

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for matematiske realfag og teknologi

Masteroppgave 2016
30 stp

Analyse og optimalisering av et bølgekraftverk basert på en punkt-absorbator

Analysis and Optimization of a Point-Absorber
Wave-Buoy Device

Yen-Nhi N. Doan

FORORD

Denne oppgaven er gjennomført som en siste del av et femårig sivilingeniørstudie i maskin-, prosess- og produktutvikling ved Institutt for matematiske realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Mastergradsoppgaven er skrevet i samarbeid med Ocean Energy AS. Oppgavens omfang er på 30 studiepoeng, som er ca. 900 arbeidstimer.

Bakgrunnen for denne oppgaven var i forbindelse med Energiseminaret på NMBU, der jeg ble kjent med bølgekraft og med bedriften Ocean Energy AS gjennom deres foredrag «The Storm Buoy». Interessen for ingeniørtekniske problemstillinger innen fornybar energi har lenge vært tilstede. Nysgjerrigheten min ble styrket etter seminaret, og da spesielt innen bølgekraft. Etter en liten tur til Runde for å bli kjent med testfasilitetene, ble det diskutert frem til en mulig problemstilling. Den endelige problemstillingen ble satt sammen i samarbeid med Ocean Energy AS, meg selv og min hovedveileder, Tor Anders Nygaard.

Jeg brukte min kunnskap og kompetanse fra tidligere kurs gjennom hele prosessen, blant annet fysikk, maskinteknikk, FEM-analyse og CAD. Nye fagområder som jeg måtte implementere var marinteknikk og hydrodynamikk. Jeg har også måttet tilegne meg kunnskap i BEM-kildekoden NEMOH og simuleringsverktøyet 3Dfloat. Dette er nye områder for meg, noe som har resultert til en bratt og spennende læringskurve. Oppgaven har vært meget lærerik, og erfaringene fra dette arbeidet vil utvilsomt komme godt med senere.

Jeg vil benytte anledningen til å rette en stor takk til min hovedveileder professor Tor Anders Nygaard for solid veiledning gjennom hele masterarbeidet, og for å ha delt sin kompetanse og bidratt med mange gode innspill. Jeg hadde ikke kommet i mål, om det ikke var for hjelpen og de gode tilbakemeldingene jeg fikk fra deg.

Takk til førsteamanuensis Marit Irene Kvittem for hjelp med innføring av NEMOH, og takk til Jacobus Bernardus de Vaal ved IFE for hjelp med introduksjon av 3Dfloat. Jeg vil også utstede en takk til familie og venner for all støtte, motiverende samtaler og råd. Dere har bidratt til en helt uforglemmelig studietid her på NMBU. Og til slutt, en stor takk til Cecilie Haugen for at du tok deg tid til korrekturlesing av oppgaven.

Ås, 18. mai 2016

Yen-Nhi N. Doan

SAMMENDRAG

En av de største utfordringene verden har i dag er hvordan man skal sikre energibehovet i fremtiden på en sikker og bærekraftig måte. Det forsøkes hele tiden å utnytte ulike typer av fornybare energikilder. Den høye energitettheten i havet gjør bølgekraft svært interessant. Det som er utfordrende med bølgekraft er de omfattende prosessene, fra bølgebevegelse til elektrisk energi inn i kraftnettet. En må tenke helhet og få til alle stegene i prosessen for å utnytte denne energien så effektiv som mulig.

Bølgekraftskonseptet som diskuteres i denne oppgaven er utviklet av Ocean Energy AS. Konseptet består av lineære generatorer som er plassert på havbunnen, forbundet med bøyer på overflaten som fanger opp bølgenes bevegelsesenergi. Hensikten med denne masteroppgaven er å analysere og optimalisere bølgekraftverket. Til dette skal simuleringsverktøyet 3Dfloat brukes.

Innledningsvis lå fokuset på å skjønne hvordan bølgekraftverket er bygget opp, gjøre seg kjent med BEM-kildekoden NEMOH og simuleringsverktøyet 3Dfloat, og tilegne seg nødvendig kunnskap innen hydrodynamikk.

Det ble etablert en simuleringsmodell av bølgekraftverket som viste seg å stemme godt overens med energiberegninger og bølge teori. Det ble kjørt simuleringer med både regulære og irregulære bølger. I simuleringene ble demper justert for å finne de optimale dempingskoeffisientene. Det ble funnet at dempingskoeffisienten varierte fra periode til periode. Andre faktorer som bølgehøyder og ballast, hadde ingen innvirkning på dempingskoeffisienten.

Det er også blitt foreslått et nytt design av flytebøyen til Ocean Energy AS på grunnlag av lineær potensialteori og bølgekinematikk. Det nye designet er lengre i høyden og litt mindre i diameter.

Avslutningsvis er det funnet at det er mange likheter mellom resultatene fra regulære og irregulære bølger. Resultatene fra irregulære bølger viser et mer realistisk bilde av hvilke krefter som virker. Men om det er behov for enklere beregninger, vil resultater fra regulære bølger kunne klare å beskrive store deler av hva som skjer i virkelige havforhold.

For videre arbeid anbefales det å teste ut en prototype for å få en bedre helhetsforståelse av bølgekraftverket. Samt utføre en grundigere undersøkelse på optimal utforming og design av flytebøyen. Og det kan også kjøres flere simuleringer med flere ulike parametere.

ABSTRACT

One of the biggest challenges right now, is how to find a solution for securing reliable and sustainable energy supply. Several renewable energy technologies are constantly under development. The high energy density of ocean waves makes utilization of wave energy very interesting. The challenges for all wave power technologies is the adaptation of the design, and all the extensive processes. Everything have to be thoroughly reviewed and considered for more efficient energy utilization.

The concept discussed in this master thesis is developed by Ocean Energy AS. The concept consists of linear generators located on the seabed. Buoys on the surface is connected to these generators via a line, and captures the energy in the motion of the waves. This will make a wave energy converter (WEC) able to generate electricity. The purpose of this thesis is to analyze and optimize this wave power device. The 3Dfloat simulation tool will be used for this.

Initially the focus was to understand how this kind of wave power device works, familiarize with the software's NEMOH and 3DFloat, and acquire the necessary knowledge in hydrodynamics.

It was established a simulation model of the wave power plant which proved to be consistent with energy calculations and wave theory. Simulations was done with regular and irregular waves. The damper were adjusted to find the optimal damping coefficients. It was found out that the coefficient varied for different periods. Other factors such as wave heights and weights, had no impact on the optimal damping coefficient.

It has been suggested a new design of the buoy. The new design is longer in height and slightly smaller in diameter. It is also found that there are many similarities between the results of regular and irregular waves. The results of irregular waves is of course more realistic. But for simpler calculations, it will be enough to run simulations with regular waves.

Suggestions for further work is to test a prototype to get a better understanding of the wave power device. As well as perform a more thorough examination of the optimal layout and design of the buoy. Also, it can be run more simulations with several different parameters.

Innhold

Figurer	X
Tabeller	XII
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.1.1 Klima og energitilvirkning	1
1.1.2 Bølgekraft	3
1.1.3 Ulike konsepter av bølgekraftverk	4
1.2 Ocean Energy AS	7
2 Prosjektbeskrivelse	9
2.1 Prosjektbakgrunn	9
2.2 Prosjekt målsettinger	9
2.2.1 Hovedmål/problemstilling	9
2.2.2 Delmål	9
2.3 Begrensninger for arbeidet	10
2.4 Symboler og terminologi	10
2.5 Koordinatsystem og frihetsgrader	12
2.6 En grundigere beskrivelse av teknologien	13
2.7 Beskrivelse av konstruksjonen og materialbruk	15
3 Teorigrunnlag	17
3.1 Bølgeteori	17
3.1.1 Mekanisk oscillasjon	17
3.1.2 Addert masse, demping og stivhet	18
3.1.3 Bølgekinematikk	18
3.1.4 Irregulære bølger	19
3.1.5 Bølgeenergi	20
3.2 Lineær potensialteori	21
4 Metodebruk og løsningsverktøy	22
4.1 Massematrise fra SolidWorks	22
4.2 Beregninger av bølgeenergi	22
4.3 NEMOH	24

4.3.1	Beskrivelse av NEMOH	24
4.3.2	Koordinatsystemet i NEMOH	25
4.4	3Dfloat	26
4.4.1	Beskrivelse av 3Dfloat	26
4.4.2	Simuleringsgeometri og påsatte krefter	26
4.4.3	Testoversikt	28
4.5	Andre programvarer og verktøy	29
5	Resultater	30
5.1	Massematrise fra SolidWorks	30
5.2	Beregninger av bølgeenergi	31
5.3	Resultater fra NEMOH	32
5.3.1	Elementinndeling	32
5.3.2	Resultater	32
5.4	Resultater for lineær demper	33
5.4.1	Simuleringer ved regulære bølger	33
5.4.2	Simuleringer ved irregulære bølger	38
5.4.3	Sammenligning av resultater fra regulære og irregulære bølger	42
6	Diskusjon	43
6.1	Massematrise fra SolidWorks	43
6.2	Vurdering av energiberegningene	43
6.3	Vurdering av resultatene fra NEMOH	43
6.4	Vurdering av resultater for lineær demper	44
6.4.1	Simuleringer ved regulære bølger	44
6.4.2	Simuleringer ved irregulære bølger	45
6.4.3	Sammenligning av resultater fra regulære og irregulære bølger	46
7	Konklusjon og videre arbeid	47
7.1	Konklusjon	47
7.2	Videre arbeid og anbefalinger	47
	Referanser	48
	Appendiks	50
A	Original utskrift av bølgedata, Runde	51

B	Massematrise fra SolidWorks	52
C	Koordinatsystem, notasjoner og matematiske funksjoner i NEMOH	53
D	Inputfil til NEMOH	55
E	Beskrivelse av 3Dfloat	56
F	Inputfil til 3Dfloat - Regulære bølger	58
G	Inputfil til 3Dfloat - Irregulære bølger	65
H	Den originale bøyekonstruksjonen tegnet i SolidWorks med mål	72

Figurer

1.1	Verdens strømproduksjon i 2013 (IEA, 2015).	1
1.2	FNs klimapanelers karbonbudsjett (Miljødirektoratet, 2014).	2
1.3	Gjennomsnittlig årlig tilgjengelig effekttetthet i verden (a) (Kofoed, 2009) og i Norge (b) (SWECO, 2007).	3
1.4	Illustrasjon av kategorier for bølgekraftskonsepter (EMEC, 2008).	4
1.5	Illustrasjon av Seabased sitt bølgekraftverk (Foto: Seabased AB).	4
1.6	Illustrasjon av Wavestar sitt konsept (Foto: Wavestar).	5
1.7	Illustrasjon av CalWave sitt konsept (Foto: CalWave).	5
1.8	Ett av konseptene til AWS Ocean Energy (Foto: AWS Ocean Energy).	5
1.9	Illustrasjon av Ocean Power Technologies sitt konsept (Foto: Ocean Power Technologies).	6
1.10	Illustrasjon av Aquamarine Power sitt konsept (Foto: Aquamarine Power).	6
1.11	Illustrasjon av Carnegie Wave Energy sitt konsept (Foto: Carnegie Wave Energy).	7
1.12	Illustrasjon av Oceanlinx sitt konsept (Foto: Oceanlinx).	7
1.13	Konseptet til en såkalt «Oscillating Water Column» (Seed).	7
1.14	Prototypen av OCEs «The Storm Buoy» uten vinsj eller generator, som flyter fritt i havet (Foto: Asbjørn Skotte).	8
2.1	Illustrasjon av OCEs flytebøye med innebygd sensorstyrt vinsj som dykker bøyen ned etter tidevannsforskjell og styrken på uværet (Ocean Energy AS, 2016).	9
2.2	Flytebøyen kan ha seks frihetsgrader i sin bevegelse.	12
2.3	Generatoren til Seabased med beskrivelse av de ulike delene (Seabased AB, 2015).	13
2.4	Illustrasjon av Seabased sin bølgegenerator (WEC) med stillverk (transformatorstasjon) (Seabased AB, 2015).	13
2.5	Illustrasjon av hvordan generatorene er koblet til transformatorene.	14
2.6	Illustrasjon av konstruksjonen som er brukt i denne oppgaven, tegnet i SolidWorks.	15
2.7	Målene til konstruksjonen tegnet i SolidWorks. Alle mål er i meter.	16
3.1	Mekanisk oscillator bestående av et masse-fjær-demper system.	17
3.2	Bølgepartikkelbevegelser i grunt vann (Journée and Massie, 2001).	18
3.3	Bølgepartikkelbevegelser i dypt vann (Journée and Massie, 2001).	19
3.4	Bølgepartikkelbevegelser med $\lambda = 100$ m i tre forskjellige vanddybder. (Journée and Massie, 2001).	19
3.5	Superposisjon av flere regulære bølger (Journée and Massie, 2001).	20

4.1	Eksempler på resultater fra NEMOH, her sammenlignet med Aquaplus som viser at programmet er validert (Babarit, 2016).	24
4.2	Eksempel på mesh med normalvektorer (Babarit, 2016).	25
4.3	Koordinatsystem for NEMOH (LHEEA, 2016).	25
4.4	Definisjonen av et bjelkeelement, med 6 frihetsgrader i hver node. X-aksen er rettet langs vektoren fra node 1 til node 2, med origo ved midtpunktet mellom disse to nodene (Nygaard, 2015).	26
4.5	En visualisering av simuleringsgeometrien (bildet er laget og tatt fra ParaView).	27
4.6	Elementene i 3Dfloat er illustrert med røde prikker i denne figuren.	28
5.1	Elementinndelingen i NEMOH.	32
5.2	Her vises det at det tar rundt 40 s før systemet er i stabilisert tilstand.	33
5.3	Data fra sensor ved regulære bølger.	36
5.4	Resultater fra plotting ved regulære bølger.	37
5.5	Her vises det at det tar rundt 400 s før systemet er i stabilisert tilstand.	38
5.6	Data fra sensor ved irregulære bølger.	40
5.7	Resultater fra plotting ved irregulære bølger.	41
B.1	Massematrise tatt fra SolidWorks.	52
H.1	Illustrasjon av «The Storm Buoy».	72
H.2	Illustrasjon av «The Storm Buoy», snittet på midten.	72

Tabeller

2.1	Symboler med tilhørende enheter, se tabell 2.2 på side 11 for resten.	10
2.2	Symboler med tilhørende enheter.	11
2.3	Frihetsgradene med beskrivelse.	12
4.1	Statistikk som viser fordeling i prosent av signifikant bølgehøyde og peak periode for hele året. Sterke farger indikerer høyere prosent. Se appendiks A for original utskrift.	23
4.2	Simuleringsspesifikasjoner inkludert koordinatene til elementene.	28
4.3	Oversikt over tester med regulære bølger.	29
4.4	Oversikt over tester med irregulære bølger.	29
5.1	Produsert energi fra én bølgeenhet beregnet med likning 4.2 og multiplisert med data fra tabell 4.1. Sterke farger indikerer høyere total energi inn til strømmettet. . .	31
5.2	Oversikt over filene fra NEMOH som brukes ved simulering med beskrivelse.	32
5.3	Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 5 s.	34
5.4	Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 10 s.	34
5.5	Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 15 s.	34
5.6	Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 20 s.	35
5.7	Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 5 s.	38
5.8	Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 10 s.	39
5.9	Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 15 s.	39
5.10	Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 20 s.	39
5.11	Sammenligning av de optimale dempingskoeffisientene ved regulære og irregulære bølger.	42
5.12	Sammenligning av gjennomsnittlig effekt ved regulære og irregulære bølger.	42

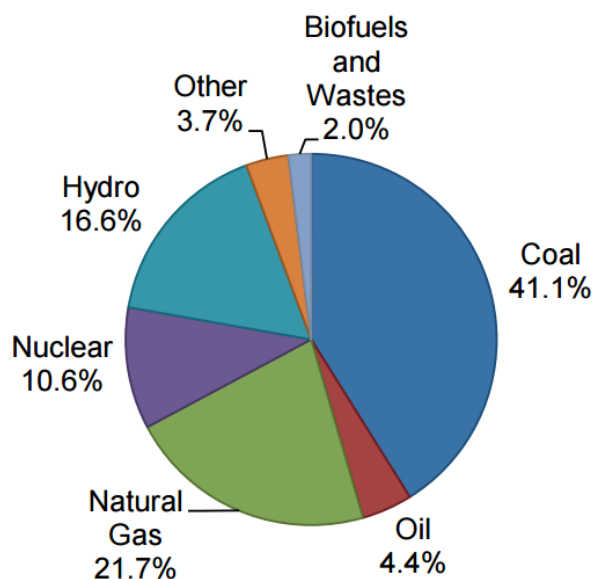
Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Bakgrunn

1.1.1 Klima og energitilvirkning

Behovet for elektrisk energi øker stadig, og det forsøkes hele tiden å finne på nye måter å løse dette behovet. Elektrisitets- og varmeproduksjon er den største kilden til klimagassutslipp i verden i dag (IPCC, 2014), i hovedsak CO₂ fra forbrenning av kull, olje og gass, og fra avskoging. I 2013 stod kullkraft for omtrent 41,1 % av verdens elektrisitetsproduksjon (IEA, 2015), 4,4 % fra olje, 21,7 % fra gass, 10,6 % fra kjernekraft og 16,6 % fra vannkraft. Resten av elektrisitetsproduksjonen ble dekket av biobrensel og av fornybare energikilder som vindkraft, sol, geotermisk og havenergi.



Figur 1.1: Verdens strømproduksjon i 2013 (IEA, 2015).

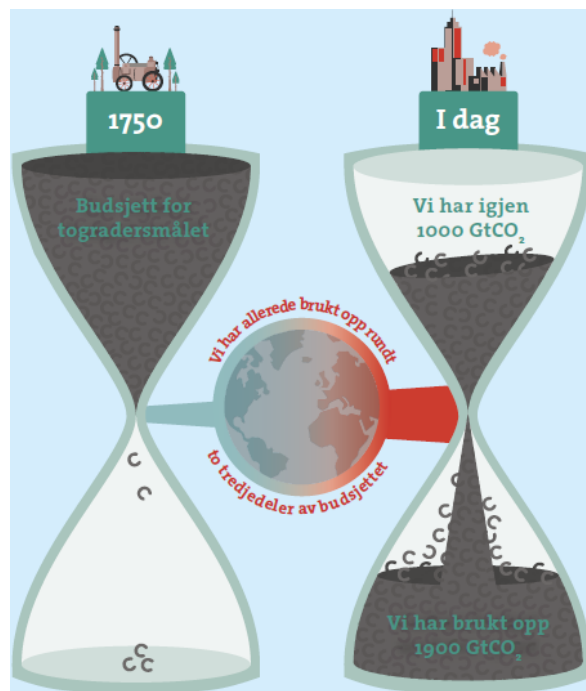
Verden i dag baserer seg i stor grad på bruk av fossile energikilder. Disse energikildene vil bli brukt opp, og medfører i tillegg veldig høye klimagassutslipp. CO₂-konsentrasjonen har steget med 40 % siden førindustriell tid (FNs-klimapanel, 2016), og klimaet på jorden har endret seg siden. Blant annet har havet steget med 19 cm fra 1901 til 2010 (Miljødirektoratet, 2014). Det er i gjennomsnitt 1,7 mm per år, og mellom 1993–2010 steg havet med 3,2 mm per år.

Videre fører havets opptak av CO₂ til forsuring av havet. Det har blitt 26 % surere siden førindustriell tid (Miljødirektoratet, 2014). Vi står ovenfor mer hyppig og kraftig ekstremvær. Hyppigheten av hetebølger har økt over store deler av verden, samtidig som ekstremnedbør forekommer oftere i Nord-Amerika og Europa (Miljødirektoratet, 2014).

1.1. BAKGRUNN

For å unngå alvorlige klimatiske ubalanser i fremtiden må vi endre måten vi bruker energi og arealer på. Det vil kreve gjennomgripende endringer i alle deler av samfunnet. På klimatoppmøtet i Paris, i desember 2015, vedtok alle verdens land en ny klimaavtale som skal gjelde fra 2020. Landene er enige om at det ikke skal bli mer enn 2 °C varmere, og helst ikke mer enn 1,5 °C før 2100 (FN-sambandet, 2016).

FNs klimapanel har laget et karbonbudsjett som viser hvor mye CO₂ vi kan slippe ut for å overholde togradersmålet. FNs klimapanel mener at 2900 milliarder tonn med CO₂-utslipp er grensen. Da er det 66 % sannsynlig at vi kan nå togradersmålet. Vi slapp ut rundt 1900 milliarder tonn mellom perioden 1861-1880 (da målingene begynte) og 2011. Det betyr at vi allerede har sluppet ut nesten to tredjedeler av den totale mengden CO₂ vi kan slippe ut, og har dermed bare 1000 milliarder tonn igjen fram til 2100 (Miljødirektoratet, 2014).



Figur 1.2: FNs klimapanelers karbonbudsjett (Miljødirektoratet, 2014).

For å få ned utslippene på dette nivået er det nødvendig å legge om energiproduksjonen slik at den ikke gir utslipp av drivhusgass. Fornybar energi og kjernekraft er allerede tatt i bruk. Sistnevnte har imidlertid møtt økt motstand på grunn av sikkerhets- og miljøhensynsmessige årsaker. Håndtering av atomavfall har lenge vært et stort problem, ikke minst fordi plutonium kan utvinnes fra avfallet og komme på avveie for bruk til atombomber. Avfallet vil også kunne være en alvorlig forurensningskilde og helsefare dersom det ikke lagres på en forsvarlig måte (Rosvold, 2016). Dette, sammen med risikoen for reaktorulykker som Tsjernobyl og Fukushima, er grunnen til at flere land har besluttet å ikke bygge og/eller stanse utbygging av kjernekraftanlegg. Blant annet vedtok Tyskland i 2011 å avvike all kjernekraft innen 2022, som da stod for 16 % av landets samlede energiproduksjon (Hofstad, 2015).

På den annen side, har fornybar energi fått økt oppslutning den siste tiden. I statsbudsjettet for 2016 økes kapitalinnskuddet i Fond for klima, fornybar energi og energiomlegging (Klimafondet) med 14,25 mrd. kroner, til totalt 67,75 mrd. kroner (NHO, 2015). I tillegg har det også

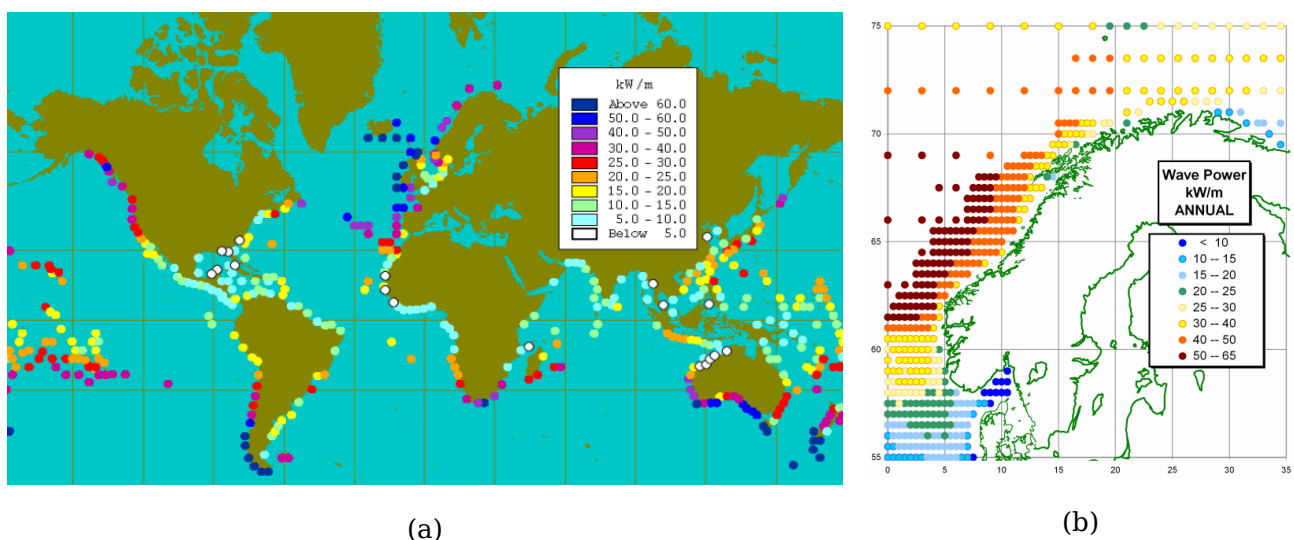
blitt en økning i bevilgningen til miljøteknologiordningen i Innovasjon Norge på 134,5 mill. kroner. Dette skaper sterke muligheter til ny forskning og teknologi innen fornybar energi. I Norge utgjør allerede store deler av kraftproduksjonen av fornybar energi som følge av landets til nå viktigste fornybare energikilde, vannkraft. Om lag 95 % av kraftproduksjonen i Norge kommer fra vannkraft (NVE, 2015b).

Forbruket, derimot, er en annen sak. Ifølge EU-tall utgjør 70 % av strømmen nordmenn kjøper fra kull, gass og atomkraft (Vagle, 2015). Forbrukerrådet lanserte i juni 2015 en nettside der nordmenn kan sjekke pris og om strømmen sin er fornybar (www.strompris.no). På sikt håper Forbrukerrådet at bedre informasjon vil gi mer konkurranse og økt etterspørsel etter miljøvennlig strøm.

Norge, som alle land, må finne en vei mot «det grønne skiftet». En av nøklene til dette er innovasjon og teknologiutvikling, noe som er svært viktig for å kunne oppnå miljøvennlig energi, og ikke minst, konkurransedyktige energipriser. Norge kan bidra med fornybare energikilder som vind-, sol-, bio- og havenergi. Slike energikilder er derimot svært avhengige av værforholdene, og er derfor vanskelige å håndtere med strømforbruket og årstidene. Den eneste løsningen som finnes per i dag er å bruke den overproduerte energien til å pumpe vann opp i magasiner i et pumpekraftverk.

1.1.2 Bølgekraft

Bølgekraft er generert av vind langs havoverflaten. Den har en høy energitetthet, typisk 30–40 kW per meter bølgefront langs norskekysten (mellom Stad og Lofoten) (NVE, 2015a). Tilsiget av bølgeenergi som når inn mot norskekysten er anslått til 400 TWh per år. Ute på åpent hav kan energitettheten komme opp i 100 kW per meter bølgefront (Norges forskningsråd, 2011). Det er blitt forsøkt ved flere konsepter å utnytte denne energien og konvertere den til elektrisitet. Potensialet er høyt, og selv om det kun er en liten del av dette potensialet som vil i praksis kunne utnyttes, kommer bølgeenergi til å gi betydelige tilskudd til strømproduksjonen i mange kystnasjoner.



Figur 1.3: Gjennomsnittlig årlig tilgjengelig effektetthet i verden (a) (Kofoed, 2009) og i Norge (b) (SWECO, 2007).

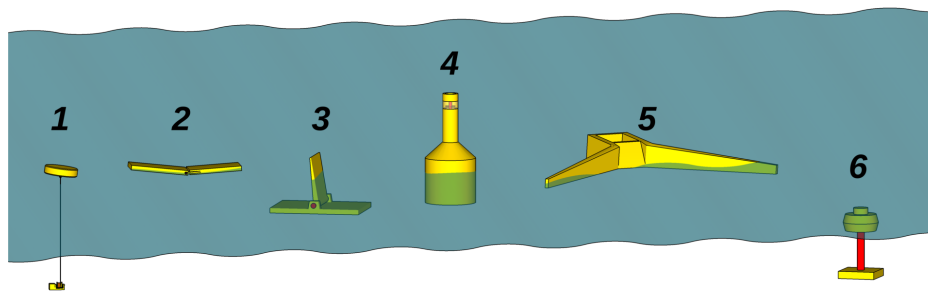
1.1. BAKGRUNN

Hovedproblemene med bølgekraftteknologi er at det er vanskelig å utnytte energien på en effektiv måte. Det er samtidig høye driftskostnader på grunn av modenheten på teknologien, og at det er store skadelige slitasje på grunn av de store kreftene som finnes i havet.

Bølgekraftteknologien startet tidlig på 1970-tallet. Det var oljekrisen i 1973 som fikk forskningen i gang, særlig i Storbritannia, Sverige og Norge (Norges forskningsråd, 2011). Men tidlig på 1980-tallet da oljeprisen gikk ned, ble bevilgningene drastisk kuttet, samtidig med at det ble mindre engasjement for energi og miljø. Det har også vært spekulasjoner om at interesser for andre energikilder har bidratt til å hindre utviklingen av bølgeenergi. Teknologien er derfor fortsatt i en test- og utviklingsfase den dag i dag.

Det finnes flere prototyper under testing på verdensbasis, men det er kun et fåtall anlegg som er i drift. Bølgekraftkonsepter faller vanligvis inn under en av disse kategoriene (EMEC, 2008):

1. Punkt-absorbator (point-absorbator)
2. Hengslet flytende innretning (attenuator)
3. Svingeplate (oscillating wave surge converter)
4. Svingende vannsøyle (OWC)
5. Oppskyllingsanlegg (overtopping device)
6. Nedsenket trykkforskjell (submerged pressure differential)



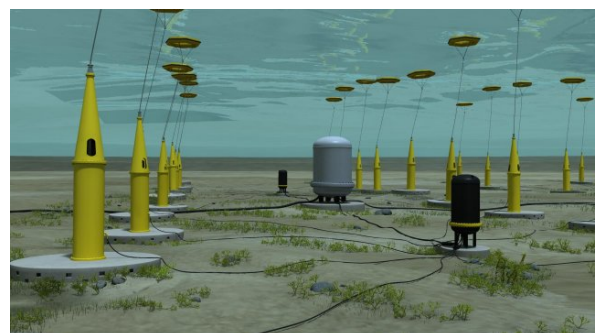
Figur 1.4: Illustrasjon av kategorier for bølgekraftkonsepter (EMEC, 2008).

1.1.3 Ulike konsepter av bølgekraftverk

I denne seksjonen skal det legges frem ulike konsepter av bølgekraftverk som per dags dato (20.01.2016) er under utvikling.

Seabased AB (Sverige)

Seabased sin bølgekraftteknologi utnytter vannets bølgebevegelse for å omforme bevegelsene til elektrisk energi. Konseptet går ut på at det er en lineær generator med permanentmagnet plassert på havbunnen, og den er forbundet med en bøye som flyter på havoverflaten. Ettersom bøyen beveger seg opp og ned sammen med bølgene, vil permanentmagneten bevege seg i takt. Dette vil generere elektrisk energi. Videre er energiomformerne koblet til marine understasjoner, hvor vekselstrøm overføres direkte til landnettet (Seabased AB, 2015).



Figur 1.5: Illustrasjon av Seabased sitt bølgekraftverk (Foto: Seabased AB).

Wavestar (Danmark)

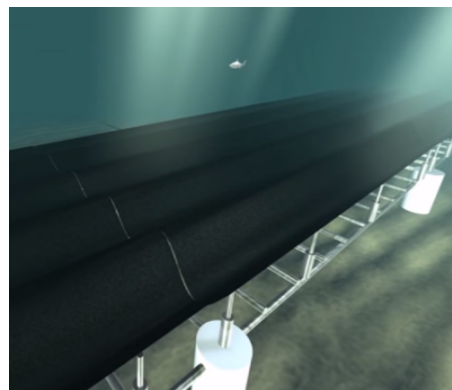
Wavestar-maskinen henter energi med «flåter» som heves og senkes med bevegelsene til bølgene. Flåtene er festet som armer til en plattform. Bevegelsene av flåtene skaper hydraulisk trykk som gjør at en generator klarer å produsere strøm. Prototypen har kun 2 flåter, men en Wavestar-maskin i fullskala har totalt 20 flåter. Prototypen ble testet fra 2009 til 2011, og det har vist seg at konstruksjonen tåler ekstreme værforhold (Wavestar, 2015).



Figur 1.6: Illustrasjon av Wavestar sitt konsept (Foto: Wavestar).

CalWave (USA)

CalWave bruker et «teppe» som ligger under havoverflaten for å fange opp bølgeenergi. Dette kaller de for «Sea Floor Carpet». Hydrauliske pumper er festet på undersiden. Ettersom teppet beveger seg etter bølgene, lager teppet hydraulisk trykk og leverer det til oppbevaringsenheter under det. Denne energien vil videre bli sendt til lands og bli konvertert til elektrisitet (CalWave, 2014).



Figur 1.7: Illustrasjon av CalWave sitt konsept (Foto: CalWave).

AWS Ocean Energy (Skottland)

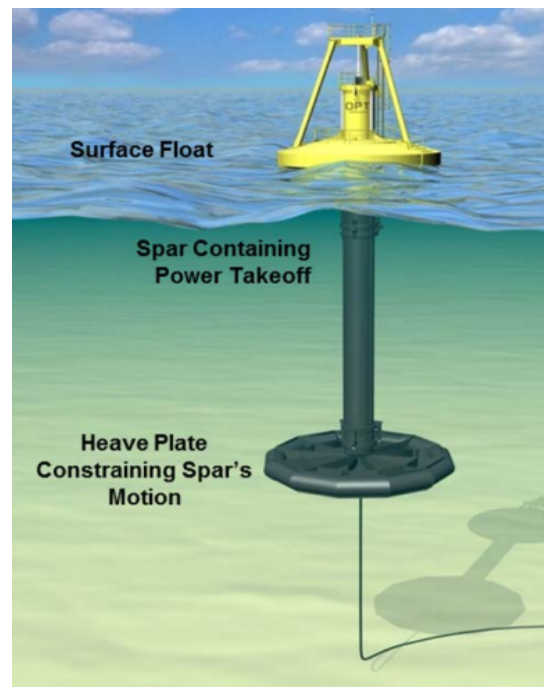
Electric Eel-konseptet til AWS Ocean Energy består av et langt elastisk rør som ligger under havoverflaten. Bølger vil forårsake et trykk og en utbuling i røret. Strøm vil da genereres ved elektro-aktive polymerplater som er bygget på innsiden av røret. Disse platene er fleksible og produserer elektrisk strøm når de blir strukket (AWS Ocean Energy, 2014).



Figur 1.8: Ett av konseptene til AWS Ocean Energy (Foto: AWS Ocean Energy).

Ocean Power Technologies (USA)

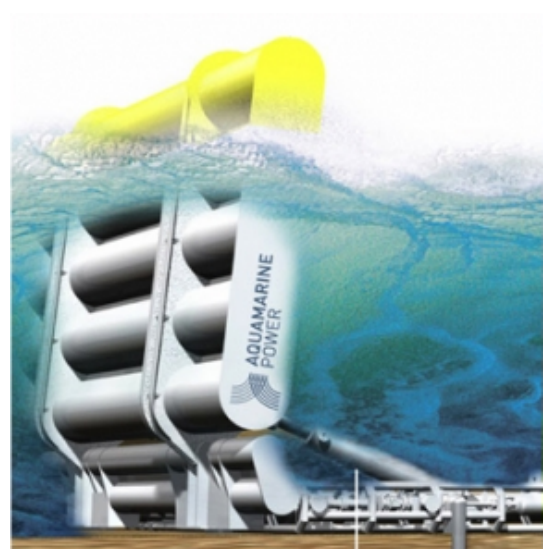
Ocean Power Technologies system er forankret på havbunnen med fortøyningsline. Bøyen beveger seg vertikalt sammen med søylen, og det er den relative bevegelsen som driver generatoren som igjen lager elektrisitet. Det som skiller dette konseptet fra de andre er at hele systemet flyter ved hjelp av blant annet en stor plate på bunnen (Ocean Power Technologies, 2014).



Figur 1.9: Illustrasjon av Ocean Power Technologies sitt konsept (Foto: Ocean Power Technologies).

Aquamarine Power (Skottland)

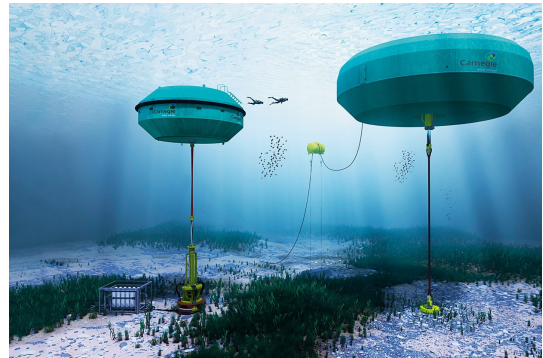
Oyster-bølgekraftteknologien til Aquamarine Power er montert nær kysten, og fanger opp energi fra bølger og konverterer den til elektrisitet. Enheten er en flytende, hengslet klaff som er festet til havbunnen på dybder på mellom 10 og 15 meter, rundt en halv kilometer fra land. Den er nesten helt under vann, og svinger frem og tilbake. Bevegelsen av klaffen driver to hydrauliske stempler som skyver høytrykksvann på land via en undervannsrørledning for å drive en hydroelektrisk turbin. I fremtiden vil undervannsrørledninger koble flere Oyster-enheter til ett enkelt landanlegg (Aquamarine Power, 2015).



Figur 1.10: Illustrasjon av Aquamarine Power sitt konsept (Foto: Aquamarine Power).

Carnegie Wave Energy (Australia)

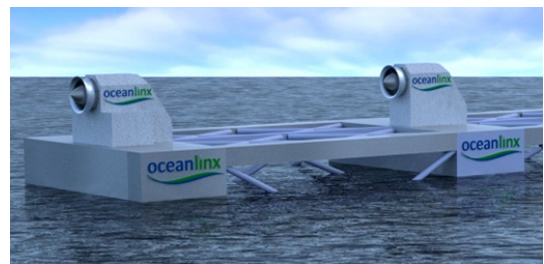
Carnegie Wave Energy kaller teknologien deres for CETO. Det som skiller dette konseptet fra de andre konseptene med flytende bøyer, er at hele systemet ligger under havoverflaten. Både pumpe og generator ligger inne i de nedsenkede bøyene. Pumpen drives av bølgene og generatoren genererer elektrisk strøm som sendes videre gjennom undersjøiske kabler til landnettet (Carnegie Wave Energy, 2015).



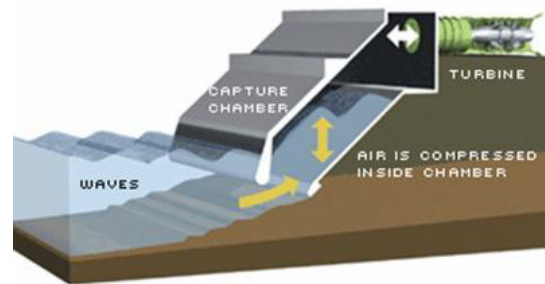
Figur 1.11: Illustrasjon av Carnegie Wave Energy sitt konsept (Foto: Carnegie Wave Energy).

Oceanlinx (Australia)

Oceanlinx sitt konsept går ut på å utnytte bevegelsene til bølgene til å skape et lufttrykk inne i et kammer som ligger halveis under havoverflaten. Øverst i kammeret er det en turbin som alltid flyter slik at det ikke kommer i kontakt med vannet. Når vann går gjennom kammeret, vil vannet presse luften oppover. Denne trykkluffen gjør at turbinen roterer rundt og genererer energi. Når vannet beveger seg nedover, skapes det et vakuum inne i kammeret og luft strømmer inn fra utsiden for å fylle det igjen. Det er denne kontinuerlige prosessen som produserer elektrisitet (Oceanlinx, 2015). Det finnes også slike konsepter som ligger på land, slik som i figur 1.13.



Figur 1.12: Illustrasjon av Oceanlinx sitt konsept (Foto: Oceanlinx).



Figur 1.13: Konseptet til en såkalt «Oscillating Water Column» (Seed).

1.2 Ocean Energy AS

Ocean Energy AS (OCE) sitt konsept er et punkt-absorberende system med en flytende bøye som følger bølgenes bevegelse. Denne bøyen har de kalt for «The Storm Buoy», og er festet til en lineær generator som genererer elektrisk energi. Systemet er designet for å overleve havari ved ekstremt situasjoner. Slitasje er som kjent det største problemet for tidligere forsøk på slike bølgekraftverkløsninger. OCE mener dette bølgekraftverket skal klare å motstå de store naturkreftene og overleve de hardeste stormer med «The Storm Buoy», fordi den flytende bøyen senker seg

ned under vann med hjelp av en innebygd vinsj ved ekstremisituasjoner og blir dermed beskyttet av vannet, mens selve generatoren er plassert permanent og sikkert nede på havbunnen (Ocean Energy AS, 2016).

Et samarbeid med Seabased AB har resultert i en løsning med Seabased sine bunnmonterte lineære generatorer og strøm-distribusjonssystem. Selve generatoren er hermetisk lukket og fylles med nitrogen slik at korrosjon ikke forekommer. Konseptet har ingen mekaniske mellomløsninger med hydraulikk eller girkasser, systemet genererer elektrisitet direkte i takt med bølgenes bevegelse (Ocean Energy AS, 2016).



Figur 1.14: Prototypen av OCEs «The Storm Buoy» uten vinsj eller generator, som flyter fritt i havet (Foto: Asbjørn Skotte).

Neste steg i denne prosessen vil være å ferdigstille en prototype, som skal testes i et røft farvann med kraftig sjø og sterke vindkrefter. Til dette bistår Runde Miljøsentor hele prosjektet med fysisk prøvelokalitet, kontinuerlig miljøovervåking og øvrig logistikkbistand for hele testperioden. En prototype av flytebøya uten vinsj eller generator er presentert i figur 1.14.

Innovasjon Norge har gjennomgått konseptet sammen med sakkyndige fra NTNU og gav i februar 2011 tilsagn om støtte på ca. 4,0 mill. kroner til testprosjektet på Runde. Seabased stiller til disposisjon 2 stk. lineære induksjonsgeneratorer på henholdsvis 25 kW og 50 kW for utplassering og testing ved Runde Miljøsentor (Ocean Energy AS, 2016).

OCE har stor tro på suksess fordi Seabased har kommet langt i sin kommersialisering av generatorer og stillverk/transformatorer. Det finske energiselskapet Fortum bestilte, i 2014, 340 enheter for montering utenfor den svenske vestkysten i Sotenäs kommune (Lie, 2014). Dette er den første kommersielle bestillingen på en samlet bølgekraftpark i verden. I januar tidligere i år (i 2016), ble 36 bølgeenergiomformere installert på havbunnen utenfor Smögen i Sötenäs (Nilsen, 2016), og for første gang ble det levert bølgekraft inn til strømmettet i Norden. Systemet er for øyeblikket i prøveproduksjon og skal utvides med flere enheter.

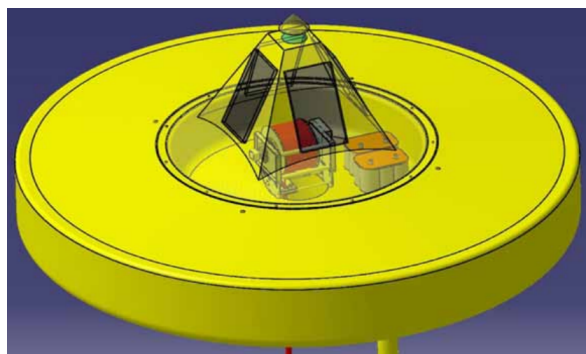
Bølgekraftteknologien fra Seabased har tidligere blitt testet utenfor Runde (i 2009), men da uten hell (Strande, 2009). Pilotanlegget holdt seg ikke så lenge. Wiren på den ene bøya ble belastet så mye av de kraftige bølgene at den røyk. Dette er svært uheldig med tanke på fare for skipstrafikk. Gründeren bak Ocean Energy AS så problemet og patenterte derfor den neddykkbare flytebøya, «The Storm Buoy». Dette konseptet kan være løsningen på bølgekraft i norsk farvann.

Kapittel 2

Prosjektbeskrivelse

2.1 Prosjektbakgrunn

Enhver flytende konstruksjon vil bli utsatt for påkjenninger fra vær og vind, og det er viktig å kunne beregne disse. Dette er spesielt nødvendig *før* en tester ut slike konstruksjoner, for å kunne få et virkelighetsnært bilde av hvilke krefter som virker. Samt for å kunne utnytte bølgeenergien så effektivt som mulig. For systemer som Ocean Energy sitt bølgekraftverk er det behov for kraftige analyseprogrammer. I denne oppgaven skal det derfor legges vekt på å analysere og optimalisere bølgekraftverket ved hjelp av programmet 3Dfloat. Figur 2.1 viser OCEs flytebøye med innebygd sensorstyrt vinsj som dykker bøyen ned etter tidevannsforskjell og styrken på uværet.



Figur 2.1: Illustrasjon av OCEs flytebøye med innebygd sensorstyrt vinsj som dykker bøyen ned etter tidevannsforskjell og styrken på uværet (Ocean Energy AS, 2016).

2.2 Prosjekt målsettinger

2.2.1 Hovedmål/problemstilling

Å utvikle en simuleringsmodell av den patenterte bøyeløsningen til Ocean Energy AS. Optimalisere generatorkarakteristikk for typiske forhold (bølger og strøm), samt at det skal legges frem mulige forbedringer.

2.2.2 Delmål

- Studere aktuelt fagstoff og bakgrunnsmateriell tilknyttet oppgaven.
- Studere bølgedataene fra Runde og regne hvor mye energi én bølgekraftenhet klarer å produsere og levere inn til strømmettet.
- Tegne en enkel skisse av flytebøyen i SolidWorks og få ut massematrise.
- Tilegne seg kunnskap i NEMOH, samt få ut nødvendige data fra NEMOH.

2.3. BEGRENSNINGER FOR ARBEIDET

- Utvikle ferdigheter i 3Dfloat.
- Etablere en simuleringsmodell av bølgekraftverket i 3Dfloat.
- Optimalisere generatorkarakteristikk gjennom simuleringer med henholdsvis regulære og irregulære bølger.
- Legge frem løsningene på best mulig måte og sammenligne disse.
- Rapportering av arbeidsprosessen.
- Presentasjon av arbeid.

2.3 Begrensninger for arbeidet

Følgende punkter er begrensninger for arbeidet i denne oppgaven, som følge av begrenset tid til rådighet i utførelsen av oppgaven.

- Ingen utmattingsberegninger for produktet, eller andre kompliserte påkjenningsberegninger.
- Testing av prototype vil ikke bli utført.
- Det har blitt tatt noen antakelser og forutsetninger i oppgaven på grunn av begrenset informasjon.
- Det er blitt foreslått et nytt design på flytebøyen kun på grunnlag av lineær bølgeteori og bølgekinematikk, og det er ikke blitt sammenlignet med simuleringsresultater fra den opprinnelige bøyen eller andre design.
- Materialvalg er allerede fastsatt av Ocean Energy AS, så det skal ikke diskuteres noe videre i denne oppgaven.
- På grunn av lineær potensialteori og flytebøyens design, skal det kun kjøres simuleringer med relativt lave bølgehøyder. Simuleringene har bølgeamplituder på 1 m eller mindre ved regulære bølger, og signifikant bølgehøyde på 1 m ved irregulære bølger.

2.4 Symboler og terminologi

Symbolene nedenfor vil bli brukt i beregninger og formuleringer videre i denne oppgaven.

Tabell 2.1: Symboler med tilhørende enheter, se tabell 2.2 på neste side for resten.

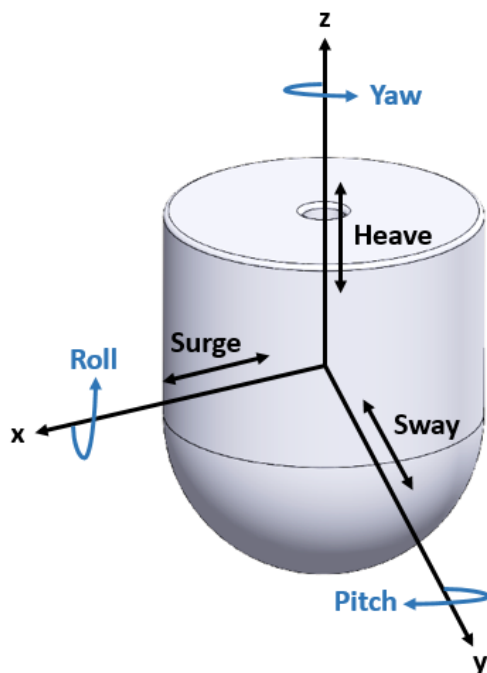
Symbol	Betydning	Enhet
m	Masse	kg
k	Stivhet	N/m
c	Demping	$N/(m/s)$
a	Addert masse (Added Mass)	kg
F	Kraft	N
F_k	Fjærkraft	N

Tabell 2.2: Symboler med tilhørende enheter.

Symbol	Betydning	Enhet
F_c	Dempningskraft	N
F_e	Eksitasjonskraft	N
$F_{oppdrift}$	Oppdriftskraft	N
F_{tyngde}	Tyngdekraft	N
x	Forflytning/avstand langs x-aksen	m
y	Forflytning/avstand langs y-aksen	m
z	Forflytning/avstand langs z-aksen (vertikal akse)	m
\dot{z}	Hastighet langs z-aksen	m/s
\ddot{z}	Akselerasjon langs z-aksen	m/s^2
V	Volum	m^3
$V_{sylinder}$	Volum av sylinder	m^3
$V_{halvsirkel}$	Volum av halvsirkel	m^3
$h_{sylinder}$	Høyde av sylinder	m
g	Tyngdeakselerasjonen (9,81)	N/kg eller m/s^2
P	Bølgeeffekt	kW/m
ρ	Tetthet	kg/m^3
$\rho_{sjøvann}$	Sjøvannets tetthet (1025)	kg/m^3
H_s	Signifikant bølgehøyde	m
T_p	Peak periode	s
h	Vanndybde	m
λ	Bølgelengde	m
p	Trykk	Pa
E	Bølgeenergi	kWh/y
d	Diameter	m
η_{gen}	Virkningsgrad til generator	%
η_{trans}	Virkningsgrad til transformator	%
Abs	Gjennomsnittlig effekt absorpsjonsrate	%
Av	Kapasitetsfaktor	-
M	Massematrise	-
I	Treghetmoment	$kg \cdot m^2$

2.5 Koordinatsystem og frihetsgrader

For å beskrive bevegelsen til en bølgekraftenhet, benyttes et kartesisk koordinatsystem med tre dimensjoner. Siden enheten er flytende har den mulighet til å bevege seg i alle 6 frihetsgrader som vist i figur 2.2.



Figur 2.2: Flytebøyen kan ha seks frihetsgrader i sin bevegelse.

Koordinatsystemet er plassert slik at origo befinner seg der flytebøyen treffer vannplanet; z-aksen ligger i midten av bøyen. xy-planet ligger i samme høyde som havoverflaten. Tre av frihetsgradene omfatter forflytning av massesenteret (Surge, Sway og Heave) og de andre tre omfatter rotasjon rundt massesenteret (Roll, Pitch og Yaw) (Faltinsen, 1990).

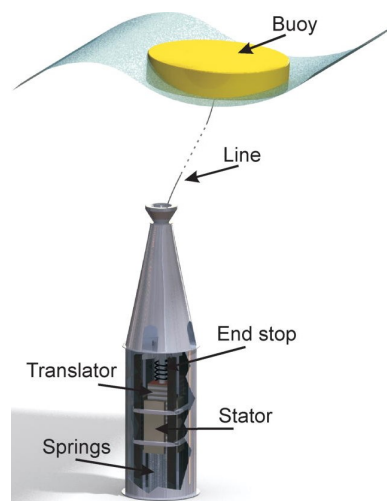
Tabell 2.3: Frihetsgradene med beskrivelse.

Begrep	Beskrivelse
Surge	Translasjonell bevegelse i x-retning
Sway	Translasjonell bevegelse i y-retning
Heave	Translasjonell bevegelse i z-retning
Roll	Rotasjonell bevegelse om x-aksen
Pitch	Rotasjonell bevegelse om y-aksen
Yaw	Rotasjonell bevegelse om z-aksen

Retningen til bølgebevegelsen er satt til å bevege seg i «Surge», altså langs x-aksen. «Sway» er bevegelsen 90 °C på bølgeretningen, altså langs y-aksen. Mens «Heave» er bevegelsen i vertikal retning, altså opp og ned.

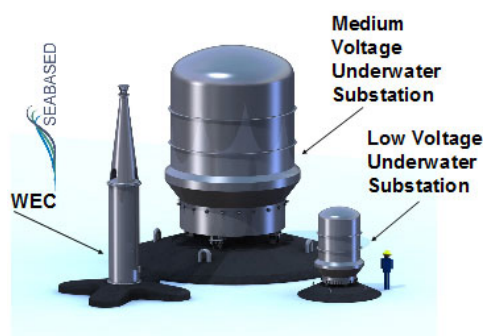
2.6 En grundigere beskrivelse av teknologien

Kort fortalt består bølgekraftverket av en bøye som er koblet til en lineær generator plassert på et betongfundament på havbunnen. Lineærgeneratorene består av to deler; en bevegelig del («translator») som er bekledd med permanente magneter, og en stillestående del (stator) med trefase kabelviklinger, se figur 2.3. Når «translatoren» beveger seg opp og ned, i takt med bevegelsen til bølgene, induseres det vekselstrøm i viklingene på statoren. Ved ekstremvær vil ballasttankene inne i bøyen fylles med vann slik at mesteparten av oppdriften oppheves, og dermed blir det enklere for den innebygde vinsjen å trekke flytebøyen ned i havet (Ocean Energy AS, 2016).



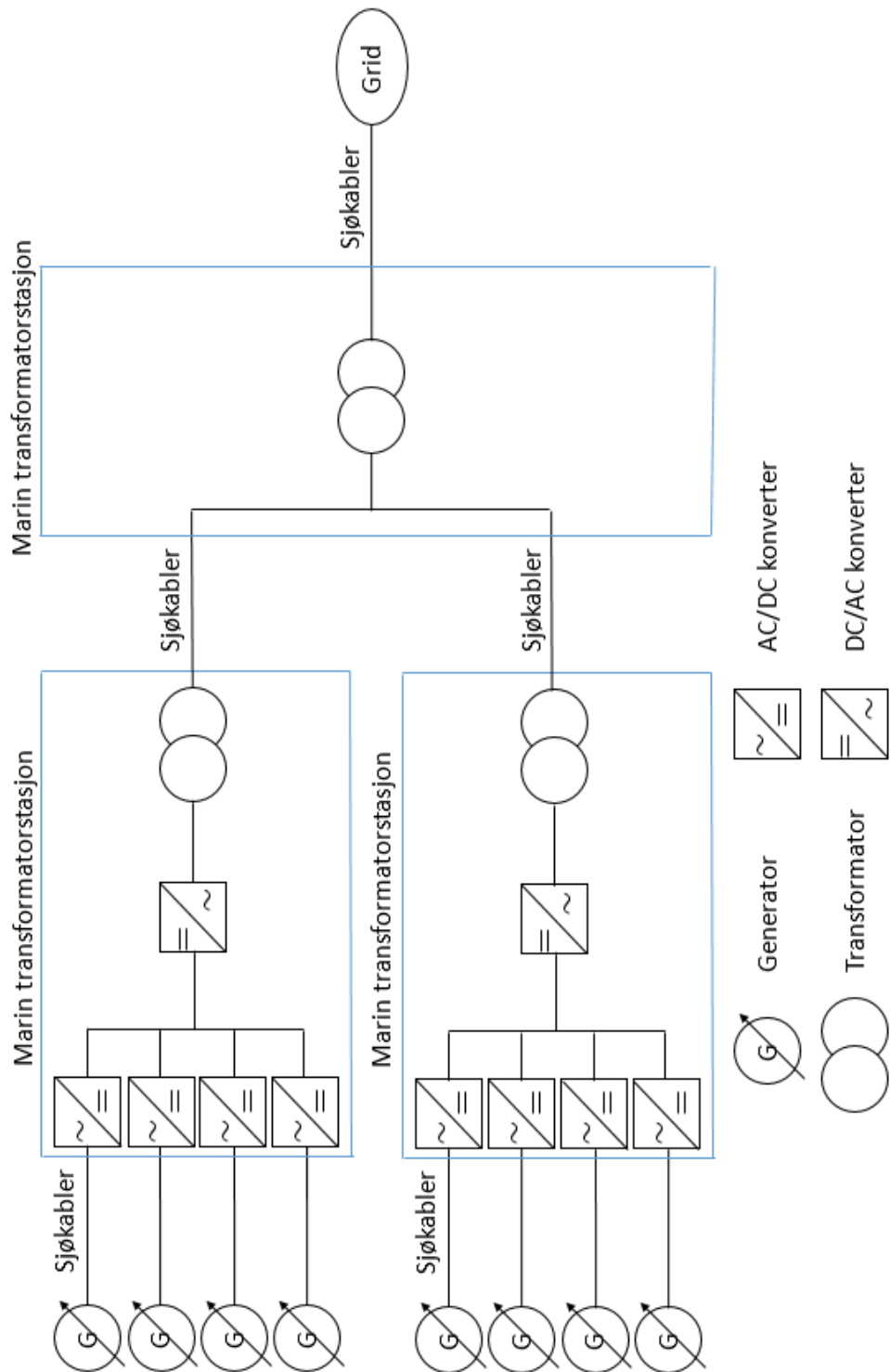
Figur 2.3: Generatoren til Seabased med beskrivelse av de ulike delene (Seabased AB, 2015).

En tenkt bølgekraftpark vil bestå av 20 eller 40 bølgeenergikonverterere plassert på havbunnen som vil ha et omfang på henholdsvis 800 x 800 m eller 1600 x 1600 m (Ocean Energy AS, 2015). Generatorene er koblet sammen gjennom en lavspent undersjøisk transformatorstasjon (Low Voltage Underwater Substation), som igjen er koblet til en middelspent undersjøisk transformatorstasjon (Medium Voltage Underwater Substation). Se figurene 2.4 og 2.5 for illustrasjon og beskrivelse av hvordan generatorene er koblet til transformatorene. Den irregulære energien fra generatorene konverteres til likespenning og så videre til en trefaset vekselspanning. Til slutt sendes det vekselstrøm gjennom sjøkabler inn til elnettet på land (Seabased AB, 2015).



Figur 2.4: Illustrasjon av Seabased sin bølgegenerator (WEC) med stillverk (transformatorstasjon) (Seabased AB, 2015).

Beskrivelse av koblingene mellom transformatorstasjonene



Figur 2.5: Illustrasjon av hvordan generatorene er koblet til transformatorene.

2.7 Beskrivelse av konstruksjonen og materialbruk

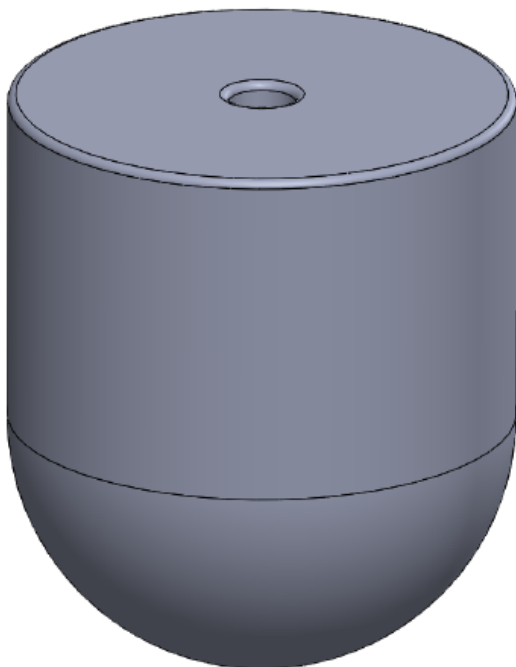
Flytebøyens innmat er av isopor som først limes sammen til en stor firkant, deretter freses denne nøyaktig til formen som er designet. Når fresingen er klargjort sprøytes isoporet med et plastmateriale. Flere lag med polyester legges på for å gi styrke og for å beskytte innmaten i bøyen. Volumet på flytebøyen må være så stort at den kan være i stand til å løfte «translatoren» som veier rundt 8 tonn (Ocean Energy AS, 2016).

«Translatoren» er laget av støpejern, mens statoren og dekselet i hovedsak er laget av forskjellige typer av stål. De permanente magnetene på translatoren består av neodym, jern og bor (henholdsvis ca. 24, 75 og 1 %), noe som gjør magnetene svært kraftige. Viklingene på statoren er av kobbertråd, isolert med kryssbundne polyetylen (PEX). Selve generatoren er festet til et tungt fundament som er laget av betong (Seabased AB, 2015).

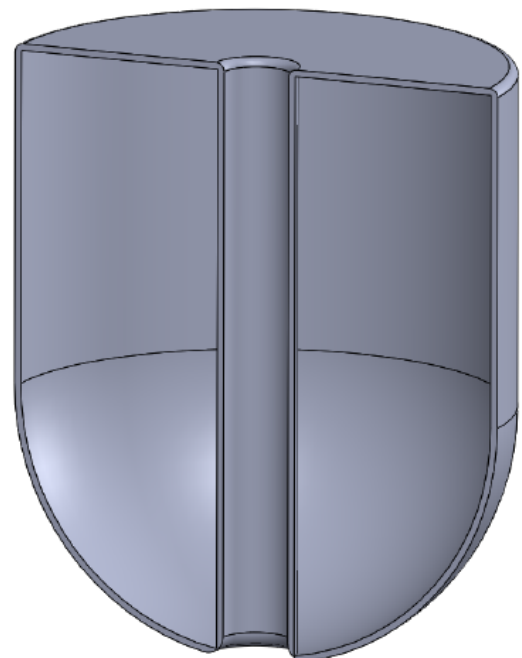
Oppgavens design på flytebøyen

I denne oppgaven skal konstruksjonen som vist i figur 2.6 brukes. Den er litt annerledes enn OCEs tiltenkte flytebøye. Se appendiks H for geometrien til den «opprinnelige» bøyen.

Den nye konstruksjonen skal være lengre i høyden, og noe kortere i diameter. Når bøyen beveger seg opp og ned vil vannplanet treffe en jevn og lik kontaktflate, noe som er nødvendig for at beregningene skal fungere med hensyn til lineær potensial teori (Journée and Massie, 2001).



SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

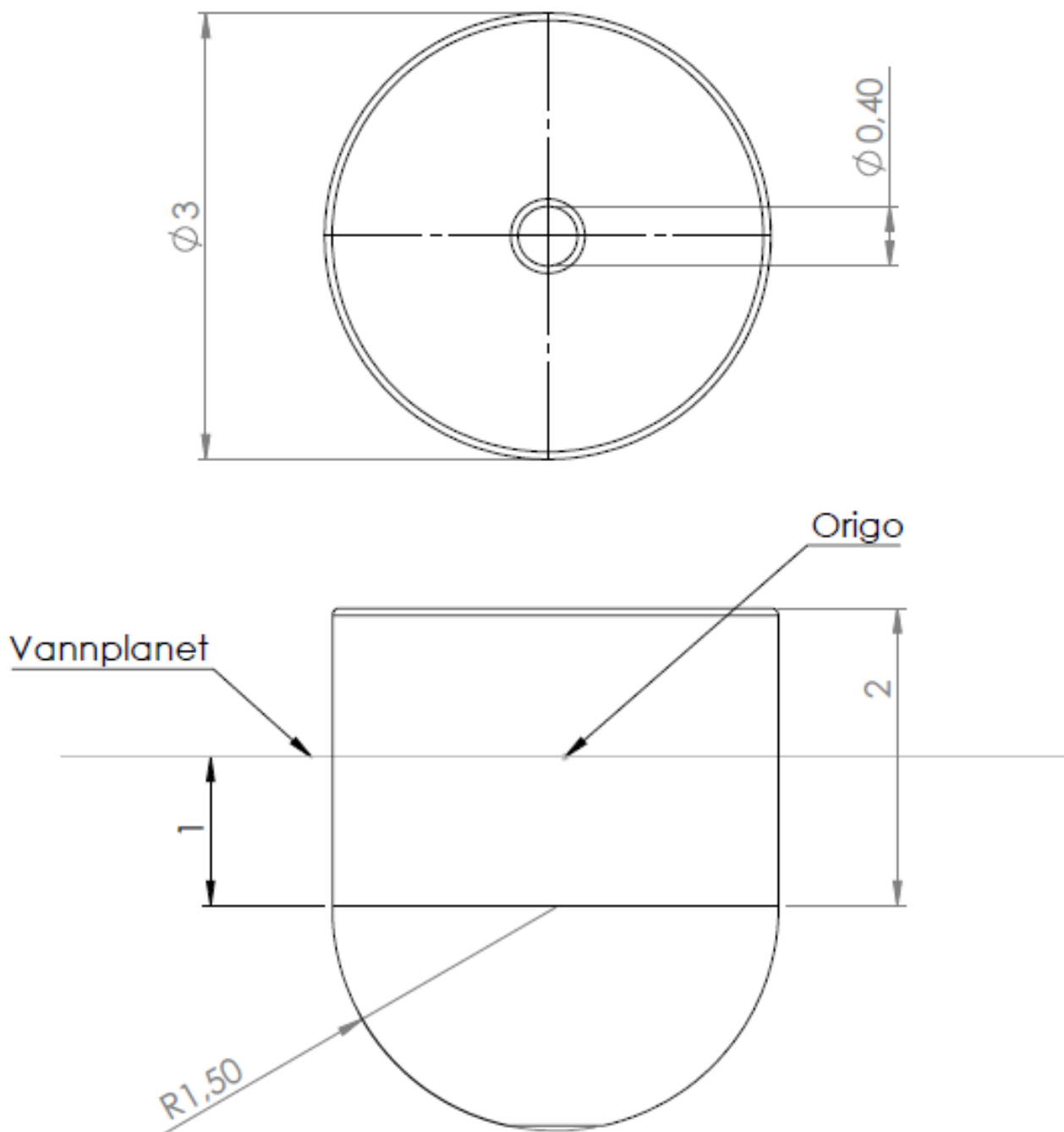


SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

Figur 2.6: Illustrasjon av konstruksjonen som er brukt i denne oppgaven, tegnet i SolidWorks.

2.7. BESKRIVELSE AV KONSTRUKSJONEN OG MATERIALBRUK

Konstruksjonen veier rundt 1735 kg og har en høyde på 3,5 m totalt, med en diameter på 3 m, se figur 2.7. Den skal trekkes ned slik at vannlinjen treffer midt på «sylinderdelen» av bøyen. En høyere bøye gjør også at bølgene ikke slår over. En kan ikke forvente at bøyene følger bølgebevegelsene til enhver tid. Dessuten vil ikke bunnen av konstruksjonen bli utsatt for like store krefter som for en kortere konstruksjon, på grunn av bølgekinematikken (se avsnitt 3.1.3 på side 18).



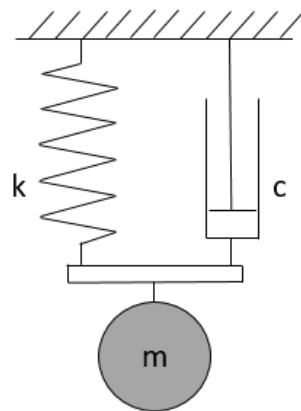
Figur 2.7: Målene til konstruksjonen tegnet i SolidWorks. Alle mål er i meter.

Kapittel 3

Teorigrunnlag

3.1 Bølgeteori

Dette kapittelet vil først ta for seg en kort introduksjon av den matematiske beskrivelsen av oscillasjon og interaksjonen mellom oscillasjon og bølger. Et enkelt mekanisk oscillator-system brukes til å forklare konseptet. Videre skal det opplyses om regulære og irregulære bølger, og til slutt skal det legges frem hvordan bølgeenergi beregnes.



Figur 3.1: Mekanisk oscillator bestående av et masse-fjær-demper system.

3.1.1 Mekanisk oscillasjon

La oss ta for oss et enkelt mekanisk oscillator i form av et masse-fjær-demper system. En kule med masse m er festet til en masseløs fjær med fjærstivhet k og en mekanisk demper med dempingsfaktor c , som vist i figur 3.1. På grunn av påvirkning av en ytre kraft F , vil kulen ha en forskyvning i vertikal retning z fra likevektsposisjonen.

Newtons lov gir

$$m\ddot{z} = F + F_k + F_c \quad (3.1)$$

der fjærkraften og dempningskraften henholdsvis er $F_k = -kz$ og $F_c = -c\dot{z}$ (Falnes, 2002). Dette gir følgende 2.ordens, lineær, inhomogen differensiallikning med konstante koeffisienter,

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F \quad (3.2)$$

hvor z , \dot{z} og \ddot{z} betegner henholdsvis forskyvning, hastighet og akselerasjon (Johnson, 2016).

3.1.2 Addert masse, demping og stivhet

For å forklare hva som skjer når bølger slår inn på flytende og neddykkede legemer, må vi studere en ligning som beskriver bevegelsene som er forårsaket av hydrodynamiske krefter. La oss anta at masse-fjær-demper systemet er i kontakt med væske. Fra likning 3.2 får vi:

$$(m + a) \cdot \ddot{z} + c \cdot \dot{z} + k \cdot z = F_e \quad (3.3)$$

hvor a er addert masse, c er demping, k er stivhet, m er masse og F_e er eksitasjonskraft.

3.1.3 Bølgekinematikk

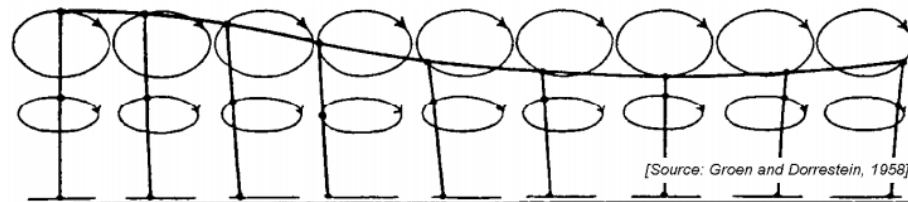
I denne seksjonen skal det forklares kort om hvordan vannpartikler beveger seg i grunt og dypt vann.

Grunt vann

Vannet anses for å være grunt hvis vanddybden, h , er mindre enn $1/20$ av bølgelengden, λ :

$$h/\lambda < 1/20 \text{ eller } \lambda/h > 20 \quad (3.4)$$

Bevegelsen av partiklene i en havbølge i grunt vann har en *elipseformet* bane slik som vist i figur 3.2. Bevegelsen er størst ved havoverflaten, og avtar så med dybden.



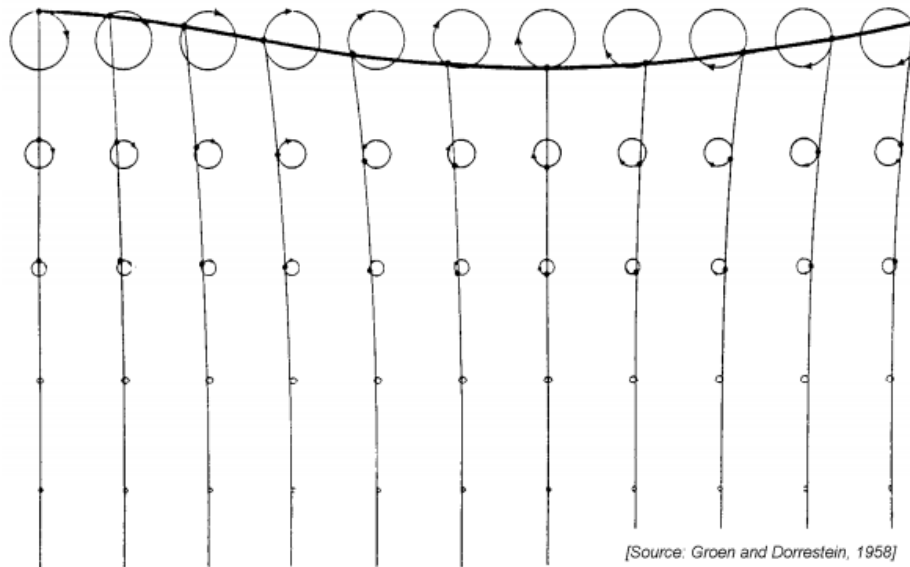
Figur 3.2: Bølgepartikkelbevegelser i grunt vann (Journée and Massie, 2001).

Dypt vann

Vannet anses for å være dypt hvis vanddybden, h , er større enn halvparten av bølgelengden, λ :

$$h/\lambda > 1/2 \text{ eller } \lambda/h < 2 \quad (3.5)$$

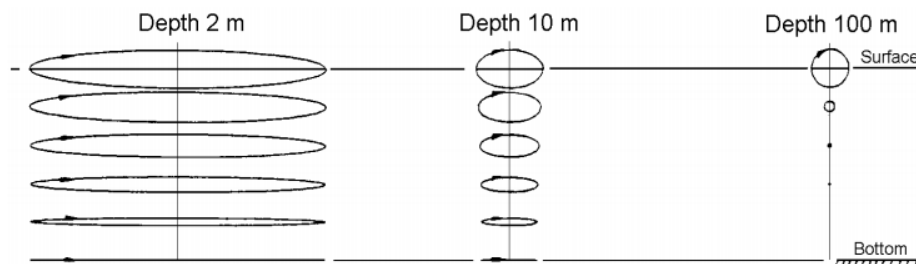
I dypt vann har vannpartiklene en *sirkelformet* bane som vist i figur 3.3 på neste side. Bevegelsen av partiklene avtar raskt med økende dybde under havoverflaten.



Figur 3.3: Bølgepartikkelbevegelser i dypt vann (Journée and Massie, 2001).

Eksempler

Noen eksempler på partikkelbevegelser med $\lambda = 100$ m i tre forskjellige vanddybder er presentert i figur 3.4, for å sammenligne forskjellene mellom grunt og dypt vann.

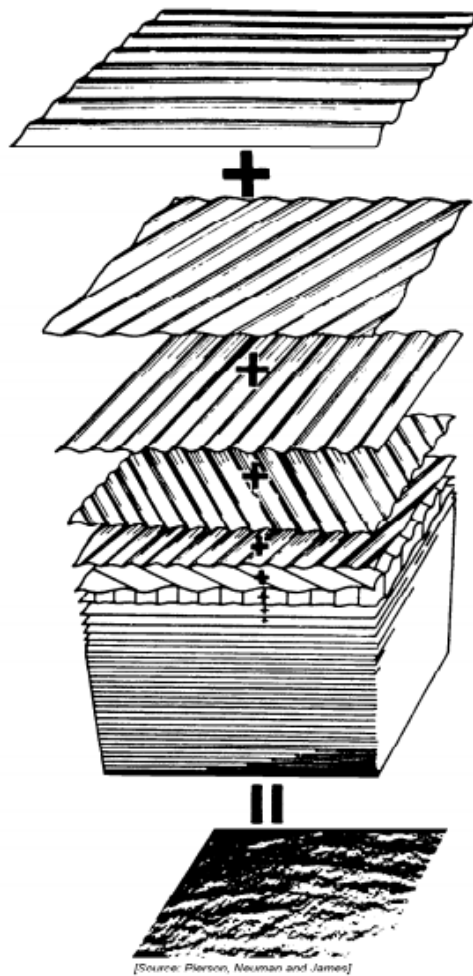


Figur 3.4: Bølgepartikkelbevegelser med $\lambda = 100$ m i tre forskjellige vanddybder. (Journée and Massie, 2001).

Vi ser at det er mest gunstig å plassere flytebøyene ved havoverflaten eller så nær havoverflaten som mulig, fordi det er her bevegelsen til vannpartiklene er størst. Og dermed vil flytebøyene kunne utnytte mest mulig av bølgeenergien på grunn av dette.

3.1.4 Irregulære bølger

Irregulære bølger gir et mer realistisk bilde av sjøforholdene og kan betraktes som en superposisjon av flere regulære bølger, med hver med sin egen bølgeamplitude, lengde, periode, frekvens og forplantningsretning. Et slikt konsept kan være svært nyttig i mange sammenhenger. Det gjør det mulig å forutsi oppførselen til virkelige bølger i form av mye enklere teori om regulære bølger. Dette såkalte superposisjonsprinsippet ble først introdusert i hydrodynamikk av St. Denis og Pierson i 1953 og er illustrert i figur 3.5 på neste side (Journée and Massie, 2001).



Figur 3.5: Superposisjon av flere regulære bølger (Journée and Massie, 2001).

3.1.5 Bølgeenergi

Basert på kalibrerte WAM data kan bølgeeffekten per meter bølgefront P regnes ut med følgende formel (SWECO, 2007),

$$P = \frac{\rho_{\text{sjøvann}} g^2}{64\pi} \cdot H_s^2 \cdot T_p \quad (3.6)$$

der

H_s er signifikant bølgehøyde i m

T_p er peak periode i s

$\rho_{\text{sjøvann}}$ er sjøvannets tetthet = $1025 \text{ kg}/\text{m}^3$

g er tyngdeakselerasjonen = $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$

For praktisk bruk kan bølgeeffekt i kW/m estimeres til,

$$P \approx 0,49 \cdot H_s^2 \cdot T_p \quad (3.7)$$

Energien en bølge har varierer stort. Både bølgehøyde og periode spiller en viktig rolle og påvirker dette. Større amplitude og lengre periode gir en større bølgeeffekt. Dette betyr kort sagt at større og lengre bølger har mer energi. Den totale energien, E , som blir levert inn til strømmettet fra en bølgekraftenhet kan beregnes ved hjelp av følgende formel,

$$E = P \cdot d \cdot Abs \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{trans} \cdot Av \cdot 8760 \text{ [kWh/y]} \quad (3.8)$$

der P = Bølgeeffekt [kW/m]

d = Bøyens diameter [m]

Abs = Gjennomsnittlig effekt absorpsjonsrate [%]

η_{gen} = Generatorens virkningsgrad

η_{trans} = Transformatorens virkningsgrad

Av = Kapasitetsfaktor

Tallet 8760 kommer av antall timer i året = 24 timer x 365 dager = 8760 timer.

3.2 Lineær potensialteori

Hydrodynamiske interaksjoner oppstår når et legeme er plassert i nærheten av havoverflaten. Denne situasjonen eksisterer i mange anvendelser av praktisk betydning, slik som bøyeenhetene til Ocean Energy. Slike marine strukturer krever teknisk analyse, og kan analyseres ved bruk av lineær potensialteori (Newman, 2001).

Lineær potensialteori er en måte å beskrive bevegelsen av viskøse væsker og gasser på. Denne teorien er godt etablert for faste konstruksjoner og for fartøyer med lav hastighet. Klassiske løsninger finnes for relativt enkle konstruksjoner som sylindere (Newman, 2001). For «heave»-bevegelse må kravet for en jevn kontaktflate med bølgene være oppfylt langs de vertikale veggene.

Denne metoden er brukt ved simuleringer i 3Dfloat. For mer detalj henvises det til publikasjoner til J. N. Newman og O. M. Faltinsen.

Kapittel 4

Metodebruk og løsningsverktøy

4.1 Massematrise fra SolidWorks

Det skal bli tegnet inn en enkel modell av flytebøyen i SolidWorks for å få ut en massematrise som vist under. Denne skal brukes videre ved simulering av bølgekraftverket.

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_6 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

der m er massen til konstruksjonen, og I_4 , I_5 og I_6 er treghetsmomenter (Faltinsen, 1990).

4.2 Beregninger av bølgeenergi

Formelen som er brukt for beregning av bølgeenergi

Energien som blir produsert av én bølgekraftenhet skal regnes ut for å vite i hvilke havforhold som gir best utfall og som er mest interessant å ta hensyn til. Likning 3.8 er blitt forenklet på grunn av begrenset informasjon om virkningsgraden til generatoren og transformatoren m.m. Det er blitt antatt at utnyttelsesgraden er 20 %. Altså at én bølgekraftenhet kan klare å omforme 20 % av havenergien og levere elektrisitet inn til strømmettet. Da vil formelen se slik ut:

$$E = P \cdot d \cdot \text{Utnyttelsesgrad} \cdot \text{Prob} \cdot 8760 \text{ [kWh/y]} \quad (4.2)$$

der P = Bølgeeffekt [kW/m]

d = Bøyens diameter [m]

Utnyttelsesgrad = 20 %

Prob = Gjennomsnittlig årlig prosent hyppighet av signifikant bølgehøyde og bølgeperiode [%]

Tallet 8760 kommer av antall timer i året = 24 timer x 365 dager = 8760 timer. Og «Prob» er bølgedata fra Runde, se tabell 4.1 på neste side.

Bølgestatistikk fra Runde

Bølgestatistikken fra Runde er bestilt fra Meteorologisk institutt av Ocean Energy AS. Statistikkene bygger på data fra årene 1958-2014, i en posisjon nordøst for Runde. Dataene er fra en relativt grov modell som ikke tar så godt hensyn til den kompliserte topografien i området, og dataene er derfor noe unøyaktige.

Tabell 4.1: Statistikk som viser fordeling i prosent av signifikant bølgehøyde og peak periode for hele året. Sterke farger indikerer høyere prosent. Se appendiks A for original utskrift.

AVERAGE ANNUAL PERCENT FREQUENCY OF SIGNIFICANT WAVE HEIGHT AND PEAK PERIOD.																		
Position: 62.43 N 5.69 E.																		
Hs[m]/Tp[s]	0-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	>19	TOTAL
0-0,5	0,05	0,16	0,21	0,28	0,35	0,38	0,31	0,26	0,15	0,11	0,06	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	2,43
0,5-1	0,17	0,71	1,90	3,10	3,32	3,20	2,72	2,14	1,59	1,17	0,77	0,40	0,26	0,16	0,07	0,05	0,05	21,79
1-1,5	0,02	0,42	1,20	2,55	4,21	4,62	3,59	2,66	2,23	1,88	1,26	0,72	0,44	0,25	0,09	0,06	0,05	26,25
1,5-2		0,05	0,41	1,06	1,71	3,20	3,47	2,70	1,83	1,47	1,11	0,72	0,47	0,25	0,12	0,07	0,04	18,68
2-2,5		0,00	0,03	0,33	0,66	1,46	2,22	2,33	1,77	1,20	0,87	0,56	0,38	0,23	0,10	0,05	0,02	12,22
2,5-3			0,00	0,04	0,20	0,55	1,09	1,54	1,52	1,08	0,64	0,43	0,26	0,16	0,07	0,05	0,01	7,63
3-3,5				0,00	0,04	0,19	0,47	0,78	0,96	0,83	0,52	0,30	0,20	0,11	0,06	0,04	0,01	4,51
3,5-4					0,00	0,05	0,18	0,38	0,53	0,57	0,41	0,24	0,15	0,08	0,03	0,02	0,01	2,65
4-4,5					0,00	0,01	0,06	0,19	0,30	0,34	0,28	0,16	0,09	0,05	0,03	0,02	0,00	1,51
4,5-5						0,00	0,02	0,08	0,17	0,19	0,18	0,11	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00	0,87
5-5,5						0,00	0,01	0,03	0,10	0,12	0,12	0,06	0,06	0,02	0,02	0,01	0,00	0,55
5,5-6							0,00	0,02	0,04	0,07	0,09	0,06	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,37
6-6,5								0,00	0,02	0,04	0,07	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,22
6,5-7								0,00	0,01	0,02	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,14
7-7,5									0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,08
7,5-8										0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03
8-8,5										0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
8,5-9										0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
9-9,5											0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
9,5-10											0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10-10,5											0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,5-11												0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11-11,5													0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11,5-12														0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
>12																		0,00
TOTAL	0,25	1,35	3,75	7,37	10,49	13,66	14,14	13,13	11,21	9,12	6,46	3,92	2,50	1,39	0,64	0,41	0,20	100,00

4.3 NEMOH

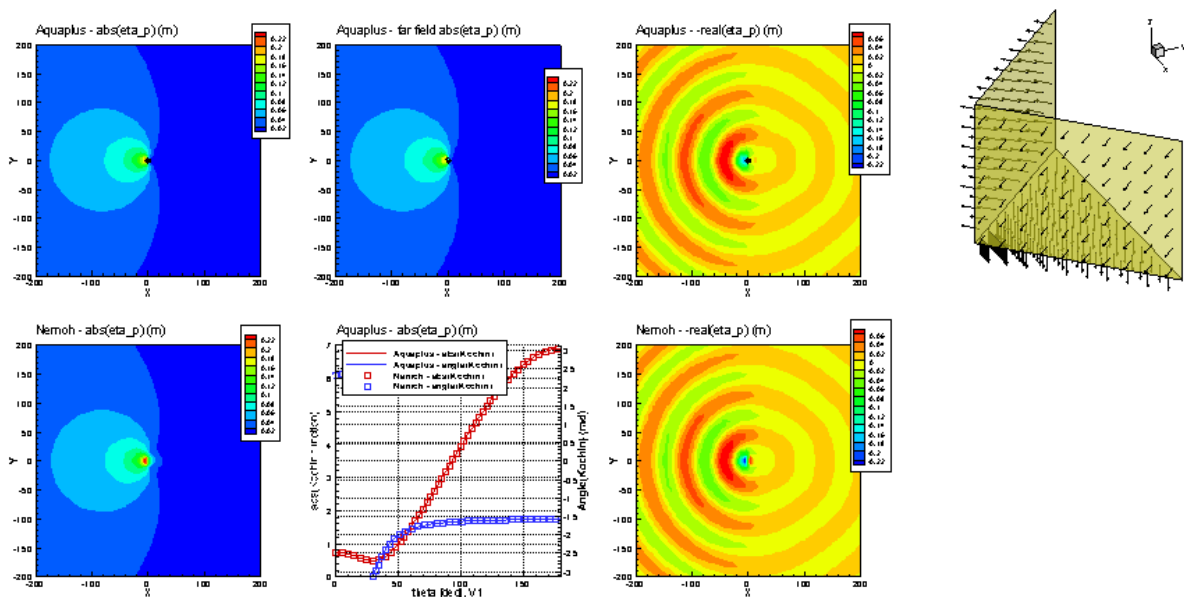
NEMOH brukes i denne oppgaven for å få ut nødvendige data til videre simuleringer. Dataene som trengs er bølgeeksitasjonskrefter, addert massematrise, dempingsmatrise, stivhetsmatrise og uendelig frekvens. I denne seksjonen skal det forklares hvordan NEMOH fungerer og hvordan programvaren brukes.

4.3.1 Beskrivelse av NEMOH

NEMOH er en BEM-kildekode som er laget for beregning på første ordens bølgelaster på off-shorekonstruksjoner (Babarit, 2016). Kildekoden har blitt utviklet av forskere ved École Centrale de Nantes, et fransk prestisjeuniversitet som uteksaminerer ingeniører i Nantes, vest i Frankrike (École Centrale de Nantes, 2016).

NEMOH er verdens første åpne kildekode som bruker BEM (Boundary Element Method). Den har blitt utgitt siden januar 2014 og brukes i mange forskningsprosjekter ved École Centrale de Nantes, og andre forskningsmiljøer over hele verden. Typisk bruk er ved simulering av flytende konstruksjoner og/eller ved vurdering av bølgeenergiomformere (WECs) (Babarit, 2016).

I motsetning til andre BEM-programvarer, klarer NEMOH å løse det lineære randverdi-problemet (BVP). Dette gjør det enkelt å håndtere fleksible konstruksjoner og ukonvensjonelle frihetsgrader. NEMOH kan både kjøres i Matlab og i kommandolinjer. Sistnevnte kan være nødvendig for spesielle beregninger (Babarit, 2016).

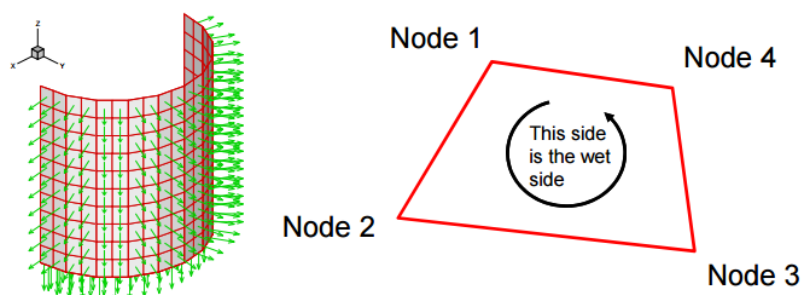


Figur 4.1: Eksempler på resultater fra NEMOH, her sammenlignet med Aquaplus som viser at programmet er validert (Babarit, 2016).

NEMOH består av tre programmer, «preProcessor», «solver» og «postProcessor», som skal kjøres en etter en. Formålet med «preProcessor» er å klargjøre «meshet» og for å generere grensebetingelser for hver beregning. For hver normalvektor skal «solve» blant annet løse det lineære randverdi-problemet (BVP), beregne kreftene som virker på konstruksjonen og beregne bølgehøyde. Målet med «postProcessor» er å etterbehandle resultatene for å kunne gi relevante

utfall (addert masse, demping, krefter, uendelig frekvens) på leselige format. Det gir også et rammeverk for å blant annet foreta relevante beregninger (Babarit, 2016).

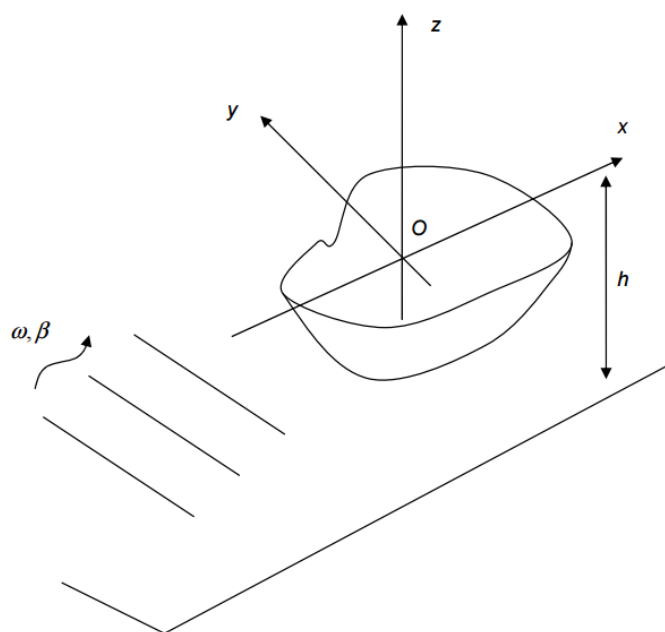
For å kunne kjøre disse programmene må en først og fremst angi et mesh for konstruksjonen. NEMOH trenger kun beskrivelsen av overflatene som ligger under vann, og vil automatisk kutte alt som ligger over vannoverflaten. z -aksen beskriver hvor dyp konstruksjonen er, der $z=0$ definerer vannoverflaten, $0 > z > h$ med h som vanddybden. Et annet krav er at normalvektorene må peke mot vannet som i figur 4.2. Om det er symmetri er det kun halve konstruksjonen som blir beskrevet. Alle enhetene i NEMOH er SI-enheter (Babarit, 2016). For mer informasjon henvises det til appendiks C.



Figur 4.2: Eksempel på mesh med normalvektorer (Babarit, 2016).

4.3.2 Koordinatsystemet i NEMOH

Referansesystemet er som vist i figur 4.3. O (0,0,0) er origo av referansesystemet. Det horisontale planet $z=0$ definerer den frie overflaten i ro. Null grader bølgeretning betyr at bølgen forplanter seg langs den positive x -aksen.



Figur 4.3: Koordinatsystem for NEMOH (LHEEA, 2016).

4.4 3Dfloat

Simuleringene i denne oppgaven skal kjøres i 3Dfloat. I denne seksjonen skal det først legges frem en liten beskrivelse av 3Dfloat, så vil det bli forklart hvordan simuleringsgeometrien er og hvilke krefter som skal settes på. Til slutt presenteres det en oversikt over testene som skal simuleres.

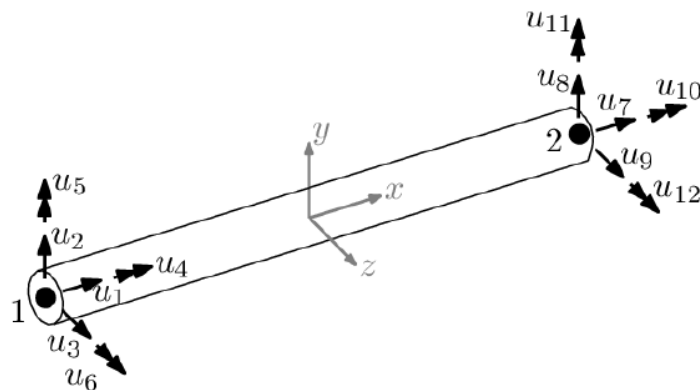
4.4.1 Beskrivelse av 3Dfloat

3Dfloat er et aero-hydro-servo-elastisk simuleringsverktøy, som er blitt utviklet av professor T. A. Nygaard ved IFE og NMBU. Programvaren er laget for simulering av konstruksjoner på både land og offshore (Nygaard, 2015).

Den strukturelle modellen i 3Dfloat er basert på et ikke-lineært FEM-rammeverk. Modellen benytter to-node Euler-Bernoulli-elementer med 12 frihetsgrader (6 frihetsgrader i hver ende), se figur 4.4. Kraftene overføres mellom disse endenodene. Kabelelementer med redusert bøyestivhet er brukt til forankringslinjer.

Laster fra gravitasjon, bølger, strømninger, oppdrift og vind er jevnt distribuert over hele konstruksjonen. Vind håndteres som en ikke-lineær drag på konstruksjonen som ligger over bølgeflaten. Oppdriften til en offshore konstruksjon vil bestemmes ut i fra trykkfeltet fra bølgekinematikken i lineær bølgeteori. Regulær bølgekinematikk er enten lineær bølgeteori eller med strømningsfunksjonsteori. Irregulære bølger oppnås som tidligere nevnt ved superposisjon av flere regulære bølger.

3Dfloat er fortsatt under utvikling, men har blitt validert opp mot andre lignende programvarer. For mer informasjon om 3Dfloat henvises det til appendiks E.

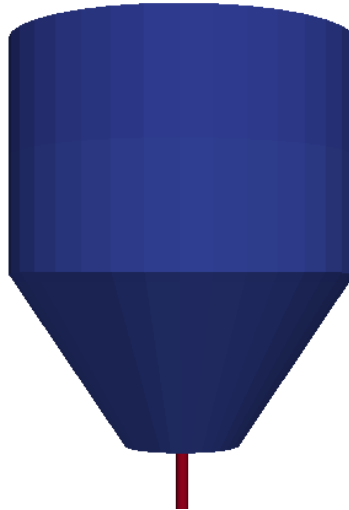


Figur 4.4: Definisjonen av et bjelkeelement, med 6 frihetsgrader i hver node. X-aksen er rettet langs vektoren fra node 1 til node 2, med origo ved midtpunktet mellom disse to nodene (Nygaard, 2015).

4.4.2 Simuleringsgeometri og påsatte krefter

Flytebøyen i figur 4.5 på neste side er laget og tatt fra ParaView, og er kun en visualisering og har ingen betydning. Det viktigste en skal vite med simuleringsgeometrien er at det er bygget opp av

to elementer, se figur 4.6 på neste side. Et element ved havoverflaten (origo) med en påsatt kraft, F , og ett element ved havbunnen 50 m rett ned med samme påsatt kraft bare motsatt rettet. Lineær generatoren i 3Dfloat er blitt forenklet med en enkel fjær, og skal simuleres med lineær demper.



Figur 4.5: En visualisering av simulering geometrien (bildet er laget og tatt fra ParaView).

Beregning av påsatt kraft

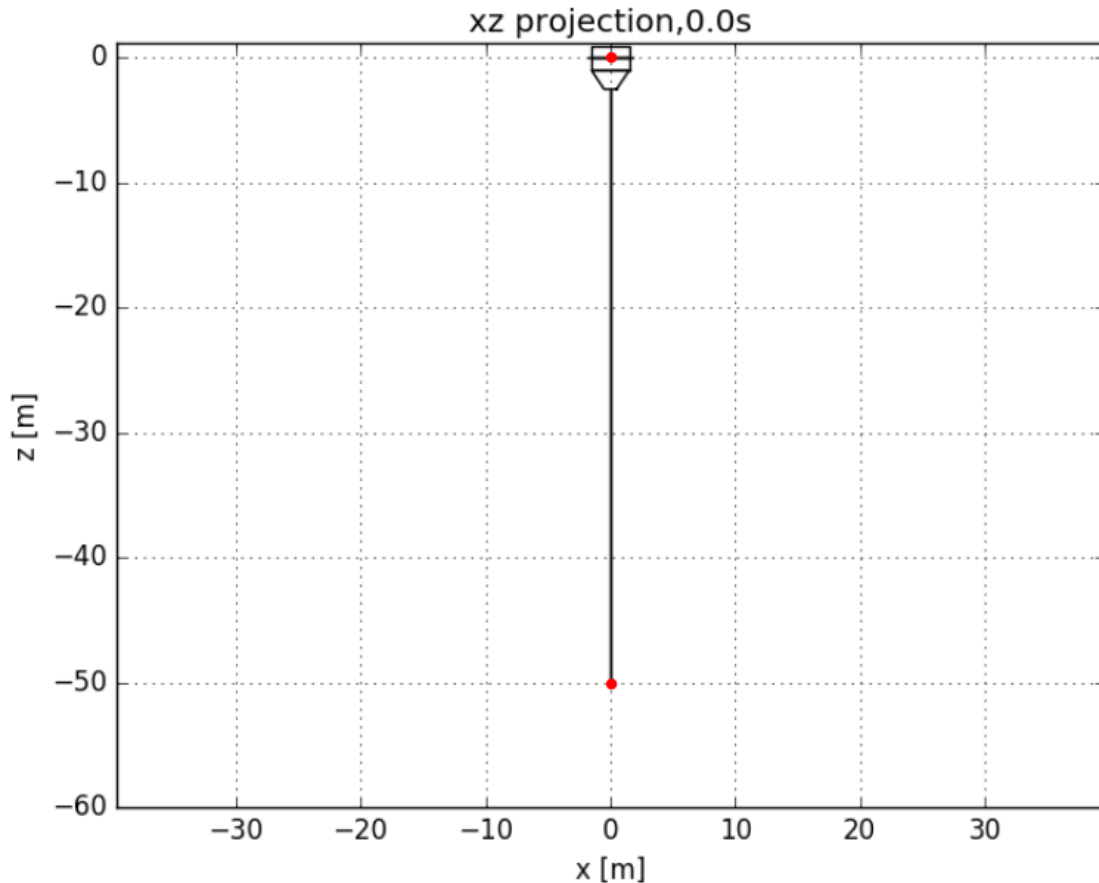
Fra Arkimedes lov har vi at: «Oppdriften av et legeme i vann er lik tyngden av det fortrengte vannet». Oppdriften til flytebøyen vil da være

$$\begin{aligned}
 F_{\text{oppdrift}} &= V \rho_{\text{sjøvann}} g \\
 &= (V_{\text{sylinder}} + V_{\text{halvsirkel}}) \rho_{\text{sjøvann}} g \\
 &= \left(\pi r^2 h_{\text{sylinder}} + \frac{2}{3} \pi r^3 \right) \rho_{\text{sjøvann}} g \\
 &= \left(\pi (1,5\text{m})^2 1\text{m} + \frac{2}{3} \pi (1,5\text{m})^3 \right) \cdot 1025\text{kg/m}^3 \cdot 9,81\text{N/kg} \\
 &= 14,14\text{m}^3 \cdot 1025\text{kg/m}^3 \cdot 9,81\text{N/kg} \\
 &= 142152,7\text{N}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Og siden $F_{\text{oppdrift}} = F_{\text{tyngde}}$ (Holm, 2011), har vi at de påsatte kreftene må være

$$\begin{aligned}
 F &= F_{\text{oppdrift}} - F_{\text{tyngde}} \\
 &= 142152,7\text{N} - mg \\
 &= 142152,7\text{N} - (1735,7\text{kg} \cdot 9,81\text{N/kg}) \\
 &= 125125,5\text{N} \\
 &\approx \boxed{125\text{ kN}}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

F er kraften som må til for å trekke ned bøyen slik at vannplanet skal ligge midt på sylinderdelen. I 3Dfloat skal denne kraften settes oppover ved $z=0$ og nedover ved $z=-50$.



Figur 4.6: Elementene i 3Dfloat er illustrert med røde prikker i denne figuren.

Tabell 4.2: Simuleringsspesifikasjoner inkludert koordinatene til elementene.

Egenskap	Verdi
Masse	1735,71 kg
Vanndybde	50 m
På satt kraft	125 kN
Element 1	(0,0,0)
Element 2	(0,0,-50)

4.4.3 Testoversikt

Ved simulering skal det studeres på peak periodene 5 s, 10 s, 15 s og 20 s. Dette fordi det er disse periodene som forekommer mest ved Runde. Testene som skal bli utført er oppsummert i tabellene 4.3 og 4.4, ved henholdsvis regulære og irregulære bølger. Alle testene skal reguleres med forskjellige dempingskoeffisient. Dempingskoeffisienten som gir høyest effekt skal velges. Det skal i tillegg studeres på om forskjellige bølgeamplituder og forskjellig vekt på ballasttank påvirker den optimale dempingskoeffisienten.

Regulære bølger

Tabell 4.3: Oversikt over tester med regulære bølger.

Bølgeperiode [s]	Bølgeamplitude [m]	Vekt til ballastank [tonn]
5	1	0
10	1	0
10	0,5	0
10	0,25	0
15	1	0
15	0,5	0
15	0,25	0
20	1	0

Irregulære bølger

Tabell 4.4: Oversikt over tester med irregulære bølger.

Bølgeperiode [s]	Signifikant bølgehøyde [m]	Vekt til ballastank [tonn]
5	1	0
10	1	0
10	1	6
10	1	12
15	1	0
15	1	6
15	1	12
20	1	0

4.5 Andre programvarer og verktøy

Andre programvarer og verktøy som er blitt brukt i denne oppgaven er listet under:

SolidWorks 2015, Dassaults Systems: 3D design av bøyen og for å få ut massematrise.

shareLaTeX: Brukt til rapportskrivning.

Snipping Tool: Illustrasjoner og utklipp.

Google/Google Scholar: Datasøk og litteratursøk.

Kapittel 5

Resultater

I dette kapitlet skal det legges frem resultater fra SolidWorks og NEMOH, resultater av energiberegninger, og til slutt simuleringsresultater fra 3Dfloat.

5.1 Massematrise fra SolidWorks

Massematrisen er tatt fra SolidWorks. Det ble tegnet inn en forenklet modell av flytebøyen, og massematrisen under er dermed kun en approksimasjon. Se appendiks B for original utskrift fra SolidWorks.

$$M = \begin{bmatrix} 1735,71 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1735,71 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1735,71 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2728,04 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3484,49 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3484,49 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

der

$$M = 1735,71kg$$

$$I_4 = 2728,04kg \cdot m^2$$

$$I_5 = 3484,49kg \cdot m^2$$

$$I_6 = 3484,49kg \cdot m^2$$

5.2 Beregninger av bølgeenergi

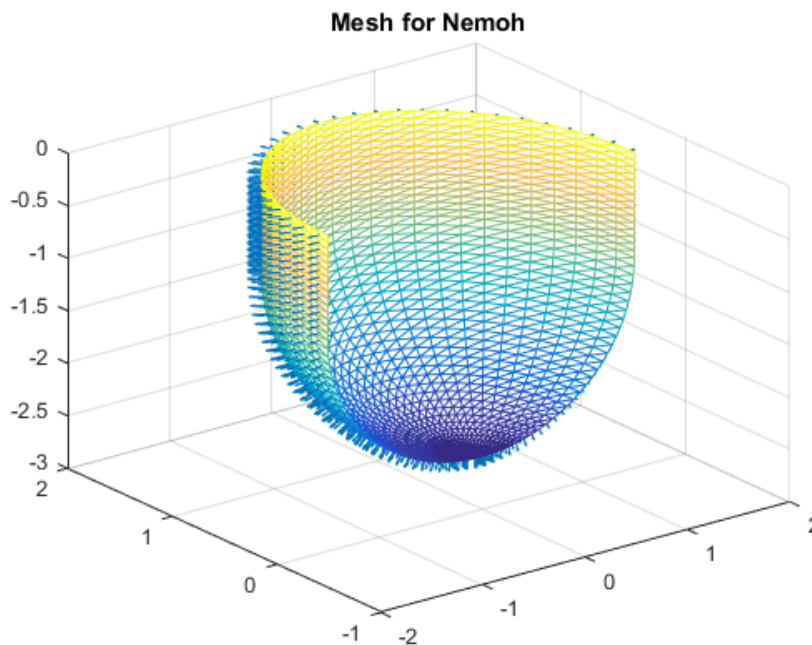
Tabell 5.1: Produsert energi fra én bølgeenhet beregnet med likning 4.2 og multiplisert med data fra tabell 4.1. Sterke farger indikerer høyere total energi inn til strømmettet.

E = P*d*0,2*Prob*24*365 [kWh/y]																			TOTAL		
Antar at en bøye på 3 m i diameter kan omforme 20 % av bølgeenergien																					
Multipliserer 3 m*0,2 = 0,6																					
Multipliserer med Prob og 0,01																					
Multipliserer med 24*365 = 8760																					
Hs[m]/Tps]	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	>19	TOTAL
0,25	0,04	0,12	0,21	0,29	1,18	1,90	2,99	4,31	5,31	4,84	4,48	2,83	2,26	1,33	0,95	0,51	0,27	0,29	0,30	0,32	35
0,75	1,26	3,77	6,28	8,80	47,23	154,48	297,87	368,08	402,08	381,98	332,16	270,30	216,19	153,66	85,74	59,57	39,03	18,11	13,67	14,41	2875
1,25	0,41	1,23	2,05	2,87	77,61	271,01	680,61	1296,55	1612,52	1400,44	1146,88	1053,05	964,97	698,47	428,69	280,05	169,38	64,67	45,58	40,04	10237
1,75	0,00	0,00	0,00	0,00	18,11	181,49	554,52	1032,19	2189,12	2653,11	2281,68	1693,75	1478,87	1206,03	840,24	586,32	331,99	169,01	104,22	62,78	15383
2,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,95	285,38	658,56	1651,06	2805,87	3254,88	2708,08	1995,64	1562,58	1080,31	783,62	504,90	232,82	123,06	51,89	17721
2,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	51,67	298,11	929,12	2057,98	3213,67	3474,02	2683,02	1717,14	1239,16	800,93	524,68	243,46	183,84	38,75	17456
3,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	83,27	448,30	1239,41	2273,40	3064,51	2879,92	1948,63	1207,48	860,51	503,81	291,46	205,41	54,13	15060
3,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	157,06	631,95	1474,55	2252,48	2633,13	2045,53	1286,08	859,23	487,82	194,02	136,74	72,06	12231
4,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	40,35	270,57	946,99	1637,65	2017,40	1794,30	1101,26	662,18	391,61	249,21	175,63	0,00	9287
4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	112,66	498,07	1159,20	1408,24	1440,85	945,74	551,44	293,51	207,53	109,69	0,00	6727
5,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	68,81	228,17	832,99	1086,51	1173,43	630,18	673,64	239,03	253,52	134,00	0,00	5320
5,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	182,47	399,69	760,27	1055,69	755,93	538,71	286,73	152,05	160,74	0,00	4292
6,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	236,11	513,28	970,10	595,41	477,35	169,38	179,65	189,91	0,00	3331
6,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	137,70	299,35	646,59	520,86	371,19	197,57	0,00	0,00	0,00	2173
7,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	172,67	372,96	400,59	214,11	227,92	0,00	0,00	0,00	1388
7,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	213,09	0,00	244,66	260,44	0,00	0,00	0,00	718
8,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	259,36	277,25	0,00	0,00	0,00	0,00	537
8,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	291,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	292
9,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
9,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
10,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
10,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
11,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
11,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
>12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
TOTAL	2	5	9	12	144	631	1873	3741	7435	11628	15837	18922	19112	17000	11670	8241	4628	2256	1583	334	125063
																					E = 125 MWh/y

5.3 Resultater fra NEMOH

5.3.1 Elementinndeling

Elementinndelingen er som vist i figur 5.1. Den er ganske raffinert, med sine 1276 paneler, dette for å få pålitelige resultater. Kun halve konstruksjonen er beskrevet.



Figur 5.1: Elementinndelingen i NEMOH.

5.3.2 Resultater

Filene som brukes ved simulering er oppsummert i tabell 5.2.

Tabell 5.2: Oversikt over filene fra NEMOH som brukes ved simulering med beskrivelse.

Filnavn	Beskrivelse
ExcitationForce.tec	Bølgeeksitasjonskrefter.
CM.dat	Addert massematrise, uendelig frekvens er tatt fra 0,1 s.
CA.dat	Frekvensavhengig lineær dempingsmatrise.
KH.dat	Hydrostatisk stivhetsmatrise.

5.4 Resultater for lineær demper

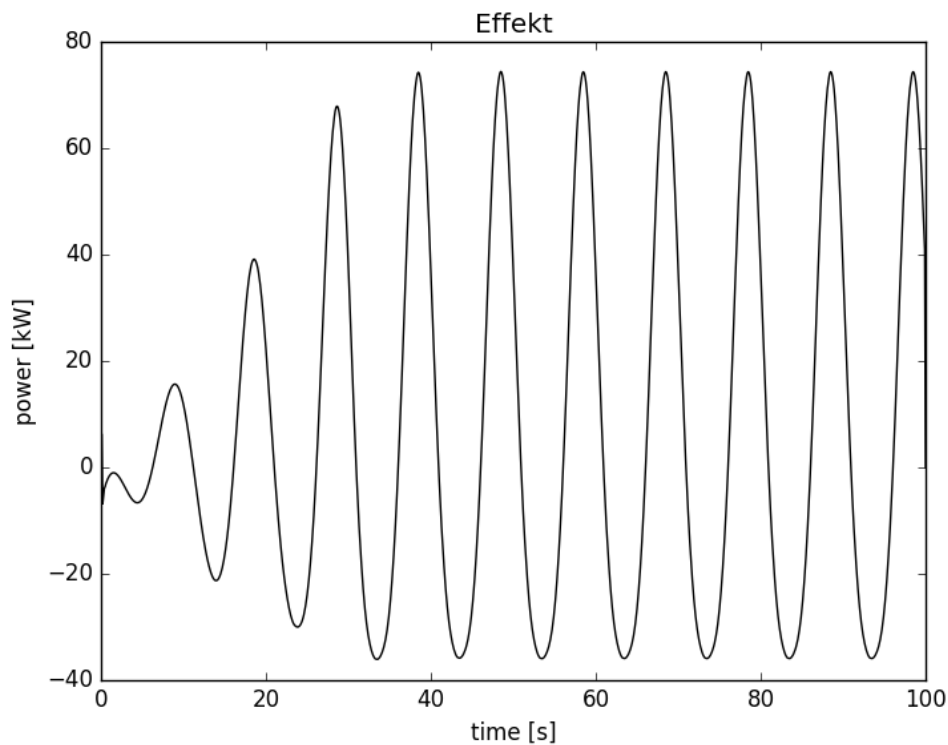
I denne seksjonen vil resultatene fra simuleringene presenteres. Først skal demperen justeres for å finne den optimale løsningen, så skal det studeres nærmere på flytbøyens forskyvninger og bevegelser m.m. Simuleringene kjøres først på regulære bølger, og deretter på irregulære bølger.

5.4.1 Simuleringer ved regulære bølger

Regulære bølger – Valg av dempingskoeffisient

Ved valg av lineær demper er det blitt kjørt simuleringer med forskjellige betingelser. Demperen justeres til systemet oppnår maks effekt. Betingelsen som gir høyest effekt skal velges.

Som følge av at effekten trenger tid til å stabilisere seg, har jeg kun sett på det som skjer etter 40 s, og regnet gjennomsnittseffekten ut fra dette. Figur 5.2 viser at det tar rundt 40 s før systemet er i stabilisert tilstand. Jeg setter bølgeamplitude = 1 m på alle simuleringene, med mindre det er oppgitt noe annet.



Figur 5.2: Her vises det at det tar rundt 40 s før systemet er i stabilisert tilstand.

5.4. RESULTATER FOR LINEÆR DEMPER

Tabell 5.3: Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 5 s.

Demping [kN/(m/s)]	Gjennomsnittlig effekt [kW]	
	Amplitude = 1 m	
40	9,52	
45	9,58	
50	9,53	
55	9,40	
60	9,22	
100	7,31	

Tabell 5.4: Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 10 s.

Demping [kN/(m/s)]	Gjennomsnittlig effekt [kW]		
	Amplitude = 1 m	Amplitude = 0,5 m	Amplitude = 0,25 m
90	8,71	2,2	0,54
100	8,81	2,21	0,55
105	8,82	2,21	0,55
110	8,81	2,21	0,55
120	8,74	2,2	0,54
150	8,30	2,1	0,52

Tabell 5.5: Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 15 s.

Demping [kN/(m/s)]	Gjennomsnittlig effekt [kW]		
	Amplitude = 1 m	Amplitude = 0,5 m	Amplitude = 0,25 m
140	6,52	1,61	0,40
150	6,57	1,63	0,41
155	6,58	1,63	0,41
160	6,59	1,64	0,41
165	6,58	1,64	0,41
200	6,45	1,61	0,40

Tabell 5.6: Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 20 s.

Demping [kN/(m/s)]	Gjennomsnittlig effekt [kW]
Amplitude = 1 m	
100	3,92
150	4,78
190	5,02
200	5,05
210	5,04
250	4,98

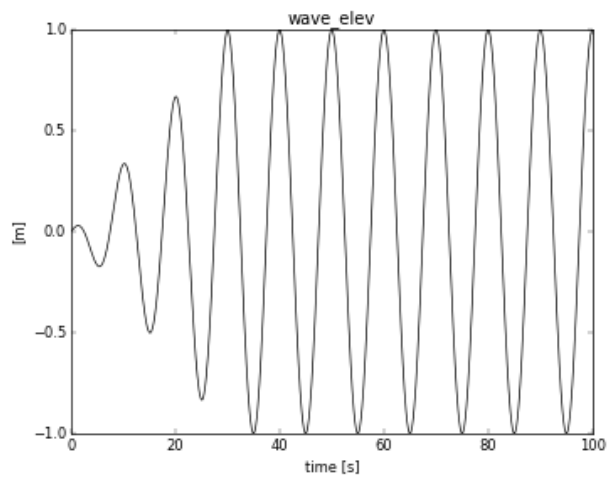
Regulære bølger – Sensor

Det skal videre studeres på en bestemt situasjon som fremkommer ganske ofte ved Runde med optimal dempingskoeffisient. Ved simulering er bølgeamplituden satt til 1 m, peak periode til 10 s og dempingskoeffisienten er skrudd til 105 kN/(m/s). En sensor registrerer:

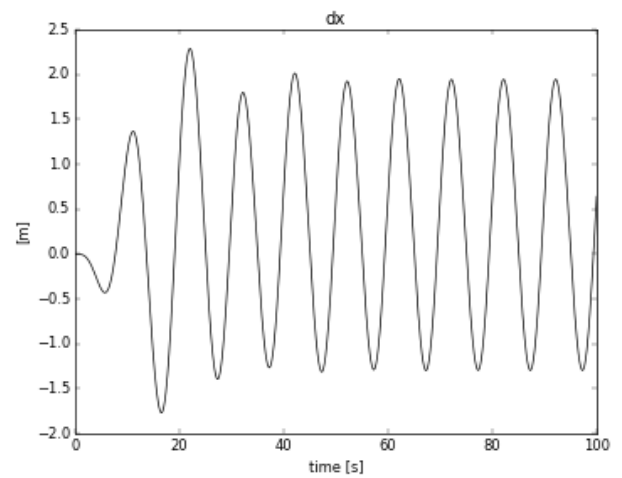
- Bølgebevegelsen langs z-aksen.
- Forskyvning av flytebøyen langs x-, y- og z-akse.
- Roll-, pitch- og yaw-bevegelse av flytebøyen.
- Kraften i linen.

Forskyvningene langs y-aksen og roll-bevegelsen av flytebøyen er tilnærmet null. Samt at simuleringen ble stilt slik at det ikke skulle være noen yaw-bevegelser. Disse resultatene vil derfor ikke bli presentert på neste side.

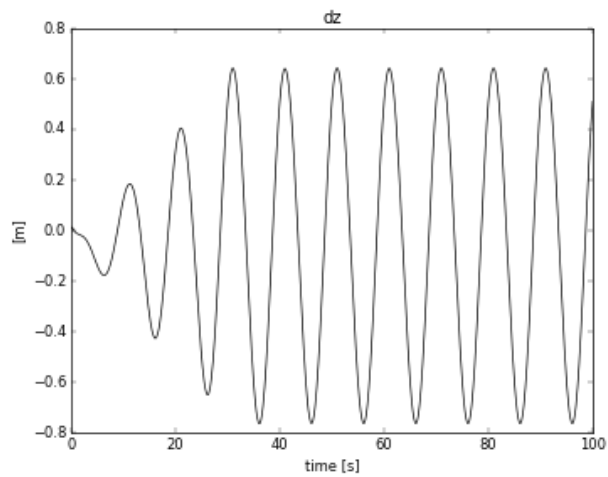
5.4. RESULTATER FOR LINEÆR DEMPER



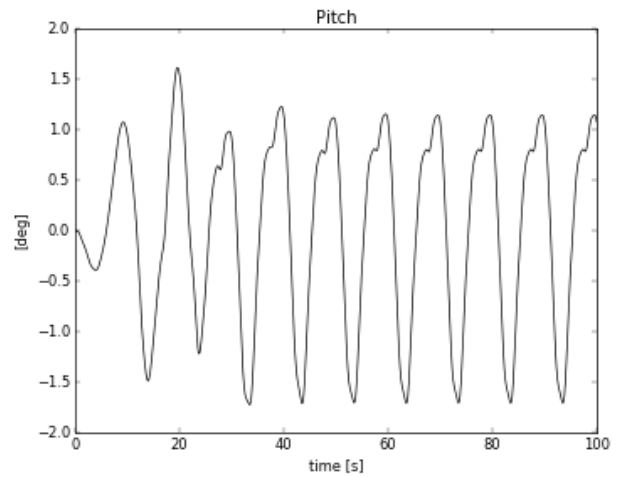
(a) Bølgebevægelsen langs z-aksen.



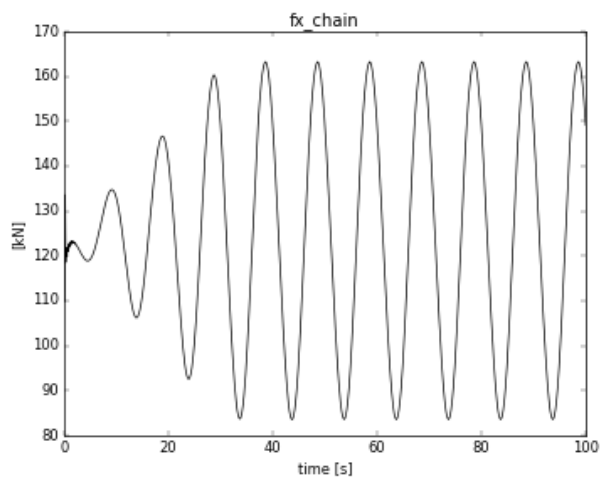
(b) Forskyvning af flytebøyn langs x-aksen.



(c) Forskyvning af flytebøyn langs z-aksen.



(d) Pitch-bevægelse af flytebøyn.



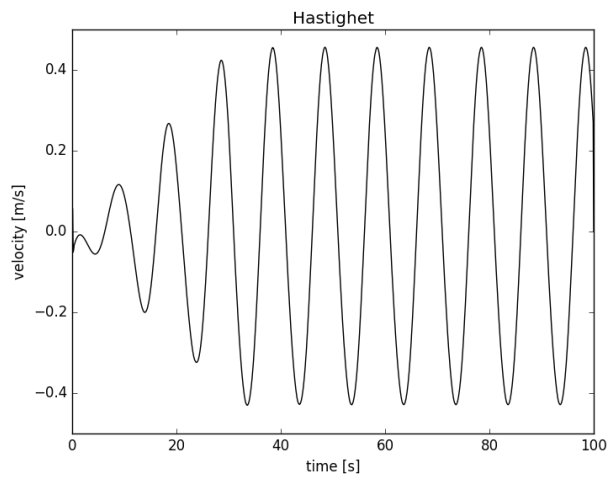
(e) Kraften i linen.

Figur 5.3: Data fra sensor ved regulære bølger.

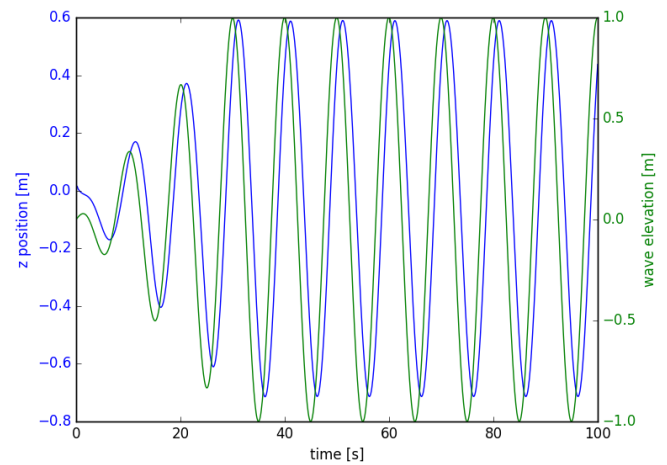
Regulære bølger - Plotting

Videre er dataene fra simuleringen blitt plottet slik at vi får:

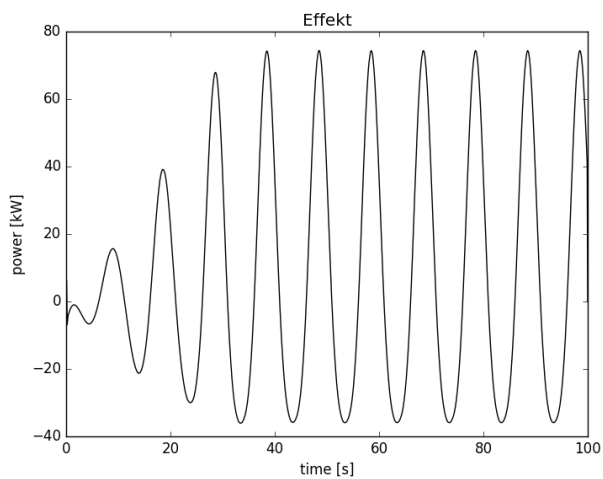
- Hastigheten til flytebøyen langs z-aksen.
- Flytebøyens forskyvning og bølgebevegelsen langs z-aksen i samme plott.
- Effekten (kraft multiplisert med hastighet).



(a) Hastigheten til flytebøyen langs z-aksen.



(b) Flytebøyens forskyvning og bølgebevegelsen langs z-aksen i samme plott.



(c) Effekten (kraft multiplisert med hastighet).

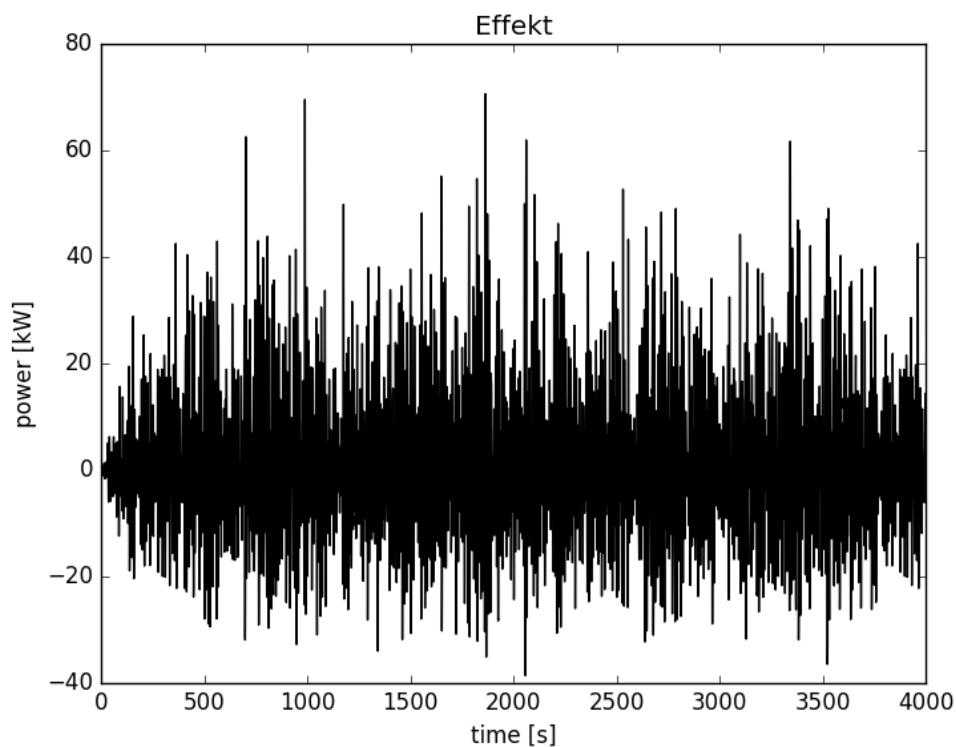
Figur 5.4: Resultater fra plotting ved regulære bølger.

5.4.2 Simuleringer ved irregulære bølger

Irregulære bølger – Valg av dempingskoeffisient

Her som ved regulære bølger, skal det studeres på peak periodene 5 s, 10 s, 15 s og 20 s. Demperen justeres til systemet oppnår maks effekt. Det som gir høyest effekt skal velges.

Som følge av at effekten trenger tid til å stabilisere seg, har jeg kun sett på det som skjer etter 400 s, og regnet gjennomsnittseffekten ut fra dette. Figur 5.5 viser at det tar rundt 400 s før systemet er i stabilisert tilstand. I tillegg skal jeg også se på om vekten av ballastanken påvirker effekten. Ballasttankene er tomme der det ikke er oppgitt noe annet.



Figur 5.5: Her vises det at det tar rundt 400 s før systemet er i stabilisert tilstand.

Tabell 5.7: Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 5 s.

Demping [kN/(m/s)]	Gjennomsnittlig effekt [kW]
30	0,87
40	0,89
50	0,87
60	0,85

Tabell 5.8: Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 10 s.

Demping [kN/(m/s)]	Gjennomsnittlig effekt [kW]		
	Tom ballasttank	Ballasttank 6 tonn	Ballasttank 12 tonn
70	1,08	1,14	1,21
80	1,10	1,15	1,22
90	1,09	1,14	1,19
100	1,08		

Tabell 5.9: Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 15 s.

Demping [kN/(m/s)]	Gjennomsnittlig effekt [kW]		
	Tom ballasttank	Ballasttank 6 tonn	Ballasttank 12 tonn
130	0,90	0,92	0,94
140	0,91	0,93	0,95
150	0,90	0,91	0,92
160	0,88		

Tabell 5.10: Gjennomsnittlig effekt ved ulike demping, peak periode = 20 s.

Demping [kN/(m/s)]	Gjennomsnittlig effekt [kW]
100	0,65
140	0,71
150	0,72
160	0,71

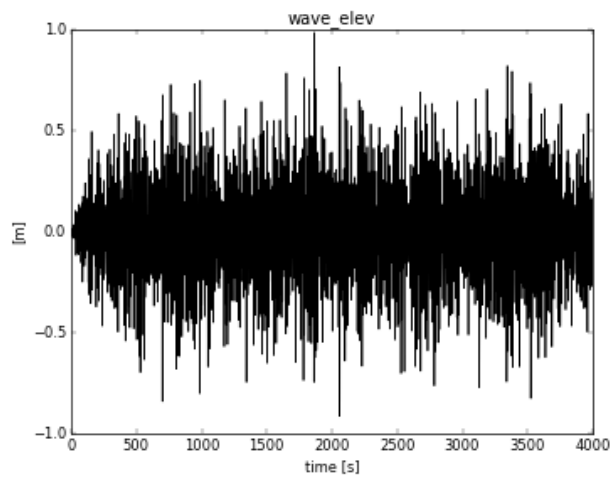
Irregulære bølger – Sensor

Det skal videre studeres på situasjonen som gir høyest effekt med dempingskoeffisienten som ble valgt over. Ved simulering er signifikant bølgehøyde satt til 1 m, peak periode til 10 s og dempingskoeffisienten er skrudd til 80 kN/(m/s). Da får jeg:

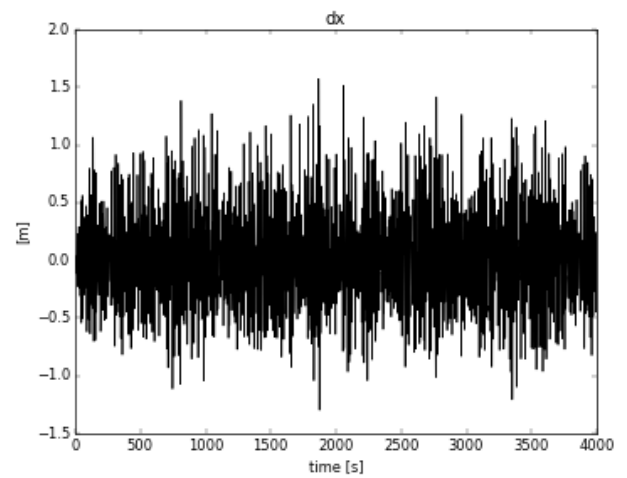
- Bølgebevegelsen langs z-aksen.
- Forskyvning av flytebøyen langs x-, y- og z-akse.
- Roll-, pitch- og yaw-bevegelse av flytebøyen.
- Kraften i linen.

Forskyvningene langs y-aksen og roll-bevegelsen av flytebøyen er tilnærmet null. Samt at simuleringen ble stilt slik at det ikke skulle være noen yaw-bevegelser. Disse resultatene vil derfor ikke bli presentert på neste side.

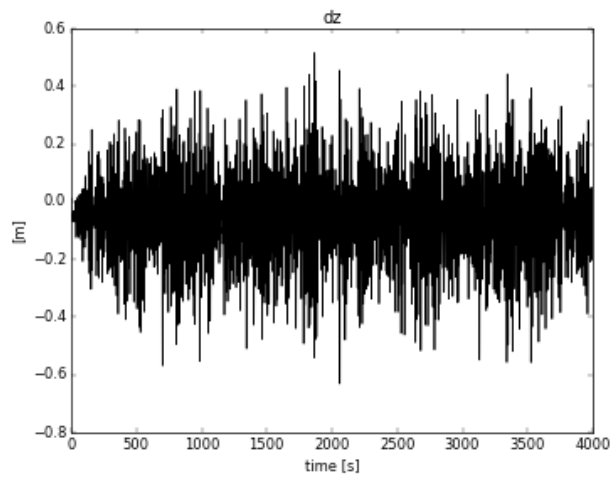
5.4. RESULTATER FOR LINEÆR DEMPER



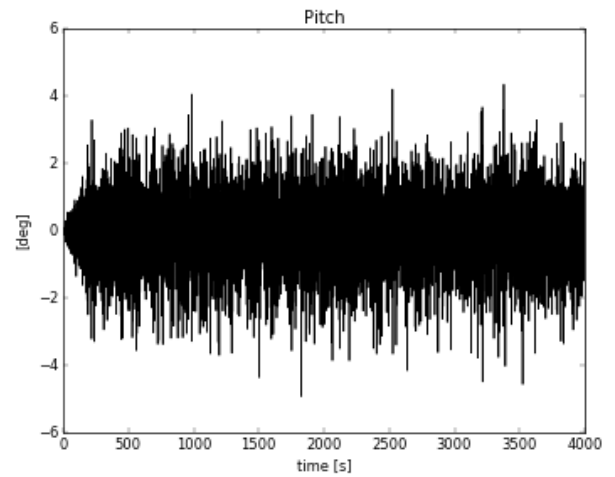
(a) Bølgebevægelsen langs z-aksen.



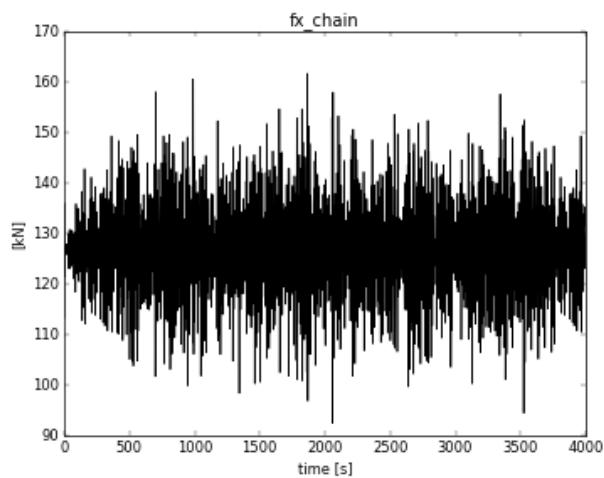
(b) Forskyvning af flytebøyen langs x-aksen.



(c) Forskyvning af flytebøyen langs z-aksen.



(d) Pitch-bevægelse af flytebøyen.



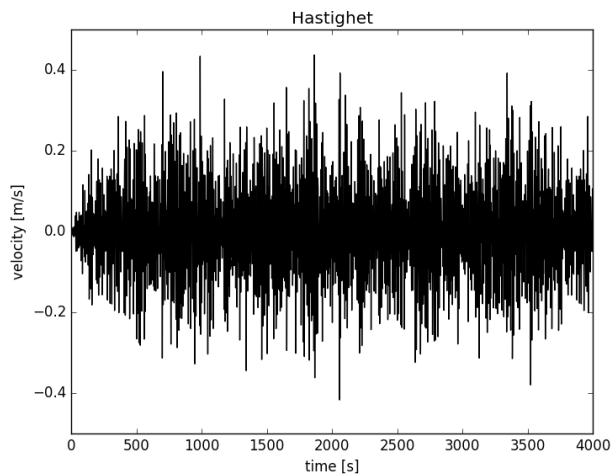
(e) Kraften i linen.

Figur 5.6: Data fra sensor ved irregulære bølger.

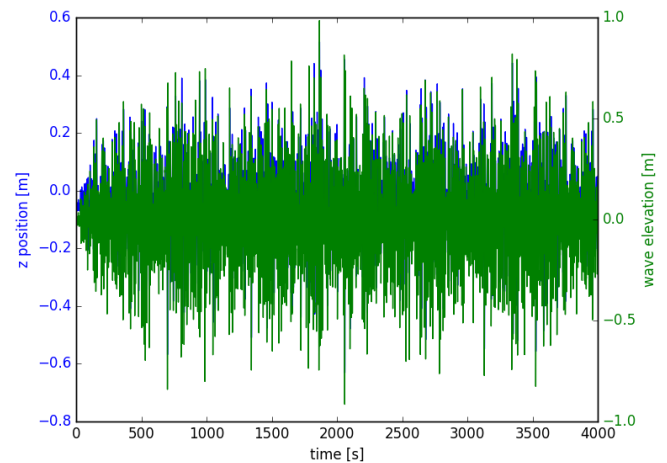
Irregulære bølger – Plotting

Videre er dataene fra simuleringen blitt plottet slik at vi får:

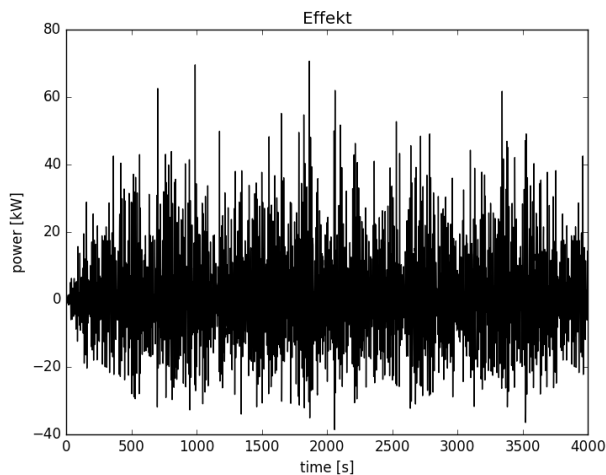
- Hastigheten til flytebøyen langs z-aksen.
- Flytebøyens forskyvning og bølgebevegelsen langs z-aksen i samme plott.
- Effekten (kraft multiplisert med hastighet).



(a) Hastigheten til flytebøyen langs z-aksen.



(b) Flytebøyens forskyvning og bølgebevegelsen langs z-aksen i samme plott.



(c) Effekten (kraft multiplisert med hastighet).

Figur 5.7: Resultater fra plotting ved irregulære bølger.

5.4.3 Sammenligning av resultater fra regulære og irregulære bølger

I tabell 5.11 settes de optimale dempingskoeffisientene ved regulære og irregulære bølger opp mot hverandre, og resultatene sammenlignes.

Tabell 5.11: Sammenligning av de optimale dempingskoeffisientene ved regulære og irregulære bølger.

Peak periode [s]	Optimal demping ved regulære bølger [kN/(m/s)]	Optimal demping ved irregulære bølger [kN/(m/s)]
5	45	40
10	105	80
15	160	140
20	200	150

Videre settes resultatene fra regulære bølger med bølgeamplitude = 0,5 m og resultatene fra irregulære bølger med signifikant bølgehøyde = 1 m opp mot hverandre. Her skal det sjekkes om det er stor forskjell mellom de største gjennomsnittlige effektene som er funnet, ved henholdsvis regulære og irregulære bølger. Se tabell 5.12.

Tabell 5.12: Sammenligning av gjennomsnittlig effekt ved regulære og irregulære bølger.

Peak periode [s]	Gjennomsnittlig effekt ved regulære bølger [kW] med bølgeamplitude = 0,5 m	Gjennomsnittlig effekt ved irregulære bølger [kW] med signifikant bølgehøyde = 1 m
10	2,21	1,10
15	1,64	0,91

Kapittel 6

Diskusjon

6.1 Massematrise fra SolidWorks

Massematrisen ser lovende ut med tanke på informasjonen som er gitt fra Ocean Energy. Den opprinnelige bøyen hadde et volum på ca. 10 m^3 og veide litt under 1 tonn med vinsj, samt en batteripakke og litt annet. Så med et volum på $14,14 \text{ m}^3$ (som regnet ut i 4.4.2), vil jeg si at en masse på 1735 kg er en fin approksimasjon. Dette er en mulig kritisk feilkilde, men jeg har ved flere simuleringer prøvd å kjøre med forskjellig masse og kraft. Og det har vist seg at dette ikke har en stor påvirkning for simuleringen.

6.2 Vurdering av energiberegningene

Det er visse antagelser, forenklinger og unøyaktigheter som må tas hensyn til ved vurdering av løsningene som blir presentert i denne oppgaven. Under har jeg listet opp punkter som kan være kritiske feilkilder:

- Det er blitt *antatt* at én bølgekraftenhet klarer å omforme 20 % av havenergien og levere det inn til strømmettet.
- Likningen for å regne ut dette er blitt forenklet.
- Bølgestatistikken fra Runde er beregnet i gridruter på ca. $10 \times 10 \text{ km}$. Dette gridet blir for grovt til å gi en god beskrivelse av variasjonen i bølgehøyde i dette området på grunn av den kompliserte topografien. Og de beregnede bølgehøydene vil for det meste være noe for høye.

Disse feilkildene vil derimot ikke utgjøre noen negative utslag for videre arbeid i oppgaven. Tallene fra disse energiberegningene har gitt meg et bilde av hvor mye energi som produseres av en bølgekraftenhet i løpet av et år, og ved hvilke bølgehøyde og bølgeperiode som gir best utfall.

Jeg ser at det er ved periodene mellom 8 og 13 s, og signifikant bølgehøydene mellom 1 og 5 m som er de mest interessante forholdene. Dette fordi det er ved disse havforholdene det produseres mest energi.

6.3 Vurdering av resultatene fra NEMOH

Etter konferering med professor T. A. Nygaard kom vi fram til at filene vi fikk fra NEMOH, gav realistiske data og kan brukes videre i simuleringer. Mulige kritiske feilkilder kan være at:

- Geometrien er uten hull i midten.
- Filen for uendelig frekvens, IRF.tec, var ikke leselig for 3Dfloat. Matrisen for uendelig frekvens var dermed tatt fra simuleringer med periode 1 s fra addert massematrise-filen (CM.dat).

6.4 Vurdering av resultater for lineær demper

6.4.1 Simuleringer ved regulære bølger

Regulære bølger – Valg av dempingskoeffisient

Ved valg av dempingskoeffisient kunne det ha blitt kjørt flere simuleringer ved flere peak perioder mellom 5-20 s for å få mere eksakte resultater. Jeg ser fra tabell 5.3 til tabell 5.6 at den optimale dempingskoeffisienten varierer fra periode til periode, og at den må justeres opp ved økende peak periode. Samt at den gjennomsnittlige effekten blir høyere jo kortere bølgene er. Dette kommer av at flytebøyen vil følge hyppigheten av peak periodene, og en kortere bølge vil gi en hyppigere bevegelse av flytebøyen.

Regulære bølger – Influens av bølgehøyde

Videre er det blitt studert på om ulike bølgehøyder har en virkning på dempningene som er valgt. Det ble utført simuleringer med lavere bølgeamplituder ved periodene 10 s og 15 s, se tabellene 5.4 og 5.5. Jeg ser at selv med forskjellige bølgehøyder, så vil ikke den optimale dempingskoeffisienten forandre seg. I tillegg vil effekten minke ved minkende bølgehøyde, noe som var forventet fordi effekten er lik produktet av kraft og hastighet.

Regulære bølger – Sensor

Registreringene fra sensor viser at bølgeamplituden er slik som den er stilt til å bli, altså 1 m i stabilisert tilstand, se figur 5.3 (a). Videre registrerer den at forskyvningen av flytebøyen kan bevege seg 1,5 m i negativ x-retning og opptil 2 m i positiv x-retning (samme retning som bølgene). Samt at flytebøyen kan ha en forskyvning langs z-aksen opp mot 60 cm over vannlinjen og ned i havet inntil 80 cm fra vannlinjen. Fra figur 5.3 (d) har vi pitch-bevegelsene av flytebøyen. Pitch-bevegelsene er så små at det ikke vil ha en betydelig påvirkning for systemet. Til slutt viser figur 5.3 (e) kraften i linen som varierer rundt 80-160 kN.

Tallene fra sensorens registrering viser realistiske tall, og sammen med professor T. A. Nygaard, ble det enig at simuleringen er pålitelig.

Regulære bølger – Plotting

Dataene fra simuleringen er blitt plottet slik som i figur 5.4. Plott (a) viser at hastigheten til flytebøyen varierer mellom 0 m/s og 0,4 m/s. Hastighet er forskyvning langs z-aksen dividert på tid. På grunn av at det elementet jeg ser på kan bevege seg i negativ z-retning, så vil dette forårsake negativ fortegn på hastighet i resultatene mine. Plott (b) viser at bevegelsen til flytebøyen ligger litt etter bevegelsen til bølgene. Plott (c) viser effekten som kommer av kraft multiplisert med hastighet. Som følge av at linen er forspent, vil effektkurven forskyves og derav negativ fortegn.

6.4.2 Simuleringer ved irregulære bølger

Irregulære bølger – Valg av dempingskoeffisient

Samme som ved regulære bølger kunne det ha blitt kjørt flere simuleringer ved flere peak perioder mellom 5-20 s for å få mere eksakte resultater. Her må det også tas hensyn til at optimal dempingskoeffisient varierer fra periode til periode. Det ble kjørt simuleringer med tomme ballasttanker ved peak periodene 5 s, 10 s, 15 s og 20 s. Jeg skal først diskutere resultatene fra dette.

Den optimale dempingskoeffisienten må ifølge resultatene justeres opp ved økende bølgeperiode. Og fra tabell 5.7 til tabell 5.10 ser jeg at det er ved peak periode mellom 10 s og 15 s som gir best utfall med tanke på effekt. Ved lavere eller høyere peak perioder enn dette reduserer effekten. Dette er i praksis veldig positivt fordi det er ved disse periodene bølgeenhetene produserer mest energi ved Runde, jf. tabell 5.1 på side 31.

Irregulære bølger – Influens av ballast

Videre har jeg sett på om vekten på ballasttankene inne i bøyen har påvirket resultatene. Jeg kjørte simulering med først en vekt på 6 tonn, og så på 12 tonn. Jeg ser fra tabellene 5.8 og 5.9 at selv med forskjellig vekt, så vil ikke den optimale dempingskoeffisienten forandre seg. Og i tillegg så øker den gjennomsnittlige effekten ved økende vekt.

Irregulære bølger – Sensor

Simuleringene kjøres slik at vi får registreringer for én time, for å få en mest mulig pålitelig bølgestatistikk. 3Dfloat bruker superposisjon av flere regulære bølger for å oppnå irregulære bølger, og bruker et system som setter dette sammen helt tilfeldig. Når jeg setter signifikant bølgehøyde = 1 m, ser jeg fra figur 5.6 (a) at bølgehøydene kan strekke seg til å nesten bli 2 meter høye. De bølgehøydene som forekommer mest er dog bølger med ca. 1 meters bølgehøyde. Jeg kan derfor sammenligne disse resultatene med simuleringene som ble kjørt med bølgeamplitude på 0,5 m ved regulære bølger. Dette skal jeg komme tilbake til senere.

Videre registrerer sensoren at forskyvningen av flytebøyen beveger seg ca. 1 m fra nullpunktet frem og tilbake langs med bølgene (langs x-aksen), og at den kan bevege seg opp mot 1,5 m i fra nullpunktet. Flytebøyen kan bevege seg i heave-bevegelse, opp mot 40 cm over vannlinjen og ned mot 60 cm fra vannlinjen. Fra figur 5.6 (d) har vi pitch-bevegelsene av flytebøyen. Pitch-bevegelsene er så små at det ikke vil ha en betydelig påvirkning for systemet. Til slutt viser figur 5.6 (e) kraften i linen som kan variere mellom 90 kN og 160 kN.

Tallene fra sensorens registrering viser realistiske tall, og sammen med professor T. A. Nygaard, ble det enig at simuleringssoppsettet ved irregulære bølger også er pålitelig.

Irregulære bølger – Plotting

Dataene fra simuleringen er blitt plottet slik som i figur 5.7. Plott (a) viser at hastigheten til flytebøyen varierer mellom 0 m/s og 0,4 m/s. Plott (b) viser at bevegelsen til flytebøyen ligger litt etter bevegelsen til bølgene. Plott (c) viser effekten som kommer av kraft multiplisert med

hastighet. Som følge av at linen er forspent, vil effektkurven forskyves og derav negativ fortegn, akkurat som ved regulære bølger.

6.4.3 Sammenligning av resultater fra regulære og irregulære bølger

Det er vanskelig å sammenligne resultatene fra regulære bølger opp mot irregulære bølger, fordi bølgebevegelsene er noe forskjellige fra hverandre. Likevel er de like nok til at det er interessant å se på hvor store forskjeller det er mellom resultatene. Fra tabell 5.11 ser jeg at den optimale dempingskoeffisienten følger samme «trend» for de ulike peak periodene, og at det ikke er så store forskjell mellom resultatene.

I tabell 5.12 viser det seg at den gjennomsnittlige effekten ved irregulære bølger er noe mindre enn ved regulære bølger. Det er dog ikke så store forskjeller, som igjen bekrefter at resultater fra regulære og irregulære bølger er sammenlignbare.

Kapittel 7

Konklusjon og videre arbeid

7.1 Konklusjon

Gjennom arbeidet i denne oppgaven er det kommet fram til en simuleringsmodell av bølgekraftverket. Bevegelser og krefter til konstruksjonen har blitt utredet gjennom simuleringer med både regulære og irregulære bølger. Hensikten var å undersøke gyldigheten av simuleringsoppsettet, samtidig bruke resultatene for å optimalisere systemet for typiske forhold. Simuleringsoppsettet viste seg å være ganske pålitelig med tanke på realistiske resultater, og at effekten stemte godt overens med energiberegningene og bølge teori.

Generator karakteristikkene er blitt optimalisert ved at demperen ble justert for å finne frem til de beste løsningene. Den optimale dempingskoeffisienten viser seg å variere fra periode til periode. Så her er det viktig å ha en nøyaktig elektronisk reguleringsmaskin som klarer å registrere havforholdene, og kan justere dempingen automatisk. Det ble også testet på influensen av både bølgehøyde og ballast, og det viste seg å ikke ha noen innvirkning på dempingskoeffisienten.

Det er også blitt foreslått et nytt design av flytebøyen som skal være en forbedring av originalen. Det nye designet er lengre i høyden og noe mindre i diameter. Dette ble gjort på grunnlag av potensialteori der det er mye enklere om vannet treffer en jevn kontaktflate, og dessuten vil en høyere konstruksjon bli utsatt for mindre krefter enn for en kortere konstruksjon, jf. bølgekinematikken. Problemstillingen for denne oppgaven regnes derfor som utført.

Resultatene fra irregulære bølger viser et mer realistisk bilde av hvilke krefter som virker. Så disse resultatene er mer pålitelige enn resultatene fra regulære bølger. Likevel ser jeg at det er mange likheter og jeg vil si at resultatene fra regulære bølger kan beskrive ganske mye om hva som skjer i virkelige havforhold.

7.2 Videre arbeid og anbefalinger

For videre arbeid vil følgende punkter være aktuelle:

- Det anbefales å teste ut en prototype for å få en bedre helhetsforståelse av bølgekraftverket.
- Utføre en grundigere undersøkelse på optimal utforming/design av flytebøyen, og sammenligne flere typer design opp mot hverandre.
- Regne på nødvendige utmattingsberegninger og andre påkjenningsberegninger for bølgekraftverket, og foreslå en vedlikeholdsplan og regne ut mulig levetid.
- Kjøre simuleringer med høyere bølgehøyder og ved flere bølgeperioder.
- Skaffe informasjon om generatorenes og transformatorenes virkningsgrad osv. for å få mere eksakte resultater for energiberegningene.

Referanser

- Aquamarine Power. Technology: How oyster wave power works, 2015. URL <http://www.aquamarinepower.com/technology/how-oyster-wave-power-works.aspx>. Sjekket 19.01.2016.
- AWS Ocean Energy. Aws-iii multi-cell wave power generator, 2014. URL <http://awsocean.com/technology/aws-iii-multi-cell-wave-power-generator/>. Sjekket 18.01.2016.
- A. Babarit. Nemoh, 2016. URL <http://lheea.ec-nantes.fr/doku.php/emo/nemoh/start>. LHEEA. Sjekket 01.04.2016.
- CalWave. How it works, 2014. URL <http://calwave.org/technology/>. Sjekket 20.01.2016.
- Carnegie Wave Energy. What is ceto, 2015. URL <http://carnegiwave.com/what-is-ceto/>. Sjekket 21.01.2016.
- EMEC. Wave devices, 2008. URL <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>. Sjekket 16.03.2016.
- J. Falnes. Ocean waves and oscillating systems. 2002.
- O. M. Faltinsen. Sea loads on ships and offshore structures. 1990.
- FN-sambandet. Dette er paris-avtalen, 2016. URL <http://www.fn.no/Tema/Klima/Klimaforhandlinger/Dette-er-Paris-avtalen>. Sjekket 08.03.2016.
- FNs-klimapanel. Klimaendringer til nå, 2016. URL <http://www.globalis.no/Tema/FNs-klimarapport/1-Klimaendringer-til-naa>. Sjekket 07.03.2016.
- K. Hofstad. Kjernekraftverk i tyskland, 2015. URL https://snl.no/Kjernekraft_i_Tyskland. Store norske leksikon. Sjekket 09.03.2016.
- H. Holm. Oppdrift og stabilitet, 2011. Havromsteknologier. NTNU, Institutt for marin teknikk.
- IEA. Electricity information 2015. 2015.
- IPCC. Climate change 2014 mitigation of climate change, 2014.
- R. W. Johnson. Handbook of fluid dynamics. 2016. Second Edition.
- J. M. J. Journée and W. W. Massie. Offshore hydromechanics. 2001. Second Edition.
- J. P. Kofoed. Bølgeenergi - hvad er potentialet i danske farvande og anlægseffektiviteten?, 2009. URL https://ida.dk/sites/prod.ida.dk/files/Jens%20Peter%20Kofoed_AAU_IDA%20Future%20Climate_Boelgeenergi_08012009.pdf. Aalborg Universitet. Sjekket 28.02.2016.
- LHEEA. General notations and conventions, 2016. URL http://lheea.ec-nantes.fr/lib/exe/fetch.php/emo/nemoh/general_notations_and_conventions.pdf. Sjekket 01.04.2016.
- Ø. Lie. Her bygges det som kan bli verdens største bølgekraftpark, 2014. URL <http://www.tu.no/artikler/her-bygges-det-som-kan-bli-verdens-storste-bolgekraftpark/231141>. Teknisk Ukeblad. Sjekket 06.04.2016.

- Miljødirektoratet. Klima i endring. 2014.
- J. N. Newman. Wave effects on multiple bodies. 2001.
- NHO. Positive klimagrep - større potensial, 2015. URL <https://www.nho.no/Politikk-og-analyse/Statsbudsjettet-2016/positive-klimagrep---storre-potensial/>. Sjekket 09.03.2016.
- J. Nilsen. Svensk gjennombrudd: For første gang leveres bølgekraft til strømmettet, 2016. URL http://www.tu.no/artikler/svensk-gjennombrudd-for-forste-gang-leveres-bolgekraft-til-stromnett/276353#cxrecs_s. Teknisk Ukeblad. Sjekket 06.04.2016.
- Norges forskningsråd. Nye fornybare energikilder. 2011. Norges forskningsråd i samarbeid med Norges vassdrags- og energidirektoratet (NVE). Produsert av Kan Energi.
- NVE. Havenergi, 2015a. URL <https://www.nve.no/energiforsyning-og-konsesjon/annen-fornybar-energi/havenergi/>. Sjekket 15.03.2016.
- NVE. Vannkraftpotensialet, 2015b. URL <https://www.nve.no/energiforsyning-og-konsesjon/vannkraft/vannkraftpotensialet/>. Sjekket 09.03.2016.
- T. A. Nygaard. 3dfloat user manual. 2015.
- Ocean Energy AS. Forretningsplan for prosjektet. 2015.
- Ocean Energy AS. Banebrytende norsk gjennombrudd innen bølgekraft! - du inviteres med på det som kan bli et nytt, grønt industrieventyr!, 2016. URL <http://www.ocean-energy.no/>. Sjekket 27.03.2016.
- Ocean Power Technologies. Ocean power technologies powerbuoy, 2014. URL <http://www.oceanpowertechnologies.com/technology/>. Sjekket 18.01.2016.
- Oceanlinx. Technology how it works, 2015. URL <http://www.oceanlinx.com/technology/how-it-works>. Sjekket 21.01.2016.
- K. A. Rosvold. Kjernekraftverk, 2016. URL <https://snl.no/kjernekraftverk>. Store norske leksikon. Sjekket 09.03.2016.
- Seabased AB. Seabased wave energy, 2015. URL <http://www.seabased.com/en/technology/seabased-wave-energy>. Sjekket 15.01.2016.
- Seed. Wave and tidal energy. URL <http://learning.media.mit.edu/seed/wave%20energy.html>. Sjekket 21.01.2016.
- M. S. Strande. Tester ut den neste kraftbølgen, 2009. URL <http://www.tu.no/artikler/tester-ut-den-neste-kraftbolgen/256326>. Teknisk Ukeblad. Sjekket 06.04.2016.
- SWECO. Potensialstudie av havenergi i norge. 2007. SWECO i samarbeid med ECON og Kjeller Vindteknikk på oppdrag fra ENOVA SF.
- H. B. Vagle. Slik havner skitten strøm i norge, 2015. URL <http://www.aftenposten.no/okonomi/Slik-havner-skitten-strom-i-Norge-8067086.html>. Aftenposten. Sjekket 10.03.2016.

REFERANSER

Wavestar. Wavestar concept, how it works, 2015. URL <http://wavestarenergy.com/concept>. Sjekket 18.01.2016.

École Centrale de Nantes. École centrale de nantes, 2016. URL <http://www.ec-nantes.fr/version-anglaise/>. Sjekket 01.04.2016.

Tillegg A

Original utskrift av bølgedata, Runde

AVERAGE ANNUAL PERCENT FREQUENCY OF SIGNIFICANT WAVE HEIGHT AND PEAK PERIOD.

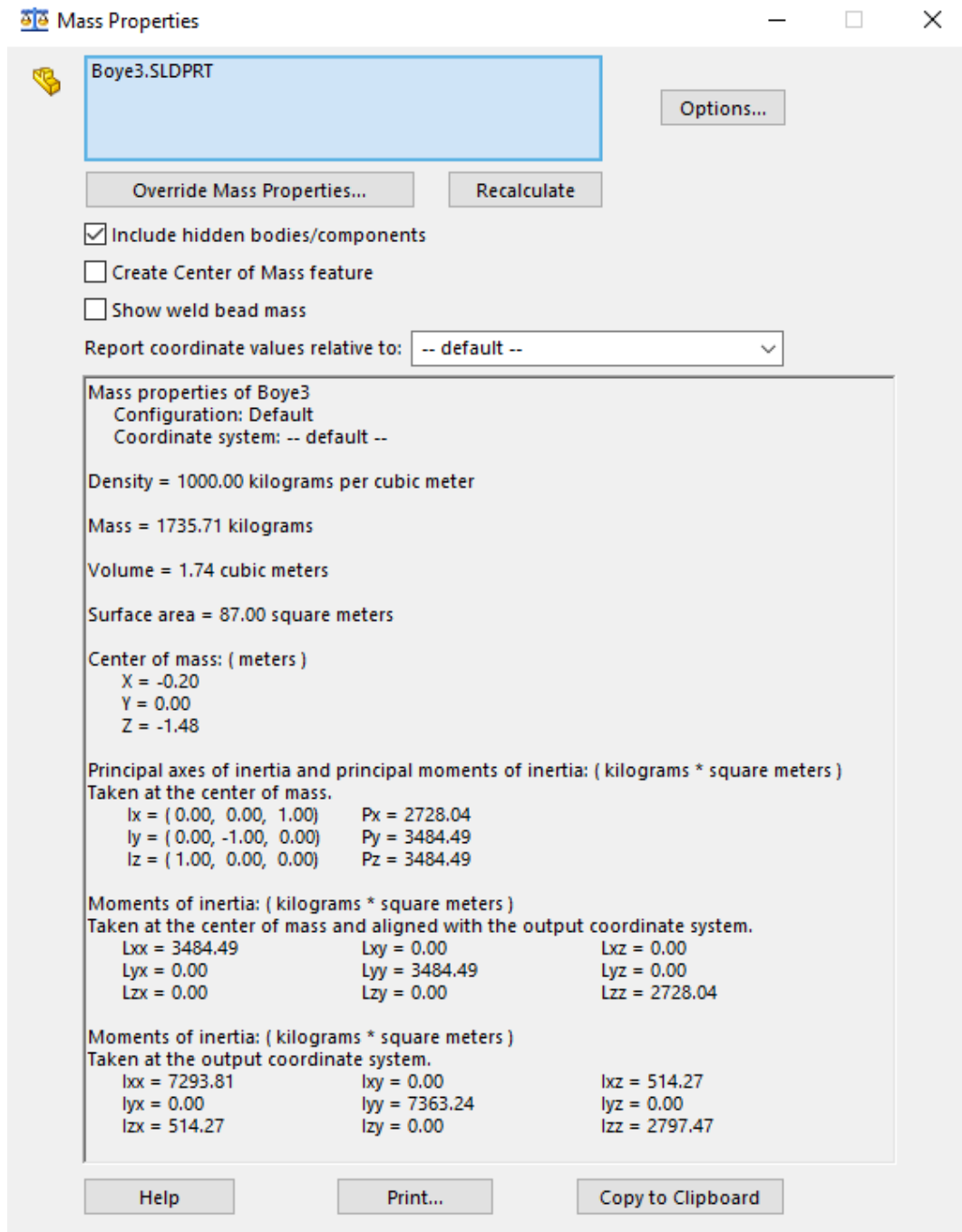
Position: 62.43 N 5.69 E.

Hs (m) / Tp (s)	0-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
0-0.5	0.05	0.16	0.21	0.28	0.35	0.38	0.31	0.26	0.15
0.5-1	0.17	0.71	1.90	3.10	3.32	3.20	2.72	2.14	1.59
1-1.5	0.02	0.42	1.20	2.55	4.21	4.62	3.59	2.66	2.23
1.5-2	-	0.05	0.41	1.06	1.71	3.20	3.47	2.70	1.83
2-2.5	-	0.00	0.03	0.33	0.66	1.46	2.22	2.33	1.77
2.5-3	-	-	0.00	0.04	0.20	0.55	1.09	1.54	1.52
3-3.5	-	-	-	0.00	0.04	0.19	0.47	0.78	0.96
3.5-4	-	-	-	-	0.00	0.05	0.18	0.38	0.53
4-4.5	-	-	-	-	0.00	0.01	0.06	0.19	0.30
4.5-5	-	-	-	-	-	0.00	0.02	0.08	0.17
5-5.5	-	-	-	-	-	0.00	0.01	0.03	0.10
5.5-6	-	-	-	-	-	-	0.00	0.02	0.04
6-6.5	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.02
6.5-7	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.01
7-7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00
7.5-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8-8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8.5-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9-9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9.5-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10-10.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10.5-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11-11.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11.5-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
>12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	0.25	1.35	3.75	7.37	10.49	13.66	14.14	13.13	11.21

Hs (m) / Tp (s)	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	>19	TOTAL
0-0.5	0.11	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	2.43
0.5-1	1.17	0.77	0.40	0.26	0.16	0.07	0.05	0.05	21.79
1-1.5	1.88	1.26	0.72	0.44	0.25	0.09	0.06	0.05	26.25
1.5-2	1.47	1.11	0.72	0.47	0.25	0.12	0.07	0.04	18.68
2-2.5	1.20	0.87	0.56	0.38	0.23	0.10	0.05	0.02	12.22
2.5-3	1.08	0.64	0.43	0.26	0.16	0.07	0.05	0.01	7.63
3-3.5	0.83	0.52	0.30	0.20	0.11	0.06	0.04	0.01	4.51
3.5-4	0.57	0.41	0.24	0.15	0.08	0.03	0.02	0.01	2.65
4-4.5	0.34	0.28	0.16	0.09	0.05	0.03	0.02	0.00	1.51
4.5-5	0.19	0.18	0.11	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	0.87
5-5.5	0.12	0.12	0.06	0.06	0.02	0.02	0.01	0.00	0.55
5.5-6	0.07	0.09	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.37
6-6.5	0.04	0.07	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01	-	0.22
6.5-7	0.02	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.14
7-7.5	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	-	0.08
7.5-8	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	-	0.03
8-8.5	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	-	0.03
8.5-9	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.02
9-9.5	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-	0.01
9.5-10	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
10-10.5	-	-	0.00	0.00	-	0.00	-	-	0.00
10.5-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11-11.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11.5-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
>12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	9.12	6.46	3.92	2.50	1.39	0.64	0.41	0.20	100.00

Tillegg B

Massematrise fra SolidWorks

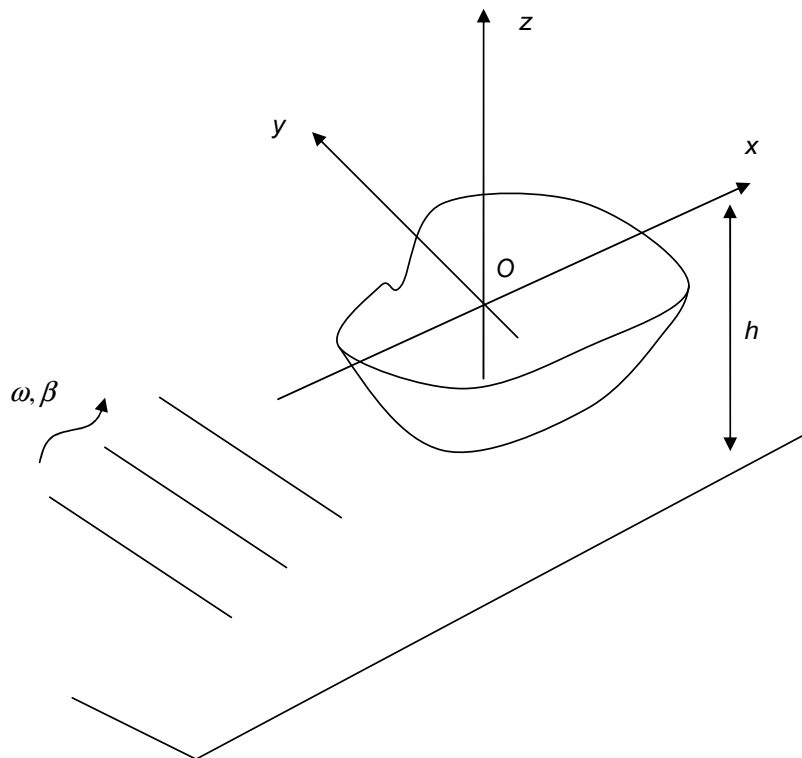


Figur B.1: Massematrise tatt fra SolidWorks.

Tillegg C

Koordinatsystem, notasjoner og matematiske funksjoner i NEMOH

General notations and conventions



Units:

All units are SI units :

- Length is in meter
- Mass is in kg
- Time is in second
- Frequency (circular) is in rad/s
- Phase angle are in radian

Reference frame:

$O(0,0,0)$ is the origin of the reference frame. The horizontal plane $z=0$ defines the free surface at rest. The vertical axis z is pointing upwards. 0 degrees wave direction means that the wave is propagating towards the x positive axis.

Notations:

- h is the water depth
- ω is the wave frequency
- k is the wave number
- β is the direction of incident wave propagation

- t is time
- (x, y, z) are coordinates in the Cartesian reference frame. (r, θ, z) are coordinates in the cylindrical reference frame.
- p denotes the pressure
- ϕ is a velocity potential
- \vec{V} is a velocity
- g is gravity
- A is the incident wave amplitude

Mathematical expressions for physical quantities:

- Phase of the incident wave elevation is 0 at origin. Incident wave elevation is given by:

$$\eta_i(x, t) = A \cos(k(x \cos \beta + y \sin \beta) - \omega t) = \Re\left(A e^{i(k(x \cos \beta + y \sin \beta) - \omega t)}\right)$$

with k solution of the dispersion relation $kg = \omega^2 \tan kh$.

- The excitation force relates to the incident wave according to:

$$F_{ex}(t) = \Re\left(A \tilde{F}_{ex}(\omega) e^{-i\omega t}\right) = \Re\left(A \left| \tilde{F}_{ex}(\omega) \right| e^{-i(\omega t - \angle \tilde{F}_{ex}(\omega))}\right)^1$$

- The incident wave potential is:

$$\phi_i(x, t) = \Re\left(-\frac{ig}{\omega} A f_0(z) e^{i(k(x \cos \beta + y \sin \beta) - \omega t)}\right)$$

with $f_0(z) = e^{kz}$ in deep water and $f_0(z) = \frac{\cosh(k((z+h)))}{\cosh(kh)}$ in intermediate water depth.

- The incident wave pressure field is:

$$p_i(x, t) = \Re\left(\rho g A f_0(z) e^{i(k(x \cos \beta + y \sin \beta) - \omega t)}\right)$$

- The incident wave velocity field is:

$$\circ \quad \vec{V}(M, t) = \Re\left(\frac{g}{\omega} A \begin{pmatrix} k \cos \beta \\ k \sin \beta \\ -ik \end{pmatrix} e^{kz} e^{ik(x \cos \beta + y \sin \beta)} e^{-i\omega t}\right) \text{ in deep water.}$$

$$\circ \quad \vec{V}(M, t) = \Re\left(\frac{g}{\omega} A \begin{pmatrix} k \cos \beta \cosh(k((z+h))) \\ k \sin \beta \cosh(k((z+h))) \\ -ik \sinh(k((z+h))) \end{pmatrix} \frac{1}{\cosh(kh)} e^{ik(x \cos \beta + y \sin \beta)} e^{-i\omega t}\right) \text{ in}$$

intermediate water depth.

¹ This equation shows that the phase angle of the excitation force in Nemoh is opposite to the one in Aquaplug.

Tillegg D

Inputfil til NEMOH

```
addpath('C:\NEMOH\nemoh_for_matlab_v2.03\matlab routines')
savedir = 'test_riktig';
nemohpath = 'C:\NEMOH\nemoh_v2.03';
addpath(nemohpath)

pi = 2.*acos(0.)
radius = 1.5
npoints = 31
nangle = 30

phi = linspace(0.,.5*pi,nangle)
rcosphi = radius*cos(phi)
rsinphi = radius*sin(phi)
r1 = linspace(radius,radius,npoints)
z1 = linspace(1.,-1.,npoints)
r2 = rcosphi
z2 = -1. - rsinphi
r = [r1(1:npoints-1),r2]
z = [z1(1:npoints-1),z2]

zcog = -0.4; %center of gravity
ptarget = 200;

axiMesh_mikedit(r,z,length(r),30,savedir,zcog,ptarget,nemohpath)

t1 = linspace(30,1,30)
t = [60.,t1,.5,.125,.1]
w = 2.*pi./t
dir = 0. %linspace(0,180,7);
depth = 50;

Nemoh(w,dir,depth,nemohpath)
```

Tillegg E

Beskrivelse av 3DFloat

QUICK GUIDE TO 3DFLOAT. 07.01.2014

3DFloat is an aero-hydro-servo-elastic simulation tool developed from 2006 at IFE and UMB for the computation of dynamic response of offshore wind turbines. It is coded in FORTRAN90, with linear algebra routines from the LAPACK library (Anderson et al., 1990). 3DFloat was one of the models applied to the OC3-HYWIND floating wind-turbine in the IEA OC3 project (Jonkman et al., 2010) and the bottom-fixed space-frame (“Jacket”) and floating semisubmersible platform in the IEA OC4 project (Popko et al., 2012) (Robertson et al., 2014).

Structural Model

The core of the model is a general nonlinear Finite-Element-Model (FEM) framework, where computational nodes are interconnected with elements. The model currently utilizes Euler-Bernoulli beams with 12 degrees of freedom (DOF). Cable elements with reduced bending-stiffness are used for the mooring lines. Other elements can be added as needed, since the framework is general. Geometric nonlinearities are accounted for by a co-rotated FEM approach, where the reference configuration is a recently deformed state. The element equations are stated in a coordinate system attached to the midpoint of the element in the reference state, and then transformed to a common component coordinate system. This allows for the utilization of small-strain elements for large global deflections, as long as the element resolution is sufficient.

Loads

Loads from gravity, buoyancy, waves, current and wind are applied as distributed external loads on the structure. Forces are evaluated at Gauss points in the elements, and a Galerkin approach is used to evaluate consistent nodal loads. Wind can be included as a nonlinear drag term on the structure above the wave surface, except on the rotor blades, where lift- and drag lookup tables are used.

The wave kinematics models are regular and irregular airy waves, optionally “extrapolated” or with Wheeler stretching, and regular waves by Stream Function up to order 12 (Chaplin, 1980). The loads are applied up to the instantaneous water surface.

Wave and current loads are computed with relative form of Morison's equation (Sarpkaya, 1981). Terms involving acceleration (added mass) are added to the mass matrix, while all other loads are kept as applied loads on the right hand side (RHS) of the equation system. Point forces can be applied to nodes. A wind turbine rotor load model can associate rigid rotors to nodes (several rotors if so desired), or provide aerodynamic loads to a flexible FEM representation of wind turbine rotors. The rotor aerodynamic loads are computed using unsteady blade-element/momentum theory (BEM), with extensions for dynamic inflow (filtered dynamic thrust) and yaw errors. Turbulence file formats include HAWC2, VIDYN and in the near future TURBSIM.

Control System

The generic control system in 3DFloat is for a variable speed rotor, with fixed blade pitch angle below rated wind speed. Above rated wind speed, PI control of pitch angle is used to control rotational speed and thereby power (Hansen et al., 2005). Alternatively, similar controllers developed in the IEA OC3 project for the NREL 5 MW reference rotor (bottom fixed and floating) are implemented. One of these controllers has been tuned to maintain stability for the OC3-HYWIND floating wind turbine (Jonkman et al., 2010).

Solvers

The time domain computations are carried out using either the implicit Generalized- α method, the implicit Newmark scheme, or an explicit central difference scheme (Pai, 2007). For the implicit schemes, modified Newton sub-iterations are used for the convergence of the solution at each time-step, governed by a residual criterion. In the Newton loop, the deflected geometry and loads are updated until dynamic equilibrium has been achieved. The main outputs are geometry configuration at user specified intervals, sensors for internal loads and positions for any element, and post-processing routines for animation of motions and stresses.

Eigen-frequency analysis with 3DFloat is handled with all displacement dependent externally applied loads linearized and added to the stiffness matrix at the relevant DOF. This includes the effect of buoyancy, mooring lines and restoring moment due to metacentric height. The outputs are tables with eigen frequencies sorted in ascending order, and plots/animations of mode shapes/motions.

Optimization

3DFloat has been applied to optimization problems by coupling to an existing optimizer at IFE (Sørheim, 2002) (Myhr and Nygaard, 2012)

REFERENCES

- Anderson, E. et al. (1990). "LAPACK: a portable linear algebra library for high-performance computers". *Proc of the 1990 conference on Super-computing*. ISBN 0-89791-412-0, IEEE Computer Society Press, Los Alamos, CA, USA.
- Chaplin, J. "Developments of stream-function theory," *Coastal Engineering*, 3, pp. 179–205, 1980.
- Faltinsen, O. M. (1990). "Sea loads on ships and offshore structures." Cambridge: Cambridge University press. ISBN: 0521458706
- Hansen, M. H. et al. (2005) "Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine". RISØ National Laboratory report, RISØ-R-1500, 2005.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G. (2009). "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development". Technical Report NREL/TP-500-38060, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Jonkman, J et al. (2010). "Offshore Code Comparison Collaboration within IEA Wind Task 23". *Proc European Wind Energy Conference & Exhibition*, Warsaw, Poland, April 2010.
- Myhr, A. and Nygaard, T. A. (2012). Load Reductions and Optimizations on Tension-Leg-Buoy Offshore Wind Turbine Platforms. Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Rhodes, Greece, June 2012.
- Pai, P. F. (2007). "Highly Flexible Structures: Modeling, Computation, and Experimentation". ISBN: 1563479176. AIAA 2007.
- Popko, W. et al. (2012). "Offshore Code Comparison Collaboration Continuation (OC4), Phase I – Results of Coupled Simulation of Offshore Wind Turbine with Jacket Support Structure". *Proc of The Twenty-second (2012) International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, June 2012.
- Robertson, A. et al. (2014). "Offshore Code Comparison Collaboration Continued: Phase II Results of a Floating Semisubmersible Wind System". To appear at 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), June 8-13, 2014, San Francisco, CA, USA
- Sarpkaya, T. and Isaacson, M. (1981). "Mechanics of Wave forces on Offshore Structures". Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1981
- Sørheim, E. A. (2002). "A user guide to INVALS: Inverse modeling of heat transfer of water film during DC-casting. IFE-report IFE/KR/F-2002/007

Tillegg F

Inputfil til 3Dfloat – Regulære bølger

```
! Pontoon
! The pontoon and global axes are aligned here
!
! New generic geometry:
!
! 3m diameter cylinder from +1m to -1m.
! Half-sphere with same diameter on bottom
```

```
set_environment
wave_amplitude 1.
spectral_peak 10.
wave_direction 0.0
nfreq 64.00
current_speed 0.0
current_exponent 0.
current_direction 0.
wind_speed 0.
wind_ref_height 87.6
wind_exponent 0.0
wind_direction 0.00
wind_mean_profile
wind_force off drag
gravity on
buoyancy on
waves      extrapolated_airy
norder -1.00
hydro_force morison
tsweeps 0.00
tsweepe -1.00
stretch 0.00
wave_ramps 0.
wave_rampe 30.
rho_water 1025.00
rho_air 1.225
pre_computed_waves_file off
random_mode right_file randomfile
tshift_waves 0. !3.75
tshift_wind 0.00
nu_water 0.00001000
nu_air 0.00000100
depth 500.0
kinematics_option: initial
surface_option:      2ndorder      OK
dtwkin -1.
```

```

define_material name: Chain rho: 7850      e: 39458300000 g:
80800000000
define_material name: synthrope rho: 1000. e: 39458300000 g:
80800000000

!jonswap_wavelets_constant hs: 3. tp: 7. tstart: 7. tcut: 7.
gamma: 1.0
!tperiodic: 7. depth: 500.0 file: wavelets.txt

!wavelets scale_amplitude: 1. file wavelets.txt

wave_forces cd_morison 0. cm_morison 0.

define_material name pon rho 7851.06383 e 210000000000.000 g
80770000000.000

! We need a node that moves with the pontoon, to provide a reference
node for the
! pontoon body. Define a small element connecting to the center of
the buoy

new_elements_beam1 nelem 1 material massless connect_mode auto
x1 -1. 0. 0. dcyll1 1. tcyl1 .1 pre_strain 0.
x2 0. 0. 0. dcyll2 1. tcyl2 .1 btype beamwb

new_body
name: pontoon
reftype: refnode
xfind: 0. 0. 0.
rotorder: 123
rotation: 0. 0. 0. ! dbg 0. 0. 90.
axes: normal
parent: inertial

new_boxmember_properties ! cone at bottom of buoy
iprop 1
material massless
connect_mode auto
btype beam
ea1 5.2779E+10
ea2 1.7813E+11
eiy1 4.2883E+09 eiy2 1.6254E+11
eiz1 4.2883E+09 eiz2 1.6254E+11
gj1 1.2539E+11 gj2 1.2539E+11
m1 0. m2 0.
lx1 40.000 lx2 40.000

```

```

ly1 1.  ly2 3.
lz1 1.  lz2 3.
ab1 0.785398163  ab2 7.06858347
pre_strain_long 0.000
pointmass1 0.  pointmass2 0.
cdx 0.000 cdy 1.000 cdz 1.000
cmx 0.000 cmy 0.000 cmz 0.000
buoyancy_type off

new_boxmember_properties          ! cylinder part of buoy
iprop 2
material massless
connect_mode auto
btype beam
ea1 1.7813E+11
ea2 1.7813E+11
eiy1 1.6254E+11 eiy2 1.6254E+11
eiz1 1.6254E+11 eiz2 1.6254E+11
gj1 1.2539E+11      gj2 1.2539E+11
m1 0.              m2 0.
lx1 40.000 lx2 40.000
ly1 3.  ly2 3.
lz1 3.  lz2 3.
ab1 7.06858347 ab2 7.06858347
pre_strain_long 0.000
pointmass1 0.  pointmass2 0.
cdx 1.000 cdy 1.000 cdz 1.000
cmx 0.000 cmy 0.000 cmz 0.000
buoyancy_type off

! Express keypoints in body coordinate system
!
new_keypoints ! node # x y z [m]
1 0. 0. -2.5
2 0. 0. -1.
3 0. 0. 0.
4 0. 0. 1.

new_boxmembers nelem_default: 2
1 1 2 1 nelem 1

new_boxmembers nelem_default: 2
2 2 4 2 nelem 2

\Mooring line 1
new_elements_beam1 nelem 1 material synthrope connect_mode
connect_2
x1 0. 0. -50.      dcy11 0.1  tcy11 0.049  pre_strain_long
0. 0.0001
x2 0. 0. -2.5     dcy12 0.1  tcy12 0.049  btype cable

```

```

frac_stiff  0.0001  cdn  3.15  cmn  7.95
add_node_mass_matrix          ! This is in the body coordinate
system (Pontoon system)
  name:  mass_matrix_pontoon1  ! Does not need to be changed,
pontoon system moves with pontoon
  components:
  1  1  1735.7          !structural
  2  2  1735.7
  3  3  1735.7
  4  4  2728.04
  5  5  3484.49
  6  6  3484.49
  1  1  0.560457E+04  !added mass, infinite frequency
  2  2  0.560457E+04  !taken from 0.1 sek results, CM4.dat, NEMOH
  3  3  0.416020E+04
  4  4  0.416406E+04
  5  5  0.416406E+04
  1  5  -0.468963E+04
  5  1  -0.468963E+04
  4  2  0.468967E+04
  2  4  0.468967E+04

read_wamit_transfer_function
  filename:  ExcitationForce6.tec
  ioptn: 10          ! option for
hydrodynamics and file format, see WAMIT manual
  name:  logfile_heavebuoy_forces          ! if filename starts
with logfile_, we get a logfile of forces
  mass_matrix_name: mass_matrix_pontoon1
  added_mass_filename: CA6.dat          !..\WAMIT_5S_set2.1  !
added mass and damping for use in convolution

apply_transfer_function_to_node
  xfind: 0.000 0.000 0.000          ! node position
  name:  logfile_heavebuoy_forces          ! corresponds to name in
read_wamit_transfer_function
  orientation_from_body: pontoon          ! transfer function is
given in this local coordinate system
  length_scale: 1.  ! [m]          ! from WAMIT input and
output  TODO check 1. ? dbg 100

add_node_stiffness  find  0.000  0.000  0.000          ! In global system
f_lin  0.  0.  12.51255e4  0.  0.  0.          ! buoyancy-weight
x_lin  0.  0.  0.  0.  0.  0.          ! ref node initial
position/orientation
  1  1  0.
  2  2  0.
  3  3  7.1051e4          ! water plane stiffness
  4  4  2.0815e4          ! pitch stiffness

```

```

5      5      2.0815e4                ! roll  stiffness

springs                ! Define a set of springs
  name: generator      ! Name of this set of springs.
  type: linear_yield   ! Algorithm : model4_2_1 (NGI)
  stiffness_maxforce:  ! List of springs, terminated by blank line
  0.  1.e4             ! Stiffness and max (yield) force (Nm)

add_node_stiffness find  0.  0.  -50. ! In global system.
  f_lin  0.  0.  -12.51255e4  0.  0.  0.    ! buoyancy - weight
  x_lin  0.  0.  -50.  0.  0.  0.          ! ref node
initial position/orientation
  springs_name: generator          ! refers to name in springs
input
  idof_springs: 3                  ! apply spring force along this
DOF
  logfile: generator.txt          ! optional logfile for force
added to the node

add_node_damping find  0.  0.  -50.
3      3      8.9e4                ! Change this parameter to optimize
generator output

! ***** NEW *****
! EDIT WAVE FIELD VISUALISATION DOMAIN
! start < x y > : coordinates of start point in xy plane
! dstep < dx dy> : desired grid increment size in the x and y
directions
! nstep < nx ny > : desired number of grid increments in the x
and y directions
! built in default values are equivalent to: monitor_set_wavefield
start -100. -100. dstep 5. 5. nstep 40 40

monitor_set_wavefield start -200.0 -100.0 dstep 40.0 40.0 nstep 10 5

! ***** NEW *****

```

```

\-----
\      Monitors
\-----

```

```

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 -.5 nmonitor 1 node 2 type forces
file forces.txt label  s1 s2 s3  fx fy fz

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 -49. nmonitor 1 node 2 type forces
file forces_chain.txt label  fx_chain

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 -25. nmonitor 1 node 2 type forces
file forces_chaintop.txt label  fx_chaintop

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 -.5 nmonitor 1 node 2 type
orientation
file pontoon.3df_orient label dx dy dz  Ptfm_xx Ptfm_xy Ptfm_xz
Ptfm_yx

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 0.0 nmonitor 1 node 2 type
acceleration
file pontoon.3df_accel label ax ay az

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 0.0 nmonitor 1 node 1 type
waveheight
file pontoon.3df_waves label wave_elev ! waveheight in the middle
of the bridge

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 -3. nmonitor 1 node 1 type
waves_fixed
file waves_fixed.txt label uxw uyw uzw  axw  ayw  azw  Pstat PDyn
Rho Zsurf

monitor_element_b1  find 0. 0. 0. nmonitor 1 body_name inertial
node 1 type gather
file sensors.txt  toffset 0. label X_gather
sensors:
nfact: 1 source: wave_elev  scale: 1.          unit: [m]
nfact: 1 source: dx        scale: 1.          unit: [m]
nfact: 1 source: dy        scale: 1.          unit: [m]
nfact: 1 source: dz        scale: 1.          unit: [m]
nfact: 1 source: Ptfm_xy   scale: -57.295779513082323  unit: [deg]
header: Roll
nfact: 1 source: Ptfm_xx   scale: 57.295779513082323  unit: [deg]
header: Pitch
nfact: 1 source: Ptfm_zy   scale: -57.295779513082323  unit: [deg]
header: Yaw2
nfact: 1 source: Ptfm_yx   scale: -57.295779513082323  unit: [deg]
header: Yaw
nfact: 1 source: fx_chain  scale: 1.e-3          unit: [kN]
nfact: 1 source: fx_chaintop  scale: 1.e-3          unit: [kN]

```

```

! Lock anchor point except vertically
!
apply_nodal_bc find: 0. 0. -50.  apply_displ idofs: 1 idofe: 2
displ: 0. 0. 0. 0. 0. 0.

! Lock in yaw
!
apply_nodal_bc find: 0. 0. 0.  apply_displ idofs:6  idofe: 6 displ:
0. 0. 0. 0. 0. 0.

\-----
\ Simulation settings
\-----

newmark dt: 0.1  nassemble: 1 nnewton: 10 nsubmin: 2  rwilson: .9
relax: 0.0  resid_newton: 1e-08  nmonitor: 10

monitor_element_b1  type plot nmonitor 10
file turb1.plot

monitor_element_b1 type tecplot nmonitor 1
file turb1.dat

damping type ratio2rayl  ratio_1 0.01  ratio_2 0.01  omega_1 0.
0.1  omega_2 1.

step nstep 1000 method step9

END

```


Tillegg G

Inputfil til 3Dfloat – Irregulære bølger

```
! Pontoon
! The pontoon and global axes are aligned here
!
! New generic geometry:
!
! 3m diameter cylinder from +1m to -1m.
! Half-sphere with same diameter on bottom
```

```
set_environment
wave_amplitude 1.
spectral_peak 8.5
wave_direction 0.0
nfreq 64.00
current_speed 0.0
current_exponent 0.
current_direction 0.
wind_speed 0.
wind_ref_height 87.6
wind_exponent 0.0
wind_direction 0.00
wind_mean_profile
wind_force off drag
gravity on
buoyancy on
waves      extrapolated_airy
norder -1.00
hydro_force morison
tsweeps 0.00
tsweepe -1.00
stretch 0.00
wave_ramps 0.
wave_rampe 30.
rho_water 1025.00
rho_air 1.225
pre_computed_waves_file off
random_mode right_file randomfile
tshift_waves 0. !3.75
tshift_wind 0.00
nu_water 0.00001000
nu_air 0.00000100
depth 500.0
kinematics_option: initial
surface_option:      2ndorder      OK
dtwkin -1.
```

```

define_material name: Chain rho: 7850      e: 39458300000 g:
80800000000
define_material name: synthrope rho: 1000. e: 39458300000 g:
80800000000

jonswap_wavelets_constant hs: 1. tp: 8.5 tstart: 25. tcut: 1.
gamma: 1.0
tperiodic: 3600. depth: 50.0 file: wavelets.txt

wavelets scale_amplitude: 1. file wavelets.txt

wave_forces cd_morison 0. cm_morison 0.

define_material name pon rho 7851.06383 e 210000000000.000 g
80770000000.000

! We need a node that moves with the pontoon, to provide a reference
node for the
! pontoon body. Define a small element connecting to the center of
the buoy

new_elements_beam1 nelem 1 material massless connect_mode auto
x1 -1. 0. 0. dcyll1 1. tcyl1 .1 pre_strain 0.
x2 0. 0. 0. dcyll2 1. tcyl2 .1 btype beamwb

new_body
name: pontoon
reftype: refnode
xfind: 0. 0. 0.
rotorder: 123
rotation: 0. 0. 0. ! dbg 0. 0. 90.
axes: normal
parent: inertial

new_boxmember_properties ! cone at bottom of buoy
iprop 1
material massless
connect_mode auto
btype beam
ea1 5.2779E+10
ea2 1.7813E+11
eiy1 4.2883E+09 eiy2 1.6254E+11
eiz1 4.2883E+09 eiz2 1.6254E+11
gj1 1.2539E+11 gj2 1.2539E+11
m1 0. m2 0.
lx1 40.000 lx2 40.000

```

```

ly1 1.  ly2 3.
lz1 1.  lz2 3.
ab1 0.785398163  ab2 7.06858347
pre_strain_long 0.000
pointmass1 0.  pointmass2 0.
cdx 0.000 cdy 1.000 cdz 1.000
cmx 0.000 cmy 0.000 cmz 0.000
buoyancy_type off

new_boxmember_properties          ! cylinder part of buoy
iprop 2
material massless
connect_mode auto
btype beam
ea1 1.7813E+11
ea2 1.7813E+11
eiy1 1.6254E+11 eiy2 1.6254E+11
eiz1 1.6254E+11 eiz2 1.6254E+11
gj1 1.2539E+11      gj2 1.2539E+11
m1 0.              m2 0.
lx1 40.000 lx2 40.000
ly1 3.  ly2 3.
lz1 3.  lz2 3.
ab1 7.06858347 ab2 7.06858347
pre_strain_long 0.000
pointmass1 0.  pointmass2 0.
cdx 1.000 cdy 1.000 cdz 1.000
cmx 0.000 cmy 0.000 cmz 0.000
buoyancy_type off

! Express keypoints in body coordinate system
!
new_keypoints ! node # x y z [m]
1 0. 0. -2.5
2 0. 0. -1.
3 0. 0. 0.
4 0. 0. 1.

new_boxmembers nelem_default: 2
1 1 2 1 nelem 1

new_boxmembers nelem_default: 2
2 2 4 2 nelem 2

\Mooring line 1
new_elements_beam1 nelem 1 material synthrope connect_mode
connect_2
x1 0. 0. -50.      dcy11 0.1  tcy11 0.049  pre_strain_long
0. 0.0001
x2 0. 0. -2.5     dcy12 0.1  tcy12 0.049  btype cable

```

```

frac_stiff  0.0001  cdn  3.15  cmn  7.95
add_node_mass_matrix          ! This is in the body coordinate
system (Pontoon system)
  name:  mass_matrix_pontoon1  ! Does not need to be changed,
pontoon system moves with pontoon
  components:
  1  1  1735.7          !structural
  2  2  1735.7
  3  3  1735.7
  4  4  2728.04
  5  5  3484.49
  6  6  3484.49
  1  1  0.560457E+04  !added mass, infinite frequency
  2  2  0.560457E+04  !taken from 0.1 sek results, CM4.dat, NEMOH
  3  3  0.416020E+04
  4  4  0.416406E+04
  5  5  0.416406E+04
  1  5  -0.468963E+04
  5  1  -0.468963E+04
  4  2  0.468967E+04
  2  4  0.468967E+04

read_wamit_transfer_function
  filename:  ExcitationForce6.tec
  ioptn: 10          ! option for
hydrodynamics and file format, see WAMIT manual
  name:  logfile_heavebuoy_forces          ! if filename starts
with logfile_, we get a logfile of forces
  mass_matrix_name: mass_matrix_pontoon1
  added_mass_filename: CA6.dat          !..\WAMIT_5S_set2.1  !
added mass and damping for use in convolution

apply_transfer_function_to_node
  xfind: 0.000 0.000 0.000          ! node position
  name:  logfile_heavebuoy_forces          ! corresponds to name in
read_wamit_transfer_function
  orientation_from_body: pontoon          ! transfer function is
given in this local coordinate system
  length_scale: 1.  ! [m]          ! from WAMIT input and
output  TODO check 1. ? dbg 100

add_node_stiffness  find  0.000  0.000  0.000          ! In global system
f_lin  0.  0.  12.51255e4  0.  0.  0.          ! buoyancy-weight
x_lin  0.  0.  0.  0.  0.  0.          ! ref node initial
position/orientation
  1  1  0.
  2  2  0.
  3  3  7.1051e4          ! water plane stiffness
  4  4  2.0815e4          ! pitch stiffness

```

```

5      5      2.0815e4                ! roll  stiffness

springs                                ! Define a set of springs
  name: generator                      ! Name of this set of springs.
  type: linear_yield                   ! Algorithm : model4_2_1 (NGI)
  stiffness_maxforce:                 ! List of springs, terminated by blank line
  0.  1.e4                             ! Stiffness and max (yield) force (Nm)

add_node_stiffness  find  0.  0.  -50.  ! In global system.
  f_lin  0.  0.  -12.51255e4  0.  0.  0.  ! buoyancy - weight
  x_lin  0.  0.  -50.  0.  0.  0.        ! ref node initial
position/orientation
  springs_name: generator              ! refers to name in springs input
  idof_springs: 3                     ! apply spring force along this DOF
  logfile: generator.txt               ! optional logfile for force added
to the node

add_node_damping  find  0.  0.  -50.
3      3      8.2e4                    ! Change this parameter to optimize
generator output

! ***** NEW *****
! EDIT WAVE FIELD VISUALISATION DOMAIN
! start < x y > : coordinates of start point in xy plane
! dstep < dx dy > : desired grid increment size in the x and y
directions
! nstep < nx ny > : desired number of grid increments in the x
and y directions
! built in default values are equivalent to: monitor_set_wavefield
start -100. -100. dstep 5. 5. nstep 40 40

monitor_set_wavefield start -200.0 -100.0 dstep 40.0 40.0 nstep 10 5

! ***** NEW *****

```

```

\-----
\      Monitors
\-----

```

```

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 -.5 nmonitor 1 node 2 type forces
file forces.txt label  s1 s2 s3  fx fy fz

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 -49. nmonitor 1 node 2 type forces
file forces_chain.txt label  fx_chain

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 -25. nmonitor 1 node 2 type forces
file forces_chaintop.txt label  fx_chaintop

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 -.5 nmonitor 1 node 2 type
orientation
file pontoon.3df_orient label dx dy dz  Ptfm_xx Ptfm_xy Ptfm_xz
Ptfm_yx

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 0.0 nmonitor 1 node 2 type
acceleration
file pontoon.3df_accel label ax ay az

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 0.0 nmonitor 1 node 1 type
waveheight
file pontoon.3df_waves label wave_elev ! waveheight in the middle
of the bridge

monitor_element_b1  find 0.0 0.0 -3. nmonitor 1 node 1 type
waves_fixed
file waves_fixed.txt label uxw uyw uzw  axw  ayw  azw  Pstat PDyn
Rho Zsurf

monitor_element_b1  find 0. 0. 0. nmonitor 1 body_name inertial
node 1 type gather
file sensors.txt toffset 0. label X_gather
sensors:
nfact: 1 source: wave_elev  scale: 1. unit: [m]
nfact: 1 source: dx  scale: 1. unit: [m]
nfact: 1 source: dy  scale: 1. unit: [m]
nfact: 1 source: dz  scale: 1. unit: [m]
nfact: 1 source: Ptfm_xy  scale: -57.295779513082323 unit: [deg]
header: Roll
nfact: 1 source: Ptfm_xx  scale: 57.295779513082323 unit: [deg]
header: Pitch
nfact: 1 source: Ptfm_zy  scale: -57.295779513082323 unit: [deg]
header: Yaw2
nfact: 1 source: Ptfm_yx  scale: -57.295779513082323 unit: [deg]
header: Yaw
nfact: 1 source: fx_chain  scale: 1.e-3 unit: [kN]
nfact: 1 source: fx_chaintop  scale: 1.e-3 unit: [kN]

```

```

! Lock anchor point except vertically
!
apply_nodal_bc find: 0. 0. -50.  apply_displ idofs: 1 idofe: 2
displ: 0. 0. 0. 0. 0. 0.

! Lock in yaw
!
apply_nodal_bc find: 0. 0. 0.  apply_displ idofs:6  idofe: 6 displ:
0. 0. 0. 0. 0. 0.

\-----
\ Simulation settings
\-----

newmark dt: 0.1  nassemble: 1  nnewton: 10  nsubmin: 2  rwilson: .9
relax: 0.0  resid_newton: 1e-08  nmonitor: 10

monitor_element_b1  type plot nmonitor 10
file turb1.plot

monitor_element_b1 type tecplot nmonitor 1
file turb1.dat

damping type ratio2rayl  ratio_1 0.01  ratio_2 0.01  omega_1 0.
0.1  omega_2 1.

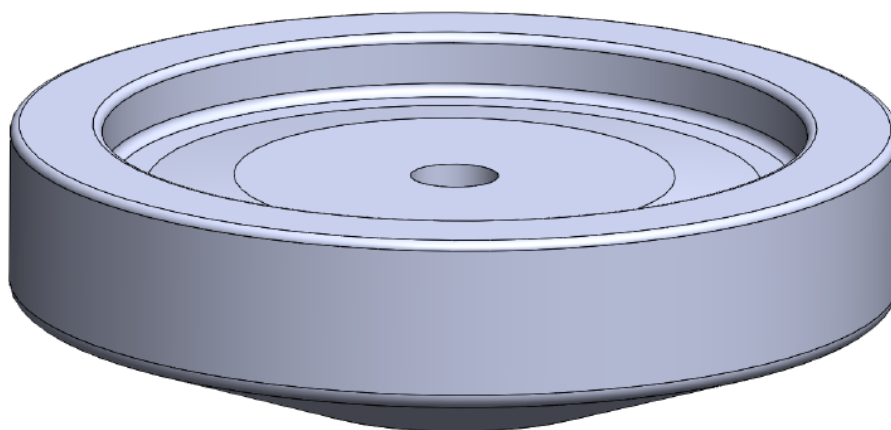
step nstep 110000 method step9

END

```

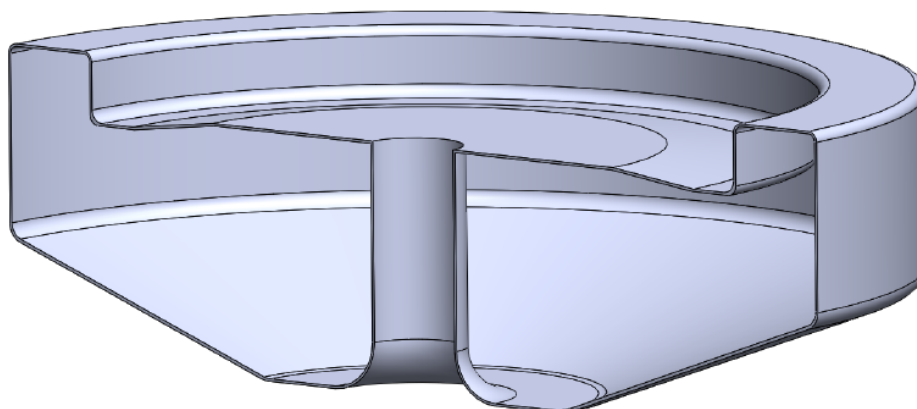
Tillegg H

Den originale bøye-konstruksjonen tegnet i SolidWorks med mål



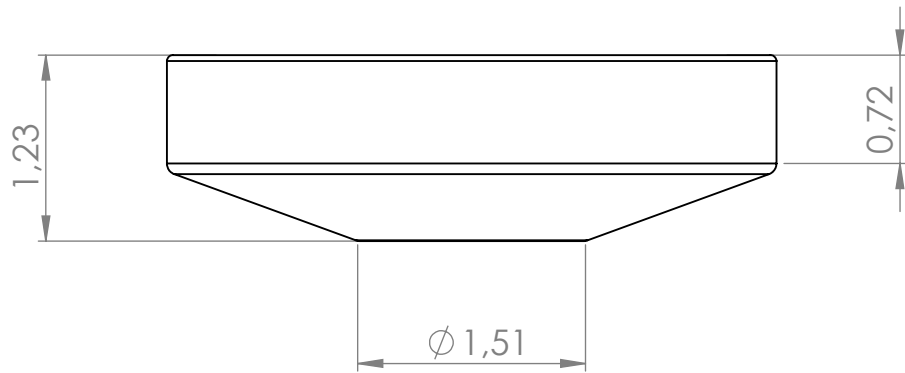
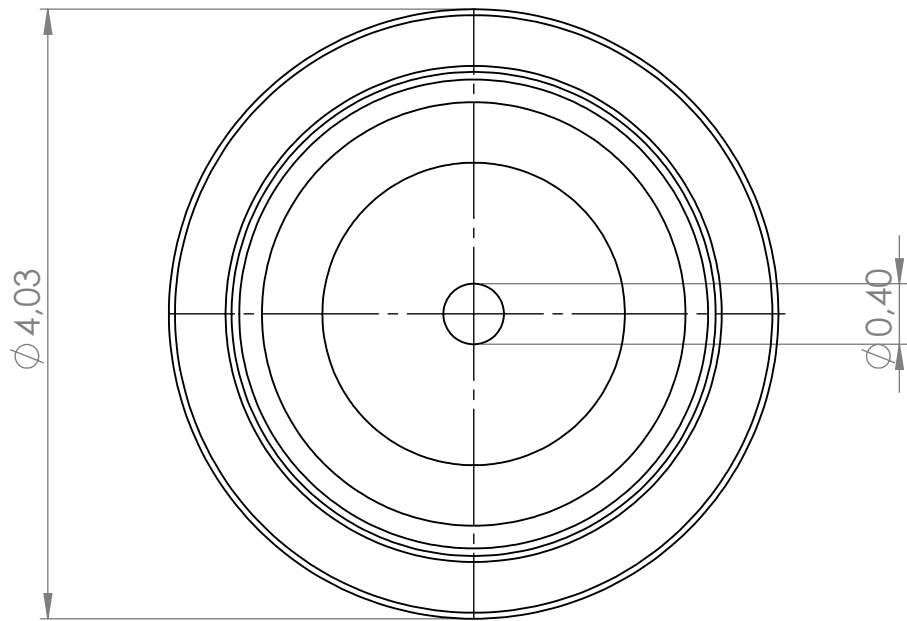
SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

Figur H.1: Illustrasjon av «The Storm Buoy».



SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

Figur H.2: Illustrasjon av «The Storm Buoy», snittet på midten.



Alle mål er i meter. 23.04.2016

Yen-Nhi N. Doan

TITLE: **The Storm Buoy**

DWG NO.

2.

A4

SCALE:1:50

SHEET 1 OF 1

**SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.**



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no