

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

Masteroppgave 2015
30 stp

Løfteoperasjoner gjennom havoverflaten

Lifting Operations Through the Water Surface

Truls Weberg

FORORD

Denne masteroppgaven er tilknyttet mitt studie i Maskin, prosess og produktutvikling ved Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT) ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet i Ås, våren 2015. Oppgaven har et omfang på 30 studiepoeng.

Rapporten omhandler offshore løfteoperasjoner hvor lasten senkes gjennom havoverflaten, og en kartlegging av det kompliserte lastbildet som opptrer. I samtaler med førsteamanuensis Geir Terjesen vedrørende valg av oppgave ble denne foreslått. Det er ønsket ved IMT å øke kunnskapen om slike løfteoperasjoner. Jeg synes offshore området generelt er spennende og fant denne oppgaven meget interessant.

Oppgaven starter med å beskrive i hvilke sammenhenger løft gjennom havoverflaten er aktuelt, deretter blir det sett på hvilket regelverk som gjelder. Videre blir teorien som benyttes presentert, og til slutt blir et eksempel gjennomgått i henhold til relevant standard.

Rapporten kan brukes som en veileder for å få en innføring i løft gjennom havoverflaten og de hydrodynamiske kreftene som opptrer. Videre gir den leseren en introduksjon om relevante standarder på området og gjennomgår også et regneeksempel som belyser bruken av en standard. Oppgaven blir dermed også et godt utgangspunkt for andre masteroppgaver som ønsker å gå videre med samme tema. Det forutsettes at leseren har grunnleggende fysikk kunnskaper på ingeniørnivå for å få fullt utbytte av oppgaven.

Til slutt vil jeg benytte anledningen til å takke førsteamanuensis og hovedveileder Geir Terjesen for samarbeidet og god veiledning underveis. Jeg vil også takke Håvard Vollset Lien ved Skipsteknisk AS for verdifull skipsdata og annen info.

Ås, 13. Mai 2015

Truls Weberg

SAMMENDRAG

I forbindelse med offshore løfteoperasjoner senkes/heves ofte lasten gjennom havoverflaten. I disse tilfellene utsettes lasten og løfteutstyret for et komplisert lastbilde. IMT ved NMBU ønsker å øke kompetansen vedrørende slike løfteoperasjoner og initierte derfor denne masteroppgaven

Målet med denne oppgaven er å fremskaffe kunnskap om de hydrodynamiske kreftene som oppstår når løft gjennom havoverflaten skal gjennomføres. Videre skal beregningene forankres i relevant regelverk og det skulle utarbeides eksempler som anvender relevante standarder.

Det ble utført en litteraturstudie for å fremskaffe relevante standarder og bakgrunnsstoff på området. Deretter ble det funnet frem til ressurspersoner på området og utført en dataanalyse på materialet tilegnet fra en av disse.

DNV (Det Norske Veritas) har utgitt en «Recommended Practice» [8] om temaet. Der presenteres en forenklet metode for beregninger ved løft gjennom havoverflaten, denne ble lagt som basis for oppgaven. Arbeidet med å forstå beregningsmetoden var tidkrevende, det krevde et omfattende teorigrunnlag og kartlegging av nødvendig data.

Hensikten med DNV's forenklede metode er å finne tillatte sjøforhold for låring av lasten. Det ble satt to kapasitetskrav: 1. De hydrodynamiske kreftene skal ikke overstige 90% av den statiske vekten. 2: Og/eller DAF-verdien skal ikke være større enn 2,0. DAF-verdien er et benevningsløst tall som brukes for å sjekke kapasiteten til kranen.

Hovedutfordringen for å lage et talleksempel ble å finne RAO-data (Response Amplification Operator) for et skip. Håvard Vollset Lien ved bedriften Skipsteknisk AS var behjelpelig, og sendte nødvendig data for skipet Edda Flora [26] [28]. Lasten det er gjort beregninger for er et 10m langt rørstykke. Tre forskjellige lasttilfeller ble identifisert, og et gjeldende bølgespekter det skulle gjøres beregninger for. Ved beregningen av skipsbevegelsene viste det seg at en måtte ha bølgehellings (wave slope). Dette presenterer ikke DNV, og det ble gjort en omfattende undersøkelse for å finne en gjeldende metode. Resterende beregninger for alle bølgehøyder og perioder er gjort i eget regneark.

Rapporten beskriver altså relevant terminologi og gir også nødvendig teori- og datagrunnlag for å kunne utføre en beregning etter DNV's forenklede metode.

ABSTRACT

In conjunction with offshore lifting operations, the load is often lowered/raised through the water surface. In these cases, the load and lifting equipment are exposed to a complicated combination of forces. IMT at NMBU wishes to increase the knowledge regarding these lifting operations and initiated this master thesis.

The main purpose is to acquire knowledge about the hydrodynamic forces that occurs when lifting through the water surface. Further, the calculations must applicate the relevant regulations, and examples using relevant standards should be created.

A study in literature were performed to acquire relevant standards and background information regarding the subject. Then people of resource on the subject were identified, and a data analysis on material given form one of these was performed.

DNV (Det Norske Veritas) has published a “Recommended Practice” [8] regarding the subject. It presents a simplified method for calculations when lifting through the water surface, this made the foundation of the thesis. The work of understanding the method was time consuming, it took extensive background knowledge and identifying which data was required.

The main purpose of DNV’s simplified method is finding allowable sea-states for lowering the load. Two capacity criteria’s were established: 1. The hydrodynamic forces shall not exceed 90% of the static weight. 2. And/or the DAF-value must be less than 2,0. The DAF-value is a unit less number, which is used for checking the capacity of the crane.

The main challenge when creating an example was finding RAO-data (Response Amplification Operator) for a ship. Håvard Vollset Lien at the company Skipsteknisk AS was helpful, and sent necessary data for the ship Edda Flora [26] [28]. The load calculated is a 10m long pipe. Three different load cases were identified, and a wave spectrum for the calculations. When calculating ship movements the wave slope proved necessary. DNV does not provide this, so extensive research was required before finding an applicable method. A calculation is conducted for one wave height and period to show an example of “how it’s done”. The remaining calculations for all wave heights and periods are performed in a spreadsheet.

The thesis describes relevant terminology and gives the necessary theory- and data-foundation to perform a calculation according to DNV’s simplified method.



INNHALDSFORTEGNELSE

Innhold	side:
FORORD	1
SAMMENDRAG	2
ABSTRACT	3
INNHALDSFORTEGNELSE	4
1. Innledning.....	8
1.1 Bakgrunn.....	8
1.2 Problemstillinger.....	10
1.3 Målsettinger og begrensninger.....	11
1.4 Kvalitetssikring.....	11
1.5 Definisjoner.....	12
1.6 Terminologi og begreper.....	14
2. Beskrivelse.....	17
2.1 Standarder og regelverk for marine operasjoner.....	17
2.2 Relevante standarder og RP'er.....	18
3. Teori.....	19
3.1 Løfteoperasjonen.....	19
3.2 Kraftbildet.....	20
3.3 Hydrodynamiske krefter.....	20
3.3.1 Slamming-krefter.....	21
3.3.2 Varierende oppdriftskrefter.....	22
3.3.3 Masse-krefter.....	22
3.3.4 Drag-krefter.....	23
3.4 Bølgeteori.....	23



3.4.1	Regulære bølger	24
3.4.2	Bølgehøyder	25
3.4.3	Bølgeperioder	26
3.4.4	Irregulære bølger	27
4.	The Simplified Method	28
4.1	Antagelser ved bruk av metoden	28
4.2	Total kraft	28
4.2.1	Statisk vekt	29
4.2.2	Hydrodynamisk last	29
4.3	Bølgeperioder og kinematikk	30
4.3.1	Alternativ 1	30
4.3.2	Alternativ 2	31
4.4	Krantipp og fartøybevegelser	32
4.5	De hydrodynamiske kreftene	34
4.5.1	Slamming-kraft	34
4.5.2	Variierende oppdriftskraft	35
4.5.3	Masse-krefter	35
4.5.4	Drag-krefter	37
4.6	Kapasitetskrav	38
4.6.1	Snap-kriteriet	38
4.6.2	Kapasitetssjekk	38
4.7	Snap-kraft	39
5.	Kommentar til metoden og kapasitetskrav	41
5.1	Snap-kriteriet	41
5.2	DAF-verdi	41
5.3	Kapasitetskrav	42



5.4 Erfaringer med metoden og bruksområder.....	43
6. Last og bølgespekter.....	45
6.1 Lasttilfeller	46
6.2 Koeffisienter.....	49
6.3 Bølgespekter for beregningene.....	51
7. Fartøy og kranbevegelser	53
7.1 Frihetsgrader.....	53
7.2 Transferfunksjonen og RAO	54
7.3 Edda Flora	54
7.4 Skipsbevegelser	56
8. Beregninger	61
8.1 Krantippens bevegelser	61
8.2 Lasttilfelle 1.....	62
8.2.1 Slamming-krefter	63
8.2.2 Hydrodynamisk kraft.....	63
8.3 Lasttilfelle 2.....	64
8.3.1 Beregning av tyngdepunkt	64
8.3.2 Varierende oppdriftskraft	66
8.3.3 Drag-krefter	66
8.3.4 Masse-krefter.....	67
8.3.5 Hydrodynamisk kraft.....	68
8.4 Lasttilfelle 3.....	69
8.4.1 Drag-krefter	69
8.4.2 Masse-krefter.....	70
8.4.3 Hydrodynamisk kraft.....	70
8.5 Oppsummering og kapasitetssjekk.....	71



8.6 Rykkklaster.....	71
8.6.1 Lasttilfelle 1.....	72
8.6.2 Lasttilfelle 2.....	72
8.6.3 Lasttilfelle 3.....	74
8.7 DAF-verdi og resultat.....	74
9. Resultater.....	76
10. Diskusjon av resultater	82
10.1 Lasttilfeller	82
10.2 Snap-krefter og DAF-verdi	83
10.3 Operasjonsvindu.....	83
11. Konklusjon	85
11.1 Videre arbeid	86
12. Referanser.....	87
14.1 Skriftlige kilder	87
14.2 Nettkilder.....	88
13. Vedlegg	89

1. Innledning

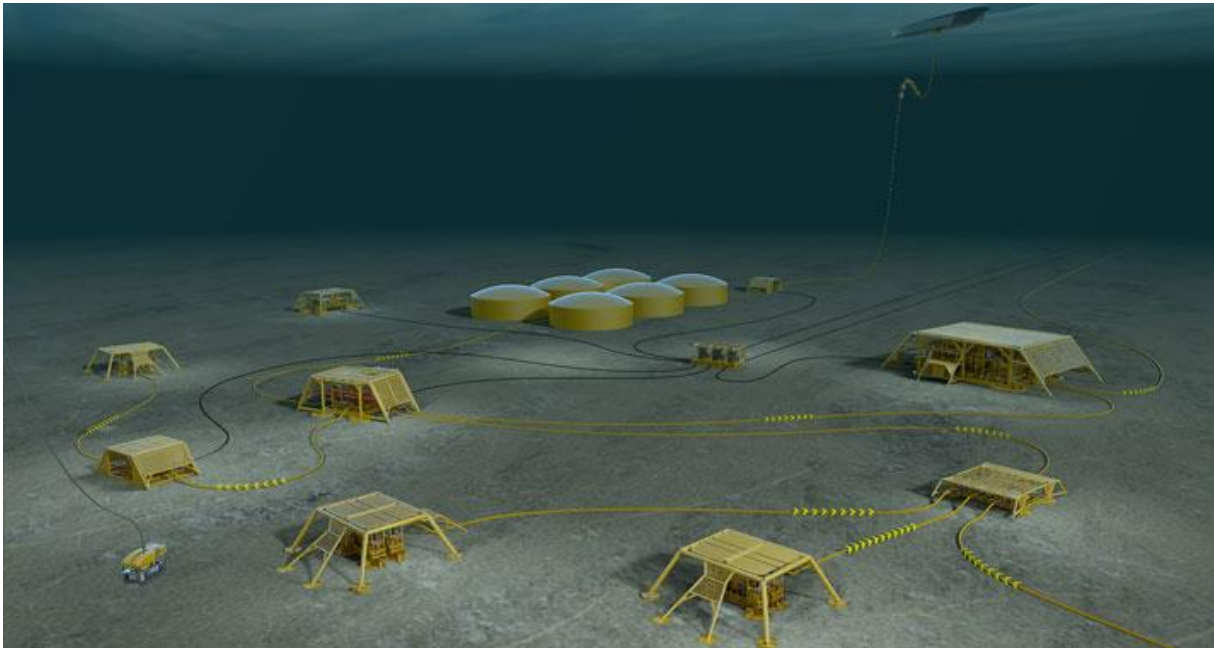
1.1 Bakgrunn

Den første subsea-brønnen ble installert i Mexicogolfen i 1961. Siden den gang har utviklingen tatt store steg med Norge som en ledende aktør på feltet. Norges første subsea-prosjekt var i 1982 på Frigg feltet i Nordsjøen.

Mot slutten av 90-tallet var Norge ledende innenfor subsea-teknologi, og ideen om å introdusere dette til resten av verden ble initiert. Teknologien ble testet utenfor kysten til Vest-Afrika. Flere store internasjonale aktører og bedrifter fattet interesse, og teknologien ble gradvis mer vanlig. Dette brakte kostnadene ned og økte funksjonaliteten [1].

Økende vanddyb og varierende oljepriser gjør at en økende andel av prosessutstyret blir plassert på havbunnen. Da kan en produksjonsplattform dekke større områder, og en kan utvinne fra mindre felt hvor det ikke ville vært profitabelt med en egen plattform. Plattformen kan også utelates hvor det er for dypt, eller hensiktsmessig å transportere olje og gassen direkte til kontinentet gjennom rørledninger på havbunnen. Bare Statoil har over 500 havbunnsbrønner, som tilsvarer over halvparten av deres produksjon [2]. Dette er en indikering på hvor stor industrien har blitt.

Subsea-teknologi bidrar til å øke utvinningsraten av oljebrønner. Men det viktigste er at mange oljefelt som ikke ville vært finansielt bærekraftige, blir profitable med subsea-teknologien. Den teknologiske utviklingen muliggjør oljeutvinning ved større dybder, tøffere forhold og ved større avstander fra kysten.



Figur 1.1: Typisk havbunnsanlegg for et oljefelt [2].

Størrelsen på oljeindustrien og omfanget av å installere et havbunnsanlegg har ført til en egen næring for løft, transport og installasjon av utstyr og strukturer. Det er flere metoder for å plassere utstyr på havbunnen, men den mest brukte er løft med kran fra båt «on site». Det assisteres med ROV (Remotley Operated Veichle) under vann.

Vekt og geometri på utstyr og strukturer som brukes er ekstremt varierende, fra et par tonn og noen kubikkmeter, til over 1000 tonn og på størrelse med hus. Derfor finnes det også tilsvarende størrelser på skip, kraner og løfteutstyr.

All denne variasjonen gjør at de hydrodynamiske kreftene som opptrer ved løft og låring av last ned til havbunnen er vanskelig å estimere. Bølger er høyst irregulære og uforutsigbare, men det er viktig å vite hvilke bølgehøyder og perioder som er begrensende for nedsenkning av lasten. Slik at operasjonen kan planlegges opp mot værforhold.

Løft gjennom havoverflaten er gjenkjent som den kritiske delen av løftet. Det er her de største hydrodynamiske kreftene vil oppstå, og lastbildet er komplisert. DNV har gitt ut en «Recomended Practice» for «Modelling and Analysis of Marine Operations», den tar for seg hele aspektet med en havbunnsinstallasjon. Der er det også utarbeidet en forenklet metode (simplified method) for beregning av hydrodynamiske krefter ved løft gjennom havoverflaten.

Det er et ønske av IMT ved NMBU om å øke kunnskapen om slike løfteoperasjoner, derfor har denne oppgaven blitt initiert. Fokus vil ligge på å estimere de hydrodynamiske kreftene ved løft gjennom plaskesonen på en gitt last. Dette ved bruk av DNV's forenklete metode.



Figur 1.2: Modell av båt som gjennomfører en løfteoperasjon [3].

1.2 Problemstillinger

- Hvilke hydrodynamiske krefter oppstår ved løft gjennom havoverflaten?
- Hvordan skal disse kreftene estimeres?
- Hvilke forskrifter og standarder gjelder?
- Hvilke forkunnskaper er nødvendig?
- Hvilke data/input er nødvendig for å gjennomføre beregningene?

1.3 Målsettinger og begrensninger

Hovedmål:

De hydrodynamiske kreftene for et gitt løft gjennom havoverflaten skal estimeres. Beregningene skal tilfredsstille gjeldende standarder og forskrifter for offshore virksomhet i norsk sektor.

Delmål:

1. Gjøre rede for forskrifter og standarder.
2. Definere grunnleggende teori og begreper.
3. Innføring i beregningsmetode og innhenting av nødvendig data.
4. Bestemme laster, lasttilfeller og fastsette ulike koeffisienter.
5. Lage regneark og utføre beregninger.
6. Lage tabeller og diagrammer for resultatpresentasjon.
7. Konkludere og fullføre rapport.

Begrensninger:

- DNV's forenklete metode for beregning av de hydrodynamiske lastene blir brukt. Alle forenklinger og forutsetninger gitt ved bruk av denne metoden er gjeldene.
- Det beregnes kun med alternativ 1 for bølgekinematikk.
- Det blir kun beregnet for en bølgeretning, 0° , treffer båten i baugen (rett forfra).
- Ved estimering av bølgehelling er en geometrisk forenkling gjort.
- Ved utregning av snap-hastigheten blir det kun brukt en verdi for låringshastigheten.

1.4 Kvalitetssikring

Produkt

Alle beregninger er utført i henhold til DNV's «Recommended Practice». Skipsdata har blitt innhentet for at resultatene skal ligge nærmere virkeligheten.

Rapport

Rapporten er gjennomgått flere ganger, gransket for språkfeil, alle referanser og nummereringer er sjekket nøye. Det samme er utregninger, formler, tabeller, diagrammer og symboler.

Løsningsverktøy

- Microsoft Excel 2013
- Microsoft Word 2013
- SolidWorks 2014-2015, Dassault Systems
- Paint

1.5 Definisjoner

Subsea

Betyr «under havet». Det har blitt et generelt begrep i oljebransjen for all virksomhet som foregår under havoverflaten. Blir brukt tilsvarende i denne oppgaven.

Sjøforhold

På engelsk brukes «sea-states». I oppgaven menes hovedsakelig bølgeperiode og bølgehøyde. Det er hovedvariablene som vil avgjøre størrelsene på de hydrodynamiske kreftene.

ROV

«Remotely operated vehicle» er en undervannsrobot som brukes til å assistere og gjennomføre subsea-operasjoner. Den styres fra skipet.

Perforasjon

Perforasjon betyr gjennomhulling eller gjennomboring. Perforasjon av en subsea-struktur er hvis luft og vann kan strømme vertikalt gjennom strukturen når den senkes. Det beregnes i prosent.

Splash-zone

«Splash zone» eller bølgesonen er området rundt stillevanns-nivået (havoverflaten) hvor bølgene slår.

Oppdrift

Oppdrift er en kraft som virker på et legeme som er delvis, eller helt nedsenket i en væske eller gass. Oppdriftskraften er like stor som tyngden av mengden væske legemet fortrenger. Kraften virker alltid oppover, motsatt rettet av tyngdekraften.

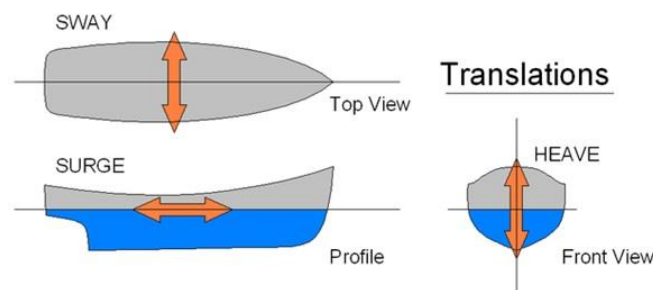
Krantipp

Eventuelt krantupp, er helt ytterst på kranen hvor wire/løfteslingen går vertikalt ned til lasten.

Skipsbevegelser

Bevegelsene til et skip er definert av seks frihetsgrader. De lineære bevegelsene er [4]:

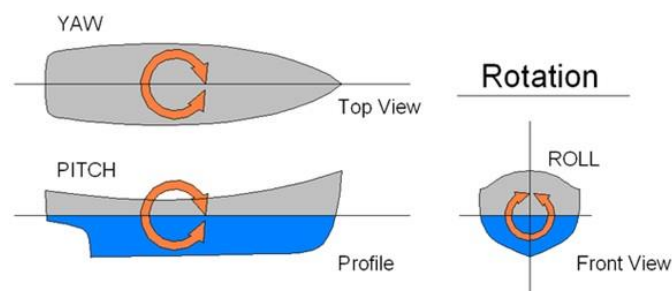
- **Heave (Hiv):** Den lineære vertikale bevegelsen (opp/ned)
- **Sway (Svai):** Den lineære laterale bevegelsen (sideveis)
- **Surge (Jag):** Den lineære lendebevegelsen (fram/tilbake)



Figur 1.3: De lineære bevegelsene til et skip [4].

Et skip har tre rotasjons-akser. Den vertikale akse går vertikalt gjennom skipet og dets tyngdepunkt. Den laterale akse går horisontalt på tvers av skipet gjennom tyngdepunktet. Den langsgående akse går horisontalt på langs med skipet gjennom dets tyngdepunkt. Rotasjonsbevegelsene er [4]:

- **Pitch (Stamp):** Er rotasjon om den laterale akse på tvers av skipet (nikking)
- **Roll (Rull):** Er rotasjon om den langsgående akse (krenkning)
- **Yaw (Gir):** Er rotasjon om den vertikale akse



Figur 1.4: Rotasjonsbevegelsene til et skip [4].

1.6 Terminologi og begreper

Latin

Tabell 1.1: Latinske symbolforklaringer.

Symbol	Betydning	Enhet
°	Symbol for grader	Grader
%	Symbol for prosent	Prosent
a_{ct}	Vertikal amplitude-akselerasjon av krantipp	m/s^2
a_w	Vertikal vannpartikkel-akselerasjon	m/s^2
A_c	Bølgetopp høyde	m
A_h	Bølgedal dybde	m
A_p	Areal projisert på horisontalplan	m^2
A_{pi}	Areal av delstruktur projisert på horisontalplan	m^2
A_s	Slamming-areal	m^2
\tilde{A}_w	Midlere vannlinjeareal	m^2
A_{33}	Tilleggsmasse	kg
A_{33i}	Tilleggsmasse for delstruktur	kg
A_{33o}	Tilleggsmasse for flat plate	kg
A_{33s}	Solid tilleggsmasse	kg
b	Distanse fra langskips akse til krantipp	m
c	Bølgehastighet/fasehastighet	m/s
C	Korreksjons faktor	-
C_A	Tilleggsmasse-koeffisient	-
C_D	Drag-koeffisient	-
C_S	Slamming-koeffisient	-
d	Avstand til CoG av neddykket del	m
D	Lengste dimensjon	m
e	Eksponentialfunksjonen	-
f	Bølgefrequens	s^{-1}
F_D	Drag-kraft	N
F_{Di}	Drag-kraft på delstruktur	N
F_{hyd}	Hydrodynamisk kraft	N
F_M	Masse-krefter	N
F_{Mi}	Masse-krefter for delstruktur	N
F_p	Varierende oppdrifts-kraft	N
F_{slam}	Slamming-kraft	N
F_{snap}	Snap-kraft	N
F_{static}	Statisk vekt	N
$F_{static-max}$	Maks statisk vekt	N
$F_{static-min}$	Minimum statisk vekt	N
F_{total}	Total kraft	N
$F(SPL)$	Ekstra kraft	N
g	Tyngdekraftens akselerasjon	m/s^2
G_r	Vekt av rør	kg
G_v	Vekt av påfylt vann	kg

Tabell 1.1 fortsetter.

h	Høyde av objekt	m
H, H_1, H_2, H_3	Bølgehøyde	m
H_M	Mest sannsynlige bølgehøyde	m
H_s	Signifikant bølgehøyde	m
$H_{1/10}$	Høyeste 10% av bølgeene	m
k	Bølgenummer	-
k_{block}	Stivhet av flere liner i blokk	N/m
k_{boom}	Stivhet av kranbom	N/m
k_{line}	Stivhet av heisline	N/m
k_{other}	Andre stivhets bidrag	N/m
k_{rigging}	Stivhet av rigging	N/m
k_{soft}	Stivhet av soft-strop/heave kompensasjonssystem	N/m
K	Stivhet av heissystem	N/m
l	Distanse fra tverrskips akse til krantipp	m
L	Lengde av heisline	m
m	Masse av heisline per lengde	kg/m
M	Masse av løftet objekt	kg
M_{max}	Maks masse av løftet objekt	kg
M_{min}	Minimum masse av løftet objekt	kg
N, P	Antall	-
p	Perforasjons rate	%
r	Indre radius	mm
R	Ytre radius	mm
T, T_1, T_2, T_3, T_4	Bølgeperiode	s
T_p	Spektrum peak periode	s
T_z	Zero-up-crossing periode	s
T_0	Resonansperiode til løftesystemet	s
T_3	Naturlig heave-periode	s
T_4	Naturlig roll-periode	s
T_5	Naturlig pitch-periode	s
\tan	Tangens funksjonen	-
v_c	Låringshastighet på kran	m/s
v_{ct}	Vertikal amplitude-hastighet av krantipp	m/s
v_{ff}	Fritt fall hastighet	m/s
v_r	Vertikal relativ hastighet	m/s
v_s	Slamming-hastighet	m/s
v_{snap}	Snap-hastighet	m/s
v_w	Vertikal vannpartikkel-hastighet	m/s
V	Volum	m^3
V_i	Volum av delstruktur	m^3
V_R	Referansevolum	m^3
W	Vekt av objekt	N
W_{rig}	Vekt av rigg	N
y_r	Avstand til tyngdepunkt, halve røret	mm
y_v	Avstand til tyngdepunkt, indre halvsirkel	mm
y_0	Samlet tyngdepunkt	mm
$z = \eta(x,y,t)$	Overflatehevingen	m

Gresk

Tabell 1.2: Greske symbolforklaring.

Symbol	Betydning	Enhet
α	Bølgehelling	$^{\circ}$
δV	Forandring i volum av fortrenget vann	m^3
ζ_a	Bølgeamplitude	m
η_{ct}	Vertikal krantipp-amplitude	m
η_3	Heave-amplitude av fartøy	m
η_4	Roll-vinkel av fartøy	$^{\circ}$
η_5	Pitch-vinkel av fartøy	$^{\circ}$
θ	Justeringsfaktor	-
λ	Bølgelengde	m
λ_h	Høydejusteringsfaktor	-
ρ	Tetthet av sjøvann	kg/m^3
ω	Bølgevinkelfrekvens	rad/s

Tabell 1.3: Forkortelser.

Forkortelse	Betydning
AS	Aksjeselskap
CFD	Computational Fluid Dynamics
CoG	Center of Gravity
DAF	Dynamic Amplification Factor
DHL	Dynamic Hook Load
DNV	Det Norske Veritas
IMT	Institutt for matematikk og teknologi
JIP	Joint Industri Project
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
NMBU	Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
OS	Offshore Standard
RAO	Response Amplification Operator
ROV	Remotely Operated Vehicle
RP	Recommended Practice
SPL	Special Loads
VMO	DNV Marine Operasjoner

2. Beskrivelse

2.1 Standarder og regelverk for marine operasjoner

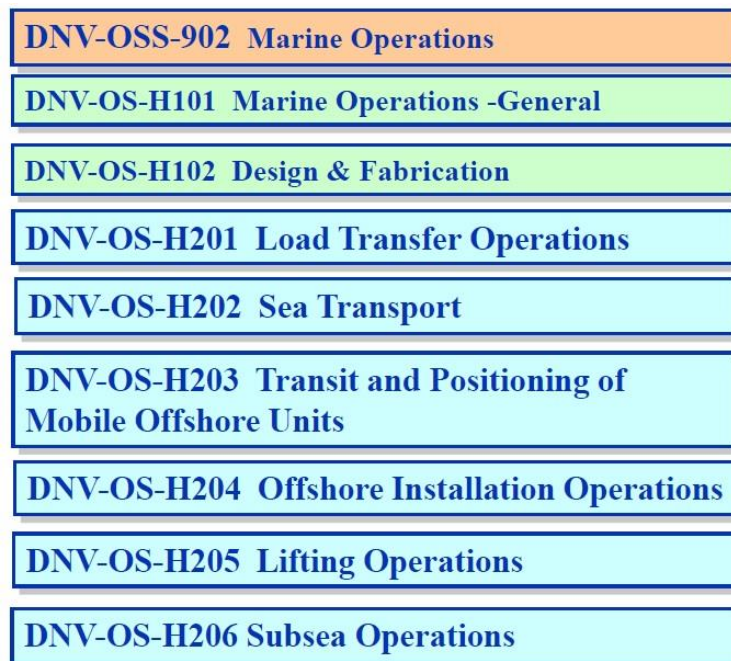
DNV Marine Operasjoner (VMO) er ansvarlig enhet for «Rules for Planning and Execution of Marine Operations» samt videreutvikling av dette regelverket. Regelverket kom ut i 1996 og omfatter etter deres egen definisjon: «Spesielt planlagte, ikke rutinemessige operasjoner av begrenset varighet, utført til sjøs. Marine operasjoner er normalt forbundet med midlertidige faser ved lastoverføring, transporter, installasjon og/eller sikring av enheter til sjøs». Rutineoperasjoner faller under andre standarder [5].

VMO har følgende hovedregler for marine operasjoner [5]:

- En marin operasjon skal designes for å vare fra en sikker kondisjon til en ny sikker kondisjon.
- En marin operasjon skal planlegges og utføres i henhold til etablerte standarder som gjenspeiler anerkjent praksis.
- Strukturen skal forbli i en stabil og kontrollerbar situasjon. Det skal være mulig å bringe strukturer videre over i en ny sikker situasjon selv om en feilsituasjon oppstår.
- Reglene skal sikre en sannsynlighet for strukturelt sammenbrudd lik eller mindre enn 1/10.000 pr. operasjon.

I 2005 startet DNV et «Joint Industry Project» (JIP) i samarbeid med MARINTEK. Partnere på prosjektet var StatoilHydro, Shell Technology, Petrobas, Acergy og Technip. Målsettingen med prosjektet var å identifisere de tilgjengelige metodene, og utvikle forbedrede prosedyrer for modellering og analyser av marine operasjoner. Disse metodene skulle senere publiseres i en «Recommended Practice» (RP), slik at de ble tilgjengelige og kunne nyttiggjøres direkte av industrien. I 2009 kom DNV-RP-H103 «Modelling and Analysis of Marine Operations» som supplement til «DNV Rules for Planning and Execution of Marine Operations». Dette er en av flere RP'er som har blitt utviklet siden den gang [6].

Videreutviklingen av regelverket fra 1996 har resultert i flere standarder som erstatter det. De nye standardene ble utgitt i 2010 og kan ses i figur 2.1. RP'ene som er utviklet i tillegg ved hjelp av JIP'er blir ansett som veiledninger. De inneholder anbefalinger og anerkjent praksis som beskriver hvordan en kan anvende kravene i standardene [7].



Figur 2.1: Oversikt over nye standarder [5].

2.2 Relevante standarder og RP'er

Hovedmålet med oppgaven er å estimere de hydrodynamiske kreftene for en gitt last ved et løft. Beregningsmetoder blir presentert i DNV-RP-H103 «Modelling and Analysis of Marine Operations». Den gir en veiledning på hele prosessen; tauing, løft gjennom havoverflaten, plassering på sjøbunn og heving av lastene igjen. I tillegg forklares vær og bølgeforld. Hovedfokus vil ligge på kapittel 4 «Lifting through Wave Zone – Simplified Method», som omhandler den forenklete metoden for estimering av hydrodynamiske krefter ved løft gjennom havoverflaten.

For kapasitetsjekk referer DNV-RP-H103 til standarden DNV-OS-H205, denne kapasitetssjekken blir også beskrevet i oppgaven. For øvrig er «H» indikasjons bokstav for marine operasjoner i standarder og RP'er fra DNV.

3. Teori

Løft gjennom havoverflaten er et komplekst hydrodynamisk problem. I denne seksjonen presenteres teori om løft, bølge teori og hydrodynamiske krefter etter den forenklete metoden.

3.1 Løfteoperasjonen

Et typisk subsea-løft består av følgende hovedfaser:

- Løft fra dekk og manøvrere objektet vekk fra fartøyet.
- Låring gjennom bølgesonen/havoverflaten.
- Videre låring ned til havbunnen.
- Posisjonering og landing på havbunn.

Alle faser i et subsea-løft må evalueres og kreftene må etableres. Presis estimering av krefter kan hindre risikoen for å måtte avvente på godt vær, øke nummeret egnede installasjonsfartøy og øke sikkerheten ved operasjonen.

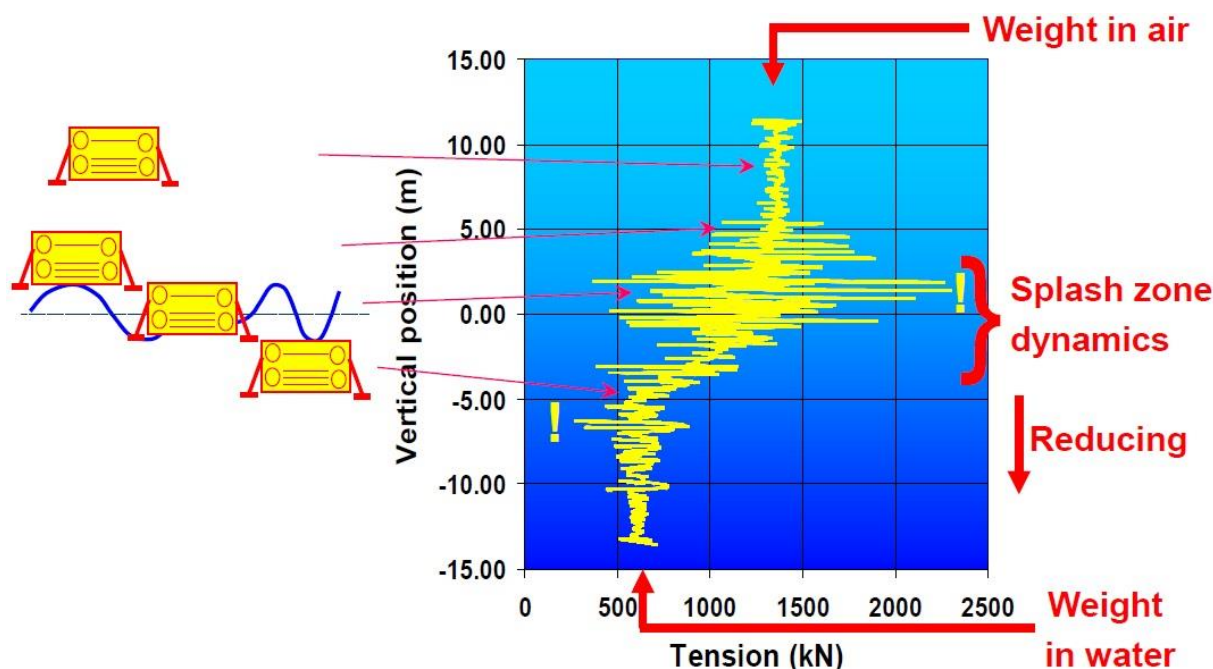
Vanligvis deles løft inn to kategorier; tunge løft og lette løft. I tunge løft er vekten av objektet mer enn 1-2% av det fortrenge vannet til fartøyet, typisk mer enn 1000 tonn. Ved lette løft er objektet mindre enn 1-2% av vekten til det fortrenge vannet til fartøyet, typisk mindre enn et par hundre tonn. Ved lette løft påvirker ikke vekten av objektet bevegelsene til fartøyet [8]. Lasten i denne oppgaven kategoriseres som et lett løft. Beregningsmetoder for tunge løft blir derfor ikke presentert.

Ved lette løft kan kranbommen behandles som en stiv struktur, og bevegelsene ved krantippen bestemmes direkte fra skipets bevegelser i bølgene. De bestemmes av fartøyets RAO'er, kombinert med krantippens posisjon [8].

3.2 Kraftbildet

Løft gjennom havoverflaten er som oftest den kritiske fasen ved en subsea-løfteoperasjon. Figur 3.1 gir en god oversikt av et typisk kraftbilde ved et subsea-løft.

Y-aksen indikerer vertikal posisjon i forhold til havoverflaten (stillevanns-nivået). X-aksen viser total last (spenningen i løftelinen). På figuren ser en at lasten er ganske jevn når objektet er i lufta. Når objektet treffer bølgene og er i «splash zone» ser en tydelig at lastvariasjonene er store. Når objektet har kommet gjennom bølgesonen jevner det seg ut til objektets vekt i vann. Av figuren kommer det tydelig frem at de største kreftene vil oppstå i bølgesonen.



Figur 3.1: Kraftbilde ved løft gjennom havoverflaten [9].

3.3 Hydrodynamiske krefter

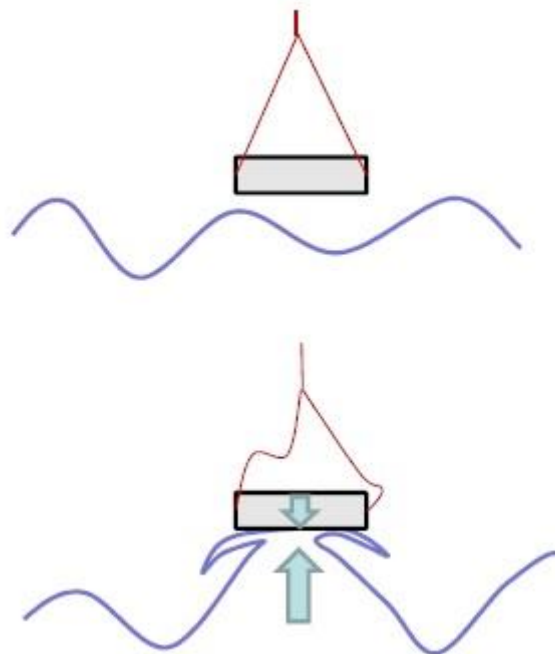
Et objekt som blir senket gjennom havoverflaten blir utsatt for et større antall hydrodynamiske krefter. En antagelse i DNV's forenklede metode er at lastbilde blir dominert av den vertikale relative bevegelsen mellom objektet og sjøen [8]. Da kan andre bevegelser og krefter neglisjeres. Derfor er det kun følgende karakteristiske hydrodynamiske krefter som estimeres:

- Slamming-kraft
- Varierende oppdriftskraft
- Masse-kraft
- Drag-kraft

Disse kreftene oppstår på grunn av den relative bevegelsen mellom objektet og vannpartiklene. Denne bevegelsen er igjen til stede fordi vannpartiklene beveger seg, krantippen beveger seg og objektet senkes med en hastighet. Videre følger en forklaring av hvordan hver kraft oppstår.

3.3.1 Slamming-krefter

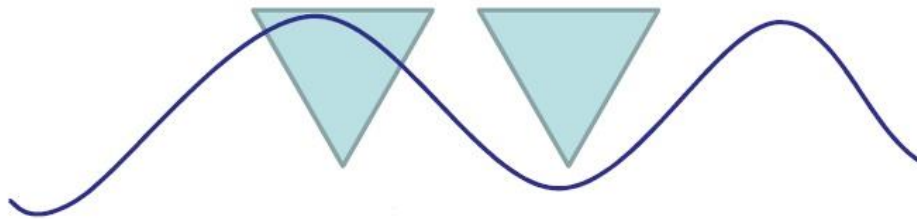
Slamming-krefter er kort-tids impuls krefter som opptrer når strukturen treffer havoverflaten og bølgene slår opp under objektet. Dette vises i figur 3.2, og det er den relative bevegelsen mellom objektet og vannpartiklene som bestemmer størrelsen på kraften. Ved korte bølgeperioder (krappe bølger) vil slamming-kreftene være større enn ved lange bølgeperioder. Slamming-krefter beregnes med en koeffisient som avhenger av objektets geometri. Kraftene virker kun i positiv vertikal retning (oppover).



Figur 3.2: Slamming-krefter [10].

3.3.2 Varierende oppdriftskrefter

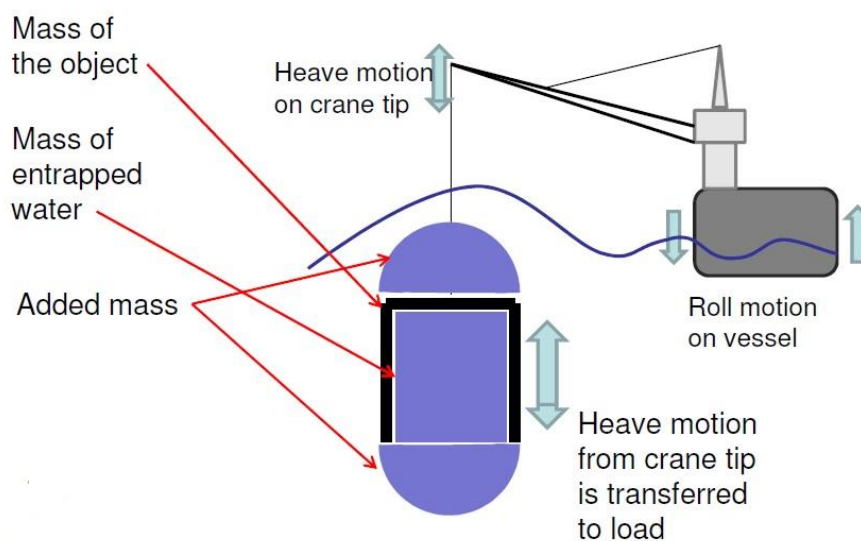
Varierende oppdriftskrefter oppstår når objektet er i bølgesonen og volumet av vannet objektet fortrenger endrer seg i bølgene. Dermed endrer den statiske totalvekten av objektet seg etter hvor i bølgene det er. Figur 3.3 illustrerer dette med et triangulært objekt som først er i en bølgetopp og har mye oppdrift, for så å ha null oppdrift når det henger over en bølgedal.



Figur 3.3: Varierende oppdriftskraft [10].

3.3.3 Masse-krefter

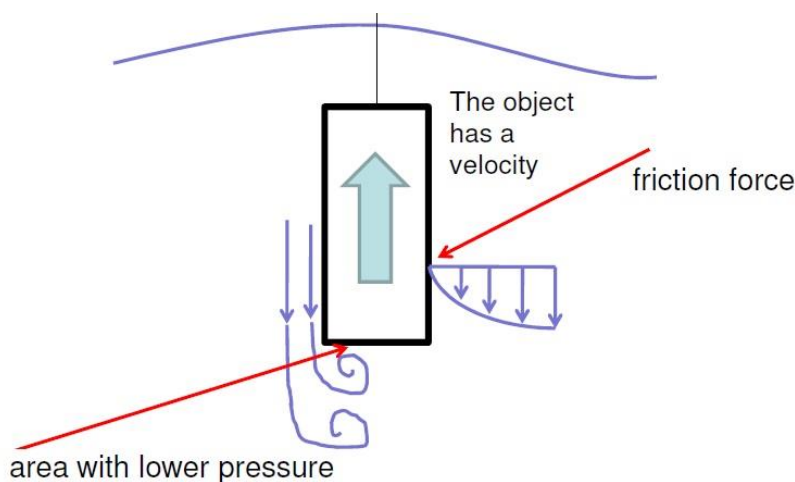
Når objektet er neddykket vil det kreve større kraft å akselerere lasten enn det ville gjort i luft. Fordi en del av vannet som er foran, bak og eventuelt inni må akselereres sammen med objektet. Så når kranttippens akselerasjon blir overført til lasten, som følge av fartøyets bevegelser, er det en del tilleggsmasse (added mass) som også må akselereres. Denne massen vil avhenge av geometrien på objektet, figur 3.4 illustrerer prinsippet.



Figur 3.4: Masse-krefter [10].

3.3.4 Drag-krefter

Det er kraften som kreves for å føre et objekt gjennom vannet med en viss hastighet, også kalt strømningsmotstand eller hydrodynamisk drag. Grunnet viskositeten til vannet og ruheten av objektets overflate vil en hastighetsavhengig friksjonskraft oppstå. Den vil alltid virke mot bevegelsen. Og vann som strømmer rundt kanter danner virvler som skaper et område med mindre trykk. Dette generer også en kraft som virker mot bevegelsen. Kraftene beregnes ved hjelp av en koeffisient som er avhengig av objektets geometri, kreftene illustreres i figur 3.5.



Figur 3.5: Drag-krefter [10].

3.4 Bølgeteori

Alle offshore aktiviteter blir påvirket av vær og bølger. Derfor er det viktig å forstå bølgeteorien og bølgenes karakteristikk når marine operasjoner skal analyseres.

De deles inn i to hovedkategorier: regulære bølger og irregulære bølger. Bølger på sjøen er irregulære og tilfeldige i form, høyde, lengde og forplantnings hastighet. Virkelige sjøforhold blir best fremstilt med en tilfeldig bølgemodell.

Igjen kan bølgeforholdene på sjøen deles inn i to klasser: vind-sjø (wind seas) og dønninger (swell). Vind-sjø er bølger generert av lokal vind, mens dønninger har ikke noe forhold til den lokale vinden. Dønninger er bølger som har beveget seg ut av sitt genererings område. De kan bevege seg tusenvis av mil og konvergerer med andre bølger underveis. Sjøforhold på åpent hav er som regel en kombinasjon [8].

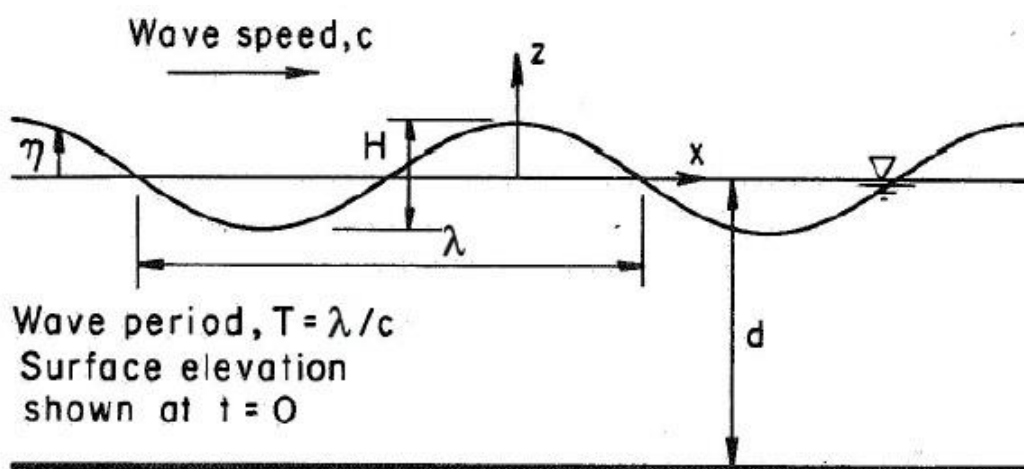
3.4.1 Regulære bølger

En regulær bølge forplanter seg med permanent form. Den har en distinkt bølgelengde, periode og høyde.

En regulær bølge er beskrevet etter følgende hoved karakteristikk [8];

- Bølgelengde: Bølgelengden λ er avstanden mellom suksessive bølgetopper (crests).
- Bølgeperiode: Bølgeperioden T er tiden mellom suksessive bølgetopper som passerer et gitt punkt.
- Fase hastigheten: Forplantningshastigheten av en bølgeform kalles fasehastighet eller bølgehastighet, og er gitt ved $c = \lambda / T = \omega/k$.
- Bølgefrequens er det inverse av bølgeperioden: $f = 1/T$.
- Bølgevinkelfrequens: $\omega = 2 \pi / T$.
- Bølgenummer: $k = 2 \pi / \lambda$.
- Overflatehevingen (surface elevation): Overflatehevingen $z = \eta(x,y,t)$ er avstanden mellom stillevanns-nivået (still water level) og bølgeoverflaten.
- Bølgetopp høyde A_C er avstanden fra stillevanns-nivået til bølgetoppen.
- Bølgedal dybde A_H er avstanden fra stillevanns-nivået til bølgedalen.
- Bølgehøyde: Bølgehøyden H er den vertikale distansen fra bølgedal til topp. $H = A_C + A_H$.

Disse karakteristikkene er illustrert i figuren under. Stillevanns-nivået er representert ved den øverste horisontale streken med en trekant over. Bølgene slår rundt stillevanns-nivået.



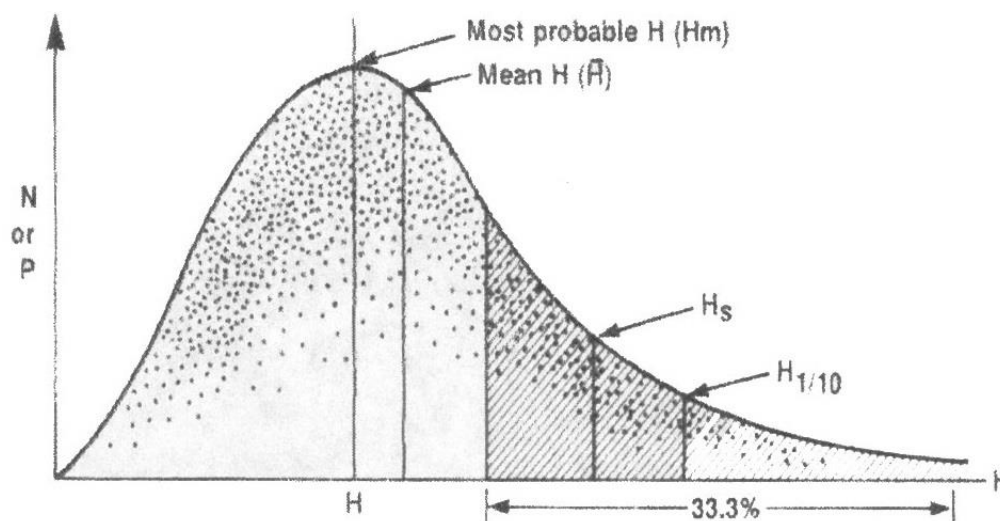
Figur 3.6: Bølgekarakteristikk til regulære bølger [8].

Dette er den regulære fremstillingen av bølger i DNV-RP-H103, og bølgemodellen som blir brukt i oppgaven. I tillegg til disse definisjonene er det noen flere begreper som må forklares.

3.4.2 Bølgehøyder

Signifikant bølgehøyde, H_s , er den verdien som blir brukt i værprognoser og rapportert av skip og værbøyer. Signifikant bølgehøyde er definert som den gjennomsnittlige høyden av den høyeste tredjedelen av bølgene i et bølgespekter.

Hvis en kunne plottet en graf over alle bølger innenfor et spekter, og fordelt de med hensyn på høyde ville det resultert i en normalfordeling lignende den i figur 3.7. Hver prikk representerer en bølge i spekteret med en høyde H . Grafen viser et relativt lavt nummer med små bølger (til venstre) og et lavt nummer av veldig store bølger (til høyre). Det høyeste antallet (N) av spekteret ligger i midtsjiktet (under H_M). Den høyeste tredjedelen (33,3%) av bølgene er markert under grafen. Den gjennomsnittlige høyden av de er den signifikante bølgehøyden H_s [11].



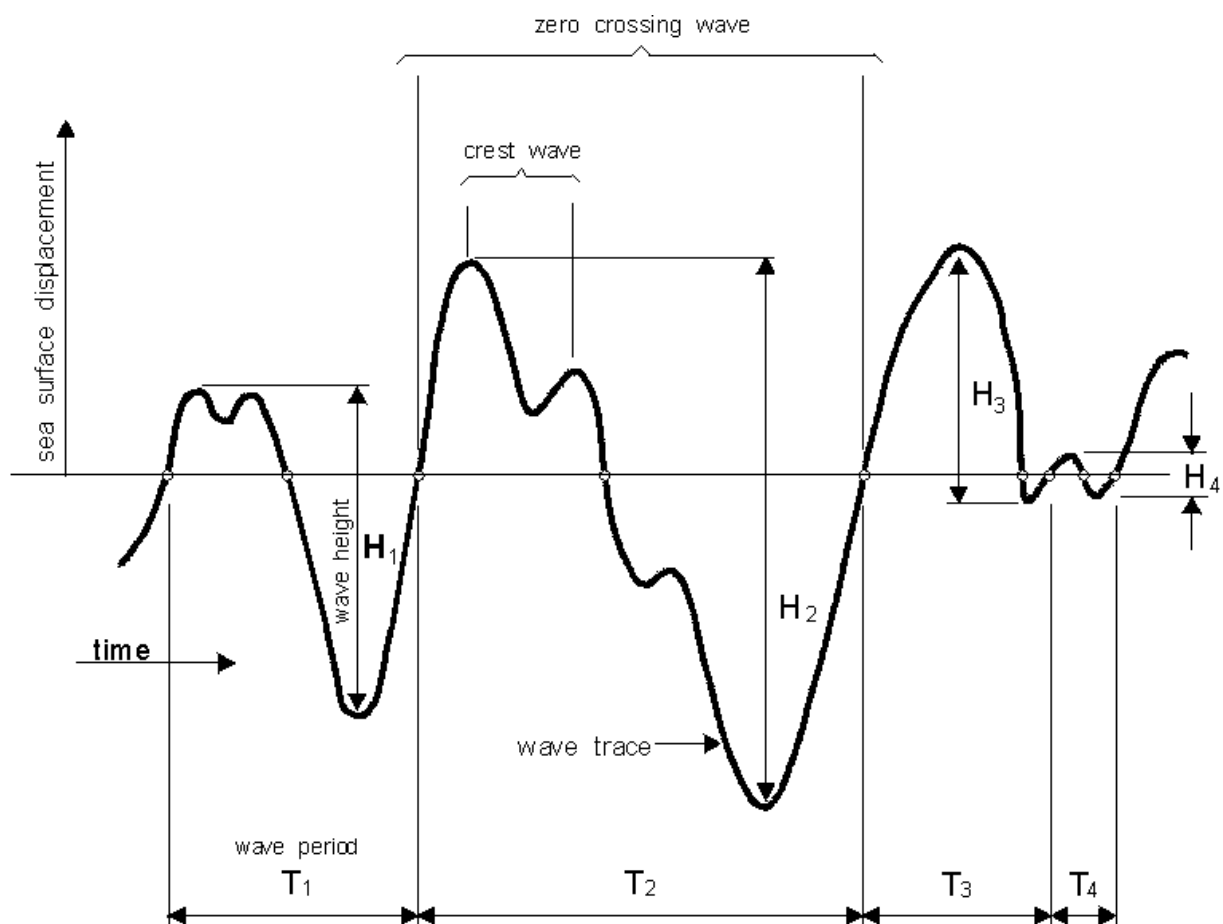
Figur 3.7: Normalfordeling i et bølgespekter med hensyn på høyde [11].

Grafen viser også mest sannsynlig bølgehøyde (H_m), midlere bølgehøyde (H) og gjennomsnittlig høyde av de høyeste 10% av bølgene ($H_{1/10}$). Den midlere bølgehøyden er ca. to tredjedeler (64%) av H_s og $H_{1/10}$ er ca. 1,27 ganger H_s . Høyden av de høyeste 1% av bølgen ca. 1,67 ganger H_s og teoretisk maksimum bølgehøyde er ca. lik to ganger H_s . Faktorene er lavere i skjermede områder hvor innvirkningen av dønninger er mindre [11].

3.4.3 Bølgeperioder

To verdier som brukes om hverandre er T_p , spectrum peak period og T_z , zero-up-crossing period. T_z er verdien den forenklete metoden forholder seg til, T_p brukes på andre områder i DNV-RP-H103. Det forklares best ved å illustrere begge. T_z refereres kun til som bølgeperiode videre i oppgaven.

T_z er tiden mellom hver suksessfulle kryssing av null-nivået for en bølge i positiv retning. Med null-nivået menes stille vanns-nivået, som defineres som null-linjen. Som figur 3.8 viser er T_1 , T_2 , T_3 og T_4 forskjellige verdier for T_z . T_p er tiden mellom hver suksessfulle bølgetopp. Som blir tiden mellom toppene til H_1-H_2 , H_2-H_3 osv. på figuren.



Figur 3.8: Illustrasjon av T_z og T_p [12].

3.4.4 Irregulære bølger

Et irregulært bølgespekter skal ikke brukes i denne oppgaven. Men bølger er tilfeldige og ikke lineære som gjør det meget vanskelig å definere eksakte sjøforhold. Den beste måten å beskrive irregulære bølger er å bruke en bølgespekter modell. Beskriver derfor de to mest brukte modellene som er Pierson-Moskowitz spekteret og JONSWAP spekteret.

Pierson-Moskowitz spekteret

Dette bølgespekteret er basert på data fra Nord-Atlanteren. Metoden regner med gjennomsnittlig bølgehøyde og periode. Når det over lengre tid har vært vind, vil bølgene skifte karakter og oppføre seg annerledes enn om det nettopp hadde blåst opp. Bølgene blir lange og stabile, og det blir en likevekt mellom vind og bølger [13].

JONSWAP spekteret

JONSWAP står for «Joint North Sea Wave Project» og er resultatet av et multinasjonalt bølgemålings prosjekt i Nordsjøen i 1968-1969 [14]. Dette spekteret uttrykker bølgene bedre når det blåses opp fra stille sjø. Bølgene er krappe og korte, men reduseres over tid med økende vind. Metoden bruker perioden hvor bølgeenergien er størst [13].

Det finnes flere bølgespekter modeller som skal simulere virkelige sjøforhold med irregulære bølger. Da gjelder det å velge det som ligner mest på sjøforholdene der operasjonen skal utføres. Felles for spektrene er at de brukes ved hjelp av analyseprogrammer hvor en kan kjøre simuleringer. Det finnes flere slike programmer og de gir generelt mer presise resultater enn den forenklete metoden, hvis alt er modellert riktig. Til gjengjeld kan det være meget tidkrevende og komplisert, derfor har DNV utviklet den forenklete metoden.

4. The Simplified Method

Det følgende kapittelet presenterer den analytiske beregningsmetoden fra DNV-RP-H103, kjent som den forenklete metoden (simplified method). Formålet med den forenklete beregningsmetoden er å kunne etablere enkle konservative verdier av de hydrodynamiske kreftene som virker på strukturen. Da kan en raskt kan finne tillatte sjøforhold begrenset av kapasitet på kran og løfteutstyr. Alle beregningene som blir gjort i oppgaven baserer seg på denne beregningsmodellen. Metoden er også anvendelig ved heving av laster. Hele dette kapittelet er hentet fra standarden DNV-RP-H103, om ikke annet er oppgitt, og blir derfor ikke referert til ved flere anledninger i dette kapittelet [8].

4.1 Antagelser ved bruk av metoden

Den forenklete beregningsmetoden er basert på følgende antagelser:

- Den horisontale utstrekningen av strukturen er liten sammenlignet med bølgelengden.
- Den vertikale bevegelsen av strukturen er lik den vertikale krantipp-bevegelsen.
- Vertikal bevegelse av struktur og vann dominerer kraftbildet → andre bevegelser neglisjeres.

4.2 Total kraft

Målet med beregningsmodellen er å komme frem til den totale kraften på et objekt som senkes gjennom havoverflaten. Den er gitt ved:

$$F_{total} = F_{static} + F_{hyd} \quad (1)$$

F_{static} = statisk vekt av objekt, se formel 3 [N]

F_{hyd} = hydrodynamisk last, se formel 6 [N]

Hvis rykkklaster (snap loads) oppstår er den totale kraften på objektet:

$$F_{total} = F_{static} + F_{snap} \quad (2)$$

F_{snap} = snap-kraft, se formel 36 [N]

4.2.1 Statisk vekt

Den statisk vekten av et nedsunket, eller delvis nedsunket objekt er gitt ved:

$$F_{static} = Mg - \rho Vg \quad (3)$$

M = massen av objektet i luft [kg]

g = tyngdekraftens akselerasjon [m/s^2]

ρ = tetthet av sjøvann [kg/m^3]

V = volum av fortrenget vann i forskjellige stadier ved passering av havoverflaten [m^3]

Den statiske vekten skal alltid beregnes i forhold til stille vanns-nivået. For strukturer som tar inn vann etter nedsenkning, kan dette ta tid. I slike tilfeller må det beregnes en maks og minimum verdi av den statiske vekten:

$$F_{static-min} = M_{min}g - \rho Vg \quad (4)$$

$$F_{static-max} = M_{max}g - \rho Vg \quad (5)$$

M_{min} = minimum masse er det samme som massen til objektet i luft (strukturen er under vann, men har ikke begynt å ta inn vann) [kg]

M_{max} = maks masse, er massen av objektet i luft pluss vekten av vannet som er inne i strukturen (alle tomrom i strukturen er fylt med vann) [kg]

Volumet av fortrenget vann blir det samme i begge tilfeller. Blir vann fylt i objektet før løfting skal dette beregnes som en del av massen i luft.

4.2.2 Hydrodynamisk last

De hydrodynamiske lastene på et objekt som blir senket gjennom havoverflaten er en tidsavhengig funksjon av slamming-krefter, varierende oppdriftskrefter, masse-krefter og drag-krefter. For den forenklete beregningsmetoden kan disse kombineres ved:

$$F_{hyd} = \sqrt{(F_D + F_{slam})^2 + (F_M - F_p)^2} \quad (6)$$

F_D = hydrodynamisk drag-kraft [N]

F_{slam} = slamming-kraft [N]

F_M = hydrodynamisk masse-kraft [N]

F_p = varierende oppdriftskraft [N]

Strukturen kan deles opp i hoveddeler og flater som hver for seg blir påkjent av hydrodynamiske laster. Vannpartikkel-hastighet og akselerasjon relateres til vertikalt tyngdepunkt for hver hoveddel. Da kan masse-krefter og drag-krefter summeres:

$$F_M = \sum_i F_{Mi} \quad (7)$$

$$F_D = \sum_i F_{Di} \quad (8)$$

F_{Mi} og F_{Di} er det individuelle kraftbidraget fra hver hoveddel.

For å kunne beregne de forskjellige hydrodynamiske kreftene må en først kunne noe om bølgeperioder, kinematikk og bevegelsesforhold mellom fartøy og last.

4.3 Bølgeperioder og kinematikk

Det er to alternativer for utregning av bølgekinematikk. Begge alternativene antar at operasjonstiden er mindre enn 30 minutter. Er det forventet at operasjonen vil ta lenger tid, må den signifikante bølgehøyden, H_s , multipliseres med en faktor på 1,10 i ligningene som følger.

4.3.1 Alternativ 1

Påvirkningen av bølgeperioden tas med i beregningen. Den utførte analysen bør da dekke følgende spekter av T_z , for en gitt signifikant bølgehøyde H_s :

$$8,9 \cdot \sqrt{\frac{H_s}{g}} \leq T_z \leq 13 \quad (9)$$

g = tyngdekraftens akselerasjon [m/s^2]

H_s = signifikant bølgehøyde [m]

T_z = bølgeperiode [s]

Bølgeamplitude antas som:

$$\zeta_a = 0,9 \cdot H_s \quad (10)$$

Da skal følgende formler for vannpartikkel-hastighet og akselerasjon benyttes:

$$v_w = \zeta_a \times \left(\frac{2\pi}{T_z}\right) \cdot e^{-\frac{4\pi^2 d}{T_z^2 g}} \quad (11)$$

$$a_w = \zeta_a \times \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^2 \cdot e^{-\frac{4\pi^2 d}{T_z^2 g}} \quad (12)$$

v_w = vertikal vannpartikkel-hastighet [m/s]

α_w = vertikal vannpartikkel-akselerasjon [m/s^2]

ζ_a = bølgeamplitude [m]

g = tyngdekraftens akselerasjon [m/s^2]

d = avstand fra stillevanns-nivået til CoG av delen av objektet som er under vann [m]

T_z = bølgeperiode [s]

4.3.2 Alternativ 2

Alternativt kan det brukes kinematiske ligninger som er uavhengige bølgeperioden. Da er beregningen kun gyldige for bølgeperioder lenger enn følgende kriterier:

$$T_z \geq 10,6 \cdot \sqrt{\frac{H_s}{g}} \quad (13)$$

Da gjelder følgende kinematiske ligninger som er uavhengige bølgeperioden:

$$v_w = 0,30 \cdot \sqrt{\pi g H_s} \cdot e^{-\frac{0,35d}{H_s}} \quad (14)$$

$$\alpha_w = 0,10\pi g \cdot e^{-\frac{0,35d}{H_s}} \quad (15)$$

Definisjonen av de ulike parameterne er like de gitt i alternativ 1.

4.4 Kranttipp og fartøybevegelser

For å bestemme den relative bevegelsen mellom bølgene og det løftede objektet, er det nødvendig å finne bevegelsene til fartøyets kranttipp. Den forenklede metoden kan ikke benyttes dersom kranttippens svingperiode eller bølgeperioden er nær resonansperioden, T_0 , til løftesystemet:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{M + A_{33} + \theta + mL}{K}} \quad (16)$$

m = masse av heiseline per lengde [kg/m]

L = lengde av heiseline [m]

M = massen av objektet i luft [kg]

A_{33} = heave-tilleggs masse av objekt [kg]

K = stivhet av heissystem [N/m]

θ = justeringsfaktor som følge av massen til heiselinen og mulige «soft springs» [-]

Stivheten til heissystemet er gitt ved:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_{rigging}} + \frac{1}{k_{line}} + \frac{1}{k_{soft}} + \frac{1}{k_{block}} + \frac{1}{k_{boom}} + \frac{1}{k_{other}} \quad (17)$$

$k_{rigging}$ = stivhet av rigging, åk, osv. [N/m]

k_{line} = stivhet av heiseline(r) [N/m]

k_{soft} = stivhet av soft-strop eller passiv heave-kompensasjonssystem, hvis brukt [N/m]

k_{block} = stivhet av flere liner i blokk, hvis brukt [N/m]

k_{boom} = stivhet av kranbom [N/m]

k_{other} = andre stivhets bidrag, hvis noen [N/m]

Krantipp-bevegelser

De brukte verdiene for krantippens bevegelse, hastighet og akselerasjon skal representere den største sannsynlige single amplitude responsen. For løfteoperasjoner som er utført uavhengig av fartøyets retning, skal fartøyets respons beregnes for bølgeretninger minst $\pm 15^\circ$ av fartøyets hovedretning. Er operasjonen avhengig av en låst fartøysretning, skal fartøyets responser for alle bølgeretninger beregnes.

Krantippens karakteristiske vertikale bevegelse i gitte bølgeforhold er:

$$\eta_{ct} = \sqrt{\eta_3^2 + (b \sin \eta_4)^2 + (l \sin \eta_5)^2} \quad (18)$$

η_{ct} = enkel vertikal amplitude-bevegelse av krantipp [m]

η_3 = enkel heave-amplitude av fartøy [m]

η_4 = enkel amplitude roll-vinkel av fartøy [$^\circ$]

η_5 = enkel amplitude pitch-vinkel av fartøy [$^\circ$]

b = horisontal distanse fra langskips akse til krantipp [m]

l = horisontal distanse fra tverrskips akse til krantipp [m]

Verdiene skal tas som absolutt verdier.

Krantippens vertikale hastighet i gitte bølgeforhold er:

$$v_{ct} = 2\pi \sqrt{\left(\frac{\eta_3}{T_3}\right)^2 + \left(\frac{b \sin \eta_4}{T_4}\right)^2 + \left(\frac{l \sin \eta_5}{T_5}\right)^2} \quad (19)$$

v_{ct} = enkel vertikal amplitude-hastighet av krantipp [m/s]

T_3 = naturlig heave-periode [s]

T_4 = naturlig roll-periode [s]

T_5 = naturlig pitch-periode [s]

Krantippens vertikale akselerasjon i gitte bølgeforhold blir ikke presentert i DNV-RP-H103. Men kreves for å gjennomføre beregningene. Den er derfor tatt fra «DNV Rules for Planning and Execution of Marine Operation» [15]:

$$a_{ct} = 4\pi^2 \sqrt{\left(\frac{\eta_3}{T_3^2}\right)^2 + \left(\frac{b \sin \eta_4}{T_4^2}\right)^2 + \left(\frac{l \sin \eta_5}{T_4^2}\right)^2} \quad (20)$$

a_{ct} = enkel vertikal amplitude-akselerasjon av krantipp [m/s²]

Definisjonene av de ulike parameterne er gitt over.

4.5 De hydrodynamiske kreftene

4.5.1 Slamming-kraft

Støt-kraften forårsaket av slamming på den delen av objektet som penetrerer vannoverflaten kan tolkes som:

$$F_{slam} = 0,5\rho C_S A_s v_s^2 \quad (21)$$

ρ = tetthet av sjøvann [kg/m³]

C_S = slamming-koeffisient, kan bestemmes teoretisk og/eller ved eksperimentelle metoder. For jevnt sirkulære sylindrer bør den ikke være mindre enn 3,0. Ellers bør den ikke være mindre enn 5,0. [-]

A_s = slamming-areal, delen av strukturen projisert på et horisontal plan som vil bli utsatt for slamming-krefter i løpet av løftet [m²]

v_s = slamming-hastighet [m/s]

Slamming-hastigheten er gitt ved:

$$v_s = v_c + \sqrt{v_{ct}^2 + v_w^2} \quad (22)$$

v_c = låringshastighet på kran, typisk 0,50 [m/s]

v_{ct} = vertikal enkel amplitude-hastighet på krantipp [m/s]

v_w = vertikal vannpartikkel-hastighet fra avsnitt 4.3, med avstanden d , lik null [m/s]

4.5.2 Varierende oppdriftskraft

Den statiske vekten av objektet er relatert til stille vanns-nivået. Forandringen i oppdrift grunnet bølger kan beregnes slik:

$$F_p = \rho \cdot \delta V \cdot g \quad (23)$$

ρ = tetthet av sjøvann [kg/m^3]

δV = forandring i volum av fortrenget vann fra stille vanns-nivået til bølgetopp eller bunn [m^3]

g = tyngdekraftens akselerasjon [m/s^2]

Forandringen i volum av fortrenget vann kan estimeres med:

$$\delta V = \tilde{A}_w \cdot \sqrt{\zeta_a^2 + \eta_{ct}^2} \quad (24)$$

\tilde{A}_w = midlere vannlinjeareal ved bølgeoverflaten [m^2]

ζ_a = bølgeamplitude [m]

η_{ct} = enkel vertikal amplitude av krantipp [m]

4.5.3 Masse-krefter

Masse-krefter for et objekt eller del-struktur grunnet kombinert akselerasjon av objekt og vannpartikler beregnes ved:

$$F_{Mi} = \sqrt{[(M_i + A_{33i}) \cdot a_{ct}]^2 + [(\rho V_i + A_{33i}) \cdot a_w]^2} \quad (25)$$

M_i = massen til en del av strukturen i luft [kg]

A_{33i} = tilleggsmasse grunnet heave-bevegelse til en del av strukturen [kg]

a_{ct} = enkel vertikal amplitude-akselerasjon av krantipp [m/s^2]

ρ = tetthet av sjøvann [kg/m^3]

V_i = volum av fortrenget vann til en del av strukturen relatert til stille vanns-nivået [m^3]

a_w = vertikal vannpartikkel-akselerasjon [m/s^2]

Tilleggsmasse for ikke perforert struktur

Det er et vedlegg i standarden for utregning av hydrodynamisk tilleggsmasse for forskjellige former og tverrsnitt. Den følgende forenklete tilnærmingen av tilleggsmasse i heave for en tredimensjonal geometri med vertikale sider kan brukes:

$$A_{33} \approx \left[1 + \sqrt{\frac{1 - \lambda_h^2}{2(1 + \lambda_h^2)}}\right] \cdot A_{33o} \quad (26)$$

$$\lambda_h = \frac{\sqrt{A_p}}{h + \sqrt{A_p}} \quad (27)$$

A_{33o} = tilleggsmasse for en flat plate med form lik det horisontale projiserte arealet av objektet (beregnes ved hjelp av vedlegget i standarden) [kg]

λ_h = høydejusteringsfaktor [-]

h = høyden av objektet [m]

A_p = areal av nedsunket del av objektet projisert på et horisontalplan [m²]

Hvis det er delvis innestengt vann i strukturen som beveger seg med strukturen, kan massen av vannet inkluderes i tilleggsmassen.

Effekten av perforering

Effekten av perforering på tilleggsmassen estimeres etter følgende veiledning:

$$A_{33} = A_{33S} \quad \text{hvis } p \leq 5 \quad (28)$$

$$A_{33} = A_{33S} \cdot \left(0,7 + 0,3 \times \cos\left[\frac{\pi \times (p - 5)}{34}\right]\right) \quad \text{hvis } 5 < p < 34 \quad (29)$$

$$A_{33} = A_{33S} \cdot e^{\frac{10-p}{28}} \quad \text{hvis } 34 \leq p \leq 50 \quad (30)$$

A_{33S} = solid tilleggsmasse (tilleggsmasse i heave for ikke perforert struktur) [kg]

p = perforasjons rate [%]

Denne veiledningen er basert på et begrenset antall test-data av modeller, og inkluderer derfor en sikkerhetsmargin. Den er ikke anvendelig for perforasjons rater over 50%. Intensjonen er å gi et konservativt estimat av perforasjonens innvirkning på tilleggsmassen. Den faktiske reduksjon vil variere veldig avhengig av geometri og oscillasjons amplitude. Veiledningen vil ved de fleste tilfeller overestimere tilleggsmassen. CFD-studier (Computational Fluid Dynamics) eller modell-testing er anbefalt hvis mer presise verdier er nødvendig.

4.5.4 Drag-krefter

Drag-kraft på et objekt eller del-struktur beregnes ved:

$$F_{Di} = 0,5\rho C_D A_{pi} v_r^2 \quad (31)$$

ρ = tetthet av sjøvann [kg/m^3]

C_D = drag-koeffisient i oscillerende strømning av nedsunket del av objekt [-]

A_{pi} = areal av nedsunket del av objekt projisert på et horisontal plan [m^2]

v_r = vertikal relativ hastighet mellom objekt og vannpartikler [m/s]

Vertikal relativ hastighet mellom objekt og vannpartikler beregnes ved:

$$v_r = v_c + \sqrt{v_{ct}^2 + v_w^2} \quad (32)$$

v_c = låringshastighet på kran, typisk 0,50 [m/s]

v_{ct} = vertikal enkel amplitude-hastighet på krantipp [m/s]

v_w = vertikal vannpartikkel-hastighet [m/s]

4.6 Kapasitetskrav

4.6.1 Snap-kriteriet

Rykkklaster skal som hovedregel unngås om det er mulig. Men de kan opptre hvis de hydrodynamiske lastene overgår den statiske vekten av objektet. Følgende kriteriet skal være oppfylt for å være sikker på at en unngår rykkklaster i slinger og heiseline:

$$F_{hyd} \leq 0.9 \cdot F_{static-min} \quad (33)$$

Den minste statiske vekten blir brukt som beskrevet i formel 4.

4.6.2 Kapasitetssjekk

Kapasiteten til kran, løfteutstyr og strukturen skal sjekkes i henhold til DNV-OS-H205. Kapasitetssjekken som beskrevet der relateres til vekten av objektet i luft. Derfor skal en konvertert DAF-verdi (dynamic amplification factor) benyttes ekvivalent til en gyldig i luft. Følgende DAF-verdi skal benyttes:

$$DAF_{conv} = \frac{F_{total}}{Mg} \quad (34)$$

DAF_{conv} = den konverterte dynamic amplification factor [-]

M = massen av objektet i luft [kg]

g = tyngdekraftens akselerasjon [m/s^2]

F_{total} = er den største av: $F_{total} = F_{static-max} + F_{hyd}$ og $F_{total} = F_{static-max} + F_{snap}$ [N]

Den maksimale statiske vekten av objektet skal brukes som beskrevet formel 5.

DNV-OS-H205 «Lifiting operations» gir følgende formel for dynamisk kroklast [16]:

$$DHL = DAF \cdot (W + W_{rig}) + F(SPL) \quad (35)$$

DHL = dynamisk kroklast (dynamic hook load) [N]

DAF = dynamic amplification factor [-]

W = vekt av objektet [N]

W_{rig} = vekt av rigg [N]

$F(SPL)$ = ekstra kraft grunnet spesial laster (special loads) [N]

Den konverterte DAF-verdien funnet ved hjelp av formel 34 og DNV-RP-H103 skal brukes i formel 35 fra DNV-OS-H205 for å beregne en dynamisk kroklast. Videre brukes den dynamiske kroklasten til å sjekke om kapasiteten i kran og løfteutstyr er tilstrekkelig.

4.7 Snap-kraft

Snap-krefter skal i hovedsak unngås, og krav til værforhold burde justeres for å unngå dette. De kan oppstå hvis kriteriet fra formel 33 ikke er oppfylt. Da skal snap-kraften beregnes ved:

$$F_{snap} = v_{snap} \cdot \sqrt{K \cdot (M + A_{33})} \quad (36)$$

v_{snap} = snap-hastighet [m/s]

K = stivhet av heissystem [N/m]

M = massen av objektet i luft [kg]

A_{33} = heave-tilleggsmasse av objekt [kg]

Snap-hastigheten kan beregnes ved:

$$v_{snap} = v_{ff} + C \cdot v_r \quad (37)$$

v_{ff} = fritt fall hastighet [m/s]

v_r = vertikal relativ hastighet mellom objekt og vannpartikler, se formel 32 [m/s]

C = korreksjons faktor, se formel 38-40 [-]

To verdier for låringshastighet bør brukes i formelen for v_r ; $v_c = 0$ m/s og $v_c =$ typisk låringshastighet. I tillegg bør en heisesituasjon dekkes med v_c lik typisk heisehastighet. Den høyeste snap-hastigheten av de tre skal brukes i snap-kraft beregningen.

Korreksjonsfaktoren, C , skal bli tatt som en av følgende:

$$C = 1 \quad \text{for} \quad v_{ff} < 0,2v_r \quad (38)$$

$$C = \cos \left[\pi \left(\frac{v_{ff}}{v_r} - 0,2 \right) \right] \quad \text{for} \quad 0,2v_r < v_{ff} < 0,7v_r \quad (39)$$

$$C = 0 \quad \text{for} \quad v_{ff} > 0,7v_r \quad (40)$$

Fritt fall hastigheten beregnes ved:

$$v_{ff} = \sqrt{\frac{2F_{static}}{\rho A_p C_D}} \quad (41)$$

F_{static} = minimum og maksimum statisk vekt som definert i formel 4 og 5 [N]

ρ = tetthet av sjøvann [kg/m^3]

A_p = areal av nedsunket del av objektet projisert på et horisontalplan [m^2]

C_D = drag-koeffisient av nedsunket del av objektet [-]

Hvis snap-kraften er forårsaket av slamming mens objektet fortsatt er i luften, kan snap-hastigheten settes lik slamming-hastigheten etter formel 22

5. Kommentar til metoden og kapasitetskrav

Forrige kapittel presenterte alle formler nødvendig for å estimere de hydrodynamiske kreftene ved løft gjennom havoverflaten, i henhold til DNV's forenklete metode fra DNV-RP-H103. Det anbefales å beregne for flere bølgeperioder, avhengig av den signifikante bølgehøyden. Dette for å finne ut hvilke bølgehøyder og perioder som vil være begrensende for operasjonen. Det er to forskjellige kapasitetskrav som kan være begrensende for operasjonen.

5.1 Snap-kriteriet

Dette kriteriet er til for å unngå rykkklaster i vaieren, og som hovedregel skal dette unngås. For å ha tilstrekkelig margin mot rykkklaster har DNV som krav at de hydrodynamiske kreftene må være mindre enn 90% av den minste statiske vekten, se formel 33.

Blir de hydrodynamiske kreftene større enn det risikerer en at objektet blir løftet opp slik at det blir slakk i løftevaieren. Når de gir slipp igjen, som følge av at de varierer med tiden, vil det bli rykklast i vaieren. Det er en dynamisk last som er vanskelig å kontrollere, og den kan gjøre skader på løftsystemet.

5.2 DAF-verdi

DAF-verdien er et dimensjonsløst tall som multipliseres med den statiske vekten av lasten. Faktoren tar hensyn til dynamiske laster, slik at kapasiteten til kranen ikke blir oversteget selv om dynamiske laster skulle oppstå. For løft i luft presenterer DNV-OS-H205 en tabell over DAF-verdier i sjøtilstander med signifikant bølgehøyde mindre 2,5m. Den avhenger av lastens vekt og om det løftes «onshore», «inshore» eller «offshore». For mer krevende forhold må en egen DAF-verdi estimeres.

Ved subsea-løft vil dynamiske laster oppstå, og det må regnes ut en konvergent DAF-verdi etter formel 34. Den vil så brukes i formel 35 for kapasitetssjekk som et løft i luft i henhold til DNV-OS-H205. Formel 35 beregner en dynamisk kroklast som løftesystemet må tåle, og som det dimensjoneres etter. Ved løft gjennom havoverflaten vil DAF-verdien avhenge av værforhold, og en vil se når operasjonen er gjennomførbart i forhold til kapasiteten til kranen.

Størrelse på DAF-verdien

VMO-reglene anbefaler at DAF-verdien er mindre enn 2,0 [17]. Da medberegner man en dobling av den statiske lasten som følge av dynamiske laster. Blir DAF-verdien større, øker risikoen for å miste kontrollen på løfteoperasjonen. Så for å overholde de andre VMO-reglene, fra avsnitt 2.1 om en sikker løfteoperasjon, er nok dette satt som øvre verdi. Blir DAF-verdien større enn 2,0 bør ikke løfteoperasjonen gjennomføres av sikkerhetsgrunner, og det bør ventes på bedre vær- og sjøforhold. Derfor settes maks tillat DAF-verdi ved beregningene til 2,0.

Ved å se nærmere på formelen for DAF-verdi vurderes det om det er mulig å få en DAF-verdi som er mindre enn 1,0. DAF-verdien er definert ved formel 34:

$$DAF_{conv} = \frac{F_{total}}{Mg} = \frac{F_{static} + F_{hyd}}{Mg} = \frac{Mg - \rho Vg + F_{hyd}}{Mg} \rightarrow$$

$$DAF_{conv} = 1 + \frac{F_{hyd} - \rho Vg}{Mg} \quad (34)$$

Denne utredningen viser at hvis oppdriften til objektet er større enn de hydrodynamiske kreftene, vil DAF-verdien bli mindre enn 1,0. Er dette tilfellet vil DAF-verdien bli satt til 1,0.

5.3 Kapasitetskrav

Siden oppgaven ikke omhandler et spesifikt løftesystem med gitt kapasitet eller dimensjonering av dette, men estimeringen av de hydrodynamiske kreftene på en gitt last ved forskjellige sjøforhold. Vil det bli oppgitt for hvilke sjøforhold snap-kriteriet blir overgått, og når den tillate DAF-verdien på 2,0 blir overgått for den gitte lasten.

Det vil vise når en bør unngå løft fordi det er fare for rykkklaster, og når det ikke må løftes fordi DAF-verdien blir større enn 2,0.

5.4 Erfaringer med metoden og bruksområder

Når den forenklete metoden blir brukt riktig vil den gi konservative resultater. Den generelle oppfatningen er at de hydrodynamiske kreftene blir overestimert. En godt detaljert modell vil gi mer reelle resultater enn en udetaljert. Det er utført sammenligninger mellom den forenklete metoden og CFD-programmer, hvor CFD-analysene som regel tillater løfting ved verre sjøforhold (høyere bølger og kortere perioder). Slike analyser er kompliserte og tidkrevende, så ofte er den forenklete metoden nødvendig og tilstrekkelig [10].

Gode bruksområder og fordeler med den forenklete metoden er [10]:

- Får rask informasjon om løfteoperasjonen → Kan prise mer nøyaktig etter vanskelighetsgrad.
- Kan bevilge ingeniørressursene mer korrekt → Avgjøre om en trenger hjelp fra analyseavdelingen.
- Påpeke utfordrende designdetaljer → Raskt foreslå endringer i design
- Krever mindre ressurser → Gir en god start input hvis analyseprogrammer må brukes.
- Analyseingeniørene er offshore → Gir veldig god kompetanse «on site».

Det er viktig å huske de tre antagelsene for bruk av den forenklete metoden, og analysere om de er oppfylt [10]:

- Den vertikale bevegelsen av strukturen er lik den vertikale krantipp-bevegelsen:
Denne antagelsen er møtt for strukturinstallasjoner med stiv rigging koblet direkte i krankroken.
- Vertikal bevegelse av struktur og vann dominerer kraftbildet:
Antagelsen er gyldig for symmetriske strukturer.
- Den horisontale utstrekningen av strukturen er liten sammenlignet med bølgelengden:
For $D < 1/4\lambda$ er metoden anvendelig. $D =$ Lengste dimensjon av struktur.
For $D > 1/2\lambda$ er metoden ikke anvendelig.



For verdiene imellom kan metoden brukes som en indikator på hvilke deler av strukturen som er mest utsatt, og hvilket lasttilfelle som er dimensjonerende [10]. Dette er ikke noe DNV opplyser om i den forenklede metoden, der listes bare antagelsene. Er de ikke oppfylt anbefales mer presise estimater. Derfor har alle antagelsene blitt konkludert som oppfylt for oppgaven, og ikke vurdert videre.

Det eneste kravet som kunne vært diskutert i forhold til oppgaven er lengden på lasten i forhold til bølgelengden. Det sjekkes ikke her, men er det ikke overholdt anbefales som sagt bruk av analyseprogrammer.

6. Last og bølgespekter

Lasten det skal estimeres krefter for er et rørstykke. Dette er en typisk struktur som senkes ned til et havbunnsanlegg. Rørdiameter som brukes subsea varierer fra 3-72 tommer med veggtykkelser fra 10-75mm [18]. Dette avhenger av mediet som skal transporteres og havdybde. De mest brukte er 10- og 12-tommers rør.

Hvis det er korte rørstrekk som skal kobles mellom strukturer på havbunnen er det oftest montert lokk (caps) på endene. For å beskytte pakningen på vei ned, slik at det blir tett når det kobles sammen. Da fylles gjerne røret med sjøvann før det senkes til havbunnen for å utligne trykkforskjellene. Derfor settes lasten til å være et rør med endelokk, fylt med sjøvann.

Materialet på veggene er stål med høy strekkfasthet, typisk 350-500 MPa [18]. 6Mo er et austenittisk stål utviklet for bruk i sjøvann og godt egnet for rørtransport av olje og gass [19]. Rørene kan ha beskyttende belegg på inn- og utsiden for å hindre korrosjon, men dette ses bort ifra.

Ut ifra disse forutsetningene bestemmes lastbeskrivelsen som kan ses i tabell 6.1. Lasttilfellene er beskrevet under. De forskjellige statiske vektene er medberegnet oppdriften for hvert lasttilfelle, etter formel 3. Endelokkene sitter utenpå røret, vekt og størrelse på disse neglisjeres. Gravitasjonen brukt er $9,81 \text{ m/s}^2$ og tettheten av sjøvann er 1025 kg/m^3 , dette blir diskutert i neste avsnitt. Beregningene anses som relativt enkle og vises ikke.

Tabell 6.1: Lastbeskrivelse [20].

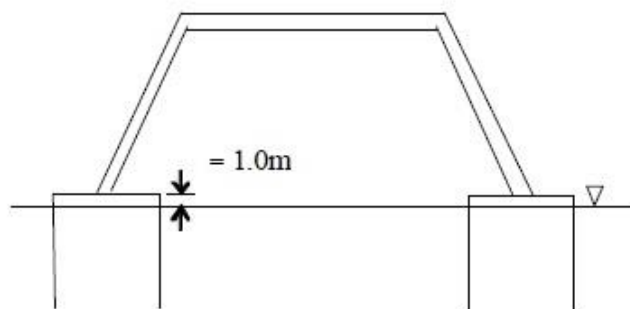
	Last	Enhet
Beskrivelse	Rør med endelokk, fylt med sjøvann	-
Lengde	10	m
Inner-/ytterdiameter	240/300	mm
Veggtykkelse	30	mm
Tetthet av 6Mo	8000	kg/m^3
Vekt av rør	2035,8	kg
Innside volum	0,452	m^3
Vekt av påfylt sjøvann	463,7	kg
Totalvolum	0,707	m^3
Statisk lasttilfelle 1 (i luft)	24,5	kN
Statisk vekt lasttilfelle 2 (halvveis nedsunken)	20,9	kN
Statisk vekt lasttilfelle 3 (helt nedsunken)	17,4	kN

6.1 Lasttilfeller

Ettersom lasten senkes vil forskjellige hydrodynamiske krefter virke på systemet ved forskjellige stadier av operasjonen. Beregningen etter den forenklede metoden er en stasjonær analyse, og må derfor må deles opp i forskjellige lasttilfeller.

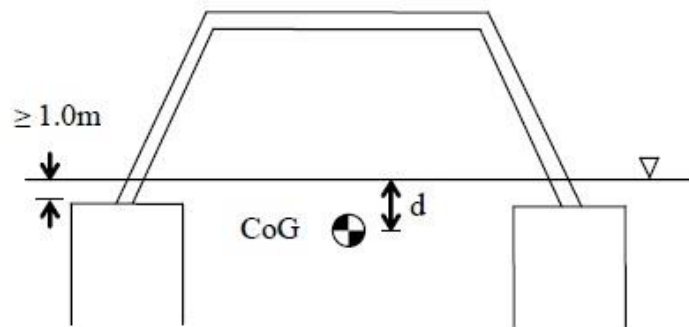
DNV-RP-H103 presenter en veiledning for å identifisere lasttilfeller, hvor de viser et eksempel med anbefalte lasttilfeller for en subsea-beskyttelsesstruktur (protection structure). Strukturen er symmetrisk og består av fire ventilerte bøtter (synkeankre) som graver seg ned i havbunnen. Og fire skråstilte ben som går opp til et beskyttende tak (roof cover), figurene viser strukturen sett fra siden i forhold til stillevannsnivået. Følgende lasttilfeller er anbefalt med oppredende krefter [8].

Lasttilfelle 1:



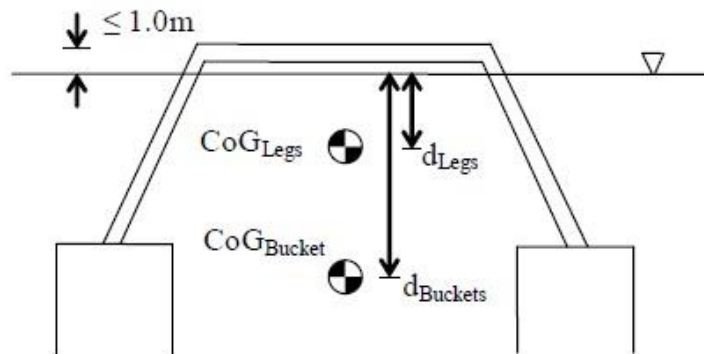
Figur 6.1: Lasttilfelle 1 for subsea-beskyttelsesstruktur [8].

- Slamming-kraft virker på topplatene på innsiden av bøttene.
- Varierende oppdriftskraft, masse-kraft og drag-kraft er neglisjerbare antatt at det horisontalt projiserte arealet av veggene til bøttene er lite.

Lasttilfelle 2:


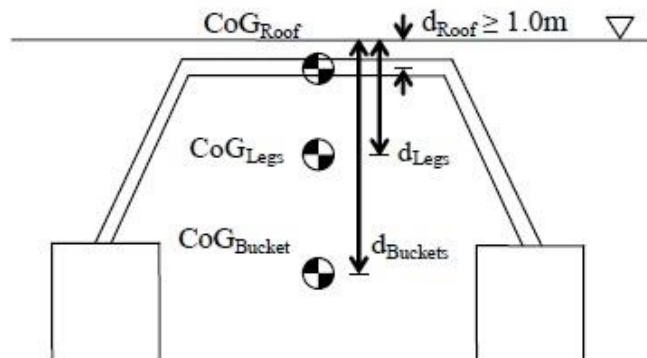
Figur 6.2: Lasttilfelle 2 for subsea-beskyttelsesstruktur [8].

- Slamming-kraften er null.
- Varierende oppdriftskraft, masse-kraft og drag-kraft må kalkuleres. Vertikal relativ hastighet og akselerasjon relateres til CoG av neddykket del av strukturen.

Lasttilfelle 3:


Figur 6.3: Lasttilfelle 3 for subsea-beskyttelsesstruktur [8].

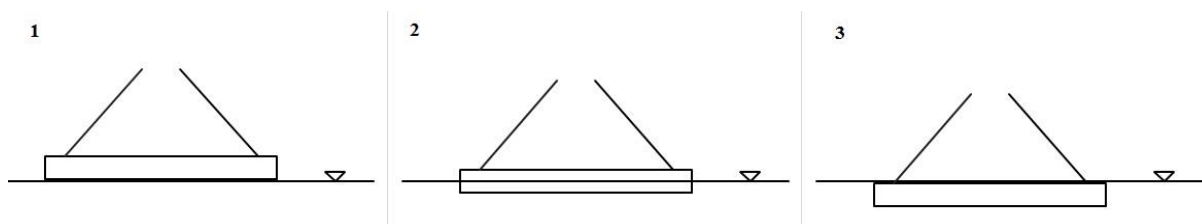
- Slamming-kraft må beregnes for taket.
- Varierende oppdriftskraft må beregnes.
- Masse-kraft må beregnes separat for bøttene og ben, med vannpartikkel-akselerasjon for CoG av bøttene og benene individuelt. Total masse-kraft er summen av komponentene.
- Drag-krefter beregnes også individuelt for bøttene og ben med korrekt CoG. Total drag-kraft er summen av komponentene.

Lasttilfelle 4:


Figur 6.4: Lasttilfelle 4 for subsea-beskyttelsesstruktur [8].

- Slamming-kraften er null.
- Varierende oppdriftskraft er null.
- Masse-kraft beregnes separat for bøttene, ben og taket, med vannpartikkel-akselerasjon for CoG av bøttene, ben og taket individuelt. Total masse-kraft er summen av komponentene.
- Drag-kraft beregnes også individuelt for bøttene, ben og taket med korrekt CoG. Total drag-kraft blir summen av komponentene.

Etter denne veiledningen er tre lasttilfeller definert for røret. Ved beregningene brukes stille vanns-nivået som referansepunkt.



Figur 6.5: Lasttilfeller for røret.

Lasttilfelle 1 – Røret er rett over stille vanns-nivået

I dette tilfellet henger lasten rett over havoverflaten og er utsatt for slamming-krefter grunnet bølger som slår på undersiden av røret. Relativ hastighet mellom røret og vannpartiklene avgjør størrelsen på slamming-kreftene.

Lasttilfelle 2 – Røret er halvveis nedsunket

Lasten er halvveis nedsunket, stille vanns-nivået ligger langs med senter av røret. Opptredende krefter er drag-, masse- og varierende oppdriftskrefter. Vannpartikkel-hastighet og akselerasjon relateres til vertikalt tyngdepunkt av den nedsunkne delen av røret.

Lasttilfelle 3 – Røret er helt nedsunket

I dette tilfellet er hele lasten under vann, stille vanns-nivået ligger rett over toppen av røret. Her er slamming- og de varierende oppdriftskreftene lik null. Drag- og masse-krefter opptrer og må beregnes med vertikal vannpartikkel-akselerasjon i forhold til lastens tyngdepunkt.

6.2 Koeffisienter

De hydrodynamiske egenskapene til en struktur som senkes gjennom havoverflaten er et viktig aspekt i estimeringen av krefter og respons på strukturen. Hydrodynamiske koeffisienter er avhengige av mange faktorer og kan være vanskelige å etablere. De kan bli estimert teoretisk, empirisk eller ved hjelp av tester.

DNV-RP-H103 er behjelpelig med dette, og foreslår koeffisienter for enkle 2- og 3-dimensjonale geometrier. Disse blir forklart og bestemt i dette avsnittet. Lasten er et lukket rør, og kan ses på som en sylinder. I tillegg blir konstanter som brukes i beregningene fastsatt.

Drag-koeffisient

Drag-koeffisienten, C_D , gjelder for nedsunket del av objekt i oscillerende strømning. C_D for sammensatte subsea-strukturer hvor tester ikke er utført skal ikke være mindre enn 2,5 [8]. Lasten er en enkel ikke sammensatt struktur og C_D settes derfor til 2,0. Dette anses som konservativt nok. Den samme verdien brukes i lasttilfelle 2 og 3 fordi høyden på lasten er såpass liten at bølgene vil slå over røret i lasttilfelle 2.

Slamming-koeffisient

For jevne sirkulære sylindre skal slamming-koeffisienten, C_s , ikke være mindre enn 3,0. Ved andre tilfeller skal den ikke være mindre enn 5,0 [8]. Slamming-koeffisienten settes derfor til 3,0.

Arealer

Det er tre forskjellige arealer som brukes i ulike deler av beregningene: slamming-areal, A_s . Midlere vannlinjeareal i bølgesonen for beregning av varierende oppdriftskraft, \tilde{A}_w . Og areal av nedsunket del av objektet projisert på et horisontalplan for beregning av drag-kraft, A_{pi} . Med den definerte lasten og lasttilfellene blir alle disse like.

Slamming-arealet er arealet på den delen av strukturen som er utsatt for slamming-krefter. I dette tilfellet blir det et avlangt rektangel med bredde lik diameteren på røret. Tilsvarende blir A_{pi} , det er det samme arealet som skaper drag-krefter.

Det er kun ved lasttilfelle 2 varierende oppdriftskrefter vil opptre. \tilde{A}_w er arealet av strukturen som ligger i vannlinjen, altså tverrsnittet av lasten hvis den kuttet langs med stillevanns-nivået. Siden lasten er halvveis nedsunket blir det arealet av det samme rektangelet som de to andre lastene. Som er lengden på 10m multiplisert med diameteren på 0,3m.

Konstanter

Andre konstanter som brukes i beregningene er låringshastighet, gravitasjon og tetthet av sjøvann, henholdsvis v_c , g , og ρ . Typisk låringshastighet er 0,5 m/s, tettheten av sjøvann er normalt 1025 kg/m^3 og gravitasjonen er $9,81 \text{ m/s}^2$ [8].

De anbefalte verdiene til DNV brukes i beregningene. Tabellen under oppsummerer alle verdier som er bestemt i dette avsnittet.

Tabell 6.2: Koeffisienter og konstanter [8].

Symbol	Navn/Beskrivelse	Verdi	Enhet
C_D	Drag-koeffisient	2	-
C_S	Slamming-koeffisient	3	-
A_{pi}	Areal av nedsunket del projisert på et horisontalplan	3	m^2
\tilde{A}_w	Midlere vannlinjeareal i bølgesonen	3	m^2
A_S	Slamming-areal	3	m^2
v_c	Låringshastighet	0,5	m/s
g	Gravitasjon	9,81	m/s^2
ρ	Tetthet av sjøvann	1025	kg/m^2

6.3 Bølgespekter for beregningene

Hovedhensikten med den forenklede metoden er å finne tillate sjøforhold begrenset av krankapasiteten og løfteutstyret [21]. Tidligere i oppgaven er det bestemt at det ikke skal sjekkes kapasitet på kran eller løfteutstyr. Det skal vises når snap-kriteriet og maks tillat DAF-verdi på 2,0 overgås.

Først må størrelsen på bølgespekteret det skal gjøres beregninger for bestemmes. Gyldighetsområdet for bølgeperioden bestemmes ut ifra den signifikante bølgehøyden og formel 9 eller 13 fra avsnitt 4.3, henholdsvis alternativ 1 og 2, begge kan ses under.

$$8,9 \cdot \sqrt{\frac{H_s}{g}} \leq T_z \leq 13 \quad (9)$$

$$T_z \geq 10,6 \cdot \sqrt{\frac{H_s}{g}} \quad (13)$$

De to alternativene bruker forskjellige formler for bølgekinematikken. I alternativ 1 er bølgepartikkelhastigheten og akselerasjonen avhengig av bølgeperioden, det er den ikke i alternativ 2. Derfor benyttes alternativ 1 i oppgaven, og formel 9 brukes for å bestemme bølgespekteret.

Signifikant bølgehøyde mindre enn 1,5 meter forekommer veldig sjeldent i Nordsjøen, og subsea-operasjoner er normalt begrenset av 3,0 meter signifikant bølgehøyde [22]. Nordsjøen er et reelt område for slike operasjoner og gir et godt grunnlag for begrensningen av bølgespekteret.

Setter derfor 1,0 meter som nedre grense og 4,0 meter som øvre grense. Utvider spekteret noe for å generere bredere resultater og gi et større bilde på progresjonen av de forskjellige hydrodynamiske kreftene. Bruker 0,5 som intervall på bølgehøyden og 1,0 på perioden. Dette er mest praktisert og i de fleste tilfeller tilstrekkelig. Bruker disse verdiene for signifikant bølgehøyde i formel 9. I tillegg er bølgeamplitude utregnet etter formel 10 som ses under, resultatene er presentert i tabell 6.3.

$$\zeta_a = 0,9 \cdot H_s \quad (10)$$

Tabell 6.3: Bølgespekter for beregningene.

H_s [m]	ζ_a [m]	T_z [s]
1,0	0,9	3,0 – 13,0
1,5	1,35	3,0 – 13,0
2,0	1,8	4,0 – 13,0
2,5	2,25	4,0 – 13,0
3,0	2,7	5,0 – 13,0
3,5	3,15	5,0 – 13,0
4,0	3,6	6,0 – 13,0

Bølgeperioder utenfor dette spekteret med tilhørende bølgehøyder forekommer sjelden, eller er ikke eksisterende.

7. Fartøy og kranbevegelser

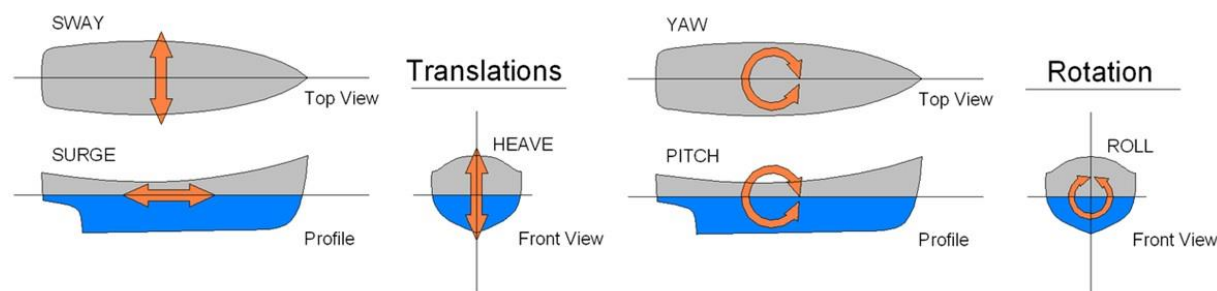
For lette løft kan kranbommen behandles som en stiv struktur. Derav kan bevegelsene ved krantippen bestemmes direkte ut fra de bølgepåkjennte bevegelsene til fartøyet. I dette kapitlet presenteres skipet Edda Flora med RAO-data, og skipets bevegelser i bølgespekteret beregnes. Gjentar først frihetsgradene for et skip.

7.1 Frihetsgrader

Et fartøy som beveger seg i bølger kan ses på som et stivt legeme. Både fartøy og andre flytende konstruksjoner i bølger er definert av seks frihetsgrader for bevegelse. Som nevnt tidligere deles de opp i tre lineære bevegelser og tre rotasjonsbevegelser. De lineære bevegelse går langs med skipets tre akser, mens rotasjonsbevegelsene roterer om de samme aksene. Alle aksene går gjennom skipets tyngdepunkt, henholdsvis vertikalt, horisontalt langsgående og horisontalt på tvers av skipet. Bevegelsene er beskrevet i tabell 7.1 sammen med figur 7.1.

Tabell 7.1: Skipsbevegelser [4].

Bevegelse	Engelsk navn	Norsk navn
Langskips bevegelse (frem/tilbake)	Surge	Jag
Tverrskips bevegelse (sideveis)	Sway	Svai
Vertikal bevegelse (opp/ned)	Heave	Hiv
Rotasjon om langskips akse (krenkning)	Roll	Rull
Rotasjon om tverrskips akse (nikking)	Pitch	Stamp
Rotasjon om vertikal akse	Yaw	Gir



Figur 7.1: Skipsbevegelser [4].

7.2 Transferfunksjonen og RAO

Et fartøys bevegelser i lineære bølger avgjøres av sammenhengen mellom eksitasjonskraft og respons. Beregningene baseres på harmoniske bølger, dvs. regulære sinusbølger. Den hydrodynamiske transferfunksjonen, også kjent som overføringsfunksjonen, er en funksjon av bølgefrequensen og bølgeamplituden. For å finne transferfunksjonen tar en utgangspunkt i den dynamiske likevektslikningen til fartøyet [13].

RAO er et sett av statistikk basert på transferfunksjonen for å finne sannsynlig respons på et fartøy som opererer på havet. RAO'ene er som regel hentet fra mindre modeller testet i basseng, eller gjennom spesialiserte CFD-programmer, ofte begge. RAO'er er som regel kalkulert for alle skipets seks bevegelser, og alle bølgeretninger [23].

Gjennomføringen av disse beregningene er ytterst kompliserte, derfor tar oppgaven utgangspunkt i en allerede utregnet transferfunksjon og RAO-verdier for Edda Flora. Verdiene blir brukt videre for utregning av kranbevegelser.

Kranbevegelser

DNV's forenklede metode bruker koblingen mellom skipets bevegelse og krantippens posisjon til å beregne krantippens vertikale amplitude-bevegelse, hastighet og akselerasjon. Etter formlene som er beskrevet i kapittel 4. De aktuelle bevegelsene som brukes i formlene er skipets heave-, roll- og pitch-bevegelse. I tillegg til horisontale avstander til krantippen fra henholdsvis langsgående og tversgående akse på skipet. Beregningene i denne oppgaven tar utgangspunkt i RAO'ene til Edda Flora som Skipsteknisk AS står for.

7.3 Edda Flora

Edda Flora er et offshore fartøy designet av Skipsteknisk AS. Skipet er spesialkonstruert for å tjene som base til konstruksjonsarbeid og undervannsoperasjoner. Det er utstyrt med to arbeidsklassifiserte ROV'er, en observasjonsklassifisert ROV, et modulhåndteringstårn for subsea-løfteoperasjoner og en 50 tons offshore marinekran. Skipet er et godt utgangspunkt for beregningene på et lett løft som skal utføres i oppgaven [24].



Figur 7.2: Edda Flora [25].

Hoveddimensjonene og nødvendige verdier for beregningene er presentert i tabell 7.2. Lengden er målt mellom perpendikulærene, som er ytterpunktene på vannlinjen til skipet. CoG er avstanden til skipets tyngdepunkt.

De naturlige periodene (egenperiodene), er periodene systemet svinger i når det blir satt i bevegelse på stille vann. Det gjelder kun frihetsgradene knyttet til vertikal bevegelse (roll, pitch og heave), siden tyngdekraft er nødvendig for at resonans skal oppstå. Det resulterer i en peak-verdi i RAO-plottene, se fig 7.3. For roll er dette tydelig og ligger på ca. 13s. For heave og pitch er det mindre klart. Tar derfor utgangspunkt i tidligere beregninger, hvor de er satt til 7s [13]. Det er for Edda Fonn, et lignende skip, så tilnærmingen anses som tilstrekkelig. Det samme gjelder verdien på stivheten til heissystemet som er basert på beregninger for samme skip.

Tabell 7.2: Data for Edda Flora [13], [26].

Dimensjon	Verdi	Enhet
Lengde	82,20	m
Bredde	20,00	m
COG fra bakre perpendikulær	38,36	m
COG fra langskips akse	0,00	m
COG over kjølen	8,59	m
Dypgang	6,48	m
Horisontal distanse fra langskips akse til kran-tippen	15,00	m
Horisontal distanse fra tverrskips akse til kran-tippen	25,00	m
Naturlig heave periode	7,00	s
Naturlig roll periode	13,00	s
Naturlig pitch periode	7,00	s
Stivhet av heissystem	714 000	N/m

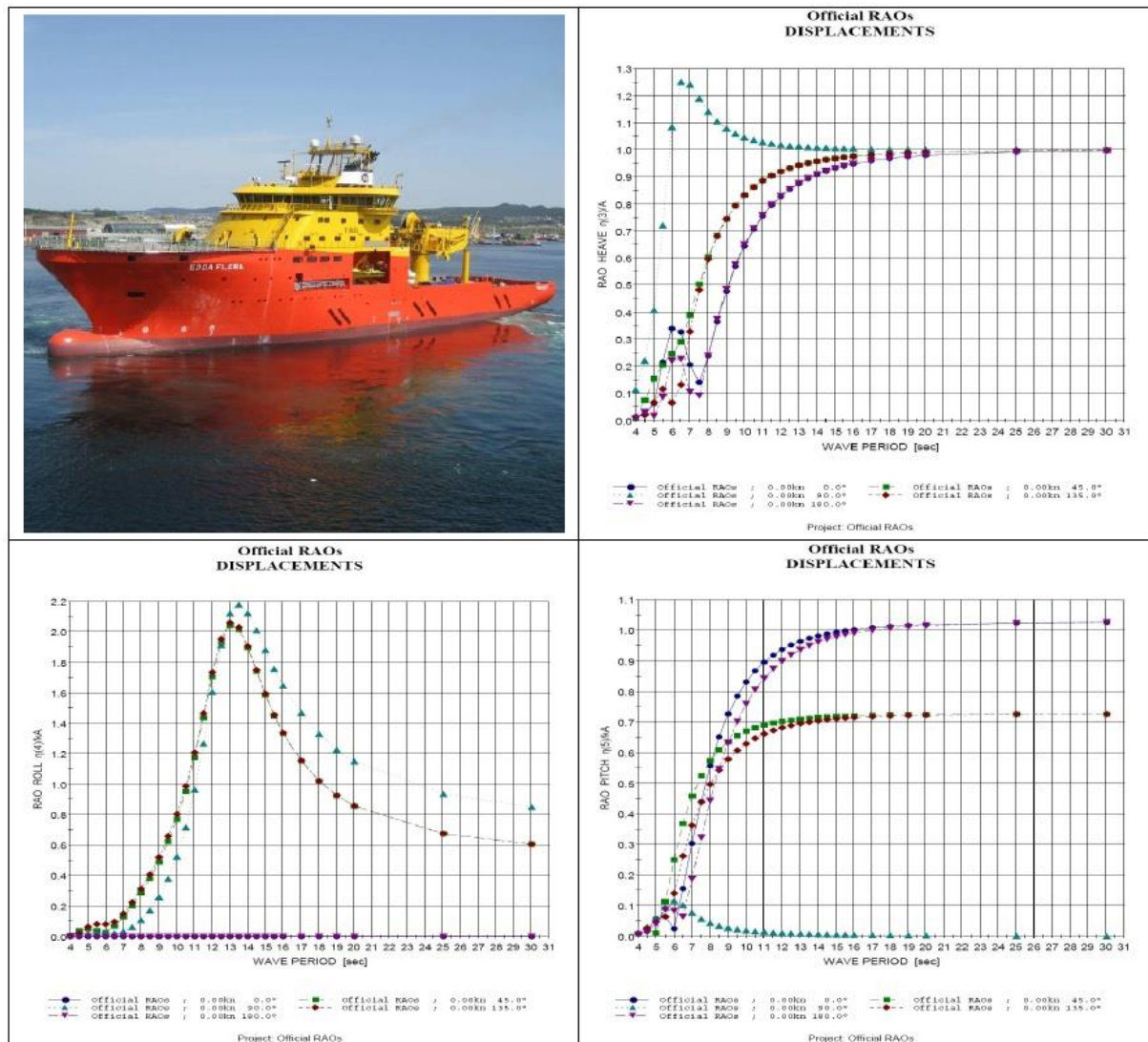
7.4 Skipsbevegelser

Dersom fartøyets retning ikke er begrenset skal fartøysresponsen likevel beregnes for bølgeretninger minst $\pm 15^\circ$ fra den benyttede fartøyretningen. Er operasjonen avhengig av en låst fartøysretning, skal fartøyets responser for alle bølgeretninger beregnes [8].

Dette kravet fra DNV vil føre til meget omfattende og tidkrevende beregninger, og vurderes som ikke nødvendig for oppgavens hensikt. Det gjøres kun beregninger for et fartøy som ligger stille (0 knop) med bølger som kommer inn forfra (0°).

I figur 7.3 vises henholdsvis RAO-grafene for heave-, roll- og pitch-bevegelsene til Edda Flora. Dette er ved 0 knop, altså et fartøy som ligger stille i bølgene. De forskjellige fargene står for ulike bølgeretninger i forhold til skipet. Ved 0° (blå graf) kommer bølgene rett forfra og treffer baugen på skipet. Det er blå graf som brukes fra alle diagrammene.

X-aksen på alle grafene viser bølgeperiode, T_z . Y-aksen viser de ulike bevegelse, heave måles i meter, roll og pitch måles i grader. Heave-verdien er oppgitt i meter per meter bølgehøyde. Y-verdien må multipliseres med bølgehøyden for å få riktig heave-verdi. Roll og pitch er oppgitt i grader per grad «wave slope», som er hellingen på bølgen. Y-verdien må multipliseres med hellingen på bølgen for å få riktig roll og pitch verdi.



Figur 7.3: RAO-grafer for Edda Flora (heave, roll og pitch). [26].

Hvis en vil ha skipets heave-bevegelse i bølgeperiode på 6s og bølgeamplitude på 2m, leser en av fra 6 på x-aksen. For 0° (blå graf) i heave er det ca. 0,35, det multipliseres med bølgehøyden på 2m, og skipets heave-bevegelse er 0,7m.

For å beregne roll og pitch verdiene må en vite hellingen på bølgen som er mer komplisert. Det avhenger av mange faktorer som vind og værforhold, bølgeamplituder, lengder og perioder. Beregningene etter DNV's forenklede metode tar utgangspunkt i jevne regulære bølger. Det beregnes derfor gjennomsnittlig helling på hver bølge ved hjelp av bølgelengde og høyde.

Sammenhengen mellom bølgehastighet (c), lengde (λ), periode (T), vinkelhastighet (ω) og nummer (k) er beskrevet i avsnitt 3.4 om bølgeteori og er gitt ved:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (42)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (43)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (44)$$

For da å kunne beregne bølgelengden λ , må en enten ha bølgehastigheten c , eller bølgenummeret k , men det er igjen avhengig av bølgelengden. For dypt vann, hvor dybden er større enn en fjerdedel av bølgelengden, kan vinkelhastigheten kvadrert tas som [27]:

$$\omega^2 = g \cdot k \quad (45)$$

Hvor g er gravitasjon. Dette gjelder for jevne regulære overflatebølger. En tilnærming for utregningen av bølgehastigheten ved dypt vann er da gitt ved [27]:

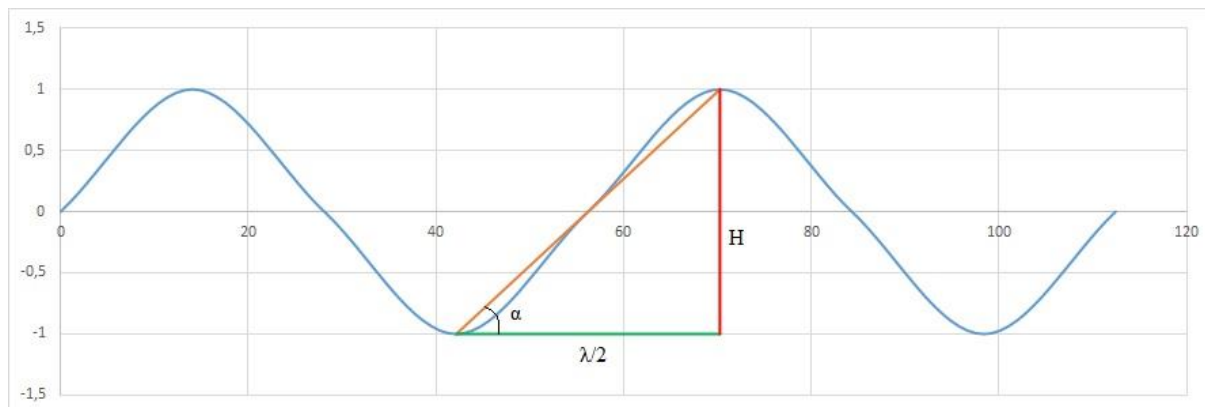
$$c = \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{g}{\omega} \quad (46)$$

I Nordsjøen hvor løftet er tiltenkt er kravet for dypt vann overholdt, og disse formlene kan brukes. Regner først ut bølgehastigheten for så å finne bølgelengden. Bruker samme bølgeperiode på 6s og høyde på 2m.

$$c = \frac{g}{\omega} = \frac{g}{2\pi/T} = \frac{9,81}{2\pi/6} = 9,37 \text{ s} \quad (46)$$

$$c = \frac{\lambda}{T} \rightarrow \lambda = c \cdot T = 9,37 \cdot 6 = 56,2 \text{ m} \quad (42)$$

Bølgens lengde er da på 56,2 meter, som er lengden mellom suksessfulle bølgetopper. For å finne gjennomsnittshellingene brukes bølgens lengde, høyde og en geometrisk forenkling. Dette vises i figur 7.4.



Figur 7.4: Geometrisk forenkling for beregning av bølgehellingen.

Bølgelengden er 56,2m, for å finne gjennomsnittlig helling på bølgen, α , brukes tangens funksjonen. Med halve bølgelengden, grønn strek på figur og bølgehøyden på 2m, rød strek på figur.

$$\tan \alpha = \frac{H}{\lambda/2} \quad \rightarrow \quad \alpha = \tan^{-1} \frac{2}{56,2/2} = 4,07^\circ \quad (47)$$

$4,07^\circ$ er gjennomsnittlig helling på bølgen. For å finne fartøyet sin pitch-bevegelse i disse bølgene leser en av blå graf (0°) ved 6s for pitch i figur 7.3. Det er ca. 0,025 som multipliseres med $4,07^\circ$. Da får en $0,1^\circ$ som er fartøyet pitch-bevegelse i bølger med periode på 6s og høyde på 2m.

Dette var for å vise gangen i beregningene. Resten av bevegelsene blir presentert i tabellene under. Da er eksakte verdier brukt fra RAO-rapporten til Edda Flora [28]. Alle roll-verdier er null som en kan se av grafen i figur 7.3, og blir derfor ikke presentert i egen tabell. Det er logisk da skipet ikke vil rulle sideveis når bølgene treffer baugen.

Som grafene i figur 7.3 også viser er det ingen verdier for bølgeperioder under 4s, disse er satt til 0. Resterende skipsbevegelser for heave, og pitch kan ses i tabell 7.3 og 7.5, bølgehellingene vises i tabell 7.4. Utenfor betyr ikke eksisterende i bølgespekteret etter formel 9.

Tabell 7.3: Heave-bevegelsene til Edda Flore i bølgespekteret [28].

Fartøyets heave-bevegelser [m]							
T_z/H_s	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,0	0,000	0,000	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor
4,0	0,014	0,021	0,029	0,036	0,043	Utenfor	Utenfor
5,0	0,064	0,096	0,128	0,160	0,192	0,2246	Utenfor
6,0	0,342	0,512	0,683	0,854	1,024	1,195	1,366
7,0	0,207	0,311	0,415	0,519	0,623	0,726	0,830
8,0	0,279	0,359	0,479	0,599	0,719	0,839	0,959
9,0	0,477	0,716	0,955	1,194	1,433	1,672	1,911
10,0	0,645	0,968	1,291	1,614	1,937	2,260	2,583
11,0	0,756	1,134	1,512	1,889	2,267	2,645	3,023
12,0	0,828	1,242	1,656	2,071	2,484	2,898	3,313
13,0	0,876	1,315	1,753	2,191	2,629	3,067	3,506

Tabell 7.4: Bølgehellingene til bølgespekteret [27].

Bølgehelling [°]							
T_z/H_s	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,0	0,000	0,000	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor
4,0	4,577	6,84	9,097	11,317	13,503	Utenfor	Utenfor
5,0	2,933	4,395	5,851	7,300	8,739	10,166	Utenfor
6,0	2,038	3,055	4,071	5,083	6,093	7,099	8,100
7,0	1,498	2,246	2,993	3,739	4,484	5,228	5,970
8,0	1,147	1,720	2,292	2,865	3,436	4,007	4,577
9,0	0,906	1,359	1,812	2,264	2,716	3,168	3,620
10,0	0,734	1,101	1,468	1,834	2,201	2,567	2,933
11,0	0,607	0,910	1,213	1,516	1,819	2,122	2,425
12,0	0,510	0,764	1,019	1,274	1,529	1,783	2,038
13,0	0,434	0,651	0,869	1,086	1,303	1,520	1,737

Tabell 7.5: Pitch-bevegelsene til Edda Flora i bølgespekteret [28].

Fartøyets pitch-bevegelser [°]							
T_z/H_s	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,0	0,000	0,000	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor
4,0	0,040	0,060	0,079	0,099	0,118	Utenfor	Utenfor
5,0	0,173	0,260	0,348	0,433	0,519	0,602	Utenfor
6,0	0,053	0,079	0,105	0,131	0,157	0,183	0,209
7,0	0,456	0,683	0,911	1,137	1,364	1,591	1,816
8,0	0,640	0,959	1,278	1,598	1,916	2,235	2,553
9,0	0,665	0,987	1,316	1,644	1,973	2,301	2,629
10,0	0,610	0,915	1,220	1,524	1,829	2,133	2,437
11,0	0,544	0,815	1,087	1,358	1,630	1,901	2,173
12,0	0,478	0,716	0,955	1,194	1,433	1,671	1,910
13,0	0,418	0,627	0,838	1,047	1,256	1,465	1,674

8. Beregninger

Det må gjøres beregninger for alle kombinasjonene av bølgehøyder og perioder innenfor bølgespekteret. Dette resulterer i mange beregninger som er tilnærmet identiske. Derfor presenteres i dette kapitlet beregningene for en bølgeperiode og høyde. Resterende beregninger er gjort i et regneark som kan ses på vedlagt CD.

Det sjekkes ikke om resonansperioden, T_0 , til løftesystemet er i nærheten av bølgeperioden eller kranttippens svingperiode etter formel 16. Det krever informasjon som viste seg vanskelig å framskaffe, og T_0 er i de fleste tilfeller mindre enn de relevante bølgeperiodene [8]. Dette ble også bekreftet av Tormod Bøe ved DNV, som mente det ikke var en problemstilling og sjelden ble testet.

8.1 Kranttippens bevegelser

Valgt bølgehøyde og periode, H_s og T_z , er henholdsvis 2m og 6s. Beregner først kranttippens amplitude-bevegelse, hastighet og akselerasjon som er felles for alle lasttilfellene. Verdiene for skipet er tatt fra tabellene forrige kapittel.

Kranttippens karakteristiske vertikale bevegelse i gitte bølgeforhold er:

$$\begin{aligned} \eta_{ct} &= \sqrt{\eta_3^2 + (b \sin \eta_4)^2 + (l \sin \eta_5)^2} \\ &= \sqrt{0,683^2 + (15 \sin 0)^2 + (25 \sin 0,105)^2} = 0,68 \text{ m} \end{aligned} \quad (18)$$

η_{ct} = enkel vertikal amplitude-bevegelse av kranttipp [m]

η_3 = enkel heave-amplitude av fartøy [m]

η_4 = enkel amplitude roll-vinkel av fartøy [°]

η_5 = enkel amplitude pitch-vinkel av fartøy [°]

b = horisontal distanse fra langskips akse til kranttipp [m]

l = horisontal distanse fra tverrskips akse til kranttipp [m]

Krantippens vertikale hastighet i gitte bølgeforld er:

$$\begin{aligned}
 v_{ct} &= 2\pi \sqrt{\left(\frac{\eta_3}{T_3}\right)^2 + \left(\frac{b \sin \eta_4}{T_4}\right)^2 + \left(\frac{l \sin \eta_5}{T_5}\right)^2} \\
 &= 2\pi \sqrt{\left(\frac{0,683}{7}\right)^2 + \left(\frac{15 \sin 0}{13}\right)^2 + \left(\frac{25 \sin 0,105}{7}\right)^2} = 0,61 \text{ m/s}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

v_{ct} = enkel vertikal amplitude-hastighet på krantipp

T_3 = naturlig heave-periode [s]

T_4 = naturlig roll-periode [s]

T_5 = naturlig pitch-periode [s]

Krantippens vertikale akselerasjon i gitte bølgeforld er:

$$\begin{aligned}
 a_{ct} &= 4\pi^2 \sqrt{\left(\frac{\eta_3}{T_3^2}\right)^2 + \left(\frac{b \sin \eta_4}{T_4^2}\right)^2 + \left(\frac{l \sin \eta_5}{T_5^2}\right)^2} \\
 &= 4\pi^2 \sqrt{\left(\frac{0,683}{7^2}\right)^2 + \left(\frac{15 \sin 0}{13^2}\right)^2 + \left(\frac{25 \sin 1,159}{7^2}\right)^2} = 0,55 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

8.2 Lasttilfelle 1

Lasten henger rett over stille vanns-nivået, det er kun slamming-krefter som opptrer. Beregner først vertikal vannpartikkel-hastighet ved overflaten, v_w . Avstanden til tyngdepunktet av den nedsunkne delen av røret, d , settes til 0 [8].

$$v_w = \zeta_a \cdot \left(\frac{2\pi}{T_z}\right) \cdot e^{-\frac{4\pi^2 d}{T_z^2 g}} = 1,8 \cdot \left(\frac{2\pi}{6}\right) \cdot e^{-\frac{4\pi^2 \times 0}{6 \times 9,81}} = 1,88 \text{ m/s}
 \tag{11}$$

v_w = vertikal vannpartikkel-hastighet [m/s]

ζ_a = bølgeamplitude [m]

g = tyngdekraftens akselerasjon [m/s^2]

d = avstand fra stillevanns-nivået til CoG av delen av objektet som er under vann [m]

T_z = bølgeperiode [s]

8.2.1 Slamming-krefter

Slamming-hastigheten:

$$v_s = v_c + \sqrt{v_{ct}^2 + v_w^2} = 0,5 + \sqrt{0,61^2 + 1,88^2} = 2,48 \text{ m/s} \quad (22)$$

v_c = låringshastighet på kran [m/s]

v_{ct} = vertikal enkel amplitude-hastighet på krantipp [m/s]

v_w = vertikal vannpartikkel-hastighet [m/s]

Slamming-kraft:

$$F_{slam} = 0,5\rho C_s A_s v_s^2 = 0,5 \cdot 1025 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2,48^2 = 28368 \text{ N} = 28,4 \text{ kN} \quad (21)$$

ρ = tetthet av sjøvann [kg/m^3]

C_s = slamming-koeffisient [-]

A_s = slamming-areal [m^2]

v_s = slamming-hastighet [m/s]

8.2.2 Hydrodynamisk kraft

Den totale hydrodynamiske kraften for lasttilfelle 1:

$$F_{hyd} = \sqrt{(F_D + F_{slam})^2 + (F_M - F_p)^2} = \sqrt{(0 + 28,4)^2 + (0 - 0)^2} = 28,4 \text{ kN} \quad (6)$$

F_D = hydrodynamisk drag-kraft [N]

F_{slam} = slamming-kraft [N]

F_M = hydrodynamisk masse-kraft [N]

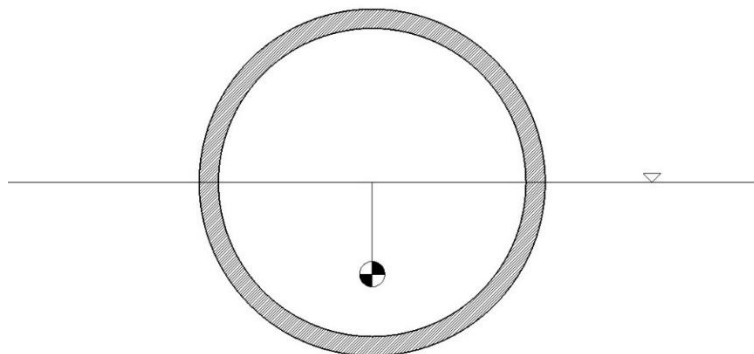
F_p = varierende oppdrifts-kraft [N]

8.3 Lasttilfelle 2

Røret er halvveis nedsunket og utsettes for drag-, masse- og varierende oppdriftskrefter. Ved utregning av bølgepartikkelhastigheten trengs avstanden d , til tyngdepunktet av den nedsunkne delen av strukturen.

8.3.1 Beregning av tyngdepunkt

Ser på den delen av røret som er under vann, se fig 8.1 Den ytre skraverte ringen er selve røret. Den indre sirkelen er sjøvann, som røret er fylt med. Stillevannsnivået er vist med den horisontale linjen.



Figur 8.1: Tyngdepunkt av neddykket del ved lasttilfelle 2.

Beregner først avstandene ned fra stillevannsnivået til tyngdepunktet for de to ulike delene.

Vertikal avstand til tyngdepunktet av indre halvsirkel (sjøvannet) er gitt ved [29]:

$$y_v = \frac{4r}{3\pi} = \frac{4 \cdot 120}{3\pi} = 50,93 \text{ mm} \quad (48)$$

y_v = avstand til tyngdepunktet av indre halvsirkel [mm]

r = indre radius rør [mm]

Vertikal avstand til tyngdepunktet av halve røret er gitt ved [29]:

$$y_r = \frac{4(R^3 - r^3)}{3\pi(R^2 - r^2)} = \frac{4 \cdot (150^3 - 120^3)}{3\pi \cdot (150^2 - 120^2)} = 86,3 \text{ mm} \quad (49)$$

y_r = avstand til tyngdepunktet av halve røret [mm]

R = ytre radius rør [mm]

r = indre radius rør [mm]

For å finne samlet tyngdepunkt kombineres disse avstandene med vekten av røret og sjøvannet som fyller det. Disse verdiene er tatt fra tabell 6.1 og gjelder hele røret, forholdet blir det samme.

$$y_0 = \frac{G_v \times y_v + G_r \times y_r}{G_v + G_r} = \frac{463,7 \cdot 50,93 + 2035,8 \cdot 86,3}{463,7 + 2035,8} = 79,7 \text{ mm} = 0,08 \text{ m} \quad (50)$$

G_v = vekt av påfylt vann [kg]

y_v = avstand til tyngdepunktet av indre halvsirkel [mm]

G_r = vekt av røret [kg]

y_r = avstand til tyngdepunktet av halve røret [mm]

Denne verdien brukes for d , i utregningen av vertikal vannpartikkel-hastighet og akselerasjon:

$$v_w = \zeta_a \cdot \left(\frac{2\pi}{T_z}\right) \cdot e^{-\frac{4\pi^2 d}{T_z^2 g}} = 1,8 \cdot \left(\frac{2\pi}{6}\right) \cdot e^{-\frac{4\pi^2 \cdot 0,08}{6^2 \cdot 9,81}} = 1,87 \text{ m/s} \quad (11)$$

$$a_w = \zeta_a \cdot \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^2 \cdot e^{-\frac{4\pi^2 d}{T_z^2 g}} = 1,8 \cdot \left(\frac{2\pi}{6}\right)^2 \cdot e^{-\frac{4\pi^2 \cdot 0,08}{6^2 \cdot 9,81}} = 1,96 \text{ m/s}^2 \quad (12)$$

8.3.2 Varierende oppdriftskraft

Forandringen i volum av fortreng vann må estimeres før varierende oppdriftskraft kan beregnes:

$$\delta V = \tilde{A}_w \cdot \sqrt{\zeta_a^2 + \eta_{ct}^2} = 3 \cdot \sqrt{1,8^2 + 0,68^2} = 5,77 \text{ m}^3 \quad (24)$$

\tilde{A}_w = midlere vannlinjeareal ved bølgeoverflaten [m²]

ζ_a = bølgeamplitude [m]

η_{ct} = enkel vertikal amplitude av krantippen [m]

Varierende oppdriftskraft:

$$F_p = \rho \cdot \delta V \cdot g = 1025 \cdot 5,77 \cdot 9,81 = 58043 \text{ N} = 58 \text{ kN} \quad (23)$$

En oppdriftskraft på 58kN er større enn den totale oppdriften til røret, og er derfor ikke oppnåelig. Kraften blir så stor grunnet stor δV , på 5,77m³, som også er større en totalvolumet av røret. Det er fordi formelen forutsetter at objektet er høyere enn bølge- og kran-amplituden kvadrert som en ser ut fra det siste leddet i formelen. Det tallet blir nesten 2m, mens diameteren på røret kun er 0,3m. Derfor blir kraften urimelig stor.

Videre brukes derfor den totale oppdriften til røret som varierende oppdriftskraft. Det blir et «worst case», med maks oppnåelig varierende oppdriftskraft. Den er på 7,1 kN, som er volumet av røret på 0,707m³, multiplisert med tettheten av sjøvann og gravitasjonen. Verdien brukes som varierende oppdriftskraft, F_p , i alle videre beregninger.

8.3.3 Drag-krefter

Relativ hastighet må beregnes før drag-kreftene kan estimeres:

$$v_r = v_c + \sqrt{v_{ct}^2 + v_w^2} = 0,5 + \sqrt{0,61^2 + 1,87^2} = 2,47 \text{ m/s} \quad (32)$$

v_c = låringshastighet på kran [m/s]

v_{ct} = vertikal enkel amplitude-hastighet på krantipp [m/s]

v_w = vertikal vannpartikkel-hastighet [m/s]

Drag-kraft:

$$F_D = 0,5\rho C_D A_{pi} v_r^2 = 0,5 \cdot 1025 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2,47^2 = 18760 \text{ N} = 18,8 \text{ kN} \quad (31)$$

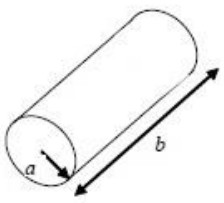
C_D = drag-koeffisient i oscillerende strømning av nedsunket del av objekt [-]

A_{pi} = areal av nedsunket del av objekt projisert på et horisontal plan [m²]

8.3.4 Masse-krefter

Tilleggsmassen til lasten i heave-bevegelse må beregnes før masse-kreftene kan estimeres. Vedlegget i DNV-RP-H103 presenter hvordan tilleggsmasse for noen enkle 2- og 3-dimensjonale geometrier. Figur 8.2 viser det for en sirkulær sylinder.

Table A-2 Analytical added mass coefficient for three-dimensional bodies in infinite fluid (far from boundaries). Added mass is $A_{ij} = \rho C_A V_R$ [kg] where V_R [m³] is reference volume (Continued)

Body shape	Direction of motion	C_A		V_R
		$b/2a$	C_A	
Right circular cylinder 	Vertical	1.2	0.62	$\pi a^2 b$
		2.5	0.78	
		5.0	0.90	
		9.0	0.96	
		∞	1.00	

Figur 8.2: Tilleggsmasse for sylinder [8].

Røret er 10m lang og 0,3m i diameter, $b/2a$ forholdet vil derfor overstige 9,0 etter beregningene i figur 8.2. C_A settes derfor til 1. Tilleggsmassen til røret blir etter formelen presentert i figuren:

$$A_{33} = \rho \cdot C_A \cdot V_R = 1025 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,15^2 \cdot 10 = 724,5 \text{ kg} \quad (51)$$

C_A = Tilleggs masse-koeffisienten [-]

V_R = Referansevolum, se figur 8.2 [m³]

Formelen gjelder for en 3-dimensjonal geometri og må derfor ikke høyde-justeres som presentert i kapittel 4. Det gjøres for strukturer med vertikale sider hvor en bruker det horisontalt projiserte planet for en 2-dimensjonal geometri. Røret er ikke perforert, så det blir ingen reduksjon i tilleggs massen grunnet dette.

Masse-kraftene:

$$\begin{aligned}
 F_M &= \sqrt{[(M + A_{33}) \cdot a_{ct}]^2 + [(\rho V + A_{33}) \cdot a_w]^2} \\
 &= \sqrt{[(2499,5 + 724,5) \cdot 0,55]^2 + \left[\left(1025 \cdot \frac{0,707}{2} + 724,5\right) \cdot 1,96\right]^2} \quad (25) \\
 &= 2771 \text{ N} = 2,8 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

M = massen av strukturen i luft [kg]

A_{33} = tilleggs masse grunnet heave-bevegelse på lasten [kg]

a_{ct} = enkel vertikal amplitude-akselerasjon av krantipp [m/s²]

V = volum av fortrenget vann [m³]

a_w = vertikal vannpartikkel-akselerasjon [m/s²]

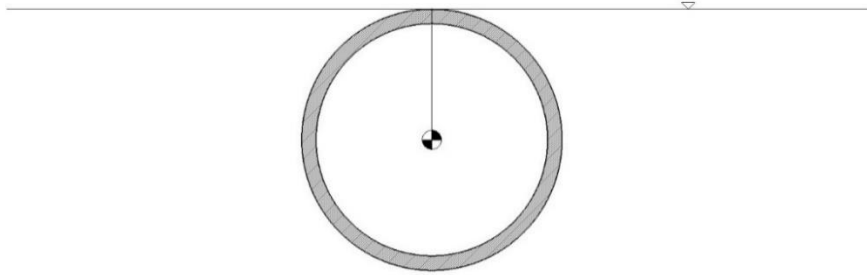
8.3.5 Hydrodynamisk kraft

Den totale hydrodynamiske kraften for lasttilfelle 2:

$$\begin{aligned}
 F_{hyd} &= \sqrt{(F_D + F_{slam})^2 + (F_M - F_p)^2} \\
 &= \sqrt{(18,8 + 0)^2 + (2,8 - 7,1)^2} = 19,3 \text{ kN} \quad (6)
 \end{aligned}$$

8.4 Lasttilfelle 3

Her opptrer det kun drag- og masse-krefter. Først må vertikal vannpartikkel-hastighet og akselerasjon bestemmes. Røret er helt nedsunket og ligger rett under stillevannsnivået, tyngdepunktet av nedsunket del ligger i midten av røret, se figur 8.3.



Figur 8.3: Tyngdepunkt lasttilfelle 3.

Avstanden d blir halve diameteren, som er 0,15m.

$$v_w = \zeta_a \cdot \left(\frac{2\pi}{T_z}\right) \cdot e^{-\frac{4\pi^2 d}{T_z^2 g}} = 1,8 \cdot \left(\frac{2\pi}{6}\right) \cdot e^{-\frac{4\pi^2 \cdot 0,15}{6^2 \cdot 9,81}} = 1,85 \text{ m/s} \quad (11)$$

$$a_w = \zeta_a \cdot \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^2 \cdot e^{-\frac{4\pi^2 d}{T_z^2 g}} = 1,8 \cdot \left(\frac{2\pi}{6}\right)^2 \cdot e^{-\frac{4\pi^2 \cdot 0,15}{6^2 \cdot 9,81}} = 1,94 \text{ m/s}^2 \quad (12)$$

8.4.1 Drag-krefter

Relativ hastighet må beregnes før drag-kreftene kan estimeres:

$$v_r = v_c + \sqrt{v_{ct}^2 + v_w^2} = 0,5 + \sqrt{0,61^2 + 1,85^2} = 2,45 \text{ m/s} \quad (32)$$

v_c = låringshastighet på kran [m/s]

v_{ct} = vertikal enkel amplitude-hastighet på krantipp [m/s]

v_w = vertikal vannpartikkel-hastighet [m/s]

Drag-kraft:

$$F_D = 0,5\rho C_D A_{pi} v_r^2 = 0,5 \cdot 1025 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2,45^2 = 18427 \text{ N} = 18,4 \text{ kN} \quad (31)$$

C_D = drag-koeffisient i oscillerende strømning av nedsunket del av objekt [-]

A_{pi} = areal av nedsunket del av objekt projisert på et horisontal plan [m^2]

8.4.2 Masse-krefter

Tilleggsmassen i heave-bevegelse er det samme som i lasttilfelle 2, på 724,5kg. Masse-kreftene blir da:

$$\begin{aligned} F_M &= \sqrt{[(M + A_{33}) \cdot a_{ct}]^2 + [(\rho V + A_{33}) \cdot a_w]^2} \\ &= \sqrt{[(2499,5 + 724,5) \cdot 0,55]^2 + [(1025 \cdot 0,707 + 724,5) \cdot 1,94]^2} \\ &= 3323 \text{ N} = 3,3 \text{ kN} \end{aligned} \quad (25)$$

M = massen av strukturen i luft [kg]

A_{33} = tilleggsmasse grunnet heave-bevegelse på strukturen [kg]

α_{ct} = enkel vertikal amplitude-akselerasjon av krantipp [m/s^2]

V = volum av fortrenget vann [m^3]

α_w = vertikal vannpartikkel-akselerasjon [m/s^2]

8.4.3 Hydrodynamisk kraft

Den totale hydrodynamiske kraften for lasttilfelle 3:

$$\begin{aligned} F_{hyd} &= \sqrt{(F_D + F_{slam})^2 + (F_M - F_p)^2} \\ &= \sqrt{(18,4 + 0)^2 + (3,3 - 0)^2} = 18,7 \text{ kN} \end{aligned} \quad (6)$$

8.5 Oppsummering og kapasitetssjekk

Kriteriet for å unngå rykkklaster:

$$F_{hyd} \leq 0,9 \cdot F_{static-min} \quad (33)$$

Hvor den statiske minstevekten er vekten i luft, minus oppdriften (vekten fortrenget vann):

$$F_{static-min} = M_{min}g - \rho Vg \quad (4)$$

Dette er regnet ut og plassert i tabell 8.1 sammen med de hydrodynamiske kreftene for alle lasttilfellene. For bølgeperiode på 6s og bølgehøyde på 2m.

Tabell 8.1: Sjekk mot rykkklaster.

Lasttilfelle	1	2	3
$F_{static-min}$ [kN]	24,5	20,9	17,4
$0,9 \cdot F_{static-min}$ [kN]	22,1	18,8	15,7
F_{hyd} [kN]	28,4	19,3	18,7

Som tabellen viser overgås snap-kriteriet for alle lasttilfellene. Faren for at rykkklaster vil oppstå er tilstede. De må beregnes før en kan sjekke om en maksimum DAF-verdi på 2,0 er overholdt.

8.6 Rykkklaster

Ved utregningen snap-hastighet krever DNV at det skal testes tre forskjellige verdier for låringshastighet, v_c , i utregningen av den relative hastigheten, v_r . For så å bruke den som resulterer i høyeste snap-hastighet (se avsnitt 4.7). Det testes kun for låringshastigheten som er satt til 0,5m/s. Da kan den relative hastigheten som alt er beregnet brukes, og den vil mest sannsynlig gi den høyeste snap-hastigheten.

8.6.1 Lasttilfelle 1

Snap-kraften blir forårsaket av slamming-kreftene, da kan snap-hastigheten settes lik slamming-hastigheten. Den er beregnet tidligere til å være 2,48m/s. Snap-kraften beregnes:

$$\begin{aligned}
 F_{snap} &= v_{snap} \cdot \sqrt{K \cdot (M + A_{33})} \\
 &= 2,48 \cdot \sqrt{714000 \cdot (2499,5 + 0)} = 104767 \text{ N} = 104,8 \text{ kN}
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

v_{snap} = snap-hastighet [m/s]

K = stivhet av heissystem [N/m]

M = massen av objektet i luft [kg]

A_{33} = heave-tilleggsmasse av objekt [kg]

8.6.2 Lasttilfelle 2

Her må en egen snap-hastighet beregnes, det er en kombinasjon av fritt fall hastigheten, v_{ff} , og den relative hastigheten som skal multipliseres med en korreksjonsfaktor. Fritt fall hastigheten:

$$v_{ff} = \sqrt{\frac{2F_{static}}{\rho A_p C_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20900}{1025 \cdot 3 \cdot 2}} = 2,6 \text{ m/s}
 \tag{41}$$

F_{static} = statisk vekt (vekt i luft minus oppdriften) [N]

ρ = tetthet av sjøvann [kg/m³]

A_p = areal av nedsunket del av objektet projisert på et horisontalplan [m²]

C_D = drag-koeffisient av nedsunket del av objektet [-]

Den relative hastigheten for lasttilfelle 2 er beregnet til 2,47m/s. Korreksjonsfaktoren bestemmes av følgende kriterier:

$$C = 1 \quad \text{for} \quad v_{ff} < 0,2v_r \quad (38)$$

$$C = \cos \left[\pi \left(\frac{v_{ff}}{v_r} - 0,2 \right) \right] \quad \text{for} \quad 0,2v_r < v_{ff} < 0,7v_r \quad (39)$$

$$C = 0 \quad \text{for} \quad v_{ff} > 0,7v_r \quad (40)$$

Sjekker korreksjonsfaktoren:

$$0,7v_r = 0,7 \cdot 2,47 = 1,73 < v_{ff} = 2,6 \quad (40)$$

Korreksjonsfaktoren blir 0, og snap-hastigheten kan da beregnes:

$$v_{snap} = v_{ff} + C \cdot v_r = 2,6 + 0 \cdot 2,47 = 2,6 \text{ m/s} \quad (37)$$

v_{ff} = fritt fall hastighet [m/s]

v_r = vertikal relativ hastighet mellom objekt og vannpartikler [m/s]

C = korreksjonsfaktor [-]

Snap-kraft lasttilfelle 2:

$$\begin{aligned} F_{snap} &= v_{snap} \cdot \sqrt{K \cdot (M + A_{33})} \\ &= 2,6 \cdot \sqrt{714000 \cdot (2499,5 + 724,5)} = 124744 \text{ N} = 124,7 \text{ kN} \end{aligned} \quad (36)$$

v_{snap} = snap-hastighet [m/s]

K = stivhet av heissystem [N/m]

M = massen av objektet i luft [kg]

A_{33} = heave-tilleggs masse av objekt [kg]

8.6.3 Lasttilfelle 3

Fritt fall hastigheten for lasttilfelle 3:

$$v_{ff} = \sqrt{\frac{2F_{static}}{\rho A_p C_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 17400}{1025 \cdot 3 \cdot 2}} = 2,37 \text{ m/s} \quad (41)$$

Den relative hastigheten for lasttilfelle 3 er beregnet til 2,45m/s. Korreksjonsfaktor:

$$0,7v_r = 0,7 \cdot 2,45 = 1,72 < v_{ff} = 2,37 \quad (40)$$

Da kan korreksjonsfaktoren igjen settes til 0. Snap-hastigheten:

$$v_{snap} = v_{ff} + C \cdot v_r = 2,37 + 0 \cdot 2,45 = 2,37 \text{ m/s} \quad (37)$$

Snap-kraft lasttilfelle 3:

$$\begin{aligned} F_{snap} &= v_{snap} \cdot \sqrt{K \cdot (M + A_{33})} \\ &= 2,37 \cdot \sqrt{714000 \cdot (2499,5 + 724,5)} = 113709 \text{ N} = 113,7 \text{ kN} \end{aligned} \quad (36)$$

8.7 DAF-verdi og resultat

Utregningen av en DAF-verdi gjøres etter følgende formel:

$$DAF_{conv} = \frac{F_{total}}{Mg} \quad (34)$$

DAF_{conv} = den konverterte dynamic amplification factor [-]

M = massen av objektet i luft [kg]

g = tyngdekraftens akselerasjon [m/s^2]

F_{total} = er den største av: $F_{total} = F_{static-max} + F_{hyd}$ og $F_{total} = F_{static-max} + F_{snap}$ [N]

I tabell 8.2 er det tydelig at snap-kreftene er vesentlig større enn de hydrodynamiske kreftene. Derfor skal de brukes i utregningen av F_{total} . DAF-verdien er regnet ut og presentert i tabellen. Lasten tar ikke inn vann ved låring så $F_{\text{static-max}}$ er den samme som $F_{\text{static-min}}$.

Tabell 8.2: Resultater.

Lasttilfelle	1	2	2
$F_{\text{static-max}}$ [kN]	24,5	20,9	17,4
F_{hyd} [kN]	29,3	19,9	19,5
F_{Snap} [kN]	104,8	124,7	113,7
F_{total} [kN]	129,6	145,6	131,1
DAF_{conv}	5,3	5,9	5,3

Alle DAF-verdiene overstiger maks kravet på 2,0. Derfor konkluderes det med at det ikke er anbefalt og senke lasten i sjøforhold med bølgeperiode på 6s og bølgehøyde på 2m. Dette kapittelet var for å vise et beregningseksempel. Neste kapittel presenteres resultatene for alle bølgeperioder og høyder. Utregningene er gjort i eget regneark.

9. Resultater

Dette kapittelet presenterer resultatene fra beregningene gjort i henhold til DNV's forenklaede metode som beskrevet i kapittel 4. De er gjennomført som beregningseksempelet i kapittel 8, men ved hjelp av et regneark i Excel. Regnearket kan finnes på vedlagt CD. Tabell 9.1 viser den statiske kraften ved hvert lasttilfelle, og snap-kriteriet som er 90% av den statiske vekten.

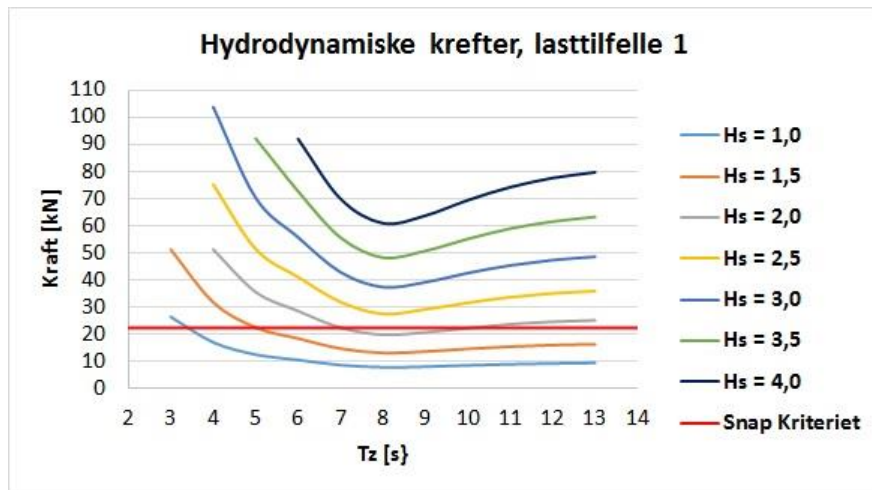
Tabell 9.1: Statisk kraft og snap-kriteriet

Lasttilfelle	$F_{\text{static-min}}$ [kN]	Snap-kriteriet [kN]
1	24,5	22,1
2	20,9	18,8
3	17,4	15,7

De seks følgende tabellene og figurene presenterer de hydrodynamiske kreftene og snap-kriteriet for hvert lasttilfelle. Dette er for hele bølgespekteret som tidligere er definert. Grønne ruter i tabellene indikerer at de hydrodynamiske kreftene er under snap-kriteriet, røde betyr at kriteriet er overgått. Figurene gir et bedre visuelt bilde, hvor den røde vannrette grafen er snap-kriteriet, og de ulike fargene indikerer ulike bølgehøyder. X-aksen viser bølgeperioden, T_z , i sekunder. Y-aksen viser den hydrodynamiske kraften i kN.

Tabell 9.2: Hydrodynamisk kraft, lasttilfelle 1.

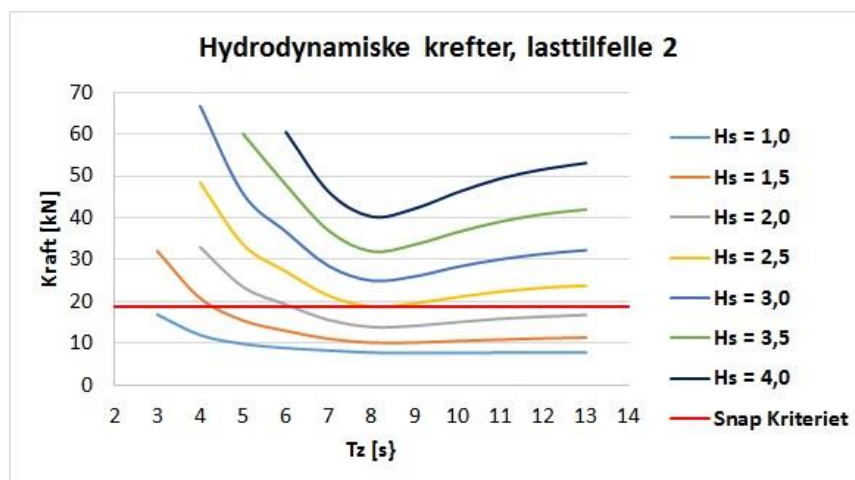
Hydrodynamisk kraft, lasttilfelle 1							
T_z/H_s	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,0	26,2	51,1	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor
4,0	16,8	31,6	51,1	75,1	103,7	Utenfor	Utenfor
5,0	12,3	22,3	35,4	51,3	70,2	92,1	Utenfor
6,0	10,3	18,2	28,4	40,9	55,6	72,6	91,9
7,0	8,4	14,5	22,2	31,7	42,7	55,5	69,8
8,0	7,6	12,9	19,6	27,3	37,2	48,1	60,8
9,0	7,8	13,4	20,5	29,0	39,0	50,6	63,6
10,0	8,3	14,4	22,0	31,4	42,4	55,0	69,3
11,0	8,7	15,2	23,5	33,5	45,2	58,8	74,1
12,0	9,0	15,8	24,4	34,9	47,2	61,4	77,5
13,0	9,2	16,1	24,9	35,7	48,4	63,1	79,6



Figur 9.1: Hydrodynamiske krefter, lasttilfelle 1.

Tabell 9.3: Hydrodynamisk kraft, lasttilfelle 2.

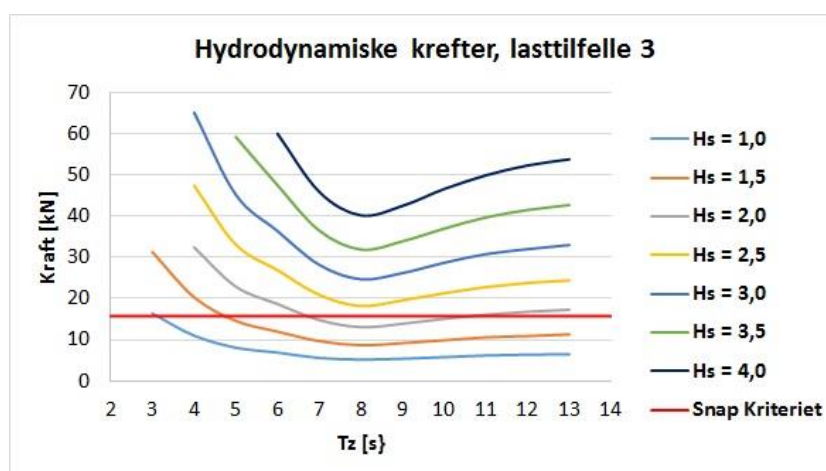
Hydrodynamisk kraft, lasttilfelle 2							
T_z/H_s	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,0	16,9	32,1	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor
4,0	12,0	20,8	33,0	48,4	66,7	Utenfor	Utenfor
5,0	9,9	15,5	23,5	33,7	45,8	60,1	Utenfor
6,0	8,9	13,0	19,3	27,2	36,7	47,9	60,5
7,0	8,3	11,1	15,6	21,4	28,5	36,9	46,2
8,0	7,8	10,2	13,9	18,8	25,0	32,0	40,3
9,0	7,7	10,2	14,2	19,6	26,0	33,6	42,2
10,0	7,7	10,6	15,1	21,1	28,3	36,6	46,1
11,0	7,8	10,9	15,9	22,4	30,1	39,1	49,4
12,0	7,8	11,2	16,4	23,3	31,4	40,9	51,6
13,0	7,8	11,4	16,8	23,8	32,3	42,0	53,1



Figur 9.2: Hydrodynamiske krefter, lasttilfelle 2.

Tabell 9.4: Hydrodynamisk kraft, lasttilfelle 3.

Hydrodynamisk kraft, lasttilfelle 3							
T_z/H_s	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,0	16,4	31,3	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor
4,0	11,0	20,3	32,4	47,4	65,1	Utenfor	Utenfor
5,0	8,1	14,6	22,9	33,1	45,2	59,2	Utenfor
6,0	6,9	12,0	18,7	26,9	36,4	47,5	60,0
7,0	5,6	9,7	14,8	20,9	28,2	36,5	45,9
8,0	5,2	8,7	13,1	18,2	24,7	31,9	40,2
9,0	5,4	9,2	13,9	19,6	26,2	33,9	42,5
10,0	5,8	9,9	15,1	21,3	28,7	37,0	46,6
11,0	6,2	10,6	16,1	22,8	30,8	39,7	49,9
12,0	6,4	10,9	16,8	23,8	32,0	41,5	52,3
13,0	6,5	11,3	17,3	24,4	33,0	42,7	53,8



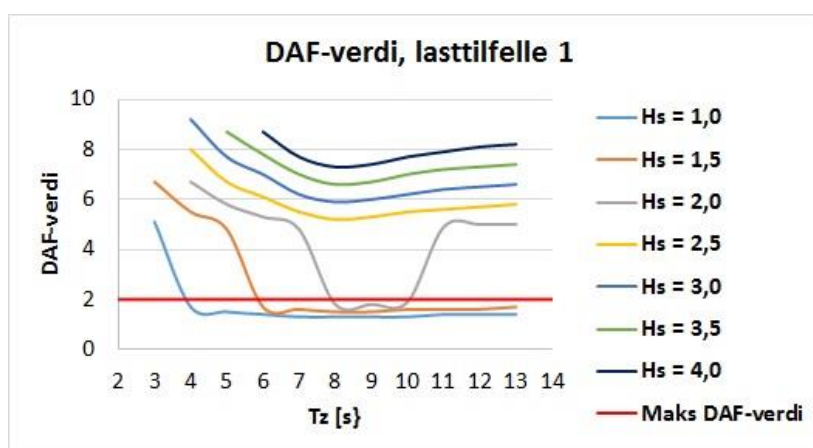
Figur 9.3: Hydrodynamiske krefter, lasttilfelle 3.

Som resultatene viser er det lasttilfelle 1 som har minst operasjonsområde. Det vil bestemme om operasjonen kan gjennomføres eller ikke. Den kan gjennomføres for de fleste bølgeperioder med høyder på 1 og 1,5m uten å overgå snap-kriteriet. Bølgeperiodene 8-10s med 2m bølgehøyde er også innenfor kriteriet. Videre er lasttilfelle 2 minst kritisk og har størst operasjonsområde.

Det andre kriteriet er DAF-verdien, er den under 2,0 kan løftet gjennomføres, selv om snap-kriteriet er overgått. De følgende tabellene og grafene presenterer DAF-verdiene på tilsvarende måte. Rødt indikerer at den har oversteget 2,0, grønt betyr at verdien er innenfor. Tilsvarende er rød vannrett graf på figurene maks tillat DAF-verdi og fargene indikerer ulike bølgehøyder. Y-asken viser nå DAF-verdi, mens x-aksen fortsatt viser bølgeperioder.

Tabell 9.5: DAF-verdi, lasttilfelle 1.

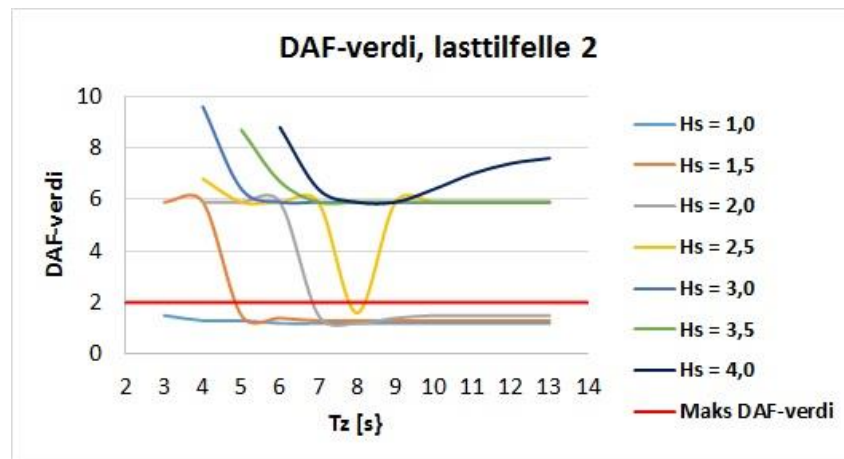
DAF-verdi, lasttilfelle 1							
T_z/H_s	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,0	5,1	6,7	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor
4,0	1,7	5,5	6,7	8,0	9,2	Utenfor	Utenfor
5,0	1,5	4,8	5,8	6,7	7,7	8,7	Utenfor
6,0	1,4	1,7	5,3	6,1	7,0	7,8	8,7
7,0	1,3	1,6	4,8	5,5	6,2	7,0	7,7
8,0	1,3	1,5	1,8	5,2	5,9	6,6	7,3
9,0	1,3	1,5	1,8	5,3	6,0	6,7	7,4
10,0	1,3	1,6	1,9	5,5	6,2	7,0	7,7
11,0	1,4	1,6	4,9	5,6	6,4	7,2	7,9
12,0	1,4	1,6	5,0	5,7	6,5	7,3	8,1
13,0	1,4	1,7	5,0	5,8	6,6	7,4	8,2



Figur 9.4: DAF-verdi, lasttilfelle 1.

Tabell 9.6: DAF-verdi, lasttilfelle 2.

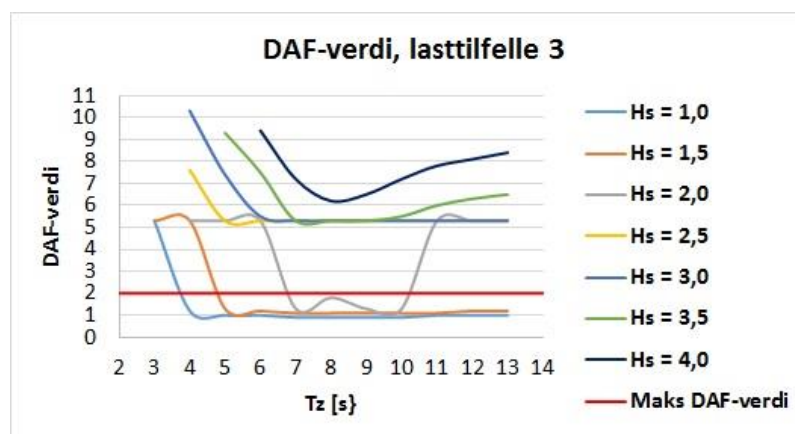
DAF-verdi, lasttilfelle 2							
T_z/H_s	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,0	1,5	5,9	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor
4,0	1,3	5,9	5,9	6,8	9,6	Utenfor	Utenfor
5,0	1,3	1,5	5,9	5,9	6,4	8,7	Utenfor
6,0	1,2	1,4	5,9	5,9	5,9	6,7	8,8
7,0	1,2	1,3	1,5	5,9	5,9	5,9	6,4
8,0	1,2	1,3	1,2	1,6	5,9	5,9	5,9
9,0	1,2	1,3	1,4	5,9	5,9	5,9	5,9
10,0	1,2	1,3	1,5	5,9	5,9	5,9	6,4
11,0	1,2	1,3	1,5	5,9	5,9	5,9	7,0
12,0	1,2	1,3	1,5	5,9	5,9	5,9	7,4
13,0	1,2	1,3	1,5	5,9	5,9	5,9	7,6



Figur 9.5: DAF-verdi, lasttilfelle 2.

Tabell 9.7: DAF-verdi, lasttilfelle 3.

DAF-verdi, lasttilfelle 3							
T_z/H_s	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,0	5,3	5,3	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor	Utenfor
4,0	1,2	5,3	5,3	7,6	10,3	Utenfor	Utenfor
5,0	1,0	1,3	5,3	5,3	7,4	9,3	Utenfor
6,0	1,0	1,2	5,3	5,3	5,5	7,5	9,4
7,0	0,9	1,1	1,3	5,3	5,3	5,3	7,2
8,0	0,9	1,1	1,8	5,3	5,3	5,3	6,2
9,0	0,9	1,1	1,3	5,3	5,3	5,3	6,5
10,0	0,9	1,1	1,3	5,3	5,3	5,5	7,2
11,0	1,0	1,1	5,3	5,3	5,3	6,0	7,8
12,0	1,0	1,2	5,3	5,3	5,3	6,3	8,1
13,0	1,0	1,2	5,3	5,3	5,3	6,5	8,4



Figur 9.6: DAF-verdi, lasttilfelle 3.

Sammenligner en alle tabellene ser en at kravet om maks DAF-verdi tillater samme operasjonsområde som snap-kriteriet. Er snap-kriteriet oversteget blir DAF-verdien større enn 2,0. Dette er grunnet den store størrelsesordenen på de potensielle snap-kreftene. Resultatene blir diskutert i neste kapittel.

Skal kapasiteten til kran og løfteutstyr sjekkes må største tillatte DAF-verdi på 1,9 fra lasttilfelle 1 brukes. Den skal brukes som vist tidligere i formel 35 etter DNV-OS-H103. Ved lasttilfelle 3 blir DAF-verdien mindre enn 1,0 ved noen bølgeperioder med høyde 1m. Som vist tidligere betyr det at oppdriften til objektet er større den hydrodynamiske kraften.

10. Diskusjon av resultater

Generelt gir kombinasjonen av korte bølgeperioder og store bølgehøyder de største hydrodynamiske kreftene. De reduseres etterhvert som bølgeperioden øker før de stagnerer ved bølgeperioder på 8-9s, og øker igjen. Det er fordi RAO-bevegelsen til skipet, som bestemmer krantipp-bevegelsene, øker drastisk og det gir utslag i resultatene som kan ses i forrige kapittel.

10.1 Lasttilfeller

Lasttilfelle 1

Lasten blir utsatt for en slamming-kraft som virker på undersiden røret. Som tabell resultatene viser overstiges kapasitetskravene for bølgehøyder fra 2,5m og oppover. Operasjonen kan gjennomføres for bølgeperiodene mellom 8-10s med en bølgehøyde på 2m, og de fleste perioder med bølgehøyde fra 1,5m og mindre.

Lasttilfelle 2

Røret blir utsatt for drag-, masse- og varierende oppdriftskrefter. Lasttilfelle 2 har det største operasjonsvinduet og kan gjennomføres for de fleste bølgeperioder med bølgehøyde på 2m og nedover. Er også innenfor kapasitetskravet med bølgehøyde på 2,5m og periode på 8s.

Lasttilfelle 3

Her opptrer kun drag- og massekrefter. Størrelsen på de hydrodynamiske kreftene er relativt like som lasttilfelle 2, men operasjonsvinduet er mindre fordi den statiske vekten er mindre som senker snap-kriteriet. Lasttilfelle 3 kan gjennomføres for de fleste perioder med bølgehøyder fra 1,5m og nedover. Og for periodene 7-10s med en bølgehøyde på 2m.

Likhet mellom lasttilfelle 2 og 3

Som nevnt er de hydrodynamiske kreftene ved lasttilfelle 2 og 3 nesten identiske, årsaken er hovedsakelig høyden på lasten. Vertikal vannpartikkel-hastighet og akselerasjon er avgjørende for drag- og masse-kreftene, og de relateres til tyngdepunktet av neddykket del av lasten. Når høyden på lasten er liten gjør det lite utslag i avstandsforskjellen mellom tyngdepunktene til lasttilfelle 2 og 3. Derfor blir vannpartikkel-hastigheten og akselerasjonen nærmest identiske.

I tillegg er drag-koeffisienten og tilleggsmassen satt til det samme for begge lasttilfellene, grunnet den lave høyden. Lasttilfelle 2 blir også påvirket av en varierende oppdriftskraft men den er relativt liten og gir lite utslag i beregningen av den totale hydrodynamiske kraften. Alt dette resulterer i at de hydrodynamiske kreftene for lasttilfelle 2 og 3 ligger nærme hverandre

10.2 Snap-krefter og DAF-verdi

Det ble observert at snap-kreftene fulgte samme trend som de hydrodynamiske kreftene, de reduserte når bølgeperioden økte. De ligger i området mellom 100-220kN for alle lasttilfellene når snap-kriteriet er overgått. De store kreftene resulterer i høye DAF-verdier, derfor blir kravet om maks tillat DAF-verdi på 2,0 oversteget hvis det er fare for rykkklaster. Kalkulasjonen av kreftene er forenklet, og er sannsynligvis i overkant konservative. I tillegg ligger det usikkerhet i stivheten av systemet og snap-hastigheten brukt i beregningene. Uansett, basert på resultatene bør snap-krefter unngås, som DNV også anbefalte.

10.3 Operasjonsvindu

Som resultatene viser gir beregningen basert på den forenklete metodene et relativt lite operasjonsvindu. Lasttilfelle 1 blir utsatt for de største kreftene og er begrensende for operasjonen. De fleste bølgeperioder med høyde 1,0 og 1,5m er gjennomførbare for løftet, når bølgehøyden er 2,0m kan det kun gjennomføres for tre bølgeperioder. Når kravet om snap-kriteriet blir overgått etter formel 33 vil også DAF-verdien overstige 2,0 som var det andre kapasitetskravet.

En grunn til at operasjonsvinduet blir såpass smalt kan være utformingen av lasten kombinert med den statiske vekten. Den statiske vekten er relativt liten i en slik sammenheng og er på ca. 2,5 tonn. De fleste andre subsea-strukturer veier mer og snap-kriteriet vil da være høyere.

I tillegg er røret langt som gjøre at det har et stort flateareal på 3m^2 som blir utsatt for de hydrodynamiske kreftene. Det arealet blir brukt i utregningen av slamming-, drag og varierende oppdriftskrefter. Hadde røret vært 5m langt ville arealet blitt halvert og disse kreftene halvert for hvert tilfelle. Derfor er muligens utforming og vekt av lasten lite egnet for løft gjennom havoverflaten. Og det bør diskuteres om flatearealet kan reduseres siden lasten er et rør, og kreftene vil i praksis ikke ha et så stort flateareal å opptre på.

I tillegg introduserer den forenklete metoden flere konservative antagelser og forenklinger som kan føre til en overestimering av de hydrodynamiske kreftene og rykklastene. Hovedbidraget til de store hydrodynamiske kreftene er vannpartikkel-hastigheten og akselerasjonen hvor det brukes en bølgeamplitude på $0,9 \cdot H_s$. Det kombinert med konservative koeffisienter vil øke de hydrodynamiske kreftene. Det kan også tenkes at metoden ikke brukes i praksis for en så enkel og standardisert last som et rør. Det er en løfteoperasjon bransjen burde ha god kontroll på.

11. Konklusjon

Hovedmålet for oppgaven var å estimere de hydrodynamiske kreftene for løft gjennom havoverflaten. Beregningene skulle i tillegg tilfredsstille gjeldene standarder og forskrifter. Dette har blitt gjennomført hvor «Recommended Practice» fra DNV er fulgt, hvor kapitlet «Lifting through Wave Zone – Simplified Method» har blitt brukt som base for beregningene og oppgaven generelt.

Alle delmål er oppfylt, det er gjort rede for gjeldene forskrifter og standarder. Oppgaven gir en grundig innføring i nødvendig teori om bølger, skipsbevegelser, kraftbilde og gjeldene hydrodynamiske krefter. Den forenklede beregningsmetoden er beskrevet med dens hensikt og brukt i et beregningseksempel. Lasten som ble definert er en reell last, data for skip er innhentet for å gi realistiske resultater og koeffisienter er satt etter anbefalinger av DNV. Sluttproduktet blir presentert på en oversiktlig måte.

Resultatene viser til et lite operasjonsvindu for løftet, som muligens er i overkant konservativt. Men hovedhensikten var ikke å få størst mulig operasjonsvindu. Oppgaven gir en god innføring i grunnleggende teori og opptredende hydrodynamiske krefter ved et løft gjennom havoverflaten, og opplæring i en beregningsmetode for estimering av disse kreftene. Som er det viktigste med oppgaven i tillegg til at den følger standarder og anbefalinger satt av DNV.

Alt i alt konkluderes det med at målene er oppfylt, oppgaven er en god start for å øke kunnskapen om slike løfteoperasjoner. Den gir også et godt grunnlag for flere oppgaver innenfor samme område.



11.1 Videre arbeid

- Beregne for flere bølgeretninger.
- Bruke alternativ 2 for beregning av bølgekinematikk, og sammenligne resultatene.
- Benytte beregningsmetoden på større og mer kompliserte strukturer.
- Utforske den generelle metoden for utregning av de hydrodynamiske kreftene og sammenligne med den forenklete metoden.
- Benytte et analyseprogram for løft gjennom havoverflaten, og sammenligne resultatene med den forenklete beregningsmetoden.
- Utforske alternative metoder for løft gjennom havoverflaten og sammenligne resultater.
- Studere størrelser på koeffisienter og andre forenklinger/antagelser nærmere.
- Utforske beregningsmetoden for tunge løft.

12. Referanser

14.1 Skriftlige kilder

5. Eivind Lona, Regelverk for løfteoperasjoner, forelesningsnotat, DNV Marine Operasjoner (VMO), NORGE, 2011, 51 sider
6. Tormod Bøe, DNV-RP-H103 Modelling and Analysis of Marine Operations, forelesningsnotat, DNV, NORGE, 2009, 40 sider
8. DNV, DNV-RP-H103 Modelling and Analysis of Marine Operations, Recommended Practice, DNV, NORGE, 2011, 150 sider
9. Peter Chr. Sandvik, Subsea lifting operations, forelesningsnotat, MARINTEK - SINTEF, TRONDHEIM, 2010, 47 sider
10. Arnstein Hosaas, Engineering optimization by using the Simplified Method for Lifting through the Splash Zone, forelesningsnotat, Subsea 7, NORGE, 2010, 22 sider
11. Tom Ainsworth, 'Significant Wave Height' A closer look at wave forecasts, publisert notat, NWS Juneau (National Weather service), ALASKA, 2006, 2 sider
13. Vibece Nicolaisen, Undervannsinstallasjon av betongmatter, masteroppgave, Høgskolen i Stord/Haugesund, HAUGESUND, 2005, 56 sider
14. Ingvild Roti, Sea State Limitations for the Deployment of Subsea Compression Modules, masteroppgave, NTNU, TRONDHEIM, 2012, 225 sider
15. DNV, DNV - Rules for Planning and Execution of Marine Operations – 1996 Revision, regelverk, DNV, NORGE, 1996, 186 sider
16. DNV, Lifting Operations (VMO Standard – Part 2-5), standard, DNV, NORGE, 2014, 45 sider
17. Tormod Bøe, Løfteoperasjoner under vann, forelesningsnotat, DNV Marine Operations (VMO), NORGE, 2006, 31 sider
19. Standards Norway, Materials selection (M-001), NORSOK STANDARD, Standards Norway, NORGE, 2014, 32 sider
21. Tormod Bøe, Estimation of Hydrodynamic Forces during Subsea Lifting, forelesningsnotat, DNV GL, NORGE, 2014, 38 sider
22. Tor Edvard Sjøfteland, Lifting analysis of intergraded spool cover, masteroppgave, University of Stavanger, STAVANGER, 2013, 184 sider
26. Håvard Vollset Lien, Official RAO rapport for Edda Flora, rapport, Skipsteknisk AS, ÅLESUND, 2009, 28 sider



27. Robert H. Stewart, Introduction to Physical Oceanography, textbook, Department of Oceanography Texas A&M University, TEXAS, 2008, 353 sider
28. Håvard Vollset Lien, RAOs Flora in Excel format, rapport, Skipsteknisk AS, ÅLESUND, 2009, 1 ark

14.2 Nettkilder

1. Info: Subsea history. Underwater Technology Foundation. Sitert 22.01.15: <http://www.utc.no/>
2. Info og bilde: Havbunnsanlegg. Statoil ASA. Sitert 22.01.15: <http://www.statoil.com/no/>
3. Bilde: Subsea crane. Ship Modelling & Simulation Centre AS. Sitert 22.01.15: <http://www.smsc.no/>
4. Info og bilder: Ship motions. Wikipedia. Sitert 24.01.15: <http://en.wikipedia.org/>
7. Info: New DNV GL recommended practice. Stiftelsen Det Norske Veritas. Sitert 28.01.15: <http://www.dnvgl.com/>
12. Bilde: Wave Data Recording. NSW Government. Sitert 07.02.15: <http://mhl.nsw.gov.au/>
18. Info: Submarine pipeline. Wikipedia. Sitert 09.03.15: <http://en.wikipedia.org/>
20. Info: Alloy 6mo. Fine Tubes Ltd. Sitert 14.03.15: <http://www.finetubes.co.uk/>
23. Info: Response amplification operators. Wikipedia. Sitert 15.03.15: <http://en.wikipedia.org/>
24. Info: Edda Flora. Maritimt Magasin AS. Sitert 19.03.15: <http://maritimt.com/>
25. Bilde: Edda Flora. Østensjø Rederi AS. Sitert 19.03.15: <http://ostensjo.no/>
29. Formler: Area Moment of Inertia Section Properties: Half Tube Calculator. Engineers Edge LLC. Sitert 23.03.15: <http://www.engineersedge.com/>



13. Vedlegg

Skriftlige vedlegg

VEDLEGG A: Refleksjonsnotat

VEDLEGG B: Fremdriftsplan tabell

VEDLEGG C: Fremdriftsplan grafisk

Elektroniske vedlegg

Microsoft Excel: Beregningsark

Vedlegg A: Refleksjonsnotat

Denne oppgaven har for det meste blitt formet underveis i arbeidsprosessen, ettersom omfang og vanskelighetsgrad på temaet var uvisst. Fikk først litt info fra veileder før jeg fikk kartlagt mye på egenhånd. Jeg gjorde mine tanker på hvordan oppgaven kunne formes, dette ble diskutert med veileder og vi ble enige om en plan for oppgaven.

Jeg har vært veldig selvstendig i mitt arbeid. Mye fordi jeg følte veileder hadde tillit til mine evner til å forme oppgaven og ta avgjørelser på egenhånd. Dette kom frem ved møter hvor vi for det meste var enige. Dette gjorde at jeg følte en trygghet ved mitt arbeid og ikke trengte å rådføre meg om alt. Siden temaet var ukjent måtte jeg også gjøre en vurdering underveis på hva som var mulig å gjennomføre på gitt tid.

Selve utregningene er ikke så kompliserte, men formelverket er veldig omfattende og litt krevende å forstå. Jeg har innhentet nødvendig teori, formler og det meste av data for et skip. Det jeg ikke klarte å finne ble lånt fra andre masteroppgaver og noen antagelser ble gjort. Hadde det vært mere tid til rådighet burde «researchen» her vært grundigere. Ellers er de fleste antagelser og forenklinger i henhold til DNV.

I ettertid innser jeg også at beregningsarket mitt burde blitt dedikert mere tid. Nå puttet jeg enkeltvis inn alle bølgehøyder og perioder med tilsvarende skipsbevegelser. Og oppdaget halvveis at jeg hadde gjort en feil i antagelsen om pitch-bevegelsene til skipet. Da tapte jeg mye tid på ny «research», og måtte gjøre alle beregninger på nytt. Skulle hatt et mer omfattende regneark som gjorde beregningene enklere.

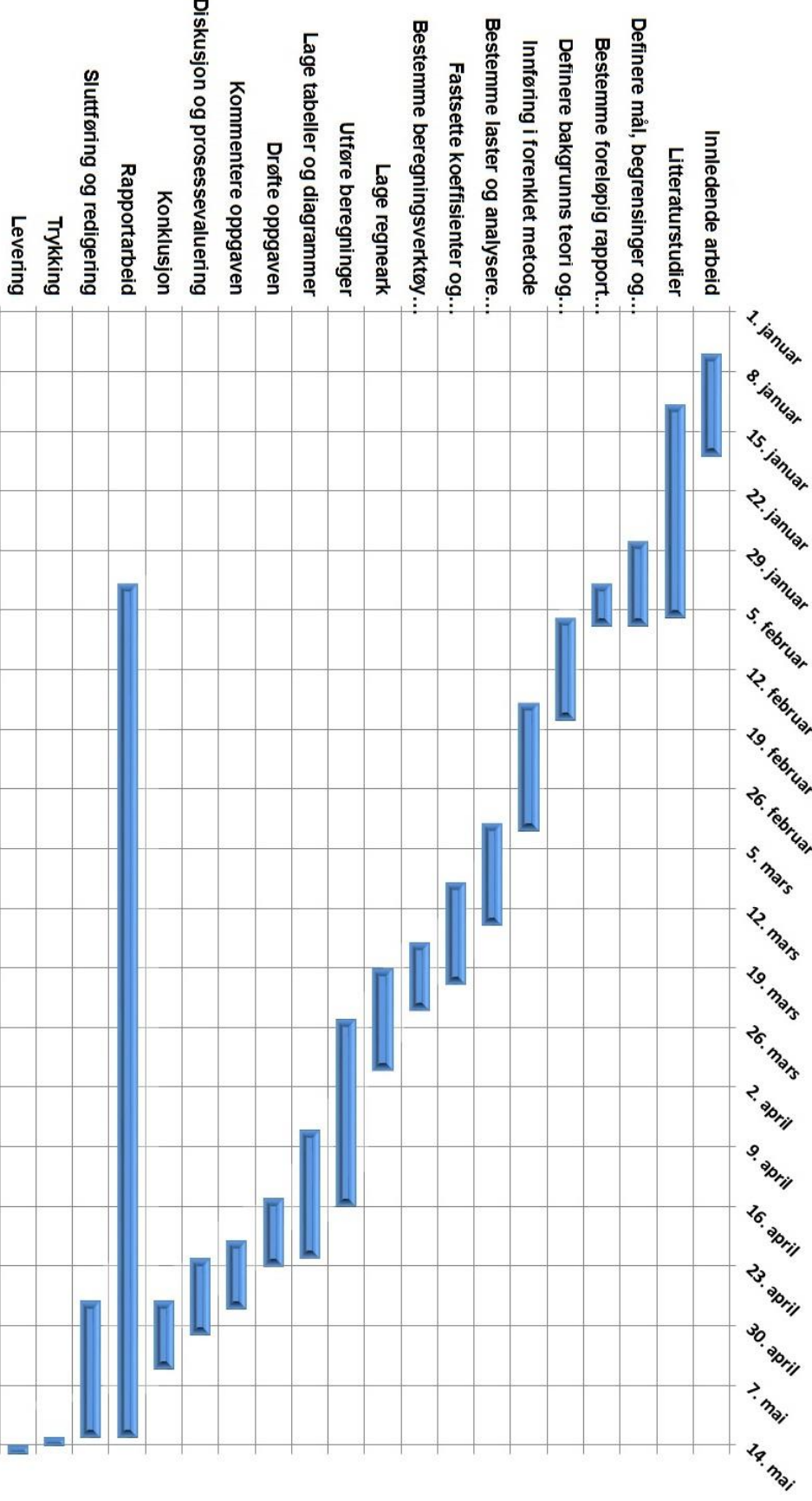
Alt i alt er jeg fornøyd med både prosessen og sluttresultatet. Jeg har vært strukturert i mitt arbeidet og jobbet jevnt. Føler oppgaven oppfyller ønsket til IMT, og samarbeidet med veileder har fungert bra. Det er alltid ting som kunne vært gjort annerledes, som nevnte beregningsark, antagelser og noen begrensninger. Men med begrenset tid, litt prøving og feiling, så må en gjøre noen beslutninger underveis. Jeg føler alle valg og begrensninger satt har blitt begrunnet og gjort rede for underveis i oppgaven.

Jeg har lært utrolig mye om et nytt og interessant tema, mer enn det som kommer frem i oppgaven. Det er noe jeg kunne tenkt meg å jobbe med, og garantert en erfaring jeg vil dra nytte av. Føler også oppgaven er en god innføring i temaet for maskiningeniører (og andre ingeniører) som ikke kan noe om det på forhånd.

Vedlegg A: Fremdriftsplan tabell

Fremdriftsplan:	Truls Weberg		NMBU 2015
Aktivitet:	Start Dato	Varighet	Sluttdato
Innledende arbeid	6. januar	12	17. januar
Litteraturstudier	12. januar	25	5. februar
Definere mål, begrensninger og problemstillinger	28. januar	10	6. februar
Bestemme foreløpig rapportoppsett	2. februar	5	6. februar
Definere bakgrunnsteori og begreper	6. februar	12	17. februar
Innføring i forenklet metode	16. februar	15	2. mars
Bestemme laster og analysere lastsituasjoner	2. mars	12	13. mars
Fastsette koeffisienter og nødvendige data	9. mars	12	20. mars
Bestemme beregningsverktøy + opplæring	16. mars	8	23. mars
Lage regneark	19. mars	12	30. mars
Utføre beregninger	25. mars	22	15. april
Lage tabeller og diagrammer	7. april	15	20. april
Drøfte oppgaven	15. april	8	22. april
Kommentere oppgaven	20. april	8	27. april
Diskusjon og prosessevaluering	22. april	9	30. april
Konklusjon	27. april	8	4. mai
Rapportarbeid	2. februar	100	12. mai
Slutføring og redigering	27. april	16	12. mai
Trykking	13. mai	1	13. mai
Levering	14. mai	1	14. mai

Vedlegg C: Fremdriftsplan grafisk





Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

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