
**Numerisk og eksperimentell analyse
av forankringskrefter for et
semilukket oppdrettsanlegg**



Mathias Riple

Masteroppgave i Havteknologi

Juni 2021

**Universitetet i Bergen
Institutt for fysikk og teknologi**

Sammendrag

Norsk havbruksnæringen genererer enorme verdier samtidig som den står ovenfor betydelige utfordringer knyttet til miljø, rømming og luseproblematikk. For å løse utfordringene er det behov for ny teknologi i bransjen. Et av konseptene som forsøker å løse mange av problemene bransjen står ovenfor er OceanTECH som er utviklet av Nordic Blu Technology. Konseptet baserer seg på semilukkede oppdrettsmerder som er bygget i betong.

Denne masteroppgaven har som hovedmål å studere forankringskrefter for den globale forankringen for OceanTECH. Videre studeres også bevegelse i hiv og jag ettersom dette er de frihetsgradene som antas å ha størst påvirkning på forankringskreftene ved 0° bølgeretning. Justeringsparameter for oppgaven er tre ulike bølgespektre og to forspenninger i forankringslinene. Alle undersøkelser gjøres både eksperimentelt og numerisk. Eksperimentelle forsøk benytter nedskalert modell mens numeriske beregninger gjøres i fullskala. Resultatene blir skalert og sammenlignet. Hensikten med oppgaven er å gi verdifull informasjon ved design av forankringssystemet til OceanTECH, med hovedfokus på å benytte en grunn forankring.

Resultatene for begge metodene viser at oppdrettsanleggets bevegelse ved økt forspenning i forankringslinene fører til stor bevegelsesreduksjon i jag. Det er derimot noe forskjell mellom metodene for bevegelse i hiv og numerisk metode viser tilnærmet ingen bevegelsesreduksjon i denne bevegelsen ved økt forspenning. Resultatene fra bevegelsesanalysen viser at økt systemstivhet som resultat av økt forspenning i ulik grad påvirker bevegelser i hiv og jag.

Kraftresponser for begge metoder viser at økt signifikant bølgehøyde gir større krefter. Begge metodene viser gjennomgående stor økning i gjennomsnittskrefter ved økt forspenning. Videre registreres det ubetydelig eller ingen relativ økning i maksimalkrefter ved økt forspenning.

Resultat fra kraftmålinger er også presentert i frekvensplanet. Resultatene viser godt samsvare mellom de to metodene og økt signifikant bølgehøyde gir mer spektral energi. Videre viser resultatene at økt forspenning også gir en stor økning i spektral energi. Det observeres tydelig kraftresponser ved beregnet egenfrekvens for hiv og jag. Resultatene for analysen i frekvensplanet viser også at for slakk forankring vil det største kraftbidraget være ved lave frekvenser utenfor bølgespekterets frekvensintervall. Dette viser at det er viktig å ta hensyn til resonans mellom bølgedriftskrefter og egenfrekvens ved design av forankringssystem.

Resultatene fra denne oppgaven viser at det er gode grunner for å benytte forankringssystem med mulighet for justering av forspenning. Dette kan bidra med å optimalisere forankringskrefter og bevegelse.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for fysikk teknologi (IFT) ved Universitetet i Bergen (UiB) skoleåret 2020/2021. Oppgaven er en del av det toårige masterprogrammet i Havteknologi som er et samarbeidsstudie mellom UIB og Høgskulen på Vestlandet (HVL).

Jeg ønsker spesielt å takke mine veiledere fra HVL, førsteamanuensis Gloria Stenfelt og førstelektor Thore Clifford Thuestad for god veiledning og støtte gjennom prosjektet. En takk sendes også til Børge Hamre, professor ved UIB.

Videre ønsker jeg å takke labpersonell ved MarinLab med Harald Moen i spissen for god hjelp til planlegging og gjennomføring av de eksperimentelle forsøkene.

En stor takk sendes også til Ole Thomas Enge i TechnipFMC som har bidratt med gode innspill gjennom hele prosjektet.

Avslutningsvis vil jeg rette en stor takk til medstudent, Bendik Sagstad og familie for uvurderlig støtte.

Innhold

Sammendrag	i
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon	1
1.2 OceanTECH	2
1.3 Målsetting for oppgaven	4
1.4 Oppgavens metoder	5
1.5 Avgrensninger og forenklinger	5
2 Teori	7
2.1 Frihetsgrader	7
2.2 Bølgeteori	7
2.2.1 Regulære bølger	8
2.2.2 Lineær potensialteori	9
2.2.3 Grensebetingelser	10
2.2.4 Dispersjonsrelasjon	13
2.2.5 Irregulære bølger	14
2.2.6 Bølgespekter	15
2.2.7 Jonswap bølgespekter	16
2.3 Bølgelaster	17
2.3.1 Morison	19
2.3.2 Diffraksjon	20
2.3.3 Bølgedriftskrefter	21
2.4 Bevegelse for system med en frihetsgrad	22
2.4.1 Tvungen dempet system	23
2.4.2 Decay-test	25
2.5 Forankring	26
2.5.1 Ulike forankringstyper	27
2.5.2 Tradisjonell forankring av oppdrettsanlegg	28
2.5.3 Forankringskrefter	30
2.6 Demping for flytende konstruksjoner	32
2.7 Skalering	34
2.8 Forskrift om krav til teknisk standard for flytende akvakulturanlegg (NS9415)	36

3	Eksperimentell metode	37
3.1	Dimensjonerende bølge	37
3.2	Modellbeskrivelse og testoppsett	39
3.3	Ballastering	43
3.4	Strekktest	44
3.5	Hydrodynamisk testfasilitet	45
3.5.1	Bølgegenerator	45
3.5.2	Bølgehøydemåler	46
3.5.3	Kamerasystem for bevegelsesdeteksjon	47
3.5.4	Lastceller	48
3.6	Databehandling	51
3.7	Feilkilder og usikkerhet	54
4	Numerisk metode	56
4.1	Numerisk programvare	56
4.2	Modellering	57
4.3	Hydrodynamisk analyse	59
4.4	Forankringsanalyse	61
4.5	Analyse for å bestemme elementstørrelse	63
4.6	Databehandling	65
4.7	Feilkilder og usikkerhet	66
5	Resultater	68
5.1	Decay-test	68
5.2	Analyse i tidsplanet	69
5.2.1	Bevegelsesanalyse ved slakk og stram forankring	70
5.2.2	Analyse av forankringskrefter	73
5.3	Analyse i frekvensplanet	76
5.3.1	Kraftrespons ved JS1	77
5.3.2	Kraftrespons ved JS3	78
5.3.3	Sammenfatning av kraftanalyse i frekvensplanet	79
6	Konklusjon	81
7	Videre arbeid	83
8	Referanser	84

1 Innledning

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Fiskerinæringen er en av de aller største næringene i Norge både når det gjelder eksportvolum og verdi. Bare i 2020 ble det eksportert 2,71 millioner tonn norsk sjømat for en verdi av 105,7 milliarder kroner. Dette tilsvarer 37 millioner måltider hver eneste dag, og det leveres til 146 markeder over hele verden. I 2020 var Polen, Danmark, Frankrike og Storbritannia de fire største importørene av norsk sjømat. [1]. Norge produserer hele 33% av all sjømat i verden og ved å se på mengde fisk pr. innbygger er vi desidert størst i verden [2].

Innen sjømat står havbruk av laks og ørret i 2020 for 70 % av den totale eksportverdien og 45 % av det totale eksportvolumet. Samtidig har oppdrettsnæringen opplevd en stagnering i produksjonsvolum i perioden etter 2012. Dette skyldes blant annet utfordringer knyttet til å oppfylle myndighetskrav med tanke på fiskevelferd, lus og miljø. Kravene som stilles er en viktig bidragsyter for å sikre en sunn og bærekraftig drift også lang tid fremover. Videre er dette med på å opprettholde og videreutvikle det generelt gode ryktet norsk fiskeri og havbruk har.

Havbruksnæringen og regjeringen har de seneste årene jobbet hardt med å sette fokus på FNs bærekraftsmål. Spesielt er mål nummer 2, 3, 8, 9, 12, 13, 14 og 15 viktig i denne sammenheng. Disse bærekraftsmålene går blant annet ut på å utrydde sult, sette fokus på matsikkerhet og sunn helse, bekjempe klimaendringer samt å bruke marine ressurser på en forsvarlig og bærekraftig måte [3]. Norsk havbruksnæring har mange gode kvaliteter som svarer til bærekraftsmålene. Dette vises blant annet ved at norske selskaper innen akvakultur gjentatte ganger topper «The Coller Fairr Protein Producer index» [4]. Dette er en indeks som måler proteinprodusenter over hele verden opp mot ulike kriterier. Deriblant bruk av antibiotika, utslipp og forsøpling, matsikkerhet, bærekraftig produksjon, fiskevelferd og de overnevnte bærekraftsmålene til FN.

Det er knyttet mange utfordringer til tradisjonelle oppdrettsanlegg. Noen av de mest kjente utfordringene er forurensing av avfall og fiskefor til miljøet, rømming samt deformasjon og groe av not.

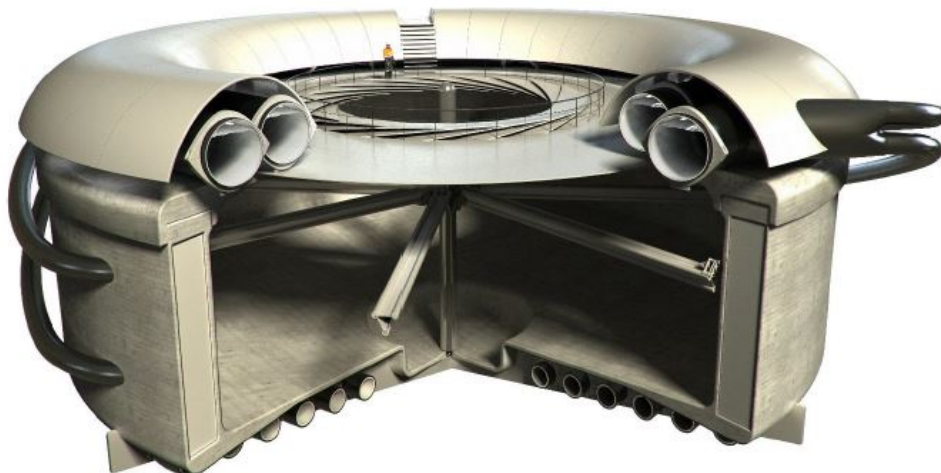
For at næringen skal ha en sunn vekst der klima, miljø, bærekraft og fiskevelferd blir ivaretatt, er det helt avgjørende med nye teknologiske fremskritt og innovasjon.

1.2 OceanTECH

Norske myndigheter ønsker å legge til rette for nytenkning og innovasjon i oppdrettsnæringen. Derfor ble det i 2015 opprettet en ordning der det er mulig å søke myndighetene om utviklingstillatelse. Dette er en midlertidig konsesjonstillatelse som blir gitt til prosjekter som kan bidra til å løse en eller flere utfordringer knyttet til areal og miljø [5].

OceanTECH er et teknologikonsept som er utviklet av Nordic Blu Technology. Konseptet er vist i Figur 1 og det er søkt om totalt ti utviklingskonsesjoner, noe som tilsvarer maksimal tillatt biomasse på 7800 tonn. Konseptet baserer seg på *semilukkede oppdrettsmerder* som er bygget i betong. Oppdrettsanlegget skal være modulbasert hvor det er mulig å flytte merder til- og fra ulike lokaliteter ved behov. Det at de er semilukket betyr at selve merdene er lukket, men at det kontinuerlig hentes nytt friskt vann fra dypet. Denne kombinasjonen gjør det mulig å unngå utslipp av avfall til miljøet og det vil eliminere risikoen for rømning. Ettersom det hentes vann fra dypet som også blir rensset vil det på denne måten unngås at det slipper lus inn i merdene.

Det er sterkt fokus på overvåking av fiskens helse, utvikling og vekst. Alle prosesser skal være intelligent, helautomatisk og alt skal være fjernstyrt og skybasert. Dette innebærer nyutviklede prober som skal overvåke fiskens helse i nåtid, automatisk biomassemåler, sortering og avfallsbehandling.



Figur 1: Figuren viser merdkonseptet til OceanTECH

Det er nødvendig med enorme vannmengder for å oppnå god fiskehelse og tilvekst. Ettersom merdene er bygget i betong og de inneholder automatiserte prosesseringssystemer er det ingen tvil om at det er snakk om svært store og tunge konstruksjoner. Merdene skal fortøyas til et prosesseringsanlegg hvor fisken blant annet kan flyttes mellom de ulike merdene eller transporteres til brønnbåt, dette er vist i Figur 2.



Figur 2: Figuren viser hele OceanTECH-konseptet med merder som er fortøyd til prosessanlegget

1.3 Målsetting for oppgaven

Tradisjonelle oppdrettsanlegg benytter forankringssystemer som tar opp enorme bunnareal og dette kan være utfordrende av flere grunner. For eksempel vil dette medføre begrensede fiskemuligheter og det vil være vanskelig å benytte havbunnen til sjøkabler. Denne problemstillingen er noe som har blitt belyst i lang tid og eksperter mener at det bør benyttes erfaring og velutviklet teknologi fra Olje og Gass industrien (O&G) for å bidra til å løse disse utfordringene [6].

Forankringssystemet for det totale oppdrettsanlegget OceanTECH er fortsatt under utvikling og hensikten med denne masteroppgaven er å bidra med erfaring og innspill til dette arbeidet. OceanTECH er et stort og tungt oppdrettsanlegg, og ettersom det stadig er under utvikling er det gode muligheter og grunner for å benytte teknologi fra O&G industrien blant annet med fokus på besparing av bunnareal. Andre interessante parametre som må tas med i designfasen av forankringssystemet er de hydrodynamiske bevegelsene for oppdrettsanlegget.

Denne oppgaven har som hensikt å undersøke og analysere krefter i den globale forankringen for oppdrettsanlegget OceanTECH. Undersøkelsene blir gjort på relativt grunt vann og med korte forankringsliner. Dette blir gjort nettopp for å sette fokus på arealbesparing av havbunnen. Det blir undersøkt hvordan kreftene endres ved å justere forspenning i forankringssystemet i kombinasjon med ulike bølgespektre. Justeringsmuligheter av forspenning er interessant å undersøke ettersom det kan muliggjøre optimalisering av forankringskrefter og hydrodynamisk bevegelse for oppdrettsanlegget.

Opgaven vil gjøre en analyse av krefter i både tids- og frekvensplanet. I tidsplanet vil fokuset være å undersøke maksimal og gjennomsnittskrefter. Videre vil det undersøkes konstruksjonens bevegelser i hiv og jag. I frekvensplanet vil det undersøkes hvordan de ulike kraftresponsene fordeler seg over ulike frekvenser. Alle undersøkelsene gjøres ved tre ulike bølgespektre og to ulike forspenninger.

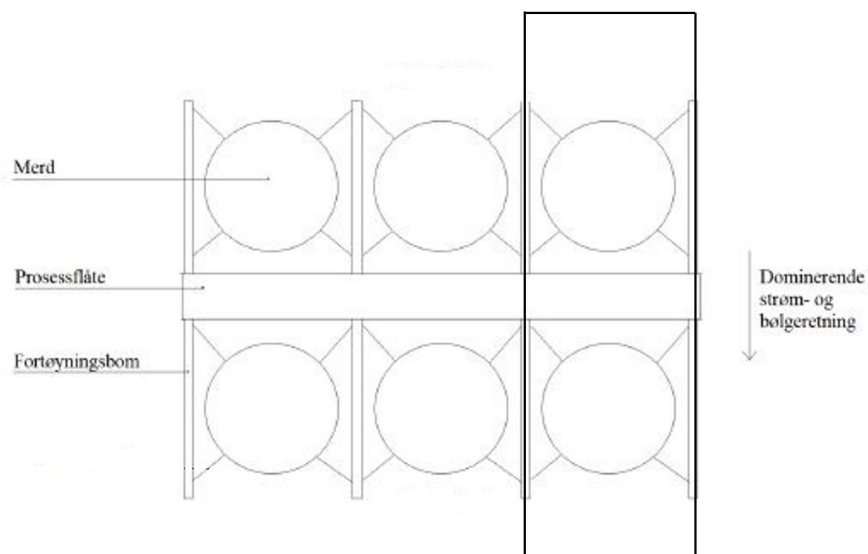
1.4 Oppgavens metoder

Denne oppgaven har som hovedmål å undersøke forankringskrefter og bevegelser i hiv og jag for det semilukkede oppdrettsanlegget, OceanTECH. Det blir gjennomført både eksperimentelle forsøk og numeriske beregninger. Oppdrettsanlegget som består av seks merder, prosessflåte og fortøyningsbommer er stort og tungt. Merdene har en diameter på 24 m og anleggets totallengde- og bredde er på henholdsvis 83 m og 30 m. Som det senere blir forklart er det bare undersøkt en modul av det totale anlegget.

For de eksperimentelle forsøkene benyttes det en modell som tilsvarende denne modulen og skaleringsfaktor, λ er på 40. Modellen og testoppsettet er utviklet i samarbeid med medstudent, Bendik Sagstad som studerer modellens hydrodynamiske bevegelser [7]. Videre gjøres kraftmålinger ved bruk av lastceller som festes til forankringslinene og bevegelsesdata hentes fra 3D kamerasystem. Det gjennomføres numeriske beregninger i programvaren Sesam som er utviklet av DNV. Den numeriske modellen som benyttes har fullskala størrelser og resultatene blir skalert i henhold til Froude-skalering slik at de kan sammenlignes med de eksperimentelle resultatene.

1.5 Avgrensninger og forenklinger

Ved gjennomføring av de numeriske og eksperimentelle forsøkene i denne oppgaven er det gjort en del forenklinger og antagelser. For det første er modellen som benyttes bare en tredjedel av det totale anlegget av OceanTECH, dette er vist i Figur 3. Grunnen til dette er at ytterligere nedskalering av modellen også krever nedskalering av bølgeparametre for bølgespektrene som benyttes. Det er knyttet en del usikkerhet til generering av bølger i MarinLab under 0,03 m, derfor er det kun benyttet en modul av den totale anlegget. Videre er det benyttet aluminium og ikke betong som konstruksjonsmateriale for selve merdene. Dette gjøres hovedsaklig fordi det er enklere å tilvirke modellen i dette materialet, samt at det gir en lavere totalvekt, noe som er praktisk for gjennomføringen av forsøkene. En annen vesentlig forenkling som er gjort er at merdene er fortøyd helt stramt til fortøyningsbommene ved bruk av gjengestenger. Prosessflåten er stramt fortøyd til fortøyningsbommene, men denne koblingen har rotasjonsmuligheter i stamp. Denne forenklingen er gjort for å ha best mulig sammenligningsgrunnlag ettersom modellen som brukes i Sesam er modellert som en hel konstruksjon uten noen frihetsgrader.



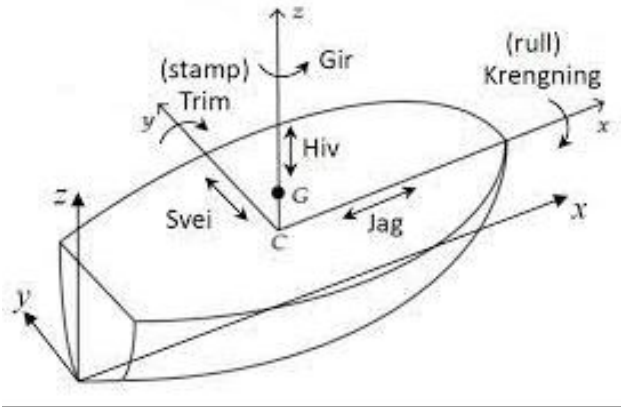
Figur 3: Her vises en forenklet skisse av det totale anlegget og modulen som brukes i denne oppgaven er markert

For det fullskala oppdrettsanlegget OceanTECH er det derimot viktig å benytte ulike ledd med rotasjonsmuligheter, ettersom det å låse bevegelsene vil føre til store belastninger og spenningskonsentrasjoner. Hovedfokuset for denne oppgaven er å analysere forankringskrefte og bevegelse - det antas at forenklingene som er nevnt over i liten grad påvirker dette. Videre er det gjort noen forenklinger i forankringssystemet sammenlignet med det som er realistisk å benytte i virkelige forhold. Forankringslinene i denne oppgaven har forankringspunkt i betonglodd som står fast på bunnen. Dette medfører en del forenklinger i forhold til virkelige forankringsmetoder.

2 Teori

2.1 Frihetsgrader

For bevegelser av et objekt i tre dimensjoner, x , y og z er det totalt seks frihetsgrader. Disse er vist i Figur 4. Det er tre translasjoner (hiv, jag og svei) og tre rotasjoner (gir, rull og stamp).



Figur 4: Illustrasjon av de seks frihetsgradene [8]

Senter for koordinatsystemet er konstruksjonens tyngdepunkt. Det blir i denne oppgaven benyttet høyrehåndssystem der z er definert som positiv oppover og x er definert mot bølge-retningen. Positivt moment om aksene gir positive vinkler. Det er interessant å merke seg at rotasjonsbevegelser er absolutte, mens translasjonsbevegelser er koblet. Eksempelvis for et skip i bevegelse vil hiv-bevegelsen i akterenden være påvirket av skipets bevegelse i trim [9].

2.2 Bølgeteori

Store deler av kreftene som konstruksjoner på havet blir utsatt er bølgeinduserte krefter. Dette gjelder for både konstruksjoner som ligger på overflaten, neddykket, forankret eller fritt flytende. Etersom bølger er periodiske vil også kreftene på en konstruksjon være periodisk. Det er avgjørende å ha kontroll på hvor store kreftene er og fordelingen av disse i konstruksjonen for å bygge pålitelige og sikre konstruksjoner [10].

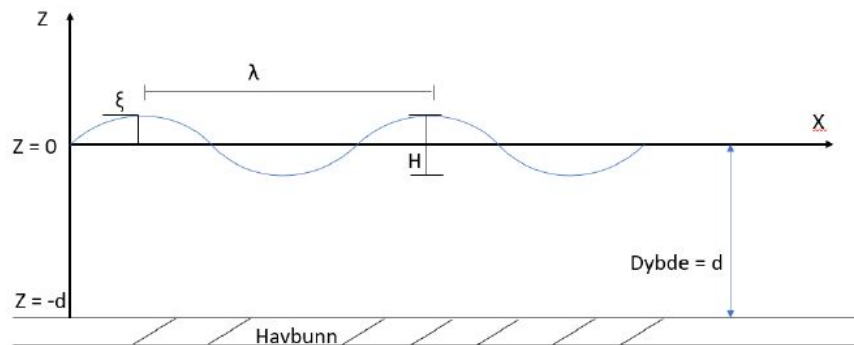
Bølger deles vanligvis opp i to hovedkategorier; vindsjø and dønningsjø. Vindsjø er benevnelsen for bølgetog som oppstår som resultat av lokal vind. Bølgene er irregulære, relativt korttoppet, ofte spisse og det dannes bølger som spres i ulike bølge-retninger. Dønningsjø beskriver en bølgetilstand der bølgene har vandret ut fra det vindgenererende området.

Til forskjell fra vindsjø vil bølgene som beskrives som dønningsjø være mer regulære og ha rundere topper.

Ettersom det er vannpartiklenes hastighet og akselerasjon som avgjør bølgenes energi vil det være nødvendig å studere dette videre, for å kunne si noe om kreftene.

2.2.1 Regulære bølger

Regulære bølger er den enkleste formen for å beskrive en bølgebevegelse ettersom det er en periodisk funksjon gitt av sinus eller cosinus. Dette betyr at regulære bølger vil forplante seg som en repeterende harmoniske svingning. Figur 5 viser en lineær bølge og tilhørende parameter som er nødvendig for å beskrive en slik bølge. Ettersom fullt utviklede regulære bølger har repeterende form vil det ikke ha noen betydning hvilke punkt på to repeterende bølger som er referansepunkt når bølgelengde og periode bestemmes. Det er ofte praktisk å beregne fra der bølgen krysser linjen for stille vann, og dette er definert som nullkrysningspunktet.



Figur 5: Regulær bølge [11]

Her er H bølgehøyde, ξ er overflateheving, d er vanddyb og λ er bølgelengde.

En fullstendig beskrivelse av en regulær bølge som beveger seg i tid og rom er gitt ved følgende ligning:

$$\xi(x, t) = \xi_a \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

Hvor x er posisjon, t er tid, ξ_a er bølgens amplitude, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ er bølgetall [$\frac{rad}{m}$], T er bølgeperiode og $\omega = \frac{2\pi}{T}$ er vinkelfrekvensen [$\frac{rad}{s}$]. Det er også verdt å nevne at en periodisk bølge beveger seg en bølgelengde, λ for hver periode, T . Derfor kan bølgens hastighet skrives som $c = \frac{\lambda}{T}$.

2.2.2 Lineær potensialteori

Innen moderne marin ingeniørvitenskap er potensialteori helt sentralt, og alle teorier som baserer seg på løsning av Laplace ligningen kalles for potensialteori. Ligningen er sett på som en av de aller viktigste innenfor ingeniørmatematikken og er sentral innen flere fagfelt, som romfart, elektronikk og havteknologi. Potensialteorien er avgjørende for både analytisk og numerisk problemløsning. I dette kapitlet vil det bli gitt antagelser og beskrivelser som er nødvendig for å utlede uttrykk og hastighetspotensiale.

For å bestemme krefter som virker på en konstruksjon er det avgjørende å beskrive vannpartikkelens påvirkning på konstruksjonen. Ved hjelp av lineær potensialteori kan dynamisk trykk, partikkelakselerasjon samt horisontal- og vertikal partikkelhastighet bestemmes fra hastighetspotensialet. Fra hastighet kan akselerasjon bestemmes, og fra akselerasjon kan kraft bestemmes [9].

For å utlede Laplace ligningen og benytte lineær potensialteori er det nødvendig å legge til grunn noen antagelser. Først antas det at bølgestigningen er relativ lav. Dette gjør det mulig å anta at fortrengning, hastighet, akselerasjon av væskepartikler samt dynamisk trykk og kraft vil ha en lineær relasjon til bølgens overflatehevingen. Det antas at konstruksjonen som påvirkes av en inngående bølge svinger med samme frekvens som bølgen og at væsketettheten er konstant [10].

Det antas videre at væskepartiklene er inkompressible. Sjøvann er vanskelig å komprimere, og derfor er dette en grei forenkling av virkeligheten. For en inkompressibel væske må kontinuitetsligningen være gjeldende i alle punkt. Det betyr at væskemassen er konstant og dette er gitt i følgende uttrykk:

$$\nabla \cdot \vec{U} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Her definerer x , y , og z kontrollvolumet, u , v og w definerer de tilhørende partikkelhastighetene og \vec{U} er hastighetsvektoren.

Det antas videre at strømmingen er rotasjonsfri, noe som betyr at væskepartikkelens vinkelhastighet er lik null. Når væsken antas å være ikke-roterbar er det følgelig også nødvendig å anta at væsken er friksjonsfri og uten skjærkrefter. Dette er en god beskrivelse av virkeligheten, bortsett fra væskestrøm langs havbunnen, eller tett inntil konstruksjoner - her vil væskestrømmen ikke være fri for skjærkrefter, og det vil oppstå dreiemoment som fører til rotasjon.

Antagelsen om rotasjonsfri strømming er beskrevet ved følgende forhold:

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{U} = \vec{0} \quad (3)$$

Her er $\vec{\omega}$ definert som væskens rotasjon.

Ved bruk av de overnevnte antagelsene for ikke-roterbar- og inkompressibel væske kan Laplace andre ordens differensialligning finnes og er gitt som:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (4)$$

Her er Φ hastighetspotensialet og vil bli forklart senere i kapitlet.

-

2.2.3 Grensebetingelser

For å muliggjøre løsning av Laplace-ligning er det nødvendig å sette noen grensebetingelser. Ettersom differensialligninger har flere løsninger må det anvendes grensebetingelser for å gi løsninger som svarer til definisjonen av linearisert bølgeteori, og som er gitt på formen til en harmonisk bølge. I denne oppgaven er det bare brukt lineariserte grensebetingelser og det er antatt små bølger.

De tre følgende grensebetingelsene som er brukt for å løse Laplace-ligningen vil bli beskrevet [9]:

- Grensebetingelse for havbunnen
- Grensebetingelse for konstruksjonens overflate
- Grensebetingelse for fri overflate

Grensebetingelse for havbunn

Grensebetingelse for havbunnen er gitt i Ligning 5. Denne er basert på at ingen væske kan strømme gjennom havbunnen, dermed blir vertikal hastighetsvektor \vec{w} satt til null. Videre er det også betinget at havbunnen er horisontal.

$$\vec{w}|_{z=-d} = 0 \longrightarrow \frac{\partial \Phi}{\partial z}|_{z=-d} = 0 \quad (5)$$

Her er d vanddyb.

Grensebetingelse ved konstruksjonens overflate

Denne grensebetingelsen beskriver at ingen væske kan strømme gjennom konstruksjonens overflate. Dette innebærer at væske som er i kontakt med konstruksjonens overflate vil ha lik normalhastighet som konstruksjonen selv i kontaktøyeblikket. Dette er beskrevet ved følgende ligning:

$$(\vec{v} - \vec{U}) \cdot \vec{n} = 0 \longrightarrow \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} = U_n \quad (6)$$

Her er \vec{v} konstruksjonens hastighetsvektor, U_n er væskepartiklenes hastighet normalt mot overflaten og \vec{n} er normalvektor [12].

Grensebetingelse ved fri overflate

Ved den frie overflate er det nødvendig å definere to grensebetingelser; kinematisk- og dynamisk grensebetingelse.

Kinematisk grensebetingelse for fri overflate

Kinematisk grensebetingelse ved fri overflate beskriver at så lenge ikke bølgene bryter og det antas små bølger så vil væskepartiklene på overflaten forbli værende på overflaten. Dette er gitt ved Ligning 7 [9]:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Dette gjelder for $z = 0$

Dynamisk grensebetingelse for fri overflate

Dynamisk grensebetingelse for fri overflate beskriver at trykket ved den frie overflaten er konstant og lik atmosfærisk trykk. Dette er gitt ved Ligning 8 [12]:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\xi = f(t) \quad (8)$$

Her er g gravitasjonskonstanten og uttrykket gjelder for $z = 0$

Kombinert fri overflatebetingelse

Grensebetingelsene som er beskrevet over for kinematisk- og dynamisk grensebetingelse for fri overflate er vanskelig å løse. Som tidligere nevnt blir det i denne oppgaven antatt små bølger og lineariserte grensebetingelser, det betyr at ligning 7 og 8 kan forenkles og omskrives til følgende uttrykk:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z} - \frac{\partial\xi}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + g\xi = 0 \quad (10)$$

Begge de to overnevnte ligningene gjelder for $z = \xi$

Ved å kombinere Ligning 9 og 10 kan den endelige kombinerte grensebetingelsen for fri overflate skrives som:

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} + g\frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

Dette gjelder for $z = 0$

Hastighetspotensial

Ved å løse Laplace-ligningen for grensebetingelser for havbunn, konstruksjonsoverflate samt kinematisk- og dynamisk overflate kan hastighetspotensialet, Φ finnes.

Det generelle hastighetspotensialet som gjelder for alle vandyp er gitt ved følgende ligning:

$$\Phi(x, z, t) = \frac{\xi_a g}{\omega} \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \cos(\omega t - kx) \quad (12)$$

Hastighetspotensialet i den lineære bølgeteorien baserer seg på forenklinger av virkeligheten. Det er gjort linearisering og grensebetingelsene er definert fra stille vannsnivå til havbunnen. I virkeligheten varierer bølgehevingen som en funksjon av tid og rom, $\xi(x, t)$. Ved å anta små bølger anses det likevel som en grei forenkling at grensebetingelsene er definert fra $z = -h$ til $z = 0$. Lineær bølgeteori og de tilhørende forenklingene fungerer utmerket i mange sammenhenger, men dersom det kreves større nøyaktighet kan høyere ordens løsninger være aktuelt. Virkelige bølger har høyere topp enn bunn, og dette med mer blir tatt hensyn til ved høyere ordens løsninger av Laplace-likning. I denne oppgaven er det benyttet lineær bølgeteori.

2.2.4 Dispersjonsrelasjon

Til nå har forholdet mellom bølgelengden og perioden vært ukjent, og følgelig også bølgehastigheten. Hastighetspotensialet er definert på bakgrunn av de overnevnte grensebetingelsene, men den kombinerte fri overflate betingelsen er ikke tatt hensyn til. Ved å ta i bruk også denne betingelsen, kan forholdet mellom bølgelengden og perioden finnes. Dette forholdet kalles for dispersjonsrelasjon og er gitt ved følgende ligning:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (13)$$

Dette uttrykket kan videre utvikles til Ligning 14.

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh(kd) \quad (14)$$

Ligning 14 inneholder bølgetall, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ og som ligningen viser inngår bølgelengden, λ på begge sider av ligningen. Ligningen må derfor løses ved hjelp av iterasjon.

For dypt vann som er definert som $\frac{h}{\lambda} > 0,5$ kan dispersjonsrelasjonen forenkles til Ligning 15 [9].

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \approx 1.56 T^2 \quad (15)$$

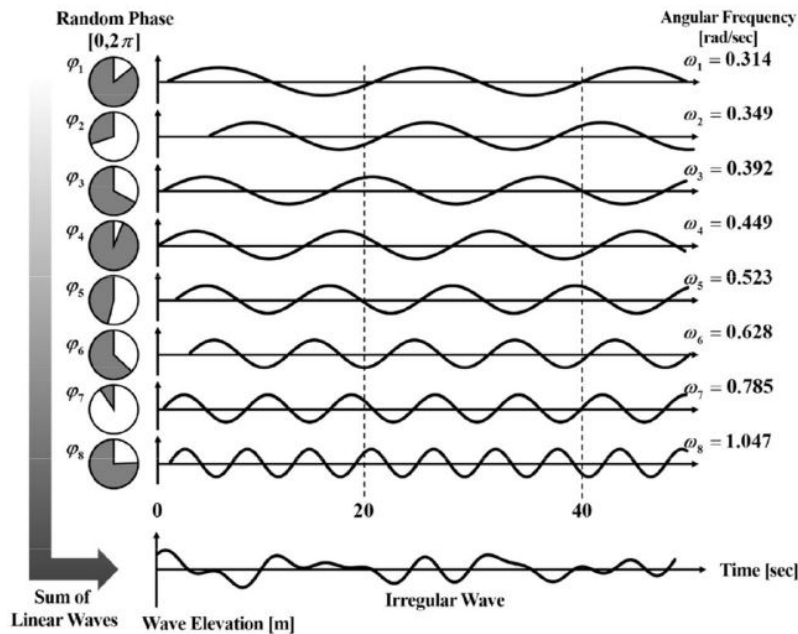
2.2.5 Irregulære bølger

Ved å studere bølgene på havet er det tydelig at disse ikke er regulære bølger med periodisk repeterende svingninger. Irregulære tilfeldige bølger dominerer virkelige sjøtilstander, og for å matematisk beskrive irregulære sjøtilstander er det vanlig å fremstille dette som en sum av regulære bølger. Dette kalles for lineær superposisjon av bølgekomponenter.

Denne summen er bygget opp av en rekke uavhengige regulære bølger, hvor hver enkelt bølge har tilfeldig stokastisk faseforskyving. Eksempel på dette er vist i Figur 6. Amplituden antas å være Rayleigh-fordelt og har gjennomsnittsverdi etter Likning 16. Summeringen av de uavhengige lineære bølgene gjøres ved hjelp av Fourier-summering. Antagelsen om at bølgene er uavhengige betyr at de ulike bølgene ikke påvirker hverandre, og følgelig heller ikke har mulighet til energioverføring [9].

$$\eta_i = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega_i} \quad (16)$$

Her er $S(\omega)$ bølgespekter og $\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_{i-1}$ definert som differansen mellom hver bølgefrequens som er lik $\frac{2\pi}{T}$ hvor T er lengden av måleserien.



Figur 6: Figuren viser hvordan irregulære bølgespekter er bygd opp av en sum av regulære bølger [13]

Den totale irregulære bølgetilstanden er beskrevet i Ligning 17. Ved bruk av denne teorien er det vanlig å anta at bølgeprosessen er stasjonær innenfor en korttidssituasjon, noe som ofte er definert som 3 timer. Videre antas det at bølgehevingen er normalfordelt med middelværdi lik null, varians lik σ^2 og at en tidsserie er representativ for hele bølgeprosessen [12].

$$\xi(t) = \sum_{i=1}^N \xi_{ai} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (17)$$

Her er N antall ulike bølgefrequenser, ε_i er tilfeldig fasevinkel mellom 0 og 2π og ξ_{ai} er enkeltbølgens amplitude.

2.2.6 Bølgespekter

Energien i en regulær bølge er proporsjonal med kvadratet av amplituden, og for å kunne beskrive hvordan energien i en irregulær sjøtilstand fordeler seg over de ulike frekvensen introduseres bølgespekter, $S(\omega)$. Dette er beskrevet i Ligning 18 og baserer seg på teorien om irregulære bølger som ble beskrevet i forrige kapittel.

$$S(\omega_n) = \frac{1}{2} \frac{\xi_n^2}{\Delta\omega} \quad (18)$$

Ved å undersøke hvordan energien fordeler seg som funksjon av frekvensen kan bølgespekteret fremstilles for en sjøtilstand. Det er viktig å merke seg at for å få en god og tilnærmet kontinuerlig fremstilling av bølgespekteret må det være kortest mulig avstand mellom hver diskret verdi. Dette sikres ifølge forholdet $\Delta\omega_i = \frac{2\pi}{T}$ ved å ha tilstrekkelig lang nok måletid, T . Dersom $T \rightarrow \infty$ betyr det at $\Delta\omega \rightarrow 0$, dette gir en tilnærmet kontinuerlig funksjon.

Standardiserte bølgespekter er basert på store mengder innsamlet data fra ulike havområder og dette er til stor hjelp i blant annet designstadiet av nye konstruksjoner. Bruk av standardiserte bølgespekter er et godt utgangspunkt når det ikke er hentet inn måledata for den aktuelle lokasjonen og det virkelige spekter er ukjent. Det antas at standardisert bølgespekter er et gjennomsnittsspektrum av det virkelige bølgespekteret, dette må være med i vurdering ved bruk [12].

Det finnes forskjellige typer av bølgespekter som representerer ulike havområder. To av de mest kjente er Pierson-Moskowitz (PM) og Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Sistnevnte blir brukt i denne oppgaven og blir derfor detaljert beskrevet i neste kapittel.

En stasjonær sjøtilstand beskrives vanligvis ved parameterne *signifikant bølgehøyde* (H_s), *topp periode* (T_p) og *kryss-opp perioden* (T_z). H_s beskriver gjennomsnittlig bølgehøyde av de 1/3 største bølgene i en irregulær sjø, T_p beskriver perioden hvor spekterets toppunkt ligger, mens T_z gir gjennomsnittlig periode mellom hver gang bølgen krysser nullpunktet fra negativ side [14].

2.2.7 Jonswap bølgespekter

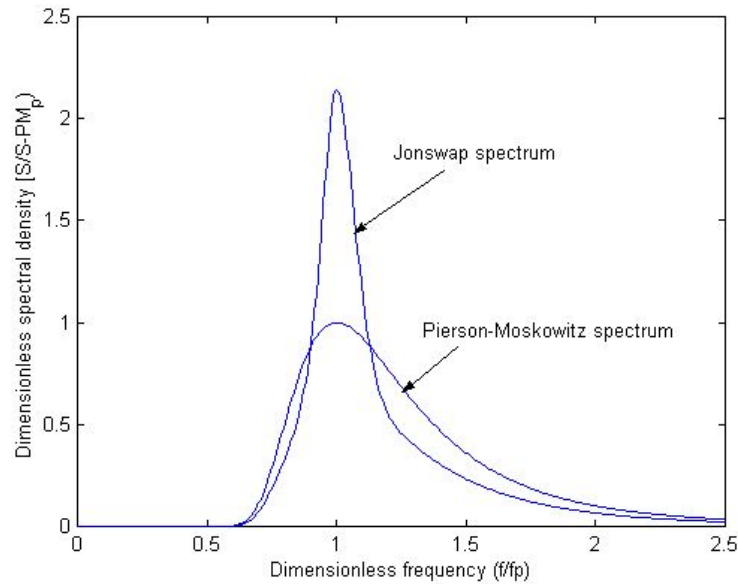
Jonswap er et mye brukt bølgespekter som er basert på forskningsarbeid og data fra relativt grunt vann i den sør-østlige Nordsjøen. Spekteret beskriver i motsetning til PM vindgenererte sjøtilstander som ikke er fullt utviklet [12]. Jonswap bølgespekteret er beskrevet i Ligning 19 og er sammen med PM spekteret vist i Figur 7.

$$S_j(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma^{\exp(-0,5(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma\omega_p})^2)} \quad (19)$$

Her er γ spisshetsparameter, S_{PM} er PM-spekteret og A_γ er normaliseringsfaktor med følgende forhold: $A_\gamma = 1 - 0,287 \ln(\gamma)$. Videre er σ spekterets breddeparameter og ω_p er toppfrekvens med følgende forhold: $\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$. PM-spekteret er gitt ved følgende ligning [14]:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp(-\frac{5}{4} (\frac{\omega}{\omega_p})^{-4}) \quad (20)$$

Her er ω_p frekvens ved spekterets topp.



Figur 7: Eksempel på Jonswap og PM spekter [15]

Figuren over illustrerer tydelig den spisse toppen som kjennetegner Jonswap-spekteret, noe som betyr at store deler av bølgeenergien fordeler seg over få frekvenser. Jonswap-spekteret er basert på PM-spekteret, og det er verdt å merke seg at den totale energien, og arealet for en gitt sjøtilstand er lik for begge spektrene. For å beskrive Jonswap-spektrene som benyttes i denne oppgaven er det brukt H_s , T_p , γ . Disse parametrene blir videre omtalt i Kapittel 3.1.

For et kjent bølgespekter er det mulig å uttrykke all informasjon om bølgetilstanden ved hjelp av bølgespekterets momenter som er gitt ved følgende ligning:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad (21)$$

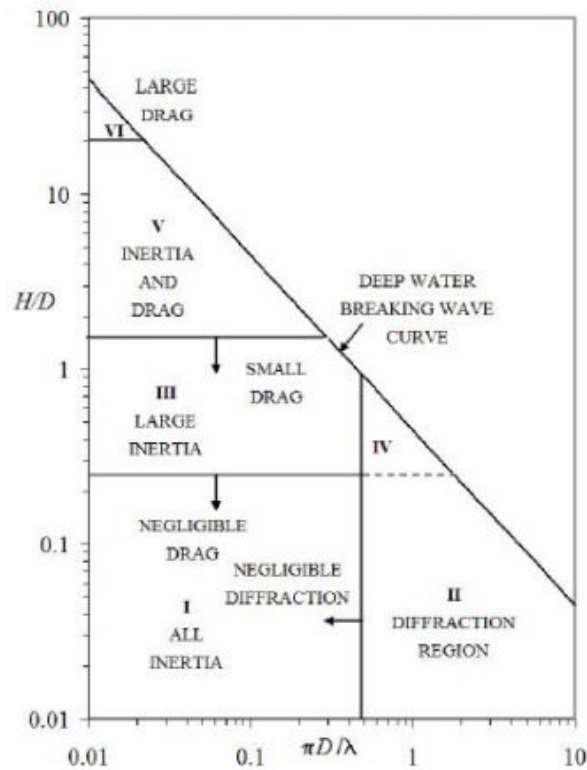
For eksemplen kan H_s finnes ved å sette $n = 0$ og bruke følgende forhold: $H_s = 4\sqrt{m_0}$

2.3 Bølgelaster

Det er avgjørende å kunne beregne krefter som virker på en konstruksjon, og det skilles generelt mellom statiske og dynamiske krefter. De statiske kreftene kommer hovedsaklig fra gravitasjonskrefter, ballastering samt strøm- og andre hydrostatisk krefter. Dynamiske kreftene kommer derimot fra de varierende vind- og bølgelastene [16].

Det skilles mellom små- og storvolumkonstruksjoner og det er viktig å vite hvilken klasse problemet som skal løses tilhører.

Figur 8 viser en oversikt over ulike klasser for bølgekrefter, denne brukes for å bestemme hvilke bølgeteori som er relevant for gjeldende problem. For å lese av diagrammet beregnes forholdet mellom konstruksjonens diameter og bølgehøyde, $\frac{H}{D}$. Videre må ka tallet beregnes som er definert som følgende forhold: $\frac{\pi D}{\lambda}$.



Figur 8: Ulike klasser for bølgekrefter [16]

Fra figuren kan det forklares hvilke kraftbidrag som er vesentlig for den gjeldende konstruksjonen. Diffraksjon må tas hensyn til dersom forholdet $\frac{\pi D}{\lambda}$ er større enn 0,5. Ellers kan dette neglisjeres. For forhold uten nevneverdig diffraksjonsbidrag er det ifølge figuren fire forskjellige situasjoner. Område 1 viser en tydelig massedominert konstruksjon, og dragledet i Morison-ligningen som blir forklart i neste delkapittel kan sløyfes. Etterhvert som forholdet $\frac{H}{D}$ øker vil også dragbidraget øke. Fra dette kan det konkluderes med at drag er viktig når konstruksjonen er liten i forhold til bølgehøyden. Det kan også observeres et spesialtilfelle som er vist i område 4 i Figur 8, her er både diffraksjon og Morison viktig for å beskrive kreftene.

Konstruksjonen som undersøkes i denne oppgaven klassifiseres som en storvolumkonstruksjon ettersom ka forholdet er større enn 0,5. Det må dermed benyttes diffraksjonsteori og dette blir forklart i Kapittel 2.3.2.

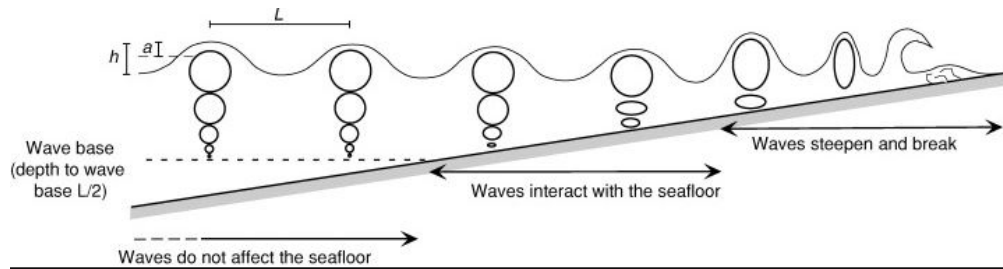
2.3.1 Morison

Morison-ligning er gitt i Ligning 22 og er svært mye brukt for å beregne krefter på sirkulære tversnitt som er definert som småvolumkonstruksjoner. Her er det antatt en sirkulær vertikal sylinder som stikker opp gjennom havoverflaten.

$$dF = \frac{\pi D^2}{4} \rho C_M \dot{u} + \frac{1}{2} \rho C_D D u |u| \quad (22)$$

Her er dF kraft pr. enhetslengde for konstruksjonen, ρ er væsketetthet, u og \dot{u} er henholdsvis partikkelhastighet og akselerasjon fra hastighetspotensialet, C_M er massekoeffisient og C_D dragkoeffisient. C_M og C_D baseres på forsøk og er kan ofte hentes fra tabeller [16]. For å beregne den totale kraften integreres dF for konstruksjonens våte overflate.

Kraft beregnet ved Morison-ligning på dypt vann med konstante kraft- og massekoeffisienter avtar med dypet. Dette henger sammen med bevegelsesmønsteret til vannpartiklene. Dette er illustrert i Figur 9, som viser hvordan vannpartiklenes sirkelbevegelser endres ved dypet for dypt- endelig- og grunt vann.



Figur 9: Oversikt over hvordan partikkelbevegelsen endres ved dypet for dypt vann og overgang til grunt vann [17]

Morison-ligningen består av to ledd, massekraft og dragkraft. Massekraften avtar ved faktoren e^{kz} , mens dragkraften avtar med faktoren e^{2kz} . Dette betyr at massekraften virker lenger ned i dypet sammenlignet med dragkraften. Videre er det verdt å nevne at massekraften når sin maksimale verdi når bølgens knutepunkt ligger rett over objektets senterakse. Dragkraften når derimot sin maksimale verdi når det er en bølgetopp over objektets senterakse. Dette forklares ut fra cosinusleddet i hastighetspotensialet som definerer variasjonen i partikkelhastighet- og akselerasjon i Morison-ligningen.

2.3.2 Diffraksjon

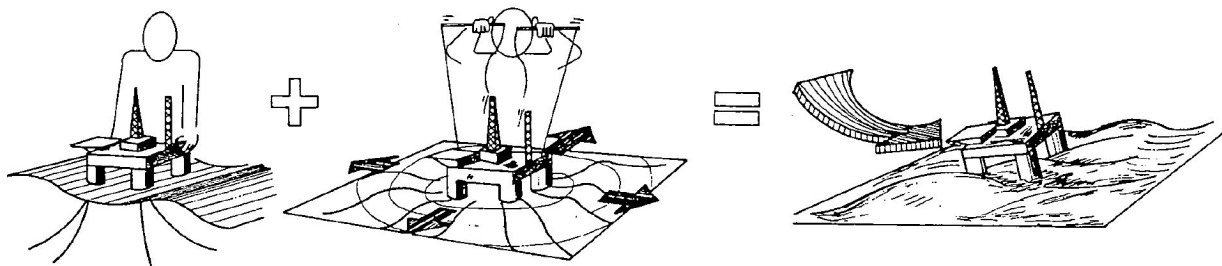
For storvolumkonstruksjoner er ikke lenger Morison-ligning anvendbar, her må diffraksjonsteori som vist i Figur 8 benyttes. Alle bølger som treffer en konstruksjon vil føre til en refleksjon. Ettersom konstruksjonen øker i størrelse vil denne effekten også øke, og når forholdet $\frac{D}{\lambda}$ blir stort nok blir kraftbidraget betydelig.

Diffraksjonsteori beskriver det tredimensjonale potensialet for en flytende konstruksjon. Dette betyr at det blir tatt høyde for både innkommende bølger, reflekterende bølger og radiasjonsbølger som oppstår når konstruksjonen beveger seg. Det totale potensialet, φ_t finnes ved å summere potensialet for innkommende bølge, φ_i , diffraksjon, φ_d og radiasjon φ_r . Det totale potensialet for en konstruksjon med seks frihetsgrader er gitt i følgende ligning:

$$\varphi_t = \sum_{n=1}^6 \varphi_i + \varphi_d + \varphi_r \quad (23)$$

Som tidligere gjelder hastighetspotensialet for innkommende bølge som er beskrevet i Ligning 12. De tilhørende grensebetingelsen er fortsatt gyldig og gjelder nå også for diffraksjonspotensialet, men det er nødvendig å etablere grensebetingelse for radiasjonspotensialet. Denne grensebetingelsen beskriver at radiasjonspotensialet avtar med økende avstand fra konstruksjonen, og er lik null uendelig langt borte.

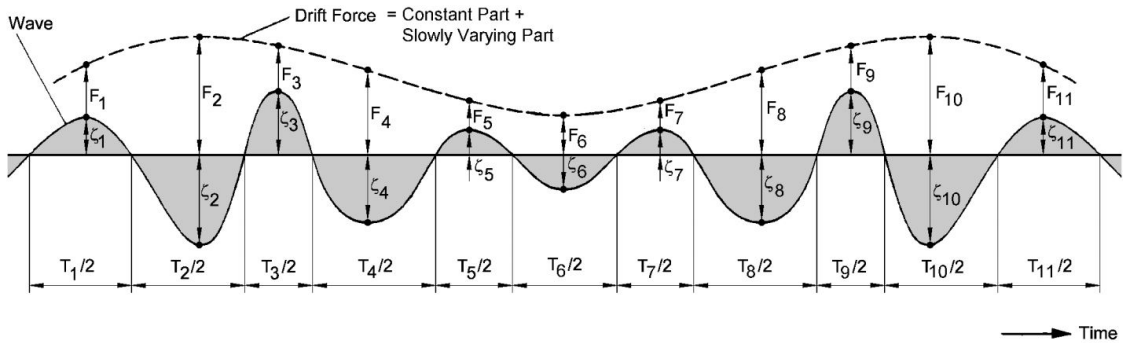
For å finne potensialet fra innkommende bølger kan det totale potensialet deles i to deler. Den første delen beskriver potensialet som oppstår fra innkommende bølger når konstruksjonen holdes i ro uten bevegelsesmulighet. Den andre delen beskriver potensialet som oppstår når konstruksjonen tvinges til å bevege seg med samme frekvenser som de innkommende bølgene, uten at disse bølgene er tilstede [12]. Denne analogien er vist i Figur 10.



Figur 10: Figuren viser hvordan potensialene for innkommende bølger, diffraksjon og radiasjon summeres for å beskrive totalpotensialet [18]

2.3.3 Bølgedriftskrefter

Forankrede konstruksjoner utsettes for lavfrekvente bevegelsesresponser og dette gjelder spesielt for horisontalbevegelsene jagg og svai. Slike lavfrekvente bevegelser oppstår selv om bølgespekteret ikke inneholder tilsvarende lave bølgefrequenser og bølgedriftskrefter bidrar til slike lavfrekvente bevegelser. De saktevarierende bølgedriftskreftene kalles også for differansefrekvenser. Bølgedriftskrefter består av en konstant kraft og en saktevarierende kraft, og det er den sistnevnte delen som bidrar til de lavfrekvente bevegelsene. Bølgedriftskrefter kan beskrives som en imaginær bølge som er avhengig av de enkelte bølgekomponentene i det aktuelle bølgespekteret. Den imaginære bølgen som definerer bølgedriftskrefter er en funksjon av bølgespekterets amplitudekomponenter kvadrert, dette betyr at det er stor forskjell mellom de høye og lave bølgekomponentene i bølgespekteret og dette er vist i Figur 11 [10].



Figur 11: Figuren viser hvordan bølgedriftskrefter defineres ut fra bølgespekter [10]

Det er viktig å ha kontroll på de forventede saktevarierende bølgedriftskreftene når flytende konstruksjoner skal forankres. Årsaken til dette er at forankrede konstruksjoner ofte har lave egenfrekvenser i horisontalbevegelsene jagg og svai og dersom det oppstår resonans mellom de saktevarierende bølgedriftskreftene og disse egenfrekvensene kan det oppstå store bevegelses- og kraftresponser. I denne oppgaven er det gjennomført decay-test som viser at egenfrekvens i jagg er lav for konstruksjonen som studeres.

Tilsvarende som for de saktevarierende bølgedriftskreftene finnes det også hurtigvarierende bølgedriftskrefter, disse kalles for sumfrekvenser. Sumfrekvenser er i likhet med differansefrekvenser proporsjonal med bølgespekterets amplitudekomponenter kvadrert.

2.4 Bevegelse for system med en frihetsgrad

Bølgelaster som virker på en flytende konstruksjon er dynamiske, derfor er det helt sentralt å kjenne til konstruksjonens dynamiske respons. I virkeligheten vil denne responsen være koblet for de ulike frihetsgradene, og beskrivelsen av totalbevegelsen gjøres ved et sett av differensialligninger. Det forankrede oppdrettsanlegget som undersøkes i denne oppgaven kan forenkles og beskrives ut fra teorien som tar for seg bevegelse for system med en frihetsgrad.

Egenfrekvens og resonans er to viktige designkriterier for alle typer konstruksjoner som er utsatt for dynamiske laster. Resonans er et viktig begrep som beskriver systemresponsen som oppstår når frekvensen til den dynamiske eksitasjonskraften og konstruksjonens egenfrekvens sammenfaller. Dette fører til en høy respons, og det er bare systemets demping som *holder* konstruksjonen igjen. For et teoretisk system uten demping kan egenfrekvensen, ω_n finnes fra følgende ligning: $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ hvor k er fjærkonstant og m er systemmassen. Et slikt udempet system vil ha en responsamplitude, y etter følgende ligning [16]:

$$y = \frac{\frac{F}{k}}{\omega_n^2 - \omega^2} \quad (24)$$

Her er F eksitasjonskraft med frekvens ω . Fra dette uttrykket kan det forklares hvorfor resonans fører til så stor respons når ω går mot ω_n siden nevneren da går mot null. I et designperspektiv bør det alltid forsøkes å oppnå egenfrekvens så langt som mulig bort fra de forventede frekvensene for eksitasjonskraften.

Naturlig finnes det ingen udempede systemer og for flytende konstruksjoner er viskøs demping, tilleggs masse og forankringsystemer eksempel på ulike dempingsbidrag. Ved hjelp av Newtons 2. lov kan bevegelsesligningen for et lineært svingesystem med en frihetsgrad skrives slik:

$$F = c\dot{x} + kx \quad (25)$$

Differensialligningen for et slikt system er:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (26)$$

Her er m systemets masse og \ddot{x} , \dot{x} og x er henholdsvis akselerasjon, hastighet og posisjon.

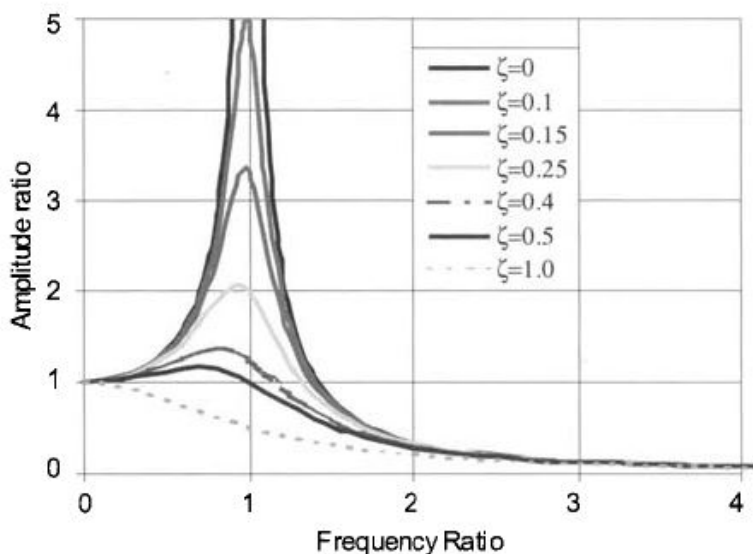
Kritisk dempingskoeffisienten, c_c er gitt ved: $c_c = 2\sqrt{km}$. Når denne er kjent kan dempingsfaktoren finnes fra følgende forhold: $\zeta = \frac{c}{c_c}$. Dempingsfaktoren er et mål på hvor mye demping som oppleves i et system. Systemet er overdempet når $\zeta > 1$, kritisk dempet når $\zeta = 1$ og underdempet når $\zeta < 1$ [16]. Forholdet for kritisk dempingskoeffisient viser at dempingsfaktoren endres dersom fjærkonstanten justeres. Dette betyr at endring i stivhet for et forankret system påvirker den kritiske dempingsfaktoren og følgelig dempingsfaktoren.

2.4.1 Tvungen dempet system

For dynamiske systemer har dempingen mye å si for responsen, dette er godt illustrert i Figur 12 som viser hvordan responsen varierer ved ulike dempingsfaktorer, ζ . I denne figuren er det på x-aksen normaliserte frekvenser som er gitt i Ligning 27. Videre beskriver y-aksen den normaliserte responsen som er gitt i Ligning 28.

$$\theta = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (27)$$

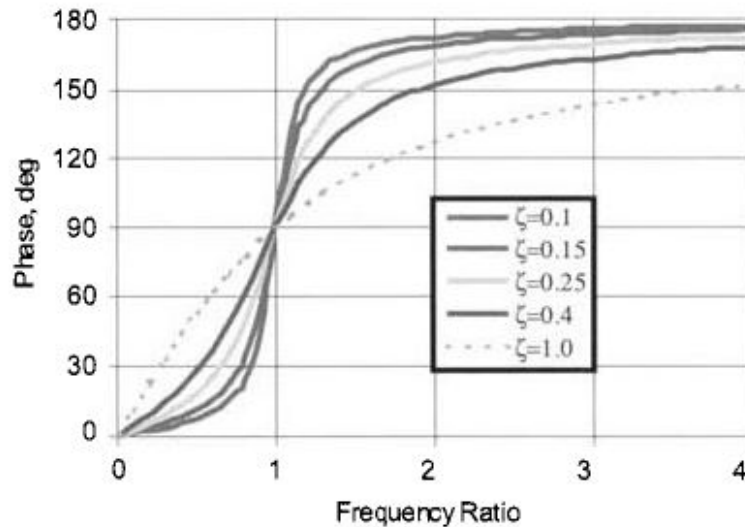
$$y_n = \sqrt{\frac{1}{(1 - \theta^2)^2 + (2\lambda\theta)^2}} \quad (28)$$



Figur 12: Plottet viser normaliserte responser for et lineært dempet system ved ulike dempingsfaktorer [16]

Ligning 29 som er beskrevet under gir fasevinkelen mellom eksitasjonskraften og systemresponsen.

$$\beta = \arctan\left(\frac{2\zeta\theta}{1-\theta^2}\right) \quad (29)$$



Figur 13: Fasevinkel mellom systemrespons og eksitasjonskraft ved ulike dempingsfaktorer[16]

Fra Figur 13 kan det observeres at for svært lave θ -verdier vil systemet oppføre seg stivt og responsen vil være lav. Da vil også fasevinkelen mellom eksitasjonskraften og responsen være liten: $\theta \ll 1 \rightarrow y_a \approx 1$

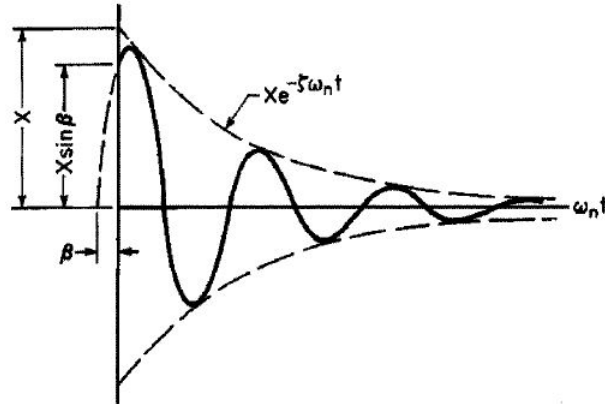
Etter hvert som θ øker og går mot 1 vil systemet oppføre seg mindre stivt, systemresponsen øker og bevegelsen blir i økende grad kontrollert av systemets demping. I denne situasjonen vil fasevinkelen være mer eller mindre konstant lik 90 grader for alle dempingsfaktorer: $\theta \approx 1 \rightarrow y_n = \frac{1}{2\zeta}$

Når frekvensen for eksitasjonskraften øker enda mer, vil bevegelsen bli stadig mer kontrollert av systemets treghetsmoment og dette vil jobbe mot bevegelsen. Fasevinkelen går nå mot 180 grader ved økende θ .

Følgende konklusjon kan trekkes fra det som er beskrevet over: $y_n \rightarrow \infty$ når $\theta = 1$ og $\zeta = 0$ [9].

2.4.2 Decay-test

Ved å undersøke et system sin bevegelseskurve i en frihetsgrad er det mulig å bestemme egenfrekvens, ω_n og demping, c . Dette kan gjøres ved en *decay-test* hvor konstruksjonen i et kort øyeblikk påføres en ytre kraft i den frihetsgraden som skal undersøkes. Videre registreres konstruksjonens frie svingninger slik som vist i Figur 14.



Figur 14: Illustrasjon av hvordan bevegelsen til et dempet oscillerende system avtar ved tiden. Stiplet linje viser dempingskurven [16]

For underdempede systemer kan responsamplituden, y beskrives ved følgende ligning:

$$y = F \exp(-\zeta \omega_n t) \sin \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t + \beta \quad (30)$$

Her er β fasevinkel og t er tiden etter at systemet er satt i bevegelse.

Dette uttrykket beskriver systembevegelsen etter foretatt translasjon i en av frihetsgradene. Eksponentialleddet forklarer at bevegelsen avtar med tiden. Fra dette leddet er det verdt å merke seg at høyere verdier for ω_n og ζ gir en hurtigere demping av systemet.

Ved gjennomføring av decay-test kan dempingen finnes ved hjelp av logaritmisk dekrement. Logaritmisk dekrement er gitt ved følgende ligning [19]:

$$\delta = \ln \frac{x_a^i}{x_a^{i+1}} \quad (31)$$

Her er $x_a^i = x(t^i)$ og $x_a^{i+1} = x(t^{i+1})$ to påfølgende amplitudetopper.

Ved å sammenligne amplitudeverdier med n antall amplitudeverdiers mellomrom kan følgende forhold beskrives:

$$\delta_n = \frac{1}{n} \ln \frac{x_a^i}{x_a^{i+n}} \quad (32)$$

Følgende forhold benyttes for å bestemme systemets dempingskoeffisient, ζ ved hjelp av den bestemte dempingen:

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} \quad (33)$$

For en lineært dempet systemrespons kan dempet egenfrekvens finnes ved hjelp av følgende ligning:

$$\omega_d = \frac{T}{2\pi} \quad (34)$$

Her er T tiden mellom to amplitudeverdier. Ved å kjenne dempet egenfrekvens og dempingskoeffisient er det mulig å beregne udempet egenfrekvens, ω_n ved følgende forhold:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (35)$$

I denne oppgaven benyttes eget MATLAB-script som ved hjelp av best mulig kurvetilpasning beregner egenfrekvens og demping basert på logaritmisk dekrement.

2.5 Forankring

Forankringen av oppdrettsanlegg har som hensikt å holde anlegget i noenlunde ønsket posisjon, slik at det ikke flytter seg avgårde ved ytre påkjenninger som vind, strøm og bølger. Videre er det avgjørende at forankringssystemet har en lang levetid og krever minimalt med vedlikehold. Det finnes en rekke forskjellige forankringstyper som bygger på forskjellige prinsipper. Ulike faktorer som må tas hensyn til når det skal designes forankringssystem er blant annet lokale værforhold, havdyp, type konstruksjon med tilhørende oppdrifts- og hydrodynamiske egenskaper, samt fare for ytre påkjenninger som kollisjon [20].

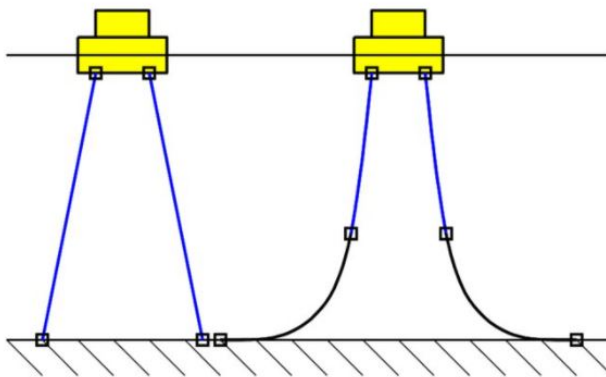
2.5.1 Ulike forankringstyper

Slakkline forankring

Ved slakkline forankring benyttes i hovedsak forankringslinenes egenvekt til å motstå bevegelse i den forankrede konstruksjonen. For et slikt system er forankringslinene relativt slakke når konstruksjonen ikke er utsatt for noen last. Dette er vist til høyre i Figur 15. Når konstruksjonen blir utsatt for en last vil det motstående kraften i hovedsak komme fra linenes endring i den effektive egenvekt og elastisitet [10]. Felles for alle forankringssystem av denne typen er at de har en tung kjetting på havbunnen som fungerer som dempning, samt justering av effektiv egenvekt. Hovedbidraget for motstående kraft kommer fra denne bunnkjettingen [18]. Videre er det hensiktsmessig å benytte kjetting ved bunnsjiktet, siden det oppstår mye friksjon og gnissing mot havbunnen. I avstanden mellom havbunnen og det øvre sjiktet er det derimot lav sannsynlighet for fysiske påkjenninger, og ettersom dette ofte er en lang distanse er det både økonomisk og vektreduserende å benytte fibertau eller wire i dette området [21].

Stramline forankring

Stramline forankringssystem benytter som navnet tilsier stramme forankringslinier, og disse består i hovedsak av wire eller fiber. Ettersom linene ofte er relativt lette, kommer i motsetning til for slakkline forankringssystem motstående kraft på en konstruksjon fra linenes aksiale elastisitet [10]. Derfor er det viktig at forankringslinene har tilstrekkelig elastisitet for å motstå krefter. Ettersom hele forankringslinene er dimensjonert til å være stram, selv ved lav ekstern belastning, stilles det store krav til ankeret. For slike forankringssystem må ankeret også tåle vertikalkrefter. Stramline forankringssystem er vist til venstre i Figur 15.



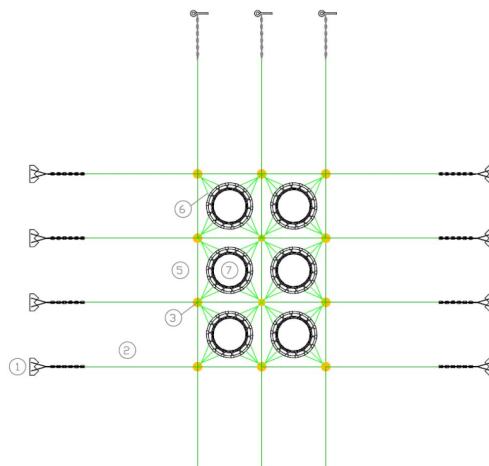
Figur 15: Figuren viser prinsippet for stramline og catenaty forankring [22]

2.5.2 Tradisjonell forankring av oppdrettsanlegg

Tradisjonelle forankringssystemer for oppdrettsanlegg består blant annet av ulike konfigurasjoner og typer av liner, kjetting, bøyer, anker. For å oppnå ønskede egenskaper for forankringslinene er det vanlig å benytte ulike materialer i ulike dybdesegmenter. Felles for de fleste tradisjonelle forankringer av oppdrettsanlegg er å bruke slakkline forankring i kombinasjon med en rammefortøyning. Denne metoden er illustrert i Figur 16 og består av en nedsenket ramme som er forankret i havbunnen ved hjelp av anker eller fjellbolter.

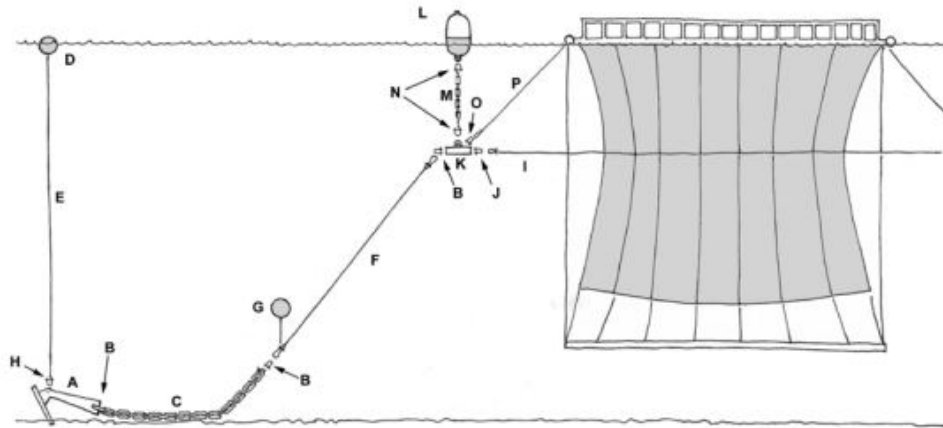
Flytekragen er festet til en koblingsplate i rammen ved hjelp av totalt tolv liner som kalles for haneføtter. Det er ulik praksis for hvilket materiale som brukes i dette segmentet, både kjetting og tau er brukt. En oppdriftsbøye er plassert over koblingsplatene, og denne har som funksjon å redusere de vertikale kreftene på merdene, gi oppdriftskrefter til rammen og å gjøre til- og frakobling lettest mulig [21].

Det er en del ytre påkjenninger som er relatert til det øvre sjiktet, derfor kan det argumenteres for at kjetting er et bra valg her. Spesielt kan det nevnes at det er fare for slitasje ettersom store båter legger seg oppå disse linene. Andre ytre påkjenninger fra UV-stråling og begroing bør tas hensyn til. Oppdrettsnæringen opplever store problemer med begroing av tauverk og andre komponenter. Dette gjelder spesielt på sommerhalvåret da det er høy temperatur og mye UV-stråling i sjøen, noe som betyr gode vekstforhold for alger, blåskjell og andre organismer. UV-stråling og begroing er nok et argument for å benytte kjetting i det øverste sjiktet, siden den er motstandsdyktig også mot disse påkjenningene.



Figur 16: Her vises fortøyningssystem med rammefortøyning. Både anker og fjellbolt er brukt som festepunkt [23]

Figur 17 viser på en god måte hvordan komponentene er sammensatt. Ankeret og bunnkjettingen er markert med henholdsvis A og C. Videre er det brukt tau fra bunnkjetting til koblingsplate (F), og fra koblingsplate og inn til flytekragen (P).



Figur 17: Oversiktsbilde som viser de ulike komponentene ved bruk av rammefortøyning og slakkline forankringsystem [24]

Oppdrettsanlegg som ligger i fjordsystem har ofte en del forankringslinjer som er festet direkte i land. Eksempel på en fjellbolt som brukes til dette er vist i Figur 18.



Figur 18: Fjellbolt som brukes for å feste forankringslinjer i fjell [23]

Det finnes en rekke forskjellige typer av anker, det mest brukte i oppdrettsnæringen er ploganker som er vist i Figur 19. Vanligvis er disse i størrelsesorden 1000 kg - 3000 kg. Normalt blir det antatt at holdekapasitet er 20 ganger ankervekt, men dette kan variere noe med bunnforhold [23].

De fleste anker er dimensjonert for å ta horisontalkrefter, dette gjelder også for ploganker. Dersom ankeret blir utsatt for vertikalkrefter vil dette redusere ankerets holdeevne drastisk. Derfor er det vanlig å sette en grensebetingelse ved beregninger av ankerkrefter slik at maksimal belastning blir det øyeblikket der det begynner å opptre vertikalkrefter på ankeret. I praksis vil det første øyeblikket når det opptrer vertikale krefter på ankeret være når hele bunnkjettingen har løftet seg fra havbunnen.



Figur 19: Ploganker er mye brukt for i oppdrettsnæringen [25]

Det er viktig å ha en rask og effektiv metode for å kunne koble til og fra de ulike komponentene som et forankringssystem består av. Til dette er sjakler mye brukt. De er slitesterke, lett å koble til/fra og fås i tilpassede varianter. Figur 20 viser hvordan en sjakkel er brukt for å koble sammen kjetting og koblingsplate.



Figur 20: Figuren viser bruk av sjakkel for å koble sammen kjetting og koblingsplate [26]

2.5.3 Forankringskrefter

Etter hvert som en forankret konstruksjon blir utsatt for ytre krefter vil den begynne å bevege seg. Forankringslinene blir også satt i bevegelse og forsøker å motstå denne bevegelsen.

For å virke mot denne nevnte bevegelsen er linenes effektive stivhet avgjørende, denne består av material- og geometrisk stivhet. Den geometriske stivheten vil endres etter hvert som konstruksjonen beveger seg - dette betyr at linenes evne til å motstå krefter avhenger av linekarakteristikken [18].

Forankringssystem er typiske ulineære system, noe som betyr at en lineær økning i belastning ikke gir lineær respons og vice versa. Dette er det hovedsakelig den ulineære geometriske stivheten og forankringslinenes drag og treghetsmomenter som bidrar til [31]. Stramline forankringssystem har generelt en mer lineær systemrespons enn slakkline forankringssystemer. Dette henger sammen med at sistnevnte vanligvis innebærer bruk av bunnkjetting noe som bidrar til ikkelinearitet [16].

For å beskrive den statiske linekarakteristikken vil det bli beskrevet noen viktige ligninger. Disse er basert på antagelser om at havbunnen er horisontal, linenes elastisitet er lik null, ingen momentbidrag fra selve forankringslinene eksisterer og at det ikke virker noen hydrodynamisk kraft på linene [12]. Koordinatsystemets origo for forankringslinen som betraktes er definert som siste kontaktpunkt mellom linen og havbunnen, altså like før linen løftes fra havbunnen. Denne posisjonen vil variere med konstruksjonens posisjon. Det er x-z planet som betraktes, og ligningene som gis er nyttige for å beskrive kraft og geometriske forhold for et forankret system [27].

- Geometrisk sammenheng

$$y = \frac{W}{F_H} (\cosh(\frac{W}{F_H} x) - 1) \quad (36)$$

- Linelengde fra konstruksjon til origo, s

$$s = \frac{F_H}{W} (\sinh(\frac{W}{F_H} L)) \quad (37)$$

- Havdyp, h

$$h = \frac{F_H}{W} (\cosh(\frac{W}{F_H} L) - 1) \quad (38)$$

- Avstand fra origo til konstruksjon, horisontalavstand, L

$$L = \frac{F_H}{W} \cosh^{-1}(\frac{W}{F_H} h + 1) \quad (39)$$

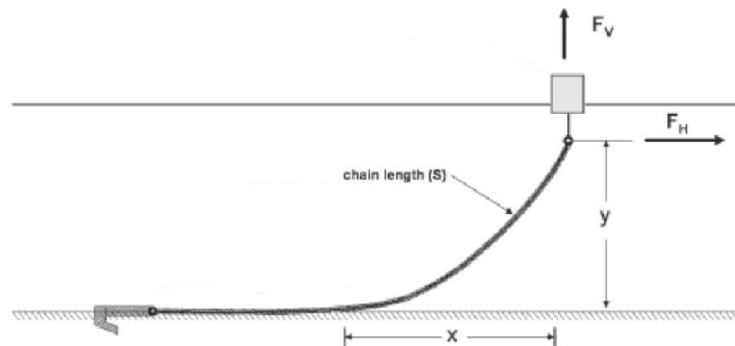
- Vertikalkraft, F_V

$$F_V = Ws \quad (40)$$

- Aksialkraft, T

$$T = \sqrt{H^2 + (Ws)^2} \quad (41)$$

Her er x og y henholdsvis x- og y- koordinater fra koordinatsystemets origo og $w =$ linens egenvekt i vann [9]. De ulike geometriske verdiene som er bestemt av ligningen over kan relateres til Figur 21.



Figur 21: Slakkline forankring [27]

Når en konstruksjon på overflaten flytter på seg som resultat av ytre miljø som vind, strøm og bølger vil det oppstå strekkrefter i forøyningslinene. Dette vil føre til at linene som ligger i lo vil strekkes. Når kreftene som virker på overflateobjektet er større enn egenvekten av forøyningslinen vil den strammes helt opp. Bli kreftene økt ytterligere vil bunnkjettingen begynne å heve seg fra havbunnen, koordinatsystemets origo forflytter seg og linelengden, s blir større. Denne endringen i linekarakteristikk fører til større motstående aksialkraft i henhold til Ligning 41. Følgelig vil også horisontalavstanden, L øke i henhold til Ligning 39.

2.6 Damping for flytende konstruksjoner

For flytende forankrede konstruksjoner er det flere bidrag til demping av konstruksjonens bevegelse.

Følgende dempingsbidrag er de mest dominerende [28]:

- Konstruksjonens viskøse demping. Dette inkluderer alle dragbidrag fra eksitasjonskrefter fra vind, strøm og bølger.
- Bølgedemping
- Forankringssystemets demping

Bølgedemping er et dempingsfenomen fra friksjons mellom veskepartikler og konstruksjonens våte overflate. Denne typen av demping er relatert til væskebevegelsen som oppstår som resultat av lavfrekvente bølgedriftskrefter. Dette bidrar til løft- og dragkrefter og effekten øker ved økende bølgehøyde [18].

To typiske bidrag til viskøs demping er virveldannelse og friksjonsmotstand mellom vannpartikler og konstruksjonens våte overflate. Bevegelser i alle seks frihetsgrader vil påvirkes av viskøs demping, men det er i hovedsak jagg og rull som opplever størst viskøs demping. Den enkleste formen for viskøs demping kan beskrives som lineær proporsjonal til hastigheten [10]. Det finnes også ulineære viskøse effekter, dette blir ikke videre omtalt i denne oppgaven.

Tabell 1 viser prosentvis dempingsbidrag av ulike slag for en skipsformet konstruksjon som er forankret på 200 meters dyp [16]. Denne tabellen illustrerer at forankringen bidrar med en vesentlig del av den totale dempingen. Dette antas å også gjelde for oppdrettsanlegget som undersøkes i denne oppgaven. Videre viser tabellen at økende signifikant bølgehøyde gir økende dempingsbidrag fra forankringen.

Tabell 1: Dempingsbidrag til forankret konstruksjon [16]

Hs	Tp	Dempingsbidrag [%]		
		Forankring	Bølge	Viskøs
8,6	12,7	81	15	4
16,3	16,9	84	12	4

For å motvirke en forankret konstruksjons bevegelse er forankringssystemets demping og stivhet sentral. Forspenning er viktig for å bestemme systemets demping, men også andre dynamiske dempingsbidrag er viktig å ha kontroll på. For forankringssystem som utsettes for både vind- og bølgelaster kan ulike dempingsbidrag være hydrodynamisk drag, vortex induisert vibrasjon og friksjon internt i linematerialet. Friksjonsmotstand mellom forankringsline og havbunnen kan også påvirke systemets demping.

De eksperimentelle forsøkene og numeriske beregningene som gjennomføres i denne oppgaven har som hensikt å analysere bevegelse- og kraftrespons ved ulike forspenning- og bølgespektre. Som nevnt bidrar forankringsystemet til en forankret konstruksjon med en betydelig del av systemets totale dempingen. Forankringssystemet som benyttes i denne oppgaven kan betraktes som en stramline forankring og det er ingen dempingsbidrag fra friksjonsmotstand mellom havbunnen og forankringslinene. Dette er videre forklart i Kapittel 3. Forsøkene er likevel interessante og har overføringsverdi til slakkline forankringssystem.

2.7 Skalering

Det har i lang tid vært interessant å gjennomføre modellforsøk. Grunnen til dette er blant annet at det er mer effektivt og økonomisk å drive forskning på modeller sammenlignet med fullskala konstruksjoner. Modelltesting for offshore konstruksjoner har som oftest som hensikt å gi relevant og verdifull data til utviklinger av nye konsepter. Modelltesting benyttes også for validering av numeriske dataprogram.

Ved gjennomføring av modelltesting er det alltid ønskelig å gjenskape en mest mulig tilsvarende situasjon som fullskala forhold. For å sikre dette er det viktig å forholde seg til skaleringslover som beskriver skaleringen av krefter og ulike fenomener. For å gjenskape en fullstendig tilsvarende situasjon i modellskala må følgende forhold være oppfylt: geometrisk, kinematisk og dynamisk likhet [29].

Geometrisk likhet

Geometrisk likhet sikres gjennom at modellen og fullskala konstruksjon har like geometriske forhold. Her er det viktig å huske på at dette også gjelder omgivelser slik som for eksempel bølger, strøm, havdyp og ruhet. Skaleringsfaktor for å sikre geometrisk likhet er gitt i følgende ligning:

$$\lambda = \frac{D_f}{D_m} \quad (42)$$

Her er λ skaleringsfaktor, D_f er dimeter for fullskala konstruksjon og D_m er diameter for modell.

Kinematisk likhet

Kinematisk likhet krever at det er tilsvarende hastighetsforhold mellom fullskala konstruksjon og modell. Dette innebærer at strømningsforholdene rundt legemene er like [29].

Dynamisk likhet

Dynamisk likhet krever at kraftforholdene er riktig skalert. Ulike krefter som dette inkluderer er treghetskrefter, viskøse krefter, gravitasjonskrefter, trykkrefter, elastiske krefter i fluidet og overflatekrefter [29].

Skaleringslover

I praksis er det umulig å oppnå geometrisk, kinematisk og dynamisk likhet samtidig. Derfor må det vurderes hvilke egenskaper som er viktig for hvert enkelt eksperimentelle oppsett. Deretter må det forsøkes så godt som mulig å skalere de viktigste forholdene. Det finnes ulike modellover som kan brukes ved skalering. Under er en oversikt for ulike dimensjonsløse kraftforhold ved skalering gitt [29].

Tabell 2: Ulike skaleringslover

Dimensjonsløs nummer	Kraftforhold	Definisjon
Reynolds	Treghet/Viskositet	$\frac{UL}{\nu}$
Froude	Treghet/Gravitasjon	$\frac{U}{\sqrt{gL}}$
Mach's	Treghet/Elastisitet	$\frac{U}{\sqrt{E_v/\rho}}$
Weber's	Treghet/Overflatespenning	$\frac{U}{\sqrt{\sigma/\rho L}}$
Keulegan-Carpenter	Drag/Treghet	$\frac{U_A T}{D}$

Her er U hastighet, ν er kinematisk viskositet, $\sqrt{E_v/\rho}$ er lyd hastighet i vann, T er svingningsperiode, D er diameter og U_A er maksimalhastighet.

I denne oppgaven er det brukt skalering av blant annet krefter og geometriske størrelser. Tabell 3 viser en oversikt over Froude-skaleringer som er benyttet.

Tabell 3: Froude-skalering

Type	Enhet	Skaleringsfaktor
Areal	m^2	λ^2
Frekvens	Hz	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$
Kraft	N	λ^3
Lengde	m	λ
Masse	Kg	λ^3
Tid	s	$\sqrt{\lambda}$

2.8 Forskrift om krav til teknisk standard for flytende akvakulturanlegg (NS9415)

Norsk Standard 9415 (NS9415) er en standard for flytende oppdrettsanlegg i Norge. Standarden omfatter krav til lokalitetundersøkelse, risikoanalyse, utforming, dimensjonering, utførelse, montering og drift. På samme måte som at NORSOK er en anerkjent standard i oljeindustrien, har NS9415 blitt en tilsvarende kjent standard i oppdrettsnæringen, og flere utenlandske aktører opererer også i henhold til denne standarden.

Standarden NS9415 definerer følgende hovedmål: «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 parametere som skal brukes for å angi naturtilstanden på en gitt lokalitet, samt en fremgangsmåte for klassifisering av lokaliteter».

Videre setter standarden «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». [30]

For analyser av sentrale funksjoner og komponenter slik som forankringssystem er det viktig at dette gjøres i henhold til standarden. Denne oppgaven benytter 2003 versjonen av NS9415.

3 Eksperimentell metode

Gjennomføringen av modellforsøkene for det semilukkede oppdrettsanlegget er gjennomført i MarinLab ved HVL. Dette kapittelet vil beskrive utstyr og gjennomføringsmetoder for disse testene. I denne oppgaven er det begrensningene for de eksperimentelle forsøkene som legger føringer for gjennomføring og testoppsett. Den mest vesentlige begrensningen i MarinLab med tanke på forankringssystemet er bølgetankens dybde på bare 2,2 meter. Det er likevel hensiktsmessig å gjennomføre testene ved denne dypgangen.

For å oppnå pålitelig statistisk informasjon fra de eksperimentelle forsøkene er det viktig at testtiden er tilstrekkelig lang nok og generelt er det ønskelig å ha så lang testtid som mulig. Det eksisterer litt ulike definisjoner på hva som er minstekrav. Det hevdes for eksempel av minste testtid skal være 100 ganger den største bølgeperioden [10]. Det tilsvarer 1 time og 44 minutter i fullskala for denne oppgaven. Denne oppgaven benytter en testtid på 3 timer og dette er anbefalt for å få tilstrekkelig statistisk data [20]. Ved hjelp av Froude-skalering tilsvarer dette 28 minutter og 28 sekunder.

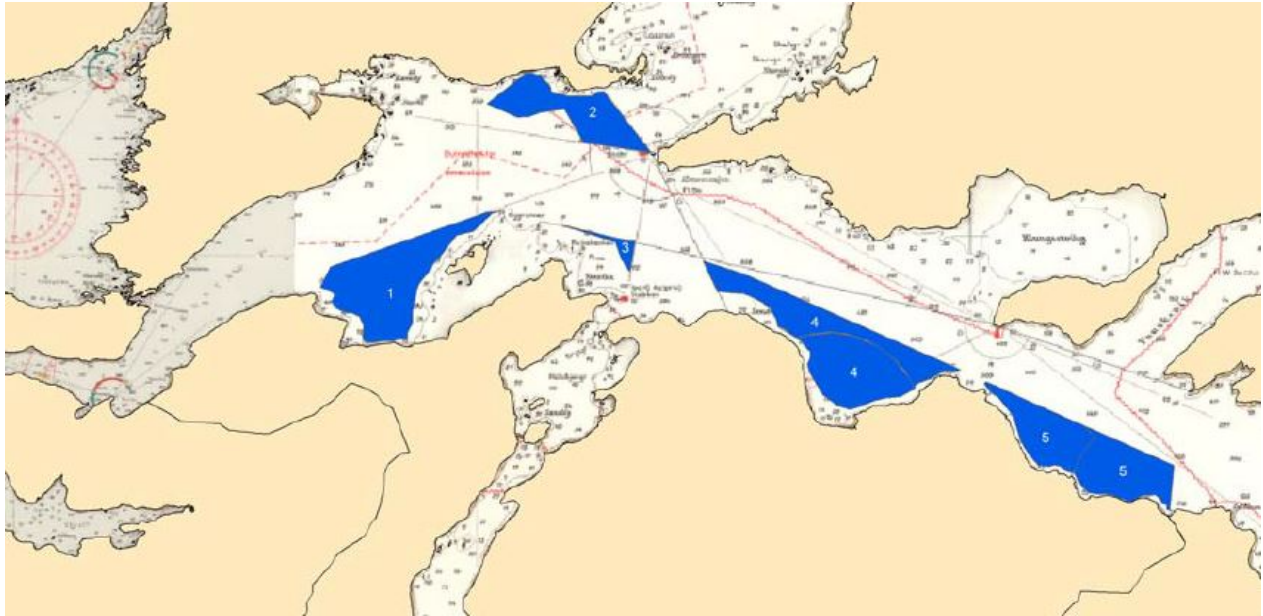
De eksperimentelle forsøkene gjennomføres for å undersøke hvordan bevegelses- og kraftresponsen for konstruksjonen og forankringssystemet påvirkes av ulike bølgespektre og forspenning i forankringslinene. Forankringssystemet har fokus på å benytte relativt korte forankringslinjer ettersom det er ønskelig å sette fokus på arealbesparende forankringssystem.

3.1 Dimensjonerende bølge

OceanTECH skal plasseres i Skjerstadjorden like ved Saltstraumen utenfor Bodø. Selve lokasjonen er ikke helt bestemt enda, men det er fem foreslåtte områder. Disse områdene er undersøkt og analysert av ekstern konsulent, Biologisk Forskningsgruppe, avdeling for Fiskeri og Naturfag. Tabell 4 viser gjennomsnittsverdier for H_s og T_p basert på målinger for de fem ulike lokasjonene. Lokasjonene er merket med blå felt i Figur 22.

Tabell 4: Bølgedata for aktuelle lokasjoner

Lokasjon	Lengste strøklengde [m]	H_s [m]	T_p [s]
1	10000	1.14	3.25
2	14000	1.54	3.62
3	22000	1.77	3.96
4	14000	1.78	3.99
5	7300	1.33	3.42



Figur 22: Oversikt over potensielle lokasjoner for plassering av OceanTECH i Skjerstadvjorden like ved Saltstraumen [31]

For å beregne dimensjonerende bølge brukes den lengste strøklengde og vindhastighet. Ifølge NS9415 skal det tas utgangspunkt i en 50-årsvind som er fastsatt til 35 m/s. Fra Tabell 4 beregnes gjennomsnittlig lengste strøklengde til å være 13460 m. Basert på dette velges maksimale strøklengde for denne oppgaven litt konservativt til å være 14000 m. Det er også ønskelig å generere to tilleggsspekter for å utvide analysegrunnlaget, til dette velges 50-års vindhastighetene $U_2 = 30$ m/s og $U_3 = 25$ m/s.

Bølger innaskjærs er primært vindgenererte og det er ofte ikke fullt utviklede sjøtilstander som er dominerende. For å beskrive slike omstendigheter er Jonswap-spekteret mye brukt. For å beregne spekterets tre parameter: H_s , T_p og γ brukes ifølge NS9415 følgende ligninger:

$$U_A = 0,71U^{1,23} \quad (43)$$

$$H_s = 5,112 \cdot 10^{-4} U_A F^{1/2} \quad (44)$$

$$T_p = 6,238 \cdot 10^{-2} (U_A F)^{1/3} \quad (45)$$

$$\gamma = 44(H_s/F)^{2/7} \quad (46)$$

Her er U vindhastighet, U_A er justert vindhastighet og F er strøklengde. Ved å sette inn for $F = 14000$ m, U , U_2 og U_3 bestemmes de tre fullskala bølgeparameterne, disse er presentert i Tabell 5. Skalering for å beregne de eksperimentelle bølgespektrene er gjort i henhold til Froude-skalering.

Tabell 5: Bølgeparameter for de ulike Jonswap spektrene

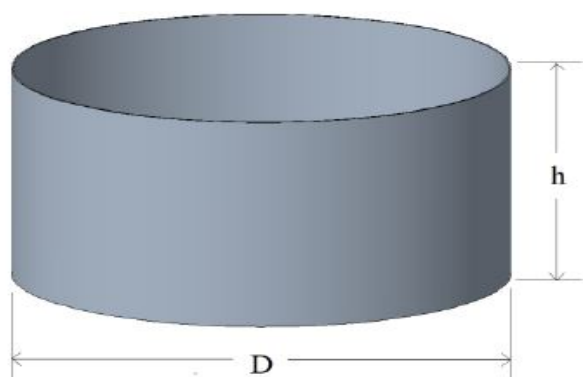
Parameter	Fullskala			Nedskalert		
	Jonswap 1	Jonswap 2	Jonswap 3	Jonswap 1	Jonswap 2	Jonswap 3
H_s [m]	2,2510	2,8169	3,4050	0,0563	0,07040	0,0851
T_p [s]	5,0195	5,4091	5,7620	0,7937	0,8553	0,9111
γ	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08

Resultatene viser at parameterne H_s og T_p er betydelig større enn de registrerte bølgedata utført av den eksterne konsulenten som er presentert i Tabell 4. Dette er fornuftig siden dimensjonerende bølge representerer 50-års bølgen. Videre er det uvisst hvor lang måleperioden var, derfor må det ikke legges altfor stor vekt på dataene som er utarbeidet av den eksterne konsulenten. De ulike bølgespektrene blir heretter kalt for JS1, JS2 og JS3.

3.2 Modellbeskrivelse og testoppsett

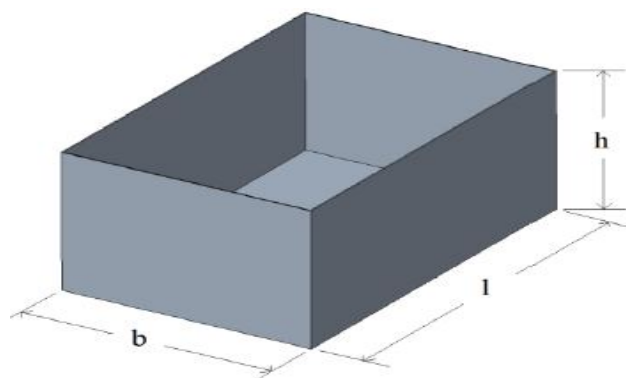
I denne delen vil de ulike komponentene som modellen er bygd opp av bli presentert med tilhørende mål. Målene er basert på egne målinger som er tatt av modellen siden det har vist seg å være små avvik fra den produserte modellen og de tilhørende arbeidstegningene. Videre vil testoppsettet bli presentert.

Modellen består av to identiske merder som er bygd i aluminium. Disse har konet bunn med dybde på 32 mm og vinkel på 7° . Det har blitt plassert lokk av pleksiglass oppå merdene for å hindre at de fylles med ekstra vann ved høye bølger. Figur 23, 24 og 25 viser de tre hovedkomponentene for modellen. Videre er det brukt gjengestenger i rustfritt stål med diameter på 12 mm for å stive av modellen.



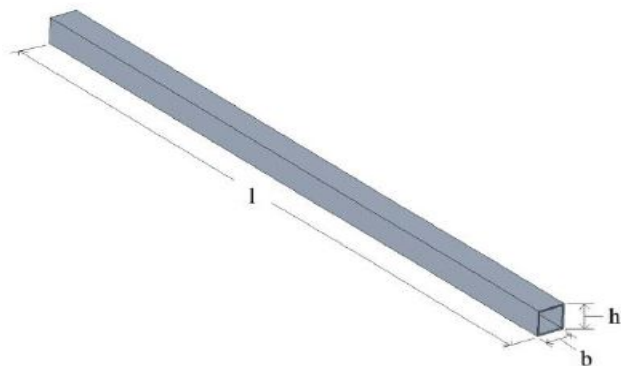
Merd	
Parameter	Størrelse
Diameter (D) [mm]	600
Totalhøyde (h) [mm]	300
Godstykkelse [mm]	2,0
Vekt [Kg]	7,2

Figur 23: Skisse av merd med tilhørende nedskalerte data [13]



Prosessflåte	
Parameter	Størrelse
Lengde (l) [mm]	600
Høyde (h) [mm]	200
Bredde (b) [mm]	395
Godstykkelse [mm]	2,0
Vekt [Kg]	8,4

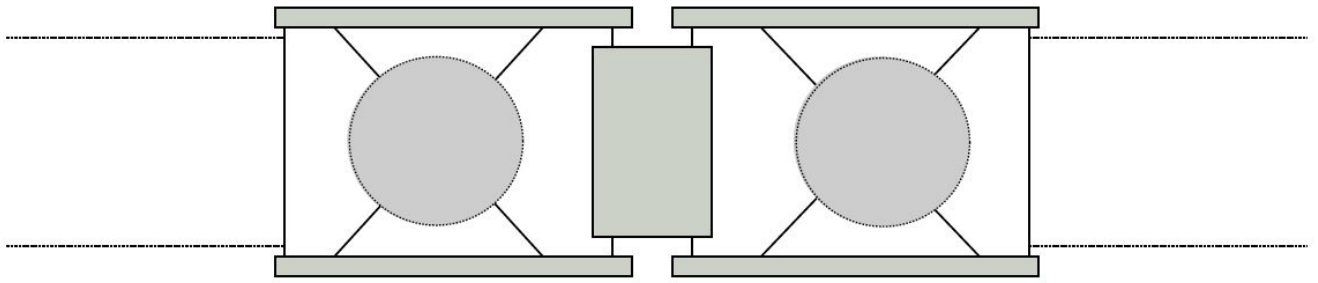
Figur 24: Skisse av prosessflåte med tilhørende nedskalerte data [13]



Fortøyningsbom	
Parameter	Størrelse
Lengde (l) [mm]	1015
Høyde (h) [mm]	40
Bredde (b) [mm]	40
Godstykkelse [mm]	2,5
Vekt [Kg]	1,65

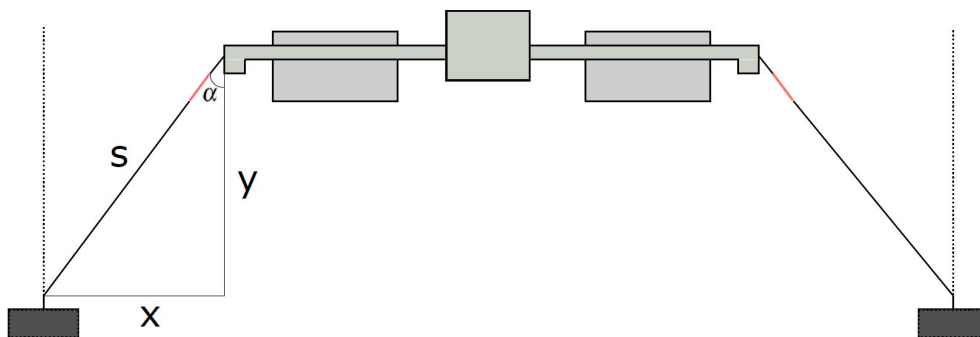
Figur 25: Skisse av fortøyningsbom med tilhørende nedskalerte data [13]

Figur 26 viser sammenstillingen for modellen, og det kommer frem hvordan gjengestenger er brukt for å avstive fortøyningsbommene og merdene. De stiplede linjene viser hvordan forankringslinene er festet til de tversgående gjengestengene, innfestningspunkt er 1 cm fra fortøyningsbommene.

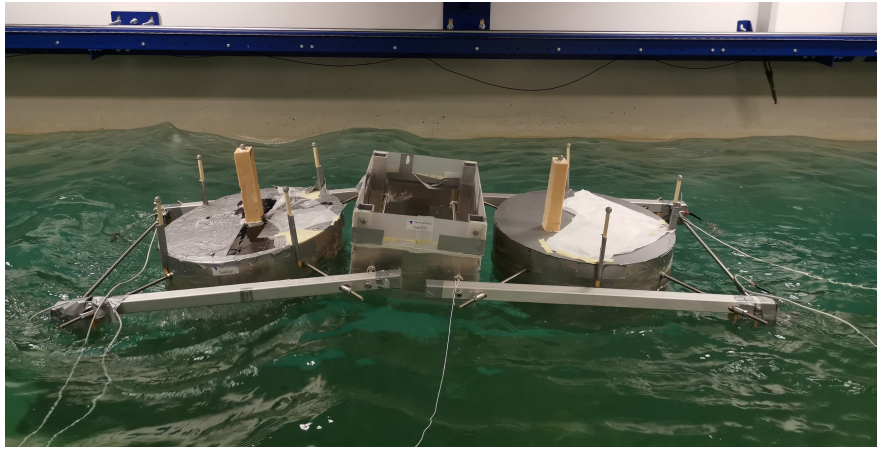


Figur 26: Sammenstilling av modellen med forankringslinjer

Figur 27 viser hvordan modellen er fortøyd til bunnen av MarinLab ved hjelp av betonglodd. Forsøkene i denne oppgaven er gjennomført med modellen plassert tilnærmet rett mot bølgerne, altså med null graders angrepsvinkel. Det er betongloddene som holder konstruksjonen i posisjon, det er derfor avgjørende av disse er plassert i riktig posisjon i forhold til hverandre. Det viste seg å være svært vanskelig å oppnå perfekt posisjonering av betongloddene siden det var vann i tanken og oppmålingen måtte foregå over vann. Plasseringen av betongloddene er likevel antatt å være rimelig bra, og det ble gjort målinger som viste at modellen hadde en angrepsvinkel som var tilnærmet rett mot bølgeretningen når forspenningen var nær lik i alle fire forankringslinjene. De røde feltene på forankringslinjene i Figur 27 viser plasseringen av lastcellene som brukes for kraftmålinger og justering av forspenning. Figur 28 viser modellen under testing.



Figur 27: Skisse som viser modellen som er fortøyd med betonglodd



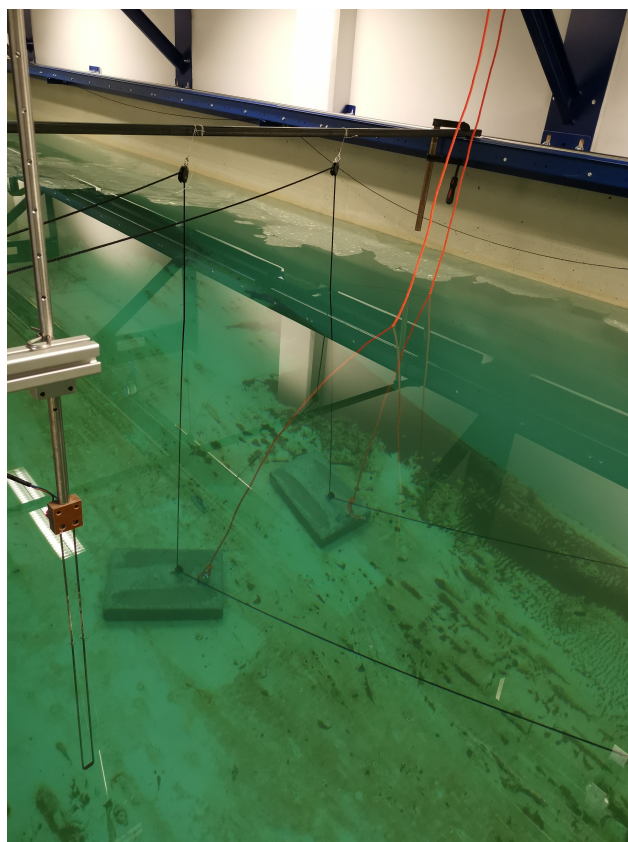
Figur 28: Modellen i bølger. Her kommer det frem hvordan sammenkobling mellom fortøyningsbommene og prosessflåten har rotasjonsmulighet om y -aksen

Som beskrevet i Kapittel 2.5.3 defineres origo for hver forankringsline i det punktet hvor forankringslinen først kommer i kontakt med havbunnen. For modellforsøkene tilsvarer origo kontaktpunktet mellom forankringslinen og trinsen på betongloddet. Total linelengde, s er 3,63 m og x - og y koordinatene er henholdsvis 3 m og 2,05 m. Her er det verdt å nevne at betongloddet og trinsen til sammen bygger opp 0,15 m slik at netto vanddyb i MarinLab er 2,05 m. Vinkelen, α er 56° .

Forankringsoppsettet er også vist i Figur 29, hvor det kommer frem hvordan forankringslinene går fra modellen og ned gjennom en lavfriksjonstrinse som er festet på betongloddene. Videre går de til overflaten og gjennom en ny trinse som henger i en tversgående bjelke, på denne måten er det mulig å justere forspenningen. Justeringen av forspenning gjøres ved å justere linelengden. Betongloddene har mål på 52 cm x 32 cm x 10 cm og en vekt på 38,5 kg over vann. Det er brukt rikelig med armering i loddene for å oppnå en høy vekt, dette er viktig fordi det er mye groe i tankbunnen, noe som gir et lavt friksjonstall. Helt til venstre i Figur 29 vises også en av bølgehøydemålerne som er brukt. Forankringsoppsettet er identisk på begge sider av modellen. Tabell 6 viser oversikt over gjennomsnittlige forspenninger som er benyttet.

Tabell 6: Forspenninger som er benyttet

Forspenning	Kraft [N]
1	2,4
2	8,4



Figur 29: Bildet viser forankringsoppsett med betonglodd fra bølgetanken

Tauverket som forankringslinene består av er flettet 5 mm flaggline av polyester. Dette har en bruddstyrke på 405 kg og egenvekt på 0,0014 kg/m i luft.

3.3 Ballastering

OceanTECH sin prosessflåte har en relativt høy masse og for et oppdrettsanlegg er det naturligvis nødvendig med vann i merdene. Ved gjennomføring av modellforsøkene er det brukt vann i merdene og vektorer i prosessflåten for å oppnå riktig dypgang. Tabell 7 viser oversikt over ballast og fribord for de ulike delene av modellen. Forankringslinene vil påføre relativt store vertikale krefter på konstruksjonen og siden fortøyningsbommene har liten oppdrift er det festet oppdriftsmateriale i hver hjørnepunkt. Dette oppdriftsmaterialet har lav tetthet på $5,19 \text{ kg/m}^3$ og har i tillegg som funksjon å gjøre fortøyningsbommene tette slik at de ikke fylles med vann.

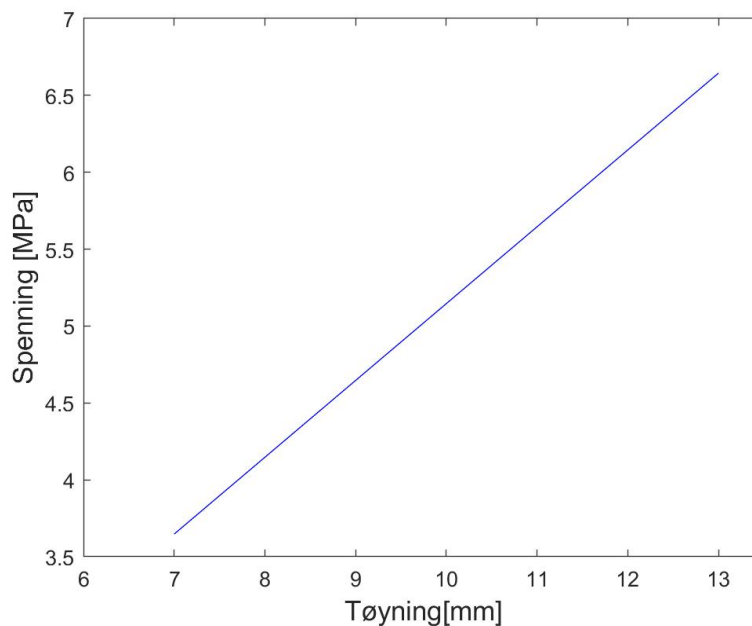
Tabell 7: Ballastering og dypgang for de ulike delene

Modelldel	Ballast [kg]	Fribord [mm]
Merd	43,2	12,5
Prosessflåte	7,2	23,5
Fortøyningsbom	-	5,7

3.4 Strekktest

Det er gjennomført strekktest i fri luft for å undersøke elastisiteten for tauet som brukes som forankringsliner i forsøkene. Tauet ble hengt opp slik at det henger fritt vertikalt, deretter ble den forspent med en vekt på 5 kg, slik at det strekte seg fra utgangsposisjon. Dette er nødvendig fordi et tau som bare er utsatt for sin egenvekt vil ha en relativt stor forlengelse i starten når det først blir påført en last. Etter at tauet er strekt opp er det lest av forlengelse etter hvert som lasten økte. Det ble benyttet fem vekter med kjent masse.

Figur 30 viser plott av spenning mot relativ tøyning for tauet. Figuren viser at tøyningen er tilnærmet lineær, den blir fastsatt til $1 \text{ mm/kg} \approx 0,102 \text{ mm/N}$. Ved å benytte Hooks lov: $F = kx$ og definisjon for spenning: $F = \frac{\sigma}{A}$ beregnes elastisitetsmodulen til å være tilnærmet 516 MPa når det antas konstant tverrsnittsareal.

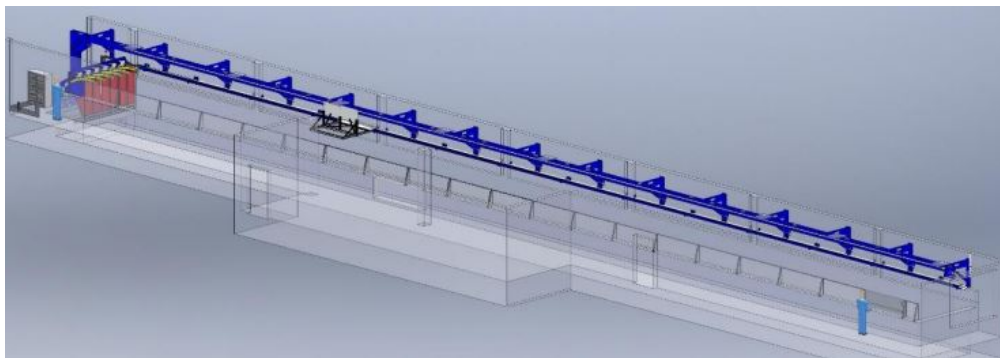


Figur 30: Spenning er plottet mot tøyning for tauet som er brukt som forankringsline i forsøkene

3.5 Hydrodynamisk testfasilitet

MarinLab er et moderne laboratorium bestående av bølgegenerator, slepevogn, kamera for bevegelsesdeteksjon og annet utstyr. Bølgetanken er vist i Figur 31 og har en lengde på 50 m, bredde på 3 m og dybde på 2,2 m [32]. Tanken er fylt med ferskvann, og ved gjennomføring av testene holdt vannet en temperatur på $17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ved en meters dyp. Ved å anta 1 atmosfære trykk gir dette en tetthet for vannet på $998,7\text{ kg/m}^3$. Det er antatt at det er konstant tetthet for hele tanken.

Når det kjøres slepeforsøk eller bølgegeneratoren er i bruk vil det oppstå refleksjonsbølger rundt konstruksjonen som er plassert i bølgetanken. Slike bølger vil etter hvert bli reflektert i tankveggene og komme tilbake på konstruksjonen. Slike veggeffekter avhenger generelt av tre forhold; konstruksjonens hastighet, forholdet mellom tank- og konstruksjonsbredde og tankdybde [33]. Det er ulike definisjoner for hva som er ansett som et akseptabelt forhold mellom tank og konstruksjonsbredde. For tidligere forsøk i MarinLab er det en tommelfingerregel at det skal være en klaring på 0,5 meter på hver side av konstruksjonen. For de eksperimentelle forsøkene som er gjennomført i denne oppgaven er avstanden på hver side av modellen på 1,1 meter, dette anses som tilstrekkelig avstand. Det er likevell viktig å ta hensyn til veggeffekter ved analyse av data.



Figur 31: Oversiktsbilde av MarinLab [32]

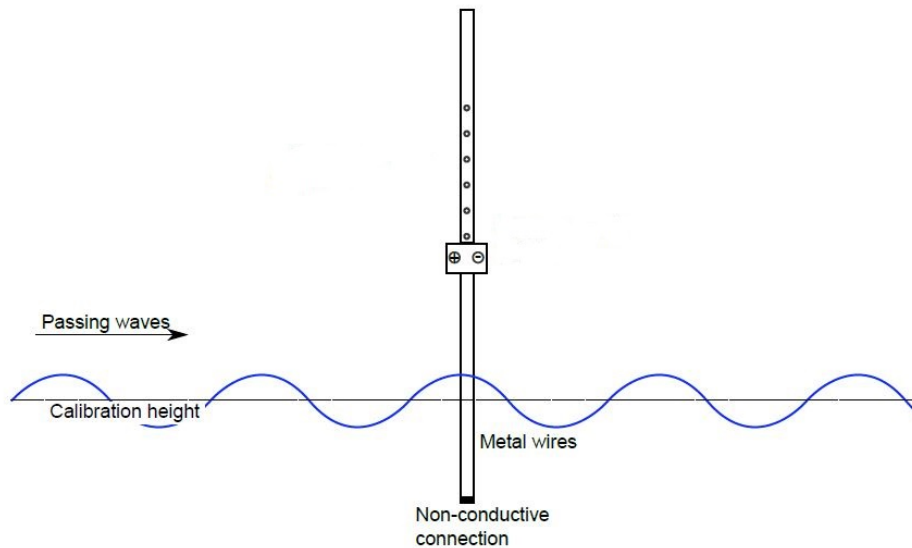
3.5.1 Bølgegenerator

Bølgegeneratoren som er plassert helt til venstre i Figur 31 består av seks leddede flaps. Bølgegeneratoren kan generere både regulære og irregulære bølgespekter med maksimal bølgerhøyde på 0,5 meter ved bølgeperiode på omtrent 2 sekunder. De standard irregulære bølgespektrene Jonswap, PM og Bretschneider kan benyttes, men det er også mulig å bruke egendefinerte bølgespekter. Ved motsatt ende i bølgetanken er det en bølgeabsorberende strand som i størst mulig grad skal hindre refleksjon i lengderetningen.

Bølgegeneratoren styres av datamaskin ved hjelp av programvare med navn *Njord Wave Synthesis* hvor ønsket bølgeparameter settes. I denne oppgaven er det brukt Jonswap bølgespektre ved gjennomføring av testene, men ved innledende testing og validering for prosjektet ble det også brukt regulære bølger.

3.5.2 Bølgehøydemåler

For å registrere virkelig bølgehøyde for bølgene som genereres benyttes to bølgehøydemålere. Disse består av noder som stikker ned i vannet, og det er motstandsending som er proporsjonal med bølgehøyden som er grunnlaget for beregningene. Det er viktig å gjennomføre kalibrering før bruk, og dette gjøres ved å flytte nodene kjente avstander opp og ned, samt registrere nullnivå for vannoverflaten. Bølgehøydemålerne opererer med en samplingsrate på 128 Hz. Figur 32 viser en skisse for bølgehøydemåler som er benyttet i denne oppgaven.

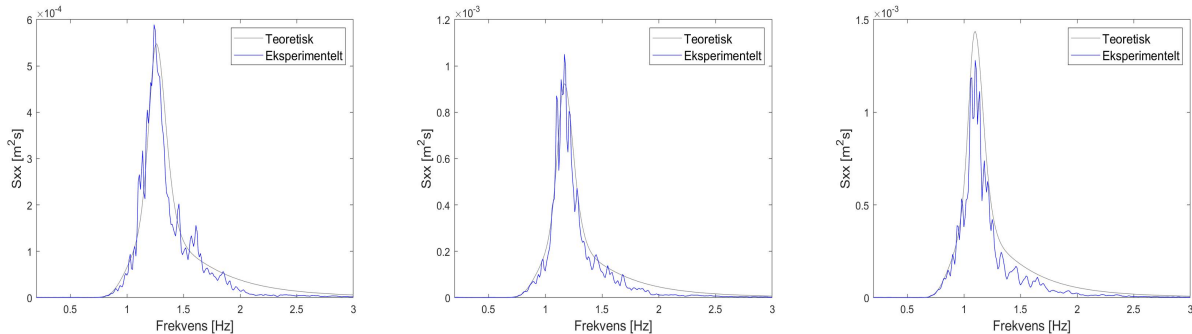


Figur 32: Figuren viser bølgehøydemåler som er brukt i denne oppgaven [34]

Bølgespekter som genereres avviker ofte fra det teoretiske bølgespekteret. Grunnene til dette kan som tidligere nevnt være refleksjon fra modellen og tankveggene. Videre kan energifordelingen over de ulike frekvensene forskyves etter hvert som bølgene vandrer gjennom bølgetanken. Ved hjelp av bølgehøydemålere som registrerer virkelig bølgehøyde- og spekter er det mulig å finjustere bølgespektre, slik at teoretisk og eksperimentelt bølgespekter samsvarer godt. Dette gjøres ved å benytte *gain correction* for frekvensområder der avviket i bølgeenergi er størst. Det er gjort innledende tester og kalibrering av bølgespekter ved bruk av to bølgehøydemålere som er plassert henholdsvis 10 m og 17 m fra bølgegeneratoren.

Det viser seg at bølgehøydemåleren som er plassert 10 m fra bølgegeneratoren gav best resultat ved sammenligning av teoretisk og eksperimentelt bølgespekter. Dette har trolig sammenheng med at denne bølgehøydemåleren har størst avstand til konstruksjonen og følgelig er minst påvirket av refleksjoner. Data fra denne bølgehøydemåleren benyttes i denne oppgaven.

I Figur 33 er sammenligningen mellom de teoretiske og eksperimentelle bølgespektrene vist. Det er disse eksperimentelle bølgespektrene som benyttes i denne oppgaven. På x-aksen viser frekvenser, Hz mens det på y-aksen viser spektral bølgeenergi, S_{xx} .



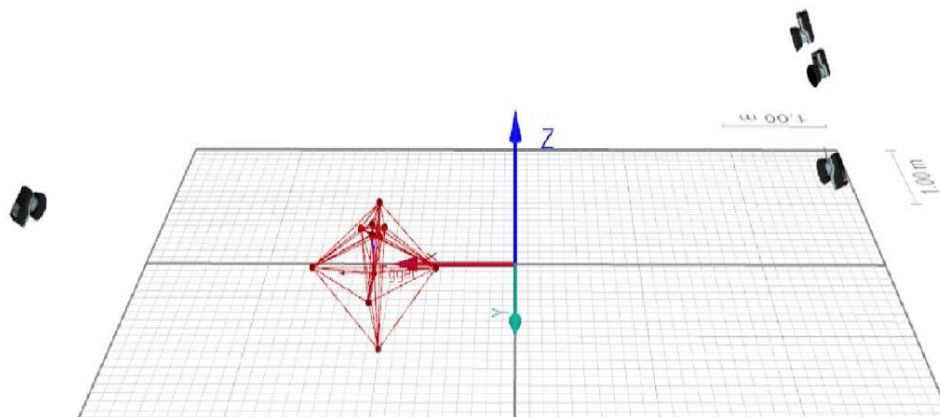
Figur 33: Teoretisk og eksperimentelt bølgespekter for de ulike bølgespektrene. JS1 til venstre, JS2 i midten og JS3 til høyre

Selv om det er lagt ned mye arbeid i ulike metoder for å få kurvene mest mulig lik hverandre, er det mulig å observere en del avvik. Spesielt tydelig er dette i området rundt toppen av spektrene. Her er det verdt å nevne at spissheitsparameteret som er brukt i denne oppgaven er på 4,08 i henhold til NS9415. Dette er betydelig mer enn den mye brukte verdien på 3,3. Det er ikke utenkelig at det hadde blitt en enda bedre tilnærming mellom teoretisk og eksperimentelt bølgespekter ved å benytte spissheitsparameter på 3,3.

3.5.3 Kamerasystem for bevegelsesdeteksjon

MarinLab har et avansert bevegelsesdeteksjonssystem som er levert av Qualisys Track Manager (QTM). Dette 3D systemet består av fire kamera av typen Opus 500, som registrerer bevegelse i alle seks frihetsgrader ved hjelp av reflektorer som fester på modellen [35]. Reflektorene er sirkulære og har en diameter på 10 mm. I programvaren for QTM defineres konstruksjonen basert på reflektorene som er festet til modellen. Bølgedata hentes også fra dette programmet. Bevegelsen til den definerte konstruksjonen blir registrert som funksjon av tiden. Translasjoner registreres i meter, mens rotasjoner registreres i grader. Samplingsraten for dette systemet er 100 Hz. Figur 34 viser et oversiktsbilde av kamera og en definert konstruksjon. Her er positiv x-retning definert mot bølgene.

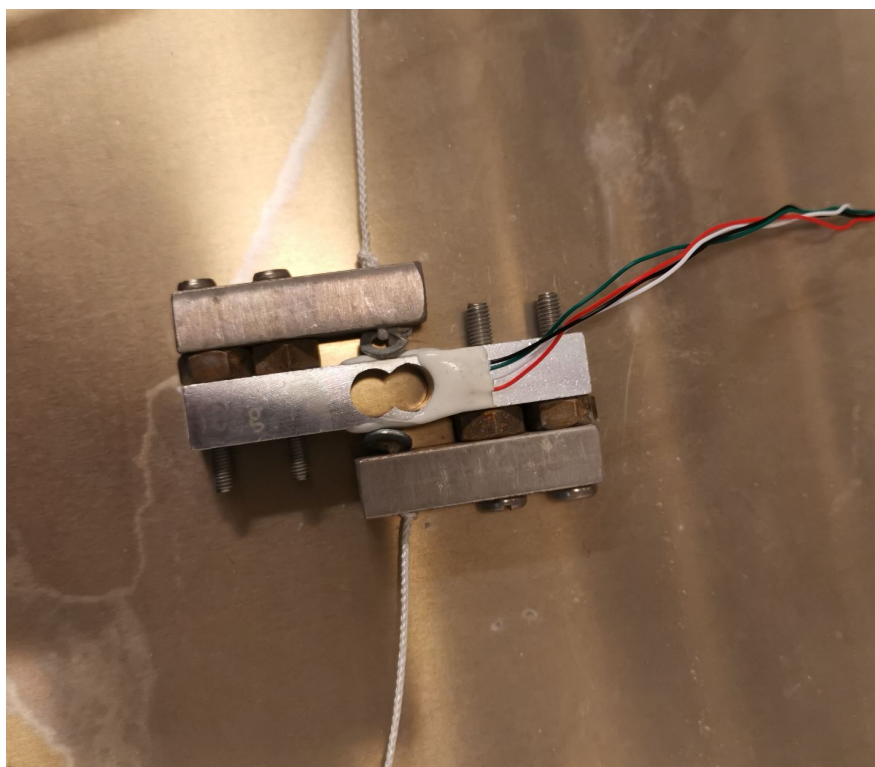
I denne oppgaven brukes QTM til gjennomføring av decay-tester og bevegelsesanalyse i hiv og jag.



Figur 34: Figuren viser oversikt over kamera, definert body og aksesystem [34]

3.5.4 Lastceller

Et viktig måleinstrument for denne oppgaven er lastceller, disse brukes for å måle de aksiale kreftene som opptrer i forankringslinene. Lastceller måler krefter ved at det registreres elektriske signaler (mV) som er antatt å variere lineært med belastningen. Selve lastcellen består av en strekkklapp av metall eller halvledermateriale. Denne strekkklappen har egenskaper som endrer motstand når den blir utsatt for deformasjon i form av trykk og strekk. For at en lastcelle skal måle riktig, altså at strekkklappen blir riktig deformert er det viktig at selve kraften som virker fra forankringslinen er parallelt med måleretningen for lastcelle. For å sikre dette har det blitt laget braketter som er festet på lastcellene, dette er vist i Figur 35.



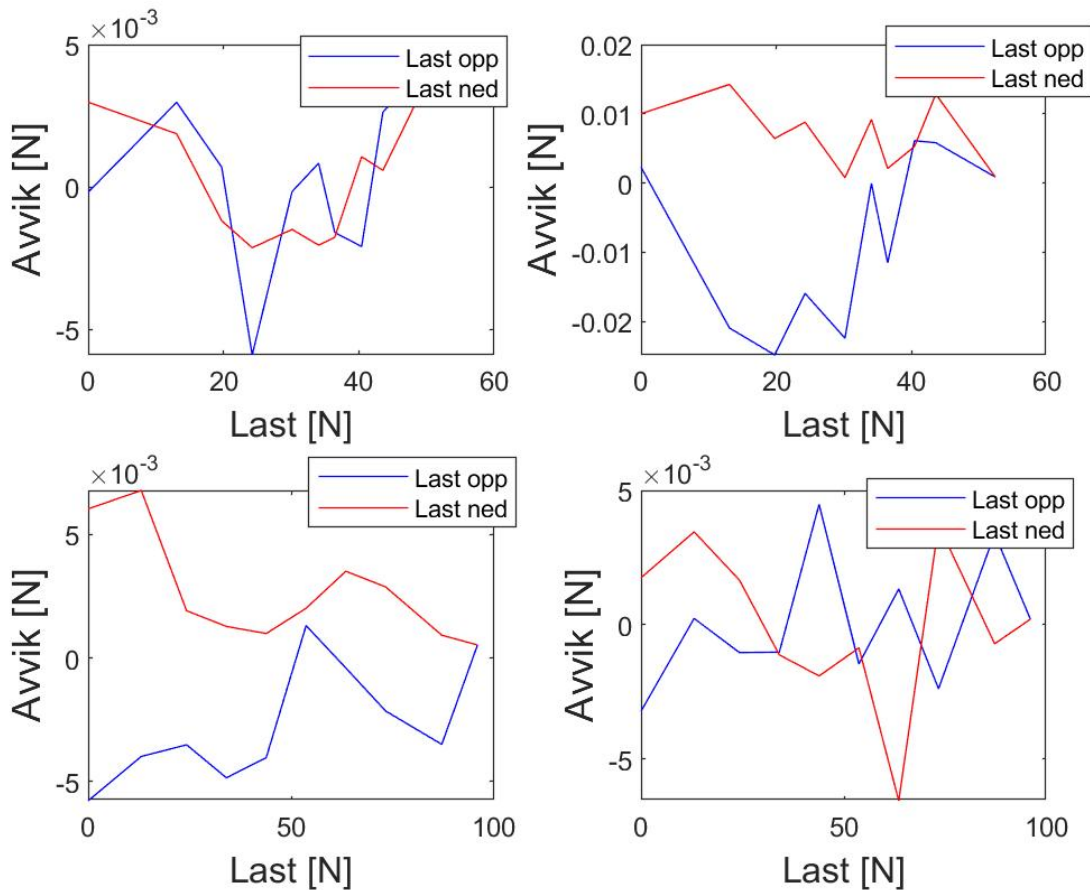
Figur 35: Lastcelle med brakett

Lastcellene som brukes i forankringslinene oppstrøms har en målekapasitet på 5 kg, mens nedstrøms lastceller har målekapasitet på 10 kg. Det er i utgangspunktet ønskelig å benytte lastceller med 5 kg målekapasitet for alle linene ettersom det forventede måleområdet for testene ikke oversiger 5 kg. Ettersom en av lastcellen ble ødelagt under forsøkene, samt at det var ønskelig å ha parvis like lastceller ble det benyttet to ulike typer av lastceller med ulik målekapasitet.

Det er gjennomført kalibrering av alle lastcellene for å sikre nøyaktige målinger. Kalibreringen ble utført ved å montere opp lastcellene horisontalt i en fast rigg. Ved hjelp av LabView-program ble responssignalet (mV) lest av ved belastning av vekter med kjent masse for totalt 10 målepunkter. Hele måleintervallet ble brukt. Med bakgrunn i disse målingene er det gjort en kurvetilpasning for å best mulig beskrive et lineært forhold mellom påsatt kraft og responssignal. Kurvetilpasningsmetode som er benyttet er minste kvadraters metode - en metode som sikrer at det er minst mulig avvik mellom den tilpassede kurven på formen $y = ax + b$ og de registrerte målingene. Basert på den tilpassede kurven kan parameterne a og b finnes. Disse verdiene legges videre inn i LabView-program og er brukt for registrering av kraftmålinger i denne oppgaven. Samplingsraten for lastcellene er på 1000 Hz.

Kalibreringen som er utført er også en god måte for å kartlegge måleavvik og hystereser for de ulike lastcellene. Ved å legge vektene på i ordnet rekkefølge, samt å gjøre både en opp- og nedlasting er dette undersøkt. Hystereser er definert som avviket i avlest kraft mellom opp- og nedlasting for en bestemt påsatt last [36].

Figur 36 viser hvordan avviket mellom den nøyaktige vekten og den beregnede vekten som baserer seg på parameterne a og b varierer ved økende last. Her kommer også hysteresen tydelig frem.



Figur 36: Avvik som funksjon av last ved opp- og nedlasting. Lastcellene er kronologisk plassert slik at for eksempel front høyre er oppe til høyre i figuren

Tabell 8 viser maksimal måleavvik ved kalibrering for de ulike lastcellene. Her kommer det tydelig frem at måleavvikene er svært bra for tre av lastcellene, mens for front venstre er det noe høyere avvik. Dette viser også i Figur 36. Avviket på 0,109% vurderes likevel som relativt bra.

Tabell 8: Oversikt over maksimalt avvik og tilhørende avviksprosent for de ulike lastcellene

Parameter	Front venstre	Front høyre	Bak venstre	Bak høyre
Maksimalt avvik [N]	0,014	0,005	0,005	0,007
Avvik [%]	0,109	0,009	0,010	0,052

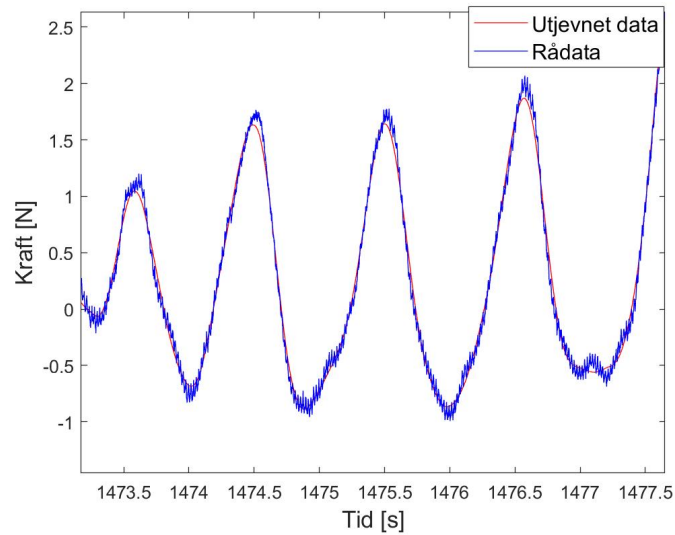
3.6 Databehandling

Datainnsamlingen for lastcellene styres fra LabView-program og herfra genereres det txt-filer som inneholder tid- og kraftdata i henholdsvis sekunder og Newton. Datainnsamling fra bølgehøydemåler styres fra Njord Wave Synthesis og genererer txt-filer som inneholder tid- og bølgehøydedata i henholdsvis sekunder og meter. Til sist er det hentet bevegelsesdata ved hjelp av QTM. Også her genereres det txt-filer og disse inneholder tids- og relativ bevegelsesdata for alle de seks frihetsgradene, enhetene for disse er sekunder, millimeter og grader.

Ettersom konstruksjonen og forankringssystemet er symmetrisk og plassert med tilnærmet 0° angrepsvinkel antas det at kreftene i forankringslinene er parvis like opp- og nedstrøms. Videre antas det at oppstrøms forankringsline er utsatt for de største kreftene. Med bakgrunn i dette samt resultatene fra kalibrering velges det å bruke kraftmålinger fra lastcellen som er plassert front høyre i den videre analysen. Lastcellene nullstilles etter at riktig forspenning er satt. Det betyr at de eksperimentelle kraftmålingene er relativ kraft i forhold til forspenning.

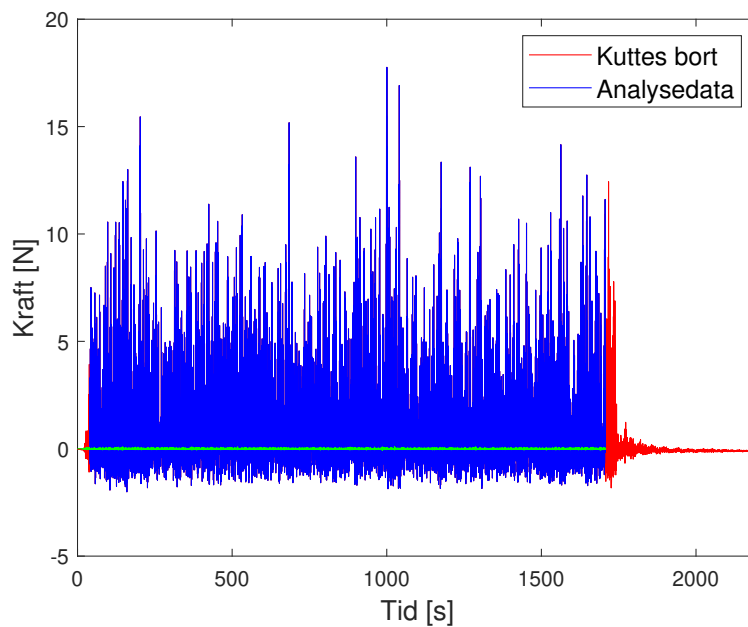
Bearbeiding av data fra lastcelle, bølgehøydemåler og QTM er gjennomført i MATLAB. Kvaliteten på de ulike datasettene er ganske ulik. Rådata fra bølgehøydemåler og QTM gir svært jevne og fine kurver, mens data fra lastcellen er preget av mye støy og ujevne kurver. Derfor er det nødvendig med utjevning (eng. smoothing) av lastcelldata.

I denne oppgaven benyttes utjevningsfilter av typen Savitzky-Golay (SG), ettersom dette filteret gir gode resultater. Dette filteret kalles også for *minste kvadraters smoothing filter* og hensikten ved bruk er å fjerne de høyfrekvente svingningene i signalet slik at trendene som virkelig er interessante kommer tydeligere frem uten at de påvirkes signalet nevneverdig. SG-filteret baserer seg på en polynomisk tilpasning til data og det må settes polynomisk orden og steglengde (eng. framelength). Steglengden må være et oddetall og polynomisk orden må være minst en verdi lavere enn steglengden. I denne oppgaven er det benyttet polynomisk orden og steglengde på henholdsvis 5 og 7. Figur 37 viser rådata og utjevnet data fra en lastcelle og det er tydelig at utjevningsfunksjonen med de gitte innstillingene fungerer godt.



Figur 37: Filtrert og ufiltrert rådata fra kraftmåling

Ved videre bearbeiding av data har det blitt kuttet bort start- og sluttdata, slik at kraft- og bevegelsesmålingene starter og slutter når den første og siste bølgen i bølgespekteret opptrer. Figur 38 viser analysedata og data som kuttes bort. Den grønne linjen viser start- og sluttid for bølgespekteret.



Figur 38: Plottet viser data som brukes i analysen og data som kuttes bort

I denne oppgaven undersøkes det blant annet gjennomsnitts- og maksimalverdier for kraftmålinger og bevegelsesdata fra QTM. Beregning av maksimalkrefter- og bevegelser er gjennomført ved å benytte gjennomsnittet av de 63% høyeste verdiene. Denne verdien er benyttet ettersom den representerer den mest sannsynlige maksimale responsen for en stokastisk prosess [37]. Denne måten å beregne maksimalverdier er benyttet for både eksperimentell og numerisk metode.

Det undersøkes også bølgeheving- og kraftmålinger i frekvensplanet. Data for bølgeheving i frekvensplanet gir mulighet til å kontrollere de virkelig genererte bølgespektrene mot teoretiske bølgespekter. For kraftmålinger i frekvensplanet er det interessant å analysere hvordan den spektrale kraftresponsen fordeler seg over ulike frekvenser ved ulike bølgespekter og forspenninger.

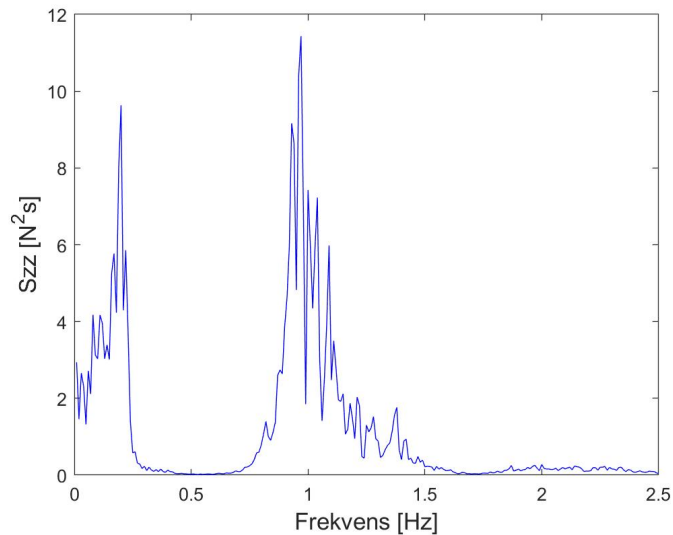
For å transformere data til frekvensplanet benyttes MATLAB-funksjonen *pwelch*. Funksjonen som er benyttet i denne oppgaven skrives på følgende form:

$[p_{xx},f]=pwelch(x,window,noverlap,f,fs)$ hvor x er data som skal transformeres og $window$ definerer en steglengde som brukes for å dele data opp i mindre segmenter. *Noverlap* definerer antall overlappende segmenter, f definerer frekvensområdet som er benyttet og fs definerer benyttet målefrekvens [38]. De benyttede verdiene for *noverlap* og *window* er gitt i Tabell 9.

Tabell 9: Instillinger som er benyttet for *pwelch*

Data	Window	Noverlap
Kraft	antall målinger/30	0,30
Bølgeheving	antall målinger/12	0,50

Figur 39 viser et eksempel på kraftrespons i frekvensplanet. Eksempelet er resultater for kraftmålinger for JS2 og forspenning 1. I figuren er det frekvenser på x-aksen og spektral kraftenergi, S_{zz} på y-aksen.



Figur 39: Eksperimentell kraftrespons ved JS2 og forspenning 1

3.7 Feilkilder og usikkerhet

Ved all gjennomføring av eksperimentelle forsøk er det en rekke ulike feilkilder og usikkerhetsmoment. Det er viktig å ha fokus på dette under både planlegging og gjennomføring av forsøk. Det bør alltid forsøkes å redusere disse faktorene i så stor grad som mulig. De mest aktuelle feilkildene og bidrag til usikkerhet er presentert under:

- Refleksjon fra tankveggene er en mulig feilkilde. Ved gjennomføring av eksperimentelle forsøk i MarinLab vil det alltid være en viss grad for refleksjon. Som tidligere beskrevet vil veggeffektene antas å være relativt små ettersom minste klaring mellom konstruksjon og tankveggene er på 1,1 meter. Det er også en fare for bølgerrefleksjon i bølgetankens lengderegning selv om det er brukt bølgeabsorberende strand. Ettersom minste avstand fra konstruksjon til bølgetankens ende er omtrent 30 meter antas denne effekten å være minimal. Tversgående bølger for tankbredden på 3 m forventes å gi respons med 0,72 Hz.

Refleksjon fra tankveggene vil potensielt kunne påvirke alle målingene i denne oppgaven. Dette inkluderer også decay-tester ettersom konstruksjonen i bevegelse danner bølger.

- Ved bruk av bølgegenerator er det alltid små avvik mellom teoretisk- og eksperimentelt bølgespekter. Dette vil i noen grad påvirke konstruksjonens bevegelse og følgelig kraft- og bevegelsesmålinger. Dette vil påvirke sammenligningen mellom eksperimentell og numerisk data, men effekten er antatt å være liten.

- Det er en del usikkerhet knyttet til forankringsoppsettet og spesielt plassering av betongloddene. Dette kan resultere i at virkelig bølgeregning ikke er nøyaktig 0° og følgelig vil konstruksjonens bevegelser bli påvirket av dette.
- Lastcellene som er benyttet for kraftmålinger har en feilmargin og dette er beskrevet tidligere i kapittelet. Det er likevel vist ved kalibrering at det er god nøyaktighet for det benyttede måleområdet og største registrerte avvik var på 0,109 %. Det viser seg videre å være umulig å få nøyaktig lik forspenning i alle forankringslinene samtidig. Når den ene forankringslinen strammes vil det føre til at en annen line blir litt slakkere. Kraftmålinger som er gjennomført ved justering av forspenning viser at den maksimalt variasjonen i forspenning er på omtrent 8%. Dette usikkerhetsmomentet bidrar også til at konstruksjonen ikke ligger i nøyaktig rett posisjon i forhold til bølgeretning.
- Det er observert at refleksjon fra lysspeiling og refleksjon fra vannoverflaten har påvirket modellens definerte geometri i QTM. Dette gjør at datasystemet fanger opp og registrerer feil bevegelse. Ved slike feilmålinger fører det til en plutselig amplitudeøkning i bevegelsesdata. Dette er noe som oppstår relativt skjelden og ved bearbeiding av data i MATLAB kan de fleste slike feilmålinger fjernes.
- Noen brytende bølger er observert og dette fører til høyere ordens effekter på konstruksjonen. Det irregulære bølgespekteret skal i teorien ikke inneholde noen form for brytende bølger, men ettersom forholdet mellom bølgehøyde- og periode for noen av bølgekomponentene ligger på grensen til brytende bølger for bølgegeneratoren, må det tase forbehold om at dette kan forekomme.
- Ved beregning av maksimalverdier for kraft og bevegelse anbefales det å benytte mange repeterende forsøk slik at beregningsgrunnlaget er best mulig [39]. Det er bare tatt utgangspunkt i ett forsøk i denne oppgaven, følgelig er det knyttet noe usikkerhet til de gjennomførte beregningene.

4 Numerisk metode

I denne delen vil de numeriske metodene som er benyttet i oppgaven bli forklart. Videre vil det bli gitt en innføring i programvaren og hvordan den er brukt.

Det viser seg å være utfordrende for programvaren å gjennomføre analyser for veldig små modeller, dette gjelder også for den nedskalerte modellen av OceanTECH. Med bakgrunn i dette blir det for de numeriske forsøkene benyttet fullskala konstruksjon, og geometrisk skaleringsforhold er 40. For å sikre best mulig sammenligningsgrunnlag mellom de numeriske- og eksperimentelle forsøkene, blir det tatt utgangspunkt i målene for den nedskalerte modellen når den fullskala konstruksjonen modelleres. Videre blir forankringssystem og vanndybde skalert for å best mulig tilsvare de eksperimentelle forholdene i MarinLab.

Det er også for de numeriske beregningene viktig med tilstrekkelig lang testtid for å sikre pålitelig statistisk data. Alle numeriske beregninger som brukes i denne oppgaven er basert på fullskala testtid på 18 timer. Dette er spesielt viktig med tanke på å få nok bevegelsesdata for de saktevarierende bølgedriftskreftene.

Det kan være tid- og ressurskrevende å kjøre analyser i Sesam, spesielt for modeller med fin *mesh* og analyser med korte frekvensintervaller. Det er likevel avgjørende med tilstrekkelig fin mesh og kort frekvensintervall for å få en god numerisk tilnærming, da settes det krav til datamaskinen som skal brukes. Tabell 10 beskriver datamaskinen som er benyttet i denne oppgaven beskrevet.

Tabell 10: Beskrivelse av datamaskinen som er brukt

Produsent	Huawei
Modell	Matebook X Pro
Prosesor	Intel Core i7-8550U 1,8 GHz
Installert minne	16 GB
Systemtype	64-biters operativsystem
Versjon	Windows 10 Pro

4.1 Numerisk programvare

Programpakken Sesam blir benyttet for å gjennomføre hydrodynamiske- og forankringsanalyser i denne oppgaven.

Sesam er en software som er utviklet for hydrodynamisk og strukturell analyse av skip og andre offshore strukturer, basert på blant annet Finite Element Method (FEM) og diffraksjonsteori. Programpakken består av en rekke underprogrammer som kan deles inn i fire hovedkategorier; forprosessering, hydrodynamisk analyse, strukturell analyse og etterprosessering. Dette er en anerkjent og mye brukt programvare i industrien over hele verden. For mer detaljert informasjon om programvaren henvises det til Sesam sin brukermanual [40].

I denne oppgaven benyttes GeniE som modelleringsprogram for å beskrive konstruksjonen. Det genereres ulike FEM-filer fra dette programmet. Filene som beskriver konstruksjonen brukes videre for de hydrodynamiske analysene som gjennomføres i HydroD. Fra HydroD genereres SIF-filer som inneholder informasjon om de hydrodynamiske forholdene til konstruksjonen. Forankringsanalysen gjennomføres i Sima, her lastes modellbeskrivelsen fra GeniE og de hydrodynamiske resultatfilene fra HydroD inn.

4.2 Modellering

GeniE (7.4.18) er utgangspunkt for alle jobber som utføres i Sesam. Her defineres geometrien for modellen som skal analyseres og modellen bygges opp av plater, stag og rør. I programmet defineres også materialegenskaper, godstykkelse og mesh. I kapittel 3 ble størrelse og vekt gitt for de ulike konstruksjonsdelene for den nedskalerte modellen. Den numeriske modellen er basert på disse målene og skaleres opp ved hjelp av Froude-skalerting.

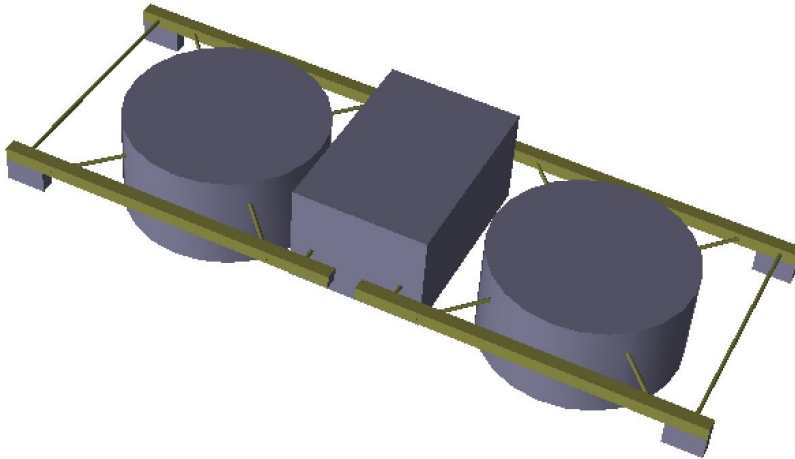
Konstruksjonsmaterialet som benyttes for merd, fortøyningsbom, prosessflåte, stag og oppdriftsmateriale er stål med egenskaper som er gitt i tabell 11. Her er tetthet for materiale som er brukt på de ulike delen justert for å passe overens med den nedskalerte modellen.

Tabell 11: Materialdata

Parameter	Merd	Prosessflåte	Fortøyningsbom	Oppdriftsmateriale
Tetthet [kg/m^3]	2073	2073	1008	5,19
Flytespenning [MPa]	276	276	276	276
Strekfasthet [MPa]	310	310	310	310
E-modul [GPa]	27,6	27,6	27,6	27,6
Poisson [-]	0,33	0,33	0,33	0,33

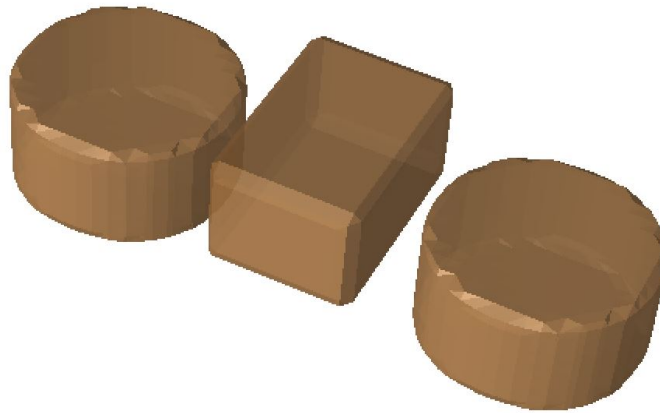
For videre hydrodynamiske analyser i HydroD er det nødvendig å lage minimum to modeller i GeniE; panel- og strukturmodell. Panelmodellen brukes for å beregne ytre bølgelaster som virker på modellen.

Panelmodellen for denne oppgaven er vist i Figur 40.



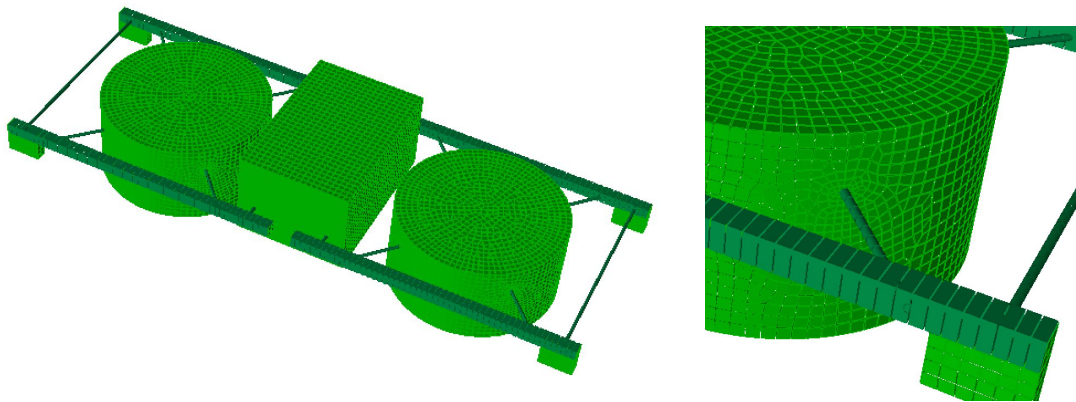
Figur 40: Panelmodell som er laget i GeniE

Strukturmodellen brukes for å etablere modellens massematrise. Denne blir brukt i bevegelsesligningene og for å beregne hydrostatisk trykk. Videre brukes strukturmodellen for å beregne kraftoverføringer internt i modellen etter hvert som den utsettes for eksterne krefter som beregnes fra panelmodellen. Strukturmodellen kan også brukes for å definere tanker i modellen, dette muliggjør fylling av væske for å oppnå riktig modellmasse og dypgang. For at programmet skal definere slike tanker må det i modellen defineres en lukket struktur uten fri overflate. For å oppnå dette er det i denne oppgaven definert lokk på merdene og prosessflåten med svært lav vekt og tykkelse. Dette har neglisjerbar praktisk betydning bortsett fra at det blir definert som en lukket konstruksjon av programvaren. Tankene som brukes for fylling av vann er vist i Figur 41.



Figur 41: Tanker som er definert i Strukturmodellen

Elementstørrelse på 0,8 m er benyttet for både struktur- og panelmodell. Denne elementstørrelsen baserer seg på analyse som blir beskrevet i slutten av dette kapittelet. Figur 42 viser hvordan *meshet* for panel- og strukturmodell ser ut. Fortøyningsbommene er konstruert ved hjelp av *beam section* med mål 1,6 m x 1,6 m.



Figur 42: Mesh for panel- og strukturmodell

4.3 Hydrodynamisk analyse

For å bestemme de hydrodynamiske egenskapene for den fullskala modellen er det gjennomført en frekvensplananalyse. Til dette brukes underprogrammet Wadam (D5.3.1).

Wadam beregner interaksjoner mellom bølge og struktur og baserer seg på lineær metode for hydrodynamiske beregninger. Dette inkluderer 3D diffraksjonsteori og kilde-sluk metoden [41]. De hydrodynamiske egenskapene for modellen genereres til SIF-filer og disse brukes videre ved gjennomføring av forankringsanalysen i Sima.

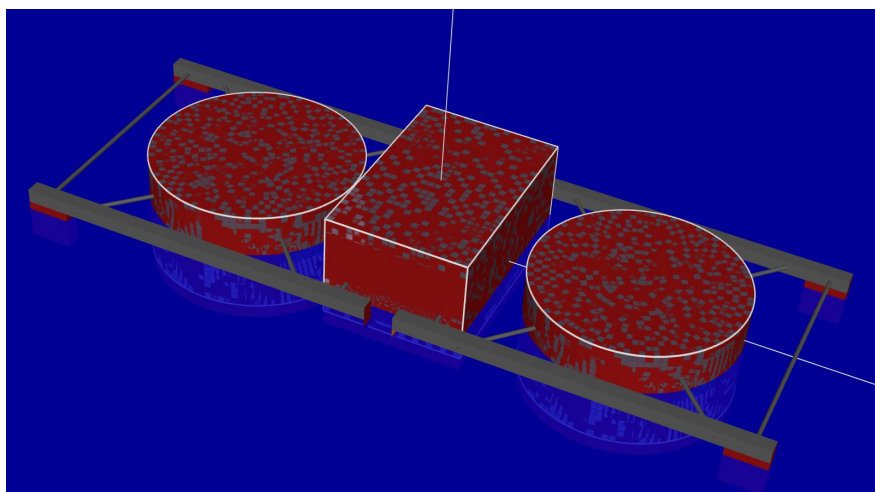
I Wadam blir panel- og strukturmodell som er generert i GeniE lastet inn og brukt. Det er panelmodellen som beregner interaksjoner mellom bølger og konstruksjon og dette gjøres som nevnt over basert på 3D diffraksjonsteori og kilde-sluk metoden. Videre defineres lokasjon for modellen og det legges her inn verdier for væsketetthet og vanddyb som er basert på de eksperimentelle forsøkene. Det velges å kjøre analyse for 0-360° med 20° intervall. Videre bestemmes frekvensområdet for analysen. Basert på det interessante frekvensområdet for de aktuelle fullskala Jonswap-bølgespektrene defineres frekvensintervallet fra 0,070 Hz til 0,619 Hz, med en fin inndeling på 0,00637 Hz.

For å oppnå riktig dypgang og modellmasse fylles de definerte tankene med væske. Væsketettheten for vannet som fylles i tankene er den samme som for det omgivende havet. Tabell 12 viser væskefordelingen for merdene og prosessflåten.

Tabell 12: Væskefordeling for de ulike tankene

Modelldel	Fyllingsgrad [%]	Masse [Kg]
Merd	49,39	$2,76 \cdot 10^6$
Prosessflåte	9,85	$4,61 \cdot 10^5$

Figur 43 viser oversiktsbilde over modellen som er riktig ballastert i forhold til de eksperimentelle forsøkene. Det er lest av dypgang for merdene i Wadam med riktig ballastering. Når denne dypgangen sammenligner med dypgangen for den eksperimentelle nedskalerte modellen viser det en forskjell på 0,2 m i fullskala. For de fullskala merdene med totalhøyde på 13,32 utgjør denne forskjellen bare 1,5%, noe som viser at sammenligningsgrunnlaget for de numeriske og eksperimentelle forsøkene er god.



Figur 43: Oversiktsbilde over den ballasterte modellen i Wadam

4.4 Forankringsanalyse

Forankringsanalysen gjennomføres i Sima (64 V4.0-02). Her lastes de hydrodynamiske dataene fra Wadam inn via SIF-filen. Det lastes også inn en objektfil som beskriver modellens geometri og denne er generert i GeniE.

Ligningene angående kraft- og geometriske forankringsforhold beskrevet i Kapittel 2.5.3 er basert på statiske forhold. Den numeriske forankringsanalysen som gjennomføres i Sima baserer seg på kvasistatiske beregninger [40]. Dette innebærer analyse i tidsdomene hvor de ulineære forholdene i forankringslinene er tatt høyde for. Videre baserer analysen seg på konstruksjonens totale bevegelsesligningen og både tilleggsmasse og dempingsbidrag er tatt hensyn til. Forankringsanalysen tar høyde for både første- og andreordens bølgekrefter og de to bidragene blir beregnet hver for seg. Dette betyr at forankringskreftene som måles er et resultat av både første- og andreordens bølgekrefter.

Det er viktig at alle forhold er så lik som mulig mellom det eksperimentelle og numeriske forankringsoppsettet og dette sikres gjennom å gjøre en rekke innstillinger i programmet. I Sima defineres miljødata for modellens lokasjon. Her legges de tre Jonswap-spektrene inn ved hjelp av parametrene H_s , T_p og γ . Her er det også mulig å legge til vind- og strømlaster, men dette blir ikke brukt ettersom det ikke tilsvarende forholdene fra de eksperimentelle forsøkene. Videre defineres punkt på modellen som brukes for å spesifisere hvor forankringslinene skal festes, disse er gitt i Tabell 13.

Tabell 13: Innfestningspunkt for forankringsliner

Innfestningspunkt			
Posisjon på modellen	x	y	z
Front høyre [m]	-39,602	13,38	0,11995
Front venstre [m]	-39,602	-13,38	0,11995
Bak høyre [m]	39,602	13,38	0,11995
Bak venstre [m]	39,602	-13,38	0,11995

Det er mulig å definere forankringsliner som består av ulike dybdesegmenter, men ettersom det er brukt samme tau for hele dybden i de eksperimentelle forsøkene defineres dette på samme måte i Sima. Det er tatt utgangspunkt i tauets diameter, lengde, egenvekt i luft, elastisitetsmodul og havdyp i dataene som er beskrevet i kapittel 3. Froude-skalering har blitt foretatt.

Tabell 14 viser innstillinger som settes i Sima. I denne oppgaven blir det tatt utgangspunkt i arbeidsmanual utarbeidet av DNV for å bestemme verdier for tverrgående- og langsgående dragkoeffisient samt andel av egenvekt til forankringsline i sjø [42]. Andelen egenvekt som er gitt som 0,81 betyr at vektreduksjonen av nedsenket forankringsline er på 19 %. Dette stemmer godt overens med data for lettvekts forankringsliner i komposittmateriale hvor vektreduksjonen ligger i intervallet 0,15 til 0,28 % avhengig av antall ytre fibre [43].

Tabell 14: Innstillinger og egenskaper som settes i Sima

Parameter	Størrelse
Diameter, forankringsline [m]	0,2
Lengde, forankringsline [m]	145,2
Egenvekt i luft [kN/m]	0,897
Andel av egenvekt i vann	0,81
Elastisitetsmodul [MPa]	516
Havdyp [m]	82
Tverrgående dragkoeffisient	1,5
Langsgående dragkoeffisient	0,15

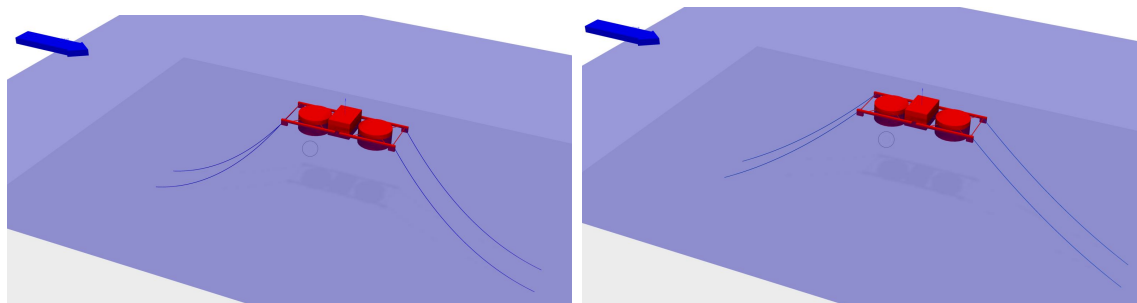
Det settes på forankringsliner til de definerte punktene på modellen. Med utgangspunkt i den definerte forankringslinen justeres ankerposisjon ut fra forspenning og total linelengde.

I programvaren er det også mulig å definere ankerposisjon ved å gi inn globale koordinater eller gi horisontal distanse og vinkel. Metodene gir ikke direkte mulighet for å justere forspenning og brukes derfor ikke. I de eksperimentelle forsøkene justeres forspenningen ved å justere linelengden, mens for de numeriske beregningene er det konstant linelengde og endring i ankerposisjon som justerer dette. Justeringen i linelengde som er gjennomført i de eksperimentelle forsøkene er på maksimalt 0,05 m, noe som tilsvarer 1,4 % av total linelengde. I fullskala tilsvarer dette 2 m justering av den totale linelengden på 145,2 m. Dette vil bidra med et avvik i forankringslinens vinkel i forhold til konstruksjonen ved sammenligning mellom de to metodene. Det antas likevel at denne forskjellen har liten innvirkning på resultatene.

Videre settes innstillinger slik at det bare er lineenden som er i kontakt med havbunnen. Dette gjøres igjen for å best mulig etterligne de eksperimentelle forsøkene. Forspenning som brukes i Sima er gitt i Tabell 15. Disse er basert på gjennomsnittet fra de eksperimentelle forspenningene og er skalert opp ved Froude-skalerting. Figur 44 viser modellen med de ulike forspenningene.

Tabell 15: Forspenning i fullskala

Forspenning	Kraft [kN]
Forspenning 1	153,6
Forspenning 2	537,6



Figur 44: Modelloppsett med de to ulike forspenningene. Forspenning 1 er vist til venstre og forspenning 2 til høyre

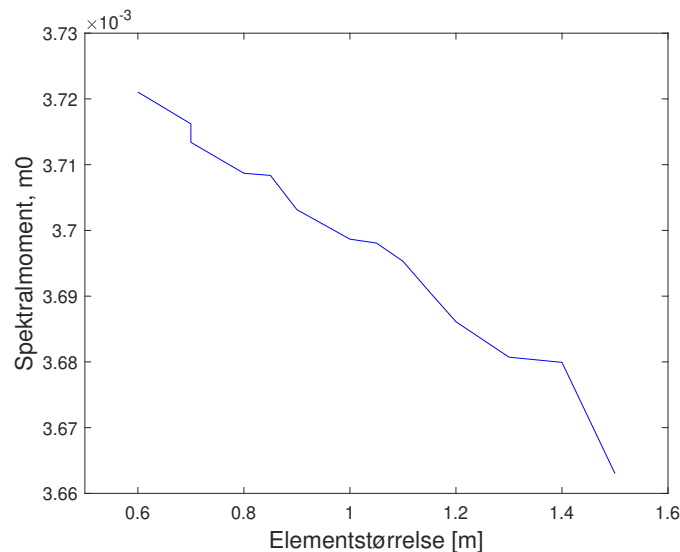
4.5 Analyse for å bestemme elementstørrelse

Elementstørrelse er helt sentralt for at de numeriske approksimasjonene skal bli så bra som mulig. Det er viktig å definere en mesh som beskriver geometrien på en god måte og en forutsetning er da å ha tilstrekkelig antall elementer.

Dersom antall elementer på den andre siden blir for stor, kan beregningstiden for datamaskinen bli lang uten at beregningene i særlig grad blir mer nøyaktige. GeniE har muligheter for to ulike mesh-metoder. Metoden som er benyttet i denne oppgaven heter *advancing front mesher*, denne egnet seg godt for konstruksjoner som i stor grad består av sirkulære eller irregulære geometrier. Denne metoden er brukt ettersom overflaten til OceanTECH i stor grad består av de sirkulære merdene.

For å velge en passende elementstørrelse for den hydrodynamiske analysen er det gjennomført en konvergenstest. Ved justering av elementstørrelse er det lengden for elementenes ytterkant som endres. Hensikten med denne testen er å avdekke hvordan spektralmomentet, m_0 endres ved ulike elementstørrelser og på bakgrunn av dette velge en egnet elementstørrelse. Fremgangsmåten for analysen er å justere elementstørrelse for FEM-filene som genereres for panel- og strukturmodellene i GeniE. Deretter har det blitt kjørt samme hydrodynamisk analyse i Wadam ved de ulike FEM-filene. Spektralmomentet for de ulike elementstørrelsene blir registrert ved hjelp av *Postresp* som er et program for etterprosessering i Sesam.

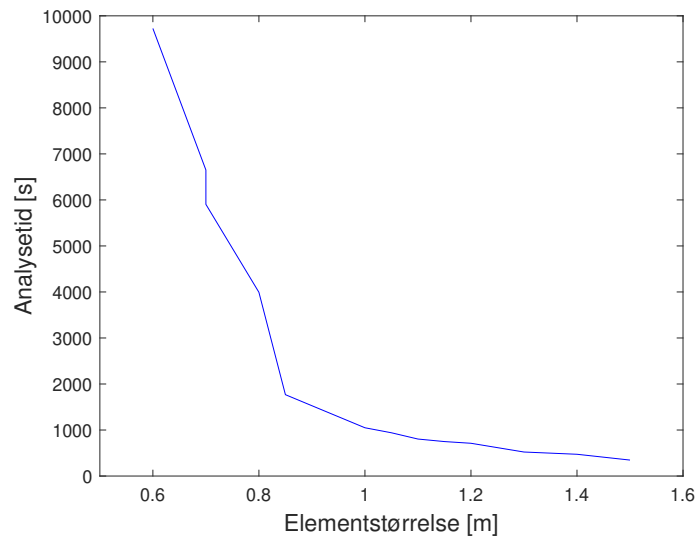
Figur 45 viser utviklingen til spektralmomentet, m_0 ved ulike elementstørrelser. Selv om det tilsynelatende ikke er noen klar konvergens i figuren er det verdt å legge merke til at det er svært små differanseverdier på y-aksen. En reduksjon i elementstørrelse fra 1,4 m til 0,6 m gir bare en endring i spektralmoment, m_0 på $4 \cdot 10^{-5}$ noe som tilsvarer omtrent 1,1%.



Figur 45: Figuren viser spektralmomentet, m_0 for ulike elementstørrelser

Fra Figur 46 kommer det tydelig frem hvor lang analysetiden blir når elementstørrelsen blir liten.

Med bakgrunn i denne analysen er elementstørrelse på 0,8 m valgt ettersom dette gir et nøyaktig spektralmoment samtidig som analysetiden er fornuftig. Til sammenligning er det vanlig å benytte 2000-3000 elementer ved analyse av en standard *semi-submersible* [16]. Ved å bruke en elementstørrelse på 0,8 meter for modellen av OceanTECH gir dette nærmere 4000 elementer, selv om denne er mye mindre enn en konvensjonell semi-submersible.



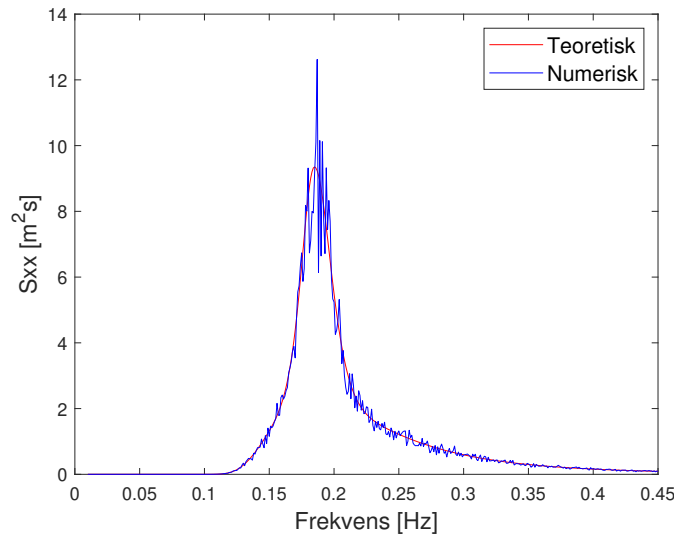
Figur 46: Figuren viser analysetid for ulike elementstørrelse

4.6 Databehandling

Resultatfilene som hentes fra Sima inneholder aksielle krefter for de fire forankringslinene samt bølgeheving som funksjon av tid. Samplingsraten for numerisk data er på 2 Hz. Også for den numeriske metoden er det benyttet kraftberegninger for forankringsline front høyre. Matlab brukes for å bearbeide og analysere data. Første steg er å subtrahere den gjeldende forspenningen fra de målte kreftene for å ha et godt sammenligningsgrunnlag. Det er ingen behov for filtrering av de numeriske dataene siden disse ikke inneholder støy på samme måte som eksperimentell data. Videre blir det på samme måte som for de eksperimentelle dataene kalkulert gjennomsnitts- og maksimalkraft.

Pwelch brukes for å gjennomføre transformasjon til frekvensplanet. Ved bruk av overføringsfunksjonen, pwelch brukes de samme innstillinger for bølgeheving og kraftrespons gitt i Tabell 9 i Kapittel 3. Det benyttes ikke noen form for frekvensfilter, ettersom det er ønskelig å studere alle frekvenser. Videre undersøkes også numerisk genererte bølgespektrene mot de teoretiske bølgespektrene for å kontrollere at disse er riktig. De tre numerisk genererte bølgespektrene samsvarer som forventet bra med de teoretiske men noen små avvik observeres.

Eksempel på numerisk generert og teoretisk bølgespekter er vist for JS2 i Figur 47, her kommer det frem at det er noen små avvik fra det teoretiske spekteret.



Figur 47: Numerisk og teoretisk bølgespekter for JS2

4.7 Feilkilder og usikkerhet

Det er knyttet en del feilkilder og usikkerhetsmomenter til numerisk simulering. De mest relevante er beskrevet under:

- Ved hydrodynamiske- og strukturelle beregninger er det nødvendig at meshet som definerer geometrien er så god som mulig. Med dette menes at det er tilstrekkelig antall elementer og at bråe overganger slik som stag og lignende er riktig beskrevet. Generelt betyr flere elementer mer nøyaktige beregninger. Det er alltid knyttet usikkerhet til om det definerte meshet representerer geometrien på en god måte.
- Numerisk hydrodynamiske beregninger som er gjennomført i denne oppgaven er basert på potensialstrøm og lineær potensialteori. Dette er en god beskrivelse av virkeligheten og et godt utgangspunkt for sammenligning med eksperimentelle forsøk. Det er likevel virkelige forhold som ikke blir tatt hensyn til i de numeriske beregningene. Eksempel på dette er brytende bølger og at positiv bølgeheving har større amplitude enn den negative amplituden.
- Det er som tidligere beskrevet litt ulike metoder for å justere forankringslinenes forspenning mellom eksperimentell og numerisk metode. Ved gjennomføring av de eksperimentelle forsøkene justeres dette med endret linelengde.

For de numeriske forsøkene gjøres denne justeringen ved å endre ankerposisjon og forskjellen mellom disse metodene bidrar med noe usikkerhet.

- Modellen som brukes for de numeriske forsøkene er modellert som en stiv konstruksjon. Dette er ikke tilfellet for den modellen som er brukt i MarinLab. Denne har mulighet for rotasjon i stamp for koblingen mellom fortøyningsbommene og prosessflåten. Denne forskjellen mellom modellene vil bidra med noe usikkerhet, men det antas å ha liten innvirkning på forankringskreftene som måles.
- Det er som vist i Figur 47 små avvik mellom teoretisk og numerisk bølgespekter. Dette kan være en potensiell feilkilde, men effekten fra dette er trolig liten.

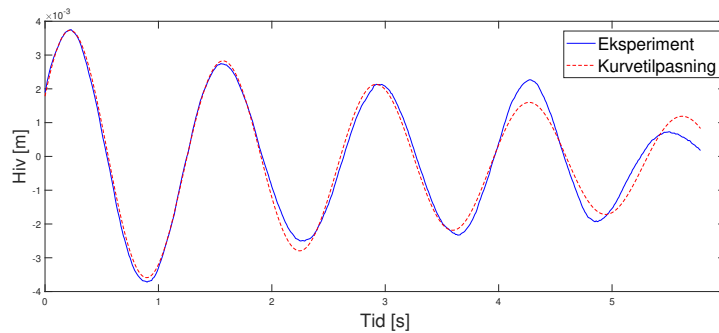
5 Resultater

I dette kapitlet blir resultat fra eksperimentell og numeriske metode sammenlignet og kommentert. Først blir resultatene fra de eksperimentelle decay-testene presentert. Videre følger kraft- og bevegelsesresultater i tidsplanet, og til slutt presenteres kraftmålinger i frekvensplanet.

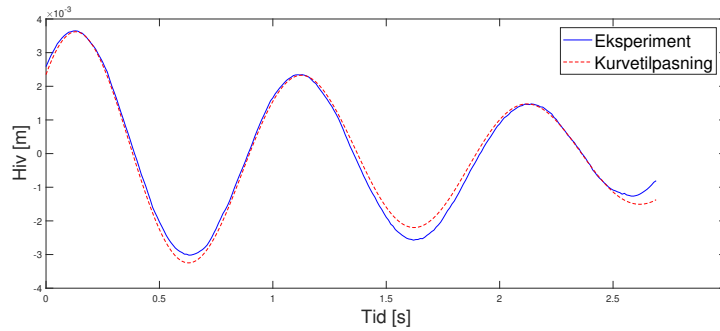
5.1 Decay-test

For å undersøke konstruksjonens egenfrekvens og demping gjennomføres det decay-tester ved forspenning 1. Dette gjøres for bevegelse i hiv og jag ettersom dette er de frihetsgradene som antas å ha størst påvirkning på kreftene i forankringslinene ved 0° bølgeretning. Decay-testene gjennomføres ved at konstruksjonen settes i bevegelse i gjeldende frihetsgrad, og ved bruk av QTM blir responsen registrert. Bevegelsesmatrisen blir bearbeidet i Matlab og teorien som benyttes er beskrevet i Kapittel 5.1. Figur 48, 49 og 50 viser bevegelseskurvene med tilhørende tilpasset kurve fra MATLAB. Programmet beregner det logaritmiske dekrementet ved hjelp av denne tilpassede kurven.

Figur 48 viser den oscillerende bevegelsen og kurvetilpasning ved gjennomføring av decay-test i hiv. Ettersom konstruksjonen har stor våt overflate og mye oppdrift er det vanskelig å sette konstruksjonen i bevegelse i hiv. I denne bevegelsen er det høy demping både på grunn av konstruksjonen i seg selv og forankringen sitt bidrag. Dette fører til at bevegelsen dør raskt ut og derfor registreres det bare fem topper for denne testen. For å ha et bedre grunnlag for å beregne egenfrekvens og demping brukes gjennomsnittet av to tester, Figur 49 viser den repeterende testen.

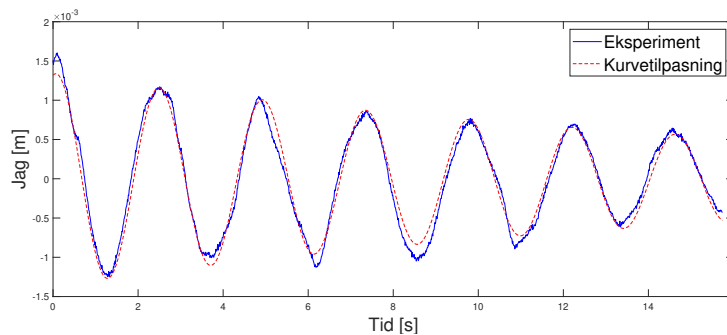


Figur 48: Decay-test 1 for hiv ved forspenning 1



Figur 49: Decay-test 2 for hiv ved forspenning 1

Resultatene fra decay-test i jag er vist i Figur 50. I denne bevegelsen er det en lavere systemdamping sammenlignet med hiv og derfor er det lettere å registrere flere sammenhengende topper.



Figur 50: Decay-test for jag ved forspenning 1

Resultatene fra decay-testene presenteres i Tabell 16. Tabellen viser at hiv har en høyere damping og egenfrekvens enn jag.

Tabell 16: Beregnet egenfrekvens og dempingskoeffisient ved forspenning 1

Parameter	Hiv	Jag
Egenfrekvens [Hz]	0,873	0,412
Dempingskoeffisient, ζ	0,07	0,02

5.2 Analyse i tidsplanet

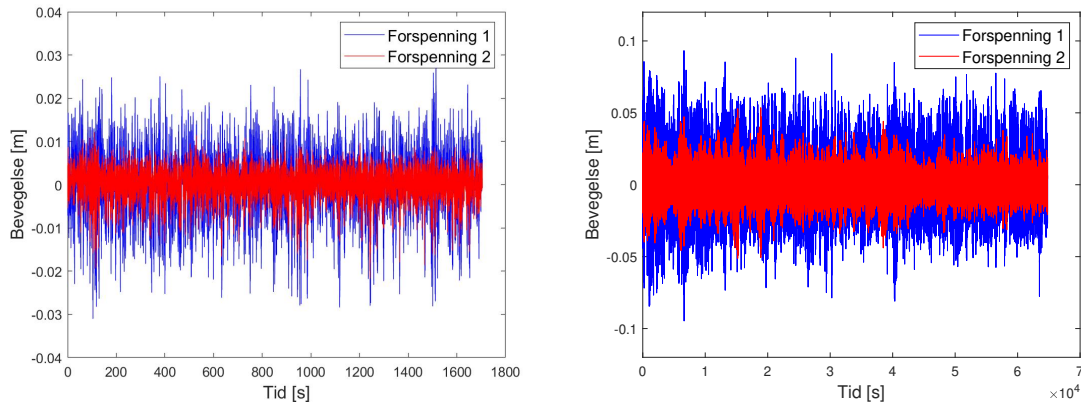
I denne delen presenteres eksperimentell og numerisk bevegelsesdata og forankringskrefter for ulike bølgespektre og forspenning.

5.2.1 Bevegelsesanalyse ved slakk og stram forankring

Det er ønskelig at OceanTECH skal ligge stabilt, med minst mulig bevegelse ved normal drift. Dette for å sikre gode arbeidsforhold og stabil posisjonering. Videre kan store bevegelse føre til at fisk får redusert appetitt og fiskevelferd. Som beskrevet i Kapittel 2.5.3 er det ulike bidrag til demping av bevegelse for flytende forankrede konstruksjoner.

Når oppdrettsanlegget OceanTECH skal forankres er det avgjørende å ha kontroll på de ulike dempingsbidragene som den totale forankringen består av. Som diskutert i delkapittel 2.6 er forankringssystemet som benyttes i denne oppgaven ansett som et stramline forankringssystem. Dette betyr at stivheten til systemet er relativt lineært og i hovedsak definert av forankringslinenes elastisitet. Etter hvert som forankringslinene strammes til ved økt forspenning betyr det at systemets demping øker. Kraftene som registreres overstiger ikke linenes elastiske område. Det er interessant å undersøke hvilke effekter justert forspenning gir på konstruksjonens bevegelser i hiv og jag. Dette er mulig ved å analysere bevegelsesdata for ulike forspenninger ved samme bølgespekter.

Figur 51 viser utviklingen i bevegelsesamplitude i jag ved slakk og stram forankring for JS2. I figuren vises de eksperimentelle resultatene til venstre og de numeriske resultatene vises til høyre. Figuren viser tydelig at konstruksjonen sin bevegelse i jag reduseres ved økt forspenning. De numeriske resultatene er skalert slik at de kan sammenlignes direkte med de eksperimentelle resultatene.



Figur 51: Jagbevegelse ved ulik forspenning for JS2. Figuren til venstre viser eksperimentelle resultat og figuren til høyre viser numeriske resultater

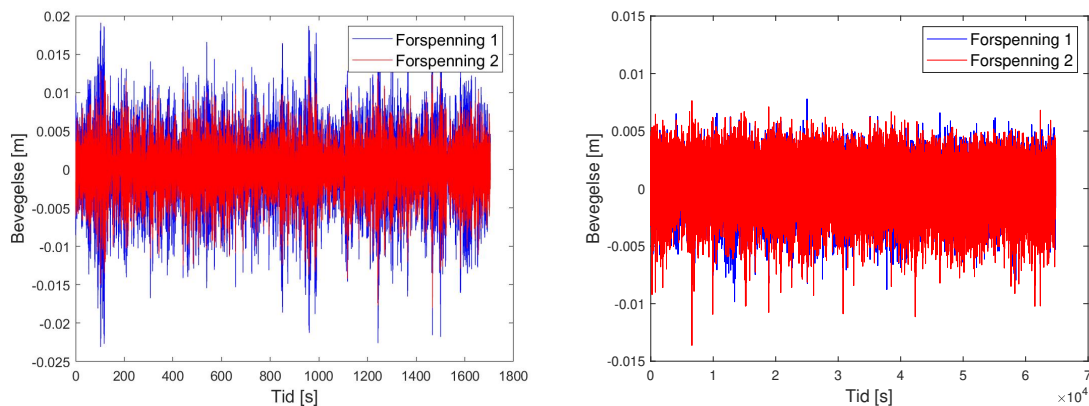
Tabell 17 viser gjennomsnittlig opp- og nedstrøms bevegelse i jag. Nedstrøms bevegelser tilsvarer positive verdier på y-aksen i Figur 51 og oppstrøms bevegelser tilsvarer negative verdier på y-aksen.

Fra tabellen er det mulig å konkludere med at nedstrøms bevegelser har noe høyere gjennomsnittlig bevegelse enn oppstrøms bevegelser, dette skyldes mest sannsynlig det konstante kraftbidraget fra bølgedriftskrefter. Resultatene viser at det er et relativt stort avvik mellom de to metodene for amplitudeverdier. De numeriske beregningene predikerer gjennomgående omtrent 3,1 ganger så store bevegelsesamplituder som de registrerte ved eksperimentelle forsøk. Trenden for bevegelsesreduksjon ved økt forspenning stemmer godt mellom de to metodene.

Tabell 17: Gjennomsnittlig opp- og nedstrøms bevegelser

Bevegelse	Forspenning	Eksperimentell	Numerisk
Nedstrøms [mm]	1	5,887	18,780
Oppstrøms [mm]	1	5,683	16,155
Nedstrøms [mm]	2	2,464	8,102
Oppstrøms [mm]	2	2,387	7,953

Figur 52 viser utviklingen av bevegelsesamplitude i hiv ved slakk og stram forankring. Også her vises de eksperimentelle forsøkene til venstre og de numeriske beregningene vises til høyre. Det er mulig å observere en bevegelsesreduksjon i hiv ved økt forspenning i de eksperimentelle resultatene. Denne trenden stemmer ikke like godt for de numeriske beregningene. Bevegelsesamplituden samsvarer derimot godt mellom de to metodene.



Figur 52: Hivbevegelse ved ulik forspenning for JS2. Plottet til venstre viser eksperimentelle resultat og plottet til høyre viser numeriske beregninger. Numeriske beregninger er skalert ned slik at de kan sammenlignes med eksperimentelle resultater

Tabell 18 viser relativ og prosentvis bevegelsesreduksjon ved økt forspenning i hiv og jag. Her kommer det tydelig frem at bevegelsesreduksjonen i jag er stor ved økt forspenning. Eksperimentelle målinger og numeriske beregninger stemmer best overens i denne bevegelsen med en differanse på 19,02 %. Videre viser tabellen som nevnt over at bevegelsesreduksjonen for de to metodene har et stort avvik for hiv bevegelse.

Tabell 18: Bevegelsesreduksjon ved økt forspenning

Bevegelsesreduksjon	Eksperimentell	Numerisk
Hiv [mm]	6,378	0,045
Hiv [%]	35,147	0,798
Jag [mm]	18,280	33,417
Jag [%]	63,340	44,320

Resultatene som er presentert viser at endring i forspenning i ulik grad påvirker bevegelsesamplituden for frihetsgradene hiv og jag. Dette henger sammen med at forankringslinene sitt bidrag til demping er forskjellig for ulike frihetsgrader. For eksempel har det semilukkede oppdrettsanlegget stor våt overflate med et stort dempingsbidrag fra treghetsmomenter i hiv. Denne bevegelsen vil også dempes mye på grunn av bølgegenererende bevegelser og tilleggs-masse. Begge metodene viser at bevegelse i jag i stor grad avhenger av forankringslinenes forspenning. Dette betyr at dempingsbidraget fra forankringslinene er stort i jag. Den store forskjellen for bevegelsesreduksjon i hiv mellom de to metodene gjør at det er vanskelig å trekke noen konklusjon for hvor stort forankringslinenes dempingsbidraget er i denne bevegelsen. Som resultatene viser er det godt samsvar for bevegelsesamplitude i hiv ved slakk forankring for begge metodene mens de numeriske resultatene predikerer en mye høyere bevegelsesamplitude i jag sammenlignet med eksperimentelle resultater. Dette kan tyde på at det er knyttet en del usikkerhetsmomenter til de numeriske forankringslinenes dempingsbidrag og følgelig bevegelse i jag. Bevegelse i hiv har derimot et mindre dempingsbidrag fra forankringslinene og påvirkes derfor mindre av usikkerheten knyttet til simulering av forankringslinene.

Figur 12 fra Kapittel 2.4 illustrerer på en god måte sammenheng mellom dempingsfaktor og systemrespons i en frihetsgrad. Etter hvert som forankringslinene strammes til vil systemets stivhet og demping økes. Dette gir en høyere dempingsfaktor og følgelig blir det en lavere respons. Dette er med på å forklare hvorfor en høy forspenningskraft reduserer bevegelsesrespons.

Forankringslinenes vinkel relativt til konstruksjonen er sentralt når det gjelder dempende effekt for de ulike frihetsgradene.

Vinkelen mellom konstruksjon og forankringsline for denne oppgaven er som vist i Kapittel 3 på 56°. Dette gir en kort forankringsline med lengde til dybde forhold på bare 1,77. Dersom vinkelen økes vil den horisontale kraftkomponenten øke, og den vertikale kraftkomponenten reduseres. En slik endring i vinkel gi en ytterligere bevegelsesreduksjon i jag, og større bevegelse i hiv ved tilsvarende forspenninger som er benyttet i denne oppgaven. Justering av forspenning og vinkel vil som nevnt påvirke den vertikale kraftkomponenten. En stor økning i våt overflate som resultat av økt vertikal kraftkomponent kan bidra med økte effekter av både viskøs- og bølgedemping. Økning i våt overflate fører også til et større projiserende areal og kraftoverføring fra bølger. Slike effekter er likevel lite sannsynlig å se i denne oppgaven ettersom forankringskreftene er forholdsvis små.

5.2.2 Analyse av forankringskrefter

Det er gjennomført kraftmålinger ved slakk og stram forankring i kombinasjon med de ulike bølgespektrene. Med bakgrunn i dette er det interessant å undersøke sammenheng mellom kreftene som opptrer ved ulike forspenninger og bølgespektre. Generelt er det mulig å bestemme forankringskrefter dersom konstruksjonens bevegelse i alle seks frihetsgrader er kjent, og det er således en klar sammenheng mellom bevegelses- og kraftrespons. Gjennomsnitts- og maksimalkrefter vil bli presentert og diskutert.

Eksperimentelle og numeriske resultater av kraftmålinger er presentert i Tabell 19. Det er gjennomført Froude-skalering av de numeriske kreftene for lettere å sammenligne disse med de eksperimentelle kreftene. Resultatene viser at det er en relativt stor kraftdifferanse mellom de to metodene.

Tabell 19: Eksperimentelle og numeriske krefter

Bølgespekter	Forspenning	Eksperimentell		Numerisk	
		F_{maks} [N]	F_{mean} [N]	F_{maks} [N]	F_{mean} [N]
JS1	1	8,696	0,913	33,184	4,892
	2	8,715	1,444	33,329	10,547
JS2	1	11,337	1,733	67,219	10,415
	2	12,960	2,256	62,072	13,621
JS3	1	17,746	2,357	65,270	6,527
	2	16,745	3,030	72,171	15,112

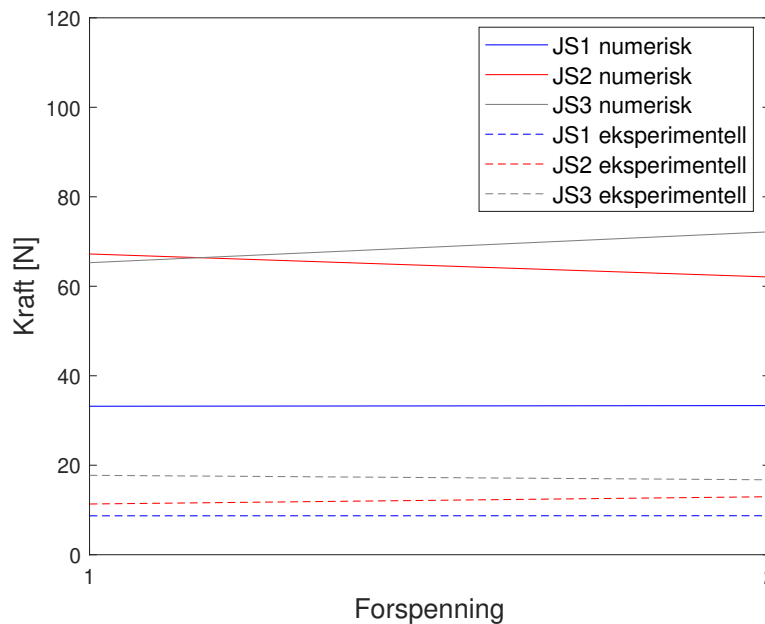
Tabell 20 viser den prosentvise økningen i maksimal- og gjennomsnittskraft ved økt forspenning for ulike bølgespektre.

Tabellen viser at det er en gjennomgående trend for begge metodene at økt forspenning gir en relativt stor økning i gjennomsnittskrefter. Det er likevel en stor forskjell i den prosentvise endringen ved økt forspenning mellom metodene for JS1 og JS3. En tilsvarende økning i forspenning gir ikke like tydelig økning i maksimalkrefter. Det er til og med registrert en nedgang i maksimale krefter ved økt forspenning. Den prosentvise endringen mellom de to metodene stemmer bra for maksimalkreftene hvor den største forskjellen mellom de to metodene er på omtrent 22 %, dette gjelder for JS2.

Tabell 20: Oversikt over endring i maksimal- og gjennomsnittskraft ved økt forspenning

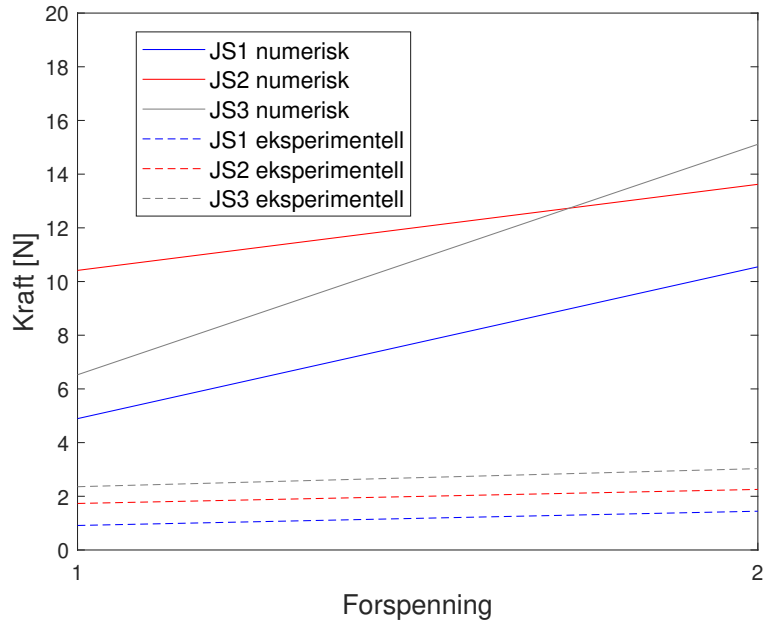
Bølgespekter	Eksperimentell		Numerisk	
	$\Delta F_{maks}[\%]$	$\Delta F_{mean}[\%]$	$\Delta F_{maks}[\%]$	$\Delta F_{mean}[\%]$
JS1	0,226	58,284	0,435	115,551
JS2	14,312	30,140	-7,657	23,532
JS3	-5,638	28,557	10,573	131,544

For å lett kunne sammenligne kraftutviklingene for de to metodene presenteres maksimal- og gjennomsnittskrefter grafisk. Figur 53 viser utvikling for maksimalkrefter og det kommer tydelig frem at maksimalkreftene for begge metodene har lavt stigningstall og kurvene er tilnærmet horisontale.



Figur 53: Utvikling av maksimalkrefter for eksperimentell og numerisk metode

Figur 54 viser den gjennomsnittlige kraftutviklingen for metodene. De eksperimentelle kreftene viser alle en jevn og svak stigning. De numeriske kreftene har derimot et betydelig høyere stigningstall for JS1 og JS3 sammenlignet med JS2.



Figur 54: Utvikling av gjennomsnittskrefter for eksperimentell og numerisk metode

Resultatene i både bevegelse- og kraftanalysen viser jevnt over stor forskjell mellom de to metodene. Bevegelsesamplituden i jag er betydelig større enn tilsvarende bevegelse for de eksperimentelle forsøkene. Alle kreftene som er presentert viser også størst verdier for numerisk metode. Det er viktig å se bevegelse- og kraftrespons i sammenheng ettersom det er konstruksjonens bevegelse som strekker i forankringslinene. Som tidligere diskutert er det grunnlag for å anta at forankringens forspenning har større dempingsbidrag for bevegelse i jag sammenlignet med hiv. Ettersom bevegelsen i jag har størst bevegelsesamplitude for de numeriske resultatene er det sannsynlig at denne bevegelsen er med på å øke kraftdifferansen mellom de to metodene. Det er også en liten bevegelsesdifferanse i hiv, denne effekten kan bidra på tilsvarende måte til økt kraft i de numeriske beregningene.

Det kan være flere årsaker til de nevnte forskjellene i registrerte bevegelsesamplituder og krefter mellom de to metodene. Det er som beskrevet i Kapittel 2.7 umulig å oppnå at alle forhold ved skalering er oppfylt samtidig. Avvikene mellom metodene kan være avhengig av skaleringsforhold i større eller mindre grad. Det er i denne oppgaven skalert så godt som mulig med hensyn til geometrisk likhet for alle mulige forhold.

Likevel er det vanskelig å sikre at dynamisk likhet som blant annet omfatter viskøs demping, systemstivhet og treghetsmomenter blir riktig skalert.

Et annet usikkerhetsmoment ved sammenligning av data for de to ulike metodene er at den numeriske modellen er modellert som en fast konstruksjon. Som forklart i Kapittel 3 består den eksperimentelle modellen av merder som er fastlåst til fortøyningsbommene. Forbindelsen mellom prosessflåten og fortøyningsbommene har derimot rotasjonsmuligheter i stamp. En stiv konstruksjon sammenlignet med en konstruksjon som har rotasjonsmuligheter har potensielt stor påvirkning på bevegelsesrespons og følgelig kraftrespons. Videre er det viktig å ta med i betraktningen at de eksperimentelle forsøkene som er gjennomført ikke har eksakt samme forspenning ettersom dette av ulike årsaker var vanskelig å få til. Dette er nærmere diskutert i Kapittel 3.

Uavhengig av de nevnte forskjellene mellom de to ulike metodene som er benyttet er funnene som er gjort interessante. Resultatene kan bidra med verdifull informasjon ved design av forankringsystemer ettersom det er avgjørende å ha kontroll på hvilke krefter som opptrer. Når OceanTECH sitt forankringsystem skal dimensjoneres er det spesielt viktig å ha kontroll på de maksimale kreftene med tanke på valg av komponenter og dimensjoner. Resultatene viser for begge metoder at økt forspenning ikke gir noen vesentlige økte krefter utover den økte forspenningen i seg selv. Det er også vist at økt forspenning gir en stor økning i gjennomsnittskrefter. Økte gjennomsnittskrefter kan ha stor betydning på utmatting av systemet og dette må tas hensyn til. Videre er det fra resultatene fornuftig å fastslå at forankringslinene har ulike dempingsbidrag for de ulike bevegelsene, hiv og jag. Følgelig vil justert forspenning ha stort påvirkning på konstruksjonens bevegelse i både hiv og jag. Med bakgrunn i resultatene er det gode grunner for å benytte forankringsystem med vinsjer, noe som muliggjør justering i forspenning. Et slikt system kan tilpasse seg ulike værforhold med hensikt å redusere både forankringskrefter og oppdrettsanleggets bevegelser.

5.3 Analyse i frekvensplanet

I denne delen vil kraftmålinger bli presentert i frekvensplanet. De numeriske data baserer seg på tidsplananalyse gjennomført i Sima, overføringen til frekvensplanet er beskrevet i Kapittel 4. Kraftresponser for stram og slakk forankring blir presentert for JS1 og JS3. Det er valgt å ikke ta med JS2 ettersom bølgespekter med minste og største signifikant bølgehøyde gir en god beskrivelse over trendutviklingen.

I denne oppgaven er det bare benyttet eksitasjonkrefter i form av bølgekrefter, mens i virkeligheten vil både vind, strøm og bølgekrefter virke på konstruksjonen samtidig.

Ved innledende testing for nye konstruksjoner er det en god forenkling å anta at vind- og strømningskrefter er relativt konstante. Med bakgrunn i dette er det hensiktsmessig å studere konstruksjonens oppførsel ved bølgekrefter som resultat av irregulære bølgespektrere. Ved å også ta høyde for bølgedriftskrefter vil eksitasjonskrefter være spredt over et bredt spekter av frekvenser. De koblede bevegelsene blir tatt opp i forankringslinene og responsspekteret beskriver kraftens frekvens og energi. Responsspektrere som presenteres inneholder også betydelig energi for lave frekvenser, utenfor bølgespekterets frekvensintervall. Det er antatt at disse kreftene kommer fra bølgedriftskrefter.

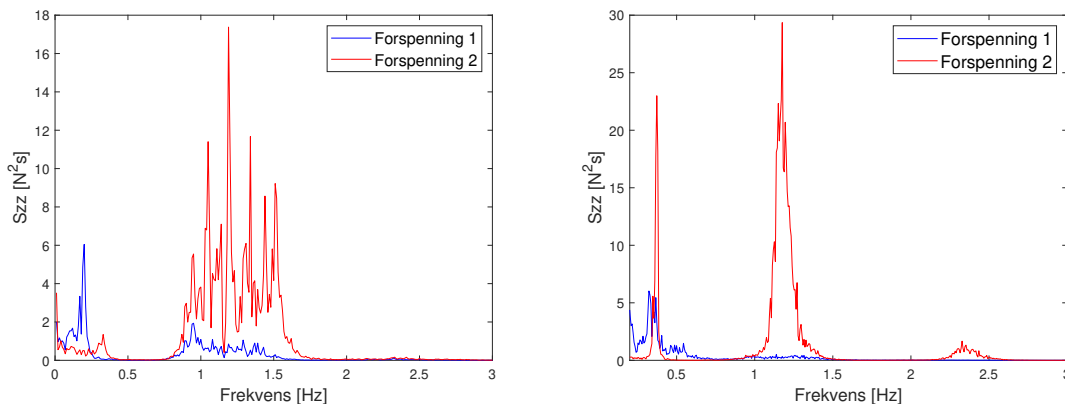
De eksperimentelle bølgespektrere ligger i frekvensområdet 0,6-2,2 Hz mens de fullskala bølgespektrere som benyttes for de numeriske beregningene ligger i frekvensområdet 0,1-0,4 Hz. For å enklest mulig kunne sammenligne de ulike resultatene plottes de numeriske kraftresponsene med nedskalerte frekvenser på x-aksen. Denne skaleringen gjøres i henhold til Froude-skalering og følgende forhold benyttes:

$$f_m = f_f \sqrt{40} \quad (47)$$

Her er f_f fullskala frekvenser og f_m er nedskalerte frekvenser. Figurene som blir presentert i dette kapittelet har eksperimentelle resultater til venstre og numeriske resultater til høyre.

5.3.1 Kraftrespons ved JS1

Figur 55 viser kraftrespons ved de to ulike forspenningene for JS1 og hvordan den spektrale energien fordeler seg over ulike frekvenser. For begge metodene er det tydelig at energifordelingen endres ved justert forspenning.



Figur 55: Kraftresponser ved ulik forspenning for JS1. Eksperimentelle resultater er vist til venstre og numeriske resultater er vist til høyre

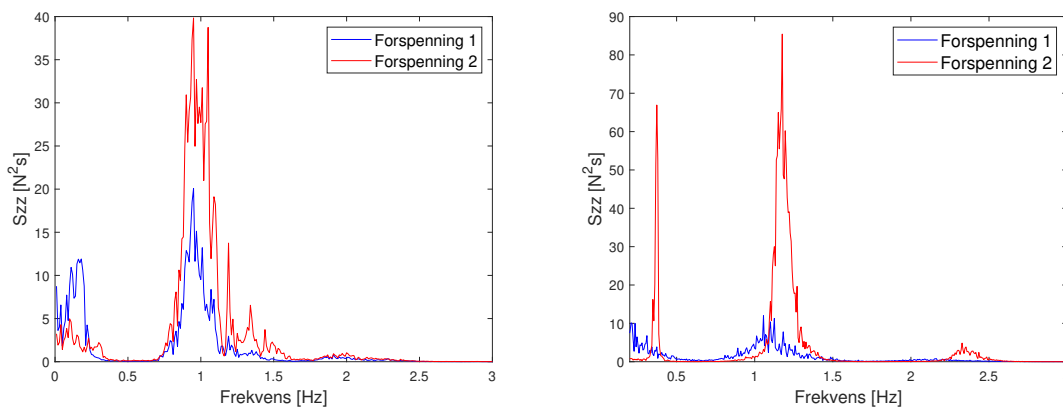
Det er et godt samsvar mellom de eksperimentelle og numeriske kraftresponsene men noen forskjeller er observerbare. I den eksperimentelle kraftresponsen for slakk forankring er en stor del av energien fordelt over lave frekvenser. Videre ligger den resterende energien i hovedsak innenfor bølgespekterets frekvensintervall som er 0,6-2,2 Hz. Den samme trenden gjelder for de numeriske resultatene, men andelen energi som ligger innenfor bølgespekterets frekvensintervall er betydelig mindre for denne metoden.

Ved stram forspenning er det for de numeriske resultatene en tydelig sentrert energifordeling i bølgespekterets frekvensintervall, og toppen ligger over 1,13 Hz. Tilsvarende topp for omtrent samme frekvens finnes også for de eksperimentelle resultatene, men energifordeling er over et større frekvensintervall. Denne forskjellen mellom de to metodene kan tyde på at det er en del støy i de eksperimentelle målingene. Eksempel på dette kan være bølgerrefleksjoner. Videre er det for begge metodene en tydelig topp over omtrent 0,3 Hz ved stram forankring, men numeriske resultater har en spissere og mer sentrert energitopp.

For den numeriske kraftresponsen ved stram forankring er det også mulig å observere noe høyfrekvent energi ved omtrent 2,3 Hz. Det er sannsynlig at denne høyfrekvente kraftresponsen kan være sumfrekvenser. Dersom dette fenomenet sammenfaller med egenfrekvens for en av de resterende fire frihetsgradene som ikke er undersøkt i denne oppgaven kan det gi et betydelig kraftbidrag.

5.3.2 Kraftrespons ved JS3

Figur 56 viser kraftresponsene ved JS3. Trendene ved justering i forspenning som er beskrevet i avsnittet over gjelder i stor grad også for denne figuren.



Figur 56: Kraftresponser ved ulik forpenning for JS3. Eksperimentelle målinger er vist til venstre og numeriske beregninger er vist til høyre

Begge metodene sine kraftresponser ved JS3 samsvarer godt med kraftresponsene for JS1. Den største forskjellen ved økt signifikant bølgehøyde er at det er betydelig økt energi innenfor bølgespekterets frekvenser for både stram og slakk forankring. For de eksperimentelle resultatene dannes det en tydelig topp over omtrent 0,90 Hz og dette gjelder både slakk og stram forankring. Videre observeres det at eksperimentelle resultater gir en mer sentrert kraftrespons sammenlignet med JS1. Resultatene tyder på at høyere signifikant bølgehøyde gir mer fremtredende kraftresponser som er mindre dominert av støy. I de numeriske resultatene er det også for JS3 og stram forankring mulig å observere høyfrekvente responser ved omtrent 2,3 Hz.

5.3.3 Sammenfatning av kraftanalyse i frekvensplanet

Kraftresponsene som er presentert i forrige delkapitlene gir et godt samsvar mellom eksperimentelle og numeriske resultater. De to ulike bølgespektrene gir relativt repeterende spektral energifordeling for kraftmålingene, dette vitner om at forsøkene er gjenprøvbare og har god validitet.

Videre er det et fremtredende resultat for begge metodene at økt forspenning gir stor økning i areal under kurven og følgelig energi som tas opp i forankringslinene. Denne nevnte differansen i energi som resultat av økt forspenning er størst for de numeriske resultatene. Dette stemmer godt med resultatene som ble presentert i Delkapittel 5.2.2 hvor resultatene for økt forspenning gir størst økning for gjennomsnittskraft for de numeriske beregningene.

Egenfrekvensene som ble presentert i Kapittel 5.1 for hiv og jag er henholdsvis 0,873 Hz og 0,412 Hz. Dette representerer egenfrekvenser ved lav forspenning. For de eksperimentelle resultatene vises en relativt høy kraftrespons ved egenfrekvens til hiv, noe som tyder på at det oppstår resonans mellom bølgespekter og denne egenfrekvensen. Det ikke mulig å observere en like tydelig kraftrespons ved egenfrekvensen til jag. Nærmeste responstopp ligger omtrent 0,15 Hz lavere enn denne egenfrekvensen. Begge metodene viser relativt stor kraftrespons like under den beregnede egenfrekvens til jag. Ettersom denne kraftresponsen er veldig tydelig og at det er knyttet usikkerhet til decay-testene er det fornuftig å anta at den virkelige egenfrekvensen til jag er noe lavere enn den som er beregnet.

Resultatene viser at det kan oppstå relativt store krefter selv ved lav forspenning. Dette skjer som et resultat av resonans mellom de saktevarierende bølgedritskraftene og egenfrekvens i jag. Denne effekten er størst ved slakk forankring. Dette kan være en av årsakene til at økt forspenning ikke gir noe vesentlig utslag for maksimalkreftene.

Ved design av forankringssystemer er det viktig å ha et bevist forhold til at det kan oppstå store krefter som resultat av bølgedriftskrefter. Mulige tiltak for å redusere denne effekten kan være å designe forankringssystem slik at egenfrekvensen flyttes bort fra de forventede bølgedriftskreftene på lokasjonen. Samtidig er det viktig å passe på at egenfrekvensen ikke sammenfaller med bølgespekterets frekvenser.

Endring i forspenning har en gjennomgående påvirkning for energifordelingen. Dette gjelder i hovedsak for de lavfrekvente kraftresponsene hvor toppverdiene ved begge bølgespektre går mot en noe høyere frekvens ved økt forspenning. Årsaken til forskyvningen for de lavfrekvente kraftresponsene ved justering i forspenning kan forklares med at både stivhet og demping økes.

Videre observeres det fra kraftresponsene er at økende signifikant bølgehøyde gir mer areal under kurvene. Dette stemmer godt med teorien om at høyere signifikant bølgehøyde betyr høyere spektral energi. Det kommer også frem at ved slakk forankring opptrer store deler av kraftresponsen ved lave frekvenser. Ved økende signifikant bølgehøyde øker denne lavfrekvente kraftresponsen noe, men mesteparten av den ekstra tilførte energien fordeler seg over bølgespekterets frekvenser.

Følgende punkt oppsummerer de viktigste resultatene fra analysen i frekvensplanet:

- Økende signifikant bølgehøyde gir økende spektral energi for kraftresponsene.
- Økt forspenning gir betydelig høyere spektral energi. Numeriske resultat gir størst differansen mellom stram og slakk forankring. Dette stemmer godt overens med analysen for maksimal- og gjennomsnittskraft i Kapittel 5.2.1.
- Slakk forankring gir tydelig størst kraftrespons ved lave frekvenser. Lavfrekvente bevegelser kommer trolig som et resultat av bølgedriftskrefter. Det er viktig å ha kontroll på lavfrekvente egenfrekvenser ettersom resonans kan føre til store kraftresponser.
- Begge metoder har høy kraftrespons ved egenfrekvens for jag. Eksperimentell metode har også tydelig kraftrespons ved egenfrekvens for hiv.
- Responstoppene flytter seg mot høyere frekvenser ved økt forspenning. Dette er spesielt tydelig for lavfrekvente responser.

6 Konklusjon

Målet med denne oppgaven var å undersøke forankringskrefter og bevegelser i hiv og jag for det semilukkede oppdrettsanlegget, OceanTECH. Tradisjonelle forankringssystem for oppdrettsanlegg er svært arealkrevende og dette er til hinder for blant annet fiske og annet bruk av havbunnen. Med bakgrunn i dette var det ønskelig å undersøke en mindre arealkrevende forankring med kortere forankringslinjer. Undersøkelsene er gjort ved ulike bølgespektre hvor det største bølgespekteret i henhold til NS9415 tilsvarer dimensjonerende bølgespekter for de potensielle lokasjonene. Videre er det benyttet to ulike forspenninger i forankringslinene. Det er blitt foretatt både eksperimentell forsøk og numeriske beregninger. Hensikten er å validere programvaren og å kartlegge hvilke effekter de ulike bølgespektrene og forspenningene har på bevegelse og krefter i forankringslinene.

Resultater for begge metodene viser at oppdrettsanleggets bevegelse ved økt forspenning fører til en stor bevegelsesreduksjon i jag. Denne bevegelsesreduksjonen ved JS2 er for eksperimentelle forsøk på 63,34% og for numeriske beregninger på 44,32%. Bevegelsesamplitudene har et relativt stort avvik mellom de to metodene, og de numeriske beregningene gir gjennomgående omtrent 3,1 ganger høyere bevegelsesamplituder i jag sammenlignet med eksperimentelle resultater.

Bevegelsesamplituder viser derimot godt samsvar for de to metodene for bevegelse i hiv. For denne bevegelsen er det derimot stor forskjell i effekt av økt forspenning; eksperimentelle resultater og numeriske beregninger viser en bevegelsesreduksjon på henholdsvis 35,2% og 0,80%. Økt forspenning har tydelig ulike effekter på bevegelsesreduksjon for de to frihetsgradene. Dette viser videre at forankringslinene har ulike dempingsbidrag for ulike frihetsgrader.

Krefter for forankringslinene viser gjennomgående høyere krefter for de numeriske beregningene. Det er viktig å se bevegelse- og kraftrespons i sammenheng ettersom det er konstruksjonens bevegelse som strekker i forankringslinene. Med bakgrunn i dette er det fornuftig at de numeriske kreftene er større enn de eksperimentelle med tanke på den store bevegelsesamplituden i jag. Foruten differansen i kreftene mellom de metodene er det godt samsvar i utviklingen ved justert forspenning for de tre bølgespektrene. Resultatene viser økende krefter ved økende signifikant bølgehøyde. Videre er det tydelig at økt forspenning ikke gir noe betydelig økning i forankringslinenes maksimalkraft, det er til og med registrert en nedgang i maksimalkraft ved økt forspenning. Begge metodene viser at økt forspenning gir en stor økning i gjennomsnittskrefter, der de numeriske beregningene viser en størst økning.

Resultater for kraftresponser i frekvensplanet viser et godt samsvar for de to metodene når det gjelder spektral energifordeling over ulike frekvenser. Det er høyere spektral energi for de numeriske beregningene og dette er som forventet ettersom kreftene er større. Økende signifikant bølgehøyde gir større areal under kurvene og følgelig høyere spektral energi. Økt forspenning gir også en stor økning i spektral energi og dette stemmer godt overens med kraftanalysen som viser stor økning i gjennomsnittskrefter ved økt forspenning. Slakk forankring gir for begge metodene en energifordeling over lave frekvenser som er utenfor bølgespekterets frekvensintervall, dette er trolig effekter fra bølgedriftskrefter.

I oppgaven er det beregnet egenfrekvenser for bevegelse i hiv og jag ved slakk forankring. Resultatene ved slakk forankring viser responstopper ved disse frekvensene. Resonans for jag oppstår ved at egenfrekvens og bølgedriftskrefter sammenfaller. Denne kraftresponsen viser at det kan oppstå relativt store krefter som resultat av bølgedriftskrefter ved resonans. Videre observeres det at egenfrekvens for hiv befinner seg innenfor bølgespekterets frekvensintervall. Kraftrespons for begge metodene sentrerer seg rundt denne frekvensen og dette kommer best til uttrykk for bølgespekteret med størst signifikant bølgehøyde ettersom støy er mindre fremtredende.

Resultatene viser til tider store forskjeller mellom de to metodene. Det er likevel mulig å konkludere med at forspenning i ulik grad bidrar med demping for de ulike frihetsgradene. Videre er det gjennomgående for begge metodene at økt forspenning gir betydelig økt gjennomsnittskrefter i forankringslinene. Den spektrale energifordelingen over ulike frekvenser samsvarer også godt mellom de to metodene. Resultatene fra analysen i frekvensplanet viser at store deler av kreftene ved lav forspenning fordeler seg over lave frekvenser og det er viktig å ha kontroll på disse kreftene. Resultatene fra denne oppgaven kan være nyttig ved design av forankringssystemet til OceanTECH. Videre er det gode grunner til å vurdere vinsjssystem med mulighet for å justere forspenning ettersom dette gir mulighet til å påvirke forankringskrefter og bevegelser.

7 Videre arbeid

Arbeidet som er utført i denne oppgaven er gjort med en rekke forenklinger. Med bakgrunn i dette er det naturlig at videre arbeid forsøker å undersøke mer realistiske forhold og problemstillinger knyttet til utviklingen av OceanTECH.

- Modelloppsettet som er benyttet i denne oppgaven er avstivet og har liten bevegelsesfrihet, dette kan potensielt ha stor påvirkning på forankringskreftene. Videre arbeid bør ha fokus på å undersøke hvilke effekter en mer realistisk modellkonfigurasjon gir for den globale forankringen.
- Forankringssystemet som er benyttet i denne oppgaven består av et fast forankringspunkt ved første kontaktpunkt mellom havbunnen og forankringlinene. Det vil bidra med verdifull informasjon dersom et mer realistisk forankringssystem blir benyttet. Dette kan bety bruk av blant annet bunnkjetting og følgelig et mindre lineært forankringssystem. Videre ville det vært interessant å undersøke forankringskrefter ved ulike bølgeretninger.
- Sloshing er et fenomen som ikke er tatt hensyn til i denne oppgaven. Effekten av sloshing kan bidra med store bevegelser og krefter. Sloshing kan ha flere ulike egenfrekvenser og derfor er det interessant å undersøke hvilken effekt dette har på konstruksjonens bevegelse. Effekter av sloshing kan være en årsak til differanser mellom de eksperimentelle og numeriske resultatene.

8 Referanser

- [1] Norsk Sjømatråd. *Nøkkeltall*. <https://seafood.no/markedsinnsikt/nokkeltall>, 2020. Hentet 17.04.21.
- [2] T. Engø. *Norge er verdens 10 største sjømatprodusent*. *Kystmagasinet*, 2019.
- [3] Sjømat Norge. *Sjømat 2030 et blått taktskifte*. https://sjomatnorge.no/wp-content/uploads/2014/04/SJ%C3%98MAT2030_endelig.pdf, 2014. Hentet 17.02.21.
- [4] Lerøy Seafood. *Bærekraftvinneren*. <https://www.leroyseafood.com/no/investor/rapporter-og-webcast/arsrapport-2018/arsrapport-2018/barekraft-i-vekst/barekraftvinneren>, 2018. Hentet 02.05.21.
- [5] Fiskeridirektoratet. *Utviklingstillatelser*. <https://www.fiskeridir.no/Akvakultur/Tildeling-og-tillatelser/Saertillatelser/Utviklingstillatelser>, 2021. Hentet 02.05.21.
- [6] A. Fredheim et al. *Sikre og mindre arealkrevende fortøyningsystem for havbruksanlegg*. Technical report, Sintef, 2012.
- [7] B. Sagstad. *Hydrostatisk og hydrodynamisk egenskaper til et semilukket oppdrettsanlegg*, Universitet i Bergen, 2021.
- [8] G. Stenfelt. *Introduksjon til Marinteknikk*. https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/mas124_intro_marinteknikk/kompendier_notater/notater/forelesningsnotater_gs_hvl.pdf, 2019. Hentet 03.10.2020.
- [9] O. Gudmestad. *Marine technology and operations - theory practice*. WIT Press, 2015.
- [10] J.M.J. Journée og W.W. Massie. *Offshore Hydrodynamics*. Delft University of Technology, 2001.
- [11] E. Klemetsen. *Hydrodynamisk motstand og bølgerespons til forskjellige utforminger av et ubemannet overflatefartøy*, Universitet i Bergen, 2020.
- [12] B. Pettersen. *Marin Teknikk 3 Hydrodynamikk*, 2020.
- [13] A. Nordrum. *Dynamisk respons og fortøyningskrefter på et semilukket oppdrettsanlegg*, Universitet i Bergen, 2020.
- [14] DNV GL. *Environmental Conditions And Environmental Loads, DNV-RP-C205*, 2010.
- [15] NTNU. *3 Sea State Parameters and Engineering Wave Spectra*. <https://folk.ntnu.no/>

oivarn/hercules_ntnu/LWTcourse/partB/3seastate/3%20SEA%20STATE%
20PARAMETERS%20AND%20ENGINEERING%20WAVE%20SPECTRA.htm.
Hentet 20.03.2021.

- [16] S. K. Chakrabarti. *Handbook of Offshore Engineering*. Elsevier, 2005.
- [17] J. Howell. *Sedimentary Environments | Shoreline and Shoreface Deposits, Encyclopedia of Geology*. Elsevier, s. 570-579, 2005.
- [18] O. M. Faltinsen. *Sea loads on ships and offshore structures*. Cambridge University Press, 1990.
- [19] D. Kristiansen et al. *Sjøegenskaper og forankring til flytende lukkede oppdrettsanlegg*. <https://www.fhf.no/prosjekter/prosjektbasen/901287/>, 2018. Hentet 02.05.21.
- [20] DNV GL. *Position Mooring, DNVGL-OS-E301*, 2015.
- [21] K. Roaldsnes. *Havbruksteknologi - Naturlaster og Forankring*. https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Litteratur/Last_komp_havbruksteknologi.pdf, 1999. Hentet 18.01.2021.
- [22] S. Weller et al. *Guidance On the Use of Synthetic Fibre Ropes for Marine Energy Devices Deliverable 3.5.2 from the MERiFIC Project. University of Exeter*, 2013.
- [23] Certex Norge AS. *Brukerhåndbok for CN fortøyningsystem*. <https://www.certex.no/sites/certex-no/Dokumenter/EH%20brukerhandbok.compressed.pdf>, 2019. Hentet 23.04.2021.
- [24] F. Cardia og A. Lovatelli. *Aquaculture operations in floating HDPE cages: A field handbook. FAO Fisheries And Aquaculture Technical Paper*, 2015.
- [25] Certex Norge AS. *Ploganker*. <https://www.certex.no/produkter/oppdrett-havbruk-og-fortoyning/oppdrettsutstyr/anker-og-kjetting/eh-megahold-anker-p39241>, 2019. Hentet 23.04.2021.
- [26] ScaleAQ. *Shackles*. <https://scaleaq.com/product/shackles/?cn-reloaded=1>, 2019. Hentet 14.11.2020.
- [27] E. Michael et al. *Evaluation of Closed-containment Technologies for Saltwater Salmon Aquaculture. NRC Research Press*, 2010.
- [28] American Petroleum Institute. *Design and analysis of stationkeeping systems for floating structures*, 2005.

- [29] S. Steen. *Experimental Methods in Marine Hydrodynamics*. NTNU, 2014.
- [30] Norsk Standard. *Flytende oppdrettsanlegg, Krav til utforming, dimensjonering, utførelse, installasjon og drift*, 2003.
- [31] O. Nicolaisen og M. Krogstad. *Vurdering av Oppdrettspotensiale i Skjerstadjorden*, 2008.
- [32] HVL, Marinlab. https://www.hvl.no/contentassets/de9d0d0d3cc146f3a0782a81d34f8e13/marinlab_info.pdf. Hentet: 16.04.2021.
- [33] Z. Yuan et al. *Side wall effects on ship model testing in a towing tank*. *Ocean Engineering*, Vol. 147, s. 447-457, 2018.
- [34] O. M. S. Glesnes. *The dynamic behavior of a closed fish farm*, Universitet i Bergen, 2019.
- [35] Qualisys. *Qtm marin manual*. https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Manualer_utstyr/QTM%20Marine%20manual%2020081211.pdf, 2008. Hentet 17.04.21.
- [36] J. P. Bentley. *Principles of Measurement Systems*. Pearson Education, 2005.
- [37] DNV GL. *Structural design of offshore ships, DNVGL-OS-C102*, 2015.
- [38] Mathworks. *Welch's power spectral density estimate*. <https://se.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html>, 2021. Hentet 19.05.21.
- [39] DNV GL. *Wave Loads, DNVGL-CG-0130*, 2018.
- [40] DNV GL. *Sesam Feature Description - Software suite for hydrodynamic and structural analysis of ships and offshore structures*, 2021.
- [41] DNV GL. *Frequency domain hydrodynamic analysis of stationary vessels - Wadam*, 2017.
- [42] DNV GL. *Workshop 3: Side By Side Mooring*. https://home.hvl.no/ansatte/tct/ftp/h2020%20marinteknisk%20analyse/forelesninger/uke%2042%20kurs%203_sima/workshops/ws3_side_by_side.pdf, 2015. Hentet 17.02.21.
- [43] G. Rebel et al. *Lighweight ropes for lifting application*. www.ropetechnology.com/bro_engl/Bro_Lightweight_en.pdf, 2018. Hentet 17.04.21.