

Dynamisk analyse av dykke- basket i ulike sjøtilstander un- der heiseoperasjon fra FPSO.

Jacob Solhaug
Peder Hanche-Olsen

Bacheloroppgave i Marinteknikk
Bergen, Norge 2024



Dynamisk analyse av dykkebasket i ulike sjøtilstander under heiseoperasjon fra FPSO.

Jacob Solhaug
Peder Hanche-Olsen

Institutt for Maskin- og Maritime Studium
Høgskulen på Vestlandet
NO-5063 Bergen, Norge

Høgskulen på Vestlandet
Institutt for Maskin- og Maritime Studium
Inndalsveien 28,
NO-5063 Bergen, Norge

Cover and backside images © Norbert Lümmer

English title: Dynamic analysis of diving basket in various sea conditions during lifting operation from FPSO.

Forfatter(e), studentnummer: Jacob Solhaug 591401
Peder Hanche-Olsen 599078

Studieprogram: Marinteknikk
Dato: Mai 2024
Rapportnummer: IMM 2024-M 38
Veileder ved HVL: Victoria Popsueva
Oppdragsgiver: Equinor ASA
Oppdragsgivers referanse: Henrik Philipsen

Antall filer levert digitalt: 6

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet av studenter fra Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) ved Høgskulen på Vestlandet (HVL), som en del av Bachelorprogrammet Marinteknikk. Arbeidet er gjennomført i tidsrommet januar 2024 til mai 2024, og er skrevet av gruppe M38, bestående av kandidatene Jacob Solhaug og Peder Hanche-Olsen. Oppgaven ble tildelt på vegne av Equinor ASA, og den er gjennomført i samarbeid med Equinors dykkeravdeling, med Henrik Philipsen som ekstern veileder. Intern veileder fra HVL er Førsteamanuensis Victoria Popsueva.

Takk til våre veiledere, Henrik Philipsen og Victoria Popsueva. Philipsen har vært til stor hjelp gjennomgående i prosjektet. Han har delt sin kompetanse og lagt inn mye tid for å veilede oss, noe vi setter stor pris på. Både Philipsen og Popsueva har vært tilgjengelig for frekvente møter, og har bidratt til gode tilbakemeldinger til rapporten som vi har tatt nytte av.

Takk til Stian Hansen Sølvberg ved Equinor for tilbakemeldinger til rapporten. Takk til Dykkerutdanningen på Skålevik ved HVL, og Brad Lea ved SMP (Submarine Manufacturing and Products Limited), for datainnhenting til dykkebasket.

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven beskriver en dynamisk analyse av en dykkebasket i ulike sjøtilstander under heiseoperasjon fra FPSO Raia. Målet med prosjektet er å besvare problemstillingen; ”Hva er operasjonsbegrensningene for heiseoperasjonen av dykkebasketen fra FPSO Raia?”. Dette gjøres for å ivareta sikkerheten til dykkere som befinner seg i dykkebasketen, og for å kunne oppnå *Marine Warranty Surveyor*-godkjenning fra DNV for heiseoperasjonen av basketen.

For utførelse av bacheloroppgaven, anvendes hydrodynamisk teori på et praktisk problem. DNVs forenklede metode benyttes for å kvantifisere de hydrodynamiske egenskapene til basketen. Basketen modelleres i analyseprogrammet OrcaFlex, og i samme program simuleres nedsenking av basketen i havet, hvor forsøk med ulike sjøtilstander automatiseres i MATLAB. Last på kabel og basket samt partikkelhastighet hentes ut og analyseres for å besvare problemstillingen.

Resultatene i rapporten presenteres som *heatmaps* med verdier som forteller om *slack sling* er oppnådd. *Slack sling* kriteriet er per DNVs forenklede metode en konservativ, industriell veiledningsmodell, som beskriver at dersom den hydrodynamiske kraften som virker oppover understiger 90% av den minste statiske kraften (altså neddykket vekt av basketen), kan fenomenet *slack sling* forekomme. Konsekvensene av dette kan være at kranwiren eller stroppene opplever slakk, og som følger av dette kan det oppstå rykk i basketen. I denne rapporten benyttes *slack sling* kriteriet som restriksjon til hvilke sjøtilstander operasjonen kan gjennomføres i, slik at det er trygt for dykkerne. Resultatene viser at *slack sling* oppnås i flertallet av forsøkene, og en gjennomgående trendlinje gir en indikasjon på et trygt operasjonsvindu ved $H_S < 2.5$ i kombinasjon med $T_Z \geq 5$. Det undersøkes også for *slack sling* i et utvalg av sjøtilstander fra erfaringsbasert dykking der operasjonene ble delvis gjennomført. Resultatene viser til verdier ca. 10% under *slack sling* kriteriet, noe som kan antas å reflektere et bilde på hvor konservativ den forenklede metoden er: Dykking har altså blitt gjennomført i sjøtilstander der denne rapportens resultater viser til oppnådd *slack sling*. Det konkluderes med at DNVs forenklede metode er såpass konservativ, at resultatene i denne bacheloroppgaven kun gir en indikasjon på reelle bildet. Det konkluderes også med at rapporten avdekker argumenter for at det konservative *slack sling* kriteriet ikke trenger å være en absolutt betingelse for trygg utførelse av dykkeoperasjoner, og en veiledende grense ved rundt 80% av neddykket vekt kan potensielt undersøkes ved videre arbeid.

Abstract

This bachelor thesis describes a dynamic analysis of a diving basket in various sea conditions during lifting operation from the FPSO Raia. The objective of this project is to answer the issue: "What are the operational limitations for lifting the diving basket from FPSO Raia?". This is done to ensure the safety of divers inside the diving basket and to achieve Marine Warranty Surveyor approval from DNV for the lifting operation of the basket.

For the execution of this bachelor thesis, hydrodynamic theory is applied to a practical problem. DNV's simplified method is used to quantify the hydrodynamic properties of the basket. The basket is modeled in the analysis program OrcaFlex, and the same program is used to simulate the submersion of the basket in the sea, where cases of various sea conditions are automated in MATLAB. Loads on the cable and basket as well as particle velocity are extracted and analyzed to address the projects' issue.

The results in the report are presented as heatmaps with values indicating whether *slack sling* has been achieved. According to DNV's simplified method, *slack sling* criteria is a conservative, industrial guidance model that states if the hydrodynamic force acting upwards is less than 90% of the smallest static force (i.e., the submerged weight of the basket), *slack sling* phenomenon can occur. The consequences of this could be that the crane wire or straps experience slack, leading to jerks in the basket. In this report, the *slack sling* criteria is used as a restriction for which sea conditions the operation can be safely conducted. The results show that *slack sling* is achieved in the majority of cases, and a consistent trendline provides an indication of a safe operational window with $H_S < 2.5$ combined with $T_Z \geq 5$. *Slack sling* is also investigated in a selection of sea conditions from experience-based diving where operations were partially conducted. The results show values about 10% below the *slack sling* criteria, which may reflect how conservative the simplified method is: Diving has been conducted in sea conditions where this report's results indicate achieved *slack sling*. It is concluded that DNV's simplified method is so conservative that the results of this bachelor thesis only provide an indication of the real picture. It is also concluded that the report reveals arguments suggesting that the conservative *slack sling* criteria does not need to be an absolute condition for the safe execution of diving operations, and a guideline limit of around 80% of the submerged weight could potentially be investigated in further work.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
Nomenklatur	ix
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Rapportens struktur	3
2 Teori	3
2.1 Bølgeteori	3
2.1.1 Linær bølgeteori	3
2.1.2 Potensialteori	4
2.1.3 Irregulære bølger	4
2.1.4 Bølgespekter	5
2.1.5 Response Amplitude Operator	6
2.2 Hydrodynamiske krefter	7
2.2.1 Morrison-likningen	7
2.2.2 Slamming- og oppdriftskraft	8
2.3 Hydrodynamiske koeffisienter	8
2.3.1 Massekoeffisient C_M	8
2.3.2 Drag koeffisient C_D	9
2.3.3 Slammingkoeffisient C_S	10
2.4 Effekt av perforasjon	10
2.5 Slack sling	10
3 Programvare	12
3.1 SolidWorks	12
3.2 OrcaFlex	12
3.2.1 Analyse	12
3.2.2 Bølgespekter	13
3.2.3 Koordinatsystem	13
3.2.4 Objekt	13
3.3 MATLAB	15
4 Metode	16
4.1 Reell dykkebasket	16
4.2 Forenklet dykkebasket	17

4.3	Diskretisering av dykkebasket	18
4.3.1	Diskretisering topplate	18
4.3.2	Diskretisering midtparti	21
4.3.3	Diskretisering bunnplate	24
4.4	Analyse	25
4.4.1	Environment	26
4.4.2	<i>Vessel</i>	27
4.4.3	<i>Line</i>	27
4.4.4	<i>6D-buoy</i>	28
4.5	Automatisering	29
4.6	Erfaringsbasert dykking	30
5	Resultat	31
5.1	Resultat for heatmaps	31
5.1.1	Resultat for 30°	32
5.1.2	Resultat for 60°	33
5.1.3	Resultat for 210°	34
5.1.4	Resultat for 240°	35
5.2	Utvalgte sjøtilstander	36
5.2.1	Sjøtilstand 1	36
5.2.2	Sjøtilstand 2	37
5.2.3	Sjøtilstand 3	38
6	Diskusjon	40
6.1	Sertifisering av marine løfteoperasjoner iht. standarder	40
6.2	Forenklingers betydning for resultatene	40
6.3	Operasjonsbegrensninger	41
7	Konklusjon	43
8	Videre arbeid	44
	Referanser	45
	Liste over Figurer	48
	Liste over Tabeller	49
	Vedlegg	50

Nomenklatur

Symbol	Beskrivelse	Enhet
A_{33}	Tilleggsmasse i hiv	[kg]
A_γ	Normaliseringsfaktoren	[-]
A_p	Projisert areal	[m ²]
C_A	Tilleggsmassekoeffisient	[-]
C_D	Dragkoeffisient	[-]
C_M	Massekoeffisient	[-]
C_S	Slammingkoeffisient	[-]
D	Diameter	[m]
Δ	Fortrengt vannmasse	[kg]
F_D	Dragkraft	[N]
F_M	Massekraft	[N]
F_ρ	Oppdriftskraft	[N]
F_{slam}	Slammingkraft	[N]
H	Bølgehøyde	[m]
H_s	Signifikant bølgehøyde	[m]
$H(\omega)$	Transferfunksjon (RAO)	[-]
h	Dypgang	[m]
k	Bølgetall	[rad/m]
KC	Keulegan-Carpenter tall	[-]
M_{min}	Neddykket vekt	[kg]
Φ	Hastighetspotensial	[-]
p	Perforasjonsfaktor	[-]
p_{dyn}	Dynamisk trykk	[Pa]
$S(\omega)$	Bølgespekter	[-]
$S_R(\omega)$	Responsspekter	[-]
T	Bølgeperiode	[s]
T_p	Topp periode	[s]
T_z	Nulloppkrysningsperiode	[s]
v_f	Partikkelhastighet	[m/s]
$\chi(\omega)$	Outputverdi (RAO)	[-]
$\gamma(\omega)$	Inputverdi (RAO)	[-]
λ	Bølgelengde	[m]
ω	Bølgefrequens	[rad/s]
ω_p	Topp bølgelengde	[rad/s]
ζ	Bølgeprofil	[-]
ζ_a	Bølgeamplitude	[m]

Forkortelser

API	Application Programming Interface
CAD	Computer-Aided Design
DNV	Det Norske Veritas
FPSO	Floating Production Storage and Offloading
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
LARS	Launch And Recovery System
NORSOK	NORsk SOKkels Konkurransesposisjon
PCF	Perforasjons-korreksjonsfaktor
PM	Pierson-Moskowitz spekter
RAO	Response Amplitude Operator
ROV	Remotely Operated Vehicle
SMP	Submarine Manufacturing and Products Limited

1 Innledning

Denne rapporten beskriver en dynamisk analyse av en dykkebasket i ulike sjøtilstander under heiseoperasjon fra FPSO Raia. Innledningsseksjonen introduserer prosjektet i delkapitler av bakgrunn for oppgaven, oppgavens problemstilling og rapportens struktur.

1.1 Bakgrunn

Utvinning av offshoreressurser har i mange tiår vært en industri av interesse for store bedrifter og nasjoner. Olje- og gassutvinning på dypet krever utstyr hvor effektivisering samt kostnads- og risikoreduering står sentralt i praksisen. I mindre oljefelt på dypt hav, der det ikke er gunstig med fast plattform, benyttes gjerne et produksjonsskip, også kalt FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*) [1]. Disse utvikles med ulike havbunnsinstallasjoner for å lede brønnstrømmen opp til skipet gjennom rør, der oljen lagres om bord før den lastes over til tankskipene. Slike FPSO-er brukes flere steder i verden, der i blant utenfor kysten av Brasil [1]. Equinor er blant aktørene der, og har under planlegging et prosjekt med FPSO Raia hvor det skal utvinnes mengder olje og gass [2]. Prosjektet med FPSO-en vil kreve vedlikehold på systemene, og enkelte oppgaver må utføres av dykkere. For å få dykkere fra skipsdekk og ned i vannet, fraktes de i en dykkebasket.

Dykking anvendes både under konstruksjon og vedlikehold. Førstkommende dykkeoperasjon vil være å koble stigerør (*risere*) fra sjøbunnens koblingsrør (*closing spools*) til produksjonsanlegget om bord på FPSO-en. Som nevnt vil dette foregå på Raia-feltet utenfor kysten av Brasil. Her vil det være et dyp på om lag 2900 meter, og basketen skal senkes ned til cirka 10 meters dyp for å utføre koblingene. Normalt sett opererer basketer på maksimalt 50 meters dyp.

Dykkere som opererte i forbindelse med oljevirkosomheten i Nordsjøen fra 1965 til 1989, betegnes ofte som pionerdykkerne, selv om det ble dykket i Nordsjøen både før og etter denne perioden [3]. Totalt var det 17 omkomne fra norsk sektor i denne perioden [3]. Ulykkene avslørte svikt i både prosedyrer og utstyr, men i dag er sikkerheten blitt bedre grunnet innførelse av lovverk og industristandarder, som NORSOK U-100 i 1993 [4].

Dykkebasketen heises opp og ned ved hjelp av et system som kalles LARS (*Launch And Recovery System*). Systemet består av en plattform på dekk utstyrt med rammekonstruksjon, vinsjer, elektrisk-hydraulisk motor og pumpe, som vist nedenfor i Figur 1. På FPSO Raia er systemet levert av SMP (*Submarine Manufacturing and Products Limited*), og den er konstruert i henhold til DNV (*Det Norske Veritas*)-standarder DNV-ST-0378 [5] og DNV-OS-E402 [6]. Standarder skal følges for at systemet skal kunne operere både lovlig og trygt gjennom DNV's *Marine Warranty Surveyor*-godkjenning. Dette gjelder på selve dykkebasketen også, som er fokusområdet for denne oppgaven. I dykkebasketen befinner det seg dykkere, gasstanker og umbilical kveiler, hvor alt blir senket ned og utsatt for havets krefter. Se Figur 1 for illustrasjon av LARS og dykkebasket.



(a) LARS fra SMP [7].



(b) Basket fra dykkerutdanningen på Skålevik.

Figur 1: LARS og dykkebasket.

Tidligere analyser på dykkebasketer finnes det lite av, men analyser av ROV-er (*Remotely Operated Vehicle*) har flere likheter. R. Gabl et al. skriver i artikkelen “*Hydrodynamic loads on restrained ROV under waves and current*” at ROV-er har et bredt spekter av maritime bruksområder, inkludert reparasjon og vedlikehold [8]. Videre påpekes det at kvantifisering av hydrodynamiske belastninger er viktig for design og kontroll av disse ROV-ene. Dette kan også overføres til en slik dykkebasket, som med sine dykkere skal ned og utføre liknende arbeid og blir utsatt for de samme hydrodynamiske belastningene. Det er altså behov for en dynamisk analyse av dykkebasketen i heiseoperasjoner fra FPSO-en, i forkant av Equinors prosjekt på Raia-feltet.

1.2 Problemstilling

I dette bachelorprosjektet anvendes hydrodynamisk teori på et praktisk problem. Rapporten beskriver en dynamisk analyse av en dykkebasket i ulike sjøtilstander under heiseoperasjon fra FPSO Raia. Basketen skal heises gjennom vannoverflaten og ned til cirka 10 meters dyp. Analysen utføres med den hensikt å bestemme operasjonsbegrensninger for denne heiseoperasjonen, og til dette benyttes *slack sling criteria*. Dette er et kriterium som beskriver et fenomen der kranwiren opplever slakk, og som følger av dette kan det oppstå uønskede rykk i basketen. Dermed analyseres det for når *slack sling* kriteriet inntreffer, som en indikasjon på hvor operasjonsbegrensningene ligger. I tillegg foretas det analyser i enkelte sjøtilstander fra erfaringsbasert data fra FPSO MW-31, der dykking måtte avbrytes. Fysiske påkjenninger i kranwire og i vann undersøkes for sammenlikning.

Formulert i et spørsmål, skal denne bacheloroppgaven besvare problemstillingen; ”Hva er operasjonsbegrensningene for heiseoperasjonen av dykkebasketen fra FPSO Raia i ulike sjøtilstander?”. I rapporten benyttes kriterier og metoder fra DNVs forenklede metode i kombinasjon med OrcaFlex analyser. Begrensende sjøtilstander vurderes etter *slack sling* kriteriet, og det sammenliknes resultater fra erfaringsbasert dykking til å støtte argumentasjonen i diskusjons- og konklusjonsseksjonene. Fra et industrielt perspektiv er en problemstilling som denne viktig å belyse, da det er ønskelig at utstyret som brukes i operasjonen opptrer forutsigbart. Dette legger grunnlag for sikker utførelse av operasjonen.

1.3 Rapportens struktur

Rapporten presenterer seksjoner bestående av teori, programvare, metode, resultater, diskusjon, konklusjon og videre arbeid. Teoriseksjonen redegjør for bølge teori, hydrodynamiske krefter og koeffisienter, effekten av perforasjon og *slack sling* kriteriet. Kapittelet om programvare presenterer programvarer som er benyttet for å besvare problemstillingen. Metodeseksjonen beskriver forenkling og diskretisering av dykkebasketen, modellering og simulering i OrcaFlex, og automatisering av forsøkene i MATLAB. I resultatseksjonen presenteres resultatene som *heatmaps* med verdier som forteller om *slack sling* kriteriet er oppnådd. Videre undersøkes det nærmere på erfaringsbasert dykk i sjøtilstander på grensen til gjennomførbare dykk. Her presenteres partikkelhastigheten, strekkraften og basketen sin posisjon for de utvalgte sjøtilstandene. Diskusjonsseksjonen tar for seg sertifisering av marine løfteoperasjoner, forenklingers betydning for resultatene og operasjonsbegrensninger ut i fra resultatene. I konklusjonsseksjonen besvares problemstillingen, og rapporten avsluttes med seksjonen for videre arbeid.

2 Teori

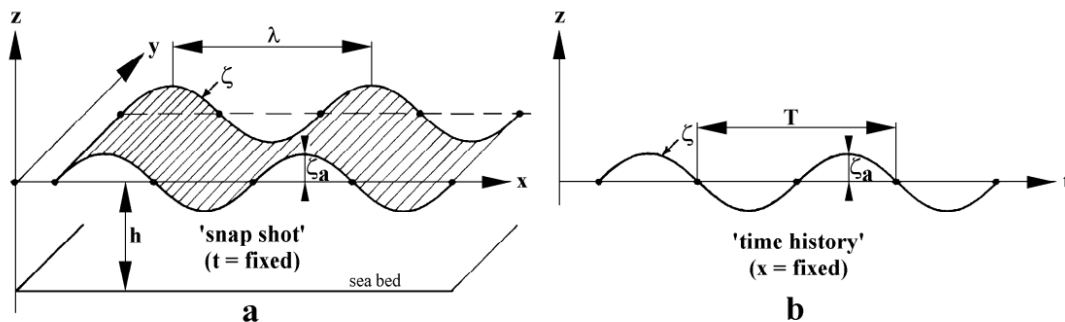
I dette kapittelet presenteres den relevante teorien for prosjektet. Kapittelet introduseres med bølge teori, herunder lineær bølge teori, potensialteori, irregulære bølger, bølgespekter og RAO. Dette føres videre av hydrodynamiske krefter, hvor Morrison-likningen, slammings- og oppdriftskraft beskrives. Deretter presenteres hydrodynamiske koeffisienter for drag, masse og slammings. I relevans med koeffisienter, presenteres effekten av perforasjon deretter. Avslutningsvis fremlegges teorien og prinsipper bak *slack sling* kriteriet.

2.1 Bølge teori

Bølger har stor påvirkning på hvordan et neddykket objekt beveger seg, og de er en av de viktigste kraftbidragene. Bølger deles inn i to grupper, regulære og irregulære bølger. Et kortfattet skille kan være at regulære bølger fremstår som ideelle, mens irregulære mer kaotiske og virkelighetspreget.

2.1.1 Linær bølge teori

En regulærbølge beskrives av lineær bølge teori, og kan anvendes om en antar at bølgehøyden er mye mindre enn det relative vanddypet, $H \ll \lambda/h$, der H er bølgehøyden, λ er bølgelengden, og h er dypgangen. Disse bølgene er harmoniske og kan fremstilles som kontinuerlige sinus- eller cosinusbølger med konstante periodiske svingninger. En illustrasjon av en regulær bølge er vist i Figur 2 under.



Figur 2: Harmoniske bølger [9].

Her illustrerer Figur 2a en regulær bølgeprofil i XYZ-planet, som en funksjon av bølgelengden og -høyden på et gitt tidspunkt. I Figur 2b fremstilles en bølgeprofil som funksjon av tiden. Bølgeprofilen for en regulærbølge kan beskrives av funksjonen gitt ved:

$$\zeta(t, x) = \zeta_a \sin(\omega t - kx) \quad (1)$$

Der ζ_a er bølgeamplituden, ω er bølgefrequensen, k er bølgetallet og x er avstanden fra z-aksen.

2.1.2 Potensialteori

For å avgjøre kraften som virker på et neddykket objekt fra en bølge, blir partikkelbevegelsene og det dynamiske trykket relevant. Formelen for de sistnevnte kan utledes fra formelen for hastighetspotensialet til en bølge på dypt vann [9], som er gitt ved:

$$\Phi(t, x, z) = \frac{\zeta_a g}{\omega} e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2)$$

Her er z avstanden fra havoverflaten. Fra denne likningen utledes formler for partikkelhastighet (v_f), -akselerasjon (a_f) og dynamisk trykk (p_{dyn}). Disse er hhv. gitt ved:

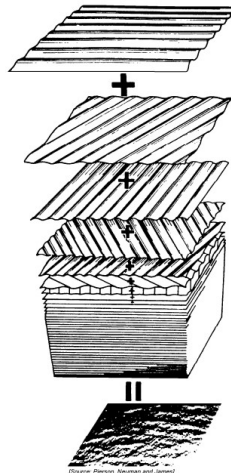
$$v_f = \omega \zeta_a e^{kz} \cos(\omega t - kx) \quad (3)$$

$$a_f = \omega^2 \zeta_a e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (4)$$

$$p_{dyn} = -\rho g z + \rho g \zeta_a^2 e^{2kz} \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

2.1.3 Irregulære bølger

For å danne et realistisk bilde av bølger og deres krefter, henvises det til irregulære bølger. Disse bølgene kan ikke defineres med en fast amplitude, frekvens eller fase, men heller som en samling av flere regulære bølger. Her har alle hver sin unike amplitude, frekvens og fase, som er illustrert i Figur 3. Dette fenomenet kalles lineær superposisjon [9].

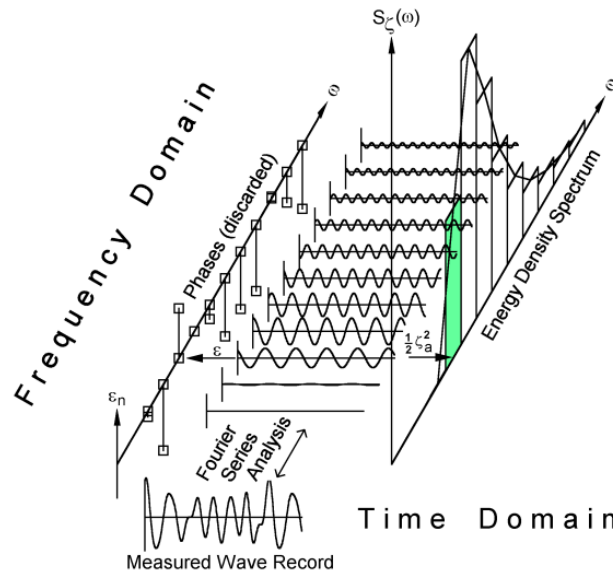


Figur 3: Lineær superposisjon. Illustrert ved flere regulære bølger som danner en irregulær bølge [9].

Det kan være enkelte bølgeperioder (frekvenser) som dominerer, slik at samsvarende bølgehevinger er mer fremtredde enn andre. En irregulær sjøtilstand blir gjerne representert ved hjelp av et bølgespekter, som beskrives i påfølgende kapittel 2.1.4.

2.1.4 Bølgespekter

For å kunne beskrive energien til en sjøtilstand med flere irregulære bølger, brukes det et bølgespekter. Til dette benyttes en Fourier serie-analyse. Dette er en matematisk presentasjon av en periodisk funksjon som en sum av uendelige sinus- og cosinusbølger, der alle bølger har egen frekvens, amplitude og fase i frekvensområde [10]. Dette indikerer forskjellige energinivå. Figur 4 illustrerer sammenhengen mellom bølger og bølgespekter.



Figur 4: Sammenheng mellom bølger og bølgespekter [9].

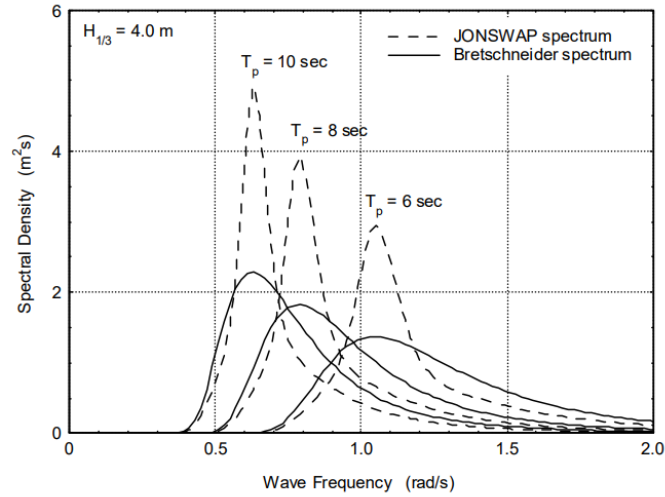
Bølgespekteret velges ut ifra det geografiske området, lokal vanndybde og den aktuelle sjøtilstanden. Et av de vanligste spektrene er Pierson Moskowitz-spekteret (*PM-spekter*). Dette er en justering av Bretschneider-spekteret, og er best egnet til en fullt utviklet sjøtilstand der bølgene har fått en fast tilstand under konstante vindforhold. Bølgespekteret kan beskrives av formelen gitt ved [11]:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \quad (6)$$

Der H_s er den signifikante bølgehøyden, som indikerer gjennomsnittet av den høyeste tredjedelen av bølgene, og ω_p er spekterets toppvinkelfrekvens. Et annet bølgespekter er JONSWAP-spekteret (*Joint North Sea Wave Project*), som er resultatet av flere bølgemålinger i Nordsjøen. JONSWAP er en forlengelse av PM-spekteret, der målingene multipliseres med en faktor γ og får en skarpere topp enn i ved bruk av PM. Dette spekteret er designet for å beskrive bølgeforholdene i Nordsjøen, og kan utledes fra formelen gitt ved:

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma \exp\left(-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma - \omega_p}\right)^2\right) \quad (7)$$

Hvor normaliseringsfaktoren A_γ er gitt som $A_\gamma = 1 - 0.287 \ln(\gamma)$, der γ er spekterets ikke-dimensjonale spissparameter og σ er spekterets breddeparameter. En sammenheng mellom bølgespektrene er vist under i Figur 5.



Figur 5: Sammenheng mellom JONSWAP- og Bretschneider-spekter [9].

For et bølgespekter er det mulig å se på dens moment. Momenter anvendes for å identifisere sentrale parameter i en sjøtilstand som signifikant bølgehøyde, H_s , topperioden, T_p , og nulloppekrysningsperiode, T_z . Momentet til et bølgespekter kan utledes av formelen gitt ved:

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega_n \quad (8)$$

Hvor n , er momentets grad. Dette kan videre brukes til å finne H_s ved nullte moment, og T_z ved andremoment, som hhv. er gitt ved:

$$H_s = H_{m0} = 4\sqrt{M_0} \quad (9)$$

$$T_z = T_{m02} = 2\pi\sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (10)$$

2.1.5 Response Amplitude Operator

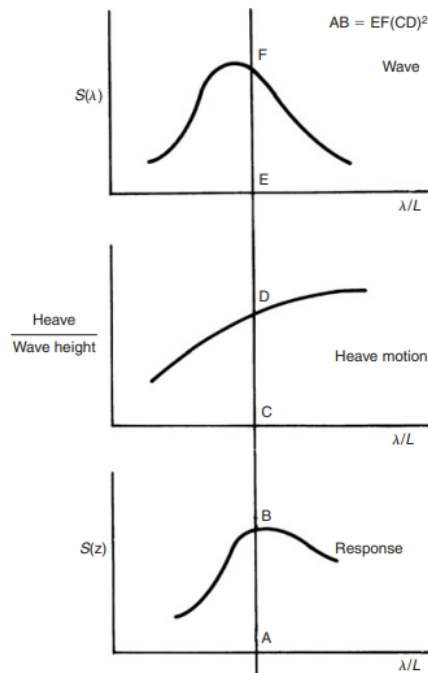
RAO (*Response amplitude operator*) benyttes til å beskrive et fartøys respons på bølgefrequenser [9]. Det kan utledes i frekvensdomenet som en transferfunksjon mellom retningsbølgespekter og bevegelsesspekter til fartøyet gitt ved:

$$|H(\omega)|^2 = \left(\frac{\gamma(\omega)}{\chi(\omega)} \right)^2 \quad (11)$$

Der $H(\omega)$ er transferfunksjonen, $\gamma(\omega)$ er inputverdier og $\chi(\omega)$ er output verdier. For en irregulær sjøtilstand, kan responspekteret beskrives som produktet mellom aktuelt bølgespekter og fartøyets RAO. Hvordan fartøyet da responderer vil være gitt ved:

$$S_R(\omega) = S_w(\omega) \times |H(\omega)|^2 \quad (12)$$

Sammenhengen her og påfølgende resultat er illustrert nedenfor i Figur 6. Punkt F i bølgespekteret og samsvarende punkt D i RAO-en resulterer i en respons B i responspekteret.



Figur 6: Bølgespekter, hiv-bevegelse fra RAO og resulterende responspekter [12].

2.2 Hydrodynamiske krefter

Hydrodynamiske krefter oppstår som følge av væskestrømning og krefter omkring et objekt, der væske og objekt beveger seg i forhold til hverandre. Typiske hydrodynamiske krefter er drag-, masse-, slamming- og oppdriftskraften. Disse er relevante for gjeldende bachelorprosjekt og presenteres i denne seksjonen av rapporten.

2.2.1 Morrison-likningen

Kraften som virker på et sylindrisk legeme, fra ubrutte overflatebølger, og som strekker seg fra bunnen og over bølgetoppen, består av to hovedkomponenter. Den første er dragkraft, som er proporsjonal med kvadratet på strømningshastigheten. Den andre er en virtuell massekraft, som er proporsjonal med den horisontale komponenten av akselerasjonskraften som virker på den fortrenkte vannmassen [13]. Dette er bakgrunnen for utledningen av Morrison-likningen, som er gitt ved:

$$f = C_M \Delta a_f + \frac{1}{2} C_D A_p |v_f| v_f \quad (13)$$

Der f er kraft på legemet, C_M er massekoeffisienten, Δ er fortrenkt vannmasse, og a_f er partikkelakselerasjon. Produktet av de tre sistnevnte utgjør massekraften, F_M , som da er gitt ved:

$$F_M = C_M \Delta a_f \quad (14)$$

Det andre leddet i summasjonen består av vannets tetthet ρ , dragkoeffisienten C_D , projisert areal A_p , og partikkelhastigheten v_f . Produktet av disse utgjør dragkraften, F_D , som følgende blir gitt ved:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A_p |v_f| v_f \quad (15)$$

For å beskrive kraften på et legeme i bevegelse, benyttes en utvidet form av Morrison-likningen [14]. Det er denne som anvendes i programmet OrcaFlex, som er brukt som analyseprogram i dette prosjektet. Den utvidede formelen er gitt ved:

$$f = (\Delta a_f + C_A \Delta a_r) + \frac{1}{2} \rho C_D A_p |v_r| v_r \quad (16)$$

Hvor den ordinære massekraften er fratrukket $C_A \Delta a_r$, og deretter omskrevet og forenklet. Her dannes en koeffisient for tilleggsmasse $C_A = C_M - 1$. Akselerasjonen og hastigheten, henholdsvis a_r og v_r , er nå relative til legemets bevegelse.

2.2.2 Slamming- og oppdriftskraft

Slamming oppstår når et legeme treffer vannoverflaten, eller når en vannmasse treffer et legeme med stor hastighet. Dette fører til en plutselig økning i trykk på kontaktoverflaten, som kan føre til en belastning på strukturen [15]. Slamming kan forekomme under operasjoner hvor objekter senkes gjennom skvalpesonen, et område nær vannoverflaten hvor bølger og partikkelbevegelser er mest intense. Kraften for slamming er gitt ved:

$$F_{slam} = \frac{1}{2} \rho C_S A_p v_s^2 \quad (17)$$

Hvor C_S representerer slammingkoeffisienten, og v_s er hastigheten objektet treffer vannet med.

Ved endring i dypgang, vil også oppdriftskraften for et delvis eller helt nedsenket objekt endres. Oppdriftskraften er da gitt ved [16]:

$$F_\rho = \rho \delta V g \quad (18)$$

Der δV er endringen i neddykket volum.

2.3 Hydrodynamiske koeffisienter

Generelt sett vil hydrodynamiske koeffisienter være avhengige av faktorer som geometri, Reynolds- og Keulegan-Carpenters-tall. De vil også være avhengige av strømmingens karakter og hastighet samt oscillasjonseffekter, der dimensjonsløse tall benyttes for å karakterisere strømmingen. I tillegg kan også legemets helningsvinkel, overflateruhet og perforasjonsforhold ha innvirkning. Drag-, slamming-, og massekoeffisienten (C_D, C_S, C_M) bestemmes ofte empirisk og analytisk, men det kan også være utfordrende, da neddykkede legemer kan bestå av sammensatte, komplekse geometrier. For å bestemme koeffisienter med nøyaktige verdier, bør eksperimentell metode benyttes gjennom modellforsøk [16] (3.3.3.2). DNV har anvendt diverse akademisk forskning og eksperimentelle data til standardisering av metoder og tabeller, og hydrodynamiske koeffisienter er stort sett basert på empiriske data fra forsøk.

2.3.1 Massekoeffisient C_M

Massekoeffisient, C_M , tar høyde for effekten av vannmassen som legemet forflytter i dets akselerasjon. I OrcaFlex benyttes tilleggsmassekoeffisient C_A til input, og C_M beregnes til å være lik $1 + C_A$ [17]. For bestemmelse av C_A -verdier for translasjon i x-, y- og z-retning, benyttes DNVs forenklete metode. I Tabell A-2 i DNV-RP-N103 er det antatt at tilleggsmassekoeffisientene anvendes på 3-dimensjonale legemer på uendelig dyp. To referanse geometrier fra denne tabellen er relevant for gjeldende prosjekt. Den første er “*Flat rectangular plate*” med bredde b og lengde a , der forholdet b/a angir estimatet for C_A -verdien. Den andre er “*Right circular cylinder*” med radius a og lengde b , der forholdet $b/2a$ angir C_A -estimatet [16](Tabell A-2).

2.3.2 Drag koeffisient C_D

Dragkoeffisient er avhengig av legemets geometri, Reynolds tall og overflateruhet. Økt drag kommer som følger av et lite strømlinjeformet profil. Formelen for dragkoeffisient C_D er gitt ved:

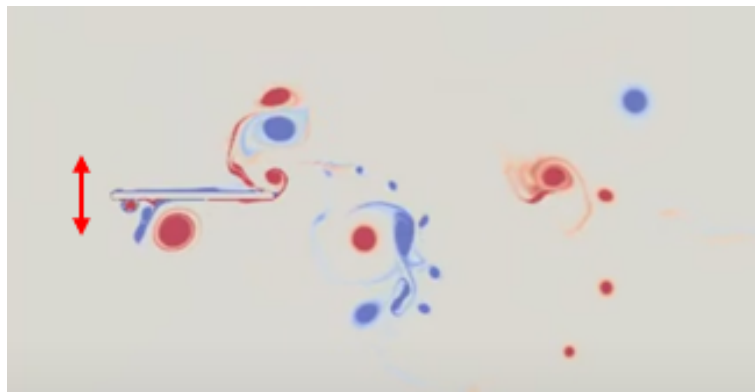
$$C_D = \frac{f_{drag}}{\frac{1}{2}\rho Dv^2} \quad (19)$$

Der f_{drag} er dragkraften, ρ er vannets tetthet, D er diameter, og v er strømmingens hastighet. Utenom eksperimentell metode, foreslår DNV-RP-N103 (4.6.2.4) C_D -verdier på minst 2.5 for neddykkede strukturer i oscillerende strømming. I tabell B-1 og B-2 [16] er det oppgitt dragkoeffisienter for 3-dimensjonale objekter i stasjonær strømming, C_{DS} . Relevante geometrier for gjeldende prosjekt er “*Rectangular plate normal to flow direction*”, og “*Circular cylinder normal to flow*”. Videre følges det opp i 4.6.2.5 at for lange slanke legemer vil en doblet dragkoeffisient i stasjonær strømming C_{DS} være anvendelig, dersom hydrodynamiske interaksjonseffekter ikke er til stede [16](4.6.2.5).

I oscillerende strømming vil dragkoeffisient variere med Keulegan-Carpenters tall, også kjent som KC-tall. Dette er et dimensjonsløst mål på tilbakelagt avstand til en fluidpartikkel over en halv oscillasjonsperiode relativt til objektets diameter eller bredde [16](3.2.8.2). KC-tallet benyttes for å bestemme om strømmingen er stasjonær eller oscillerende. Formelen for KC-tallet kan variere noe i parametere, og er for gjeldene bachelorprosjekt gitt ved:

$$KC = \frac{v_z T}{D} \quad (20)$$

Der v_z er maks vertikale partikkelhastighet, T er den minste perioden, og D dimensjonerende diameter eller bredde. Ved $0 < KC < 10$ vil objektet treffe virvlene som dannes under oscillasjonen, men kun umiddelbart ved retningsskifte i ytterpunktene i bevegelsesbanene. Oscillasjonseffekter er da tilstede, og dragkoeffisient C_D vil da få en sterk økning i forhold til C_{DS} ved stasjonær strømming [16](3.2.8.5). Men ved veldig høye KC-tall ($\gg 10$) vil ikke objektet treffe virvlene under tilbakesvingning, og oscillasjonseffekten neglisjeres. I dette tilfellet, vil en lavere dragkoeffisient på nivå med C_{DS} være anvendelig [16](3.2.8.5). Figur 7 nedenfor er en illustrasjon av oscillasjon med virvelgenerering.



Figur 7: Virvelgenerering ved oscillerende plate [18].

2.3.3 Slammingkoeffisient C_S

Slammingkoeffisient, C_S , er et dimensjonsløst tall som representerer endring i tilleggsmassen i skvalpesonen. Koeffisienten er størst når objektet treffer vannoverflaten, og reduseres over tid [15]. Formelen for C_S er gitt ved:

$$C_S = \frac{2}{\rho A_p} \frac{dA_{33}^{\infty}}{dt} \quad (21)$$

Hvor dA_{33}^{∞} er den øyeblikkelige høyfrekvente grensa for tilleggsmassen i z-retning, mens $\frac{dA_{33}^{\infty}}{dt}$ er endringen i tilleggsmassen over tid [16].

2.4 Effekt av perforasjon

En perforert flate vil ha en perforasjonsfaktor, p , som er definert som perforert areal delt på det totale arealet [16](3.3.4.2), og er oppgitt i prosent. Perforasjonen vil redusere projisert areal, samtidig som det vil ha innvirkning på tilleggsmasse- og koeffisient, dragkoeffisient og slammingkoeffisient. Innvirkningen på tilleggsmassen kan estimeres ved:

$$A_{33} = A_{33S} \quad \text{if} \quad p \leq 5 \quad (22)$$

$$A_{33} = A_{33S} \left(0.7 + 0.3 \cos \left[\frac{\pi(p-5)}{34} \right] \right) \quad \text{if} \quad 5 < p < 34 \quad (23)$$

$$A_{33} = A_{33S} e^{\frac{10-p}{28}} \quad \text{if} \quad 34 \leq p \leq 50 \quad (24)$$

Der A_{33S} er tilleggsmasse i hiv for ikke-perforerte strukturer [16](4.6.4.1). En spesifikk metode for å korrigere tilleggsmasse som funksjon av perforasjon fungerer slik at leddet som ganges med A_{33S} benyttes som perforasjons-korreksjonsfaktor, PFC . Denne multipliseres med tilleggsmassekoeffisienten for å involvere effekten av perforasjon i en dimensjonsløs koeffisient.

2.5 Slack sling

En marin heiseoperasjon utføres normalt sett med en kranwire og løftestropper. Stroppe kan ikke komprimeres og de gir bare strekk. Derfor kan de bli utsatt for slakk under løftet, noe som oppstår når det ikke er spenning i løftewiren. Dette kan oppstå som følge av at de hydrodynamiske kreftene oppover understiger den minste vekten til objektet som heises ned, altså når objektet er fullt neddykket. Kriteriet *slack sling* er en konservativ betingelsesmodell som viser at fenomenet oppstår når de hydrodynamiske kreftene tilsvarer 90% av den neddykkede vekten. Dette er en konservativ, industriell veiledning, og medfører ikke garanti for slakk i kranwiren. Formelen for *slack sling* er gitt ved [16]:

$$F_{hyd} \leq 0.9F_{static-min} \quad (25)$$

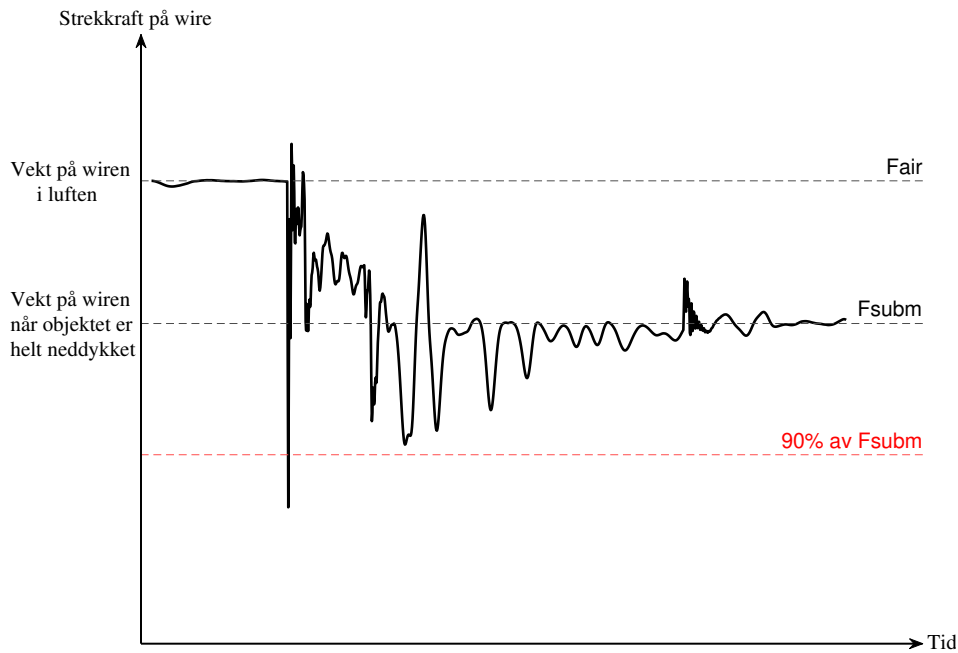
Der den minste statiske kraften kan beregnes ved:

$$F_{static-min} = M_{min}g - \rho Vg \quad (26)$$

Hvor M_{min} er objektets neddykkede vekt. Videre er den hydrodynamiske kraften er gitt ved:

$$F_{hyd} = \sqrt{(F_D + F_{slam})^2 + (F_M - F_\rho)^2} \quad (27)$$

En kritisk fase i heiseoperasjonen er i skvalpesonen, da objektet senkes ned i vannet. Dette fordi de hydrodynamiske kreftene vil være størst her, ettersom slamming oppstår, og vil være dominerende. En visuell presentasjon av *slack sling* fenomenet er illustrert nedenfor i Figur 8.



Figur 8: Illustrert eksempel på *slack sling* fenomenet.

Om *slack sling* skulle oppstå, kan det følgelig forekomme rykk i selve basketen. Dette vil potensielt utsette dykkeoperasjonen for fare, ved enten skade på dykker eller utstyret. Det er derfor ønskelig å unngå dette fenomenet.

3 Programvare

I denne bacheloroppgaven er det benyttet diverse programvare for å løse problemstillingen, herunder SolidWorks, OrcaFlex og MATLAB. Programmernes funksjoner og teorien bak blir presentert i denne seksjonen av rapporten.

3.1 SolidWorks

SolidWorks er en anerkjent CAD (*Computer-Aided Design*) programvare for ingeniørindustrien. Programvaren bruker parametrisk design, som gjør det mulig for brukeren å se hvordan endringer påvirker hele strukturen [19]. SolidWorks benyttes i denne oppgaven for å generere tekniske tegninger og 3D-modelleringer av basketen. Programvarens funksjoner for å hente ut basketens egenskaper benyttes også. Massesenter beregnes ved tyngdepunktssatsen som er gitt ved:

$$X_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (28)$$

$$Y_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (29)$$

$$Z_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (30)$$

Der massesenterets koordinater beregnes for x, y og z ved å multiplisere de forskjellige delenes respektive masse og senter, og deretter dele denne summen på den totale massen. Massetregghetsmomentene om x-, y- og z-aksen beregnes i formler som er gitt ved:

$$I_{xx} = \int (y^2 + z^2) dm \quad (31)$$

$$I_{yy} = \int (z^2 + x^2) dm \quad (32)$$

$$I_{zz} = \int (x^2 + y^2) dm \quad (33)$$

3.2 OrcaFlex

OrcaFlex er benyttet som analyseprogram for simulering av dykkebasketen i heiseoperasjoner. Programvaren gjennomfører statiske og dynamiske analyser av maritime systemer i tidsdomenet. Programmet er levert av selskapet Orcina, og ble grunnlagt i 1986. Teorien bak OrcaFlex er beskrevet i denne seksjonen, og er sammen med inkluderte bilder hentet fra Orcinas brukermanual til programmet [20].

3.2.1 Analyse

OrcaFlex utfører statisk og dynamiske analyser. Den statiske avgjør systemets likevekts posisjon, som videre brukes i den dynamiske analysen. Den dynamiske deles inn i to faser, en oppbyggingsfase og selve simuleringen. Oppbyggingsfasen gir systemet og omgivelsene tid til å utvikle seg fra statisk til en fullt utviklet tilstand. Dette reduserer overgangene i transformasjonen mellom statisk og dynamisk tilstand. Varigheten av oppbyggingsfasen settes til minimum en bølgeperiode.

Den andre fasen av den dynamiske analysen er selve simuleringen, og er beskrevet av bevegelseslikningen. Beregningene av den dynamiske likningen gjennomføres ved eksplisitt eller implisitt integrasjon, der begge metodene bruker startverdiene fra den statiske analysen. Dette brukes for å beregne akselerasjonen til systemet, for så finne krefter og momentet som virker på hver node i systemet, innenfor et tidsintervall. Bevegelseslikningen er gitt ved:

$$M\ddot{x} = F - B\dot{x} - Kx \quad (34)$$

Eksplisitt integrering bruker Eulers integrasjonsmetode med et konstant tidsintervall. Her løses bevegelseslikningen for hvert intervall, til det er etablert en fullverdig tidsanalyse. Ved denne metoden er OrcaFlex avhengig av å vite nodenes plassering og orientering, i hele tidsintervallet. Om dette er ukjent kan implisitt integrasjon anvendes for å løse bevegelseslikningen. Her kreves det en iterativ beregning for hvert tidsintervall, som fører til at den implisitte metoden er mer tidkrevende. Den gir igjen en mer stabil analyse for lengre tidsintervall enn den eksplisitte metoden.

3.2.2 Bølgespekter

OrcaFlex genererer bølger som enten regulære eller irregulære bølger. For å beskrive irregulære bølger har OrcaFlex fem ulike bølgespekter; JONSWAP, ISSC (Pierson-Moskowitz), Ochi-Hubble, Torsethaugen og Gaussian swell. Sentrale parameter i bølgespektrene er signifikant bølgehøyde H_s , topperioden T_p og nulloppekrysningsperiode T_z . Teorien til spektrene er beskrevet i seksjon 2.1.4.

3.2.3 Koordinatsystem

OrcaFlex opererer med to koordinatsystem, et globalt og et lokalt. Det globale koordinatsystemet betegnes ved aksene GX , GY og GZ , og definerer hele systemet. Hvert objekt får sitt eget lokale koordinatsystem, som betegnes ved aksene LX , LY og LZ . Begge koordinatsystemene er høyreorientert, med positiv rotasjon med klokken.

3.2.4 Objekt

OrcaFlex har flere innebygde kommandoer som brukes til å modellere typiske maritime objekter. Blant disse, benyttes *Vessel*, *6D-Buoy*, *3D-buoy* og *line* i gjeldende bachelorprosjekt.

Vessel *Vessel* brukes for å illustrere et fartøy, semi-sub eller andre flytende konstruksjoner. Fartøyet kan bevege seg fritt i alle seks frihetsgradene, herunder tre translasjoner og tre rotasjoner. Bevegelsene styres av høy- og lavfrekvente bevegelser som er forårsaket av responsen fra bølgelasten og langsomme drivbevegelser.

6D-buoy *6D-buoy* er et fast objekt, som ikke kan deformeres eller endre form. Den kan bevege seg fritt i alle seks frihetsgrader, i motsetning til *3D-buoy*, som bare kan beveges i tre translasjoner. Kraftene som virker på slike *buoys* beregnes ved Morrison-likningen som er beskrevet i seksjon 2.2.1. Vekten til en *buoy* er gitt ved:

$$f_w = -mgu_z \quad (35)$$

Hvor m er masse, g er tyngdeakselerasjonen, og u_z er enhetsvektoren som virker vertikalt oppover.

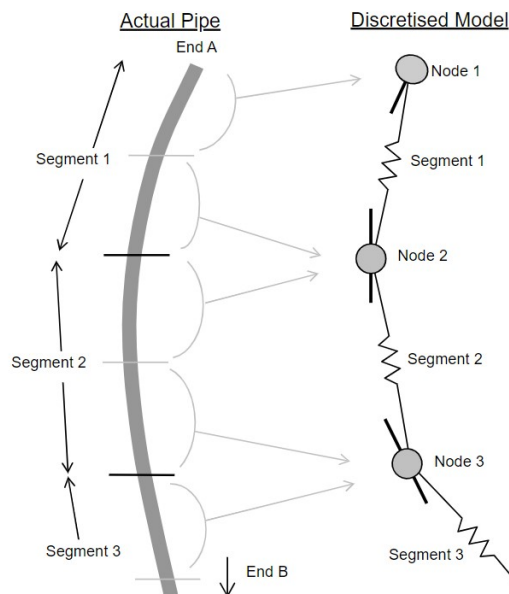
OrcaFlex har tre ulike *6D-buoy*; *lumped buoy*, *spar buoy* og *towed fish*. De to førstnevnte er mest relevant for gjeldende bachelorprosjekt. *Lumped buoy* er definert uten detaljert geometri, derfor er det ingen stivhet i rull- og stampbevegelser.

Når oppdriften beregnes, blir *buoyen* behandlet som en vertikal stav, der lengden er lik høyden som er angitt. Oppdriften endres lineært med dens vertikale posisjon, uten å betrakte orienteringen. Oppdriften for *lumped buoy* er gitt ved:

$$f_b = \rho g V_{wet} u_z \quad (36)$$

V_{wet} er det neddykkete volumet til *buoyen*, som OrcaFlex finner ved å se på hvor mye av høyden, h , som er neddykket i vannet. Denne faktoren multipliseres så med volumet for å finne det neddykkede volumet. Angrepspunktet til kraften er senteret til det neddykkede volumet. *Spar buoy* består av flere sylindere som er plassert oppå hverandre, noe som gir en definert geometri. Oppdriften og de hydrodynamiske kreftene beregnes for hver sylinder og gir en bedre tilnærming på hvordan *buoyen* responderer. Siden prosjektet omhandler en overgang fra luft til vann, er det nødvendig å se på kraften som oppstår i skvalpesonen. Formelen for denne er gitt i Formel 17. For *lumped buoy* blir det projiserte arealet (*slam area*) lagt inn manuelt, mens for *spar buoy* vises det nøyaktig og varierer med tiden. Dette fordi *spar buoy* har en definert geometri. Slamming koeffisienten C_S kan gis som en konstant, eller en variabel som varierer med tiden. OrcaFlex bruker også en enhetsvektor for å sikre at slamming motvirker objektets penetrering av overflaten.

Line I OrcaFlex deles *line* inn i ulike sekvenser med rette masseløse segmenter. Segmentet måler aksial og torsjonsegenskapene til wiren, og har en node i hver ende. Nodene måler vekt, oppdrift og de hydrodynamiske kreftene som oppstår. Figur 9 viser hvordan OrcaFlex setter opp noder og segmenter i en wire.



Figur 9: Segmenter og noder i *line*.

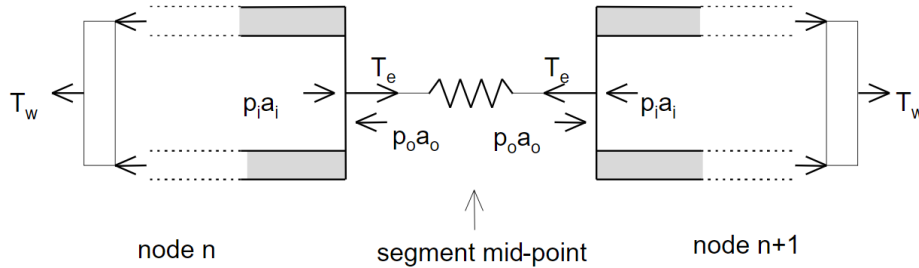
Line gjennomfører flere målinger, deriblant strekkraft. Dette beregnes ved å se på avstanden og endringsraten mellom nodene og segmentene, for så beregne strekkraften. OrcaFlex beregner strekkraft ved formelen:

$$T_e = T_w + (p_0 a_0 - p_i a_i) \quad (37)$$

Hvor p_0 og p_i er indre- og ytre trykk, a_0 og a_i er indre- og ytre tvernsnittsområde, T_e er effektiv strekkraft og T_w er veggspenning (*wall tension*). Sistnevnte kan utledes ved:

$$T_w = EA\epsilon - 2\nu(p_0a_0 - p_i a_i) + k_{tt} \frac{\tau}{l_0} + EA c \frac{dl}{dt} \frac{1}{l_0} \quad (38)$$

Her er EA aksial stivhet, ϵ er gjennomsnittlig strekk, ν er Poissons tall, k_{tt} er sammenhengen mellom strekk og torsjon, τ er vinkelen mellom segmentene, l_0 er den ustrukket lengde på segmentet, c er dempningskoeffisient for torsjon på wiren, og $\frac{dl}{dt}$ er endingen på lengden av wiren over tid. Sammenhengen mellom veggspenningen og effektiv strekkraft er illustrert i Figur 10.



Figur 10: Sammenheng mellom T_e og T_w i wiren.

3.3 MATLAB

MATLAB er en programvare som brukes til å programmere og behandle numeriske data. I dette prosjektet brukes det som en tredjepart i analysen gjennom API (*Application Programming Interface*). Simuleringene kjøres og varieres for ulike sjøtilstander i MATLAB. Det brukes også for å post-prosessere dataene fra analysene, og gir en visualisering av resultatene. Resultatene blir presentert med MATLABs innebygde kommando *heatmap*. Dette er en funksjon som bruker matriser til å presentere data for de ulike kombinasjoner av matrisene.

4 Metode

I denne seksjonen presenteres metode for prosjektets problemløsning. Gjeldende problemstilling for prosjektet angripes på følgende vis: Data på FPSO og basket innhentes, for så å benytte dette til å diskretisere basketen, og deretter modellere en forenklet modell i OrcaFlex. I OrcaFlex simuleres nedsenking av basketen i havet, hvor forsøk med forskjellige sjøtilstander automatiseres i MATLAB. Last på kabel og basket samt partikkelhastighet hentes ut og analyseres for å besvare problemstillingen. Dette kapittelet introduseres med beskrivelse av dykkebasketen. Dette følges opp av hvordan basketen er diskretisert, slik at den kan modelleres i analyseprogrammet OrcaFlex. Etter beskrivelse av modelleringen følger en gjennomgang av hvordan analysen settes opp og utføres, som følges videre av automatiseringen av testforsøk i MATLAB. Seksjonen avsluttes med anvendelse av erfaringsbasert dykking til forsøkene.

4.1 Reell dykkebasket

FPSO Raia er 339.50 meter lang. Med basketens lengde på 1.89 meter antas det at FPSO-ens bevegelse er upåvirket av basketen. Derimot er FPSO-ens bevegelse avhengig av fartøyets RAO. RAO-data som er brukt i modelleringen er tilsendt fra Equinor. Basketen er plassert på babord side av skipet, med utgangsposisjon gitt ved koordinatene som vist i Tabell 1 under.

Koordinat	Posisjon [m]
X	71
Y	45
Z	0

Tabell 1: Utgangsposisjon til basket i globalt koordinatsystem.

Origo for koordinatsystemet er midtskips, med $Z = 0$ ved havnivå. Positiv x-retning er forut, og positiv y-retning er mot babord. Det antas at basketens vertikale bevegelse følger kranenden.

Basketen er levert av SMP, og den er utstyrt med umbilical kveiler og gasstanker. Basketen er designet med perforert flate i bunn og topp, sidegjerder, et lite gjerdet på for- og bakside (ellers helt åpen), samt enkelte detaljer rundt på strukturen. Dimensjonene på lengde, bredde og høyde er hhv. 1.89, 1.34 og 2.315 meter. Basketen består hovedsakelig av S355 stål som har en tetthet på $7800\text{kg}/\text{m}^3$. Vekt på basket er som vist i Tabell 2 nedenfor.

Lastkondisjon	Vekt [kg]
Egenvekt	630
Maks nyttelast	500
Maks totallast	1130

Tabell 2: Basket vekt ved de ulike lastkondisjonene.

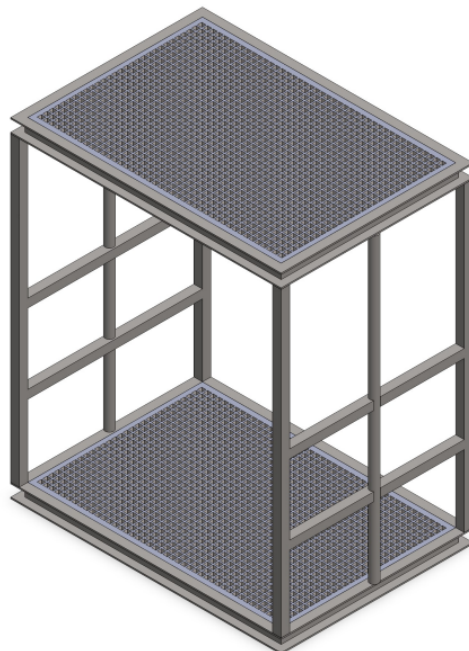
Et lodd på 500kg er koplet til LARS-systemet i stive kabler. Dette har innvirkning på stabilitet under nedsenking av basketen. Se Figur 11 nedenfor for bilder av dykkebasketen fra SMP.



Figur 11: Venstreside, framside og høyreside av dykkebasket hos dykkerutdanningen på Skålevik.

4.2 Forenklet dykkebasket

Detaljene i basketens struktur antas å ha neglisjerbare hydrodynamiske påvirkninger for basketen som helhet. Dette ble oppdaget ved første diskretisering, der små stenger i sidegjerdene ble inkludert, noe som belyste deres minimale påvirkning. Dette førte til beslutningen om en forenklet modell, som er modellert i SolidWorks. I denne modellen er basketen strippet for strukturdetaljer, som stenger med liten diameter, koplingspunkter, sveisepunkter og andre detaljer. Se Figur 12 nedenfor for illustrasjon av endelig forenklet modell som benyttes i diskretiseringen.



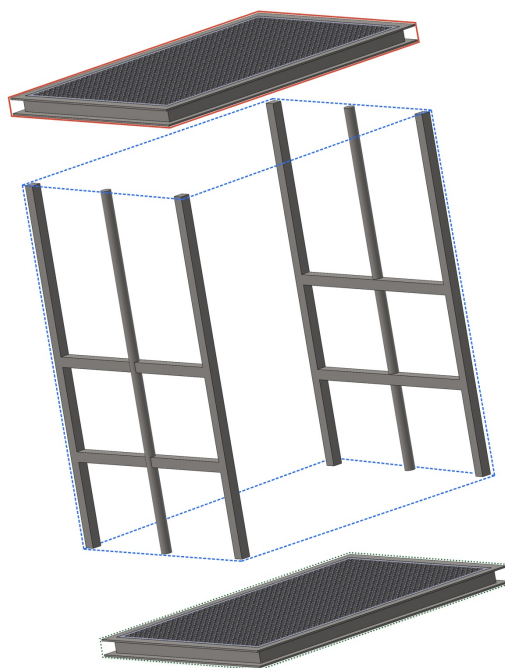
Figur 12: Forenklet basket modellert i SolidWorks.

Basketens ytre dimensjoner er lik det som er beskrevet i Kapittel 4.1 ovenfor. Ytterlige detaljerte mål på basketen er som vedlagt i SolidWorks tegningene i Vedlegg A.

Basketen er modellert i et forsøk på å oppnå den reelle egenvekten, altså 630kg . Dette oppnås ved å velge materialer på de forskjellige delene, slik at volumet som delen rommer ganget med tettheten utgjør en passende vekt. Derfor er hele strukturen modellert i S355J0 stål, med unntak av de perforerte flatene, som er i titan. Med dette resulterte egenvekten på 655kg . Det antas at modellen likevel er representativ for den reelle basketen. Modellstrukturen er ikke massiv, men hul. Likevel antas det at hulrommene ikke har noe bidrag til oppdriftskraft når den er neddykket.

4.3 Diskretisering av dykkebasket

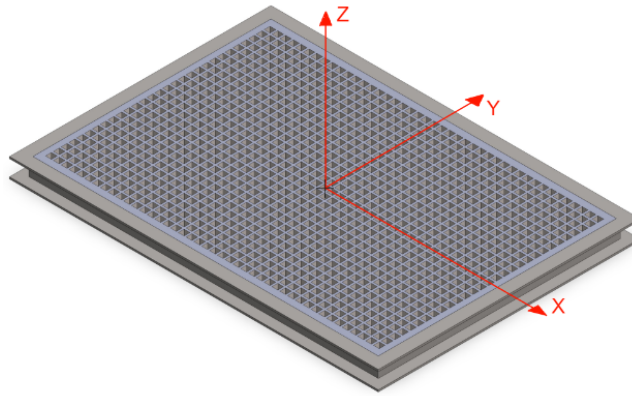
For diskretiseringen av dykkebasketen, er den delt opp i tre deler; topplate, midtparti og bunnplate. Hydrodynamiske egenskaper som dragareal, tilleggsmassekoeffisient, dragkoeffisient, volum og volumsenter, masse og massesenter, og massetregghetsmomenter beregnes og bestemmes hver for seg i alle translasjonsretninger (X , Y og Z) for de tre delene. Ved å dele opp basketen i flere deler kan verdiene for de hydrodynamiske egenskapene være nærmere de reelle verdiene for basketen, men det byr på utfordringer ettersom det krever en mer kompleks modell i OrcaFlex. Dersom basketen behandles som ett enkelt element, byr dette også på utfordringer ved beregning og bestemmelse av for eksempel hydrodynamiske koeffisienter. Dermed konkluderes det med at en inndeling i tre deler resulterer i en balanse av god nøyaktighet og modelleringsvennlighet. En illustrasjon av inndelingen er vist i Figur 13 nedenfor. I dette kapitlet blir diskretiseringen av de tre delene presentert under hvert sitt delkapittel, topplate, midtparti, og bunnplate.



Figur 13: Inndeling for diskretisering av dykkebasket.

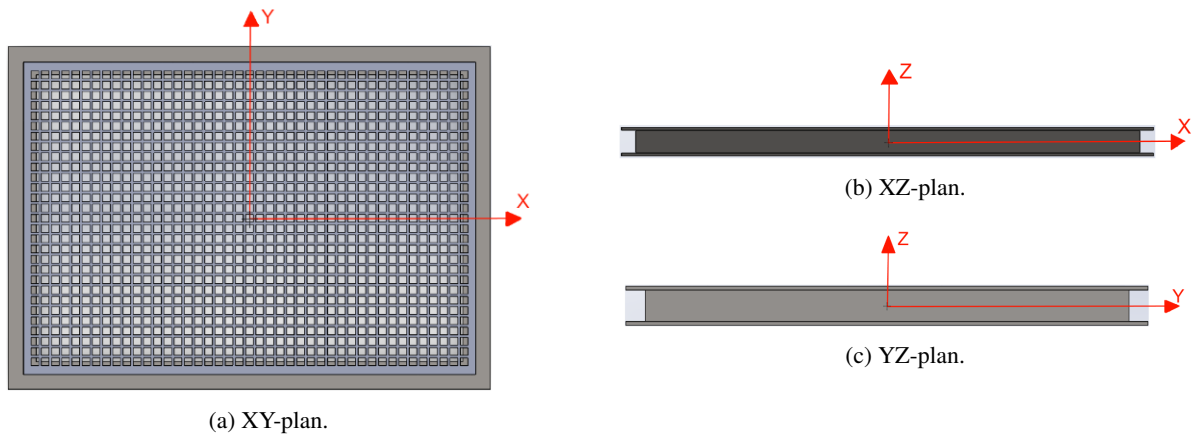
4.3.1 Diskretisering topplate

Topplate er en sammensatt modell av en rammestruktur og en perforert flate. Lengde, bredde og høyde er hhv. 1.89, 1.34, og 0.1 meter. Modellen av topplaten med lokale akser er som illustrert i Figur 14 nedenfor.



Figur 14: Topplaten med lokale akser.

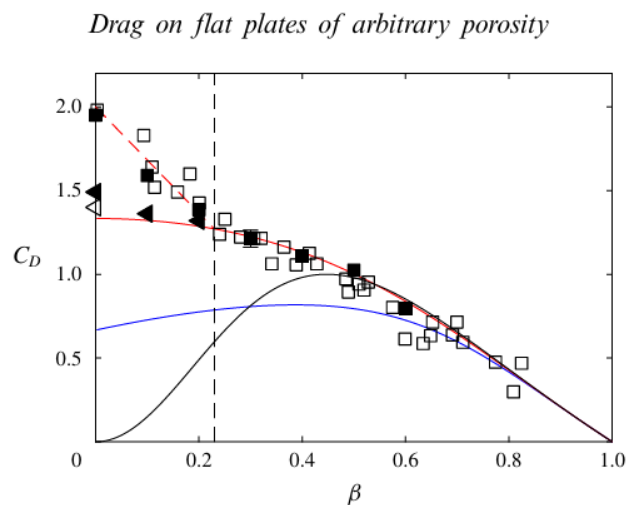
Først beregnes projisert dragareal for hvert translasjonsplan. De ytre innsnevringene i XZ- og YZ-plan er neglisjert i beregningene her, selv om de ville redusert arealet noe. I YZ-plan kommer perforasjonsfaktoren på 44.31%, noe som reduserer dragareal betydelig. Topplate i de tre plan er som vist i Figur 15 nedenfor.



Figur 15: Topplaten i alle tre plan.

For bestemmelse av tilleggsmassekoeffisient, C_A , henvises det til DNV-RP-N103 [16]. Her benyttes DNV-type “Flat rectangular plate” med referansemål $a \cdot b$ til sammenlikning i alle plan. Dette er hentet fra Tabell A-2 som er vedlagt i Vedlegg B. Argumentet for utvelgelse av C_A er definert som b/a , som i XZ-plan blir *lengde/høyde*, i YZ-plan blir det *bredde/høyde*, og i XY-plan benyttes *lengde/bredde*. Uten perforasjon i XZ- og YZ-plan, resulterer dette i $C_A = 1$ for begge. I henhold til DNV-standard involveres effekten av perforasjon ikke ved bestemmelse av den dimensjonsløse C_A , men ved utregning av tilleggsmassen i enheten kg. Modellen i OrcaFlex krever derimot input for C_A , men ikke tilleggsmasse. Dermed, for å ta høyde for perforasjonen ved bestemmelse av tilleggsmassekoeffisienten i XY-plan, benyttes perforasjonsfaktoren inne i Formel 24. Her dannes en ny perforasjons-korreksjonsfaktor, PCF , som ganges med den ordinære tilleggsmassekoeffisienten. Dette resulterer i at den korrigerte C_A -verdien får en betydelig reduksjon, fra 0.68 til 0.2.

For bestemmelse av dragkoeffisient, C_D , henvises det igjen til DNV-RP-N103 [16]. Seksjon 4.6.2.4 foreslår $C_D \geq 2.5$ for neddykkede strukturer i oscillerende strømning. Påfølgende seksjon 4.6.2.5 følger opp med at for lange, slanke strukturer kan dragkoeffisient lik det dobbelte av stasjonær C_{DS} benyttes dersom hydrodynamiske interaksjonseffekter ikke er til stede. Det antas at for XZ- og YZ-plan på gjeldende modell, kan det sistnevnte anvendes. Det benyttes DNV-geometrireferanse “*Rectangular plate normal to flow direction*” med referansemål $B \cdot H$ til sammenlikning for de to relevante plan. Dette er hentet fra Tabell B-2 som er vedlagt i Vedlegg B. Argumentet for utvelgelse av C_{DS} er definert som B/H , som for begge plan resulterer i $C_{DS} = 1.9$. Denne verdien er mindre enn anbefalte minsteverdi 2.5, derfor bestemmes det at doblingen trer i kraft her og dragkoeffisient, C_D , beregnes til å bli 3.8. Dersom samme metode følges for å bestemme dragkoeffisient for XY-plan, resulterer det i $C_{DS} = 1.16$, og dette uten å kunne doble det, ettersom strukturen ikke kan kategoriseres som lang og slank. Dette vurderes til usikkert, fordi perforasjonen ikke blir tatt høyde for. Dermed inkluderes KC-tallet for bestemmelse av C_D -verdi. Ved bruk av Formel 20, resulterer KC i en verdi på cirka 226. Isoler sett er dette et argument for neglisjerbare oscillasjonseffekter, og legitimerer per definisjon bruk av C_{DS} . Perforasjonen i platen gjør dette igjen til usikkert, fordi DNV ikke spesifiserer dette tilfellet. I artikkelen “*Numerical modeling of perforated plates in oscillating flow*” fra NTNU, belyser Fredrik Mentzoni og Trygve Kristiansen resultater fra eksperimentell og numerisk metode at ved økende perforasjon vil dragkoeffisientens relasjon til KC bli mindre betydelig. Dette viser at under oscillerende flow vil C_D -økningen avta med økt perforasjon [21]. Det antas dermed i denne bacheloroppgaven at en lavere C_D -verdi vil være representativ for basketens topplate. Artikkelen “*Drag on flat plates of arbitrary porosity*” [22] viser gjennom eksperimentell metode resultater av C_D som funksjon av perforasjonsfaktor i fri strøm. Grafen er vist i Figur 16 nedenfor.



Figur 16: C_D som funksjon av perforasjonsfaktor (her: β) i fri strøm [22].

Det antas at grafen kan benyttes for bestemmelse av dragkoeffisient, og at estimatet på $C_D = 1.15$ vil være gyldig for topplatens XY-plan, med dens perforasjonsfaktor på 44.31%.

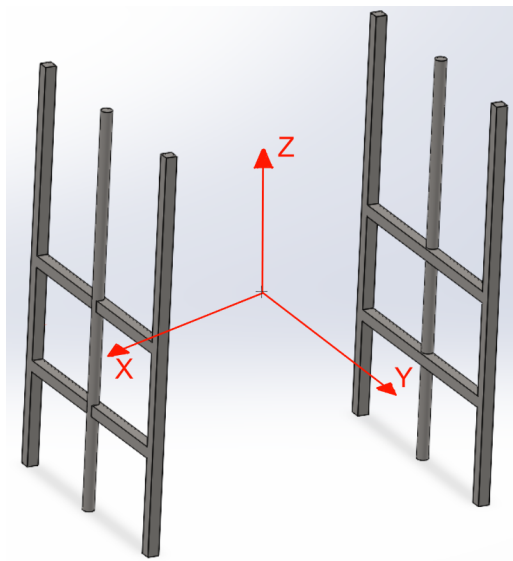
Resterende relevante egenskaper på modellen beregnes av SolidWorks og hentes fra oversikten over “*Mass Properties*”. Her er volumet av strukturen beregnet til 0.046m^3 . Senter av masse hentes også herfra, med koordinater i lokalt aksesystem lik $[0, 0, 0.018]$. Det bestemmes at materialet behandles som homogent, derfor settes også volumsenter lik massesenter. Massetregghetsmoment om x-, y- og z-aksen hentes fra samme oversikt. Resultater for diskretiseringen av øvre del er samlet i Tabell 3 nedenfor.

Parameter	YZ-plan	XZ-plan	XY-plan	Enhet
Dragareal	0.124	0.179	1.410	[m ²]
p	0	0	44.31	[%]
C_A	1.00	1.00	0.68	[-]
PCF	-	-	0.29	[-]
Korrigert C_A	-	-	0.20	[-]
C_D	3.80	3.80	1.15	[-]
Volumsenter	0	0	0.018	[m]
Massetreghetsmoment	51.96	147.04	95.60	[kg · m ²]

Tabell 3: Resultater for diskretisering topplate.

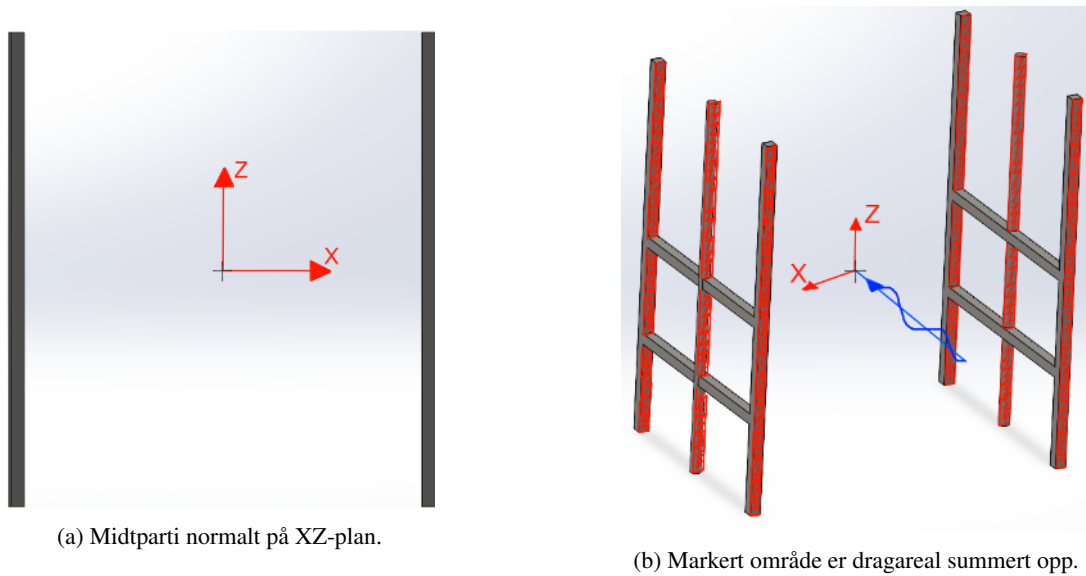
4.3.2 Diskretisering midtparti

Midtrepartiet består av begge sidegjerdene behandlet som ett enkelt element. Lengde og bredde på stolpene er 0.06 meter, mens høyden er 2.115 meter. Stolpene med senter i $Y = 0$ har sirkulært tverrsnitt med radius $r = 0.06$ meter. De 8 horisontale stolpene har alle lengde på 0.58 meter. Modellen av midtpartiet med lokale akser er som illustrert i Figur 17 nedenfor.



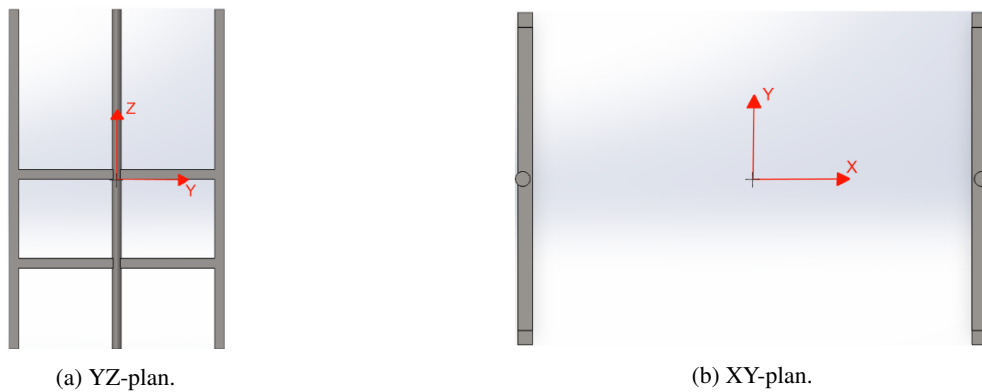
Figur 17: Midpartiet med lokale akser.

Som tidligere nevnt er modellen strippet for strukturdetaljer med neglisjerbare hydrodynamiske påvirkninger. De hydrodynamiske egenskapene på midtpartiet antas å være uendret med dybden i vannet. Wake effekten og slip-strøm neglisjeres også. Ved beregning av dragareal antas det at det å inkludere alle flater som er plassert bak hverandre er en realistisk tilnærming til 3D modellen. Dermed beregnes dragareal til en høyere verdi enn ved å bare inkludere projisert areal. Figur 18 nedenfor illustrerer hvordan drag-areal beregnes med XZ-plan som eksempel, der de markerte områdene er summert opp til totalt drag-areal.



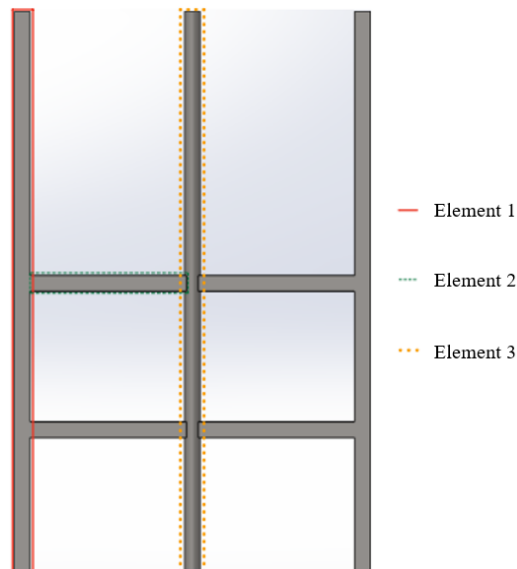
Figur 18: Midtparti i XZ-plan med markert dragareal.

De to andre plan for midpartiet, YZ- og XY-plan er illustrert i Figur 19 nedenfor. Her er også drag-areal økt på samme måte for å ta høyde for flere flater bak hverandre.



Figur 19: Midtparti normalt på YZ- og XY-plan.

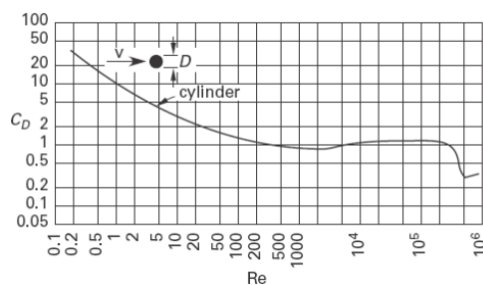
For bestemmelse av C_A og C_D er det utfordrende å benytte DNVs forenklete metode, ettersom midtpartiet som ett enkelt element ikke samsvarer med referansegeometriene i tabell A-2 og B-2 [16]. For å løse dette, betraktes midtpartiet som en sammensatt modell av ulike elementer. Disse elementene inkluderer de kvadratiske med høyde 2.115 meter (*Element 1*), de horisontale kvadratiske med lengde 0.58 meter (*Element 2*), og de sirkulære med høyde 2.115 meter (*Element 3*). Det bestemmes koeffisienter for hvert element, og gjennomsnittet av resultatene antas å være representativ for gjeldene plans C_A - og C_D -verdi. Nedenfor i Figur 20 er det en illustrasjon av elementene som er diskretisert hver for seg.



Figur 20: Midtpartiet med markerte elementer 1-3 for diskretisering.

Dermed kan bestemmelse av C_A gjennomføres i henhold til DNV-RP-N103 ved å bruk av Tabell A-2 [16]. I YZ-plan benyttes referansegeometri “*Flat rectangular plate*” for *Element 1* og 2, mens for *Element 3* benyttes “*Right circular cylinder*”. Dette resulterer i C_A -verdier på hhv. 1, 0.95 og 1. Gjennomsnittet av disse representerer midtpartiets C_A i YZ-plan, og resulterer i en verdi på 0.98. I XZ-plan betraktes *Element 1* og 3 som de eneste av betydning for tilleggs-massekoeffisienten. Med samme beregningsmetode som for YZ-plan, resulterer det i en C_A -verdi på 1. I XY-plan benyttes referansegeometri “*Flat rectangular plate*” på *Element 2* slått sammen i én lengde. Dette resulterer i $C_A = 1$.

For bestemmelse av dragkoeffisient, C_D , henvises det igjen til DNV-RP-N103 [16]. I YZ-plan benyttes geometrireferanse “*Rectangular plate normal to flow direction*” fra Tabell B-2 på *Element 1* og 2. Disse kategoriseres som lange og slanke og det antas derfor at C_{DS} verdien kan dobles. Dermed får disse C_D -verdi på 3.8 begge to. For *Element 3* benyttes en antakelse om at $C_D = 1$, fordi det er et brukbart estimat ut ifra grafen i Figur 21 nedenfor, som viser dragkoeffisient for en sylinder som funksjon av Reynolds tall, Re . Gjennomsnittet på 2.87 antas deretter å være representativt for midtpartiets dragkoeffisient i YZ-plan. I XZ-plan antas det at *Element 2* vil ha neglisjerbar innvirkning på dragkoeffisient. Med samme metode blir C_D for *Element 1* og 3 hhv. 3.8 og 1, og gjennomsnittet resulterer i en dragkoeffisient lik 2.4 som antas å være representativ for midtpartiets XZ-plan. I XY-plan benyttes referansegeometri “*Rectangular plate normal to flow direction*” på *Element 2*, igjen slått sammen i én lengde. C_{DS} får dermed en verdi på 1.9, som også dobles ettersom elementet kategoriseres som lang og slank.



Figur 21: C_D som funksjon av Re [23].

De resterende egenskapene beregnes av- og hentes ut fra SolidWorks oversikt over “*Material Properties*”. Volum resulterer i 0.018m^3 , med senter i $[0, 0, -0.068]$. Igjen antas homogenitet, og massesenter settes lik volumsenter. Massetregghetsmoment om x-, y- og z-aksen hentes fra samme oversikt. Resultater for diskretiseringen av midtparti er samlet i Tabell 4 nedenfor.

Parameter	YZ-plan	XZ-plan	XY-plan	Enhet
Dragareal	1.040	0.733	0.315	$[\text{m}^2]$
C_A	0.98	1.00	1.00	[-]
C_D	2.87	2.40	3.80	[-]
Volumsenter	0	0	-0.068	[m]
Massetregghetsmoment	78.60	162.40	153.80	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$

Tabell 4: Resultater for diskretisering midtparti.

4.3.3 Diskretisering bunnplate

Dykkebasketen vil som tidligere nevnt være utstyrt med umbilical kveiler og gasstanker. I tillegg vil basketen også kunne operere på maks tilleggslast på 500kg, noe som resulterer i totalvekt på 1130kg. Foreløpig i modellens diskretisering vil en bunnplate identisk til topplaten utgjøre en totalvekt av basketen på 655kg. For å inkludere tilleggslasten og utstyret uten å overkomplisere modelleringen og videre diskretisering, antas det følgende:

Bunnplatens dimensjoner er identisk til topplaten, og de to er modellert likt i SolidWorks. Henvisninger til YZ-, XZ- og XY-plan referer dermed til Figur 15 i Kap 4.3.1. To stk umbilical kveiler, to stk nødgasstanker, og to stk blybarrer betraktes uten vekt og geometri, men har tiltenkt arealfotavtrykk som reduserer perforasjonen i bunnplaten. Fotavtrykkene til umbilical kveilene estimeres til 0.5m^2 , mens gasstankene med diameter på 0.229 meter utgjør et areal på ca. 0.0824m^2 . To blybarrer med lengde og bredde på hhv. 0.62 og 0.115 meter utgjør et arealfotavtrykk på 0.1426m^2 . Blybarrene er hentet fra Støberiet Ørkild [24] for referanse. Siden utstyret er betraktet som geometriløst, vil bunnplatens dragareal være uendret fra topplaten i YZ- og XZ-plan. Med fotavtrykket til utstyret i bunnplaten, reduseres perforasjonsfaktor til 35.32%, og som følger av dette økes dragareal i XY-plan til 1.643m^2 . Perforasjonsfaktoren benyttes i Formel 24, som gir en ny PCF , og dermed korrigerer C_A til en endelig verdi på 0.28. Endringen i perforasjonsfaktor resulterer også i ny dragkoeffisient for XY-plan. Med samme antakelsesprosedyre som for topplaten i Kap 4.3.1, estimeres C_D ut ifra Figur 16, og resulterer i en verdi på 1.25. Uten endringer i YZ- og XZ-plan, forblir disse dragkoeffisienter like som for topplaten. Volum, volumsenter og massesenter forblir uendret også. Vekten på bunnplaten økes med 500kg, slik at den blir 757kg. Da er totalvekten av basketen på 1155kg, noe som antas å være representativt for den reelle basketen med maks tilleggslast.

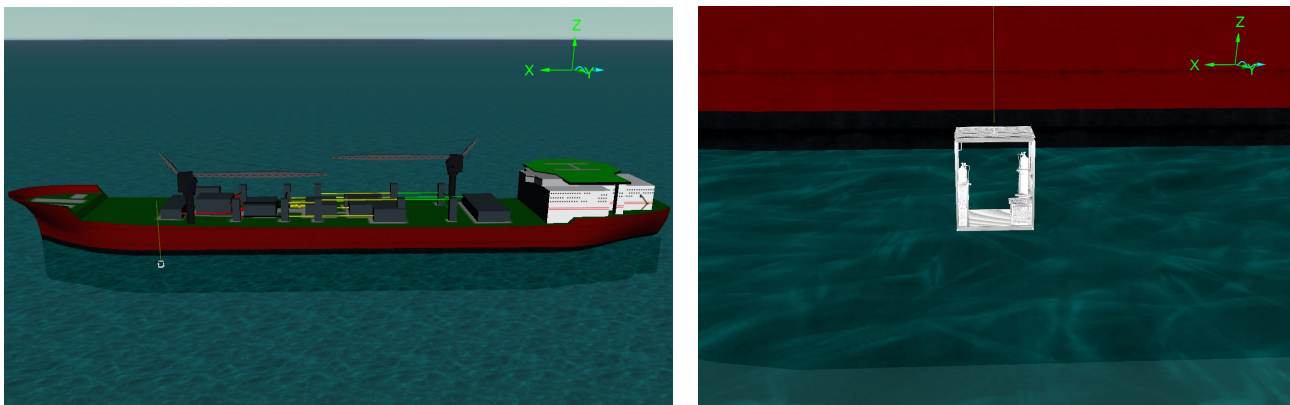
Som følge av økt vekt, økes også massetregghetsmomentene. Uten å kunne angi vekt på modellen i SolidWorks, byttes modellens material til det tyngste tilgjengelig. Byttet resulterer i en vektøkning til 406kg på bunnplaten. Her hentes massetregghetsmomentene ut fra oversikten over “*Material Properties*” og noteres ned. Med data på platens massetregghetsmoment ved vekt på 257 og 406kg, ekstrapoleres verdier på massetregghetsmomenter ved ønsket vekt på 757kg. Resultatene for diskretiseringen på bunnplaten er samlet i Tabell 5 nedenfor.

Parameter	YZ-plan	XZ-plan	XY-plan	Enhet
Dragareal	0.124	0.179	1.643	[m ²]
p	0	0	35.32	[%]
C_A	1.00	1.00	0.68	[-]
PCF	-	-	0.40	[-]
Korrigert C_A	-	-	0.28	[-]
C_D	3.80	3.80	1.25	[-]
Volumsenter	0	0	0.018	[m]
Massetreghetsmoment	114.09	387.44	246.00	[kg · m ²]

Tabell 5: Resultater for diskretisering bunnlate.

4.4 Analyse

Denne seksjonen tar for seg oppsettet i OrcaFlex og hvordan analysen gjennomføres. I OrcaFlex benyttes *Vessel*, *Line* og *6D-buoy* til modellering av hhv. FPSO, kranwire og dykkebasketen. Oppsettet i OrcaFlex *graphic mode* er vist i Figur 22. CAD-filen til basketen er levert av SMP, og er bare brukt til visualisering.

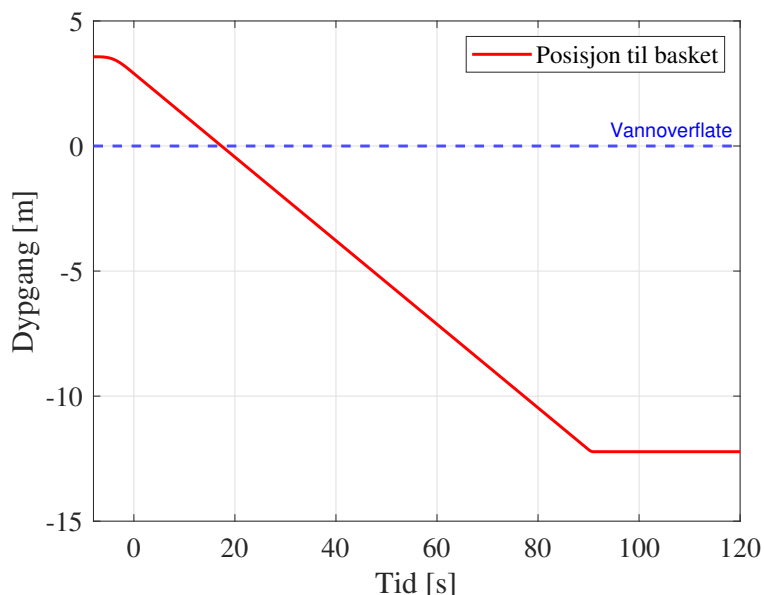


(a) Oversiktsbilde av FPSO og basket som henger i wiren.

(b) Nærbilde av dykkebasketen og wiren.

Figur 22: Oppsettet i OrcaFlex i *graphic mode*.

Analysen i OrcaFlex settes opp til å vare i totalt 128 sekunder, der de første 8 sekundene er oppbyggingsfasen, og de resterende 120 sekunder er selve analysen. Tidsintervallet settes til 0.1 sekunder. Basketen starter rundt fire meter over vannet, og heises ned til rundt tolv meter, hvor den henger i 30 sekunder. Posisjonen til basketens senter i stillestående sjø er vist i Figur 23.



Figur 23: Vertikale posisjon til basketen gjennom analysen i stillestående sjø.

4.4.1 Environment

I relevans med prosjektet på Raia-feltet, har Equinor levert miljødata for vær, vind, temperatur og sjøtilstander. Dette brukes for å gi analysen en validitet til hvordan forholdene er på Raia. Temperaturmålingene i vannet er gjort fra 10 meters dybde, og ned til 2900 meter. Her strekker temperaturene seg fra 27°C i overflaten, og ned til 3°C på det dypeste. På grunnlag av at dykkebasketen opererer på 10 meters dybde, beregnes et gjennomsnitt av målingene for alle måneder på 10 meters dyp. Dette gir en snittemperatur på 25.2°C . Bølger genereres naturlig av vinden, men ettersom bølgene genereres automatisk i OrcaFlex, er vinden neglisjert fra analysen. Gjennomsnittet av sjøtilstandene viser at H_s varierer mellom 1.9- og 3.3 meter i snitt, for de ulike bølgeretningene. De fleste bølgene kommer fra 30° og 60° , mens de største bølgene kommer fra 210° og 240° , dette relativt til fartøyets kjøreretning. OrcaFlex har standardiserte verdier innsatt for ulike parametere, og disse benyttes for resterende av krevd input. En oversikt over omgivelsesdata er presentert i Tabell 6.

Parameter	Verdi	Enhet
Kinematisk viskositet sjøvann	1.35e-6	m^2/s
Kinematisk viskositet luft	15e-6	m^2/s
Tetthet sjøvann	1025	kg/m^3
Tetthet luft	1.28	kg/m^3
Vanndybde	2900	m
Temperatur i vannet	25.2	$^{\circ}\text{C}$

Tabell 6: Environment data for analysen.

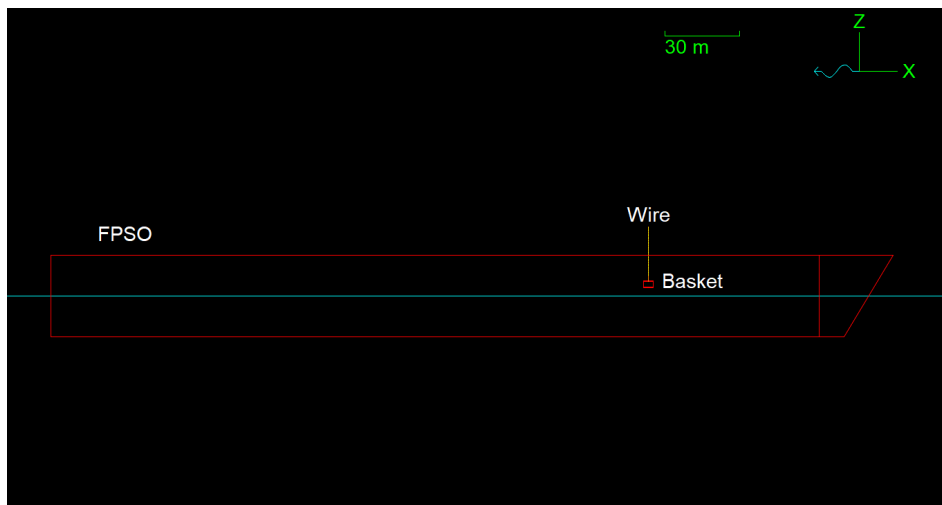
Det benyttes JONSWAP-bølgespekter til å generere bølger. Simuleringer kjøres for alle mulige kombinasjoner av H_s , T_z og bølgeretning, som utgjør de ulike sjøtilstandene i forsøkene. Variasjonen i de tre parametrene er presentert i Tabell 7 nedenfor.

H_s [m]	T_z [s]	Bølgeretning [deg]
0.50	4	0
1.00	5	30
1.50	6	60
2.00	7	90
2.25	8	120
2.50	9	150
2.75	10	180
3.00	11	210
3.50	12	240
4.00	13	270
		300
		330

Tabell 7: De tre parametere som kombineres for forsøkene.

4.4.2 Vessel

FPSO-en som dykkebasketen heises ned fra, modelleres i OrcaFlex ved hjelp av kommandoen *Vessel*. Fartøyet plasseres i origo, og posisjonen i globale koordinater er gitt ved $[0, 0, 0]$. FPSO-en modelleres i *Vessel type*, der Equinor har tilsendt fartøysdata og tilhørende RAO. Lengden på FPSO-en settes til 339.5 meter, og RAO-dataen implementeres i henhold til Equinors data. Det antas RAO-dataen er symmetrisk om XZ-planet, så dataen som går fra $[0-180]^\circ$ gjentas for $[180-360]^\circ$. Figur 24 viser hvordan *Vessel* og resten av oppsettet er satt opp i OrcaFlex.



Figur 24: Oppsettet i OrcaFlex.

4.4.3 Line

Wiren som heiser basketen ned fra FPSO-en og gjennom vannoverflaten blir modellert ved kommandoen *Line*. Opphengspunktet er satt til $[71, 45, 28]$ i forhold til fartøyets lokale koordinatsystem. Input dataen for wiren legges i *Line type*, hvor dens egenskaper blir konstruert ved hjelp av OrcaFlex sin *Wizard* for wire. Dette er en funksjon som har forhåndslagt ulike typer liner og wire, samt deres koresponderende egenskaper. Wiren sine egenskaper er presentert i Tabell 8.

Parameter	Verdi	Enhet
Diameter	13	mm
Masse per lengde	0.674	kg/m
Lengde	58	m
Aksial stivhet	15.396	kN
Torsjon stivhet	80	kN · m ²

Tabell 8: *Line* data for analysen.

Wiren er delt opp i tre seksjoner. Dette gjøres for å øke nøyaktigheten av analysen, uten at det går utover simulasjonstiden. Wiren er delt opp slik Tabell 9 viser, der seksjonene får flere segmenter nærmere basketen. Ved opphengspunktet har wiren bare ett *segment* per meter, mens ved basketen har den 20.

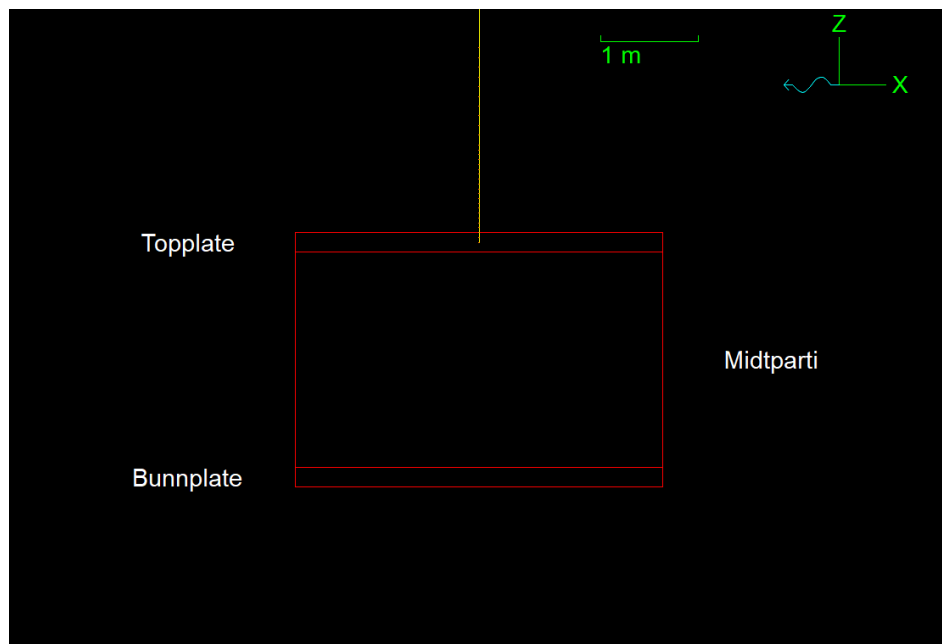
Seksjons nr	Seksjonslengde [m]	Antall segmenter per meter
1	56	1
2	1	10
3	1	20

Tabell 9: Seksjonsinndeling av wiren.

Wiren starter med 22 meter aktiv line, og ved hjelp av funksjonen *feeding*, mates wiren ut med en konstant hastighet, og heiser basketen ned i vannet. Oppstigningshastigheten til dykkere skal ikke overstige 10 m/min, mens nedstigningshastighet ikke bør overstige 20 m/min [25]. Hastigheten på nedstigningen av dykkebasketen settes derfor til 10 m/min.

4.4.4 6D-buoy

Basketen modelleres med *6D-buoy*, da ved tre stk *lumped buoy* som er festet sammen til en fjerde *lumped buoy*. Den fjerde *buoy* er skjult og har neglisjerbare egenskaper. Dette med hensikten å ha en primær *buoy* som muliggjør henting av resultater på basketen som en helhet. Diskritiseringen er gjort i henhold til beskrivelsen i Kapittel 4.3, og en oversikt av oppsettet i OrcaFlex er vist i Figur 25.



Figur 25: Diskritisering av basket med bunnplate, midtparti og topplate i OrcaFlex.

Videre viser Tabell 10 en samlet oversikt over basketen som helhet, mens Tabell 11 viser en komplett oversikt over input data som legges inn for basketens modellering.

Parameter	Verdi	Enhet
Vekt	11.3267	kN
Oppdrift	1.1107	kN
Neddykket vekt	10.2160	kN
Volum	0.1105	m ³

Tabell 10: Data fra dykkebasketen i OrcaFlex.

Egenskap/6D-buoy	Bunnplate	Midtparti	Topplate
Geometri			
Masse [kg]	757	257	141
Høyde [m]	0.100	2.115	0.100
Volum [m ³]	0.046	0.018	0.046
Tregghetsmoment [kg · m²]			
x	114.09	78.60	51.96
y	387.44	162.40	147.04
z	246.00	153.80	95.60
Dragareal [m²]			
x	0.124	1.040	0.124
y	0.179	0.733	0.179
z	1.643	0.315	1.410
Slam area [m ²]	1.643	–	–
Koeffisienter			
C_{DX}	3.80	2.87	3.80
C_{DY}	3.80	2.40	3.80
C_{DZ}	1.25	3.80	1.15
C_{AX}	1.00	0.98	1.00
C_{AY}	1.00	1.00	1.00
C_{AZ}	0.28	1.00	0.2
C_S	2.02	–	–

Tabell 11: Input data i OrcaFlex for Bunnplate, Midtparti og Topplate.

Dykkebasketen er i virkeligheten sikret med to guidewires for å unngå rotasjon rundt z-aksen. For å kompensere for dette er det satt en høy *damping* konstant på rotasjon om z-aksen, på topplaten til basketen.

4.5 Automatisering

Analysen settes opp i OrcaFlex, men kjøres i MATLAB. MATLAB automatiserer analysen ved å variere sjøtilstanden for ulike kombinasjoner av H_s , T_z og bølgeretning. MATLAB henter modellen til dykkebasketen i OrcaFlex, og setter opp noen faste parametere som er gjeldene for hele analysen. Ved hjelp av en *for-loop* kjører scriptet analysen for alle kombinasjonene av H_s - og T_z -verdiene, mens bølgeretningen endres manuelt for hver kjøring. Dataen lagres i en tidsserie for hver sjøtilstand, der det uthentes data på strekkraften i wiren. I for-loopen brukes en *while-løkke*, og en *try catch* funksjon. *Try catch* funksjonen brukes i tilfeller der det forventes å få en feilmelding. Scriptet prøver å kjøre analysen for den gitte sjøtilstanden og fanger opp eventuelle feilmeldinger. Feilmeldingen “*Invalid Simulation Period (The simulation must be complete before calling a results function with Period.PeriodNum equal to pnWholeSimulation)*” kommer ved bruk av implisitt integrasjon, der tidssteget i analysen blir for langt og systemet ikke klarer å beregne bevegelseslikningen.

Scriptet fanger opp feilen, og forsøker å kjøre analysen for samme sjøtilstand med et kortere tidsintervall. Intervallet endres til 0.01 sekunder, da dette er ti ganger kortere enn standarden som er gitt for analysen. Dersom samme feil oppstår to ganger for samme sjøtilstand, avbryter while-løkken analysen for den gitte tilstanden, og fyller NaN i resultatet. Det er for ekstreme sjøtilstander disse feilmeldingene oppstår, der H_s -verdien er høyest og T_z -verdien er lavest. Disse sjøtilstandene er usannsynlige, og det aksepteres derfor et fåtall slike NaN-verdier. Resultatene lagres i en matrise, som funksjon av tid for hver sjøtilstand. Deretter hentes ekstremalverdiene for hver tilstand, og sammenlignes med vekten av den neddykkede basketen. Dette er basketens laveste vekt, og vil kunne avgjøre om *slack sling* oppstår. Resultatene presenteres i *heatmap* som dimensjonsløse tall, som forholdet mellom den hydrostatiske- og den minste statiske kraften, der tallene endrer farge i henhold til *heatmapet*.

4.6 Erfaringsbasert dykking

Til bachelorprosjektet er det blitt tilsendt erfaringsbasert dykking fra FPSO MW-31, hvor det er dokumentert sjøtilstander på dykk som måtte avbrytes som følge av dårlige værforhold. I Tabell 12 presenteres hvor mye av det planlagte dykket som ble utført før det måtte avbrytes i prosent. Videre presenteres den da høyeste signifikante bølgehøyden $H_{s,max}$, og ved hvilken bølgeretning det gjaldt.

Fullført dykk [%]	Maks H_s [m]	Bølgeretning [deg]
45	1.8	322.5
38	2.3	277.5
37	2.4	300.0
33	2.4	277.5
29	2.2	277.5
27	3.4	322.5
25	2.1	300.0
25	2.8	210.0
16	2.2	355.0
16	4.9	7.5
5	3.7	322.5
5	2.9	300.0
5	2.3	277.5

Tabell 12: Erfaringsbasert dykking.

Fra FPSO MW-31 sin dykkelogg, er det fjernet dykk som måtte avbrytes før dykket startet (0% fullført dykk). Tabell 12 brukes sammen med *heatmap* som presenteres i Seksjon 5.1, til å finne sjøtilstander på grensen for gjennomførbare dykk. Ettersom Tabell 12 bare viser H_s -verdier, leses T_z -verdiene av *heatmapet* for den gitte bølgeretningen, hvor grensen på *slack sling* ligger. Det velges tre sjøtilstander fra Tabell 12 det ønskes å se nærmere på:

1. $H_s = 2.3$, Bølgeretning: 277.5°
2. $H_s = 2.2$, Bølgeretning: 300.0°
3. $H_s = 2.8$, Bølgeretning: 210.0°

5 Resultat

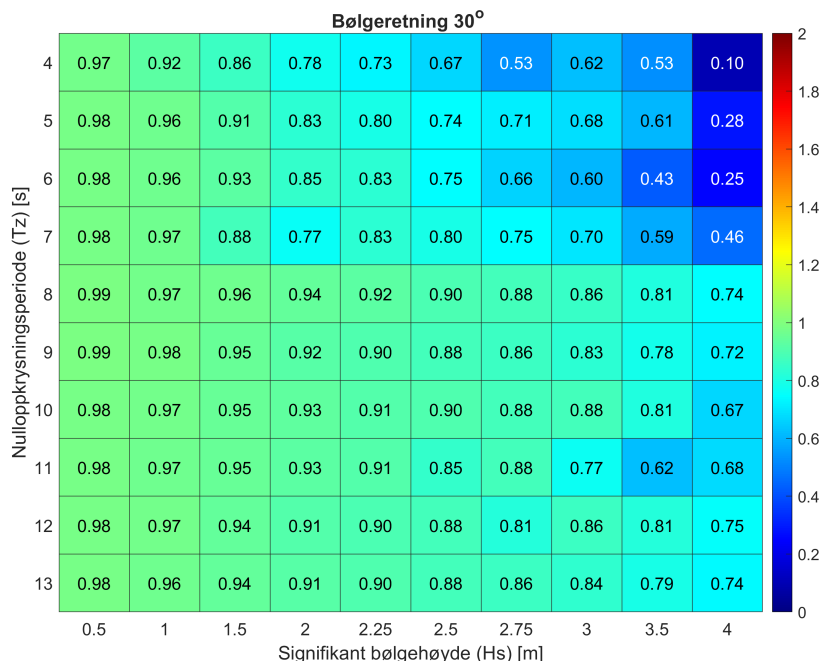
I dette kapittelet presenteres resultatet for analysene. Først presenteres *heatmap* for fire ulike bølgeretninger. Hver bølgeretning inneholder 100 sjøtilstander med ulike kombinasjoner av H_s og T_z . Fra *heatmapet* velges det tre sjøtilstander, som er tett på *slack sling* kriteriet, for å kunne se hvilken påkjenninger dykkeren vil oppleve under dykkeoperasjonen.

5.1 Resultat for heatmaps

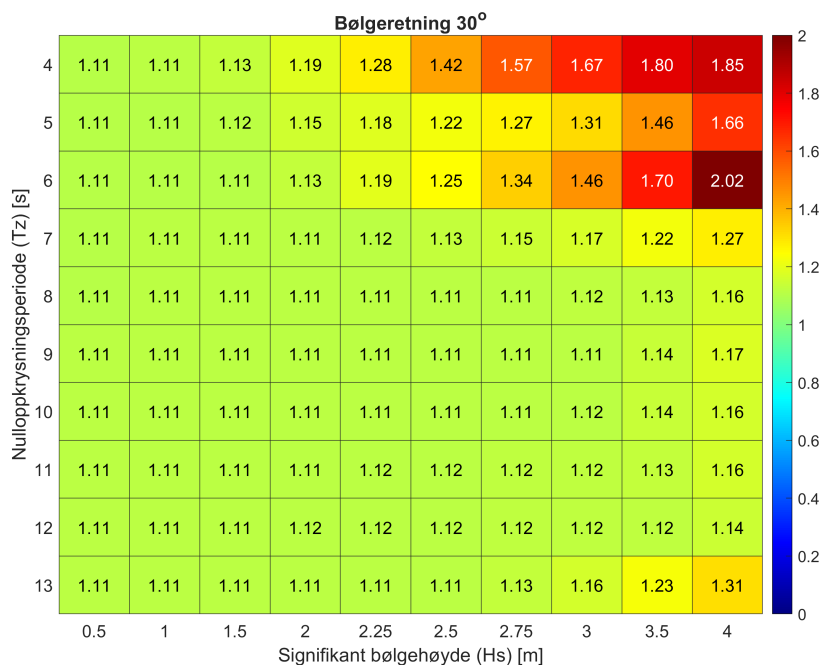
Resultatene presenteres som dimensjonsløse tall, der forholdet mellom den hydrostatiske- og den minste statiske kraften ikke skal understige ti prosent. Dersom det gjør det, er *slack sling* per DNVs forenklete metode og Formel 25 oppnådd. Dette er dermed synlig for resultater med verdier ≤ 0.90 . For hver bølgeretning presenteres to plots, der det første viser wiren sine laveste verdier, mens det andre viser wirens høyeste verdier. Alle tall presenteres som dimensjonsløse, der 1 er gitt som vekten av den neddykkede basketen. Vekten til den neddykkede basketen er 10.216 kN, og den hydrostatiske kraften regnes for hver sjøtilstand. I denne analysen indikerer NaN-verdiene i *heatmapet* tilfeller der det ikke var mulig å hente simuleringsdata for hele simuleringen. Feilmeldingen oppstår for ekstreme sjøtilstander, og det godtas noen NaN-verdier i plotene. Det plukkes ut resultater for fire ulike bølgeretninger; 30° , 60° , 210° , og 240° . Grunnlaget for utvelgelsen av nettopp disse, baseres på at værdata fra Raia-feltet viser disse som de vanligste bølgeretningene, og at de inneholder de mest ekstreme bølgene. Det kjøres simuleringer for alle bølgeretningene som er oppgitt i Tabell 7, og alle tilhørende *heatmaps* er lagt ved i Vedlegg B.

5.1.1 Resultat for 30°

Under i Figur 26 og 27 vises minste og største strekkraft i forhold til basketen sin neddykkede vekt for bølgeretning 30°.



Figur 26: Forholdet mellom minste hydrodynamiske- og statiske kraft ved 30°.

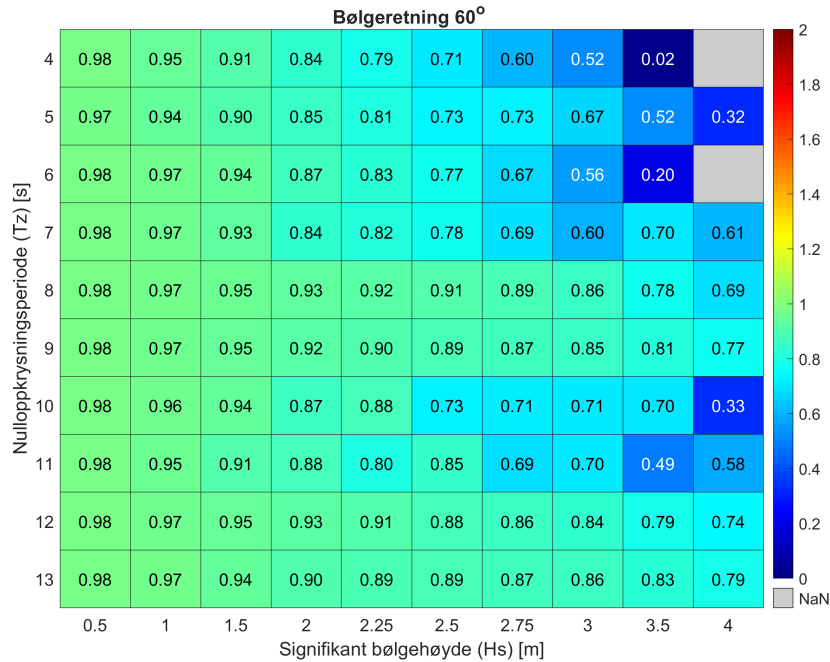


Figur 27: Forholdet mellom største hydrodynamiske- og minste statiske kraft ved 30°.

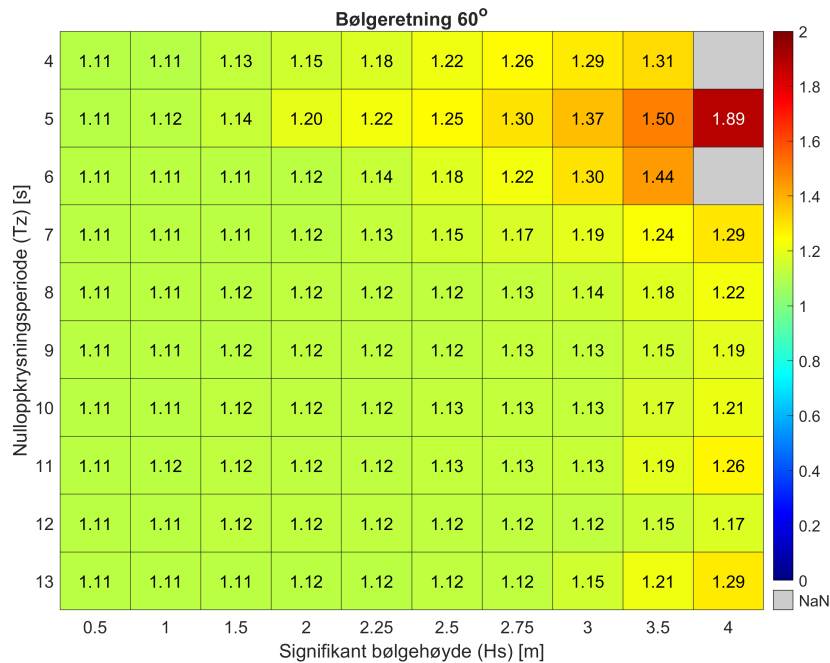
Figur 26 viser at strekkraften ikke understiger 0.9 før ved $H_s = 1.5\text{m}$. Figur 27 viser at for de mest ekstreme sjøtilstandene oppnås nesten en dobling av de hydrodynamiske kreftene på basketen. For $H_s = 4.0\text{m}$ og $T_z = 6\text{s}$ er kreftene dobbelt av den neddykkede vekten. Ved sammenlikning av denne sjøtilstanden er det synlig i *heatmapene* at kreftene går fra 25% til 202% av den neddykkede vekten over enn periode.

5.1.2 Resultat for 60°

I Figur 28 og 29 vises minste og største strekkraft i forhold til basketen sin neddykkede vekt for bølgeretning 60°.



Figur 28: Forholdet mellom minste hydrodynamiske- og statiske kraft ved 60°.

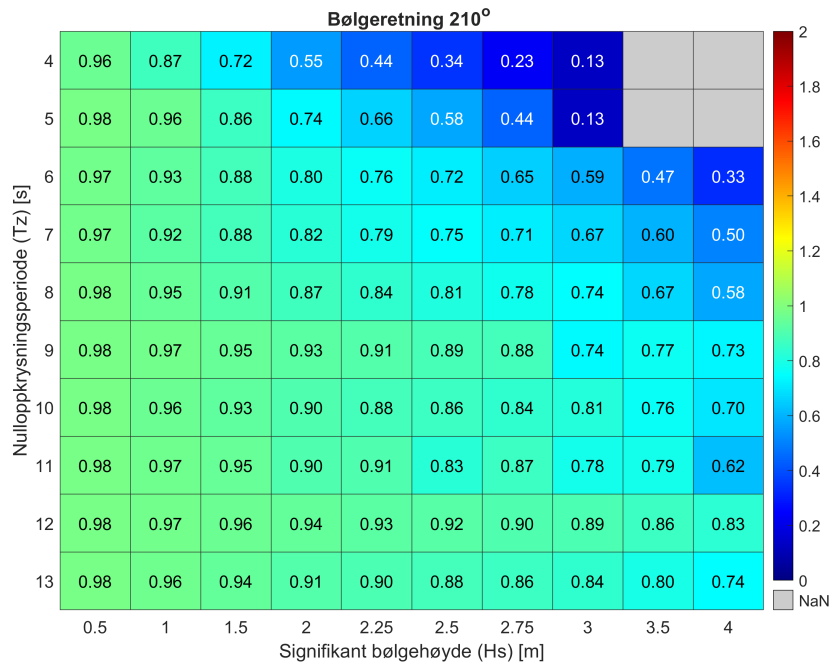


Figur 29: Forholdet mellom største hydrodynamiske- og minste statiske kraft ved 60°.

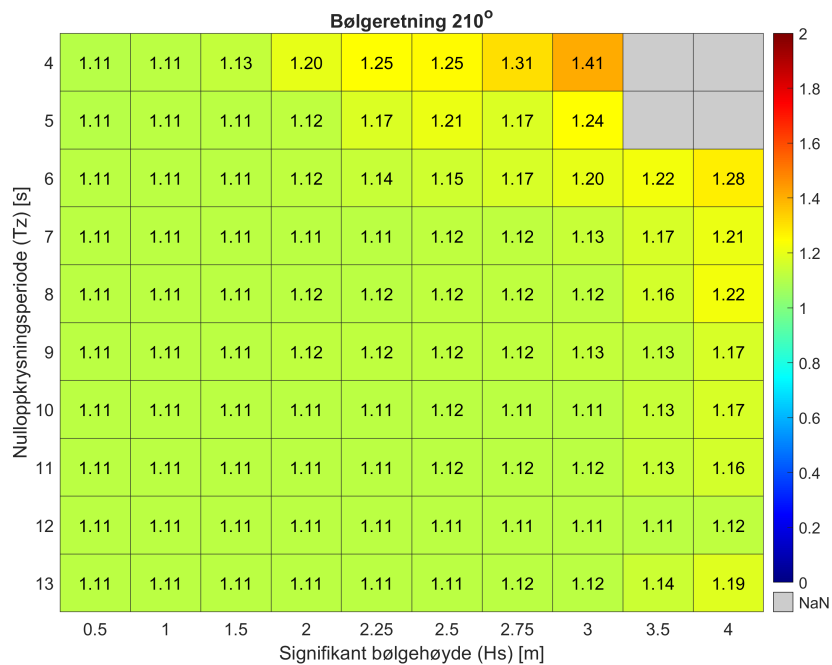
For bølgeretning 60° oppstår to tilfeller med NaN som resultat. Dette for $H_s = 4.0\text{m}$, $T_z = 4\text{s}$ og for $H_s = 4.0\text{m}$, $T_z = 6\text{s}$. Her klarer ikke OrcaFlex å kjøre analysen med et tidssteg på 0.01 sekunder, og gir NaN som resultat. Strekkraften går ikke under 0.9 før ved $H_s = 2.0$, og da ved lave T_z -verdier, noe som tyder på at kreftene i bølgene er mindre for 60° enn for 30°.

5.1.3 Resultat for 210°

Metocean rapporten viste at for bølgeretning 210° og 240° oppstod de største bølgehøydene, H . Under i Figur 30 og 31 vises resultatene for bølgeretning 210°.



Figur 30: Forholdet mellom minste hydrodynamiske- og statiske kraft ved 210°.

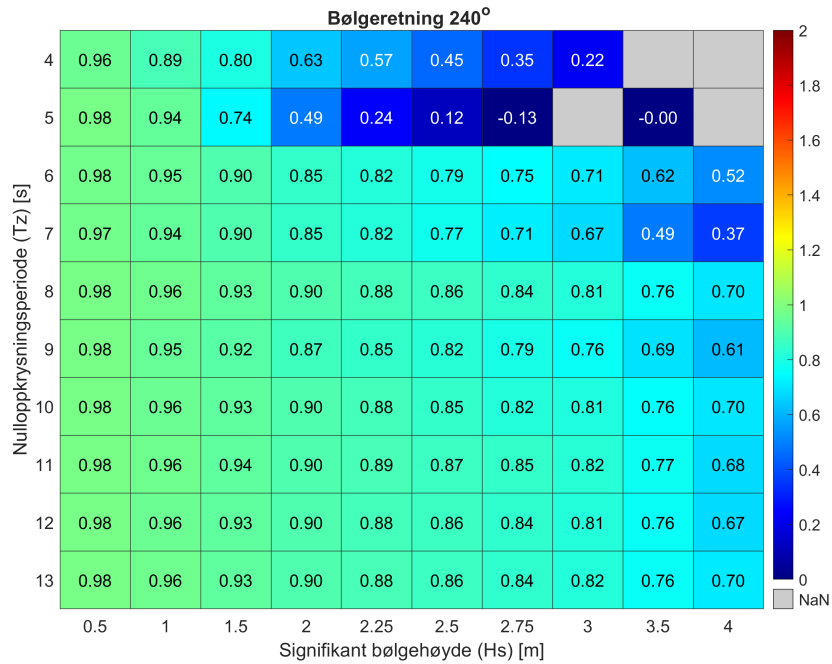


Figur 31: Forholdet mellom største hydrodynamiske- og minste statiske kraft ved 210°.

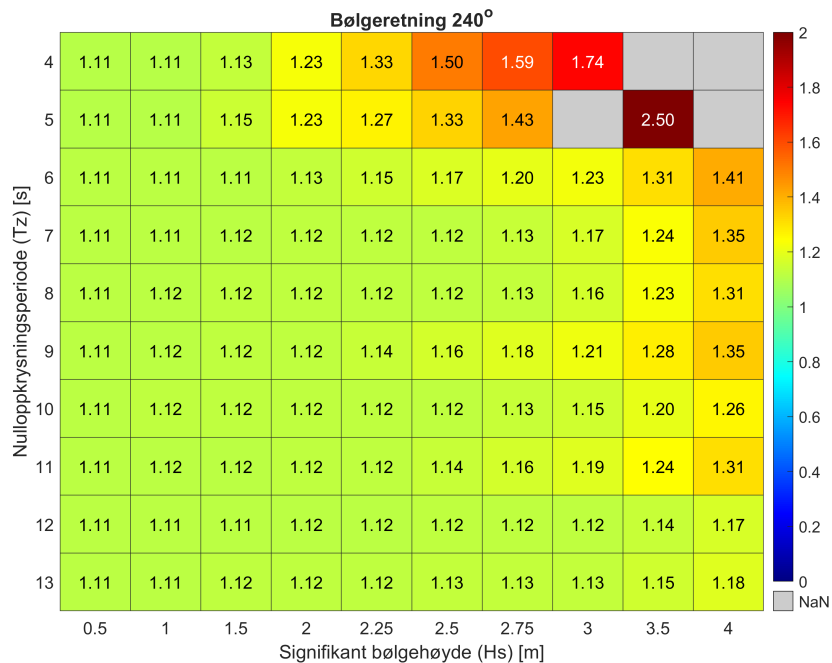
For fire tilfeller er det ikke mulig å utføre analysen, og det plottes NaN som resultat. Dette for sjøtilstand $(H_s, T_z) = (3.5m, 4s), (3.5m, 5s), (4.0m, 4s)$ og $(4.0m, 5s)$. Første tilfelle av *slack sling* oppstår ved $H_s = 1.0m$.

5.1.4 Resultat for 240°

Under i figur 32 og 33 vises minste og største strekkraft i forhold til basketen sin neddykkede vekt for bølgeretning 240°.



Figur 32: Forholdet mellom minste hydrodynamiske- og statiske kraft ved 240°.



Figur 33: Forholdet mellom største hydrodynamiske- og minste statiske kraft ved 240°.

For bølgeretning 240° er det fire tilfeller med NaN, og kraften blir 90% av den neddykkede vekten allerede ved $H_s = 1.0$. Den største kraften er ved 250%, mens den laveste er ved (-13)%. Dette for sjøtilstanden henholdsvis $(H_s, T_z) = (3.50\text{m}, 5\text{s})$ og $(2.75\text{m}, 5\text{s})$

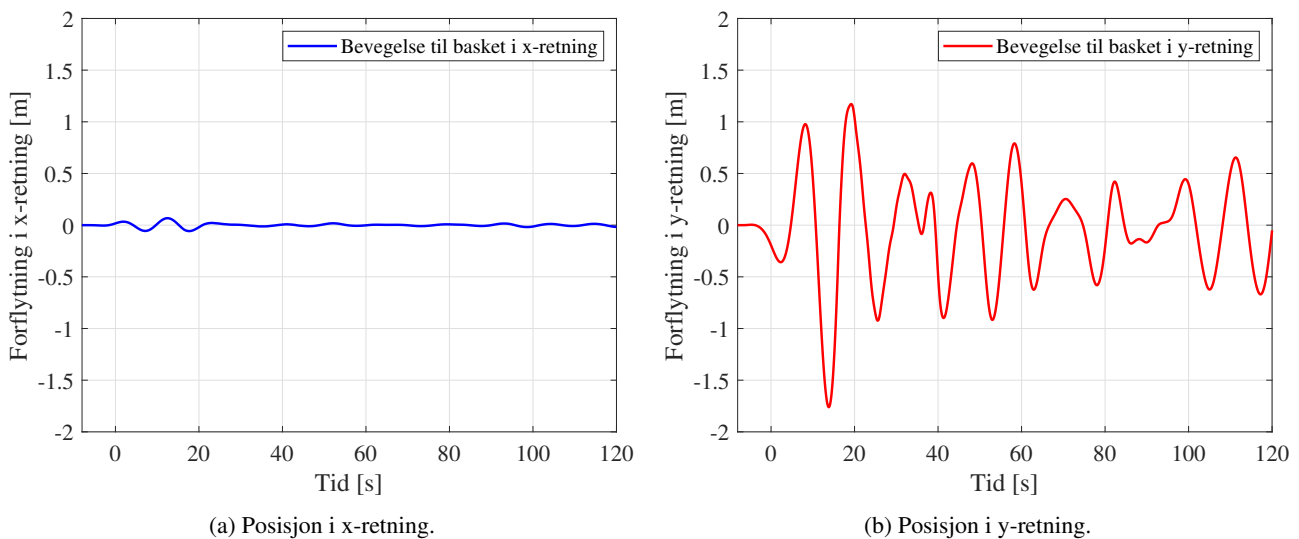
5.2 Utvalgte sjøtilstander

Tabell 12 viser en oversikt fra FPSO MW-31 med erfaringsbasert dykking som måtte avbrytes som følge av dårlig vær. Basert på resterende *heatmaps* vedlagt i Vedlegg D, kombinert med Tabell 12, velges sjøtilstander som er på grensen til dykk som kan gjennomføres. Disse presenteres ved tidsserier av basketens bevegelse i x- og y-retning, partikkelhastighet på basketen i z-retning, og strekkraften i wiren. For H_s -verdier i mellom to verdier fra Tabell 12 og *heatmapet*, rundes verdien opp. T_z -verdien velges fra *heatmapet*, hvor verdien er på grensa til *slack sling* for den korresponderende bølgeretningen. Basert på dette blir det bestemt å se videre på følgende sjøtilstander:

1. $H_s = 2.50$, $T_z = 7$, Bølgeretning = 270°
2. $H_s = 2.25$, $T_z = 5$, Bølgeretning: 300°
3. $H_s = 2.80$, $T_z = 10$, Bølgeretning: 210°

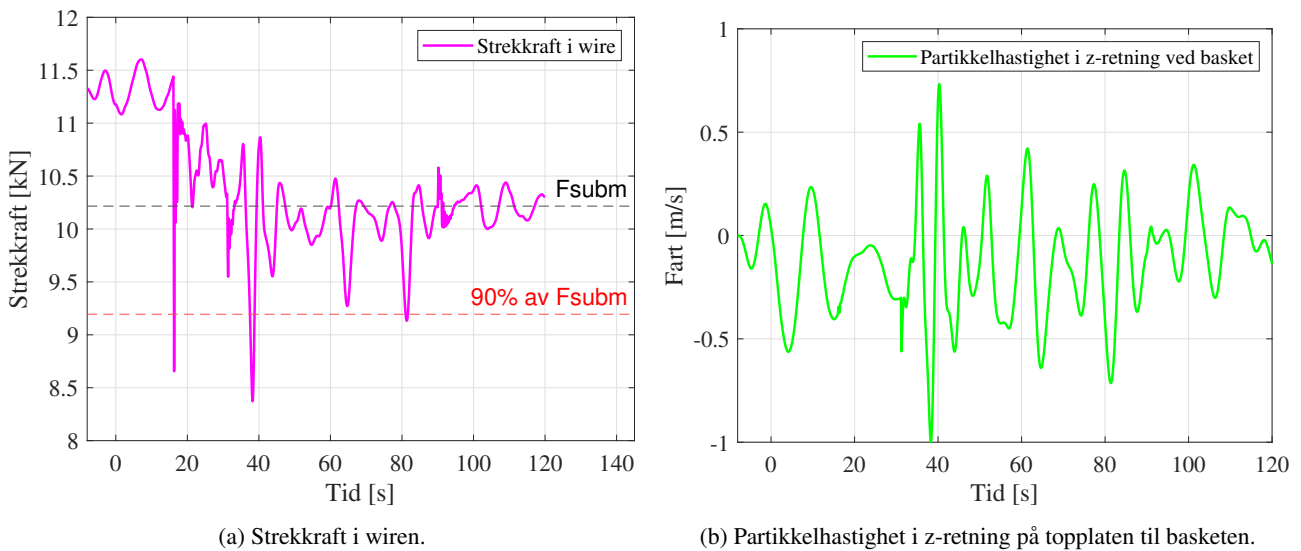
5.2.1 Sjøtilstand 1

Heatmapet for 270° , vedlagt i Vedlegg D, viser at den minste hydrodynamiske vekten for denne sjøtilstanden er 82% av den minste statiske vekten. Dette er 8% mer enn hva *slack sling* kriteriet anbefaler. Figur 34, viser hvordan basketen sin plassering endrer seg i x- og y-retningen.



Figur 34: Dykkebasketens bevegelse i x- og y-retning for $H_s = 2.5\text{m}$, $T_z = 7\text{s}$ og bølgeretning = 270° .

Figur 34 viser tilnærmet ingen bevegelser i x-retning, men mye større bevegelser i y-retning. Basketen har for det meste en bevegelse som flytter basketen 3 meter i intervallet [15s, 20s]. Dette er perioden hvor basketen inntreffer skvalpesonen, og slamming er den dominerende kraften. Figur 35 viser partikkelhastigheten ved opphengspunktet til basketen, samt strekkraften i wiren som altså tilsvarende den hydrodynamiske kraften som virker på basketen.

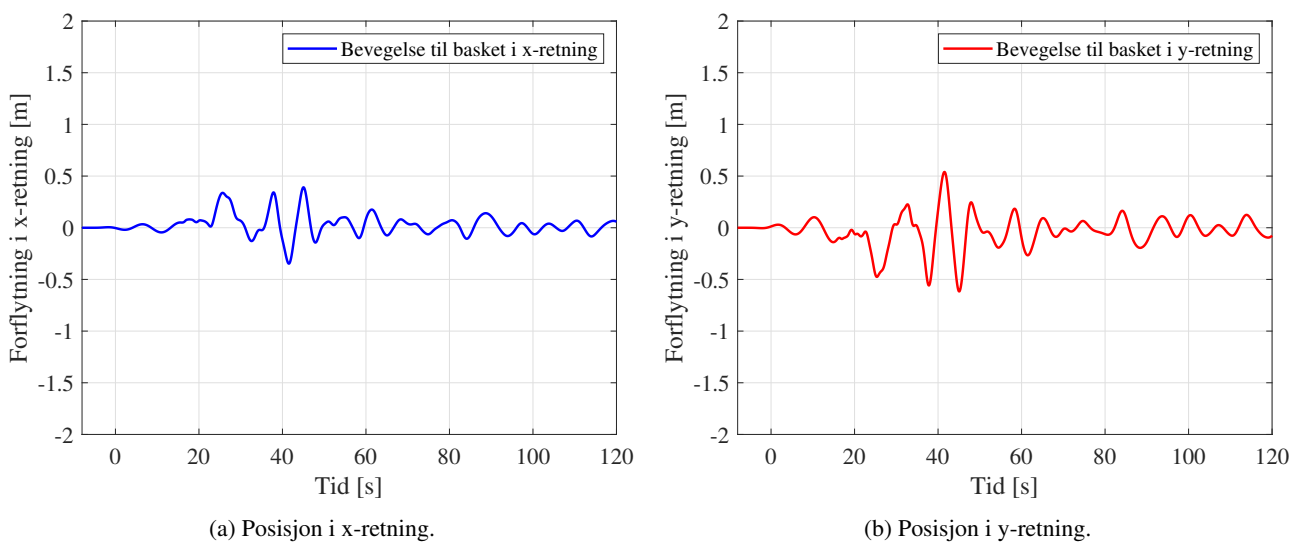


Figur 35: Strekkraft i wiren, og partikkelhastigheten i z-retning ved opphengspunktet til basketen ved: $H_s = 2.5\text{m}$, $T_z = 7\text{s}$ og bølgeretning = 270° .

Figur 35a viser hvordan strekkraften på wiren endres gjennom analysen. Kraften på wiren vil for tre tilfeller gjennom simuleringen understige *slack sling* kriteriet. Dette for tiden 17-, 38- og 82 sekunder, der den minste strekkraften oppstår ved 38 sekunder. Grafen viser store variasjoner i strekkraften, hvilket betyr at den hydrodynamiske kraften på basketen har store variasjoner. Dette vil gi bevegelse i basketen, noe som vil kunne merkes av dykkerene i basketen. For partikkelhastigheten er den største variasjonen på hastigheten ved rundt 40 sekunder. Da er basketen fullstendig neddykket og opplever en større hastighetsendring på topplaten, enn for resten av analysen.

5.2.2 Sjøtilstand 2

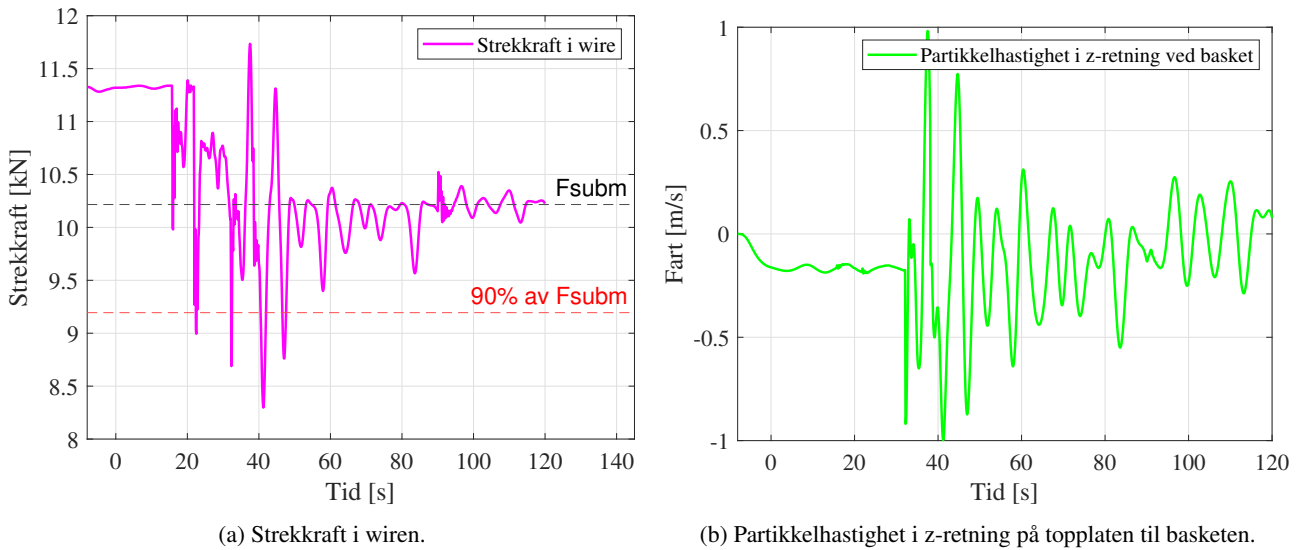
Heatmapet for 300° Vedlegg D, viser at den hydrodynamiske kraften for denne sjøtilstanden er 81% av den neddykkede vekten, og det er 9% mer enn hva *slack sling* kriteriet anbefaler. Figur 36, viser hvordan basketens posisjon endrer seg i x- og y-retningen, for $H_s = 2.25\text{m}$, $T_z = 5\text{s}$, og bølgeretning 300° .



Figur 36: Dykkebasketens bevegelse i x- og y-retning for $H_s = 2.25\text{m}$, $T_z = 5\text{s}$ og bølgeretning = 300° .

Figur 36 viser en jevnere bevegelse mellom x- og y-retning enn hva sjøtilstand 1 viste. Fremdeles er den største bevegelse i y-retningen, med en variasjon på cirka 1 meter. Den største variasjonen for begge retningene fremkommer 40 sekunder

inn i analysen, som tilsvarende tidsperioden hvor basketen er helt neddykket. Dette kan indikere at de største påkjenningen på basketen fremkommer i det basketen er fullstendig neddykket. Videre viser Figur 37 partikkelhastigheten og strekkraft i wiren for denne sjøtilstanden.

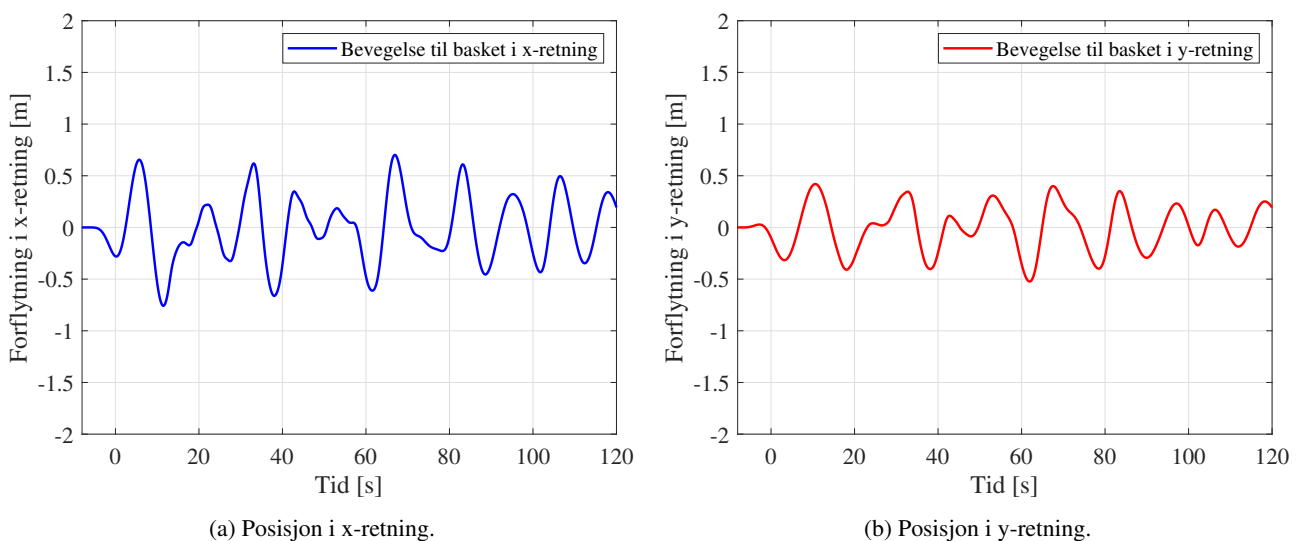


Figur 37: Strekkraft i wiren, og partikkelhastigheten i z-retning ved opphengspunktet til basketen ved: $H_s = 2.25\text{m}$, $T_z = 5\text{s}$ og bølgeretning = 300° .

For strekkraften i denne sjøtilstanden er det flere svinginger over en kort periode, med relativt høye topper. *Slack sling* intrefrer ved fire ulike tilfeller, innenfor tidsintervallet [20,50] sekunder. Partikkelhastigheten har i likhet med sjøtilstand 1 også en svingningstopp på rundt 40 sekunder, og de største variasjonene er på cirka 2 m/s. Det er også ved 40 sekunder strekkraften varierer mest. Dette tyder på at akselerasjonene og kreftene på basketen er størst i det basketen blir fullstendig neddykket.

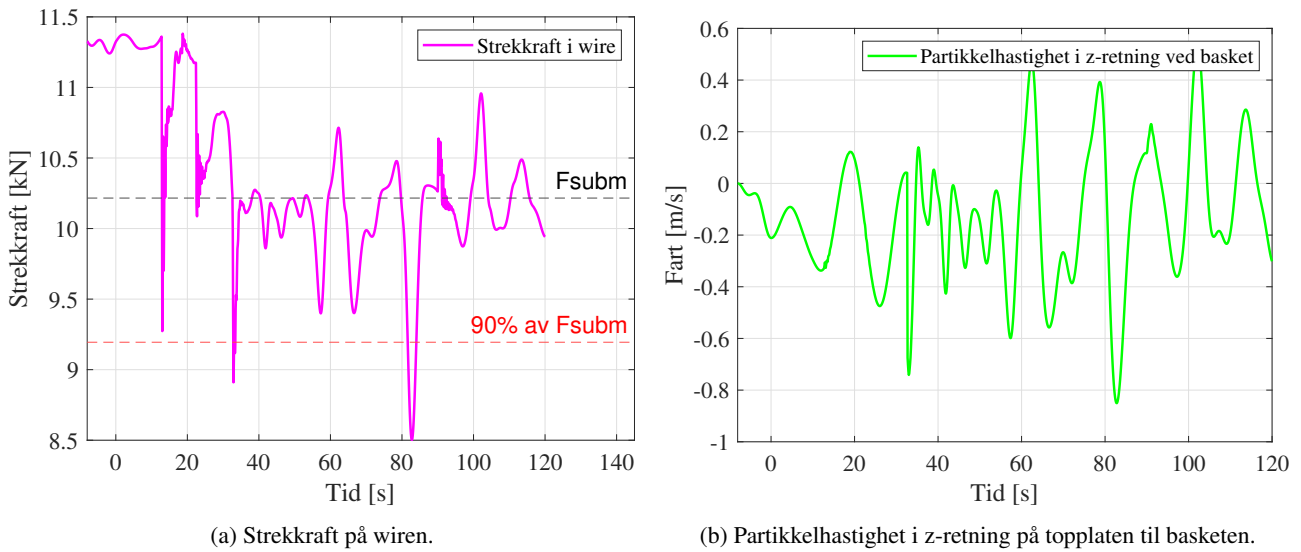
5.2.3 Sjøtilstand 3

Figur 30 viser at den hydrodynamiske vekten for denne sjøtilstanden er 81% av den neddykkede vekten, og er 9% mer enn hva *slack sling* kriteriet anbefaler. Figur 38 viser hvordan basketens posisjon endrer seg i x- og y-retningen for $H_s = 2.8\text{m}$, $T_z = 10\text{s}$, og bølgeretning 210° .



Figur 38: Dykkebasketens bevegelse i x- og y-retning for $H_s = 2.8\text{m}$, $T_z = 10\text{s}$ og bølgeretning = 210° .

Figur 38 viser likheter i bevegelse i x- og y-retning, med noe større bevegelser i x-retning. Beveggelsene viser seg som periodiske svingninger, med den største variasjon i x-retning på rundt 1.5 meter. Videre viser Figur 39 tidsserier for strekkraften på wiren og partikkelhastigheten i z-retning.



Figur 39: Strekkraft i wiren, og partikkelhastigheten i z-retning ved opphengspunktet til basketen ved $H_s = 2.8\text{m}$, $T_z = 10\text{s}$ og bølgeretning = 210° .

Strekkraften for denne sjøtilstanden har store svingninger, men ingen høye verdier på strekkraften i forhold til de tidligere sjøtilstandene. Den laveste verdien oppstår ved rundt 80 sekunder, som er perioden like før nedsenkingen til 10 meters dyp stopper. Dette skiller seg ut fra sjøtilstand 1 og 2, som begge opplever den minste kraften ved cirka 40 sekunder. Årsaken til dette kan skyldes at T_z -verdien er mye høyere for tilstand 3, enn for de tidligere sjøtilstandene. *Slack sling* inntreffer bare to ganger for denne tilstanden, og har den laveste strekkraften på rundt 8.5 kN.

Figur 39b viser også en lavere verdi for partikkelhastigheten, enn for de tidligere sjøtilstandene. Den største variasjonen her gir en fartsendring på 1.2 m/s. Sjøtilstand 3 gir de laveste verdiene for både strekkraft og partikkelhastighet. Dette skyldes at for denne tilstanden brukes de høyeste H_s - og T_z -verdiene. Da de høyeste bølgeene kommer sjeldnere, ettersom perioden mellom hver bølge er lengre.

6 Diskusjon

I dette kapittelet presenteres diskusjon av sertifisering av marine løfteoperasjoner i tråd med analysene av dykkebasketen, forenklingers betydning for dette, og resultatene fra analysene i forbindelse med operasjonsbegrensninger.

6.1 Sertifisering av marine løfteoperasjoner iht. standarder

Denne studien har undersøkt blant annet *slack sling* kriteriet i forbindelse med løfteoperasjoner av dykkebasket fra FPSO-en i Equinors prosjekt på Raia-feltet i Brasil. Motivasjonen for dette er blant annet å oppnå *Marine Warranty Surveyor*-godkjenning for løfteoperasjonene. Analysen er nemlig basert på relevante standarder og retningslinjer. Først og fremst referer Havindustritilsynets paragraf 93; *Bemannede undervannsoperasjoner*, til behovet for operasjonelle tiltak for å bevare sikkerheten til de som deltar i bemannede undervannsoperasjoner, og veileder til å benytte NORSOK U-100 for operasjonene [26]. Equinor bruker dette kravet over hele verden der de opererer, dermed også i Brasil. Standarden NORSOK U-100, utviklet i samarbeid mellom operatørselskaper, interesseorganisasjoner og myndigheter i 1993 [27], regulerer detaljer om kvalitet på utstyr og sikker operasjon. Under seksjon 8.11 i samme standard står det at sertifisering av *handling systems* skal være i samsvar med NORSOK R-003 [4]. I denne sistnevnte standarden, titulert "*Safe use of lifting equipment*", henvises det i seksjon 10.3 til DNV-ST-N001 for marine løfteoperasjoner [28]. Løft av dykkebasket kan kategoriseres som en marin løfteoperasjon og sertifiseres deretter. I DNV-ST-N001 er det beskrevet at *DNV Noble Denton marine services* er en global leverandør av marine garantitjenester og har satt industristandarder for marine operasjoner de siste 50 årene [29]. Seksjon 16 (*Lifting operations*) introduseres med at gjeldende standard (ST-N001) kan anvendes ved godkjenning av marine operasjoner med formål om *Marine Warranty* [29]. Videre i seksjon 16.17 er det beskrevet at dette skal utføres for å utlede begrensende sjøtilstander, samt kreftene på løftesystem og -objekt [29]. DNV krever da dokumentert analyse på diverse hydrodynamiske belastninger, der listen inkluderer en rekke egenskaper som er dekket i denne bacheloroppgaven, blant annet *slack sling* kriteriet. For gjennomførelse av analysene, henviser ST-N001 til DNV-RP-N103 ved bruk av den forenklete metoden. Det er denne metoden som er benyttet i gjeldene bachelorprosjekt, og riktig bruk av denne setter et kvalitetsstempel på fremgangsmåten.

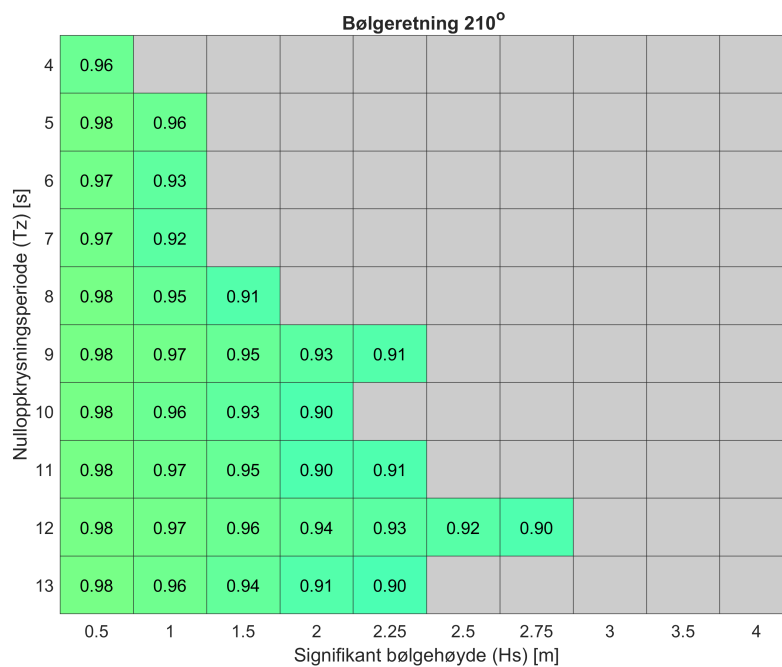
6.2 Forenklingers betydning for resultatene

Selvom analysene er utført i henhold til DNV-RP-N103, vil den forenklete metoden mest sannsynlig resultere i konservative verdier og resultater. Dermed kan det antas at resultatene i denne bacheloroppgaven kun er en indikasjon på det reelle bildet. Den forenklete metoden er basert på empiri, og dekker kun et begrenset antall geometrier og konstruksjoner. Det oppstår dermed situasjoner hvor brukeren av metoden må ta beslutninger for egen konstruksjon, dersom den ikke samsvarer godt med alternativene lagt fram i RP-N103. Det blir med dette essensielt med god akademisk forståelse av de hydrodynamiske belastningene og fenomenene, for å ta gode vurderinger på hva som resulterer i et realistisk bilde. Det lønner seg også å benytte resultater fra eksperimentelle forsøk, som gjerne støtter argumentene for avgjørelser som er tatt og forenklinger som er gjort. Dette er benyttet i flere tilfeller gjennom denne bacheloroppgaven.

Under Kapittel 4.2 forenkles strukturen på basketen, slik at detaljer med minimale hydrodynamiske påvirkninger neglisjeres. Disse detaljene vil i realiteten ha en effekt, og det kan antas at dette vil underskyte resultatene noe. I diskretiseringen under Kapittel 4.3 utledes diverse hydrodynamiske egenskaper og -koeffisienter, som alle antas å være uendret med vann- dybden. Dette reflekterer ikke et realistisk bilde. *Slack sling* kriteriet i seg selv er også et konservativt kriterium som skal gjelde både lette og tunge strukturer. Å benytte dette som restriksjon for operasjonene, vil dermed også resultere i usikkerhet ved bestemmelse av begrensende sjøtilstander. Den forenklete metoden, gjennomført i henhold til DNV-RP-N103, vil resultere i konservative verdier, men likevel kan det antas at resultatene gir en god indikasjon på den reelle basketens respons i heiseoperasjonene.

6.3 Operasjonsbegrensninger

Resultatene fra gjeldende analyse presenteres som *heatmaps* i seksjon 5.1 og viser at for flere av tilfellene vil det oppstå *slack sling*. Likevel kan presenterte og vedlagte resultater vise en antydning til en trendlinje der *slack sling* i stor grad ikke oppnås. Denne trendlinjen kan settes til tilnærmet lineært avtakende fra $T_Z \geq 5$ til $H_S < 2.5$, som illustrert nedenfor i Figur 40, der bølgeretning 210° er benyttet som eksempel. I disse sjøtilstandene kan heiseoperasjonen potensielt vurderes til trygg og gjennomførbar.



Figur 40: Trendlinje for *heatmap* der *slack sling* kriteriet ikke oppnås.

Likevel er det vanskelig å sette konkrete operasjonsbegrensninger, dette fordi det finnes få betingelsesmodeller for begrensning av dykkeoperasjoner. Kriteriet er en konservativ veiledningsmodell for industrien, og bruken av dette som restriksjon for dykkeoperasjoner er lite anvendt. Dermed kan operasjonsbegrensning basert på resultatene i seksjon 5.1 alene oppleves som et usikkert grunnlag å bestemme etter. Det velges derfor å se nærmere på noen bestemte sjøtilstander, hvor *slack sling* er rundt 10% under kriteriet. Sjøtilstandene velges basert på erfaringsbasert dykking, hvor det har vært nødvendig å bryte som følge av værforholdene.

De utvalgte sjøtilstandene viste at det var noe ulike respons i basketen for de ulike bølgeretningene. Sjøtilstand 1 hvor bølgeretningen var satt til 270° , hadde den største bevegelsen i y-retning, der basketen ikke bevegde seg i x-retning. Denne bølgeretningen treffer FPSO-en rett på dens babord side, og skaper bevegelse på basketen i y-retning. Sjøtilstand 2, med den laveste H_s - og T_z -verdien, viste den minste bevegelsen på basketen, men de største endringen i partikkelhastigheten. For sjøtilstand 3, hvor H_s - og T_z -verdien er høyest, er også strekkraften og de hydrodynamiske kreftene i z-retning størst. Her er partikkelhastigheten lav, og bevegelsen av basketen er jevnt over lik.

Parametrene i sjøtilstanden viser å ha ulike bidrag på kreftene og bevegelsen på basketen. Den signifikante bølgehøyden H_s , viser å størst innvirkning på hvor stor bevegelsen og kreftene blir, men virker å ha lite betydning på partikkelhastigheten. Her vil nuloppkrysnings perioden T_z ha større innvirkning. Bølgeretningen avgjør hvilken retning basketen beveges.

Tabell 12 viser at for nevnte 3 sjøtilstander, har dykkeoperasjon vært delvis gjennomført selvom gjeldene bachelorprosjekts resultater viser til oppnådd *slack sling*. Det er synlig at dykk ved hydrodynamisk kraft rundt 80% av neddykket vekt kan delvis gjennomføres, noe som synliggjør at DNVs forenklete metode gir konservative resultater. Dette argumenter for at *slack sling* kriteriet iht. DNVs forenklete metode ikke er en absolutt betingelse for dykkeoperasjoner, og at sjøtilstander ned til 10% under kriteriet bør analyseres ytterligere.

7 Konklusjon

Problemstillingen i denne bacheloroppgaven var å bestemme operasjonsbegrensninger for heiseoperasjon av dykkebasket fra FPSO-Raia. En problemstilling som denne krevde en fremgangsmåte bestående av flere steg. Det er modellert en forenklet modell av dykkebasketen, og den er diskretisert iht. DNV-RP-N103 der de hydrodynamiske egenskapene ble kvantifisert. Dette ble så brukt til å modellere testoppsett i programmet OrcaFlex, der basketen er festet i wire, som igjen er koplet til fartøyet. Forsøkene som er gjort bestod av nedsenking av basketen gjennom vannoverflaten og ned til 10 meters dyp, og dette var automatisert i MATLAB til å kjøre gjennom en rekke ulike sjøtilstander. Etter endt analyse er heatmaps vurdert til å bestemme begrensende sjøtilstander for heiseoperasjonen.

Det kan konkluderes med at det er vanskelig å sette en operasjonsbegrensning for dykking, dette fordi det finnes få betingelsesmodeller for begrenning av dette. *Slack sling* er en konservativ modell som er anvendt mindre ved analyse av dykkeoperasjoner. Dykkere er individuelle arbeidere, og har selv egne individuelle begrensninger på hvilke dykk som anses å være trygge og gjennomførbare. Likevel viser rapportens resultater en gjennomgående trendlinje, synlig i heatmapene. Det kan antas at i sjøtilstander $H_S < 2.5$ i kombinasjon med $T_Z \geq 5$ er dykkeoperasjonene fullt gjennomførbare, dette fordi *slack sling* kriteriet iht. DNVs forenklete metode og Formel 25 i stor grad ikke oppnås. Som diskutert i Seksjon 6.3, er dette kriteriet konservativt, og behøver ikke være en absolutt betingelse. I sjøtilstander der erfaringsbasert dykking var delvis gjennomført, viser denne rapportens resultater til hydrodynamisk kraft rundt 80% av minste hydrostatiske kraft. Det kan dermed konkluderes med at rapporten avdekker argumenter for at operasjonen kan oppleves som gjennomførbar selvom *slack sling* er oppnådd, med en veiledende *slack sling* grense ved rundt 80%. Likevel, for å øke forståelsen av fenomenene, og potensielt kunne fastslå om disse sjøtilstandene ved oppnådd *slack sling* er operasjonstrygge, vil videre arbeid med omfattende analyser være nødvendig.

Bacheloroppgavens formål; bestemme operasjonsbegrensninger for heiseoperasjonen av dykkebasket fra FPSO Raia, kan vurderes til gjennomført. Dette på grunnlag av at DNVs forenklete metode antas å gi en indikasjon på det reelle bildet, og en trendlinje med uoppnådd *slack sling* indikerer operasjonstrygge sjøtilstander. På en annen side er det også avdekket konservatisme ved bruk av *slack sling* kriterie som en betingelse for begrenning av dykkeoperasjoner, der erfaringsbasert dykking har vært gjennomført til tross for at gjeldende prosjekts resultater viser til oppnådd *slack sling* rundt 10% under kriteriet. Dette kan være nyttig informasjon i videre forskning på feltet.

8 Videre arbeid

For arbeidet videre på dette bachelorprosjektet, vil det endelige målet være å oppnå *Marine Warranty Surveyor*-godkjenning for heiseoperasjonen av dykkebasketen. Hva dette vil si er beskrevet i Kapittel 6.1. For å oppnå godkjenningen, vil omfattende analyser utover DNV's forenklede metode kreves. Det vil være behov for å modellere LARS-systemets og krankrokens bevegelsesmønster i OrcaFlex, samt se på hvordan basketen responderer med last. For basketen med last, kan dykkeren settes opp som et multilegeme eller grensebetingelse i en *CFD*-analyse, hvor det er mulig å se påkjenningen på dykkeren. Videre kan koeffisientene beregnes på nytt, da med eksperimentelle forsøk av en skalert dykkebasket, eller gjennom *CFD*-analyse. Disse metodene vil sørge for nøyaktige verdier, og kvantifiseringen kan bli gjennomført uten konservative antakelser.

I forlengelse av dette, kan det også undersøkes ytterligere rundt bruken av slack sling kriteriet som betingelsesmodell for dykkeoperasjoner. Potensielt kan det avdekkes til hvilken grad DNVs forenklede metodes Formel 25 er anvendelig på en dykkebasket, og hvorvidt dette er felt innen industristandarder som kan oppdateres.

Referanser

- [1] T. Fallet og F. Rabbevåg. produksjonsskip.
<https://snl.no/produksjonsskip>, February 2021.
- [2] Equinor. em drivverdighetserklæring for bm-c-33-området i campos-bassenget, brasil.
<https://www.equinor.com/no/nyheter/20230921-drivverdighetserklaering-bm-c-33-brasil>, September 2023.
- [3] F. Fanebust og M. Smith-Solbakken. nordsjødykkerne.
<https://snl.no/nordsj>
- [4] Standard Norge. *Dykkeoperasjoner*. Standard Norge, norsok u-100:2023(e) edition, 2023.
- [5] Det Norske Veritas. *Offshore and platform lifting appliances*. DNV, dnv-st-0378:2019-07-amended 2021-10(e) edition, 2019.
- [6] Det Norske Veritas. *Offshore and platform lifting appliances*. DNV, dnv-st-0378:2019-07-amended 2021-08(e) edition, 2019.
- [7] Submarine Manufacturing & Products Limited. Diver twin basket launch and recovery system (lars) — smp ltd uk.
<https://www.smp-ltd.com/shop/smp-twin-basket-diver-launch-and-recovery-system-lars/>.
- [8] Y. Cao Q. Li B. Li K. L. Walker F. Giorgio-Serchi S. Aracri A. Kiprakis A. A. Stokes R. Gabl, T. Davey and D. M. Ingram. Hydrodynamic loads on a restrained roV under waves and current. *Ocean Engineering*, 234:109279, 2021.
- [9] J.M.J. Journée and W.W. Massie. *OFFSHORE HYDROMECHANICS*. Delft University of Technology, 2001.
- [10] Bjørnar Pettersen. *Marinteknikk 3 Hydrodynamikk*. Akademika, 2018.
- [11] Det Norske Veritas. *Environmental conditions and environmental loads*. DNV, 2019.
- [12] A. F. Molland. *The Maritime Engineering Reference Book*. Butterworth Heinemann, 2009.
- [13] J. W. Johnson J. R. Morison and S. A. Schaaf. The force exerted by surface waves on piles. *Journal of Petroleum Technology*, 2:149–154, 1950.
- [14] Orcina. Morison's equation. <https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Content/html/Morisonsequation.htm>.
- [15] O. M. Faltinsen. *Sea Loads On Ships and Offshore Structures*. Cambridge University Press, 1990.
- [16] Det Norske Veritas. *Modelling and analysis of marine operations*. DNV, dnv-rp-n103:2017-07-amended 2021-09(e) edition, 2017.
- [17] Orcina. 6d buoys: Hydrodynamic properties of a rectangular box.
<https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Content/html/6Dbuoys,Hydrodynamicpropertiesofarectangularbox.htm>.
- [18] E. Mohaghegh. Vorticity generation over an oscillating flat plate airfoil.
<https://www.youtube.com/watch?v=QmkuKoxoS9I>, August 2018.
- [19] P. Durham. What is SOLIDWORKS?
<https://www.technia.com/blog/what-is-solidworks/>, January 2022.

- [20] Orcina. OrcaFlex Documentation.
<https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/>.
- [21] F. Mentzoni and T. Kristiansen. Numerical modeling of perforated plates in oscillating flow. *Applied Ocean Research*, page 44, 2019.
- [22] K. Steirosand and M. Hultmark. Drag on flat plates of arbitrary porosity. *Journal of Fluid Mechanics*, page 11, 2018.
- [23] Engineers Edge LLC. Wind Force on Flag Pole Cylinder Formula and Calculator.
https://www.engineersedge.com/calculators/wind_force_on_flag_pole_16039.htm.
- [24] Støberiet Ørkild. Ballastbly.
<http://www.oerkild.com/html/ballast.html>.
- [25] A. Møllerløgken og O. S. Eftedal J. Risberg. *Norske dykke- og behandlingstabeller*. Eget forlag, 2019.
- [26] Havindustritilsynet. Bemannede undervannsoperasjoner.
<https://www.havtil.no/regelverk/alle-forskrifter/aktivitetsforskriften/XIX/93/?expandGuideline=truehideParagraph=true>.
- [27] A. Aabø. Felles standarder.
<https://ndla.no/subject:1:6eb22154-3d19-4551-93f5-f137bb5abba8/topic:e238932c-2ff7-4066-82fe-210e25476d34/topic:1:5f0ef6f5-1b8f-4ca0-b6a2-2d7691630340/resource:1:166429>, April 2018.
- [28] Standard Norge. *Sikker bruk av løfteutstyr Rev.3, Juni 2017*. Standard Norge, NORSOK R-003:2017+AC(E) edition, 2017.
- [29] Det Norske Veritas. *Marine operations and marine warranty*. DNV, dnv st-n001:2023-12(e) edition, 2023.

Figurer

1	LARS og dykkebasket.	2
2	Harmoniske bølger [9].	3
3	Lineær superposisjon. Illustrert ved flere regulære bølger som danner en irregulær bølge [9].	4
4	Sammenheng mellom bølger og bølgespekter [9].	5
5	Sammenheng mellom JONSWAP- og Bretschneider-spekter [9].	6
6	Bølgespekter, hiv-bevegelse fra RAO og resulterende responsspekter [12].	7
7	Virvelgenerering ved oscillerende plate [18].	9
8	Illustrert eksempel på <i>slack sling</i> fenomenet.	11
9	Segmenter og noder i <i>line</i>	14
10	Sammenheng mellom T_e og T_w i wiren.	15
11	Venstreside, framside og høyreside av dykkebasket hos dykkerutdanningen på Skålevik.	17
12	Forenklet basket modellert i SolidWorks.	17
13	Inndeling for diskretisering av dykkebasket.	18
14	Topplaten med lokale akser.	19
15	Topplaten i alle tre plan.	19
16	C_D som funksjon av perforasjonsfaktor (her: β) i fri strøm [22].	20
17	Midtpartiet med lokale akser.	21
18	Midtparti i XZ-plan med markert dragareal.	22
19	Midtparti normalt på YZ- og XY-plan.	22
20	Midtpartiet med markerte elementer 1-3 for diskretisering.	23
21	C_D som funksjon av Re [23].	23
22	Oppsettet i OrcaFlex i <i>graphic mode</i>	25
23	Vertikale posisjon til basketen gjennom analysen i stillestående sjø.	26
24	Oppsettet i OrcaFlex.	27
25	Diskretisering av basket med bunnplate, midtparti og topplate i OrcaFlex.	28
26	Forholdet mellom minste hydrodynamiske- og statiske kraft ved 30°	32
27	Forholdet mellom største hydrodynamiske- og minste statiske kraft ved 30°	32
28	Forholdet mellom minste hydrodynamiske- og statiske kraft ved 60°	33
29	Forholdet mellom største hydrodynamiske- og minste statiske kraft ved 60°	33
30	Forholdet mellom minste hydrodynamiske- og statiske kraft ved 210°	34
31	Forholdet mellom største hydrodynamiske- og minste statiske kraft ved 210°	34
32	Forholdet mellom minste hydrodynamiske- og statiske kraft ved 240°	35
33	Forholdet mellom største hydrodynamiske- og minste statiske kraft ved 240°	35
34	Dykkebasketens bevegelse i x- og y-retning for $H_s = 2.5\text{m}$, $T_z = 7\text{s}$ og bølgeretning = 270°	36
35	Strekraft i wiren, og partikkelhastigheten i z-retning ved opphengspunktet til basketen ved: $H_s = 2.5\text{m}$, $T_z = 7\text{s}$ og bølgeretning = 270°	37
36	Dykkebasketens bevegelse i x- og y-retning for $H_s = 2.25\text{m}$, $T_z = 5\text{s}$ og bølgeretning = 300°	37
37	Strekraft i wiren, og partikkelhastigheten i z-retning ved opphengspunktet til basketen ved: $H_s = 2.25\text{m}$, $T_z = 5\text{s}$ og bølgeretning = 300°	38

38	Dykkebasketens bevegelse i x- og y-retning for $H_s = 2.8\text{m}$, $T_z = 10\text{s}$ og bølgeretning = 210°	38
39	Strekraft i wiren, og partikkelhastigheten i z-retning ved opphengspunktet til basketen ved $H_s = 2.8\text{m}$, $T_z = 10\text{s}$ og bølgeretning = 210°	39
40	Trendlinje for <i>heatmap</i> der slack sling kriteriet ikke oppnås.	41

Tabeller

1	Utgangsposisjon til basket i globalt koordinatsystem.	16
2	Basket vekt ved de ulike lastkondisjonene.	16
3	Resultater for diskretisering topplate.	21
4	Resultater for diskretisering midtparti.	24
5	Resultater for diskretisering bunnlate.	25
6	Environment data for analysen.	26
7	De tre parametere som kombineres for forsøkene.	27
8	<i>Line</i> data for analysen.	28
9	Seksjonsinndeling av wiren.	28
10	Data fra dykkebasketen i OrcaFlex.	29
11	Input data i OrcaFlex for Bunnplate, Midtparti og Topplate.	29
12	Erfaringsbasert dykking.	30
13	Tabelloversikt over vedlegg.	50

Vedlegg

Vedlegg nr.	Beskrivelse
A	Arbeidstegninger forenklet dykkebasket
B	DNV-RP-N103 Tabell A-1, A-2, B-1 og B-2
C	Diskretisering Excel fil
D	Heatmaps for alle forsøk
E	OrcaFlex modell dat-fil
F	MATLAB-script for automatisering

Tabell 13: Tabelloversikt over vedlegg.

