
Hydrostatiske og
hydrodynamiske egenskaper
til et semilukket oppdrettsanlegg



Bendik Riis Sagstad

Masteroppgave i Havteknologi

Juni 2021

Universitetet i Bergen
Institutt for fysikk og teknologi

Sammendrag

Oppdrettsvirksomhet i Norge har i de siste årene opplevd en stor teknologisk utvikling, hvor nye design av oppdrettsanlegg foreslås som et alternativ til tradisjonelle løsninger. Drivkraften bak utviklingen er et stadig større fokus på miljø, effektivitet og fiskehelse. En alternativ løsning til de nevnte problemstillingene er lukkede merder, hvor flere ulike prototyper allerede er under testing. Denne masteroppgaven tar for seg en slik prototype, designet og utviklet av Nordic Blu Technology. Anlegget er av typen *semilukket oppdrettsanlegg*, og er kjent under navnet OceanTECH.

Målet med masteroppgaven er å kartlegge førsteordens hydrodynamiske responser en nedskalert forenklet modell av OceanTECH-anlegget har, under tre ekstreme sjøtilstander. I den forbindelse er det gjort både eksperimentelle og numeriske beregninger for hver sjøtilstand, hvor bølgeforholdene er av typen irregulære bølger. De eksperimentelle målingene er gjort i bølgetanken ved Høgskulen på Vestlandet, hvor konstruksjonens bevegelser under de ulike sjøtilstandene måles med et optisk detekteringssystem. For å kunne måle bevegelsesresponsene i alle seks frihetsgrader er det i de eksperimentelle forsøkene benyttet et forankringssystem med to ulike forankringskonfigurasjoner; en slakk og en stram forankring, for 0 og 20 grader innkommende bølgeretning. Hensikten med to ulike forankringskonfigurasjoner er å undersøke hvilke effekter ulike forankringsforspenninger har på systemets bevegelsesresponser. Den numeriske modellen er konstruert uten forankringsliner, for å undersøke om førsteordens numeriske metoder på en tilstrekkelig måte korrelerer med eksperimentelle målinger hvor forankring benyttes.

Eigenfrekvensene til det forankrede systemet er funnet ved å gjennomføre decay-tester. Videre sammenlignes egenfrekvensene med eksperimentelle og numeriske Respons Amplitude Operators (RAO), for å undersøke om frekvensene hvor responstoppe under bølgeforsøk opptrer, samsvarer med de målte egenfrekvensene. Størst likhet mellom egenfrekvenser fra decay-tester og eksperimentelle bølgeforsøk, observeres for frihetsgradene stamp og rull. Basert på resultatene fra bølgeforsøkene, er det relativt godt samsvar mellom de eksperimentelle og numeriske beregninger for frekvenser over 0,9 Hz, ved 0 grader innkommende bølgeretning. For bølgeforsøk ved 20 graders innkommende bølgeretning viser resultatene stor grad av sammenlignbarhet ved frekvenser over 1,2 Hz, med unntak av frihetsgraden rull. Gjennomgående for alle forsøk, med unntak av frihetsgraden gir, er at det beregnes større responsamplituder fra de numeriske beregningene, sammenlignet med de eksperimentelle. Basert på resultatene tyder det på at forankringen, over visse frekvenser, påvirker den naturlige bevegelsen til systemet. Dette er som forventet, mest fremtredende ved stram forankring.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet for Nordic Blu Technology, som har designet og konstruert forsøksmodellen brukt i dette prosjektet. Oppgaven er levert til masterprogramstudiet Havteknologi ved Institutt for fysikk og teknologi, ved Universitetet i Bergen. Masterprogrammet er et samarbeid mellom Universitetet i Bergen og Høgskulen på Vestlandet.

Jeg vil starte med å utnevne et stort takk til veilederne mine Gloria Stenfelt, førsteamanuensis ved HVL, og Thore Clifford Thuestad, førstelektor ved HVL, for eminent hjelp med mastoppgaven min. Selv under den svært spesielle perioden vi er i, har de tilbudt gode råd og veiledning gjennom hele masteroppgaven. Jeg vil også utnevne en stor takk til Ole Thomas Enge, ved TechnipFMC, for å ha bidratt til vinklingen av denne masteroppgaven, samt gitt relevant dokumentasjon vedrørende OceanTECH-prosjektet og forsøksmodellen.

En stor takk går også til Jan Michael Simon Bartl, førsteamanuensis ved HVL og David Roger Lande-Sudall, førsteamanuensis ved HVL, som har tatt seg tid til å gi tilbakemeldinger. Deres ekspertise og velvilje til å hjelpe meg og andre masterstudenter utover deres egne tas ikke for gitt. Jeg vil også takke veilederen min, Børge Hamre, professor ved UiB, som har gitt verdifull og konstruktiv tilbakemeldinger på arbeidet jeg har gjort.

Jeg vil og takke Harald Moen, overingeniør ved HVL, som har vært svært behjelpelig med utbedring av den eksperimentelle modellen, samt gitt gode råd i forbindelse med de eksperimentelle forsøkene.

Avslutningsvis vil jeg rette en stor takk til alle mine medstudenter, familie, venner og sist men ikke minst, kjæresten min Tonje Brekke, for uvurderlig støtte.

Liste over figurer

Figur 1: Hauge Aquas <i>Egget</i> [8]	3
Figur 2: Nekkars <i>Starfish</i> [9]	3
Figur 3: Konsept for OceanTECH - flytende semilukket oppdrettsanlegg	4
Figur 4: Eksperimentelt oppsett og numerisk simulasjon av eksperimentell modell	5
Figur 5: Simulering av bølge-struktur interaksjon for en storvolum konstruksjon [19]	15
Figur 6: Et fartøys seks frihetsgrader [20]	16
Figur 7: Relasjonen mellom bølgespekter, RAO og responsspekter, inspirert av [21]	18
Figur 8: Begrep for beregning av metasenterhøyde	19
Figur 9: Effekten av fri væskeoverflate i et lukket system [22]	20
Figur 10: Statisk stabilitetskurve [23]	21
Figur 11: Illustrasjon av forsøksmodellen [27]	24
Figur 12: Illustrasjon av bølgetanken på MarinLab ved Høgskulen på Vestlandet[28]	27
Figur 13: Resistansbasert bølgehøydemåler brukt i prosjektet [30]	28
Figur 14: Oppsett og arbeidsområde for en vilkårlig modell i Qualisys [30]	29
Figur 15: Forankringsoppsett	30
Figur 16: Testoppsett med lastceller, reflektorer og forankring	30
Figur 17: Eksperimentelt oppsett under krengeprøve	32
Figur 18: Generert bølgespekter i henhold til JS1-parametre	34
Figur 19: Generert bølgespekter i henhold til JS2-parametre	34
Figur 20: Generert bølgespekter i henhold til JS3-parametre	34
Figur 21: Numerisk modell i GeniE	38
Figur 22: Sammenligning av tre ulike mesh konfigurasjoner for hiv og stamp	39
Figur 23: Meshet strukturmodell i GeniE	40
Figur 24: Balansering av modell etter fylling av kompartenment	41
Figur 25: Prosedyre for numerisk og eksperimentell analyse	43
Figur 26: Resultat fra decay-test i jag	45
Figur 27: Resultat fra decay-test i svai	45
Figur 28: Resultat fra decay-test i hiv - kurvetilpasning 1	46
Figur 29: Resultat fra decay-test i hiv - kurvetilpasning 2	46
Figur 30: Resultat fra decay-test i rull	46
Figur 31: Resultat fra decay-test i stamp	47

Figur 32: Målte verdier og førsteordens polynom av det kregende momentet, som en funksjon av tangens til krengevinkelen	48
Figur 33: Numerisk generert \overline{GZ} -kurve for estimering av metasenterhøyden, \overline{GM}	49
Figur 34: Tyngdepunkts plassering for den numeriske modellen, beregnet i HydroD	49
Figur 35: RAO og responsspekter i jag ved 0 grader innkommende bølgeretning	51
Figur 36: RAO og responsspekter i hiv ved 0 grader innkommende bølgeretning	52
Figur 37: RAO og responsspekter i stamp ved 0 grader innkommende bølgeretning	53
Figur 38: RAO og responsspekter i svai ved 20 grader innkommende bølgeretning	55
Figur 39: RAO og responsspekter i rull ved 20 grader innkommende bølgeretning	56
Figur 40: RAO og responsspekter i gir ved 20 grader innkommende bølgeretning	57
Figur 41: RAO for jag ved 0 grader innkommende bølgeretning og stram forankring	58
Figur 42: RAO for hiv ved 0 grader innkommende bølgeretning og stram forankring	59
Figur 43: RAO for stamp ved 0 grader innkommende bølgeretning og stram forankring	59
Figur 44: RAO for gir ved 20 grader innkommende bølgeretning og stram forankring	60
Figur 45: Numerisk RAO i svai for lavfrekvent område	61
Figur 46: Numerisk RAO i jag for lavfrekvent område	62

Liste over tabeller

Tabell 1: Skaleringsmodeller for beregning av dimensjonsløse kraftforholdtall mellom modell og fullskala konstruksjon	7
Tabell 2: Froudes dimensjonsløse skaleringsfaktorer for fysiske parametre	7
Tabell 3: Nedskalerte parameterverdier av merd, prosessflåte og fortøyningsbom, med skaleringsfaktor $\lambda=40$	26
Tabell 4: Målte parametre for eksperimentelt oppsett	31
Tabell 5: Målte resultater fra krengeprøve	32
Tabell 6: Fullskala og nedskalerte bølgeparametre for lokasjonsområdet	33
Tabell 7: Testplan for eksperimentelle bølgeforsøk	36
Tabell 8: Effekten de ulike mesh konfigurasjonene har på RAO i hiv og stamp	39
Tabell 9: Meshegenskaper til struktur- og panelmodell	40
Tabell 10: Sammenfatning av resultater fra decay-testene	47
Tabell 11: Sammenfatning av resultater fra decay-test og eksperimentelle og numeriske bølgeforsøk for 0 grader innkommende bølgeretning	62

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	i
Forord	ii
Liste over figurer	iii
Liste over tabeller	iv
1 Introduksjon	1
1.1 Lukkede oppdrettsanlegg	2
1.2 Bakgrunn	3
1.3 Oppgaven og metode	4
2 Teori	6
2.1 Skalering	6
2.2 Potensial strømmingsteori	8
2.3 Grensebetingelser	9
2.4 Bølgeteori	10
2.4.1 Lineær bølgeteori	11
2.4.2 Irregulære bølger	11
2.4.3 Standardiserte bølgespektra	12
2.5 Forskrift om teknisk standard for flytende oppdrettsanlegg	13
2.6 Fastsettelse av sjøtilstander	14
2.7 Bølgelaster på storvolumskonstruksjoner	14
2.7.1 Diffraksjonsteori	14
2.8 De seks frihetsgradene	16
2.9 Respons i irregulær sjø	16
2.10 Stabilitet	19
2.10.1 Statisk stabilitet	19
2.10.2 Fri væskeoverflate	20
2.10.3 Statisk stabilitetskurve	21
2.10.4 Krengeprøve	22
2.11 Sloshing	22

3	Metode	24
3.1	Forsøksmodellen	24
3.2	Eksperimentelle metoder	26
3.2.1	Beskrivelse av hydrodynamisk testfasilitet	26
3.2.2	Bølgegenerator	27
3.2.3	Bølgehøydemåler	27
3.2.4	Optisk kamerasystem	28
3.2.5	Eksperimentelt oppsett	29
3.2.6	Krengprøve	31
3.2.7	Generering av bølgespektra	32
3.2.8	Decay-test	34
3.2.9	Generering av spektralverdier	35
3.2.10	Programmeringsverktøy	36
3.3	Eksperimentell usikkerheter og feilkilder	37
3.4	Numeriske metoder	38
3.4.1	Modelldesign og mesh	38
3.4.2	Hydrostatisk og hydrodynamisk analyse	40
3.4.3	Begrensninger og feilkilder ved numerisk analyse	42
3.5	Prosedyre for analyse	43
4	Resultat og diskusjon	44
4.1	Decay-test	44
4.1.1	Jag	44
4.1.2	Svai	45
4.1.3	Hiv	45
4.1.4	Rull	46
4.1.5	Stamp	46
4.1.6	Gir	47
4.1.7	Sammenfatning av resultater fra decay-test	47
4.2	Sammenligning av eksperimentell og numerisk metasenterhøyde	48
4.3	Hydrodynamiske egenskaper fra eksperimentelle og numeriske forsøk	49
4.3.1	RAO og responspektre ved 0 grader - Slakk forankring	50
4.3.2	RAO og responspektre for 20 grader - Slakk forankring	54

4.3.3	RAO ved stram forankring	57
4.3.4	Numerisk RAO over lave frekvenser	60
4.4	Sammenfatning av resultater	62
5	Konklusjon	63
6	Videre arbeid	65
7	Referanser	67

1 Introduksjon

Norsk havbruksnæring har siden 1990-tallet hatt en formidabel vekst. Bare i 2019 eksporterte Norge sjømat for 107,3 milliarder kroner og er med det en av de største sjømateksportørene i verden [1]. Innen 2050 er det satt som mål av fiskeri- og oppdrettsnæringen å femdoble produksjonen av sjømat, noe som anslås å koste over 500 milliarder kroner [2]. Parallelt med den økende veksten blir det i næringen nå satt et større fokus både internt og eksternt på hvordan veien til å nå målene skal forløpe seg. Havbruksnæringen har i samarbeid med regjeringen de siste årene jobbet mye med å innarbeide seg FN's bærekraftsmål, med et spesielt fokus på punktene omhandlende matsikkerhet, sunn helse, bekjemping av klimaendringer samt å bruke marine ressurser på en bærekraftig måte [3]. For oppdrettsnæringen hvor de miljømessige utfordringene er store, impliserer dette et stort behov for innovasjon og nytenking.

Fremtidens mål for norsk havbruk forutsetter at nye metoder og kunnskap tas i bruk i en ellers, historisk sett, konservativ bransje. I den forbindelse blir det derfor utdelt en betraktelig sum fra regjeringen til innovasjon, som i 2020 var 99 millioner fordelt på 16 prosjekter i de maritime havnæringene [4]. Som et resultat av forskningen ser man i dag en mye større grad muligheten til diversifisering av produksjonsformer innen oppdrett. En fremtredende løsning for flere av utviklingsprosjektene som finnes i dag er lukkede anlegg på land og i sjø. Lukkede anlegg gir mulighet til både å eliminere lakselusproblemet, samt forurensninger i form av fiskeavfall og kjemikalier, som er tilstedeværende for tradisjonell nylonbaserte notmerder. Likevel er det flere problemstillinger som knyttes opp mot lukkede anlegg og spesielt i forhold til fiskens velvære og optimal strukturell design.

1.1 Lukkede oppdrettsanlegg

Drastiske endringer i miljøet gjør at flere av de marine operasjonene som gjøres i dag er i en omstillingsfase hvor bærekraft og konservering er et mye større fokus enn før. For fiskenæringen ser man i dag et enormt potensiale til å løse de nevnte problemstillingene som forekommer av tradisjonell drift av fiskeoppdrett. Av det som har blitt forsket på til nå har lukkede anlegg steget frem som en potensiell løsning med mange lovende resultater i designfasen [5]. Lukkede oppdrettsanlegg i sjø har bunn og vegger som består av et ugjennomtrengelig materiale som stål, plast eller betong. Robustheten til konstruksjonen gjør at det er mulig å lokalisere anleggene på langt mer værutsatte områder, også utenfor fjordene. For å gi tilstrekkelig med oksygen til fisken brukes pumpe-systemer hvor vann under det såkalte lusebeltet pumpes inn. Et lukket system vil kunne føre til en eliminering av lakselusproblemet, rømming samt forhindre utslipp av kjemikalier og organisk materiale. Likevel er det naturlig nok vesentlige forskjeller i påvirkningen ulike miljølaster har på lukkede anlegg i forhold til tradisjonelt notbasert merder.

Når en lukket, stiv oppdrettsmerd beveger seg, vil også den indre væsken bevege seg. Bevegelsen av den frie væskeoverflaten er kjent som sloshing og er et svært kompleks fenomen å modellere matematisk. Manglende kunnskap om hvordan de dynamiske responsene påvirker fiskens helse og velvære, gjør at det foreløpig ikke er et lukket fiskeoppdrettsanlegg i Norge i dag som opererer i kommersiell produksjonsskala. Likevel er det mye som tilsier at dette fort kan snu; i januar 2021 varslet fiskeriministeren Odd Emil Ingebrigtsen at det vil komme en ny havbruksstrategi i nær fremtid. I planen vil det tilrettelegges for flere lukkede oppdrettsanlegg i årene som kommer. Bakgrunnen for omstillingen er at det i større grad stilles krav til dokumentasjon om bærekraft og miljø, fra ulike importører av norsk havbruk [6].

Av lukkede anlegg som eksisterer i dag, er det de på land som har kommet lengst i forhold til produksjon av fisk. Et av de mest suksessfulle, lukkede anleggene er utviklet av Atlantic Sapphire, som er lokalisert i Hvide Sande, Danmark. I følge den årlige rapporten fra 2020, har anlegget kapasitet til å produsere 2400 tonn med slaktet laks årlig. På grunn av gode årsresultat har også bedriften laget et nytt landbasert anlegg i Miami, som skal produsere 220000 tonn slaktet fisk innen 2031 [7]. Til sammenligning vil dette volumet være nok til å forsyne halve USA med laks, gjennom et helt år. Blant lukkede oppdrettsanlegg i sjø er som nevnt ingen i kommersiell drift i Norge enda, men flere prosjekter er godt på vei i utviklingsfasen. Egget og Starfish er to slike eksempler, som er presentert i henholdsvis Figur 1 og Figur 2. Eksemplene viser to ulike strukturelle løsninger, hvor Egget er et hellukket anlegg i betong,

og Starfish er et lukket anlegg hvor merden er laget i myk PVC-duk. Valg av materialet vil avhenge av hvilke miljøforhold konstruksjonen kan forvente å oppleve, og det knyttes ulike utfordringer til begge løsningene.



Figur 1: Hauge Aquas *Egget* [8]



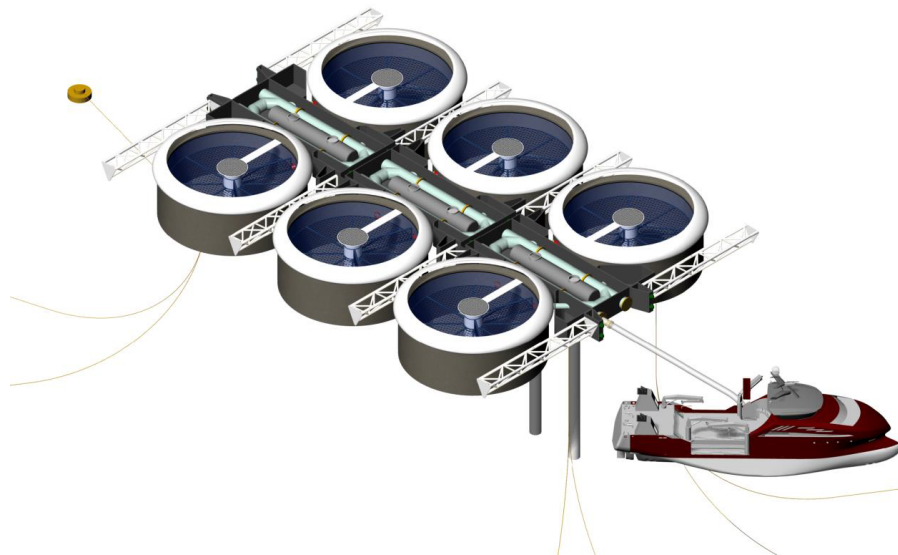
Figur 2: Nekkars *Starfish* [9]

1.2 Bakgrunn

Et av innovasjonsprosjektene som omfatter lukkede oppdrettsanlegg er utviklet av Nordic Blu Technology, og består av et semilukket anlegg med navnet OceanTECH. Hovedformålene med anlegget er blant annet å øke produksjonsnivået av fisk, hindre utslipp av avfall og rømming av fisk, samt øke den generelle fiskevelferden. Figur 3 viser en illustrasjon av anlegget som skal bestå av seks sylindriske merder i betong, hvor hver har en diameter på 24 meter og en høyde på 9 meter. Hver merd er fortøyd til to fortøyningsbommer som igjen er hengslet til en felles prosessflåte. Prosessflåten fungerer som systemets infrastruktur med ulike rørsystemer for blant annet håndtering av fisk og overlevering til slakteri. Prosessflåten er igjen forankret til havbunnen slik at konstruksjonen holder sin posisjon i sjøen, med muligheter for å slakke opp under dårlige værforhold.

En viktig betraktning i designfasen av lukkede oppdrettsmerder er å beregne hvordan konstruksjonen vil oppføre seg under ulike miljølaster. Hydrodynamiske responsanalyser er et eksempel på dette, som ett av flere viktige fagfelt som må betraktes. Analyser gjennomføres ofte i modellskala i designfasen, for å få en indikasjon på konstruksjonens viktigste responsparametre. Den dynamiske oppførselen til konstruksjonen er spesielt viktig for lukkede anlegg da det gir mulighet til å beskrive bevegelser av de indre vannmassene, som er drivende for de totale kreftene. Tidligere er det gjort en analyse av

anlegget i modellskala, hvor det er gjennomført tester for dynamisk respons i tre frihetsgrader, samt krefter mellom merd og fortøyningsbom. I neste fase er det derfor naturlig å studere responsen i de tre andre frihetsgradene for å få et helhetlig bilde av bevegelsesresponsene.



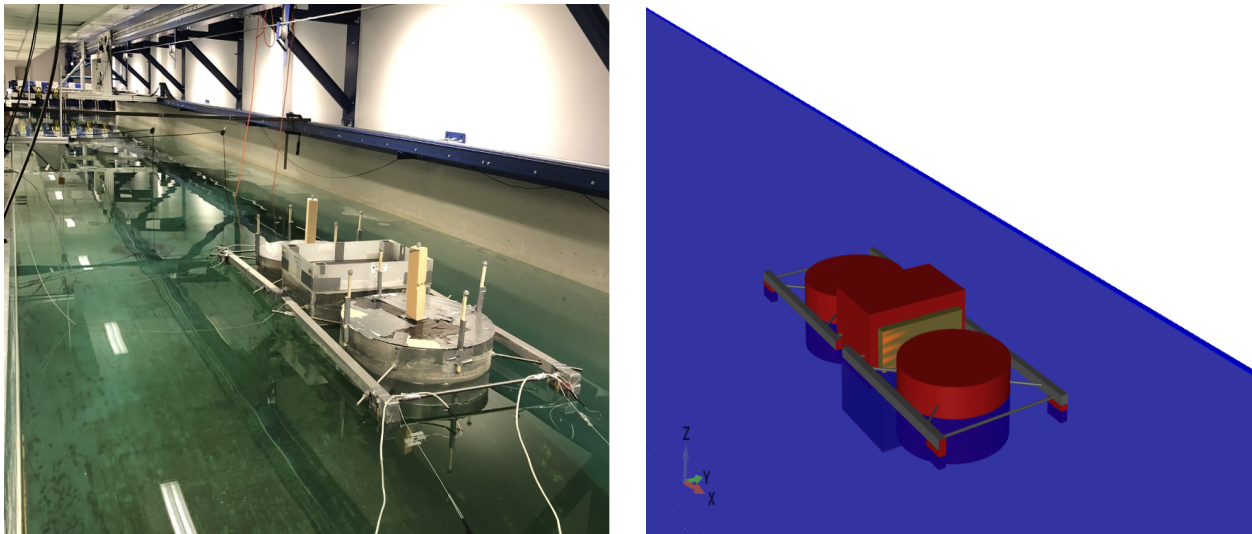
Figur 3: Konsept for OceanTECH - flytende semilukket oppdrettsanlegg

1.3 Oppgaven og metode

Hovedformålet med masteroppgaven er å kartlegge utvalgte sjøegenskaper systemet har ved ulike hydrodynamiske belastninger. Oppgaven baserer seg på en nedskalert forenklet modell av anleggets hovedkomponenter, hvor det skal gjennomføres både eksperimentelle og numeriske forsøk. De eksperimentelle forsøkene utføres i bølgetanken ved MarinLab - Høgskulen på Vestlandet sin forsøkslab for hydrostatiske og hydrodynamiske analyser. For å minimere effektene av veggrefleksjoner i bølgetanken, representerer den nedskalerte forsøksmodellen en tredjedel av det totale anlegget. De numeriske forsøkene brukes for å ytterligere validere det målte datamaterialet fra eksperimentelle forsøk. I den forbindelse brukes programpakken Sesam, som er utviklet av DNV [10]. En oversikt over det eksperimentelle oppsettet og tilhørende numerisk simulering av det eksperimentelle oppsettet er gitt i Figur 4. Hensikten med å anvende de to metodikkene er for å undersøke om den numeriske modellen har like sjøegenskaper som den eksperimentelle modellen. Dersom analysene samsvarer er det mulig å benytte den numeriske modellen til å øke kompleksiteten og omfanget av fremtidige studier.

De hydrodynamiske sjøegenskapene som studeres er førsteordens Response Amplitude Operator (RAO) og responsspektre, i alle seks frihetsgradene. RAO-er er av interesse for alle marine konstruksjoner da det sier noe om responsoppførselen en konstruksjon kan forventes å ha over ulike bølgefrequenser. For å understreke hvilke effekter en forankring har på systemets RAO, gjennomføres de eksperimentelle forsøkene med en slakk og en stram forankring, og de numeriske beregningene uten. Den slakke forankringen forventes å gi størst samsvar med de numeriske beregningene, og den stramme forankringen har til hensikt å belyse hvordan RAO-verdiene endres med mindre bevegelsesfrihet. Forankringssystemet er designet og laget av medstudent Mathias Rippe, som undersøker forankringskreftene på samme modell [11].

For å undersøke at tyngdepunktet til den eksperimentelle modellen samsvarer med den numeriske vil det gjennomføres en eksperimentell og numerisk hydrostatisk analyse. Tyngdepunktplasseringen er viktig å redgjøre, da det er forløpet for flere andre stabilitetsegenskaper, noe alle marine konstruksjoner må dokumentere før de kan brukes i operasjonell drift.



Figur 4: Eksperimentelt oppsett og numerisk simulasjon av eksperimentell modell

2 Teori

Dette kapittelet beskriver den viktigste teorien som legges til grunn for denne masteroppgaven. I første delkapittel beskrives skaleringsmetode mellom modell- og fullskalastruktur. Neste delkapitler utleder sentrale begrep i potensial strømmingsteori, da det numeriske analyseprogrammet Sesam baserer seg på denne teorien. Videre vil begreper vedrørende lineær- og irregulær bølgeteori beskrives samt hvilke hydrodynamiske egenskaper storvolumskonstruksjoner har ved bølgelaster. Avslutningsvis vil de siste delkapitlene presentere teori om statisk stabilitet for konstruksjoner med indre fri væskeoverflate, samt en beskrivelse av sloshing-effekter.

2.1 Skalering

Nedskalerte fysiske modeller er ofte anvendt i designprosessen av en marin konstruksjon, hvor modellen skal etterligne det opprinnelige fullskalerte systemet på best mulig måte. Modellover muliggjør dette hvor målinger for en modellkonstruksjon kan korreleres med tilsvarende målinger for en fullskalert modell. Dette fører til både lavere kostnader, samt forenkler eventuelle modellendringer. Den gode karakteristiske tilnærmingen modeller har sammenlignet med fullskalerte system, gjør at de også brukes til verifisering i henhold til diverse lovverk, for den gitte operasjonelle bransjen.

For å opprettholde likhet mellom fullskalerte system og modelltester er det i hovedsak tre parametre som må oppfylles [12]:

- **Geometrisk likhet:** De geometriske parametrene må være lik. Dette impliserer at det må være en konstant dimensjonsløs lengdeparameter som beskriver forholdet mellom konstruksjonene, gitt ved:

$$\lambda = L_F/L_M \tag{1}$$

hvor L_F og L_M er lengde for respektive fullskala og modellskala. Den dimensjonsløse parameteren λ er skaleringsfaktor av omgivelsene.

- **Kinematisk likhet:** Forholdet mellom hastighetene og akselerasjonene i modell- og fullskala må være proporsjonal. Dette impliserer at strømningsmønsteret rundt systemet må være lik i begge tilfeller.
- **Dynamisk likhet:** Forholdet mellom kreftene i fullskala må være tilsvarende det korresponderende forholdet i modellskala. Viskøse krefter, trykkrefter og overflatespenninger er eksempler på slike krefter.

Det finnes ingen universell skaleringsfaktor som beskriver alle skaleringsforhold mellom krefter på modell og fullskala konstruksjoner. Det er derfor nødvendig å bestemme hvilke kraftforhold som er viktigst å opprettholde for det gjeldende prosjektet. Noen av de vanligste skaleringsforholdene som beskriver de dimensjonsløse forholdstall mellom krefter for modell og fullskala er gitt i Tabell 1.

Modellov	Symbol	Kraftforhold	Dimensjonsløst tall
Froudes tall	F_n	Treghet/Tyngdekraft	$\frac{U}{\sqrt{gL}}$
Reynolds tall	R_n	Treghet/Viskositet	$\frac{UL}{\nu}$
Weber's tall	W_n	Treghet/Overflatespenning	$\frac{U}{\sqrt{\lambda/\rho L}}$
Keulegan-Carpenter tall	KC	Dragkraft/Treghet	$\frac{U_A T}{L}$

Tabell 1: Skaleringsmodeller for beregning av dimensjonsløs kraftforholdtall mellom modell og fullskala konstruksjon

hvor U er hastigheten, L er lengden, g er tyngdeakselerasjonen, ν er kinematisk viskositet, λ er overflatespenningen, ρ er væsketettheten, U_A er oscillerende hastighet og T er perioden mellom oscillasjoner.

For forsøk som betrakter indre, fri væskeoverflate, er det hensiktsmessig å anvende Froudes skaleringsmodell. Dette fordi det antas å være en dominerende effekt av tyngdekraftsgenererte bølger hvor treghetseffekter er dominerende, og andre krefter som kinematisk viskositet er små. Froudes skaleringslover gir en rekke forholdstall som gitt i Tabell 2.

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

Tabell 2: Froudes dimensjonsløse skaleringsfaktorer for fysiske parametre

2.2 Potensial strømmingsteori

Potensial strømmingsteori er en idealisert beskrivelse av væskestrøm brukt for å beskrive strømmingsmønstre rundt et objekt. Ved hjelp av fysiske antagelser kan derfor en kompleks dynamisk oppførsel beskrives uten å ta hensyn til fenomen som viskøse effekter, tetthet, temperatur og eksterne krefter som tyngdekraften. De fysiske antagelsene som ligger til grunn for beskrivelsen av potensialteori er; konservering av masse og moment, samt en inkompressibel og rotasjonsfri strømming. Tidligere forskning viser at dette er en god approksimasjon for å beskrive væskestrøm for tilfeller hvor strømmingen ikke er nær havbunnen.

For at en væske skal være rotasjonsfri må *curlen* til hastighetsfeltet alltid være lik null. Det impliserer at det mellom fluidet og et legeme ikke oppstår skjærkrefter. Følgende beskrives dette som:

$$\nabla \times \mathbf{U} = 0 \quad (2)$$

hvor \mathbf{U} er strømhastigheten og ∇ er den vektorielle nabla operatoren. For en inkompressibel væske hvor det antas at tettheten ρ er konstant gjelder:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

hvor u , v og w er partikkelhastigheten i henholdsvis x , y og z -retning. Uttrykket er kjent som kontinuitetsligningen og er et essensielt teorem for beskrivelsen av potensialstrøm.

Videre defineres det en skalar funksjon $\phi = \phi(x, y, z, t)$, kjent som potesialfunksjonen, hvor den partiellderiverte til funksjonen med hensyn på retning er lik hastigheten i de samme retningene. Fra antagelsene om rotasjonsfri strøm er det mulig å definere en slik funksjon. Dette er kjent som hastighetspotensialet, og uttrykkes på følgende måte:

$$\nabla \phi = \mathbf{U} \quad (4)$$

Fra antagelsene om rotasjonsfri og inkompressibel væske sammen med definisjonen av potensialfunksjonen er det mulig å uttrykke en funksjon som beskriver potensialstrøm i tre dimensjoner:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \nabla^2 \phi = 0 \quad (5)$$

Uttrykket $\nabla^2\phi = 0$ er kjent fra matematikken som Laplace-ligningen og er et lineært uttrykk som gjør det mulig å anvende superposisjonsprinsippet. Superposisjonsprinsippet betyr at hver enkel løsning av hastighetspotensiale i en strøm, uavhengig av hvor i væsken de forekommer, kan beskrive det resulterende hastighetspotensialet ved å summere dem sammen [13]. Dette er et svært nyttig bevis, spesielt for alle numeriske beregninger hvor den beregningsmessige datakraften kan reduseres stort.

2.3 Grensebetingelser

Grensebetingelser er begrensninger som er nødvendige for en løsning av et grenseverdiproblem. For lineær bølge teori impliserer det en løsning på en partiell differensialligning som beskriver en sinusformet bølge på overflaten. Det er definert tre grensebetingelser for å løse Laplace-ligningen som beskriver dette; grensebetingelse ved bunn, grensebetingelse ved overflaten og grensebetingelse på legemet [14].

Grensebetingelse ved bunnen

Grensebetingelsen ved bunnen beskriver hvordan ingen væske kan strømme normalt mot bunnen dersom det antas å være en endelig vanndybde. Uttrykt med hastighetspotensialet kan dette skrives som:

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)_{z=-h} = 0 \quad (6)$$

hvor h er vanndybden med en antagelse om horisontal bunn.

Grensebetingelser ved overflaten

Grensebetingelse ved overflaten forklares ved hjelp av to betingelser; dynamisk grensebetingelse og kinematisk grensebetingelse.

Den dynamiske betingelsen beskriver hvordan Bernoullis ligning også gjelder på vannoverflaten. Det impliserer at trykket p på overflaten skal være lik det atmosfæriske trykket som antas å være konstant. Ettersom det i potensialteorien er en antagelse om konservering av moment kan ligningen for en rotasjonsfri strøm skrives om ved hjelp av Eulers ligninger som en beskrivelse av ikke-stasjonær strømning.

Den kinematiske grensebetingelsen forklarer at væskepartikler på overflaten av lave bølger alltid blir liggende på overflaten. Dette kan uttrykkes ved at væskepartikkelens hastighet vinkelrett mot overflaten er lik overflatens hastighet vinkelrett mot seg selv. Karakteristikken betinger at det ikke forekommer brytende bølger, og at bølgene er små. Videre kan den kinematiske og dynamiske grensebetingelsen

lineariseres og skrives på formen:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Kinematisk grensebetingelse på legeme

Hastigheten et legeme forflytter seg i påvirkning av bølger, vil være ulik fra hastigheten til de innkommende bølgene. Den kinematiske grensebetingelsen på et legeme brukes for å beskrive dette forholdet. Grensebetingelsen uttrykker at det ikke kan være gjennomstrømming av væske gjennom legemets overflate. For væske i kontakt med legemet, betyr dette at væskehastigheten og overflatehastigheten normalt mot konstruksjonen er lik. Dersom man antar et punkt på overflaten hvor den ene hastighetskomponenten peker normalt mot legemet, kan det uttrykkes en grenseflatebetingelse på overflaten gitt ved:

$$(\mathbf{v} - \mathbf{U}) \cdot \mathbf{n} = 0 \rightarrow U_n = \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} \quad (8)$$

hvor \mathbf{v} er legemets hastighet, \mathbf{U} er væskepartikkelens hastighet, og \mathbf{n} er normalvektoren mot legemets overflate.

Fra de tre nevnte grensebetingelsene er det nå mulig å definere et uttrykk for potensialstrømmingen, ϕ , ved å løse Laplace-ligningen $\nabla^2 \phi = 0$. Etersom grensebetingelsene uttrykkes som lineariserte løsninger vil bølger som beskrives ved hjelp av hastighetspotensialet derfor være harmoniske.

2.4 Bølgeteori

Den største ytre påvirkningskraften som fører til bølger, er vind som virker på sjøoverflaten. For vindutsatte områder observeres det bølger med en spiss topp hvor avstanden mellom hver bølge er liten. I designfasen av flytende oppdrettsanlegg brukes det i norsk farvann standarder gitt av NS9415 for å bestemme graden av lokalgenerert vindsjø anlegget minst må kunne fungere i normal drift. Likevel er parametersettingen for sjøtilstander normalt vanskelig å estimere da bølger er stokastisk av natur. Det er derfor nødvendig å simplificere sjøtilstandene ved hjelp av noen fysiske approksimasjoner. De to hovedkategoriene man definerer bølger som er enten regulære eller irregulære bølger. I denne masteroppgaven antas de numeriske bølgene å være lineære, ikke brytende bølger, som opptrer i henhold til lineær bølgeteori.

2.4.1 Lineær bølgeteori

Den enkleste formen for bølgeteori er kjent som *lineær bølgeteori*. Lineær bølgeteori tar utgangspunkt i at hver enkelt bølge kan karakteriseres som en harmonisk sinusbølge og gir en god approksimasjon for mange av de fysiske bølgeparametrene. Lineære bølger forplanter seg med konstant form og har en endelig bølgehøyde, bølgeperiode og bølgelengde. Teorien baserer seg på potensial strømmingsteori med antagelser om at bølgehøyden er mye mindre enn bølgelengden og vanddyppet.

De numeriske analysene i denne masteroppgaven baserer seg på lineær bølgeteori hvor grensebetingelsene på overflaten er linearisert, som vist i Ligning (7). Fra grensebetingelsene og antagelsen om en inkompressibel og rotasjonsfri strømming kan en funksjon for hastighetspotensialet skrives på følgende måte:

$$\phi(x, z, t) = \frac{g\xi_A}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (9)$$

hvor ξ_A er bølgeamplitude, ω er vinkelfrekvens, k er bølgetallet og h er midlere vanddypp. Uttrykket for hastighetspotensialet brukes til å bestemme blant annet partikkelhastigheten, partikkelakselerasjon og dynamisk trykk i horisontal og vertikal retning.

2.4.2 Irregulære bølger

Observasjoner av sjøoverflaten gjør det naturlig å betrakte bølger sin natur som variabel og uforutsigbar. Likevel har målinger vist at sjøtilstanden kan antas å være konstant i kortere perioder, og at nødvendige statistiske parametre kan defineres med stor nøyaktighet ved målinger. Kontinuiteten impliserer at også energifordelingen kan antas å være konstant over samme periode. Det er vanlig å anta følgende om en korttidssituasjon av irregulære bølger [13]:

- Bølgeprosessen er stasjonær innenfor måleperioden (typisk 3timer) slik at middelveidien og variansen kan antas å være konstant
- Bølgehevningen er normalfordelt hvor middelveidien er null
- Bølgeprosessen kan beskrives ved hjelp av en enkel tidsserie (ergodisk prosess)

Irregulære bølger beskriver den naturlige sjøen og kan modelleres ved hjelp av å kombinere flere harmoniske bølger som alle kan ha ulik bølgehøyde og fase. En måte å modellere homogene langtoppede bølger er gitt ved [15]:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^N \xi_{Ak} \cos(\omega_k t + \epsilon_k) \quad (10)$$

hvor ϵ_k er den tilfeldige faseforskjellen fordelt mellom 0 til 2π og ξ_{Ak} er amplituden til en lineær bølgekomponent, som videre kan beskrive energimengden pr. arealenhet på følgende måte:

$$\frac{1}{2} \xi_{Ak}^2 = S(\omega_k) \Delta\omega_k \quad (11)$$

hvor $S(\omega)$ er spekteret til $\xi(t)$ og $\Delta\omega_k = \omega_k - \omega_{k-1}$ er forskjellen mellom påfølgende frekvenser. Etersom $\Delta\omega$ beskriver energien til alle komponentene innenfor et lite frekvensintervall, kan den totale energien berignes ved å summere energien av alle N harmoniske bølger. Ved å løse ut ligningen for $S(\omega)$ ser man at et bølgespektrum kan defineres som spredningsfunksjonen for kvadratet av bølgehøydene.

Som nevnt er irregulære bølger beskrevet som en varierende prosess, hvor en kan anta at sjøtilstanden er stasjonær i korte perioder. Dette impliserer at også bølgeparametrene beskrives i form av statistiske verdier. Det er vist at sannsynlighetsfordelingen av kystbølger følger Rayleigh-distribusjonen dersom målingene omfatter et ikke for stort frekvensområde [16]. Dette er av stor nytte for marine ingeniører da det gir muligheten til å beregne sannsynligheten for ulike bølgehøyder, dersom empirisk data av sjøtilstander for lokasjonsområdet er tilgjengelig. I korttids sjøtilstander defineres bølgehøydeparameteren ved å ta gjennomsnittet av de 1/3 største bølgene i løpet av måleperioden. Dette er kjent som *signifikante bølgehøyde*, $H_s = H_{1/3}$. *Pikperioden*, T_p , er en annen nødvendig statistisk parameter og beskriver bølgeperioden hvor energispekteret har sin maksimale verdi. Parametrene er nødvendig for å beskrive standardiserte bølgespektra som nærmere beskrives i påfølgende kapittel.

2.4.3 Standardiserte bølgespektra

Å definere et irregulært bølgespekter basert på måledata for lokasjonsområdet er ofte en svært tidskrevende prosess i designfasen av en marin konstruksjoner. Det er derfor utviklet flere numeriske approksimasjoner som beskriver ulike bølgespektra i henhold til ulike geografiske lokasjoner. Bølgespektra viser energien over bølgefrequensene, hvor alle de nødvendige parametrene kan beregnes ved å betrakte momentene i spekteret. Spekterets første moment, m_0 , er definert som det totale arealet under bølgeenergi-spektrumet, og inneholder informasjon om flere av de nødvendige bølgeparametrene, deriblant signifikant bølgehøyde. Fra de høyere ordens momentene, er det mulig å beregne pikperioden og spekterets breddeparametre.

To kjente standardiserte bølgespektra er Pierson-Moskowitz (PM) spekteret og JONSWAP-spekteret (Joint North Sea Wave Project) som begge er anvendt i norsk havbruk. JONSWAP-spekteret er en viderutvikling av PM-spekteret og er brukt i masteroppgaven for generering av spektre basert på irregulære bølger, både numerisk og eksperimentelt. Et JONSWAP-spekter karakteriseres ved at bølgene har en spiss topp som følge av vindgenererte bølger. JONSWAP-spekteret kan uttrykkes på følgende måte [15]:

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma^{\exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)} \quad (12)$$

hvor $S_{PM}(\omega)$ er PM-spekteret, γ er spisshetsparameteren, σ er den spektrale breddeparameteren og A_γ er normaliseringsfaktoren gitt som $1-0,2874(\ln \gamma)$. σ -parameteren er delt opp i to separate breddeparametre; en hvor $\omega \leq \omega_p$, gitt som σ_a , og en hvor $\omega > \omega_p$, gitt som σ_b . ω_p representerer frekvensen hvor spekteret har sin maksimale verdi.

2.5 Forskrift om teknisk standard for flytende oppdrettsanlegg

NS9415 er en standard med forskrifter om krav til flytende oppdrettsanlegg i Norge. Dette innebærer krav til utforming, dimensjonering, utførelse, installasjon og drift. Standarden definerer sitt formål på følgende måte: ”Hensikten med standarden er å redusere risikoen for rømming som følge av teknisk svikt og feilbruk av oppdrettsanlegg. Standarden beskriver krav til fysisk utforming av flytende oppdrettsanlegg, og hvordan fysisk utforming skal kunne dokumenteres. Dette innbefatter også beregnings- og prosjekteringsregler for slike anlegg. Standarden angir hvilke parametre som skal brukes for å angi naturtilstanden på en gitt lokalitet, samt en fremgangsmåte for klassifisering av lokaliteter. Krav til fysisk utforming omfatter krav til alle hovedkomponenter som et anlegg består av, det vil si notpose, fortøyning, flytekrage, flåte/lekter og eventuelt ekstrautstyr samt krav til funksjonalitet etter at hovedkomponentene er satt sammen til et komplett oppdrettsanlegg. Det beskrives hvordan krav til komplett anlegg samt dets hovedkomponenter skal plasseres ut fra naturtilstanden på den gitte lokaliteten. Standarden beskriver også krav til hvordan et anlegg skal drives for å oppnå akseptabel rømmingssikkerhet”[17].

Utsnittet av standarden er hentet fra er 2003-versjonen. Dette er også versjonen som er benyttet i masteroppgaven for å definere bølgelaster. Det må bemerkes at versjonen ikke inneholder forskrifter gjeldene for lukkede anlegg i betong eller annet fast materiale. Dette vil dog være å forvente i kommende versjoner.

2.6 Fastsettelse av sjøtilstander

Bølgeparametre som brukes i fremstilling av eksperimentelle sjøtilstander beregnes i oppgaven ved hjelp av standarder gitt av NS9415. I henhold til standarden skal det ved fastsettelse av bølgeparametre anvendes en av følgende tre metoder; beregning av bølger ut fra strøklengde, beregning av bølger ut fra befaring eller bruk av bølgekart. For vindutsatte områder skal den første av de tre overnevnte metodene anvendes, hvor bølgene beregnes med utgangspunkt i miljødata for nærliggende lokasjonsområder. Mer spesifikt er det strøklengden, som er den lengden med sjø vinden har til rådighet, og vindhastigheter som bestemmer bølgeparametrene. Vindhastigheten skal bestemmes ut fra områdes 50-årsvind basert på empirisk data. Dersom empiriske data ikke er tilgjengelig kan det ved prosjektering tas utgangspunkt i en 50-årsvind på 35 m/s [17]. Ligning (13) viser hvordan det kan beregnes en justert vindfart, U_A (m/s) basert på vindfarten U (m/s). Med den justerte vindfarten, samt strøklengden, F (m), er det videre mulig å beregne signifikante bølgehøyde, pikperiode og tilhørende spissheitsparameter for bølgespekteret på følgende måte:

$$U_A = 0,71 \cdot U^{1,23} \quad (13)$$

$$H_S = 5,112 \cdot 10^{-4} \cdot U_A F^{0,5} \quad (14)$$

$$T_P = 6,238 \cdot 10^{-2} \cdot (U_A F)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

$$\gamma = 44(H_S/F)^{\frac{2}{7}} \quad (16)$$

2.7 Bølgelaster på storvolumskonstruksjoner

For storvolumskonstruksjoner hvor bølgelengden er mindre enn fem ganger diameteren til legemet antas konstruksjonen å være av typen storvolumskonstruksjon. For slike konstruksjoner vil det i større grad oppstå krefter og momenter som følger av eksitasjonskreftene. For å finne koeffisientene for eksitasjonskreftene er det nødvendig å beskrive potensialteorien i tre dimensjoner. Eksitasjonskreftene for en halvt nedsenkbar sylinder beskrives ved enten Froude-Krylov teori eller diffraksjonsmetode. Ettersom det numeriske dataprogramverktøyet brukt i masteroppgaven løser dette problemet ved diffraksjonsmetoden, vil dette nærmere forklares.

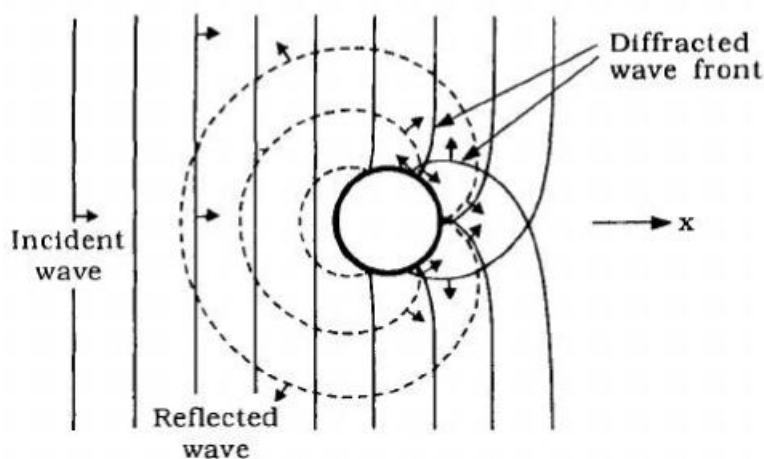
2.7.1 Diffraksjonsteori

Diffraksjonsteori brukes for å beskrive tre-dimensjonal potensialteori og hvordan konstruksjonen selv vil påvirke bølgefeltet det befinner seg i. Diffraksjonsproblemet løses ved å betrakte konstruksjonen som stasjonær hvor egenspredninger av bølger som følger av en konstant bølgekilde kvantifiseres.

Diffraksjonsbevegelsene beskrives i form av et eget hastighetspotensiale, kjent som ϕ_d . For å definere diffraksjonspotensialet må de samme tre grensebetingelsene som beskrevet i kapittel 2.3 gjelde for diffraksjonsproblemet. I tillegg til de nevnte betingelsene er det også nødvendig med en ny grensebetingelse kalt radiasjonsbetingelsen. Den beskriver hvordan potensialet til de reflekterte bølgene forsvinner etter hvert som avstanden vekk fra legemet øker [18].

Tidligere er det beskrevet hvordan hastighetspotensialet i lineær bølgeteori kan beskrives ved hjelp superposisjonsprinsippet, bestående av potensialet til alle innkommende bølger. I tre-dimensjonal potensialteori tas det høyde for diffraksjonen som følge av innkommende bølger mot et stasjonært legeme. Naturlig er det også nødvendig å uttrykke effektene et legemets oscillerende bevegelse har på det totale hastighetspotensialet. Dette er kjent som radiasjonspotensialet, og beskriver det resulterende potensialet, ϕ_r , som følger av objektets oscillerende bevegelse i alle seks frihetsgrader, ϕ_j . En illustrasjon av interaksjonen mellom bølge og sylindrisk storvolumskonstruksjon er gitt i Figur 5. Det totale hastighetspotensialet til legemet kan beskrives som summen av potensialene fra radiasjon- og diffraksjonspotensialet, samt potensialet til det uforstyrrede, innkommende bølgefeltet, ϕ_0 [12]:

$$\phi = \sum_{j=1}^6 \phi_j + \phi_0 + \phi_d \quad (17)$$



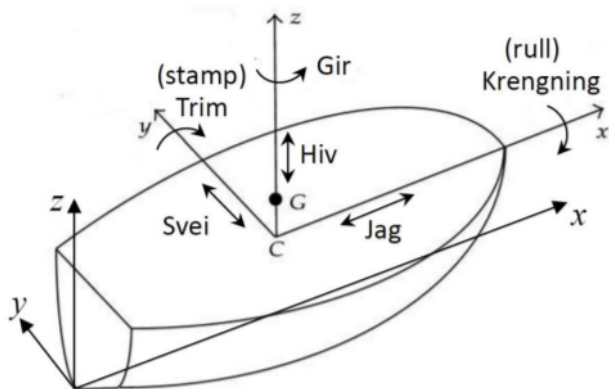
Figur 5: Simulering av bølge-struktur interaksjon for en storvolum konstruksjon [19]

For å finne potensialkoeffisientene er det mulig å anvende Green's teorem for frie overflater. Teoremet transformerer et stort volumintegral til et mindre kompleks overflateintegral hvor potensialfunksjonen kan løses ved å beregne kildestyrkene som følger av konstruksjonens bevegelse i havoverflaten.

Integralet tar hensyn til bevegelsene i alle seks frihetsgrader og løses over den våte overflaten, S . Det numeriske programmet brukt i denne masteroppgaven anvender Green's teorem for beregninger av potensialkoeffisientene.

2.8 De seks frihetsgradene

En fritt flytende, stiv konstruksjon har totalt seks frihetsgrader den kan bevege seg i. Frihetsgradene beskriver antall forskyvningsparametre som er til rådighet, hvor det er tre translasjoner og tre rotasjoner langs x - y - og z -aksen. Som illustrert i Figur 6 navngis de tre translasjonene som jag, svai og hiv langs henholdsvis x - y - og z -aksene. Tilsvarende kalles de tre rotasjonene om hver av aksene for rull, trim og gir. Bevegelsene måles om et stasjonært punkt på konstruksjonen som observeres, og betraktes ofte ut fra konstruksjonens initialtyngdepunkt, G , som illustrert i figuren.



Figur 6: Et fartøys seks frihetsgrader [20]

2.9 Respons i irregulær sjø

Når effekten irregulære bølger mot en konstruksjon måles, er det mulig å kvantifisere den mest sannsynlige oppførselen til konstruksjonen ved å foreta en spektralanalyse. I delkapittelet om irregulære bølger ble det i Ligning (11) innført et begrep som beskriver hvordan et bølgespekter kan defineres som spredningsfunksjonen for kvadratet av bølgeamplitudene. Videre kan det på samme måte defineres et responspekter for hver frihetsgrad, som beskriver bevegelsesresponsen en konstruksjon har for et definert bølgespekter. Som en analog til Ligning (11) kan responspekteret for hivbevegelsen, $z_a(\omega, t)$,

defineres som:

$$\begin{aligned}
 S_z(\omega) \cdot d\omega &= \frac{1}{2} z_a^2(\omega) \\
 &= \left| \frac{z_a}{\xi_a}(\omega) \right|^2 \frac{1}{2} \xi_a^2(\omega) \\
 &= \left| \frac{z_a}{\xi_a}(\omega) \right|^2 S(\omega) \cdot d\omega
 \end{aligned} \tag{18}$$

hvor z_a er amplituden av hivresponsen ved frekvensen ω og $\left| \frac{z_a}{\xi_a}(\omega) \right|$ er absoluttverdien av overføringsfunksjonen, kjent som Response Amplitude Operator (RAO) [12]. En RAO kan genereres for hver frihetsgrad, og er unik for hver innkommende bølgeretning. Antagelsen som legges til grunn for RAO-verdiene er et lineært forhold mellom størrelsen på bølgen og tilhørende respons. Dette fører til at RAO-verdiene kan superponeres for hver harmoniske bølgekomponent og generere ett RAO-spekter som en funksjon av bølgefrequensene.

RAO-spekteret er av stor interesse for ingeniører som studerer marine operasjoner, da det gir muligheten til å kartlegge hvilke bølgefrequenser som gir størst strukturreponser. Den største strukturreponsen finner man oftest over det som kalles systemets egenfrekvens. Egenfrekvens er egenskapen et system eller del av systemet har til å svinge når den har fått en svingbevegelse og så overlates til seg selv. Egenfrekvensen kan beregnes ved å gjennomføre en decay-test, hvor svingningsamplitudene og dempningsraten til et system måles som en funksjon av tid. Egenfrekvensen representerer tiden mellom to påfølgende svingningsamplituder, og for tilnærmede lineært dempet system, kan dempningsraten beregnes ut fra det logaritmiske dekrementet ved:

$$\zeta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x(t)}{x(t+nT)} \right) \tag{19}$$

hvor x_t representerer amplituden ved tiden t , og $x(t+nT)$ er amplituden ved n hele svinginger unna. Dempningsraten, δ , kalkuleres ut fra det logaritmiske dekrementet på måten gitt i Ligning (20):

$$\delta = \frac{\zeta}{2\pi} \tag{20}$$

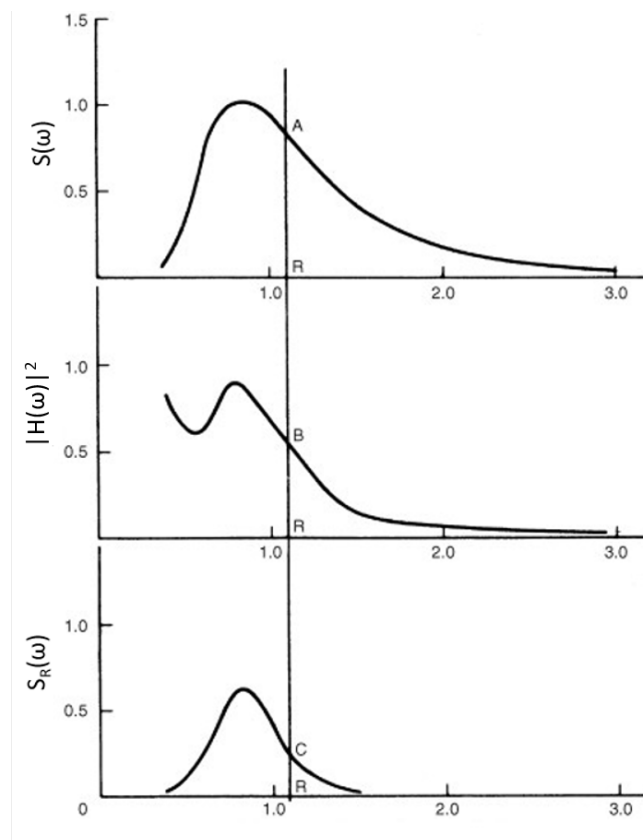
I designfasen av et anlegg bør RAO-verdiene evalueres i forhold til egenfrekvensene beregnet fra decay tester, samt miljødata fra lokasjonen konstruksjonen skal befinne seg i. Dersom bølgefrequensene som kan forventes i lokasjonsområdet sammenfaller med egenfrekvensene til systemet, vil det kunne føre til store resonansbevegelser. Om utslagene viser seg å være over toleranseverdiene beregnet, må det

vurderes å gjøre endringer på strukturen. Bevegelsesresponsene gir grunnlaget for andre beregninger som blant annet utmatting og sloshing. Et helhetlig bilde oppnås ved kartlegging av responsene i alle seks frihetsgrader.

Ligning (18) viser hvordan responsspekteret kan finnes ved å multiplisere bølgespekteret med kvadratet av overføringsfunksjonen til hivbevegelsen. På samme måte som for bølgespekteret, finnes informasjon om alle responstilstandene i momentene til spekteret. Fra dette kan det etableres et uttrykk for RAO-verdien, og følgelig responsspekteret for hvilken som helst frihetsgrad ved:

$$S_R(\omega) = S(\omega) \cdot |H(\omega)|^2 \quad (21)$$

hvor $S_R(\omega)$ er responsspekteret, $S(\omega)$ er bølgespekteret og $|H(\omega)|^2$ er kvadratet av RAO-funksjonen. En tilhørende illustrasjon av sammenhengen mellom bølgespekter, RAO og responsspekter er gitt i Figur 7. Her bemerkes det at figuren illustrerer hvordan responsbevegelsen for et skip i hiv når et toppunkt over de samme frekvensene som for bølgespekteret. For konstruksjoner hvor hivinduserte bevegelser er en stor negativ faktor ville en slik karakteristik være urovekkende, da resonans kan forekomme.



Figur 7: Relasjonen mellom bølgespekter, RAO og responsspekter, inspirert av [21]

2.10 Stabilitet

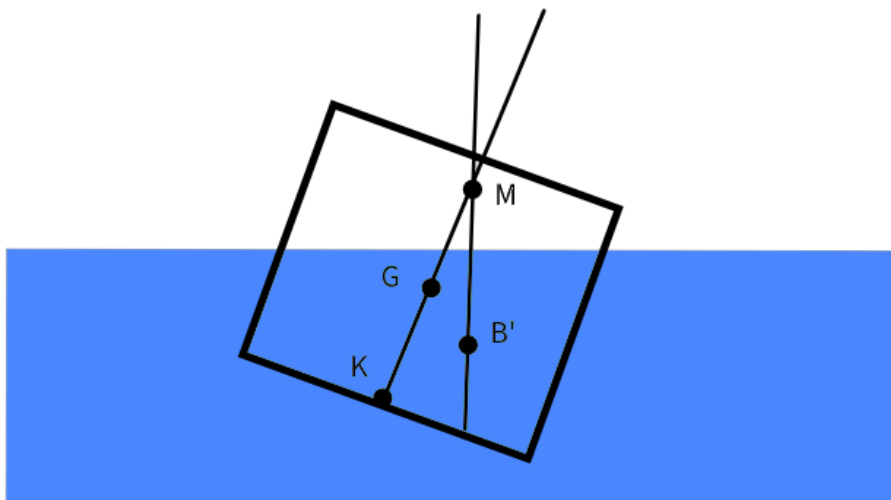
For flytende konstruksjoner i sjø vil eksterne og interne krefter føre til en endring i konstruksjonens likevektsstilling. Evnen konstruksjonen har til å motarbeide tyngdeoverføringene er kjent som statisk stabilitet og defineres av de opprettende egenskapene som er unik for hver enkelt konstruksjon. De viktigste parametrene som avgjør konstruksjonens stabilitet er geometrisk form, dypgang og last. Følgende vil egenskapene som beskriver statisk stabilitet for flytende innretninger beskrives, samt hvordan eksperimentelle forsøk gjennomføres for beregning av statisk stabilitet.

2.10.1 Statisk stabilitet

Den statiske stabiliteten for en lukket merd finnes på samme måte som for skip og andre marine konstruksjoner; initialstabiliteten må beregnes gitt ved avstanden fra tyngdepunktet til metasenter, \overline{GM} , også kalt metasenterhøyden. Metasenteret, M, er definert som skjæringspunktet mellom senterlinjen ved 0° krengeing og den nye oppdriftslinjen som følger av en krengevinkel. Figur 8 viser hvordan metasenterhøyden kan finnes ved formelen:

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (22)$$

hvor \overline{KB} er oppdriftssenters vertikale avstand fra punkt i kjølen, \overline{BM} er avstand fra oppdriftssenteret til metasenteret og \overline{KG} er den vertikale avstanden fra punkt i kjølen til konstruksjonens tyngdepunkt. Metasenterhøyden er av interesse da det er et direkte mål på stabiliteten til konstruksjonen. Dersom $\overline{GM} > 0$, hvor metasenteret er over tyngdepunktet, betegnes konstruksjonen som statisk stabil.



Figur 8: Begrep for beregning av metasenterhøyde

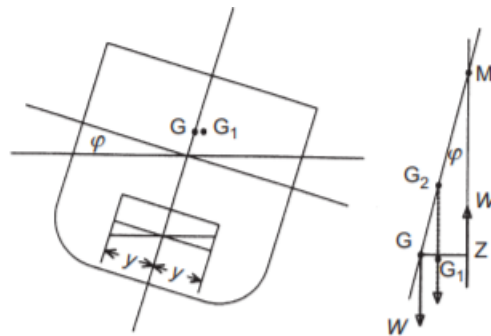
2.10.2 Fri væskeoverflate

I Ligning (22) er det presentert en generell beregning av metasenterhøyden, uten at noen form for ballastering eller fri væskeoverflate er til stede. For en konstruksjon med fri væskeoverflate, vil en krengeing føre til at det indre fluidet forsterker det kregende momentet. Dette tas høyde for i Figur 9, som illustrer hvordan tyngdepunktet forskyver seg horisontalt fra G til G_1 grunnet forflytningen av væskevolumet. Fra det nye tyngdepunktet trekkes det en linje, normalt på angrepslinjen fra metasenteret. Krysningen av linjene definerer punktet Z , hvor lengden $\overline{G_1Z}$ er den opprettende momentarmen. Etersom plasseringen av en kraft langs sin egen angrepslinje er likegyldig, kan det fra punktet G_1 defineres et virtuelt tyngdepunkt, markert som G_2 i figuren. Den virtuelle hevingen av tyngdepunktet fører til en destabiliserende effekt, sett ved at \overline{GM} reduseres. Påvirkningen væskeforflytningen har for den metasentriske høyden beskrives ved følgende formel for en konstruksjon med flere kompartement:

$$\overline{GG_2} = \frac{\sum(\rho' i)}{\rho \nabla} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi\right) \quad (23)$$

hvor ρ' er tettheten til fluidet i kompartementet, ρ er tettheten til vannet utenfor konstruksjonen, i er det annet arealmoment til vannarealet i kompartementet og ∇ er totalt volumdeplasement. For små krengevinkler, opp til ca 5° grader, blir $\frac{1}{2} \tan^2$ så liten at dette leddet kan strykes. Utledningen av metasenterhøyden hvor effekt av fri væskeoverflate er tatt med er gitt på følgende måte:

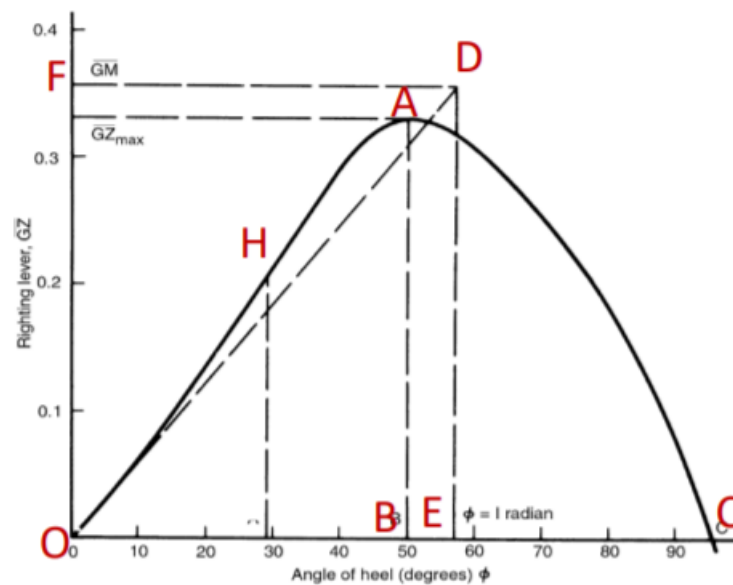
$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} - \overline{GG_2} \quad (24)$$



Figur 9: Effekten av fri væskeoverflate i et lukket system [22]

2.10.3 Statisk stabilitetskurve

Ved store krengevinkler ($>10^\circ$) kan det ikke lengre antas en konstant endring i neddykket volum og vannlinjeareal. Det finnes derfor ikke lengre et punkt hvor oppdriften alltid virker gjennom. Fra Figur 9 ble det beskrevet hvordan avstanden \overline{GZ} beskriver den opprettende momentarmen til konstruksjonen. Verdien av \overline{GZ} avgjør størrelsen på stabilitetsmomentet og er gitt som en funksjon av krengevinkelen. Ved å plote en \overline{GZ} -kurve får man informasjon om konstruksjonens stabilitet. Et eksempel på en \overline{GZ} -kurve for et skip er gitt i Figur 10. Punktet A i figuren representerer kurvens maksverdi, hvor de opprettende kreftene er størst og følgelig representerer AB den maksimale momentarmen. Fra dette punktet vil \overline{GZ} -verdien avta til det går mot null i punkt C, ved en viss vinkel ϕ . Ved denne vinkelen vil konstruksjonen kantre. Området mellom O og C representerer det totale stabilitetsområdet. Det vil si, området hvor konstruksjonen vil gå tilbake til sin opprinnelige tilstand, etter kilden for det kregende momentet er fjernet. Punktet H representerer punktet hvor kurvaturen på kurven endres. Dette som et resultat av at dekkskanten til konstruksjonen havner under vann ved denne vinkelen. Som figuren illustrerer, er også \overline{GM} -verdien relatert til \overline{GZ} -kurven. Den finnes ved å tegne en tangent til kurven fra punktet O til det når krysningspunktet med den vertikale linjen fra punktet E, hvor $\phi=1$ radian. Verdien av \overline{GM} finnes ved å trekke en horisontal linje fra krysningspunktet D, representert som punkt F i figuren.



Figur 10: Statisk stabilitetskurve [23]

I norsk farvann settes det stabilitetskrav til de aller fleste marine konstruksjoner. I forskriftene er det spesifikke minimumkrav til både \overline{GM} verdi og \overline{GZ} kurvens forløp [24]. Det finnes flere ulike lovverk som beskriver de grunnleggende kravene et skip må oppfylle, og de fleste baserer seg på regelverk fra 2008. Et eksempel på et internasjonalt, anerkjent lovverk for sikkerhet og miljø er IMO (International Maritime Organisation). Fra dette overordnede regelverket kan det også stilles nasjonale lover og forskrifter. Et eksempel på dette er forskrifter gitt i Lovdata [25]. Etersom lukkede oppdrettsanlegg i sjø ikke har vært aktuelt før de siste årene, baserer standardene seg i hovedsak på skip. Dette kan likevel forventes å endre seg i de kommende årene. Stabilitetsegenskaper for et lukket oppdrettsanlegg vil ha stor påvirkning på fiskehelse da vertikal tyngdepunktplassering og de opprettende egenskapene påvirker den dynamiske væskeforflytningen i tankene.

2.10.4 Krengeprøve

Det kreves at det for en hver flytende innretning i Norge, gjennomføres en krengeprøve [25]. Målet med en krengeprøve er å kartlegge konstruksjonens \overline{GM} -verdi ved de aktuelle lastkondisjonene, slik at maksimal lasteevne og posisjonen til tyngdepunktet senere kan beregnes. Den praktiske gjennomføringen av en krengeprøve baserer seg på å forskyve kjente masser, tverrskips på konstruksjonen, og måle krengeingen som følger av vektforskyvningene. Etersom det er det lineære området som er av interesse i en krengeprøve, bør det ikke være en større krengevinkel enn 5° . Ved å beregne krengemomentet og tilhørende tangens til krengevinkel kan konstruksjonens \overline{GM} -verdi for de gitte krengeingene defineres på følgende måte:

$$\overline{GM} = \frac{M_k}{\Delta \tan \phi} = \frac{a}{\Delta} \quad (25)$$

hvor M_k er krengemomentet. Δ er totale vekten til konstruksjonen, inkludert ballast og hvor a er stigningstallet tilnærmet ved flere målepunkt $\frac{\partial M_{ki}}{\partial \tan \phi_i}$, $i = 1 \dots n$. Antall målepunkt bør være minimum 3, men flere øker nøyaktigheten av målingen. Repetisjoner av forsøket anbefales også.

2.11 Sloshing

Beregninger av den dynamiske oppførselen til indre vannmasser er svært viktig i designfasen av lukkede oppdrettsanlegg. Ikke bare er det en stor bidragsyter til de totale kreftene som virker i systemet, men det påvirker også fiskens helse via det som er kjent som sloshing. Sloshing-fenomenet, eller skvulping, skjer for en hver konstruksjon i bevegelse som inneholder en form for fri væskeoverflate. Sloshing i et lukket oppdrettsanlegg fører til et varierende dynamisk trykk og akselerasjon av vannmassen, som

påvirker sirkulasjonen av oksygen i vann i systemet. Effektene er spesielt fremtredende dersom fluidet beveger seg med en av frekvens nær en av sine egenfrekvenser. Egenfrekvensene vil variere avhengig av geometrisk form og mengde av fluid i tanken. Egenmode beskriver de ulike bevegelsene de indre vannmassene kan ha, hvor hver egenmode har en tilhørende egenfrekvens. Effektene av fluidets ulike bevegelser er en svært komplisert prosess å modellere nøyaktig, men empiriske data har vist at det kan gjøres gode tilnærminger numerisk ved bruk av matematiske approksimasjoner.

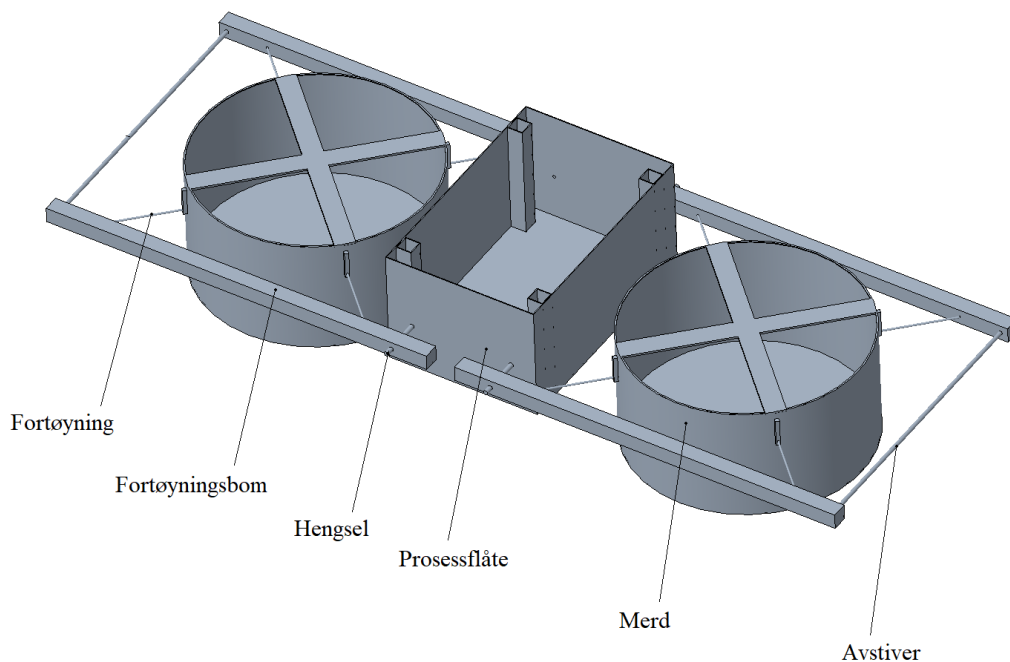
Én metode for å gjøre dynamisk analyse av indre væskebevegelser, er ved bruk av førsteordens potensialteori. Det vil si at løsningen oppfyller Laplace-ligningen hvor potensialet av den frie væskeoverflaten i hvert kompartement kan superponeres og beskrives som et resulterende potensial. Sloshing-effektene vil opptre på ulike måter avhengig av bevegelsen på konstruksjonen og kan observeres ved en plutselig økning i RAO-verdier over frekvenser nært egenfrekvensen til sloshingen. Et eksempel på et slikt studie er rapporten *Sjøflo* som undersøkte egenfrekvensene for sloshing i en stiv merd [26]. I rapporten ble det fremlagt at de mest påvirkende egenmodene for sloshing-effekter er ved bølgeperioder på 0,96 Hz og 1,32 Hz. I studiet ble det gjort hydrodynamiske responsanalyser i frihetsgradene hiv, jag og stamp, hvor sloshing-effektene viste seg å være mest fremtredende i jag og stamp. I denne masteroppgaven gjøres det ikke et eget studie på egenfrekvensene til de ulike egenmodene til sloshing, men effektene forventes å være fremtredende i både numerisk og eksperimentell data.

3 Metode

Dette kapittelet presenterer fremgangsmåtene for numerisk og eksperimentell metodikk som brukes i forbindelse med masteroppgaven. Det første delkapitlet beskriver forsøksmodellen samt de fysiske betingelsene som betraktes ved eksperimentell testing. Innledende følger en beskrivelse av de eksperimentelle metodene, hvor testfasilitet og måleinstrumenter som er brukt i oppgaven inngår. Avslutningsvis i kapittelet forklares de numeriske metodene, hvor programvare, metode for modellering og valg av mesh utledes. Her vil også de valgte numeriske parametrene som har til hensikt å speile de eksperimentelle miljøfaktorene beskrives.

3.1 Forsøksmodellen

Forsøksmodellen som brukes i oppgaven er laget av Nordic Blu Technology som en forenklet nedskalert modell av OceanTECH-anlegget. En illustrasjon av forsøksmodellen er gitt i Figur 11. Ettersom modellens hovedkomponenter som merdene, prosessflåte og fortøyningsbommene har en geometrisk likhet sammenlignet med den fullskalerte konstruksjonen, antas den å være en god tilnærming til det fullskalerte anlegget. Det antas videre at de øvrige komponentene på anlegget ikke påvirker den hydrodynamiske responsen i stor grad. I oppgaven er det ønskelig å studere det totale systemets hydrodynamiske responskarakteristikk og det er derfor ikke gjort enkeltforsøk for å kartlegge responsen for hver delkomponent.



Figur 11: Illustrasjon av forsøksmodellen [27]

Forenklinger som gjøres i forbindelse med denne masteroppgaven har ulike årsaker. Det er i alle tilfeller viktig at forenklingene ikke påvirker den geometriske, kinematiske og dynamiske likheten mellom modell og fullskala konstruksjon. Følgelig gjøres det rede for påvirkende faktorer som tas hensyn til i utformingen av forsøksmodellen.

- Empirisk data viser at det bør være minst en halv meter klaring på begge sider av bølgetanken, dersom bølgerespons skal undersøkes. Dette fordi veggrefleksjoners påvirkning øker ved små avstander til konstruksjoner. Det impliserer at modellen maks kan være 2 meter i bredderetning. Dersom konstruksjonen skal roteres må det også tas høyde for at avstanden til veggene blir kortere.
- Bølgegeneratoren har vansker for å generere nøyaktige bølgespektra for bølger som er mindre enn 0,15 m. Det er derfor ikke gjort analyse av hele oppdrettsanlegget, da nedskaleringsfaktoren blir såpass stor at det vil forekomme større usikkerhet tilknyttet nøyaktigheten av energifordelingen i bølgespektre. På bakgrunn av dette er forsøksmodellen laget som en tredjedel av det totale anlegget, bestående av to merder, en prosessflåte og fortøyningsbommer.
- For å minimere effektene av koblet bevegelseeffekter er det gjort en modifikasjon på den opprinnelige modellen; det er boret 10 mm hull gjennom merdene hvor forlengede gjengestenger er fastmontert mellom fortøyningsbommene og skroget på merdene. Dette fører til at konstruksjonen i større grad stives av. Bakgrunn for modifikasjonen kommer fra at innledende målinger viser større avvik numerisk og eksperimentelt når fortøyningen av merdene bestod av fjærer.
- For å spare tid er det laget en forenklet modell av det komplette oppdrettsanlegget. Dette fører til at det er lettere å gjøre modifikasjoner på anlegget underveis i masteroppgaven, som eksempelvis beskrevet i det ovennevnte punktet.
- Den nedskalerte modellen er laget i aluminium og ikke betong som det tiltenkte fullskalerte anlegget. Dette er gjort av partiske grunner, da betong i større grad er utsatt for støtskader.

På bakgrunn av de to første ovennevnte begrensningen er det totale anlegget skalert ned med en faktor på $\lambda=40$, hvor Froudes skaleringslov brukes for å kalkulere nedskalerte verdier. Valget av nedskaleringsfaktor er bestemt slik at modellen har tilstrekkelig med klaring på begge sider av bølgetanken, selv når modellen er rotert 20 grader i forhold til innkommende bølgeretning. En oversikt over forsøksmodellens dimensjoner er videre gitt i Tabell 3.

	Merd	Prosessflåte	Fortøyningsbom
Lengde [mm]	-	600,0	1015
Diameter [mm]	598,0	-	-
Høyde [mm]	301,0	305,0	40,0
Bredde [mm]	-	400,0	40,0
Tykkelse [mm]	2,0	4,7	2,5
Vekt [kg]	7,2	8,3	1,64

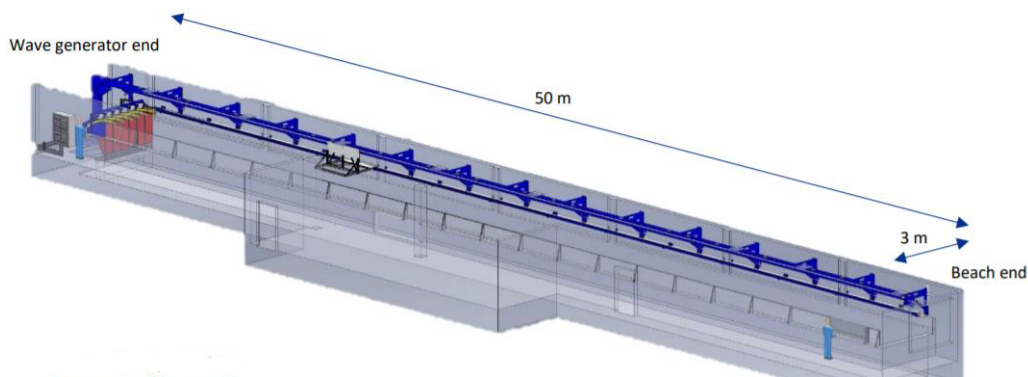
Tabell 3: Nedskalerte parameterverdier av merd, prosessflåte og fortøyningsbom, med skaleringsfaktor $\lambda=40$

3.2 Eksperimentelle metoder

De eksperimentelle forsøkene som gjøres i forbindelse med masteroppgaven utføres på MarinLab ved Høgskulen på Vestlandet. MarinLab fasiliterer blant annet en bølgetank, en bølgegenerator, en rigg for væskestrømsimulering, et kamerasystem for sanntidsproving og diverse måleinstrumenter. Programmer for håndtering av data fra måleinstrumentene er på designerte datamaskiner hvor opplæring er gitt på stedet av labingeniører. Videre vil en beskrivesle av de eksperimentelle måleinstrumentene utledes samt hvilke feilkilder som kan påvirke de målte dataene.

3.2.1 Beskrivelse av hydrodynamisk testfasilitet

MarinLab er et forskningsanlegg hvor strøm- og bølgetester utføres i en skipsmodelltank. En illustrasjon av tankens utforming er gitt i Figur 12. Tanken har en dybde på 2,2 meter, bredde på 3 meter og en lengde på 50 meter. Den er utstyrt med bølgegenererende klaffer, en slepevogn og en porøs, passiv strand i enden med hensikt å minske bølger reflekterende interferens [28]. Stranden har en eksponentiell profil slik at brytende bølger absorberes med minst mulig refleksjon. Bølgegeneratoren kan generere bølger på opp til 0,5 meter og bølgeperioder på ca 2 sekunder. For eksperimentelle strømforsøk er det, for en modell som er 2 meter lang, anbefalt å ikke være bredere enn 0,5 meter. Dette for å unngå store refleksjonseffekter fra tankveggene. Påvirkningen er i størst grad synlig dersom de reflekterende bølgene fra tankveggen kommer i fase med de innkommende bølgene hvor bølgefrequensene nærmer seg ett eller flere av systemets egenfrekvenser.



Figur 12: Illustrasjon av bølgetanken på MarinLab ved Høgskulen på Vestlandet[28]

3.2.2 Bølgegenerator

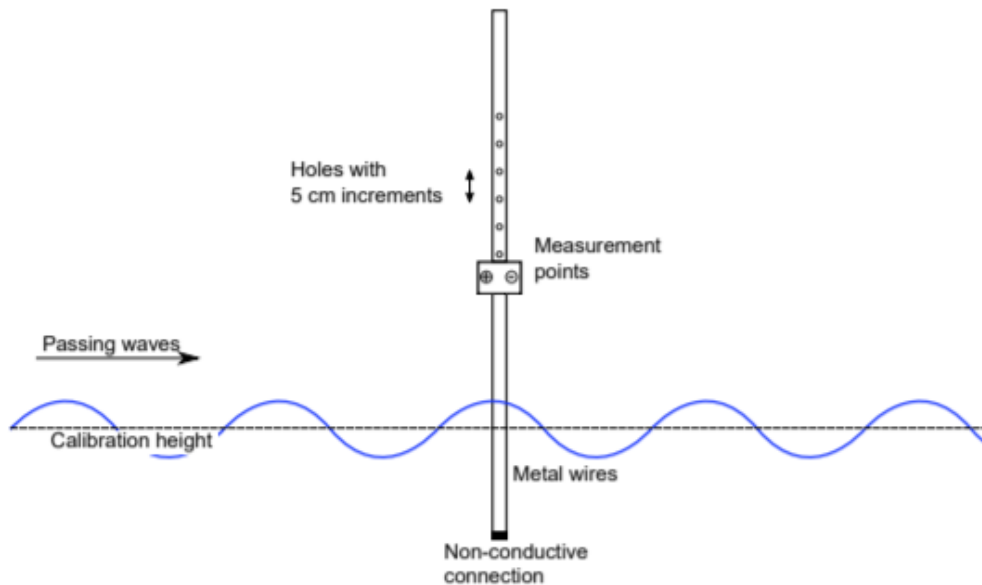
I tanken er det mulig å definere både regulære og irregulære bølger ved hjelp av Edinburgh Designs egne programvarer for bølgegenerering [29]. Wave Synthesiser er en av programvarene, hvor brukeren definerer parametre for hvilke bølger som skal inngå i forsøkene. Kommandoene lagres som en XML-fil og importeres til en annen programvare, kalt Wave Runtime. Wave Runtime er brukergrensesnittet for kjøring av bølger og er brukt som datainnsamlingsprogramvare for bølgehøydemålere.

For generering av bølgespektrere gir Wave Synthesiser en oversikt over bølgekarakteristikken over en valgt måleperiode, dersom de nødvendige statistiske parametrene er definert. Den målte dataen vises i form av et energispekter som sammenlignes med det teoretiske energispekteret. Dersom store avvik er til stede er det mulig å definere en forsterkningskorreksjonsfunksjon som endrer inputen til bølgegeneratoren. Korreksjonen gjøres helt til den teoretiske og målte spekteret samsvarer i størst mulig grad.

3.2.3 Bølgehøydemåler

For å redgjøre at det teoretiske inputspekteret samsvarer med det som genereres i bølgetanken, brukes det bølgehøydemålere for å registrere bølgehøyde og periode. En illustrasjon av bølgehøydemåleren som brukes i masteroppgaven er gitt i Figur 13. Bølgehøydemåleren fungerer ved at den målte motstanden mellom de to nedsenkede metallstengene er proporsjonal med målt motstand. Den graderte stangen som bølgehøydemåleren er festet til brukes for å kalibrere bølgehøydemåleren. Posisjonen til bølgehøydemåleren i forhold til bølgeklaffene presiseres i Wave Synthesiser programvaren. Programvaren sender da videre beskjed til bølgegeneratoren at bølgene skal være fullt utviklet til de er ved bølgehøydemåleren. Plasseringen på bølgehøydemåleren bør være slik at det er tilstrekkelig avstand til modeller som påvirker det innkommende bølgefeltet i stor grad. Det er og hensiktsmessig å plassere

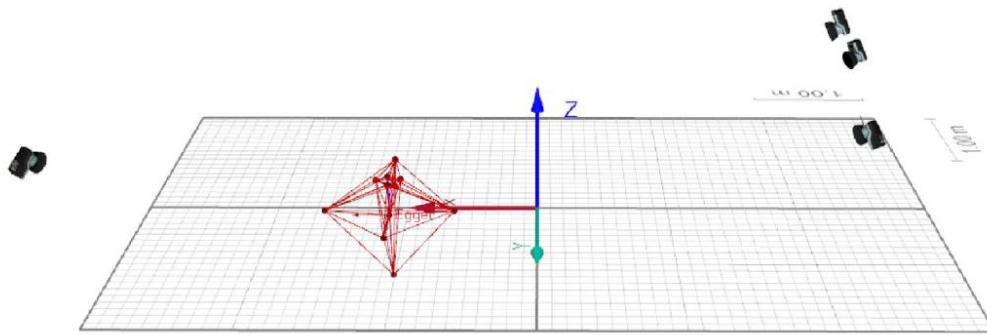
de ut fra sidene i bølgetanken for å minimere refleksjonseffekter. Samplingfrekvensen for bølgehøydemålerne er satt til 128 Hz for de eksperimentelle forsøkene.



Figur 13: Resistansbasert bølgehøydemåler brukt i prosjektet [30]

3.2.4 Optisk kamerasystem

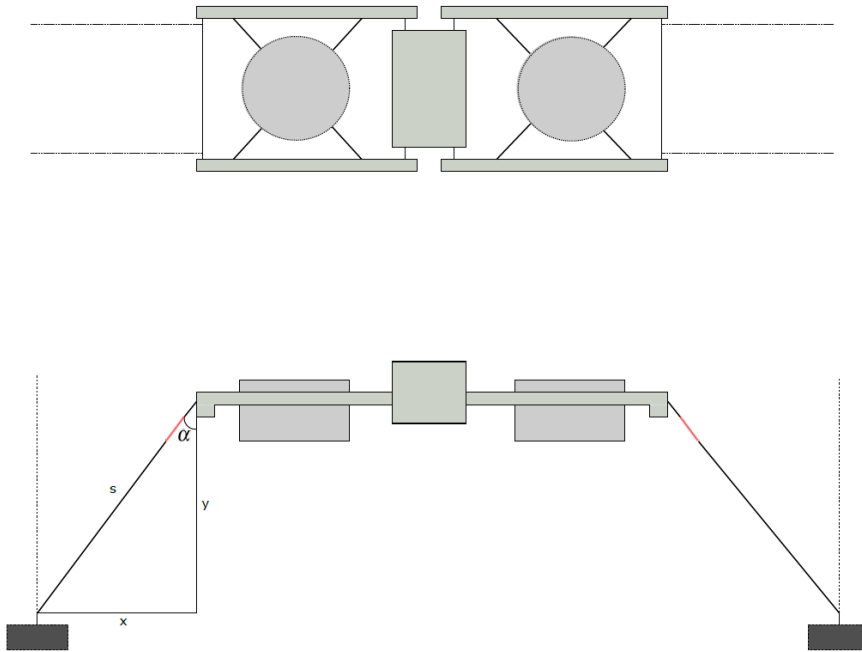
Qualisys Track Manager (QTM) er et kamerasystem som bruker optisk detekteringsteknologi for å registrer posisjon og bevegelse til tre-dimensjonale objekt i sanntid [31]. For å registrere et objekt fastmonteres reflektorer over og rundt testobjektet. Programvaren kalkulerer så posisjonen til hver reflektor relativt til et globalt koordinatsystem, ved hjelp av fire fastmonterte Qualisys Oqus 500 kamera. Når alle reflektorene er montert, kan testobjektets kropp genereres ved at programvaren trekker linjer mellom alle punktene hvor reflektorene er plassert. Figur 14 illustrerer oppsett og arbeidsområde i programvaren for en vilkårlig modell, med x-asken pekende mot innkommende bølgetretning. Når kroppen er definert, kan bevegelsen i alle seks frihetsgrader kvantifiseres i påvirkning av innkommende bølger. Dette blir i QTM-programvaren fremstilt visuelt i sanntid, og registrert i egne tsv-utgangsfiler. Utgangsfilerne inneholder innsamlet data om relativbevegelsen og residualen for hver måling. Kamerasystemet brukes i oppgaven for å måle bevegelsesresponsene til modellen, samt beregning av egenfrekvenser ved decay-tester. Dette beskrives nærmere i Kapittel 3.2.8 og 3.2.9. Samplingfrekvensen for Qualisys Track Manager er satt til 100 Hz for alle forsøkene i denne masteroppgaven.



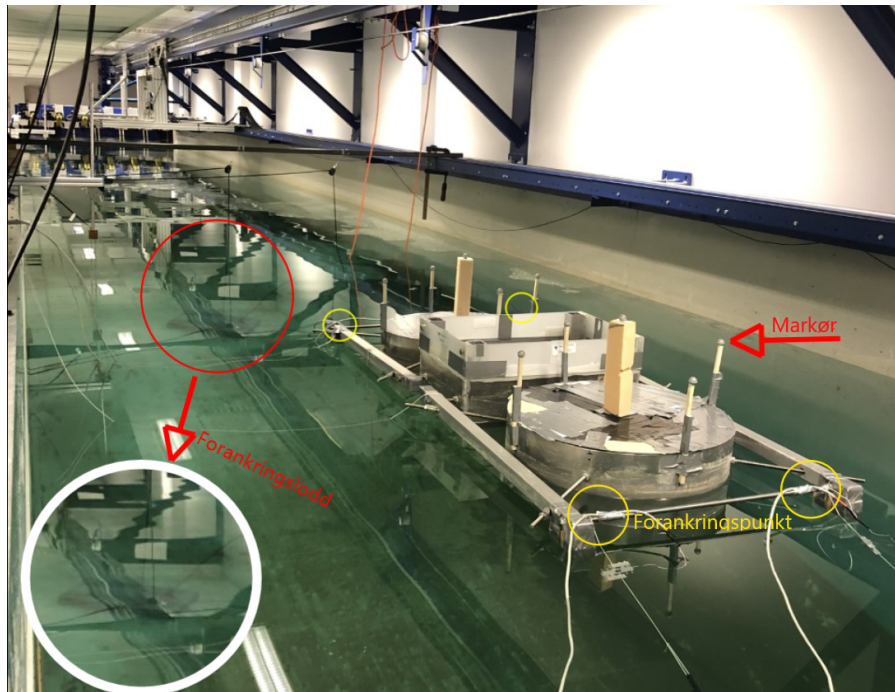
Figur 14: Oppsett og arbeidsområde for en vilkårlig modell i Qualisys [30]

3.2.5 Eksperimentelt oppsett

For å studere den hydrodynamiske bevegelsesresponsen til konstruksjonen i frihetsgradene gir, jag og svai er det hensiktsmessig å rotere konstruksjonen relativt til innkommende bølgeretning. Dette fordi en symmetrisk konstruksjon kan forvente å ha svært lave responsamplituder, dersom innkommende bølgeretning er på 0 grader relativt til konstruksjonen. I den forbindelse er det plassert betongblokker i bunn av bølgetanken som forankringspunkt. Fra betongblokkene er det støpt inn trinser som forankringslinjer tres gjennom. Videre trekkes forankringslinene opp til overflaten, hvor de er festet til et stag på tvers av bølgetanken. Som Figur 15 viser, har testobjektet fire forankringspunkt, en i hver ende av avstiverne. I forankringspunktet på konstruksjonen er det i enden festet lastceller som gjør det mulig å bekrefte at linene er like stramme for hver kjøring. Ved hjelp av Qualisys er det også undersøkt at modellens orientering mot bølgeretningene er lik mellom hver kjøring. Forankringslinene strekker seg til bunn av tanken, hvor de er festet i 30-40 kg tunge betongblokker, som fremhevet i Figur 16. I figuren er linelengde $x=3,0$ m, $y=2,1$ m, total linelengde, $s=3,6$ m og vinkelen $\alpha=55,0^\circ$. I forhold til bevegelsesresponser, vil forankringssystemet i større grad forsikre likhet mellom to påfølgende målinger, da konstruksjonens posisjon i vannet er mer stabil. For å undersøke eventuelle effekter forankringen har på RAO-en, er alle forsøkene gjennomført med to ulike forspenninger på forankringslinene; en slakk og en stram forankring. Den slakke forankringen er under forsøkene spent opp til rundt 2,5 N i alle linene, mens den stramme forankringen er på rundt 8 N. Den slakke forankringen er slik at modellen i likevektposisjon kan bevege seg fritt i de aksiale retningene, men likevel unngår for store rotasjoner. Det forventes derfor at den slakke forankringsforspenningen i mindre grad påvirker den naturlige bevegelsen til systemet, og da på en bedre måte enn den stramme forankringen, representerer forholdene i de numeriske beregningene. Den stramme forankringen har til hensikt å belyse hvilke påvirkninger en strammere forspenning vil ha på eksperimentelt målte RAO-verdier.



Figur 15: Forankringsoppsett



Figur 16: Testoppsett med lastceller, reflektorer og forankring

Tabell 4 gir en oversikt over de viktigste eksperimentelle parametrene. Fylling av vann i merdene er gjennomført ved hjelp av av bøtter som for hver fylling veies og noteres ned. Før fylling ble temperaturen av vannet målt for å kunne beregne nøyaktig væsketetthet. Prosessflåten er derimot ikke fylt opp med vann, men ballasteres med metallodd for å få ønsket dypgang. Årsaken til at den ikke fylles opp med vann er for å unngå for mange ukjente i startfasen i et omfattende prosjekt. Loddenens plassering er i midten av bunnen på prosessflåten. Fortøyningsbommene på modellen er hul i begge åpninger, så for å forhindre at de fylles med vann er endene tettet igjen med Divinycell konstruksjonsmateriale. Materialet er svært porøst og med en lav tetthet. Dette fører til økt oppdrift i endene av modellen, noe som vil være realistisk i forhold til en fullskalert løsning, hvor fortøyningsbommene vil ligge horisontalt i vannoverflaten. For å unngå at merdene tar inn vann er det plassert lokk i plast på toppen. For prosessflåten er sidene forhøyet med ett lett plastmateriale. For å forsikre om at konstruksjonen ligger stabilt i vannet, blir det etter fylling av vann og ballastering, brukt en digital vinkelmåler for å verifisere at konstruksjonen er uten trim- og krengevinkel. Etter hver måling blir likevektposisjonen på nytt målt for å forsikre om at modellen ikke har tatt inn vann eller at loddene i prosessflåten har flyttet på seg under forsøkene.

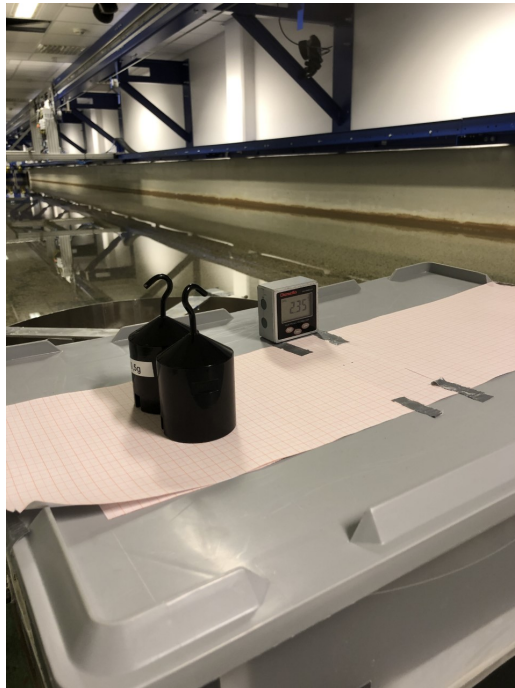
Parameter	Enhet	Verdi
Modellvekt	kg	29,9
Væsketetthet	kg/m ³	998,8
Ballast	kg	93,5
Massedeplassment, Δ	kg	123,4
Fribord (merd)	m	0,125
Dypgang (merd)	m	0,177
Fribord (prosessflåte)	m	0,235
Dypgang (prosessflåte)	m	0,07
Vertikalt tyngdepunkt	m	0,168

Tabell 4: Målte parametre for eksperimentelt oppsett

3.2.6 Krengeprøve

Figur 17 viser oppsettet under krengeprøven, hvor det er benyttet en digital vinkemåler, med en nøyaktighet på $\pm 0,1^\circ$, for å måle krengevingen ved hver vektforskyvning. For å forsikre om at avstanden vekten flyttes er målt riktig, benyttes millimeterpapir. Tabell 5 viser de ulike avstandende loddene på

til sammen 2,0 kg er forskøvet samt de tilhørende krengevinklene ved hver vektforskyvning. Forsøket ble gjentatt to ganger, for å tilse at metoden gav tilsvarende resultater.



Figur 17: Eksperimentelt oppsett under krengeprøve

Forsøk #	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Forflytning [m]	-0,280	-0,215	-0,120	-0,060	0	0,060	0,120	0,215	0,280
Krengevinkel [deg]	-4,40	-3,75	-2,25	-1,55	0	1,50	2,25	3,70	4,45
Tan(krengevinkel)	-0,077	-0,065	-0,039	-0,027	0	0,026	0,039	0,064	0,078

Tabell 5: Målte resultater fra krengeprøve

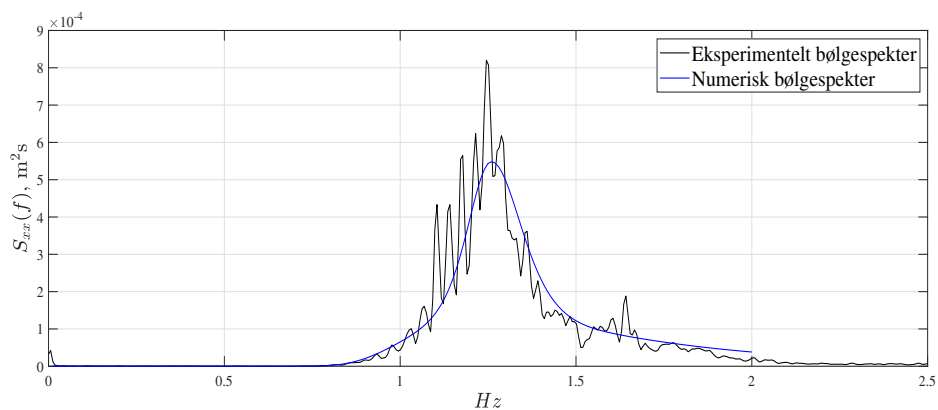
3.2.7 Generering av bølgespektra

I oppgaven er bølgeparametre bestemt ut fra strøklengde, ved metoden beskrevet i 2.6, hvor det er tatt et gjennomsnitt av fem ulike strøklengder ved potensielle lokasjoner for oppdrettsanlegget. Dette gav en strøklengde på 14000 meter som videre er brukt for å generere tre ulike JONSWAP bølgespektre modellert ut fra vindstyrker satt til henholdsvis 25, 30 og 35 m/s. Årsaken til at det er generert to bølgespektre utover 50-årsvinden på 35 m/s er for å undersøke om mindre ekstreme sjøtilstander gir større grad av likhet i RAO-målinger. Videre i rapporten brukes forkortelsene JS1, JS2 og JS3 som referanse til de ulike spektrene. Tabell 6 viser en oversikt over bølgeparametrene som er beregnet ut fra vindhastighetene og strøklengden, samt tilhørende nedskalerte verdier.

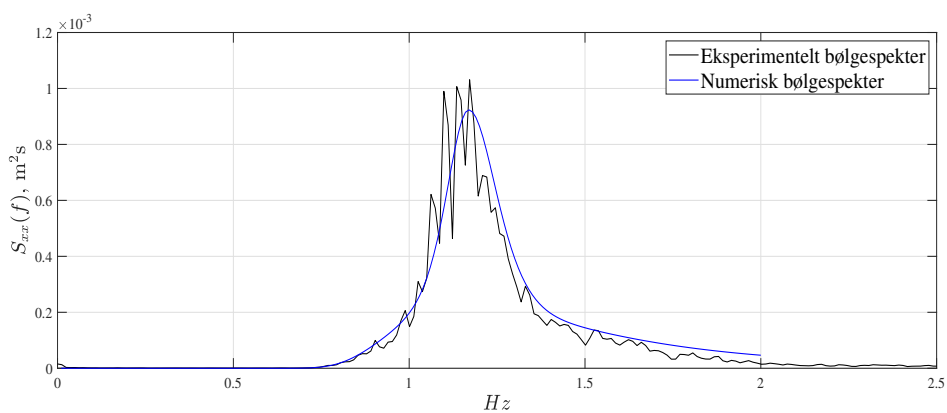
JONSWAP bølgespekter					
($\gamma = 4,08$)					
Fullskala			Nedskalert		
Bølgespekter	Hs [m]	Tp [s]	Bølgespekter	Hs [m]	Tp [s]
JS1	2,25	5,02	JS1	0.056	0.794
JS2	2,81	5,41	JS2	0.070	0.855
JS3	3,41	5,76	JS3	0.085	0.911

Tabell 6: Fullskala og nedskalerte bølgeparametre for lokasjonsområdet

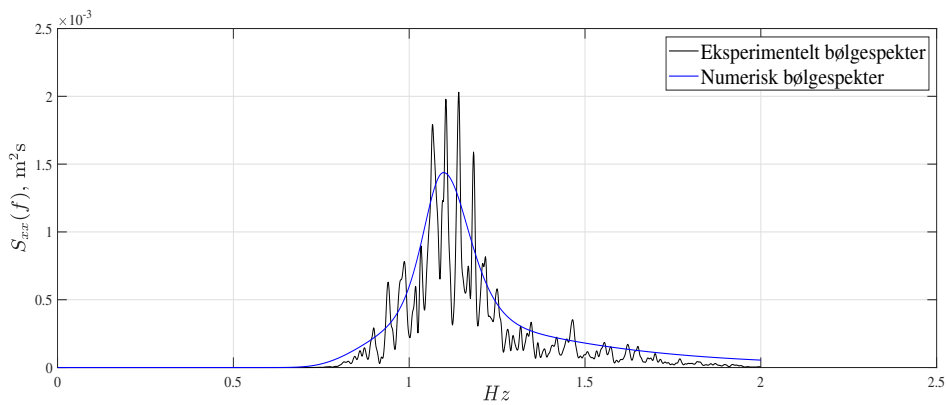
De nedskalerte verdiene i Tabell 6 er de som brukes for å generere de numeriske og eksperimentelle bølgespektrene i oppgaven. Den numeriske og eksperimentelle spektralfordelingen av de tre bølgespektrene, JS1, JS2 og JS3 er gitt i henholdsvis Figur 18, 19 og 20. Som figurene illustrerer, er det størst avvik mellom det numeriske og eksperimentelle spekteret over frekvenser med høy spektralenergi. For JS3 - bølgespekteret er dette mest fremtredende, hvor det også observeres større innkonsistenser over alle bølgefrequensene. Dette kommer som et resultat av at bølgeparametrene for dette spekteret er på grensen til hva bølgeklaffene kan generere med forbehold om likhet til input-parametrene. I noen tilfeller observeres det under kjøring av JS3-spekteret, brytende bølger hvor lineær bølgeteori ikke lengre kan antas å gjelde. Dersom det hadde blitt valgt en lavere spisshetsparameter kunne effektene av dette blitt redusert. For hver bølgekalibrering ble det valgt en kjøretid på 28 minutter og 28 sekunder, som tilsvarer 3 timer i fullskala. Hvert bølgespekter trengte 3 kjøring for å få en tilstrekkelig tilnærming sammenlignet med den teoretiske kurven. I områdene hvor størst avvik i det gitte bølgespektret ble observert, er det brukt en automatisk forsterkningskorreksjonsfunksjon for å få bedre samsvar med teoretiske verdier.



Figur 18: Generert bølgespekter i henhold til JS1-parametre



Figur 19: Generert bølgespekter i henhold til JS2-parametre



Figur 20: Generert bølgespekter i henhold til JS3-parametre

3.2.8 Decay-test

Det er gjennomført decay-tester for å kartlegge egenfrekvensene til systemet i alle seks frihetsgrader. Dette er av interesse da det gir større vurderingsgrunnlag i forbindelse med RAO-analyse fra bølgeforsøkene. Decay-testene er gjennomført i stille vann hvor det benyttes samme forankringssystem som for

bølgeforsøkene. Forsøket foregikk ved at modellen ble dynamisk forskøvet i den aktuelle frihetsgraden og deretter sluppet fri. Perioden mellom de påfølgende svingningene tilsvarer systemets egenfrekvens og raten svingningene avtar med tilsvarer systemets dempningsrate. Etersom de første svingningene i større grad er ulineær, filtreres disse bort. Videre ble dataen overført til et MATLAB-skript som beregner dempningsraten og egenfrekvensen ved hjelp av en kurvetilpasningsfunksjon. Prinsippet baserer seg på en sammenligning av det faktiske svingningsmønsteret og et teoretisk svingningsmønster hvor det i første iterasjonen antas en dempning og egenfrekvens, tilsvarende det systemet observeres å ha. Når den teoretiske kurven samsvarer med den eksperimentelle, kan egenfrekvensen bestemmes basert på den teoretiske kurven. Metoden krever en serie med måledata hvor det er tilstrekkelig datapunkt som tilsvarer et lineært dempet system. Ideelt sett bør det være ti topp- og bunnpunkt som i størst mulig grad passer den teoretiske dempningskurven [32]. Dersom det observeres ikke-linære effekter i dempningsraten som gjør at det ikke er mulig å bruke tilstrekkelig nok målepunkt, er det være hensiktsmessig å dele opp dataen i flere deler. Fra de to oppdelte måleseriene tas det videre et gjennomsnitt av parametrene totalt sett. Dette forutsetter at det ikke er for store ulikheter i parametrene mellom de to måledataene. Ved store avvik bør det gjøres nye målinger eller endres metode.

3.2.9 Generering av spektralverdier

Den praktiske gjennomføringen av hvordan RAO og bølgespektra etableres numerisk og eksperimentelt, er i oppgaven gjort på to ulike måter; numerisk RAO genereres på bakgrunn av tyngdepunkt-plasseringen og geometrien til konstruksjonen hvor kilde-sluk metoden brukes for å beskrive fluidets endringer i bevegelse og trykk. Det vil si at programmet ikke er avhengig av et bølgespekter eller responspekter for generering av et RAO-spekter. Den numeriske RAO-en vil derimot, i kombinasjon med et teoretisk bølgespekter, brukes for å definere et responspekter på måten gitt i Likning 21, i Kapittel 2.9. Den eksperimentelle fremgangsmåten for beregning av RAO-verdier baserer seg på å måle bevegelsesresponsen fra Qualysis, og bølgespekteret ved bruk av bølgehøydemåleren. Basert på bevegelsesresponsene over de ulike bølgefrequensene tilstede i bølgespekteret, er responspektre for hver frihetgrad generert, og de eksperimentelle RAO-ene finnes ved å løse Likning 21, for $|H(\omega)|$.

I forbindelse med de eksperimentelle forsøkene er det laget en testplan, som gitt i Tabell 7. Testplanen viser en oversikt over de eksperimentelle bølgeforsøkene som er brukt i spektralanalysen, hvor det totalt er 12 konfigurasjoner.

Eksperimentelle bølgeforsøk										
Forsøk #	Hs	Tp	Forspenning #	Bølgeretning	Forsøk #	Hs	Tp	Forspenning #	Bølgeretning	Bølgetopper
1-1	0.056	0.794	1	0	1-3	0.056	0.794	2	0	2500
2-1	0.070	0.855	1	0	2-3	0.070	0.855	2	0	2500
3-1	0.085	0.911	1	0	3-3	0.085	0.911	2	0	2500
1-2	0.056	0.794	1	20	1-4	0.056	0.794	2	20	2500
2-2	0.070	0.855	1	20	2-4	0.070	0.855	2	20	2500
3-2	0.085	0.911	1	20	3-4	0.085	0.911	2	20	2500
Enhet	m	Hz	-	grader	-	m	Hz	-	grader	-

Tabell 7: Testplan for eksperimentelle bølgeforsøk

3.2.10 Programmeringsverktøy

Dataen som skrives ut av Qualysis og bølgehøydemålerne blir i oppgaven etterbehandlet i MATLAB. Programmet brukes for å fremstille numerisk og eksperimentell data, samt avdekke og eliminere støy i målingene. For å verifisere at dataen i en måling er av god kvalitet studeres målinger først i tidsdomenet. Tydelige inkonsistenser i måledataen detekteres og fjernes med en automatisk søkefunksjon, før RAO og bølgespektrere fremstilles. Som nevnt i Kapittel 2.9 fremstilles RAO og bølgespekter i form av spektraltetthet. For dette formålet er *pwelch*-funksjonen anvendt. *Pwelch*-funksjonen brukes til å beregne den to-sidige spektraltettheten av både bølgespekteret fra bølgehøydemåleren, og responspekteret fra Qualysis. Funksjonen skrives på formen [33]:

$$[pxx, f] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{overlap}, f, fs) \quad (26)$$

hvor x er input-dataen og window er en vektor eller ett tall som brukes for å dele opp dataen i mindre segmenter. Videre er overlap antall overlappende segmenter i målingene, f er frekvensområdet til målingene og fs er målefrekvensen. I funksjonen har window -parameteren stor påvirkning på formen av spektralfunksjonene. Dersom størrelsen på et vindu blir satt til en høy verdi, vil det bli et redusert antall målepunkt i grafen. Dette fører til jevnere kurver, men kan gå på bekostning av oppløsningen av det opprinnelige signalet. Ettersom det ikke er en fasit på hva som er riktig størrelse på vinduene, gjennomgås spektralverdiene for både filtrert og ufiltrert signal i alle frihetsgrader for å finne best mulig vindustørrelse. For de andre parametrene, er overlap satt til standardverdi på 50% og f er en vektor fra 0.7 til 2 Hz, som representerer frekvensområdet til de innkommende bølgene. Ettersom samplingsfrekvensen for bølgehøydemåleren (128 Hz) er høyere enn for Qualysis (100 Hz) er samplingfrekvensen fra bølgehøydemåleren nedskalert til 100 Hz. Dette representerer da fs i *pwelch*-funksjonen.

3.3 Eksperimentell usikkerheter og feilkilder

- Spektralverdiene i bølgespekteret avviker i forhold til det teoretiske spekteret over noen frekvenser. Dette vil gi noe utslag i både responsspekter og RAO da innkommende bølger kan inneholde mindre eller mer energi enn det teoretiske spekteret.
- Egenfrekvensene målt fra decay-testene kan i noen av frihetsgradene bli påvirket av refleksjoner fra tankveggene. Dette gjelder spesielt for hiv og stamp da modellbevegelser i disse frihetsgradene inducerer bølger. For noen av frihetsgradene er det også et begrenset antall svingninger som følger en lineær demping, og det knyttes derfor større usikkerheter til disse.
- Det tas forbehold om at forankringen kan påvirke bevegelsesresponsene i de eksperimentelle resultatene og spesielt over lave frekvenser. I de lavfrekvente områdene, utenfor de frekvensene som er tilstede i bølgespekteret, observeres det bevegelsesresponsen langt over de som måles over bølgefrequensene i JS1, JS2 og JS3.
- Angrepsvinkelen bølgene treffer modellen med kan variere noe under hvert forsøk, da det ikke er mulig å låse fast modellen helt uten å påvirke den dynamiske responsen i en eller flere frihetsgrader.
- For detekteringsmålingene av Qualisys kan lysrefleksjoner i vannoverflaten momentant forveksles med en reflektor. For noen målinger observeres dette i form av en plutselig økning i responsverdi, men det antas å ikke påvirke måleresultatene i nevneverdig grad, da dette for det meste filtreres ut.
- Det observeres bølgebrytninger for noen av de største bølgene i spekterene. Det kan derfor ikke antas en lineær bevegelsesrespons over disse bølgene. Effektene av de brytende bølgene observeres også i de genererte bølgespektrene, hvor det er tydelig større avvik over de energikonsentrerte områdene i spektrene.
- For å unngå at konstruksjonens oscillerende bevegelse påvirker det målte bølgespekteret, plasseres bølgehøydemåleren 8 meter foran modellen. Dette fører med en antagelse om at det er like stort energiinnhold over de bølgene som treffer bølgehøydemåleren, som modellen.
- For en tankbredde på 3 meter, vil tversgående bølger være mest fremtredende for tilsvarende bølgelengde. Dette fordi de tversgående bølgene da kommer i fase med hverandre. En bølgelengde på 3 meter gir en bølgefrequens på 0,72 Hz. Det kan derfor i dette området forventes et høyere energinivå i spektralverdiene.

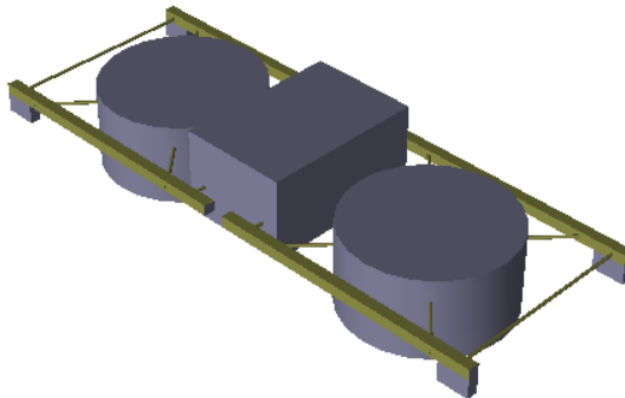
3.4 Numeriske metoder

Sesam er en programpakke som egner seg for strukturell og hydrodynamisk analyse av skip og andre marine konstruksjoner. I programpakken finnes det fire typer program; forbehandlere, hydrodynamiske analyseprogrammer, strukturelle analyseprogrammer og etterbehandlere. Forbehandleren GeniE brukes til blant annet modellering, geomtrisk validering og generering av mesh. For hydrodynamiske og hydrostatiske analyser overføres modellen fra GeniE til programmet HydroD. De hydrodynamiske miljøfaktorene modelleres først direkte i HydroD, hvor de hydrodynamiske analysene kalkuleres av underprogrammet Wadam, for bølgelaster i frekvensdomenet. Videre overføres dataen til etterbehandlingsprogrammet Postresp hvor statistiske parametre i frekvensdomenet fremstilles.

3.4.1 Modelldesign og mesh

Den numeriske modelleringen tar utgangspunkt i fysiske dimensjoner som er målt ved hjelp av en digital avstandsmåler. Hver del av modellen er veid slik at en nøyaktig materialtetthet kan beregnes. Materialegenskapene til merdene og prosessflåten tar utgangspunkt i aluminiumslegeringen 6061 hvor tettheten er tilpasset hver delkomponent for å få vekten til å samsvare med modellen.

For hydrodynamiske analyser av modeller med innvendig væske er det i Sesam nødvendig å lage minst to ulike modeller; en panelmodell og en strukturmodell. Panelmodeller lages for beregning av ytre hydrodynamisk trykk og krefter over en definert våt overflate, med hensyn til potensialteorien. Lastene viderføres til en strukturmodell som har informasjon om massen og kompartementene i modellen. Det er ut fra strukturmodellen de indre kreftene beregnes. Panelmodellen og strukturmodellens ytre utforming er lik, men strukturmodellen inkluderer også fri væskeoverflate med spesifisert hydrostatisk trykk mot tankveggene. En illustrasjon av den numeriske modellen, modelert i GeniE er gitt i Figur 21.

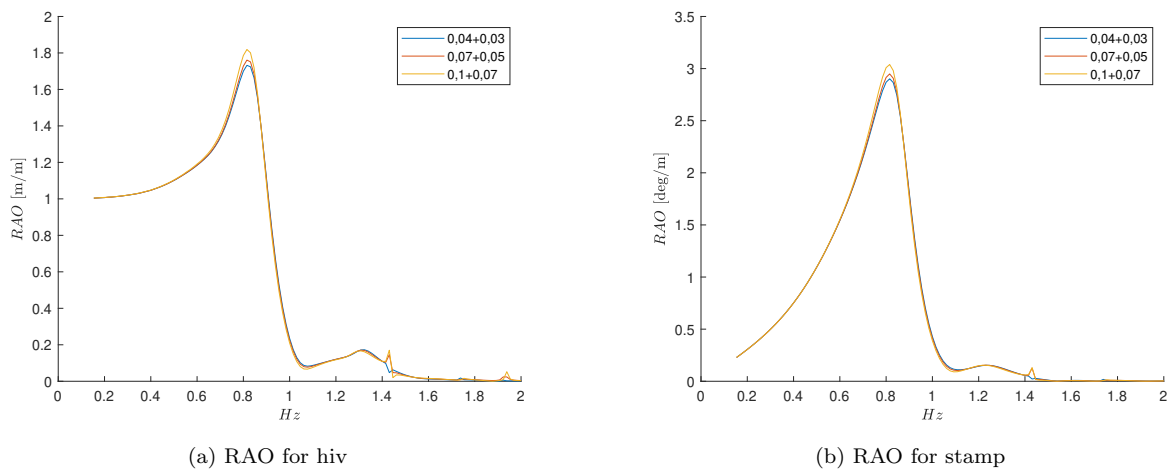


Figur 21: Numerisk modell i GeniE

I GeniE er det mulig å velge mellom to ulike mesh algoritmer; *Sesam quad mesher* og *Advancing front mesher* [34]. Den førstnevnte er ofte mest anvendelig for enkle geometriske utforminger, mens det for geometrier med hulrom og irregulariteter er best å benytte sistnevnte. Advancing front mesher algoritmen lager først meshet rundt kantene på modellen før resten av overflaten. Sesam quad mesher algoritmen deler først opp overflaten til modellen i mindre paneler, før den mesher over disse. Algoritmen egner seg derfor best for regulære flater. På bakgrunn av dette er en kombinasjon av begge algoritmene brukt for generering av mesh. Det er også brukt to ulike elementstørrelser på meshet; et finere mesh på merdene med bruk av advancing front mesher algoritmen og en litt grovere mesh på prosessflåten og fortøyningsbommene med bruk av sesam quad mesher. For å bekrefte at meshet i struktur- og panelmodellen er tilstrekkelig fint samtidig som det ikke går på bekostning av nøyaktighet og datakraft, er det gjort tester med tre ulike mesh størrelser. En oversikt over påvirkningen ulike elementstørrelser har på RAO i hiv og stamp er gitt i Tabell 8, hvor elementstørrelsene på henholdsvis prosessflåte og merd er oppgitt. De to groveste meshene er sammenlignet med et finere mesh, hvor et relativt prosentavvik over hele kurvenene som gitt i Figurene 22a og 22b er beregnet. RAO-verdiene er målt over 90 frekvenspunkt, hvor avviket mellom hver tilhørende amplitudeverdi beregnes. Analysen er kjørt i HydroD hvor det beregnes data ut fra to bølgeretninger over 0,7-2 Hz med en steglengde på 0,016 Hz.

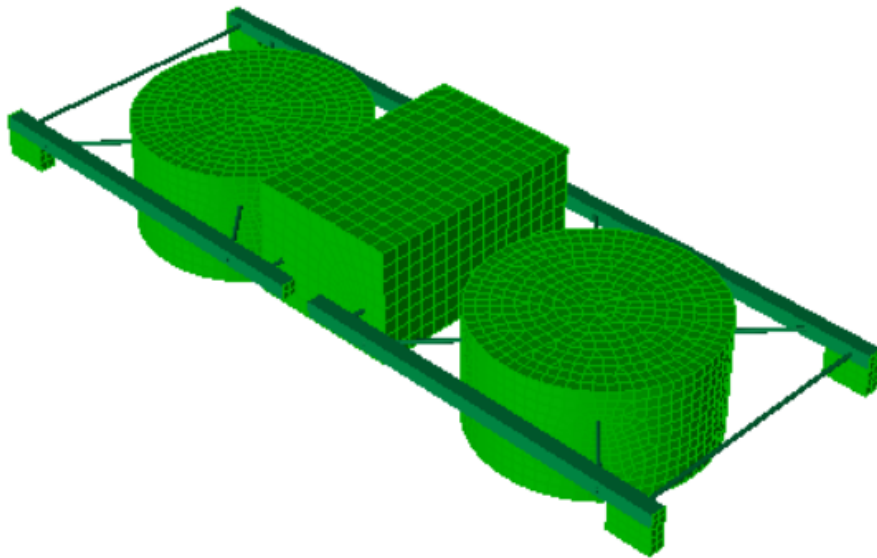
Elementstørrelse Merd	Elementstørrelse prosessflåte	Kjøretid	Relativt avvik i hiv	Relativt avvik i stamp
0,03 [m]	0,04 [m]	280 [s]	-	-
0,05 [m]	0,07 [m]	161 [s]	1,30 [%]	1,48 [%]
0,7 [m]	0,1 [m]	85 [s]	3,98 [%]	4,35 [%]

Tabell 8: Effekten de ulike mesh konfigurasjonene har på RAO i hiv og stamp



Figur 22: Sammenligning av tre ulike mesh konfigurasjoner for hiv og stamp

På bakgrunn av resultatene fra meshanalysen er det bestemt å bruke elementstørrelse på 0,03 m for merdene og 0,04 m for prosessflåte, da kjøretiden for denne konfigurasjonen fortsatt er relativt kort, og med noe bedre oppløsning i verdier for RAO. Lik meshstørrelse er brukt for både panel- og strukturmodell. Ved mindre meshstørrelse har det vist seg at Wadam gir feilmeldinger dersom full dynamisk analyse gjennomføres. Bakgrunn for feilmelding har ikke blitt redgjort, men tidlige studier har vist til samme begrensning [35]. En oversikt over meshet av strukturmodellen er gitt i Figur 23 med tilhørende meshegenskaper gitt i Tabell 9.



Figur 23: Meshet strukturmodell i GeniE

Egenskap	Verdi
Antall noder	13460
Antall element	4624
Antall trekantede element	194
Antall firkantede element	4117
Antall bjelkeelement	313

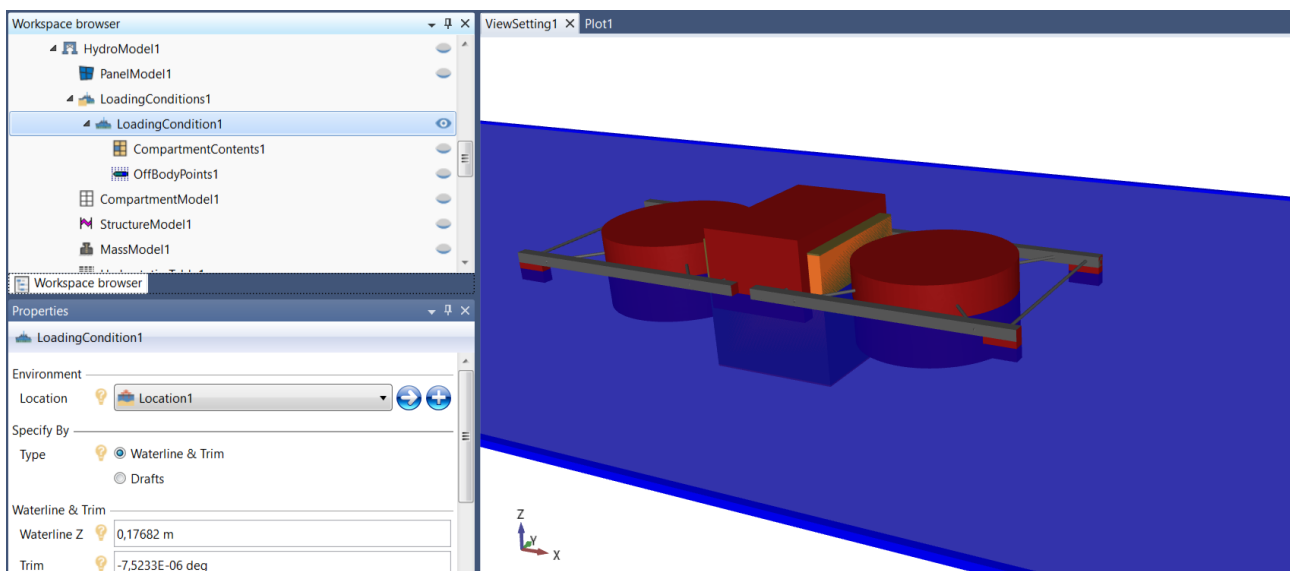
Tabell 9: Meshegenskaper til struktur- og panelmodell

3.4.2 Hydrostatisk og hydrodynamisk analyse

HydroD er et grafisk designverktøyet som brukes for å definere miljøfaktorer, hydrostatiske og hydrodynamiske forhold. Kommandoene som gjøres i HydroD blir videreført til underprogrammet Wadam

som står for beregninger av bølge-struktur interaksjoner på flytende objekter. Wadam baserer seg på lineære metoder for hydrodynamiske beregninger, ved bruk av 3-D radiasjon- og diffraksjonsteori samt kilde-sluk metoden [36]. For flytende konstruksjoner krever Wadam tre modelltyper i den numeriske analysen; en panelmodell, en strukturmodell og en massemodell. Massemodellen kan enten defineres ut fra massen i strukturmodellen, eller som en massematrise. I masteroppgaven er den definert ut fra massen til strukturmodellen. Massemodellen brukes både for hydrostatiske kalkulasjoner, og for bevegelsesligninger. Dersom det er en ubalanse i vekt og oppdrift er det også massemodellen som gir grunnlag for å rapportere disse feilene.

I design av miljøfaktorer er det tatt hensyn til de eksperimentelle forholdene på best mulig måte. Det er derfor valgt beregninger for 0 og 20 graders innkommende bølgetretning med et frekvensområdet mellom 0,7-2 Hz. Steglengden settes i utgangspunktet til 0,016 Hz, hvor det gjøres finere inndeling for hver frihetsgrad i områdene av interesse. Videre er kompartementene fylt med like mye vann som de eksperimentelle forsøkene. Etter fylling av vann, er det nødvendig å finne det nye likevektspunktet til modellen. Vannmassen og massemodellen brukes for å kalkulere den nye dypgangen, relativt til konstruksjonens koordinatsystem, som er definert i GeniE. Dypgangen beregnes numerisk til å være 176,8 mm, noe som gir et prosentavvik på 0,11% sammenlignet med den eksperimentelle dypgangen. Forskjellen antas å ha tilnærmet ingen effekt på målingene. En illustrasjon av modell i vannoverflaten, hvor dypgang er beregnet er gitt i Figur 24.



Figur 24: Balansering av modell etter fylling av kompartenent

For å ta høyde for indre væskeoverflate, er det i HydroD mulig å gjøre kalkulasjoner av det varierende

tanktrykket. Kalkulasjonene gjøres av Wadam som løser dette ved å beregne tillegsmassene for hvert kompartement og overfører resultatene videre til de globale bevegelsesberegningene. Radiasjonspotensialet sammen med de globale bevegelsesberegningene avgjør trykklastene i kompartementet ved de gitte betingelsene for fri væskeoverflate. For å gjøre slike beregninger, er det nødvendig å inkludere samme betingelser for kompartement i panelmodellen som for strukturmodellen. Dette for at overføringen av laster og trykk fra panelmodell til strukturmodell er riktig definert. For en tank som er delvis fylt, defineres nullpunktet for beregning av hydrostatisk trykk til tyngdepunktet i den frie væskeoverflaten.

Resultatene fra den hydrodynamiske analysen kan fremstilles visuelt ved bruk av postprosesseringsprogrammet Postresp. Fra Postresp er det mulig å beregne ytterligere statistisk data. Blant annet er det mulig å definere flere ulike bølgespektre som videre kan brukes i kombinasjon med RAO-ene for generering av responspektre. Data i Postresp printes til en csv formatfil og eksporteres til MATLAB for videre analyser.

3.4.3 Begrensninger og feilkilder ved numerisk analyse

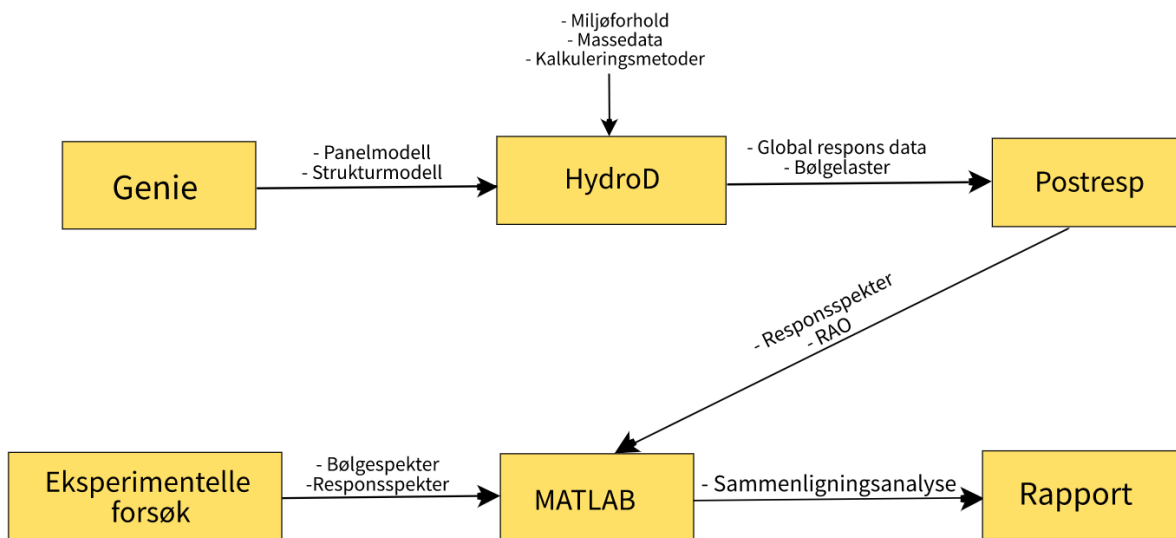
- Numeriske analyser i Sesam betrakter interaksjonen mellom bølger og struktur i forhold til potensialstrømning og lineær bølgeteori. Det forventes at den numeriske idealiseringen ikke fullstendig gjenspeiles i eksperimentelle forsøk, hvor bølgene til en viss grad inneholder ikke-lineære effekter.
- Modellen er definert som et stivt legeme i GeniE for å unngå for mange ukjente faktorer. Selv om dette ble forsøkt gjenskapt eksperimentelt ved å bore inn gjengestenger i modellen, observeres det at modellen ikke er helt stiv under bølgeforsøk. De ulike fasebevegelsene mellom merdene eksperimentelt kan gi utslag i sammenligning av RAO og responspektre.
- Kjøringer av Wadam med mindre meshstørrelser enn det som er brukt, gir feilmeldinger i HydroD ved full dynamisk analyse. Det er derfor knyttet noe usikkerheter til hvor godt HydroD klarer å kalkulere hydrodynamiske laster for så små konstruksjoner som brukt i oppgaven.
- For de eksperimentelle forsøkene er det benyttet forankringspunkt, mens modellen er frittstående i de numeriske analysene. Egenfrekvensen til forankringen kan ha en påvirkning på systemets naturlige egenfrekvens, noe som vil kunne føre til økte avvik mellom de numeriske og eksperimentelle resultatene. Årsaken til at det ikke er brukt en forankring i de numeriske beregningene, kommer av at Sesam ikke gir muligheten til å gjennomføre hydrodynamiske beregninger med forankring i frekvensdomenet.
- Lineær bølgeteori gir best tilnærmingen ved betraktning av lang-toppede bølger. Den beregnede

spissshetsparameteren i JONSWAP-spektrene gir bølger som er nært brytningspunktet for bølger generert av 35 m/s vind. Det knyttes derfor noe usikkerheter til sammenligning av RAO og responsspekteret for denne bølgekonfigurasjonen.

- For frihetsgradene rull observeres det ved numeriske beregninger en amplitudeverdi i RAO-en langt over det målt i de eksperimentelle forsøkene. Det er derfor knyttet usikkerheter til resultatene i denne frihetsgraden.
- Sesam beregner sloshing-effekter basert på potensial strømmingsteori, hvor det ikke tas høyde for demping. Dette kan gi utslag i at de numeriske beregningene forventer større responsverdier sammenlignet med de målt fra eksperimentelle bølgeforsøk.

3.5 Prosedyre for analyse

På bakgrunn av de nevnte metodene for eksperimentell og numerisk analyse er det i Figur 25 illustrert et flytskjema som summerer opp de viktigste stegene i data-innsamlingsprosessen.



Figur 25: Prosedyre for numerisk og eksperimentell analyse

4 Resultat og diskusjon

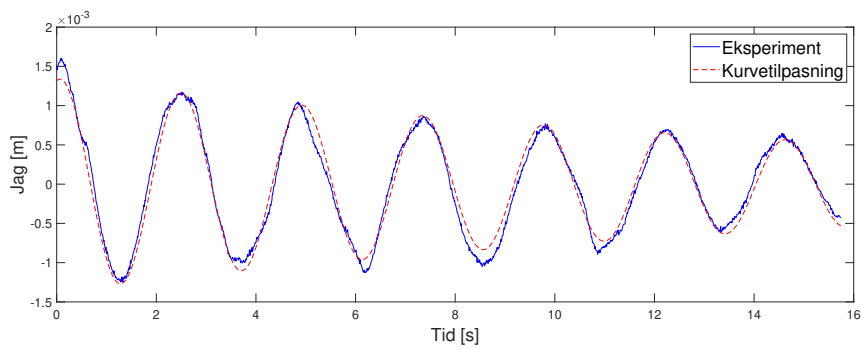
Dette kapitlet presenterer de eksperimentelle og numeriske resultatene i denne masteroppgaven. Første delkapittel presenterer resultatene fra decay-testene som har til hensikt å gi en indikasjon på hvilke egenfrekvenser og dempningsrate systemet har med slakk forankring i de seks frihetsgradene. Videre presenteres det i andre delkapittel resultater fra de statiske stabilitetsforsøkene, hvor det sammenlignes mellom numerisk og eksperimentelle resultater. Avslutningsvis presenteres RAO og responspektrene, hvor de numeriske og eksperimentelle resultatene sammenlignes og kommenteres.

4.1 Decay-test

Det gjøres fem decay-tester for hver frihetsgrad. Dette for å forsikre om at forsøkene er gjenprøvbare og at metodene for gjennomføringen gir konsise resultat. Egenfrekvensene og dempningsraten er for hver frihetsgrad beregnet basert på den teoretiske genererte svingningskurven som samsvarer med den eksperimentelle målingen. Forspenningen på forankringslinene er i alle forsøk like stram og måles ved hjelp av lastceller. For å i størst grad unngå ikke-lineære effekter, er datamaterialet fra de første svingningene filtrert ut. Dette fører til relativt små svingningsamplituder for noen frihetsgrader, men dempningen og egenfrekvensen antas å være konstant under hele måleperioden, også etter at de første svingningene er filtrert bort. For måleserier hvor dempningen ikke er lineær over et stort nok måleområde, er datamaterialet delt opp i flere deler, hvor det tas et gjennomsnitt av både dempningsraten og egenfrekvensene for hvert måleområde. Ettersom deler av dempningen i måleserien da er ikke-lineær, knyttes det også større måleusikkerheter i forhold til beregnet egenfrekvens og dempningsrate.

4.1.1 Jag

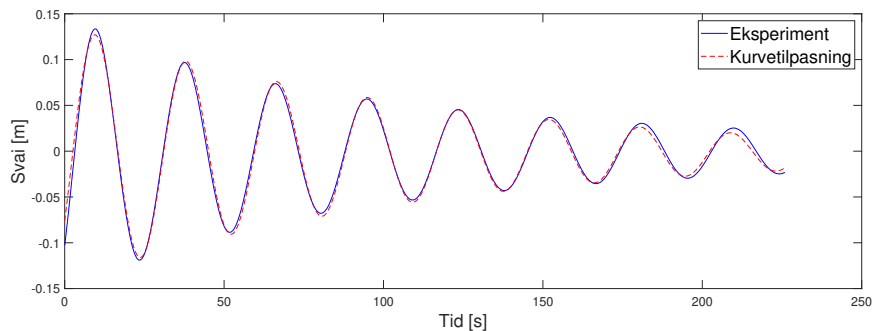
Eksperimentene i jag utføres ved å statisk forskyve modellen i x-retning. Når modellen slippes, måles svingningene til modellen er tilbake til opprinnelig likevektsstilling. Svingningene i jag viser en god tilnærming til et lineært dempet system, som presentert i Figur 26. Det ble ikke observert store avvik mellom de fem målingene hvor egensvingningene i jag er målt til 0,41 Hz, med en tilhørende dempningsrate på 0,02.



Figur 26: Resultat fra decay-test i jag

4.1.2 Svai

Eksperimentene i svai utføres ved å statisk spenne opp i modellens y-retning. Når modellen slippes observeres det egenfrekvenser over lave frekvenser for alle forsøk. Dette er en vanlig respons for forankrede system hvor saktevarierende bevegelser er å forvente i frihetsgraden svai. Figur 27 viser måledataen hvor det registreres en egenfrekvens på 0,05 Hz og en dempningsrate på 0,03.

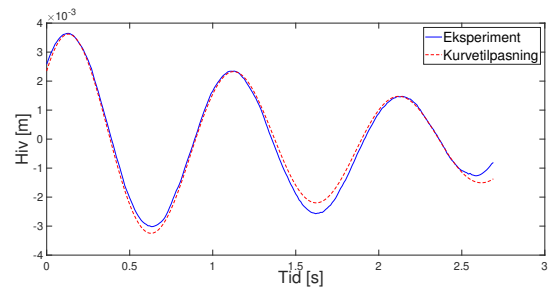
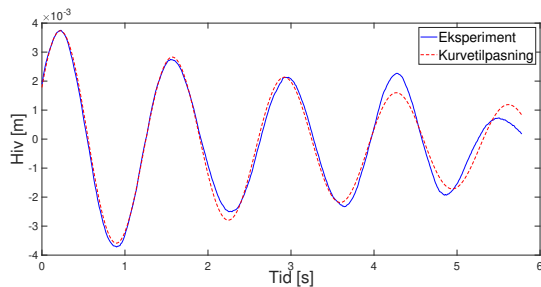


Figur 27: Resultat fra decay-test i svai

4.1.3 Hiv

Decay-testene i hiv gjennomføres ved å statisk forskyve hele konstruksjonen ned på en måte hvor alle komponenter har lik dyppgang, relativt til sin likevektstilstand. Dette er viktig for å forhindre tilstedeværelse av en initial trim- og krengevinkel. Det knyttes noe usikkerheter til nøyaktigheten av målingene, da det observeres maks fire svingningstopper som passer en teoretisk kurvetilpasning. Det er derfor nødvendig å beregne dempningsraten og egenfrekvensen basert på to ulike tidsserier i samme måleperiode. Årsaken til den ikke-lineære dempningen kan komme som et resultat av veggrefleksjoner da de hiv-induserte bevegelsene radierer bølger. Likevel observeres det lite avvik mellom de fem målingene. Forsøket med størst grad av lineær demping over to forskjellige kurvetilpasninger er gitt

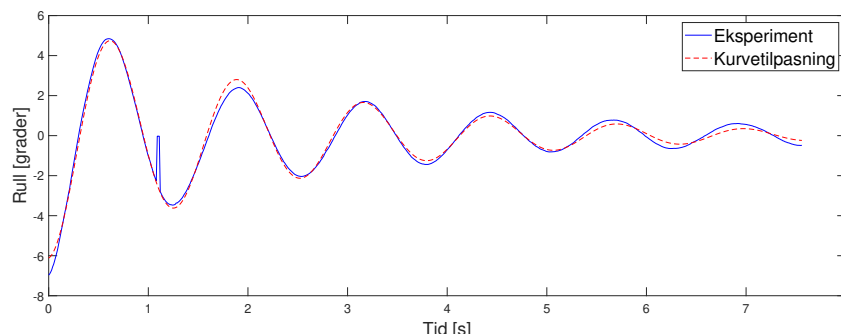
i Figur 28 og 29. Gjennomsnittet av de to tidsseriene gir en egenfrekvens på 0,82 Hz og tilhørende dempningsrate på 0,07.



Figur 28: Resultat fra decay-test i hiv - kurvetilpasning 1 Figur 29: Resultat fra decay-test i hiv - kurvetilpasning 2

4.1.4 Rull

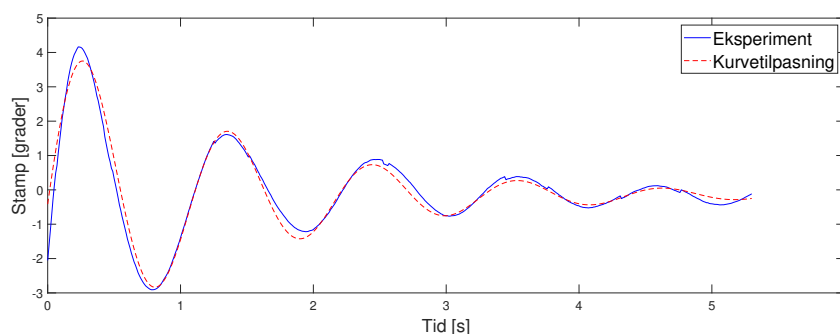
Oppspenning av modellen i frihetsgraden rull gjennomføres ved at den ene siden på modellens statisk forskyves ned i vannoverflaten. I datamaterialet observeres det gode tilnærminger til kurvetilpasningene hvor egenfrekvensene ikke avviker mer enn 0,02 Hz mellom de fem målingene gjort. Egenfrekvensen i rull måles til å være 0,77 Hz med tilhørende dempningsrate på 0,09. En av decay-målingene i rull er gitt i Figur 30.



Figur 30: Resultat fra decay-test i rull

4.1.5 Stamp

Oppspenningen av modellen i frihetsgraden stamp gjennomføres ved å statisk forskyve senteret av fronten til modellen ned i vannoverflaten. Når modellen slippes, observeres det en høy initialdempning som kjapt avtar med tid. Dette fører til at det er vanskelig å observere et stort nok måleområde til at egenfrekvensen og dempningsraten kan sies å være nøyaktig med stor sikkerhet. Likevel viser målingene at dempningen i den korte måleperioden kan tilnærmes med kurvetilpasning. Svingningene er illustrert i Figur 31 hvor egenfrekvensen og dempningsrate er målt til henholdsvis 0,91 Hz og 0,13.



Figur 31: Resultat fra decay-test i stamp

4.1.6 Gir

Målingene i frihetsgraden gir viser at det ikke er lett å få et godt bilde av egenfrekvensen da det er stor tilstedeværelse av ikke-lineære effekter i dempningen, allerede etter tre svingninger. Årsaken til dette kan være påvirkning fra bevegelser i andre frihetsgrader, som etter hvert i forsøkene observeres å være mer tilstedeværende enn gir-bevegelsen. Det vil derfor ikke benyttes resultater fra decay-testene i gir som sammenligningsgrunnlag videre i rapporten.

4.1.7 Sammenfatning av resultater fra decay-test

Tabell 10 viser en sammenfatning av resultatverdier for egenfrekvens og dempningsrate i alle seks frihetsgrader. Det bemerkes at egenfrekvensene til både jag og svai er utenfor de bølgefrekvensene representativt i de tre bølgespektrene. Det vil derfor ikke være mulig å gi grunnlag for sammenligning mellom egenfrekvensene i decay-testen og bølgetestene. For de andre frihetsgradene vil resultatene fra decay-testen sammenlignes med de amplitudetoppene som opptrer i numerisek og eksperimentelle RAO-er. En korrelasjon i frekvenstoppene og egenfrekvensen målt i decay-testene vil ytterligere forsterke konfidens i resultatene og metodikken brukt i oppgaven.

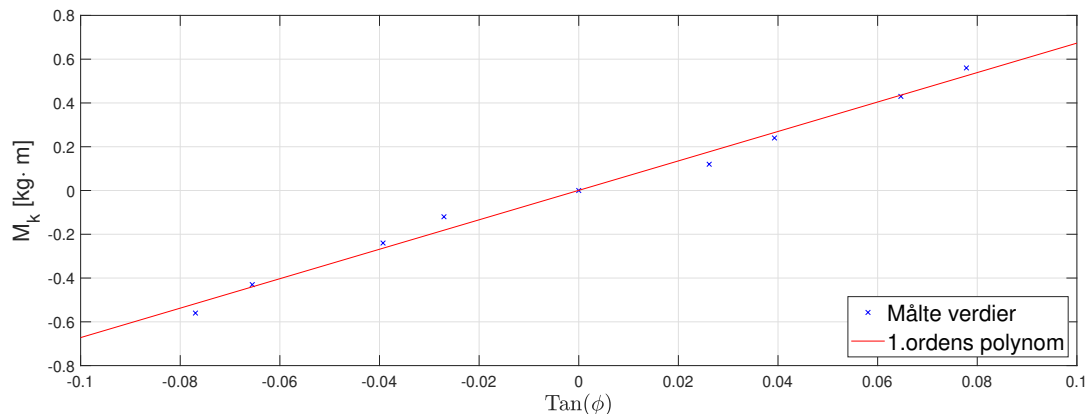
Frihetsgrad	T [s]	f [Hz]	ζ
Jag	2,70	0,37	0,02
Svai	33,33	0,03	0,05
Hiv	1,22	0,82	0,07
Rull	1,30	0,77	0,09
Stamp	1,10	0,91	0,13
Gir	-	-	-

Tabell 10: Sammenfatning av resultater fra decay-testene

4.2 Sammenligning av eksperimentell og numerisk metasenterhøyde

For å undersøke at tyngdepunkts plasseringen til den eksperimentelle og numeriske modellen samsvarer, er det hensiktsmessig å sammenligne \overline{GM} -verdien. Som nevnt, representerer \overline{GM} -verdien konstruksjonens initialstabilitet ved å uttrykke avstanden fra det totale tyngdepunktet, til metasenteret. Verdiene som er beregnet i denne masteroppgaven er i seg selv ikke av stor praktisk betydning, da modellen bare består av en tredjedel av det totale anlegget. Likevel er det interessant å undersøke om de to metodikkene gir samsvar, slik at eventuelle senere studier kan benytte samme fremgangsmåte for beregninger av statiske stabilitetsegenskaper. En likhet i resultatene vil og ytterligere forsterke betingelsene om geometrisk likhet mellom den eksperimentelle og numeriske modellen. I forbindelse med beregninger av \overline{GM} -verdien til den eksperimentelle forsøksmodellen, er det gjennomført en krengeprøve, som presentert i Kapittel 3.2.6. Den numeriske \overline{GM} -verdien er funnet fra modellens \overline{GZ} -kurve, på samme måte som det ble illustrert i Figur 10. \overline{GZ} -kurven er som for de hydrodynamiske bevegelsesresponsene, beregnet i HydroD.

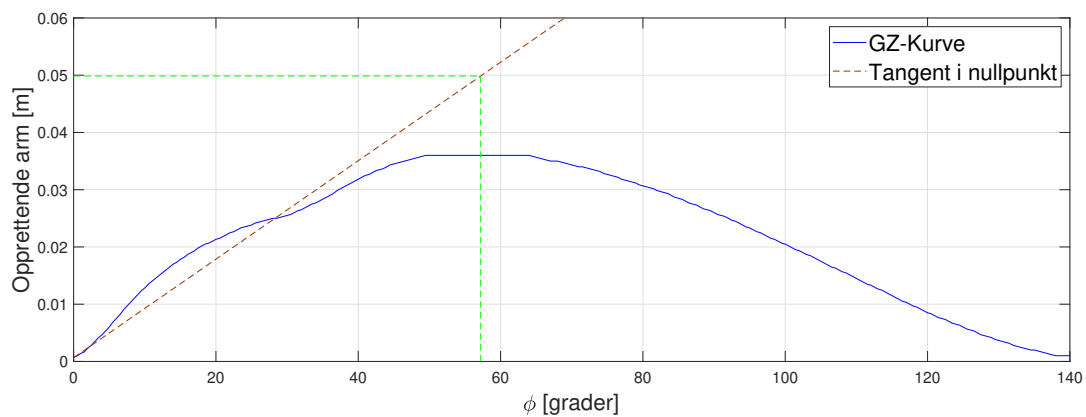
Fra resultatene gitt i Tabell 5, er det laget en kurvetilpasset linje hvor de kregende momentene er presentert som en funksjon av tangens til krengevinklene. Dette er illustrert i Figur 32. Basert på stigningstallet til den førsteordens polynomkurven, er \overline{GM} -verdien funnet ved å anvende Likning 25, som gav en \overline{GM} -verdi på 0,054 meter i modellskala.



Figur 32: Målte verdier og førsteordens polynom av det kregende momentet, som en funksjon av tangens til krengevinkelen

Den numeriske \overline{GM} -verdien er beregnet basert på strukturmodellen, hvor merdene er ballastert med lik mengde væske som for den eksperimentelle krengeprøven. Figur 33 viser den numerisk genererte \overline{GZ} -kurven. Basert på forløpet til \overline{GZ} -kurven, er det totale stabilitetsområdet til modellen stort, da

modellen vil rette seg opp til sin opprinnelige tilstand ved opp til 140° krenning. Dette kommer som et resultat av at fortøyningsbommene som er plassert på siden av modellen bidrar til et stort opprettende moment. Den maksimale momentarmen er fra kurven beregnet til å være 0,036 meter. Videre er det i origo generert en tangentlinje som strekker seg til punktet hvor tangenten er vinkelrett på x-aksen ved $57,2^\circ$ (1 radian). Basert på krysningen mellom tangenten og den vertikale linjen, er \overline{GM} -verdien for den numeriske modellen beregnet til å være på 0,050 meter [34]. Sammenlignet med den eksperimentelle \overline{GM} -verdien er det et prosentavvik på 8,0%. Dette ansees som å være et tilstrekkelig resultat, tatt i betraktning at den eksperimentelle modellen ikke er fullt avstivet i alle ledd, som den numeriske. Fra de numeriske resultatene er også tyngdepunkts plasseringene beregnet. Resultatet er gitt i Figur 34, hvor den totale tyngdepunkts plasseringen er markert med rødt. Ettersom det er en symmetrisk modell, er det vertikalt tyngdepunkt av størst interesse, som er på 0,097 meter. Fra modellen tilsvarer dette et punkt rett under senteret av prosessflåten.



Figur 33: Numerisk generert \overline{GZ} -kurve for estimering av metasenterhøyden, \overline{GM}

Total weight				
NAME	MASS	COGX	COGY	COGZ
	t	m	m	m
Light weight	0.037	0.567	0	0.168
Dead weight	0.086	0.567	0	0.066
Total	0.123	0.567	0	0.097

Figur 34: Tyngdepunkts plassering for den numeriske modellen, beregnet i HydroD

4.3 Hydrodynamiske egenskaper fra eksperimentelle og numeriske forsøk

Følgelig presenteres de hydrodynamiske egenskapene fra de eksperimentelle og numeriske forsøkene, for de tre bølgespektrene; JS1, JS2 og JS3. Ettersom hvert bølgespekter er tilnærmet lik for hver kjøring,

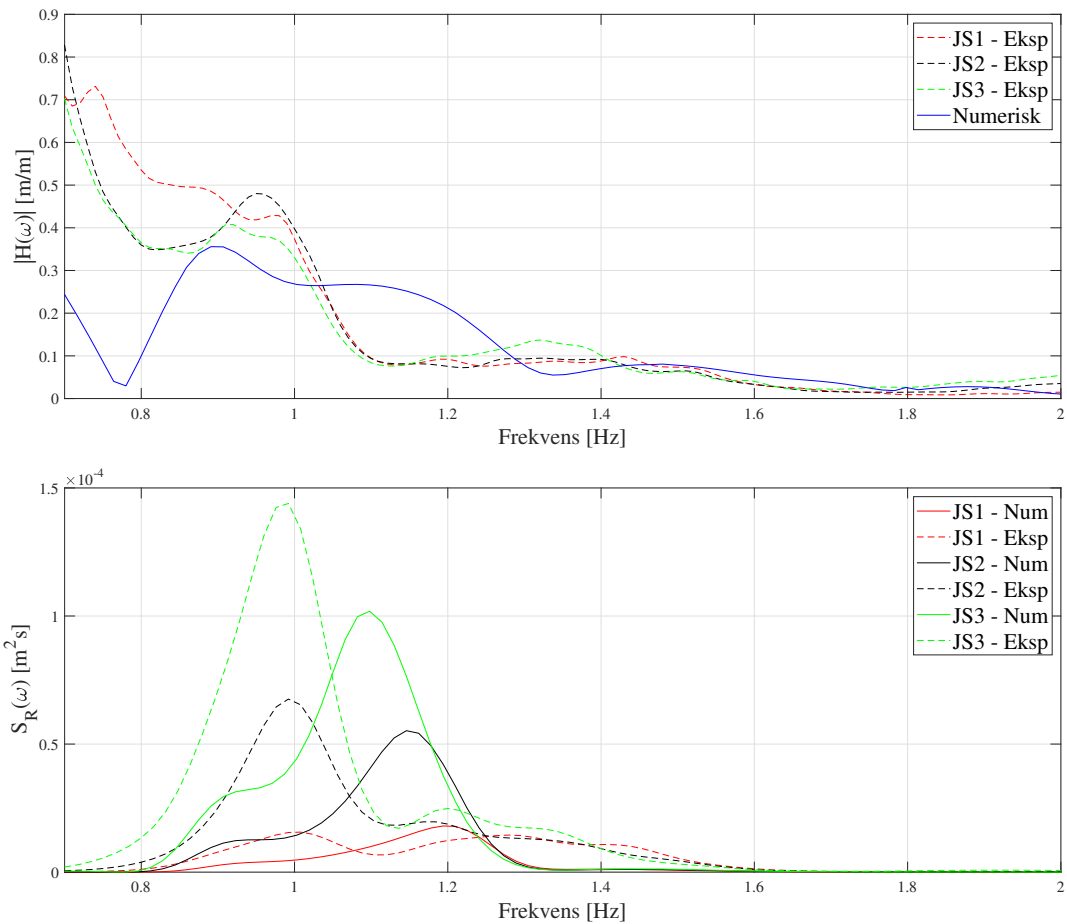
vil dette ikke presenteres utover det som er gitt i Figur 18, 19 og 20. Årsaken til at det brukes tre ulike bølgespektre er for å bedre bekrefte konsistens i målingen av RAO og responspektre. Datamaterialet sammenlignes med de numeriske resultatene for å kommentere likheter og ulikheter i resultatene.

Den første delen presenterer responsene hvor slakk forankring er brukt, i de frihetsgradene som er mest relevant for 0 graders innkommende bølgeretning; jag, hiv og stamp. I neste del presenteres responsene for 20 graders innkommende bølgeretning i frihetsgradene; svai, rull og gir. Årsaken til at det ikke presenteres resultater for jag, hiv og stamp ved 20 grader, er at det observeres større grad av veggrefleksjoner, og dermed større usikkerhet knyttet til datamaterialet. Ettersom det også er av interesse å undersøke hvordan den strammere forankringen påvirker de eksperimentelle responsene, er de mest interessante resultatene ved denne forankringskonfigurasjonen tatt høyde for i Kapittel 4.3.3.

4.3.1 RAO og responspektre ved 0 grader - Slakk forankring

Videre presenteres de eksperimentelle RAO-ene og responspektrene for de tre JONSWAP-bølgespektrene, ved 0 grader innkommende bølgeretning.

Resultater for frihetsgraden jag, er gitt i Figur 35. De eksperimentelle RAO-verdiene viser å ha en relativ god tilnærming sammenlignet med de teoretiske for alle de tre bølgespektrene ved frekvenser over 0,83 Hz. Plottet av responspektrene viser hvordan det over de lavere frekvensene er store avvik mellom de eksperimentelle og numeriske resultatene. Det mest energikonsentrerte området i responspektret observeres rundt 1 Hz for de eksperimentelle resultatene og mellom 1,1-1,2 Hz for de numeriske. Forskyvningen av energien over de lavere frekvensene kan komme som et resultat av forankringens påvirkning på systemet. Ved decay-testene ble det målt en egenfrekvens på 0,37 Hz, som tyder på at områdene med størst hydrodynamiske responser er over lavere frekvenser enn de tilstede i de tre bølgespektrene. Utviklingen i RAO-verdiene tilsier dette ved at det for frekvenser lavere enn 0,9 Hz er en vesentlig større responsverdi fra eksperimentelle resultater sammenlignet med de teoretiske. Hvorvidt de store RAO-verdiene i dette området kommer som et resultat av forankringens påvirkning og/eller tilstedeværelse av sloshing-effekter kan ikke konstanteres basert på resultatene presentert.

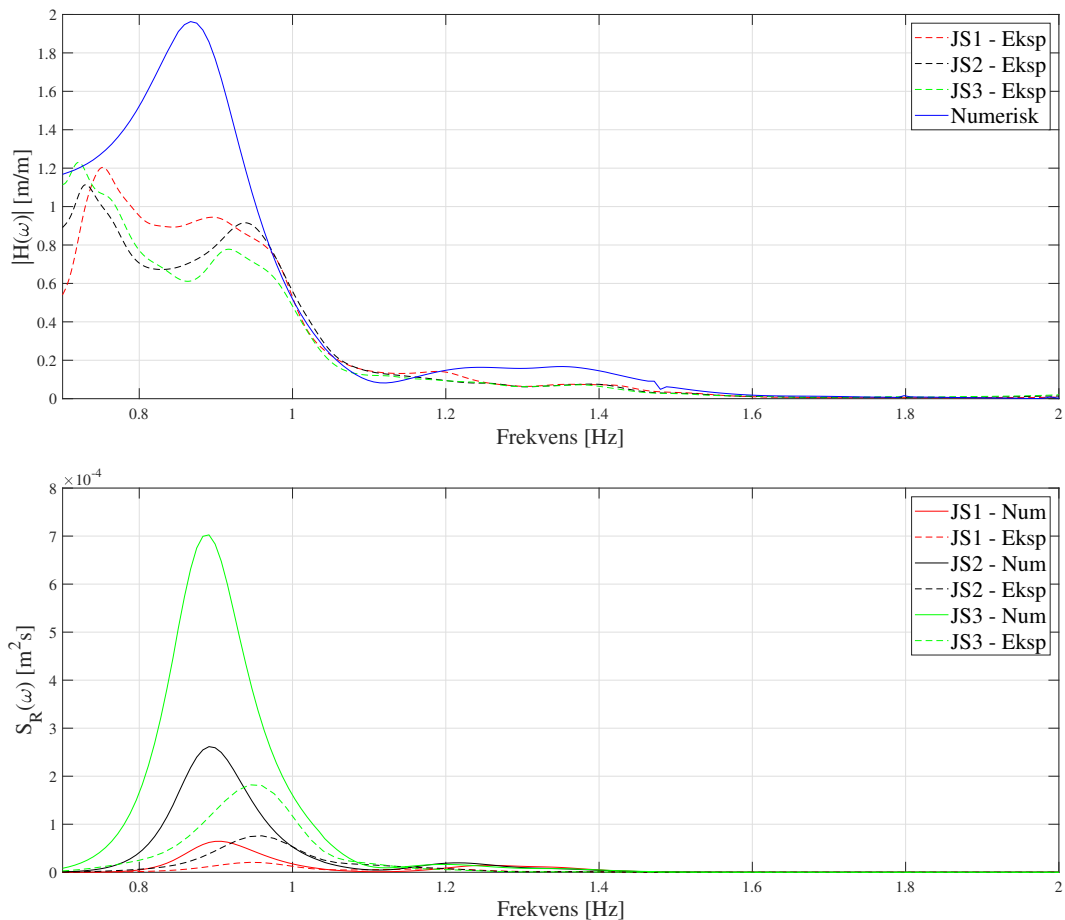


Figur 35: RAO og responspekter i jag ved 0 grader innkommende bølgeretning

Oversikt over RAO og responspekter for frihetsgraden hiv er gitt i Figur 36. Her observeres det gjennomgående lavere responsverdier for de eksperimentelle RAO-ene mellom 0,75-0,95 Hz. En av årsakene til at det observeres avvik i RAO-verdiene i dette frekvensområdet kan komme av at forankringen i de eksperimentelle forsøkene ikke tillater en fri hivebevegelse i området hvor den numeriske beregningen forventer størst responsverdier. I frekvensene over 0,95 Hz observeres det stor grad av samsvar med de eksperimentelle RAO-spektrene og det numeriske RAO-spekteret. Det gjennomsnittlige toppunktet til de tre eksperimentelle RAO-målingene er på 0,73 Hz og den kalkulererte egenfrekvensen fra HydroD er 0,84 Hz. Sammenlignet med resultatene fra decay-testene, som gav en egenfrekvens på 0,82 Hz, viser det seg å være best samsvar mellom verdiene gitt av HydroD og decay-testene. Etersom de tre målingene er såpass nærliggende kan det med stor sikkerhet sies at systemets egenfrekvens i hiv er i dette området.

På bakgrunn av RAO-målingene er responspektrene som forventet, hvor det fremvises lavere energi-

innhold for de eksperimentelle forsøkene enn for de teoretiske. Det kan likevel bemerkes en tilnærmet lik normalisert utvikling av responsspektrene mellom de teoretiske og eksperimentelle målingene. Dette styrker ytterligere konsistens i målingene for de tre eksperimentelle forsøkene, hvor det antas at en større likhet ville forekommet dersom den numeriske analysen hadde inkludert en tilsvarende forankring.

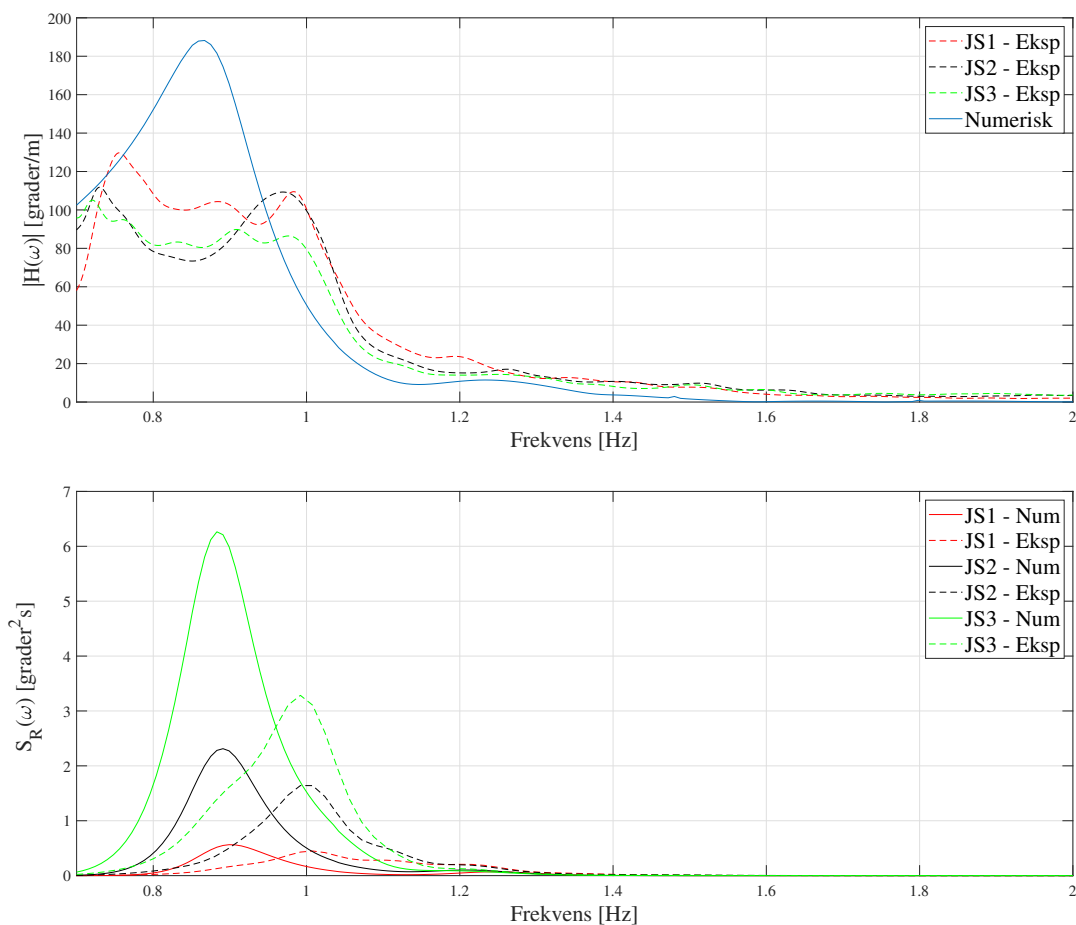


Figur 36: RAO og responspekter i hiv ved 0 grader innkommende bølgeretning

Modellens RAO-verdier og responspekter for frihetsgraden stamp er gitt i Figur 37. På samme måte som for hiv observeres det i de lavfrekvente områdene av spekteret, responsverdier som er lavere i de eksperimentelle forsøkene, sammenlignet med numerisk beregning. Dette tyder på at begge frihetsgradene kan ha blitt påvirket av forankringens stivhet i frekvensområdet hvor størst responsverdier er å forvente. Egenfrekvensen er numerisk beregnet til å være på 0,84 Hz, noe som er identiske med den numeriske beregningen for hiv. Den numeriske egenfrekvensen samsvarer også relativt bra med den beregnet fra decay-testene, som gav en egenfrekvens på 0,91 Hz. Basert på de eksperimentelle forsø-

kene observeres det to lokale toppunkt i RAO-verdiene på henholdsvis 0,75 Hz og 0,98 Hz. Ettersom det gjennomgående i alle RAO-beregningene er store responsverdier i de mest lavfrekvente områdene, kan det tyde på at en av egenmodene til sloshing-effektene også opptrer i dette området. Antagelsen om at en av egenfrekvensen til sloshing-effektene er ved ca 1 Hz samsvarer med de eksperimentelle resultatene. Ettersom den numeriske RAO-en bare er presentert med en frekvenstopp, kan det tyde på at egenfrekvensen til sloshing-effektene forventes å opptre i samme frekvensområdet som den naturlige egenfrekvensen til systemet.

Responsspektrene viser større responsverdier for de teoretiske målingene, noe som er forventet ut fra RAO-ene. Energifordelingen er størst ved rundt 1 Hz for de eksperimentelle målingene, og 0,84 Hz for de numeriske målingene. Dette tyder på at sloshing-effekter har en stor påvirkning på responsspekteret over de gitte bølgespektrene.



Figur 37: RAO og responspekter i stamp ved 0 grader innkommende bølgeretning

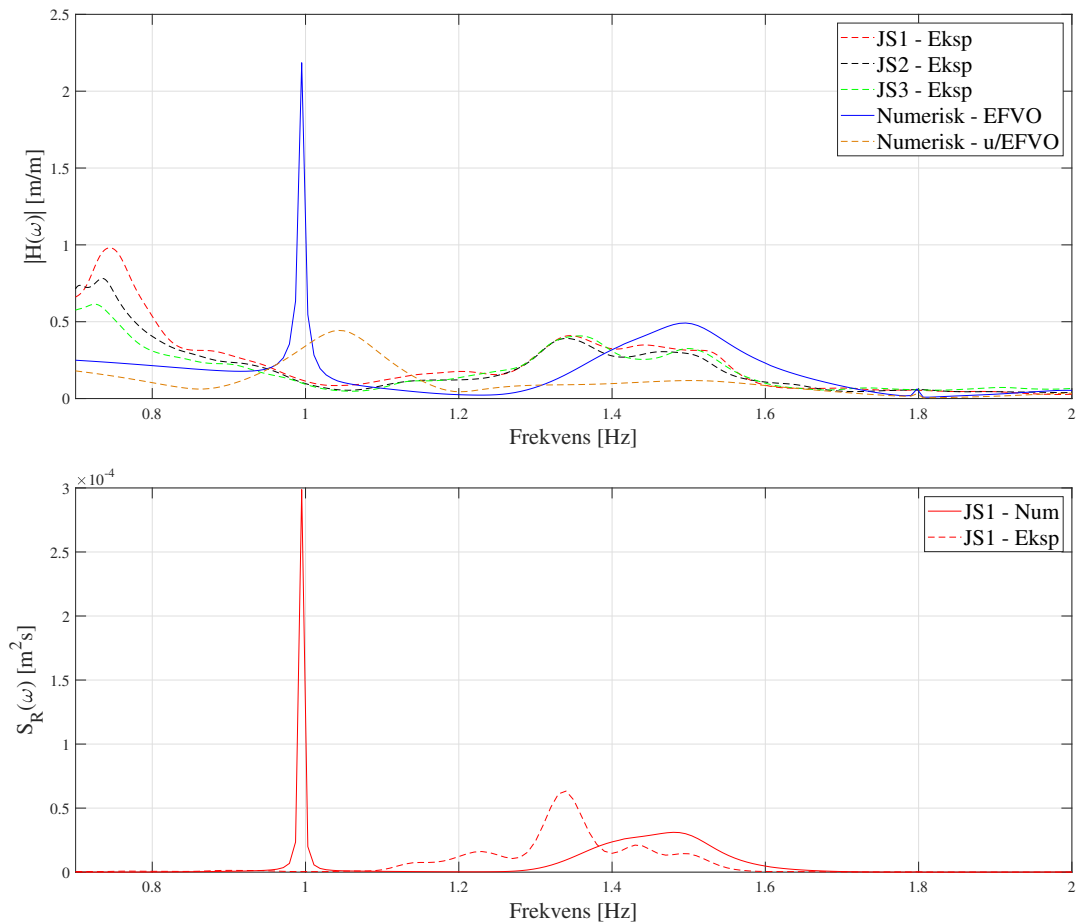
4.3.2 RAO og responspektre for 20 grader - Slakk forankring

Videre presenteres de eksperimentelle RAO-ene og responspektrene for de tre JONSWAP-bølgespektrene ved 20 grader innkommende bølgeretning.

Resultatene for frihetsgraden svai er gitt i Figur 38. Det observeres en relativ lik form mellom de eksperimentelle og den numeriske RAO-en for frekvenser over 1,2 Hz. De eksperimentelle resultatene viser et lokalt toppunkt i frekvenser på 0,73 Hz og den numeriske beregningen gir et lokalt toppunkt ved ca 1 Hz, hvor effektene av sloshing er klart fremtredende. I figuren er det også inkludert en beregning hvor effekten av fri væskeoverflate (EFVO) ikke er tatt høyde for. Det er av interesse da egenfrekvensen til systemet uten fri væskeoverflate er over en frekvens nærliggende egenfrekvensen til sloshing-effektene. Dette fører til en ytterligere forsterkning i responsverdier når effekt av fri væskeoverflate tas høyde for. Det observeres også et lokalt toppunkt i frekvens ved ca 1,35 Hz eksperimentelt og 1,5 Hz numerisk. Som nevnt i Kapittel 2.11 er det fra tidligere hydrodynamiske forsøk for lukkede merder blitt konstantert sloshing-effekter omkring 1,3 Hz. Basert på resultatene presentert tyder det på at de samme egenfrekvensene for sloshing-effekter fremtrer i modellen brukt i denne masteroppgaven.

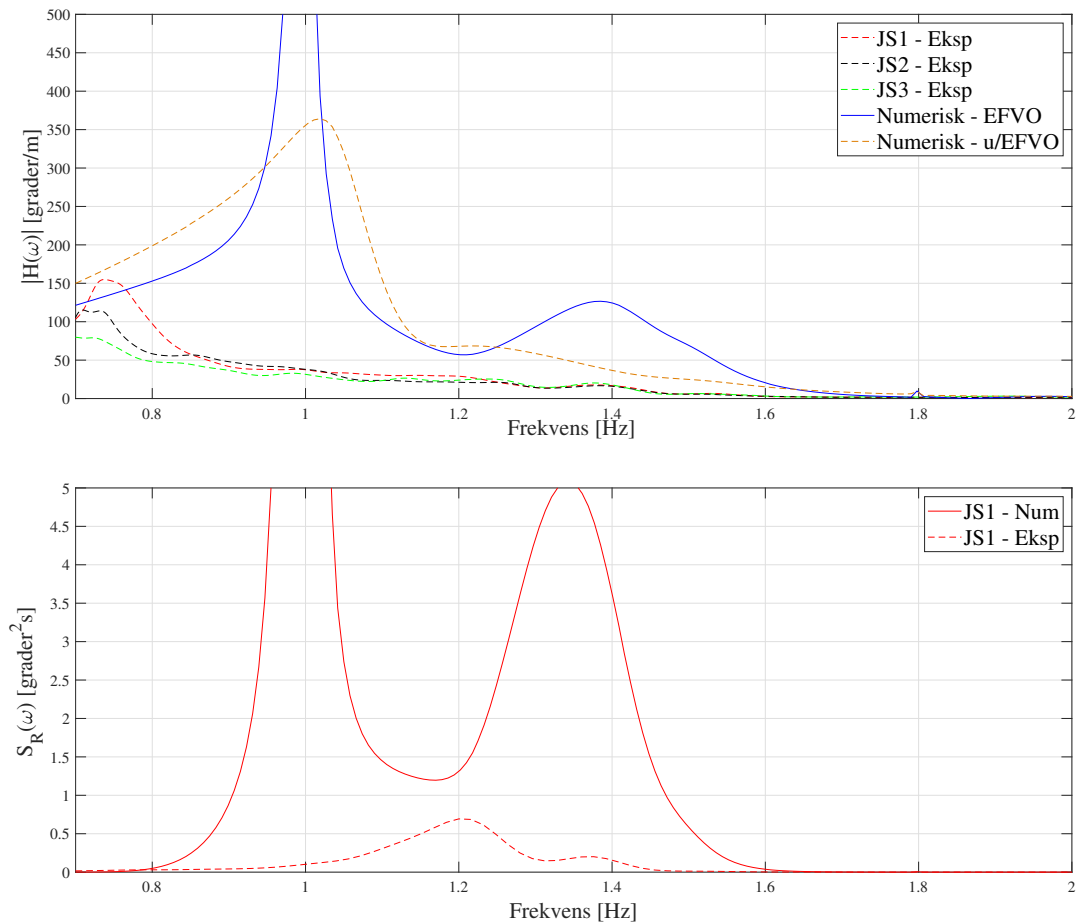
Etttersom egenfrekvensen i sloshing gir en så stor responsverdi i RAO-ene er det kun tatt høyde for JS1 spekteret i sammenligning av responspektret for frihetsgraden svai. Dette fordi de store responsverdiene fra sloshing-effektene gjør det vanskelig å gi en visuell sammenligning mellom de numeriske- og eksperimentelle resultatene for spektrene med større energiinnhold.

Målingene fra decay-testene gav en egenfrekvens langt under det som er tilstede av bølgefrequenser. Egenfrekvensen ble i decay-testene målt til 0,03 Hz, noe som er i området hvor høyere ordens bølgekrefter kan forventes for forankrede system. Basert på resultatene fra de eksperimentelle bølgeforsøkene er det sloshing-effektene som er av størst betydning for videre studier av bevegelsesresponsen i frihetsgraden svai.



Figur 38: RAO og responspekter i svai ved 20 grader innkommende bølgeretning

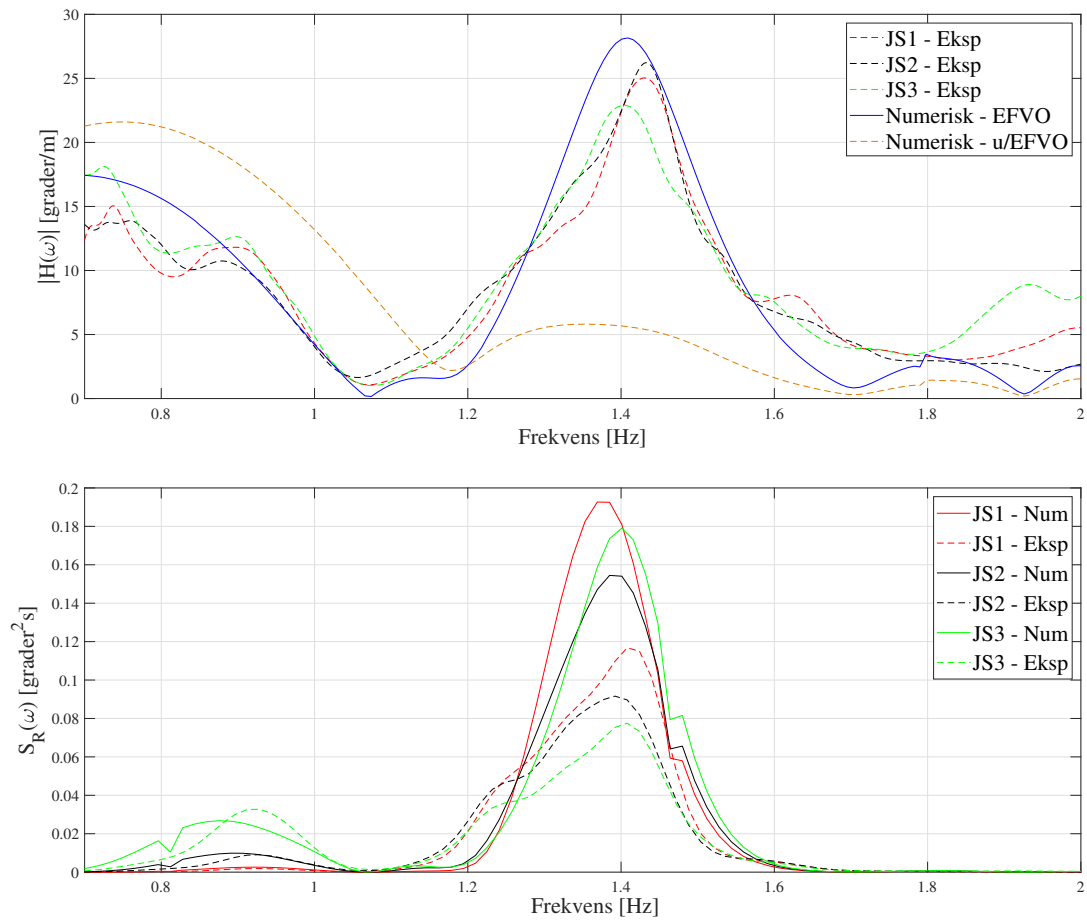
For frihetsgraden rull observeres det, som gitt i Figur 39, store avvik i sammenligning av eksperimentelle og numeriske resultater. På samme måte som for svai er det tydelige sloshing-effekter tilstede i den numeriske beregningen for frekvenser rundt 1 Hz. De eksperimentelle forsøkene gir et lokalt toppunkt ved 0,73 Hz og det numeriske estimatet gir en egenfrekvens på 1,05 Hz. På grunn av den ekstreme responsamplituden over 1 Hz, er det gjort en begrensning i akseverdien for å kunne gi en visuell sammenligning av numerisk og eksperimentell responsverdier. Den numeriske responsamplituden over 1 Hz strekker seg til 4683 deg/m, noe som tilsvarer rundt 30 ganger større responsverdier sammenlignet med de eksperimentelle toppunktene. Sammenlignet med resultatet fra decay-testene, som indikerer en egenfrekvens på 0,77 Hz, tyder det på godt samsvar mellom egenfrekvensen fra decay-testen og det lokale toppunktet fra de eksperimentelle resultatet. Resultatene fra de numeriske beregningene, tyder på at dempingen av sloshing-effektene ikke samsvarer med det som kan forventes av eksperimentelle målinger. Det knyttes derfor større usikkerhet rundt den numeriske beregningen i frihetsgraden rull.



Figur 39: RAO og responspekter i rull ved 20 grader innkommende bølgeretning

Figur 40 viser de eksperimentelle målingene og det numeriske estimatet av RAO og responspekteret i frihetsgraden gir. I figuren observeres det en tilnærmet identisk utvikling av RAO-verdiene over hele måleområdet. Fra de eksperimentelle målingene noteres det et lokalt toppunkt på 1,43 Hz, mens det numerisk beregnes til 1,41 Hz. Sammenlignet med den numeriske beregningen hvor effektene av fri væskeoverflate ikke er tatt høyde for, observeres det vesentlig lavere RAO-verdier i frekvensområdet 1,2-1,7 Hz. Dette tyder på at egenfrekvensen til sloshing-effektene er den drivende faktoren til de største responsverdiene i frihetsgraden gir.

Etttersom det i decay-testene ikke ble gjort en suksessfull måling i frihetsgraden gir, er det ikke sammenligningsgrunnlag fra disse målingene. Det er derfor et behov for videre studier for å bekrefte egenfrekvensen i denne frihetsgraden. Likevel er det mye som tyder på at den slakke forankringen brukt i de eksperimentelle forsøkene ikke påvirker systemets naturlige hydrodynamiske responser, i frihetsgraden jag.



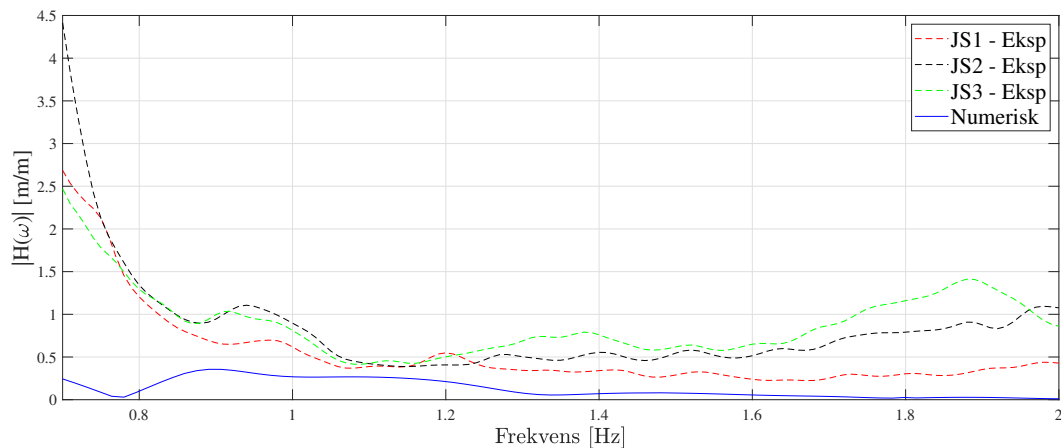
Figur 40: RAO og responspekter i gir ved 20 grader innkommende bølgeretning

4.3.3 RAO ved stram forankring

Dette delkapittelet tar for seg noen utvalgte frihetsgrader, hvor det undersøkes hvilke effekter en strammere forankring vil ha på eksperimentelle RAO-verdier. Basert på resultatene hvor slakk forankring er brukt, er det av interesse å undersøke hvilke effekter en strammere forankring vil ha på de eksperimentelle resultatene i frihetsgraden gir, ettersom den slakke forankringen tilsynelatende ikke påvirket RAO-en i nevneverdig grad. Videre presenteres det også resultater for frihetsgradene hiv, stamp og jag. Dette fordi bevegelser i de nevnte frihetsgradene er drivende for forankringskreftene som tas opp av systemet. Årsaken til at svai og rull ikke tas høyde for, er fordi de eksperimentelle resultatene ved stram forankring observeres å ikke tilføre interessant funn utover det som er presentert ved slakk forankring.

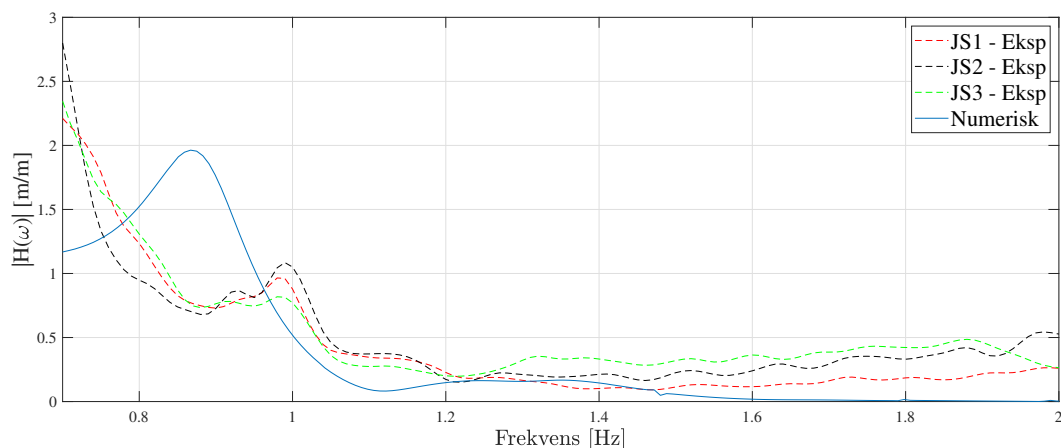
Figur 41 viser RAO for frihetsgraden jag ved 0 grader innkommende bølgeretning. Det observeres relativ stor likhet mellom RAO-verdiene for både slakk og stram forankring i de lavfrekvente område-

ne. Det observeres også konsistens i målingene, hvor avviket mellom de tre eksperimentelle RAO-ene er små. Det at det ikke er store avvik mellom de to forankringskonfigurasjonene kan komme som et resultat av at konstruksjonen, med ballast, er svært tung, og bærer store krefter i aksial bevegelse. For frekvenser mellom 0,9-2,0 Hz, observeres det relativt lave RAO-verdier for både numeriske og eksperimentelle resultater. I frekvensområdet over 1,2 Hz observeres det dog noe større RAO-verdier sammenlignet med forsøket hvor slakk forankring er brukt. Dette indikerer at den stramme forankringen i større grad påvirker den naturlige RAO-en i frihetsgraden gir, over de høyeste frekvensene i bølgespektrene.



Figur 41: RAO for jag ved 0 grader innkommende bølgeretning og stram forankring

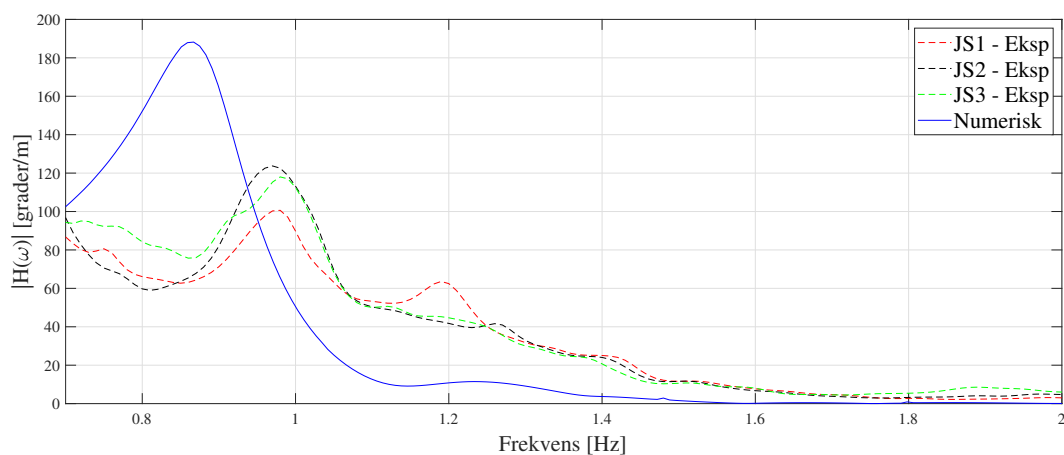
Figur 42 viser RAO for frihetsgraden hiv ved 0 grader innkommende bølgeretning. Fra figuren observeres det større RAO-verdier i de eksperimentelle resultatene over de laveste frekvensene i bølgespekteret. Det er tydelig at de eksperimentelle RAO-verdiene for frihetsgraden hiv ved stram forankring har større likhetstrekk med RAO-verdiene for jag ved stram forankring. Årsaken til dette er uvisst, men det tyder på at forankringens stramme forspenning fører til gjennomgående økte responser over lavere bølgefrequenser. Ved ca 1 Hz observeres det også et lokalt toppunkt, som er mer distinkt ved stram forankring, sammenlignet med slakk. Dette indikerer ytterligere at økningen av RAO-verdier i området rundt 1 Hz kommer som følger av sloshing-effekter.



Figur 42: RAO for hiv ved 0 grader innkommende bølgeretning og stram forankring

Figur 43 viser RAO for frihetsgraden stamp ved 0 grader innkommende bølgeretning. Her observeres det liten forskjell i RAO-verdier for frekvenser over 0,8 Hz, sammenlignet med det eksperimentelle forsøket hvor slakk forankring ble bruk. Likevel er det som for RAO-verdiene i hiv og jag ved stram forankring, en demping av responsene over frekvensene rundt 0,8 Hz.

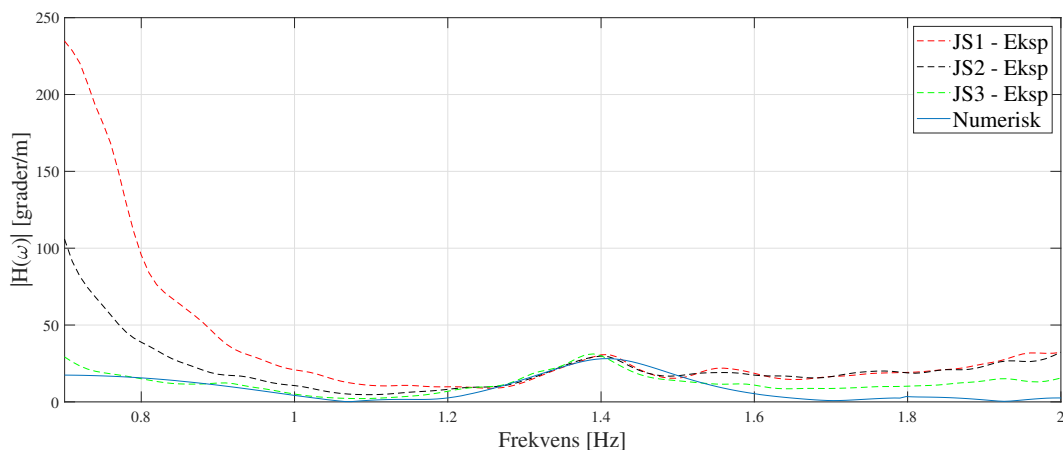
Eigenfrekvensen til sloshing-effektene fra Figur 43 er på 0,98 Hz, noe som er identisk sammenlignet med det målt ved slakk forankring. Det er også svært liten forskjell i responsverdiene i dette området, sammenlignet med slakk forankring. Dette tyder på at forankringen i seg selv ikke har stor påvirkning på RAO-verdiene med de gitte forspenningene. Den drivende faktoren til det lokale toppunktet i RAO-ene antas derfor å komme som et resultat av sloshing-effekter, som sammenfaller med den naturlige egenfrekvensen til systemet.



Figur 43: RAO for stamp ved 0 grader innkommende bølgeretning og stram forankring

Figur 44 viser RAO for frihetsgraden gir ved 20 grader innkommende bølgeretning. På samme måte som ved slakk forankring, observeres det en god tilnærming mellom de eksperimentelle resultatene, sammenlignet med den numeriske i området rundt 1,4 Hz. I de lavfrekvente og høyfrekvente områdene av spekteret, observeres det dog vesentlig større avvik, hvor de eksperimentelle resultatene gir økte RAO-verdier. Dette tyder på at tilstedeværelse av høyere ordens responser er mer fremtredende for den strammere forankringen, i betraktning av frihetsgraden gir.

Et annet interessant funn er hvordan det minst energiinnholdene spekteret, JS1, gir tydelig større RAO-verdier i de eksperimentelle forsøkene, sammenlignet med JS2 og JS3. Dette kan komme som et resultat av at mindre bevegelsesfrihet i systemet fører til at de største bølgene bryter over konstruksjonen. I tilfeller hvor bølgen bryter over konstruksjonen vil eksitasjonskreftene i større grad føre til ikke-lineære responser.



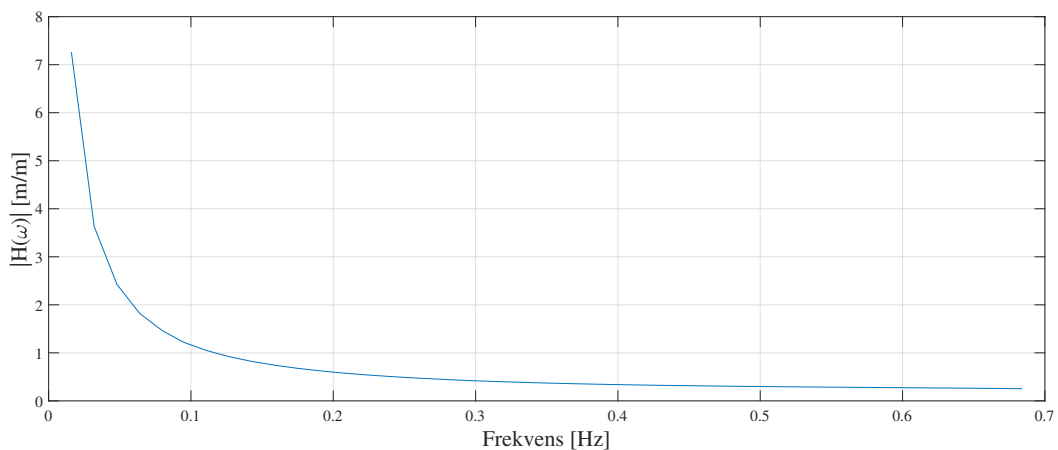
Figur 44: RAO for gir ved 20 grader innkommende bølgeretning og stram forankring

4.3.4 Numerisk RAO over lave frekvenser

Bølgespektrene JS1, JS2 og JS3 inneholder bølger i et frekvensområdet på ca 0,7-2,0 Hz. Det har derfor i sammenligningen av de numeriske og eksperimentelle RAO-ene ikke blitt presentert responser over frekvenser utenfor dette frekvensintervallet. Som Tabell 10 fra decay-testene indikerte, er egenfrekvensen for både svai og jag over lavere frekvenser enn det som bølgespektrene inneholder. Det er derfor av interesse å illustrer hvilke egenfrekvenser som forventes fra de numeriske beregningene uten forankring, og videre sammenligne med egenfrekvensene fra decay-testene.

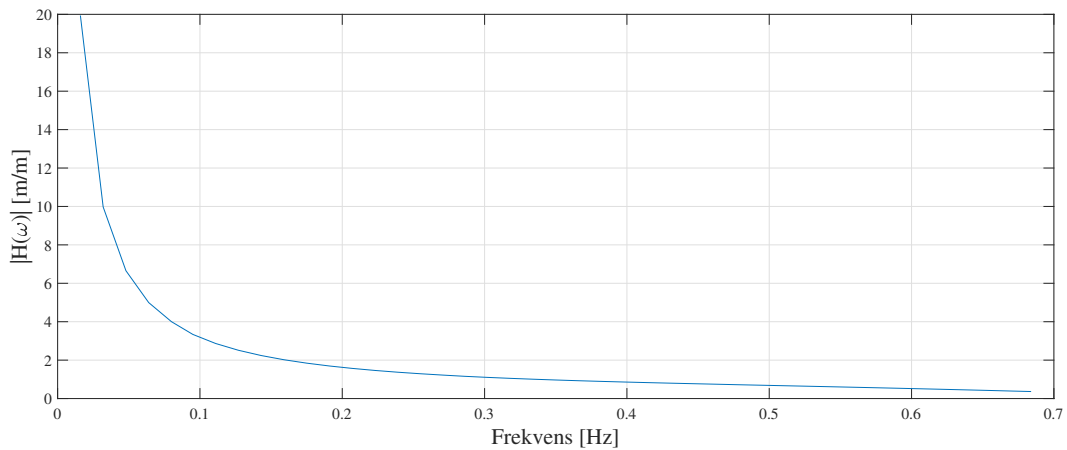
Figur 45 viser den numeriske RAO-en for frihetsgraden svai mellom 0,016 Hz til 0,7 Hz. Figuren illustrerer hvordan RAO-en konvergerer mot høye responsverdier ved de laveste frekvensene i spekteret.

Dette er en naturlig utvikling for frihetsgradene svai da alle system som ikke er forankret i økende grad vil drifte ved lavere bølgefrequenser. Det som bemerkes er hvordan egenfrekvensen til det forankrede systemet, som fra decay-testen ble målt til 0,03 Hz, kan forventes å få store responsverdier i dette området. Det må nevnes at en egenfrekvens på 0,03 Hz tilsvarer en bølgeperiode på 33,33 sekunder, som ikke kan forventes å være tilstede i en faktisk sjøtilstand. Likvel må det tas høyde for at forankrede systemer ofte kan oppleve oscillerende bevegelser i frekvenser mye lavere enn det som er tilstede i irregulære bølger. Det er derfor viktig å ta høyde for at kreftene som opptas i forankringslinene kan bli svært store i dette området.



Figur 45: Numerisk RAO i svai for lavfrekvent område

Figur 46 viser den numeriske RAO-en for frihetsgraden jag. På samme måte som for svai observeres det en konvergering mot høye responsverdier over de laveste frekvensene i spekteret. Sammenlignet med egenfrekvensen fra decay-testen som gav en egenfrekvens på 0,37 Hz, er det ingen korrelasjon mellom med de numeriske og eksperimentelle resultatene. Likvel tyder dette på at lavfrekvente bølger vil føre til svært store spenninger i forankringskrefter, og må tas forbehold om ved design av anlegget. Resultatet tyder også på at forankringen påvirker den naturlige egenfrekvensen i frihetsgraden jag. Dette er et viktig resultat å presisere da riktig design av forankringskonfigurasjoner vil kunne føre til vesentlig mindre opptatte krefter i forankringslinene.



Figur 46: Numerisk RAO i jag for lavfrekvent område

4.4 Sammenfatning av resultater

Tabell 11 gir en sammenfatning av de eksperimentelle og numeriske RAO-beregningene i denne masteroppgaven. Tabellen presenterer de målte egenfrekvensene fra decay-testene, de numerisk beregnede egenfrekvensene samt de lokale toppunktene i RAO-er fra bølgeforsøk ved 0 grader innkommende bølgeretning. Tabellen belyser hvilke metodikker som gir best samsvar med hverandre og er markert i grønt.

Frihetsgrad	Egenfrekvens - Decay-test	Toppunkt - Eksperimentelle bølgeforsøk	Egenfrekvens - Numerisk bølgeforsøk
Jag	0,37	-	-
Svai	0,03	1,35	1
Hiv	0,82	0,73	0,84
Rull	0,77	0,73	1,05
Stamp	0,91	0,98	0,84
Gir	-	1,43	1,41
Enhet	Hz	Hz	Hz

Tabell 11: Sammenfatning av resultater fra decay-test og eksperimentelle og numeriske bølgeforsøk for 0 grader innkommende bølgeretning

5 Konklusjon

I denne masteroppgaven er det undersøkt hvilke hydrodynamiske responser en nedskalert forenklet modell av oppdrettsanlegget OceanTECH har under tre ekstreme sjøtilstander. I den forbindelse har det også vært av interesse å undersøke hvilke effekter forankring har på de hydrodynamiske responsene. Det er derfor benyttet to forankringskonfigurasjoner i de eksperimentelle forsøkene; en stram og en slakk forankring, for 0 og 20 grader innkommende bølgetning. Resultatene fra de eksperimentelle forsøkene er sammenlignet med numeriske beregninger, hvor det ikke er benyttet forankring. For å bekrefte at tyngdepunktssatsene i den eksperimentelle og numeriske modellen samsvarer, er det gjort beregninger for å kartlegge systemets \overline{GM} -verdi. Resultatene fra den numeriske og eksperimentelle beregningen gav en \overline{GM} -verdi på henholdsvis 0,054 og 0,050 meter som ansees som å være tilstrekkelig for sammenligning av hydrodynamiske responser.

Resultater fra decay-testene viser at de naturlige svingningene til det forankrede systemet i stor grad representerer et lineært dempet system for alle frihetsgrader med unntak av gir. For hivbevegelsen knyttes det større usikkerheter til målingene på grunn av bølgeinterferens fra tankveggene. Sammenlignet med de eksperimentelle bølgeforsøkene er det stor grad av korrelasjon mellom egenfrekvensene fra decay-testene og de lokale toppunktene i RAO-verdiene, i frihetsgraden rull og stamp. Ettersom egenfrekvensene i frihetsgradene jag og svai er utenfor bølgefrekvensene fra forsøket, gir disse målingene ikke grunnlag for sammenligning med eksperimentelle RAO-er.

Sammenligning av eksperimentelle og numeriske bølgeforsøk viser at det er gjennomgående store avvik over det lavere frekvensområdet i spektrene. Dette kan komme som et resultat av tverrgående bølgeinterferens fra bølgetanken, som forventes å være mest fremtredende over frekvenser rundt 0,7 Hz. Størst samsvar observeres i frekvenser over 1,2 Hz med unntak av rull, hvor det er lite korrelasjon mellom den numeriske beregningen og de eksperimentelle forsøkene. For frihetsgraden gir, hvor den største delen av spekterets responser er over de høyere frekvensene, observeres det en stor grad av korrelasjon mellom numeriske og eksperimentelle resultater, ved slakk forankringsforspenning. Dette tyder på at slakk forankring ikke påvirker den naturlige bevegelsen til systemet over det høyere frekvensområdet.

RAO-responser fra forsøk med stram forankringsliner gir som forventet, utslag i større avvik mellom numerisk og eksperimentelle beregninger. Avvikene er spesielt fremtredende over de høyeste og laveste frekvensene, for henholdsvis hiv og gir. Resultatene viser tydelig at stram forankring i større

grad påvirker systemets frie bevegelsesrespons i disse frekvensområdene hvor det kan oppstå større responsverdier enn ved slakk forankring.

Fra empirisk data ble det antatt at de mest påvirkende egenmodene til sloshing-effektene ville ligge rundt 1 Hz og 1,3 Hz. Dette samsvarer godt med de eksperimentelle RAO-ene hvor det for hiv og stamp er tydelige lokale toppunkt over frekvenser i området rundt 1 Hz. For frihetsgradene svai og rull ble det også numerisk beregnet å være store påvirkninger av sloshing-effekter ved ca 1 Hz. For frihetsgradene som ble testet ved 20 graders innkommende bølgeretning, ble det observert lokale toppunkt ved rundt 1,4 Hz. Dette tyder på at de samme sloshing-effektene kan være til stede for forsøksmodellen brukt i denne oppgaven. Hvordan sloshing-effekter skaper en ekstrem respons dersom den sammenfaller med systemets egenfrekvens er illustrert i resultatene for frihetsgraden rull. Videre analyser av slike fenomen vil være viktig i fremtidige studier av forsøksmodellen.

Konkluderende er det på bakgrunn av dette studiet, ikke tilstrekkelig nok grunnlag for å anta at førsteordens bevegelsesrespons fra numeriske beregninger på en tilstrekkelig måte simulerer den dynamiske oppførsel til oppsettet brukt i eksperimentelle forsøk. Hovedårsaken til dette antas å komme som et resultat av at de ekstreme sjøtilstandene har høyere ordens bølgekrefte, som i større grad påvirker et forankret system over de bølgelastene brukt i denne masteroppgaven. En annen faktor som vil føre til avvik, er hvordan sloshing-effekter numerisk beregnes ved potensial strømmingsteori, hvor demping ikke tas høyde for. Resultatet av dette er at numeriske beregninger forventer større responsverdier, samt en mulig forskyvning av egenfrekvensene i forhold til de eksperimentelle resultatene. Det vil derfor være nødvendig med videre studier av forsøksmodellen, hvor det i de eksperimentelle forsøkene bør være et fokus på sloshing-effekter og beregninger av egenfrekvenser og demping. Avsluttende, er det basert på de hydrostatiske beregningene, stor grad av samsvar mellom den eksperimentelle og numeriske modellen, hvor avviket mellom målingene bare er på 4 mm. Dette indikerer at en kombinasjon av eksperimentelle og numeriske hydrostatiske beregninger er anvendelig for tester i modellskala.

6 Videre arbeid

Å kartlegge hydrodynamiske responser i ekstreme sjøtilstander er en kompleks og iterativ prosess. Videre eksperimentelle og numeriske studier er derfor nødvendig for å kunne konkludere de hydrodynamiske egenskapene til OceanTECH anlegget. Følgelig presenteres anbefalinger til videre arbeid for forsøksmodellen brukt i denne masteroppgaven:

- For å kartlegge de dynamiske effektene fri væskeoverflate har på den totale bevegelsesresponsen, er det nødvendig å gjennomføre studier av sloshing-effekter. I et slikt studie vil det vært interessant å først beregne egenmodene og egenfrekvensene til sloshing-effektene i en enkelt merd. Ulike fyllingsgrader kan benyttes for å redegjøre om en endring i egenmoder og egenfrekvenser opptrer. For et videre studie av det totale anlegget anbefales det å gjennomføre sloshing-analyser i tidsdomenet, for å studere effektene av faseforskyvningen mellom væskebevegelsene inni de to merdene. Dette vil gi nyttig informasjon i vurderingsgrunnlag av RAO-verdiene i de eksperimentelle forsøkene, samt belyse hvorvidt numeriske beregninger av sloshing-effekter samsvarer.
- For beregninger av RAO og responsspektre anbefales det i videre studier å gjennomføre forsøk i mindre ekstreme sjøtilstander. Dette vil gi en bedre tilnærming ved sammenligning av numerisk og eksperimentell data, da responsene i større grad forventes å ha et lineært forhold til bølgene. Spesielt viktig er det å tilse at innkommende bølger ikke er brytende, og at de genererte bølgespektrene i stor grad samsvarer med de eksperimentelle. Dersom numerisk og eksperimentelt bølgespekter samsvarer, kan det være hensiktsmessig å bruke det numeriske bølgespekteret sammen med de eksperimentelt målte bevegelsesresponsene for å generere eksperimentelle RAO-verdier.
- I videre RAO-beregninger av forsøksmodellen, er det også interessant å teste det forankrede systemet over lavfrekvente bølgespektre. For frihetsgradene jag observeres det egenperioder langt under de bølgefrequensene som er representativt i denne masteroppgaven. Ettersom bevegelser i jag forventes å gi store bidrag til de totale kreftene i forankringslinene, vil det være nødvendig å beregne både RAO og forankringskrefter over systemets egenfrekvens i jag. Ulike forankringskonfigurasjoner kan forventes å endre egenfrekvensene i jag, så forskjellige forankringsmetoder og forspenninger bør benyttes. Basert på studiet gjort i denne oppgaven, vil det for numerisk validering være nødvendig å modellere samme forankringskonfigurasjon som brukt under eksperimentelle forsøk.

7 Referanser

- [1] Norges Sjømatråd. *Sjømateksport for 107,3 milliarder kroner i 2019*. <https://seafood.no/aktuelt/nyheter/sjomateksport-for-1073-milliarder-kroner-i-2019/>, 2020. Hentet 14.12.2020.
- [2] T. Olafsen et al. *Verdiskaping basert på produktive hav i 2050*. https://www.sintef.no/globalassets/upload/fiskeri_og_havbruk/publikasjoner/verdiskaping-basert-pa-produktive-hav-i-2050.pdf/, 2012. Hentet 15.12.2020.
- [3] Norsk Industri. *Veikart for havbruksnæringen*. https://www.norskindustri.no/siteassets/dokumenter/rapporter-og-brosjyrer/veikart-havbruksnaringen_f41_web.pdf, 2019. Hentet 14.04.2021.
- [4] Nærings og fiskeridepartementet. *602 millioner kroner til mer innovasjon i næringslivet*. <https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/602-millioner-kroner-til-mer-innovasjon-i-naeringslivet?publisherId=14943704&releaseId=17897595>, 2020. Hentet 15.12.2020.
- [5] Stiim Aqua Cluster. *Bærekraftig vekst med lukkede anlegg i sjø*. <https://stiimaquacluster.no/wp-content/uploads/2021/04/Stiim-Rapport-Flytende-Lukket-Oppdrett-i-sjo.pdf>, 2021. Hentet 29.05.2021.
- [6] Lage Bøhren. *Varsler ny havbruksstrategi: Vil ha mer lukket oppdrett i Norge*. <https://e24.no/hav-og-sjoemat/i/kR8k4Q/varsler-ny-havbruksstrategi-vil-ha-mer-lukket-oppdrett-i-norge>, 2021. Hentet 14.04.2021.
- [7] Atlantic Sapphire ASA. *Annual Report 2020*. <https://atlanticsapphire.com/wp-content/uploads/2021/04/20210414-Atlantic-Sapphire-ASA-Integrated-Annual-ESG-Report-for-2020.pdf>, 2020. Hentet 29.04.2021.
- [8] Hauge Aqua. *Egget*. <https://haugeaqua.com/technology/egget>. Hentet 14.04.2021.
- [9] Nekkar. *Starfish*. <https://finansavisen.no/nyheter/industri/2021/01/03/7601960/nekkar-sikter-seg-inn-mot-oppdrettsbransjen>, 2021. Hentet 14.04.2021.
- [10] DNV. *Software products overview*. <https://www.dnv.com/software/products/sesam-products.html>. Hentet 14.04.2021.

- [11] M. Riple. *Numerisk og eksperimentell analyse av forankringskrefter for et semilukket oppdrettsanlegg*, Universitetet i Bergen, 2021.
- [12] J.M.J. Journée og W.W Maisse. *Offshore Hydromechanics*. Delft University of Technology, 2001.
- [13] B. Pettersen. *Marin Teknikk 3 Hydrodynamikk*. Akademika, 2019.
- [14] O.T. Gudmestad. *Marine Technology and Operations*. WIT Press, 2015.
- [15] DNV. *Environmental Conditions and environmental loads*.
<https://rules.dnv.com/docs/pdf/dnvpmp/codes/docs/2014-04/RP-C205.pdf>, 2014. Hentet 12.04.2021.
- [16] D.J. Thomson. *Spectrum estimation techniques for characterization and development of WT4 waveguide—I*. *Bell System Technical Journal*, 1977.
- [17] Norsk Standard. *Flytende oppdrettsanlegg - Krav til utforming, dimensjonering, utførelse, installasjon og drift*, 2003.
- [18] U.S. Army Corps of Engineers. *Coastal Engineering Manual – Part II*. Military Bookshop, 2002.
- [19] B.M Sumer et al. *Hydrodynamics around cylindrical structures*, volume 26. World scientific, 2006.
- [20] Stenfelt. G. *Introduksjon til Marinteknikk - MAS124*.
<https://www.hvl.no/om/organisering/fin/institutt-for-maskin--og-marinfag/>, 2019. Hentet 16.04.2021.
- [21] A.F. Molland. *The Maritime Engineering Reference Book*. Butterworth-Heinemann, 2008.
- [22] E.C. Tupper. *Introduction to Naval Architecture*. Butterworth-Heinemann, fourth edition, 2004.
- [23] K.J. Rawson and E.C. Tupper. *Basic Ship Theory*. Butterworth-Heinemann, fifth edition, 2001.
- [24] DNV. *Rules for classification - Ships*.
<https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2019-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch15.pdf>, 2019. Hentet 12.05.2021.
- [25] Nærings- og fiskeridepartementet. *Forskrift om stabilitet, vanntett oppdeling og vanntette/værtette lukningsmidler på flyttbare innretninger*.
https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1991-12-20-878#KAPITTEL_4, 2018. Hentet 16.04.2021.

- [26] D. Kristiansen et al. *Sjøegenskaper og forankring til flytende lukkede oppdrettsanlegg*. <https://www.fhf.no/prosjekter/prosjektbasen/901287/>, 2018.
- [27] A. Nordrum. *Dynamisk respons og fortøyningskrefter på et semilukket oppdrettsanlegg*, Universitetet i Bergen, 2020.
- [28] HVL. *MarinLab*. <https://www.hvl.no/marinlab>. Hentet 17.03.2021.
- [29] Edinburgh Designs. *Wave Generating Software*. <http://www4.edesign.co.uk/product/wave-generating-software/>. Hentet 17.03.2021.
- [30] O.M.S. Glesnes. *The dynamic behaviour of a closed fish farm*, Universitetet i Bergen, 2019.
- [31] Qualisys AB. *Marine manual*. https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Manualer_utstyr/QTM%20Marine%20manual%2020081211.pdf, 2008. Hentet 05.04.2021.
- [32] S. Steen. *Experimental Methods in Marine Hydrodynamics*, 2014.
- [33] MathWorks. *Pwelch*. <https://se.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html>. Hentet 02.05.2021.
- [34] DNV. *Sesam-Feature-Description*. https://www.dnv.com/Images/Sesam-feature-description_tcm8-58834.pdf, 2019. Hentet 08.10.2020.
- [35] C. Kosacki. *Investigation of Sloshing Inside Closed Aquaculture Plants*, NTNU, 2017.
- [36] DNV. *Wave Analysis by Diffraction and Morison theory*. <https://www.dnv.com/services/frequency-domain-hydrodynamic-analysis-of-stationary-vessels-wadam-2412>, 2017. Hentet 04.03.2021.