



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:
Offshoreteknologi - Maskinteknikk

Vårsemesteret, 2007

Åpen

Forfatter: Kjell Korneliussen

.....
(signatur forfatter)

Faglig ansvarlig: Hirpa L. Gelgele

Veileder(e): Helge Stang

Tittel på masteroppgaven: Våttauing av bunnramme
Engelsk tittel: Wet towing of a subsea structure

Studiepoeng: 30

Emneord: Bunnramme
Oppdriftselement
Våttauing

Sidetall: 52
+ vedlegg

Stavanger, 14.06.2007

SAMMENDRAG

I de siste årene har det kommet mer teknologi som baserer seg på å bruke undervannsløsninger som tidligere krevde plattformløsninger. Dette skaper et økt behov for fartøyer som kan frakte og sette bunnrammer ned på havbunnen. I dag er det noen få store fartøyer som kan frakte og plassere konstruksjoner som veier mer enn 225 tonn i neddykket tilstand.

Denne oppgaven ser derfor på muligheten for å bruke oppdriftselementer for å redusere den statiske vekten. Oppdriftselementer er brukt i mange sammenhenger offshore, men ikke tidligere ved nedsetting av bunnrammer. Kan en benytte oppdriftslegemer slik at den statiske vekten går under 225 tonn, vil det være mange flere fartøyer som kan benyttes og presset i markedet for fartøyer vil gå ned.

For å redusere behovet for store fartøyer tar også oppgaven for seg en beskrivelse av våttauing av bunnrammene, med særlig vekt på bruk av oppdriftsbøye (penmetoden) som fraktmetode.

For å vurdere om det er mulig å bruke oppdriftslegemer for å benytte mindre fartøyer enn i dag, er det i oppgaven presentert hvilke krefter i følge Det Norske Veritas som opptrer ved et løft offshore. To viktige elementer som må besvares i den sammenheng er hvilken betydning oppdriftselementene har i forhold til tilleggsmasse og demping.

Denne oppgaven har tatt for seg en bunnramme med en neddykket vekt på 250 tonn, som skal settes ned i området rundt Snorre. Dette området har et havdyp på ca 300m og små variasjoner i strømmingen fra havoverflate og ned til havbunnen. Er det i tillegg en tilnærmet konstant vertikal hastighet på løftet, vil ikke oppdriftslegemene føre til et stort bidrag av tilleggsmasse. Oppdriftselementene vil også bidra med en økt demping i vertikal retning, noe som kan være positivt hvis en mister kontroll på løftet. For å gi en klar konklusjon på om en kan benytte oppdriftslegemer i forhold til det økte bidraget av tilleggsmasse, må en ha en helt konkret bunnramme og fartøyer som en analyserer i forhold til bevegelser og hastigheter. Dette er ikke blitt gjort i denne oppgaven, men ved slike forhold som det er i Tampenområdet ser det ut som om bruk av oppdriftslegemer er et egnet alternativ.

FORORD

Denne rapporten er den avsluttende hovedoppgaven i masterstudiet ved institutt for konstruksjonsteknikk og materialteknologi ved Universitetet i Stavanger med spesialisering i offshoreteknologi-maskinteknikk. Oppgaven er gitt av Statoil og veileder har vært Helge Stang.

Jeg vil takke Helge Stang for en utfordrende oppgave, for all veiledning og henvisninger til ressurspersoner. Jeg vil også takke Hirpa L. Gelgele som har vært faglig ansvarlig ved universitet.

Jeg vil også benytte anledningen til å takke mine medstudenter i paviljong 4 for nyttige innspill og diskusjoner.

Stavanger 14.6.2007

Kjell Korneliussen

INNHALDSFORTEGNELSE

| | |
|--|-----|
| SAMMENDRAG..... | I |
| FORORD | II |
| INNHALDSFORTEGNELSE | III |
| FIGUROVERSIKT | IV |
| FORKORTELSER..... | IV |
| 1. INNLEDNING..... | 1 |
| 2. LASTER | 3 |
| 2.1. BEREGNINGSMETODER I FØLGE DNV | 3 |
| 2.2. TILLEGGSMASSE | 12 |
| 2.3. DEMPING | 14 |
| 3. FRAKTMETODER | 17 |
| 3.1. PENNMETODEN..... | 18 |
| 3.2. KRAN/VINSJ TAUING | 20 |
| 4. OPPDRIFTSLEGEMER..... | 22 |
| 4.1. SKUM SOM OPPDRIFTSLEGEME | 22 |
| 4.2. BEREGNING AV VOLUM OG VEKT PÅ OPPDRIFTSLEGEME | 25 |
| 4.3. BEREGNING AV OPPDRIFTSHASTIGHET | 26 |
| 4.4. UTFORMING AV OPPDRIFTSLEGEME..... | 28 |
| 4.5. FIBERTAU | 29 |
| 5. PLANLEGGING AV OPERASJON | 31 |
| 5.1. Plassering av bunnramme | 36 |
| 5.1.1. POSISJONERING | 36 |
| 5.1.2. KOMPENSERING | 39 |
| 6. KONKLUSJON | 43 |
| REFERANSER | 45 |
| VEDLEGG..... | 47 |

FIGUROVERSIKT

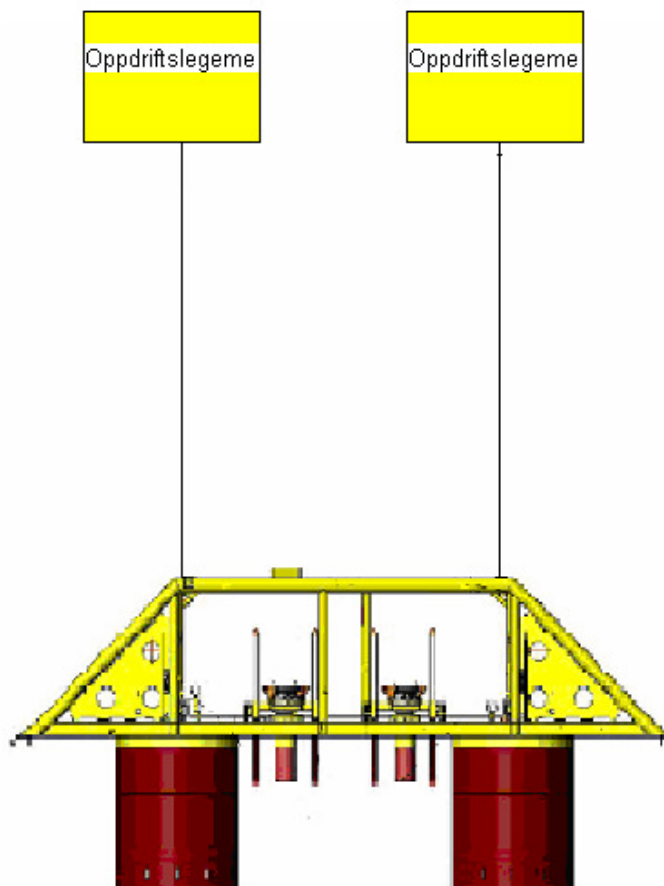
| | |
|---|----|
| Figur 1: Bunnramme med oppdriftslegemer..... | 1 |
| Figur 2: Løftearrangement | 6 |
| Figur 3: Løftefartøy i en fjord..... | 7 |
| Figur 4: strømningsregimer i forhold til Reynoldstall | 10 |
| Figur 5: Tilleggsmasse nær havbunnen | 13 |
| Figur 6: Tegning av bunnramme..... | 15 |
| Figur 7: Last overført til blyantbøyen..... | 18 |
| Figur 8: Tauing av bunnramme..... | 19 |
| Figur 9: Nedsenking av konstruksjon gjennom fartøyet..... | 20 |
| Figur 10: Skummet som er benyttet i oppgaven. | 23 |
| Figur 11: Påføring av det ytre belegget..... | 23 |
| Figur 12: Valg av skumtype..... | 24 |
| Figur 13: Densiteten på skum går opp ved økende vanndybde. | 25 |
| Figur 14: Forslag til utforming av oppdriftselement..... | 28 |
| Figur 15: Stålkjernen i oppdriftselementet | 29 |
| Figur 16: Utdrag av brosjyre for fibertau..... | 30 |
| Figur 17: konseptløsninger | 31 |
| Figur 18: Bølgehøyde for operasjoner | 33 |
| Figur 19: Gjennomsnittstiden for utførelse av operasjon..... | 34 |
| Figur 20: Posisjonering av bunnramme | 36 |
| Figur 21: Omkoblingsblokk fra en wire til en annen wire..... | 37 |
| Figur 22: Frihetsgradene til et fartøy | 39 |
| Figur 23: Oppbyggingen til det passive hivsystemet..... | 40 |
| Figur 24: Oppbyggingen til det aktive systemet..... | 41 |

FORKORTELSER

DNV: Det Norske Veritas
DP: Dynamisk Posisjonering
HPU: Hydraulic Power Unit
MRU: Motion Reference Unit
ROV: Remotely Operated Vehicle

1. INNLEDNING

For tiden er det mange prosjekter som ønsker å benytte undervannsteknologi både til å styre brønnstrøm, og til prosessering av hydrokarboner nede på havbunnen. Dette er ønskelig for å få en billigere og raskere utbygging av feltene. Ved å benytte ny teknologi som gjør det mulig å flytte aktiviteter under vann, vil vi få en økning i antall installerte bunnrammer. Størrelse og vekt vil sannsynligvis øke på bunnrammene som en følge av at mer og mer komplekst utstyr blir plassert under vann. Det er derfor et økende behov for fartøyer som kan frakte og sette bunnrammen på plass. Ved utplassering av bunnrammer har det vært vanskelig å finne egnede fartøyer som kan håndtere strukturer over 225 tonn. Det finnes noen få store fartøyer med større kapasitet, men disse er i midlertidig store og dyre å leie. Tilgjengeligheten på disse fartøyene er også liten da det er mange aktører som ønsker å leie dem for oppdrag. Det er derfor ønskelig å se på alternative måter for å kunne få plassert konstruksjoner ned på havbunnen. Våttauing av bunnrammen er et alternativ for frakt og vil bli sett nærmere på i denne oppgaven. Ved hjelp av våttauing kan en frakte store konstruksjoner uavhengig av dekkskapasiteten til slepefartøyet. I løpet av den tiden det har tatt å skrive hovedoppgaven har det kommet innretninger som kan håndtere konstruksjoner på opptil 400 tonn.



Figur 1: Bunnramme med oppdriftslegemer

For å øke antall mulige fartøyer som kan håndtere nedsettingen av større bunnrammer, kan en bygge mindre konstruksjoner og sette dem sammen nede på havbunnen. Alternativt kan man redusere den statiske kraften på konstruksjonen ved å øke oppdriften. Denne oppgaven vil se på muligheten for å benytte seg av oppdriftselementer. Det er ved nedsenking av bunnrammen til havbunnen at de største problemene oppstår når konstruksjonen blir tung. I løpet av oppgaven vil det bli vurdert om det er mulig å benytte oppdriftslegemer til å redusere den statiske kraften. Kan man benytte oppdriftslegemer vil en kunne bruke mindre fartøy med hivkompensering. For å kunne besvare dette spørsmålet må det kartlegges hvilke krefter som opptrer ved en nedsenking av konstruksjon. I kapitel 2 presenteres beregningsmetodene som DNV anbefaler for marine operasjoner. Der er også gitt en nærmere forklaring på hva tilleggsmasse og demping betyr for en løfteoperasjon i vann.

Kapitel 3 presenterer forskjellige fraktmetoder for å få konstruksjonen fraktet ut til feltet hvor den skal operere. Her er det lagt særlig vekt på våttauing som fraktmetode. For å kunne benytte oppdriftslegemer er det i kapitel 4 utformet et forslag til type oppdriftselement. I markedet er det i dag mange former for oppdriftselementer, men de er ikke tilpasset formålet som det er behov for i denne oppgaven. Kapitel 5 gir en oversikt for hvordan og hva en planlegger for å kunne utføre frakt og nedsetting av konstruksjonen.

Formålet med oppgaven er å gi en presentasjon av muligheten til å benytte oppdriftslegemer ved nedsetting av en konstruksjon. For å kunne besvare dette konkret må det være konkrete konstruksjoner og et valgt fartøy som det blir utført analyse på. Analyseprogrammene som kan gjøre dette er store og dyre å skaffe til veie. Det er derfor ikke blitt gjort i denne oppgaven. Konstruksjonen som det er tatt utgangspunkt i for størrelse og vekt, er Norne bunnrammen. Tegninger er ikke tatt med fordi FMC Technologies ønsker konfidensialitet rundt tegningene. Det er derfor gjort noen forenklete beregninger i oppgaven for å visualisere noen av problemstillingene som er knyttet til installering av en bunnramme.

2. LASTER

Ved prosjekter som innbefatter løfteoperasjoner må en utrede hvilke laster som kan opptre ved løft. I dette kapitlet vil det bli presentert hvordan dette kan gjøres i følge DNV sine anbefalinger. Ved en marinoperasjon er det mange elementer som påvirker de operasjonene som skal bli utført. For å kunne ta høyde for de forskjellige elementene fins det standarder og erfaringsdata som en tar utgangspunkt i. Det er også regelverk for hvordan løfteredskapene skal dimensjoneres etter at lastpåvirkningene er beregnet. Dette regelverket er også i stor grad hentet fra DNV.

2.1. BEREGNINGSMETODER I FØLGE DNV

For å kunne beregne nødvendig løftekapasitet til kranen må en ta hensyn til både statiske og dynamiske krefter.

Ifølge DNV er den dynamisk krankroklasten når en har et løft hvor det blir benyttet en krankrok gitt ved:

$$DHL = DAF * (W + W_{rig}) + F(SPL) \quad [N] \quad [ref. 4]$$

hvor

| | | |
|-----------|---|--|
| DHL | : | Dynamisk krocklast |
| DAF | : | Dynamisk forsterkningsfaktor |
| W | : | Vekt av konstruksjon |
| W_{rig} | : | Vekt av riggingen |
| F(SPL): | : | Spesielle krefter, for eksempel taueline |

De største belastningene på en konstruksjon som skal fraktes og settes på havbunnen er ofte de belastningene som opptrer når konstruksjonen skal senkes ned i sjøen, eller ved landing på havbunnen. De totale karakteristiske kreftene kan uttrykkes slik:

$$F_{total} = F_{statisk} \pm F_{hyd} \quad [N] \quad [ref. 5]$$

hvor

| | | |
|---------------|---|--|
| $F_{statisk}$ | : | Vekten av konstruksjonen nedsenket i vann. |
| F_{hyd} | : | Karakteristiske hydrodynamiske krefter. |

De statiske nedsenkede vekten beregnes slik:

$$F_{statisk} = mg - \rho Vg \quad [N] \quad [ref. 5]$$

hvor

| | | |
|---|---------------------------------------|----------------------|
| m | : Masse av konstruksjonen i luft. | [kg] |
| g | : Tyngdeakselerasjon = 9,81 | [m/s ²] |
| ρ | : Tetthet til sjøvann, normalt = 1025 | [kg/m ³] |
| V | : Volum av fortrengt vann | [m ³] |

Volumet vil forandre seg etter hvert som løftet går gjennom plaskesonen.

De karakteristiske hydrodynamiske kreftene på konstruksjonen, gjennom plaskesonen kan uttrykkes gjennom ligningen

$$F_{\text{hyd}} = F_{\text{slam}} + F_{\rho} + F_{\text{drag}} + F_{\text{treg}} \quad [\text{ref. 5}]$$

hvor

F_{slam} : Kort- tids impulslaster.

F_{ρ} : Karakteristiske oppdriftskrefter.

F_{drag} : Hydrodynamisk drag krefter.

F_{treg} : Hydrodynamiske treghetskrefter.

Støtlasten er kort-tids impulslaster som opptrer når strukturen bryter vannoverflaten. Disse kreftene er sterkt avhengig av låringshastighet og arealet på konstruksjonen som bryter vannoverflaten.

De karakteristiske støtkreftene kan beskrives ved uttrykket:

$$F = 0,5 * \rho * C_s * A_p * v_s^2 \quad [\text{ref. 5}]$$

hvor

ρ : Tetthet til sjøvann, normalt = 1025 [kg/m³]

C_s : Støt koeffisient som kan bli bestemt enten ved hjelp av teori eller praktiske tester. For en konstruksjon slik som en bunnramme er, er det vanlig å fastsette den til 5,0.

A_p : Arealet til elementene som penetrerer vannoverflaten.

v_s : Støt hastighet

Støthastigheten kan bli kalkulert slik:

$$v_s = \frac{\sqrt{v_{ct}^2 + 3,1 * H_s}}{4} * \left(0,528 * \left(\frac{4 * v_c}{\sqrt{v_{ct}^2 + 3,1 * H_s}} \right)^{-0,44} + 1,645 \right) + v_c \quad [\text{ref. 5}]$$

hvor

v_{ct} : Hastighet på kranbom

H_s : Signifikant bølgehøyde

v_c : Låringshastighet på krankrok

De karakteristiske oppdriftskreftene blir beregnet fra uttrykket:

$$F_\rho = mg * \left(1 + \frac{v_r}{g} \left(1 - \frac{\rho g A_p}{K + \rho g A_p} \right) \left(\frac{K}{m} \right)^{0,5} \right) \quad [\text{ref. 5}]$$

m : Massen til konstruksjonen i luft. [kg]

v_r : Relativ hastighet mellom konstruksjon og vannpartiklene. [m/s]

K : Stivheten til løftesystemet [N/m]

hvor

Under nedsenkingen vil oppdriftskreftene variere som følge av bølgehevingen. Den karakteristiske vertikale hastigheten kan en finne ved hjelp av uttrykket:

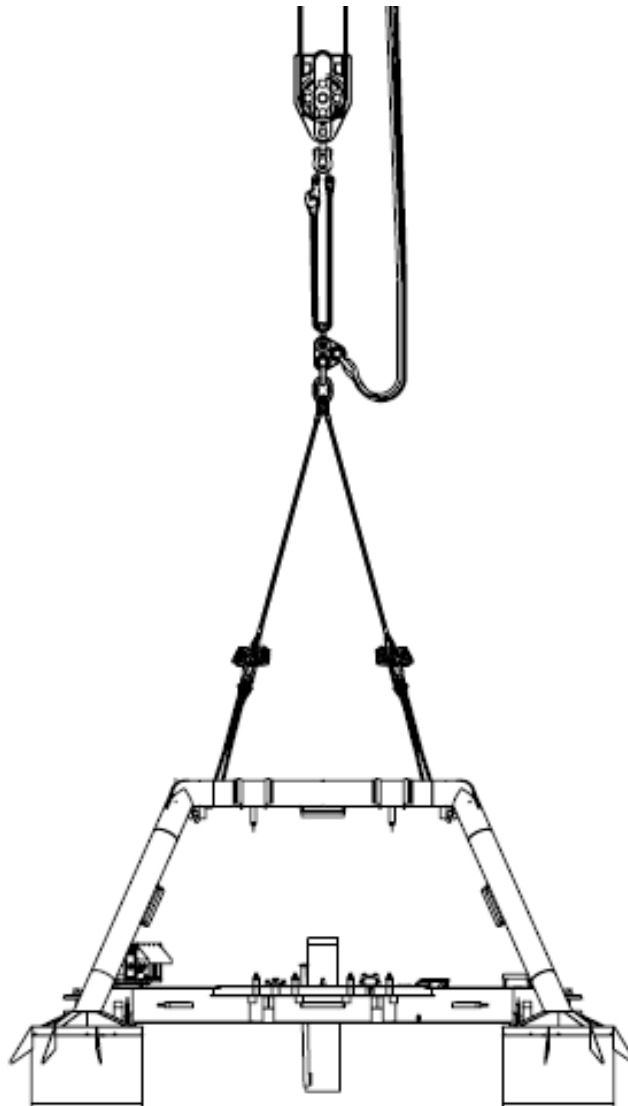
$$v_r = \sqrt{v_{ct}^2 + 3,1 * H_s \left(e^{-\frac{0,32d}{H_s}} \right)^2} \quad [\text{m/s}]$$

hvor

d : Avstanden mellom vannplanet og tyngdesenteret til den nedsenkede delen av konstruksjonen.

Stivheten til systemet er vanlig å beregne etter metoden:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_{wire}} + \frac{1}{k_{fiberstropp}} + \frac{1}{k_{blokk}} + \frac{1}{k_{bom}} + \frac{1}{k_{andre}} \quad [\text{ref. 5}]$$



Figur 2: Løftearrangement

Figur 2 illustrer et løftearrangement, som er sammensatt av flere komponenter som er satt sammen i serie. Bunnrammen er overført fra wiren som ble benyttet ved uttauing til den hivkompenserte løfteinnretningen. Slik bunnrammen henger nå er den festet i selve strukturen, opp i et løfteskrev. Løfteskrevet er koblet i en omkoblingsblokk som går videre til neste løfteline slik at man kan koble til hovedløftewiren. Slik kan en sette sammen et løftearrangement ved hjelp av sjakler som kobler stropper og wire sammen..

Stivheten på kranbommen blir ofte neglisjert da stivheten på denne er mye høyere enn stivheten til wire og stropper.

Stivheten til wire og stropper kan en beregne slik:

$$k = \frac{EA_1}{L}$$

[N]

[ref. 5]

hvor

E : Elastetsmodul

A₁ : Effektivt areal til linen. Hvis flere liner blir de addert sammen

L : Lengden til linen(e).

En av fordelene med å bruke våttauing er at operasjonen med å trenge gjennom plaskesonen foregår nær land. Det er vanlig å foreta denne manøveren inne i en fjord, der det er rolig farvann. Dette gjør at en har mindre bølger og perioden på bølgene er av en annen karakter enn de er ute i åpent hav. Dette gjør at det er et mye større spekter av fartøy som kan senke konstruksjonen gjennom plaskesonen. En kan for eksempel bruke en lekter som er utstyrt med kran. Slike fartøyer er helt uaktuelle å bruke i åpent hav da de har lett for å komme i resonansområdet.



Figur 3: Løftefartøy i en fjord

Figur 3 viser et typisk kranfartøy som blir brukt inne i fjorder ved gunstige bølgeforhold. Dette gjør at støtkreftene blir lave i forhold til å senke konstruksjonen gjennom skvalpesonen ute til havs.

Belastninger på konstruksjonen og i løfteutstyret vil være forskjellig når hele konstruksjonen er nedsenket. Støtkreftene som gir bidrag til belastning i skvalpesonen kan en se bort fra, og en vil ikke ha de samme variasjonene i oppdriftskreftene. Fortsatt har en statiske og hydrodynamiske krefter som virker inn på operasjonen med å senke

konstruksjonen ned til havbunnen. Forskjellen er hva som gir bidrag til kreftene. Fortsatt gjelder uttrykket:

$$F_{tot} = F_{statisk} + F_{hyd}$$

$F_{statisk}$: Statisk vekt av konstruksjonene neddykket i sjøen.

F_{hyd} : Karakteristiske hydrodynamiske krefter

F_{hyd} kan en finne ved hjelp av uttrykket:

$$F_{hyd} = \sqrt{F_m^2 + F_d^2} \quad [\text{ref. 5}]$$

F_m : Karakteristisk masse kraft. [N]

F_d : Karakteristisk drag kraft. [N]

Karakteristisk masse kraft kan en finne av uttrykket:

$$F_m = (m + m_{add})a_{ct} + \rho V_w + m_{add} a_w$$

m : Masse av konstruksjonen i luft. [kg]

m_{add} : Tilleggsmasse til konstruksjonen. [kg]

a_{ct} : Karakteristisk vertikal akselerasjon på kranbom [m/s²]

ρ : Tetthet til sjøvann, normalt 1025 [kg/m³]

V : Volum av fortrengt væske [m³]

A_w : Karakteristisk vertikal vannpartikkelakselerasjon. [m/s²]

Den tillagte massen kan en beregne fra uttrykket:

$$M_{add} : \rho V C_m \quad [\text{ref.5}]$$

C_m er tillagt massekoeffisient som er en funksjon av dybden. Koeffisienten kan en bestemme enten ved hjelp av teori eller eksperimentelle metoder.

Den karakteristiske vannpartikkelakselerasjonen er en funksjon av d og den signifikante bølgehøyden (H_s), og finnes ved hjelp av uttrykket:

$$a_w = 3,1H_s \left(e^{\frac{0,32d}{H_s}} \right)^2 \quad [\text{m/s}^2] \quad [\text{ref. 5}]$$

d : Avstanden mellom vannplanet og tyngdesenteret til den nedsenkede delen av konstruksjonen.

H_s : Signifikant bølgehøyde. [m]

Drag kreftene er vanlig å beregne slik:

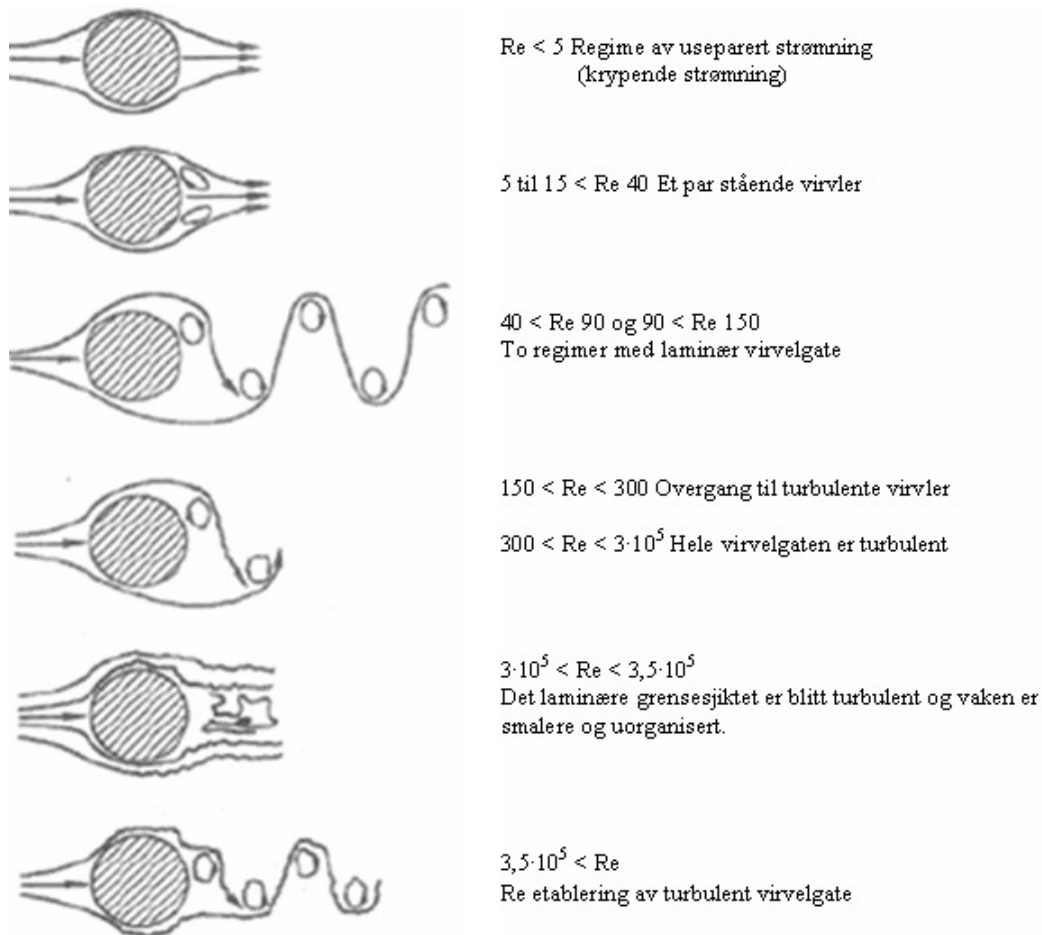
$$F_d = 0,5 * \rho * C_d A_p * v_r^2 \quad [\text{ref. 5}]$$

C_d : Dragkoeffisient som kan bli bestemt enten ved hjelp av teori eller eksperimentelle metoder. For konstruksjoner som mangler nøyaktige data på eller av annen grunn ikke klarer å beregne helt nøyaktig er det vanlig å sette $C_d = 2,0$

A_p : Prosjeksert areal. [m²]

V_r : Karakteristisk vertikal hastighet, relativ hastighet mellom konstruksjon og vannpartiklene. [m/s]

Dragkreftene som virker på konstruksjonen blir forårsaket av friksjon mellom konstruksjonen og vannstrømmen. Strømning kommer fra bølger, tidevann og kontinuerlige strømmer. Strømningen som blir induert av bølgene blir redusert nedover i havet, og under et gitt nivå kan en se bort fra bølgeindusert strømning. Strømningen nedover kan variere nedover, en kan ha strømningslag med høy eller lav hastighet. Blir strømningshastigheten stor kan den skape problemer for operasjonen. Det har vært tilfeller der strømningshastigheten har vært så stor at en har hatt problemer med å styre ROV. Det er derfor viktig å kartlegge bunnforhold og miljøkrefter som påvirker strømningene. I Tampenområdet er det forholdsvis flate bunnforhold. Det betyr at en ikke har store variasjoner i strømning langs havbunnen.



Figur 4: Strømningsregimer i forhold til Reynoldstall

Figur 4 viser sammenhengen mellom strømningshastig som funksjon av Reynoldstall og hvordan en sylinder blir påvirket ved forskjellige strømningshastigheter. I praktiske sammenhenger er det de tre siste regimene som vil opptre [ref. 7].

Går strømningshastigheten opp får en større viskøsekrefter og en kan få større dragkraft og løft som følge av strømningsregimet som oppstår bak sylindren.

En annen faktor en må ta hensyn til er om en risikerer å få slakk i løftewire/stropper.

Dette kan oppstå ved hastighetsforandringer, slik som start og stopp av løft. Det kan også oppstå slakk i løfteliner hvis de hydrodynamiske kreftene blir større enn de statiske kreftene.

$$F_{\text{hyd}} > F_{\text{statisk}}$$

[ref. 5]

For å ikke risikere å få slakk i løfteliner anbefaler DNV å bruke en dynamisk forsterkningsfaktor for å sjekke om det kan inntreffe. Faren hvis slakk i linene inntreffer er at det kan komme store impuls krefter i løfteutstyret. De kreftene kan overskride det kran og løfteutstyr er sertifisert for, i verste fall kan det føre til brudd som forårsaker at en

mister lasten. Fordelen med våttauing er igjen at en unngår skvalpesonen ved nedsetting av konstruksjonen på havbunnen. Normalt er det i skvalpesonen det er størst fare for at slakk i linene vil inntre. I denne oppgaven er det et viktig element med slakk i løfteliner under hele operasjonen. Dette pga bruk av oppdriftslegemer. Oppdriftslegemet representerer et areal som bidrar til hydrodynamiske krefter. I tillegg til økt areal får en også økt massebidrag som påvirker løfteoperasjonen. Det er derfor svært viktig at en får sjekket om det er fare for å få slakke løfteliner. Dette kan gjøres ved å bruke en dynamisk forsterkningsfaktor, DAF.

$$DAF = \frac{F_{statisk} + F_{hyd}}{F_{statisk}} \quad [\text{ref. 5}]$$

For å unngå slakk i løftet anbefaler DNV at $DAF < 2,0$.

Den dynamiske forsterkningsfaktoren brukes til flere formål, den brukes blant annet til å sjekke kapasitet til kran og løfteutstyr. Ved de forskjellige formålene blir faktoren tilpasset til ligningene som blir brukt i de aktuelle problemstillingene.

2.2. TILLEGGSMASSE

Tilleggs masse kan også kalles virtuell masse. Dette pga at det ikke dreier seg om en virkelig fysisk væskemasse [ref. 9]. Tilleggs masse er en kraft som en får pga at konstruksjonen forstyrrer væsken som er omkranset. Det er en kraft som opptrer når en har vannpartikler i akselrasjon. I følge Hydros forsknings senter er denne kraften i fase med akselerasjonen.

Størrelsen på tilleggs massen avhenger også av retningen på akselrasjonen. For å finne tilleggs massen til enkle konstruksjoner er det utarbeidet tabeller. Dette gjelder for kuler, plater, kuber eller sirkelformede legemer. Blir konstruksjonen mer innfløkt kreves det numeriske metoder eller forsøk for å finne hvor stor tilleggs massen blir. Dette er vanligvis et arbeid som krever spesialprogrammer og er tidkrevende. Grunnen til at det blir vanskeligere å bestemme tilleggs massen på mer innfløkte geometrier er påvirkningen en får fra selve konstruksjonen. I noen tilfeller er geometriene av en slik art at en får en forsterkning av tilleggs masse. I andre tilfeller vil en få skyggeeffekter, slik at en kan neglisjere enkelte deler av konstruksjonen. I tillegg til dette kan konstruksjonen ha perforeringer. Perforeringene vil normalt føre til at en får redusert tilleggs massen.

Ved den numeriske metoden for å finne tilleggs massen kan en bruke matriser. En måte å tenke på for å visualisere tilleggs masse på, er at hvert uttrykk i matrisen er masse assosiert med en kraft på konstruksjonen ved i^{th} retning på grunn av akselrasjon i j^{th} retning [ref. 15].

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} & m_{16} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} & m_{26} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} & m_{35} & m_{36} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} & m_{45} & m_{46} \\ m_{51} & m_{52} & m_{53} & m_{54} & m_{55} & m_{56} \\ m_{61} & m_{62} & m_{63} & m_{64} & m_{56} & m_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \\ \dot{u}_4 \\ \dot{u}_5 \\ \dot{u}_6 \end{bmatrix}$$

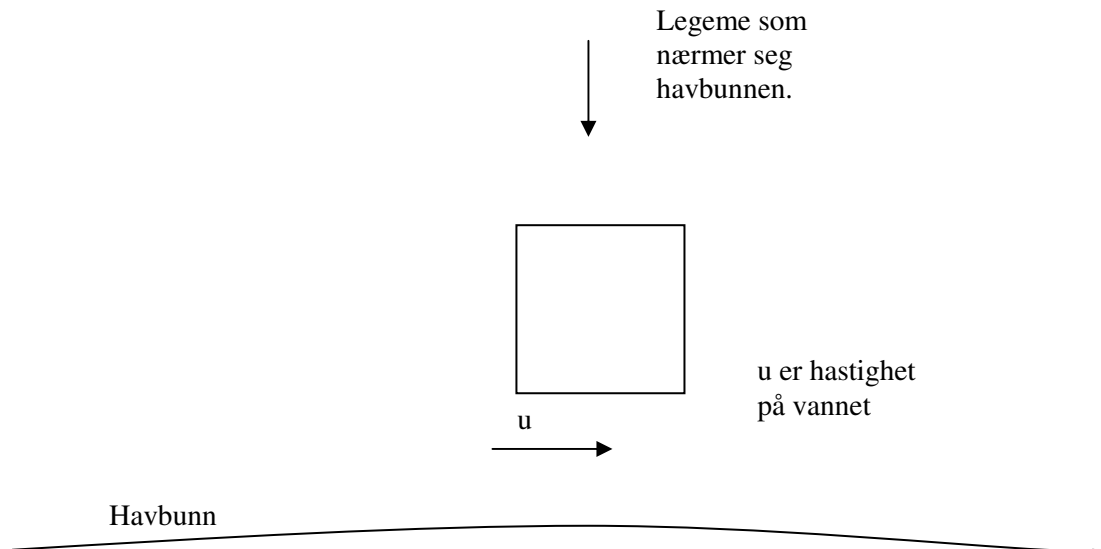
der

$\bar{F}_i = F_i$ hvor $i = 1,2,3,4,5,6$ av disse er 1,2,3 lineære krefter og 4,5,6 er momenter

Vektoren $\dot{u} = [\dot{u}_1 \quad \dot{u}_2 \quad \dot{u}_3 \quad \dot{u}_4 \quad \dot{u}_5 \quad \dot{u}_6]$ inneholder akselrasjoner.

For hver m_{ij} har en et uttrykk som blir satt inn i matrisen. Dette viser at det kreves kraftige numeriske verktøy og programmer for å kunne få gode svar. Det er også viktig at en har god kontroll på geometrien, dette pga at en benytter projeksert areal i den retningen som en behandler i hvert tilfelle.

Når konstruksjonen nærmer seg havbunnen vil en få en økt tilleggsmasse [ref.1]. Dette pga at akselerasjonen på vannpartiklene øker. Vannpartiklene vil måtte flytte seg med større hastighet pga at etter hvert som konstruksjonen nærmer havbunnen, reduseres retningene som vannpartiklene kan forflytte seg i.



Figur 5: Tilleggsmasse nær havbunnen

I følge Hydros forskningssenter er det også positive effekter med tilleggsmasse. I forbindelse med landing av konstruksjoner kan tilleggsmassen bidra til at en får en mykere landing [ref. 10].

I denne oppgaven har det vært fokusert tilleggsmasse pga skepsisen det er i markedet til å bruke oppdriftslegemer. Det har derfor vært viktig å få fram hva tilleggsmasse er og hva som skaper tilleggsmassen. I denne problemstillingen som blir belyst her, kan man anta at en vil få bidrag fra tilleggsmasse når en påfører oppdriftselementene på konstruksjonen, samt ved landing av konstruksjonen. Under størsteparten av løftet vil en ha små bidrag av tilleggsmasse. Dette forutsetter at en har jevn hastighet på løftet, samt at en har en tilnærmet konstant strømningshastighet.

2.3. DEMPING

For en konstruksjon som blir utsatt for dynamiske laster som f. eks bølgelaster og strømninger, vil det oppstå treghetskrefter og energitap. For en konstruksjon kan en assosiere dempingen med evnen den har til å ta opp krefter.

Ved neddykkende objekter kan en ha flere former for demping. Dempingen kan komme som et bidrag fra selve strukturen eller det er tatt i bruk eksternt utstyr for å redusere bevegelsene. Dette kan være bevegelseskontroll av båten, bruk av hivkompensert kran, eller en kombinasjon av dette.

Det vil også forekomme en naturlig demping fra vannet. Dette bidraget kommer fra den tidligere nevnte drag kraften. Dette kalles viskøs demping. Den vil være med på å gi en treghet rundt objektet, og oppta krefter.

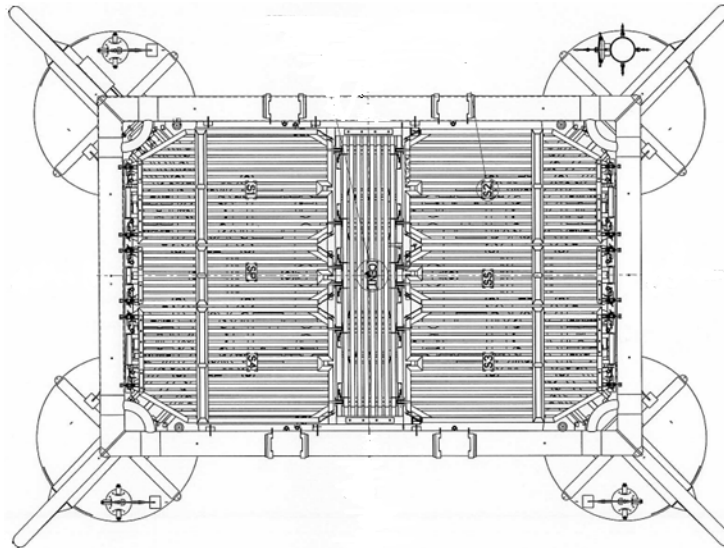
Den viskøse dempingen kan uttrykkes som: $F_d = c\dot{u}$ [ref. 9]

Der c er dempingsfaktoren.

Størrelsen på dempingen er avhengig av geometrien til objektet. Det som hovedsakelig gjør at en får en dempingseffekt er at vannet i fronten av objektet bremser opp objektet. Ved bevegelse vil trykket bak være mindre enn i fronten av objektet. Det vil også danne seg virvler i bakkant av objektet ved relativt små hastigheter. Dette er også en effekt som vil virke dempende på bevegelsen. En generell regel er at C_d er dobbel så stor ved oscillerende strømninger enn for laminer strømning [ref. 11].

Ved marine operasjoner er det viktig å kartlegge hvilke skader som kan opptre ved uønskede hendelser. En uønsket hendelse som kartlegges er tap av lasten og hva er konsekvensen for konstruksjonen hvis dette skulle inntreffe. Ved tap av lasten kan en anta at den vertikale draglasten vil være en dempingsfaktor.

For å få et bilde på hvordan dempingen vil virke ved nedsenkingen av bunnrammen, gjøres det en del forenklinger. I beregningen av hvor stor hastighet bunnrammen vil treffe havbunnen ser en på rammens projekserte areal, sammen med dragkoeffisienten. For å beregne arealet, tar en utgangspunkt i at gitteret i lukene sammen med geometrien under lukene multipliseres med en faktor på 0,7. Velger å bruke en dragkoeffisient på 1,0 Dette for ikke å få en urealistisk høy demping.



Figur 6: Tegning av bunnramme

Figur 6 viser bunnrammen sett ovenfra. Denne er det er tatt utgangspunkt i for oppgaveskrivingen.

$$\text{Areal:} \quad \text{Ramme + luker} = 13,2m * 20,3m * 0,7 = 188m^2$$

$$\text{Sugeanker} = \frac{6,1^2 m * \pi}{4} * 4 \text{stk} * 0,75 = 88m^2$$

$$\text{Oppdriftselementer} = 3m * 3m * 4 \text{stk} = 36m^2$$

$$\text{Areal uten oppdriftselementer:} \quad 276m^2$$

$$\text{Areal med oppdriftselementer:} \quad 312m^2$$

For å beregne frittfallshastigheten v i vertikal retning brukes følgende ligning:

$$W = \frac{1}{2} * \rho * C_d * A_p * v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 * W}{\rho * C_d * A_p}} \quad [\text{ref.} \quad 5]$$

hvor

W : Neddykket vekt.

ρ : Densitet til sjøvann.

C_d : Dragkoeffisient

A_p : Projeksert areal i vertikal retning.

Den neddykkede vekten varierer om det blir brukt oppdriftslegemer eller ikke. Ved bruk av oppdriftlegemer, blir den neddykkede vekten mindre.

$$\text{Frittfallhastighet uten oppdriftselementer: } v_u = \sqrt{\frac{2 * 2,45 * 10^6 \text{ kg} / \text{ms}^2}{1025 \text{ kg} / \text{m}^3 * 1 * 276 \text{ m}^2}} = 4,16 \text{ m} / \text{s}$$

$$\text{Frittfallhastighet med oppdriftselementer: } v_m = \sqrt{\frac{2 * 1,6 * 10^6 \text{ kg} / \text{ms}^2}{1025 \text{ kg} / \text{m}^3 * 1 * 312 \text{ m}^2}} = 3,16 \text{ m} / \text{s}$$

Beregningen for frittfallhastigheten viser at om hovedwiren ryker, vil det være en positiv effekt å bruke oppdriftslegemer i forhold til hvor kraftig støtet blir mot havbunnen. Det har skjedd under nedsetting at bunnrammen er blitt mistet pga havari på løfteutstyret. I det tilfellet ble det ikke nevneverdige skader på bunnrammen. Erfaring viser da at dempingeffekten som er skissert, er et viktig bidrag til at skadene ikke ble omfattende [ref. 8].

3. FRAKTMETODER

For å frakte en bunnramme ut til destinasjonspunktet er det forskjellige hovedmetoder å benytte seg av. Nedenfor er disse metodene beskrevet.

Hovedmetode 1:

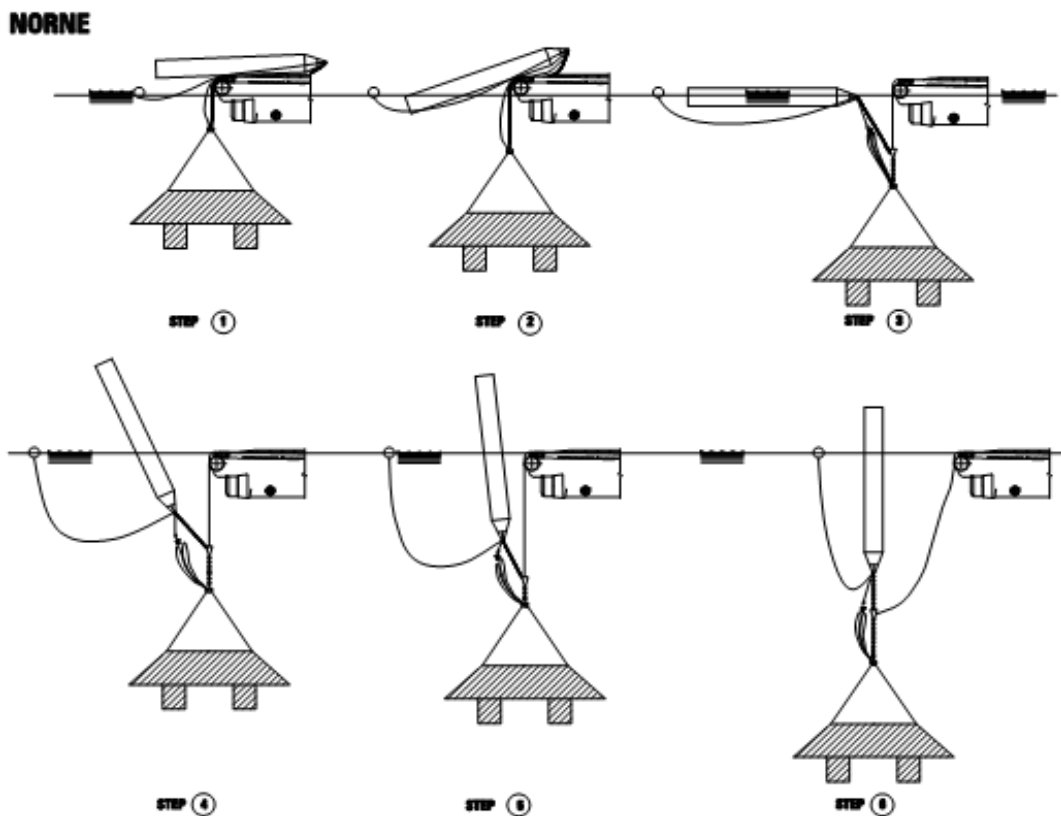
Det er å bruke et lastefartøy til å frakte bunnrammen ut til feltet hvor den skal plasseres. Denne metoden kan en gjøre i to forskjellige varianter. Den ene varianten er å bruke et fartøy som har dekkareal til å frakte konstruksjonen samtidig som det er en stor nok kran til å løfte bunnrammen på plass. Det andre alternativet er å bruke to fartøyer. Da vil det ene fartøyet bli benyttet til frakt av bunnrammen. Det andre fartøyet er et kranfartøy som løfter bunnrammen fra fraktestartøyet og ned på havbunnen. Hvilken variasjon som blir benyttet avhenger av tilgjengelighet på fartøy og pris. De store kranfartøyene er dyre å leie samtidig som det lite tilgjengelighet på denne typen fartøy. En vil derfor bruke de i så kort tid som mulig.

Hovedmetode 2:

Den andre hovedmetoden baserer seg på våttauing av bunnrammen. Ved denne metoden er det flere varianter å velge mellom. I markedet er det forskjellige leverandører av tjenesten som har spesialisert seg på egne metoder. Denne oppgaven gir en mer fylldig beskrivelse to forskjellige hovedvarianter av våttauing. Den ene metoden er ved bruk av oppdriftsbøye, ofte kalt pennmetoden. Den andre metoden er ved bruk av kran/vinsj. I oppgaven vil det bli gitt en beskrivelse av de to metodene for våttauing med særlig vekt på bruk oppdriftselementer.

3.1. PENNMETODEN

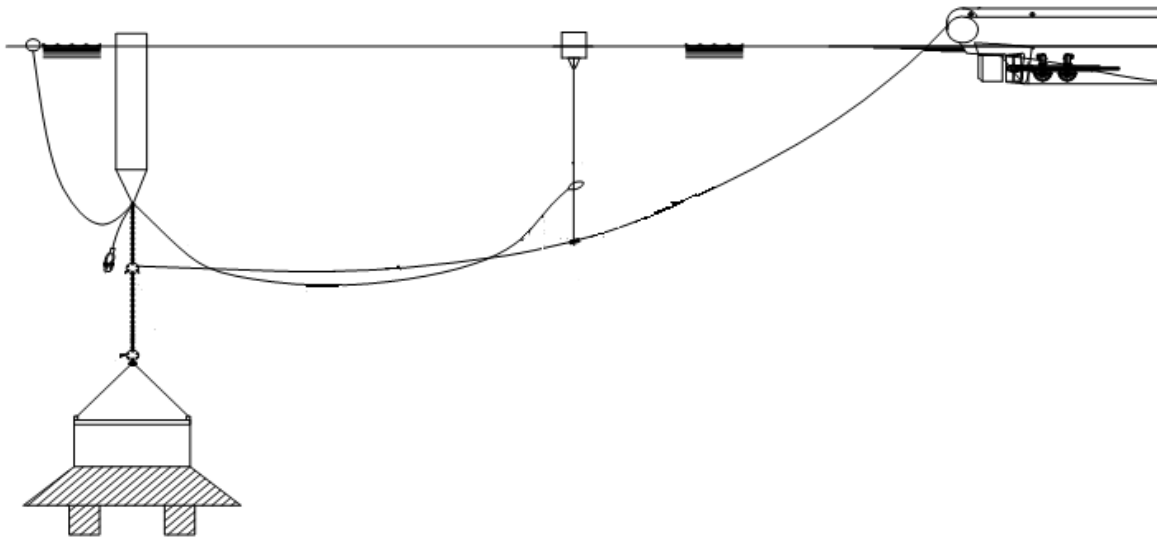
Aker Marine Contractors AS har spesialisert seg på å bruke oppdriftsbøyer for å kunne frakte konstruksjonen fram til bestemmelsesstedet, som vist i Figur 8: Tauing av bunnramme. Da henger konstruksjonen under en blyantbøye fram til det stedet hvor konstruksjonen skal plasseres. Ved landingen av konstruksjonen blir lasten overført til en vinsj eller en form for kran. Ved denne formen for frakt av konstruksjonen har en hatt problemer med overføringen av lasten fra bøye til kran/vinsj. Et av problemene en har hatt er ved håndteringen av bøyen etter at en har kommet ut til feltet. Ved opptrekking av bøyen har det blitt påført skader på fartøyet som utfører inntrekkingen, samt en har fått skader på selve bøyen. Det har også vært usikkerhetsmomenter rundt utmatting ved festeordningene mellom last og blyantbøye. Dette er et problem en har klart å løse. Grunnen til utmattingsproblematikken er responsen en kan få i blyantbøyen under tauing [ref. 14].



Figur 7: Last overført til blyantbøyen

Figur 7 viser stegene fra trinn 1 hvor bunnrammen henger i fartøyets vinsj og oppdriftselementet er om bord i båten. I trinn to startes sjøsetting av oppdriftsbøyen fram til trinn 6 hvor oppdriftsbøyen er stabil i sjøen og hele lasten blir overført til

oppdriftsbøyen. Båtens vinsj blir koblet av og bunnrammen blir tauet ut til bestemmelsesstedet i denne posisjonen ved hjelp av et tauarrangement.



Figur 8: Tauing av bunnramme

Figur 8 viser en enkel skisse av hvordan tauarrangementet er oppbygd. Bunnrammen henger i blyantbøyen og blir tauet av en båt. For å redusere den statiske vekten av tauelinen er det montert en oppdriftsbøye.

Fordelen med å bruke denne formen for transport er at en kan bruke mindre fartøyer som slepefartøy. Det er også større fleksibilitet med hensyn til tid. Med dette menes at ved frakt langs kysten, kan en ved dårlig vær søke inn til smulere farvann. Så kan en igjen fortsette ut til destinasjonspunktet når en får et langt nok værvindu. Ved bruk av pennmetoden kan en dele operasjonen inn i flere trinn.

- Trinn 1: Lasten senkes gjennom plaskesonen innaskjærs.
- Trinn 2: Overføring til ankerhåndteringsfartøy.
- Trinn 3: Lasten overføres til blyantbøye.
- Trinn 4: Holder lasten nedsenket fram til destinasjonspunkt.
- Trinn 5: Overfører lasten til vinsj/kran.
- Trinn 6: Nedsenking av konstruksjon til bunnen.

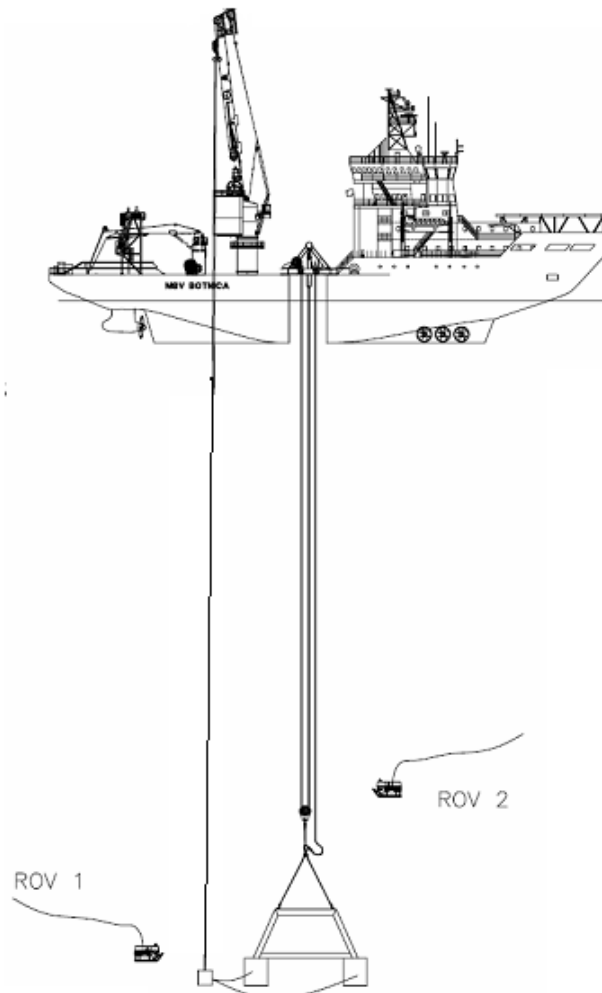
Ved begynnelsen av arbeidet med denne hovedoppgaven hadde en begrensninger ved denne metoden med konstruksjoner på over 250 tonn. Under arbeidet med oppgaven har det kommet på markedet blyantbøyer og fartøyer med hivkompensert kran som kan takle konstruksjoner som veier opp til 400 tonn [ref. 10].

3.2. KRAN/VINSJ TAUING

Den andre metoden som blir brukt for våttauing kan en dele videre opp etter hvordan kran/vinsj er plassert på fartøyet som frakter konstruksjonen ut til feltet. For Nordsjøen er Subsea7 en stor aktør på denne måten å frakte konstruksjonen ut til feltet på. Her blir det benyttet en vinsj eller en kran som konstruksjonen er festet til under hele taueoperasjonen.

Denne metoden kan en dele inn slik:

- Trinn 1: Lasten senkes gjennom plaskesonen innaskjærs.
- Trinn 2: Overføring til fartøy som skal frakte konstruksjonen.
- Trinn 3: Eventuell overføring av last til hiv-kompensert kran/vinsj
- Trinn 4: Nedsenking av konstruksjon til havbunn.



Figur 9: Nedsenking av konstruksjon gjennom fartøyet

Figur 9 viser en bunnramme som blir senket ned mot havbunnen gjennom lukesystemet (moonpool). Bunnrammen er nær havbunnen og lasten blir overført til den hivkompenserte vinsjen. ROV 1 overvåker klumpvekten som skal holde bunnrammen i riktig posisjon. ROV 2 overvåker omkoblingen av wire.

Ved selve frakten kan en benytte seg av en vinsj/kran som ikke er hivkompensert, men under nedsenkingen er det ønskelig at en kan benytte en hivkompensert kran/vinsj. Dette for å unngå støtkrefter som genereres fra de vertikale bevegelsene til løftefartøyet. De forskjellige måtene å håndtere lasten på er å ha lasten hengende gjennom et lukesystem midt i båten, eller at lasten henger utenfor båten ved hekken. I utgangspunktet er det ønskelig å kunne bruke et lukesystem midt i båten. Men det avhenger av designen på fartøyet og tilgjengeligheten på denne type fartøy. Grunnen til at det er ønskelig å kunne henge lasten gjennom dette lukesystemet er at den hengende konstruksjonen blir mindre påvirket av bevegelsesmønsteret til fartøyet enn om det henger på utsiden av fartøyet. En viktig faktor en må ta hensyn til ved bruk av lukesystemet, er om det rommet som går gjennom fartøyet er stort nok. Det er viktig at det er så stort i omfang at en ikke risikerer at løfteutstyr vil slå borti veggene. Da kan en få skade både på selve fartøyet og det kan få uønskede konsekvenser på løfteutstyret.

4. OPPDRIFTSLEGEMER

I denne oppgaven er det et viktig poeng å se på om det er mulig å kunne bruke oppdriftslegemer for å få en større tilgjengelighet på antall fartøy som det er mulig å benytte seg av.

I enkelte fagmiljø som driver med våttauing er en skeptisk til bruk av oppdriftslegemer. Grunnen til skepsisen er blant annet den tilførte massen oppdriftslegemene har, og påvirkningen som oppdriftslegemene har på de hydrodynamiske kreftene. Tidligere har det vært brukt ballonger som en har pumpet opp slik at en har fått den ønskede oppdriften. Dette er en metode som en har gått bort ifra pga sikkerheten. Ved bruk av slike oppdriftslegemer kan de lett bli skadet og derved miste oppdriften. Fordelen en hadde ved bruk av slike oppdriftslegemer var at de var skånsomme mot fartøyer og utstyr rundt operasjonene. Ved utløsning ville en ikke få skader på fartøyer/utstyr når oppdriftslegemet går opp mot overflaten når oppgaven er utført.

4.1. SKUM SOM OPPDRIFTSLEGEME

Oppdriftslegemene som blir brukt nå, består av et ytre skall som er fylt med skum. Figur 10 viser det skummet som er valgt i denne oppgaven for å kunne gjøre et anslag på størrelsen og vekten til oppdriftselementene som er tenkt brukt. Materialvalget for skummet blir valgt etter hvilket havdyp en operer i. Det som har vært ankepunktet ved bruk av stive oppdriftslegemer er frykt for skade på fartøy og utstyr når en avslutter bruken av oppdriftslegemet. Den største frykten er likevel hvis det ryker noe under selve operasjonen. Da er en bekymret for å miste kontroll på operasjonen en utfører, samt at oppdriftslegemet vil komme opp mot overflaten i stor hastighet. Kommer oppdriftslegemet opp med stor hastighet kan det forårsake skader på fartøy og utstyr som er involvert. Leverandør av denne typen oppdriftsbøyer hevder at dette er en frykt som ikke er begrunnet. De hevder at hastighet opp mot overflaten ikke vil bli stor nok til å kunne påføre skader på slike store fartøy som her er involvert. Leverandør hevder at en må ned i små fritidsbåter før dette vil bli et problem en må ta hensyn til. Grunnen til at en har gått over til denne typen oppdriftsbøyer er at en ikke risikerer å få en total kollaps av oppdriftselementet [ref. 17].



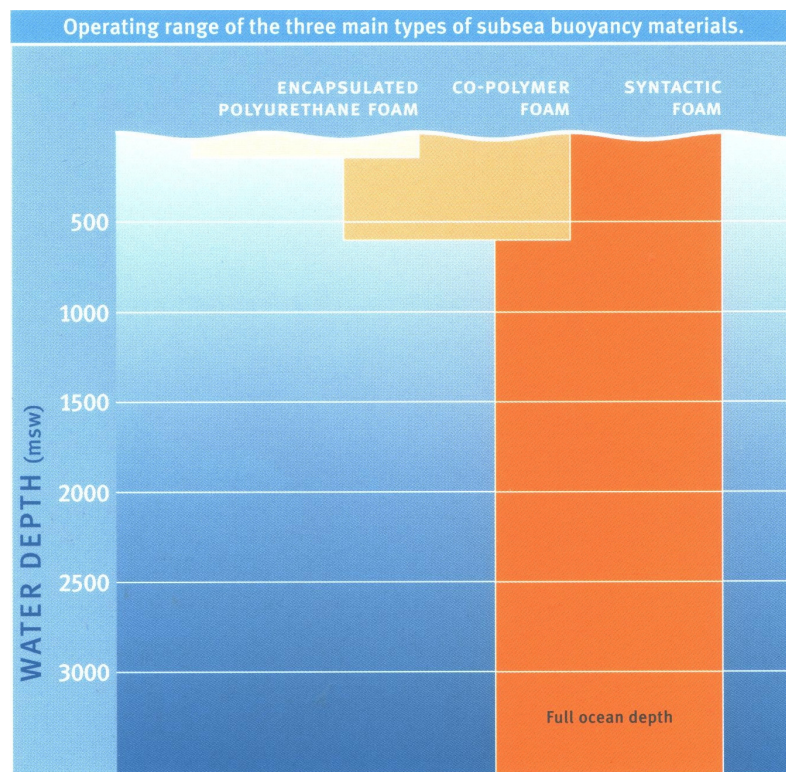
Figur 10: Skummet som er benyttet i oppgaven

Det ytre beskyttelseslaget kan enten sprayes på, som vist i Figur 11, eller det kan bli støpt. Tykkelsen på dette belegget varierer etter hvilke betingelser en operer under. Typisk varierer tykkelsen mellom 6 til 30 mm. Materialet som ligger beskyttelseslaget av, er et elastomer som heter Polyuretan. Dette laget skal beskytte mot vanninntrengning i oppdriftslegemer. Ved behov for langtidsoppdrift er det også motstandsdyktig mot groing.



Figur 11: Påføring av det ytre belegget

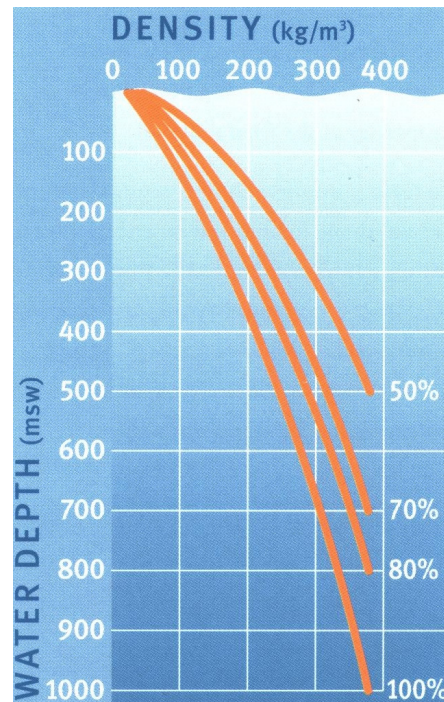
Ved valg av skum som skaper volum, er det dybden som avgjør hvilken type skum en velger. Figur 12 viser ved hvilke havdybder de forskjellige typene av skum kan anvendes. I denne oppgaven hvor en operer med et havdyp på omkring 300 m kan det være naturlig å velge skum som en kaller CO-Polymer. Det er et konservativt valg når en tar i betraktning at oppdriftsbøyene i utgangspunktet ikke skal senkes ned til den totale vanndybden. Dette er et skum som består av stive celler. Dette skummet er typisk beregnet til å motstå hydrostatiske krefter til et vanddyp i overkant av 500m. Skummet tåler også at beskyttelsesbelegget ikke er helt tett. Dette betyr at problemet med kollaps ikke vil inntre. Typisk levetid for en bøye med dette skummet er 25 år.



Figur 12: Valg av skumtype

Alle bøyene har en kjerne av stål. Denne kjernen blir tilpasset den bruken en har tiltenkt. Den utformes slik det er mest hensiktsmessig i forhold til hvordan løfteutstyret er utformet. Den kan også tilpasses slik at det kan bli brukt ROV til å feste/utløse bøyen.

For å kunne beregne størrelsen av bøyen er en avhenging av tettheten til skummet. Som Figur 13 viser, går tettheten opp når havdybden øker. Dette er en konsekvens av at oppdriftslegemet må motstå større hydrostatiske krefter.



Figur 13: Densiteten på skum går opp ved økende vanddybde

Ved bruk av oppdriftselementer som bare skal brukes ved nedsenking av en konstruksjon, vil tiden for vanneksponering bli liten. For å kunne finne densiteten til det skummet, kan en derfor følge linjen som viser 100 %. Dette betyr at en ikke vil få vanninntrengning i skummet.

4.2. BEREGNING AV VOLUM OG VEKT PÅ OPPDRIFTSLEGEME

For det valgte skummet og en vanddybde på 300m finner en at densiteten til skummet er på 170 kg/m³. Dette brukes videre for å finne hvor stort oppdriftslegemet må være for å få stor nok oppdrift.

Størrelsen på oppdriften er gitt ved ligningen:

$$\text{Oppdrift: } l * b * h * \rho$$

l: Lengde

b: Bredd

h: Høyde

ρ : Densitet til sjøvann

Ved å ta utgangspunkt i et oppdriftselement som er 3m langt, 3m bredt, og 3m høyt (tegninger av oppdriftslegemet er med i vedlegg) gir dette en oppdrift på:

$$\left(3m * 3m * 3m + 0.026m^3 - \left(\frac{0,6^2 m * \pi}{4} \right) * 0,2m * 2 \right) * 1025kg / m^3 = 27122kg$$

Egenvekt oppdriftselement:

$$\text{Skum: } \left(2,98m * 2,98m * 2,98m - \left(\frac{0,61^2 m * \pi}{4} \right) * 0,2m * 2 \right) * 170kg / m^3 = 4479kg$$

Belegg:

$$\left(3m * 3m * 0,01m * 4sider + (3m * 3m + 0,6 * \pi * 0,2, m - \left(\frac{0,6m^2 * \pi}{4} \right)) * 0,01m * 2 \right) * 940kg / m^3 = 509kg$$

Stålkjernen er valgt ut fra et vanlig standard sveist stålrør av stålqualiteten NS-EN 10 219-1 (St 52-3). Denne må korrosjonsbeskyttes ved hjelp av maling eller galvanisering. Det er også brukt den samme materialqualiteten i stålkappen i topp og bunn. Stålrøret er 219,1 mm i ytterdiameter med en godstykkelse på 10 mm.

$$\text{Vekt: } 51,57kg / m * 2,40m = 124kg$$

Fra tegningene i SolidWorks finner en vekten på stålelementet til å være 328 kg. Når en vet vekten på røret, finner en volumet som gir et bidrag til oppdrift.

$$328 - 124 = 204kg \rightarrow \text{dette gir et volum på } 0,026m^3$$

$$\text{Total vekt på oppdriftselement: } 4479kg + 509kg + 328 = 5316kg$$

$$\text{Netto oppdrift for hvert element blir da: } 27122kg - 5316kg = 21806kg$$

Dette er tilstrekkelig oppdrift for det som er tiltenkt i denne oppgaven.

4.3. BEREGNING AV OPPDRIFTSHASTIGHET

For å illustrere hvilken hastighet som oppdriftselementet vil få ved overflaten ved en utløsning av et oppdriftselement kan en sette opp formelen:

$$F_d = \frac{1}{2} * C_d * \rho * A_p * v^2 \quad [\text{ref. 5}]$$

hvor

C_d : Dragkoeffisient

ρ : Densitet til sjøvann.

A_p : Projeksert areal i vertikal retning.

v : Hastighet i vertikal retning.

F_d vil da være netto oppdriftskraften til elementet. Dette vil gi den maksimale hastigheten som oppdriftselementet vil få på vei opp mot havoverflaten.

$$F_d = 21806 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 = 213917 \text{ N}$$

Dette gir en hastighet på:

$$v = \sqrt{\frac{F_d}{0,5 * C_d * \rho * A_p}} = \sqrt{\frac{213917}{0,5 * 2 * 1025 \text{ kg/m}^3 * 9 \text{ m}^2}} = 4,82 \text{ m/s}$$

$$F = \text{masse} * \text{akselerasjon} \rightarrow a = \frac{213917 \text{ N}}{5316 \text{ kg}} = 40,2 \text{ m/s}^2$$

Ved å forenkle akselerasjonen og anta at det er en lineær akselerasjon, får en strekningen som kreves for å oppnå maksimal hastighet.

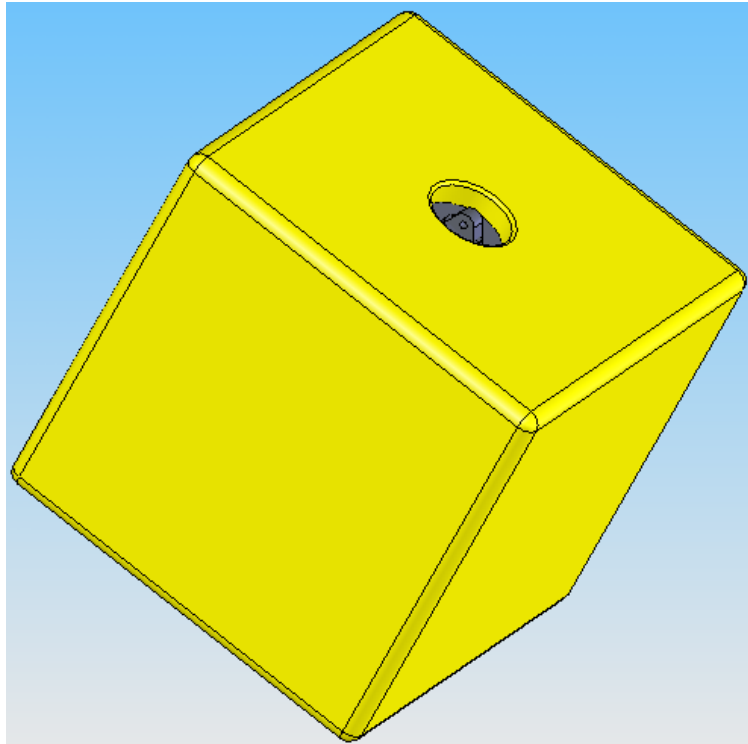
$$v = \sqrt{2 * a * s}, \quad 4,82 = \sqrt{2 * 40,2 \text{ m/s}^2 * s} \rightarrow s = 0,06 \text{ m}$$

Dette viser at oppdriftslegemet oppnår den maksimale hastighet på en kort strekning. I denne oppgaven vil oppdriftslegemene være 50 m under havoverflaten når de frigjøres fra bunnrammen. En kan derfor fastslå at oppdriftslegemet vil ha den maksimale hastigheten på 4,82 m/s ved havoverflaten. Ved et eventuelt sammenstøt av fartøy eller utstyr vil da det enkelte oppdriftslegemet ha en energi på:

$$E = \frac{1}{2} m * v^2 = \frac{1}{2} * 5316 \text{ kg} * (4,81 \text{ m/s})^2 = 61496 \text{ J}$$

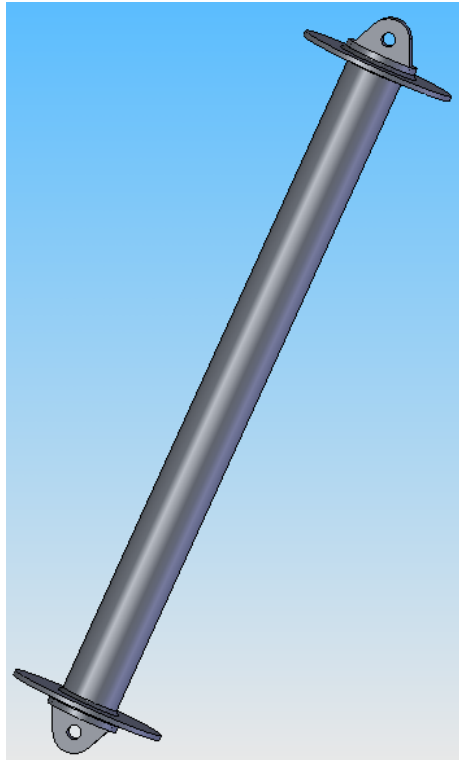
Oppdriftselementet er designet med tanke på at fartøy/utstyr kan bli truffet. Utforming er derfor slik at det ikke skal være løfteører eller stålplatene i oppdriftselementene som treffer fartøy/utstyr først. Dette for en eventuell kollisjon skal fordeles på en så stor flate som mulig.

4.4. UTFORMING AV OPPDRIFTSLEGEME



Figur 14: Forslag til utforming av oppdriftselement

Figur 14 viser at festeøret som fibertauet skal bli festet i, er nedsenket i selve oppdriftsbøyen. Oppdriftselementet har denne festeannordningen både i bunn og topp av oppdriftsbøyen, dette for å ha et mer fleksibelt oppdriftselement. Dette er et forslag til hvordan oppdriftselementene kan være utformet. Det er ikke tatt beregninger på hvor stor kappen på stålkjernen må være. Det er tatt et anslag for denne størrelsen, men det har ikke lyktes å finne den eksakte styrken på verken det beskyttende laget eller skummet oppdriftselementet er laget av. Det er derfor mulig at det behøves en større diameter for å holde innmaten i posisjon.



Figur 15: Stålkjernen i oppdriftselementet

For å kunne beregne vekt og volum på oppdriftslegemet, er det i denne oppgaven laget tegninger av oppdriftselementet i SolidWorks. Disse tegningene har dannet grunnlag for å kunne gjøre en analyse på hvilke dimensjoner stålkjernen må ha for å kunne tåle de påførte lastene. Figur 15 er tegningen som ble benyttet i analyseprogrammet. I analysen ble det benyttet en sikkerhetsfaktor på 3,0 for å verifisere at stålkjernen tåler belastningen som den vil bli utsatt for.

4.5. FIBERTAU

For å feste oppdriftslegemene til bunnrammen vil en bruke fibertau. Grunnen til dette er å spare på vekt, fibertauet har en densitet som gjør at det flyter. Dette gjør at en ikke trenger å ta hensyn til fibertauet ved beregning av størrelsen på oppdriftslegemene. I forhold til vekten er fibertauet meget sterkt når en sammenligner med stålwire. Med samme diameter kan fibertauet ha samme styrken, men har en vekt som er 1/8 av vekten til stålwiren. Ved større dyp og belastninger enn det som fibertauet blir utsatt for ved denne operasjonen, kan det bli et problem med at fibertauet strekker seg mer enn en stålwire.

Et passende fibertau til denne oppgaven heter SuperMax. Det er 12 partig flettet tau som består av Polypropylene. Dette fibertauet har en styrke som Figur 16 viser. [ref. 2]

| Diameter i | MBL | | Vekt |
|------------|------|---------|---------|
| mm | tonn | kN | kg/100m |
| 36 | 104 | 1.020,2 | 68,0 |
| 38 | 112 | 1.098,7 | 74,0 |
| 40 | 127 | 1.245,9 | 84,0 |

Figur 16: Utdrag av brosjyre for fibertau

Fibertauet må ha en sikkerhetsfaktor i følge DNV sine regler for marine operasjoner. Denne sikkerhetsfaktoren regnes slik:

$$\gamma_{sf} = \gamma_f \gamma_c \gamma_s \gamma_r \gamma_m = 1,30 * 1,30 * 1,33 * 1,33 * 1,50 = 4,48 \quad [\text{ref. 4}]$$

hvor

| | |
|---------------|---|
| γ_{sf} | Sikkerhetsfaktor |
| γ_f | Lastfaktor 1,3 |
| γ_c | Konsekvensfaktor 1,3 |
| γ_s | Reduksjonsfaktor for spleising 1,33 |
| γ_r | Reduksjonsfaktor pga spleising og bøying 1,33 |
| γ_m | Materialfaktor 1,5 |

Oppdriftselementet har en oppdrift på 213 917 N og med en sikkerhetsfaktor på 4,48 må fibertauet ha en minimum bruddstyrke på 959 234 N. Dette betyr at fibertauet må ha en diameter på 36 mm.

5. PLANLEGGING AV OPERASJON

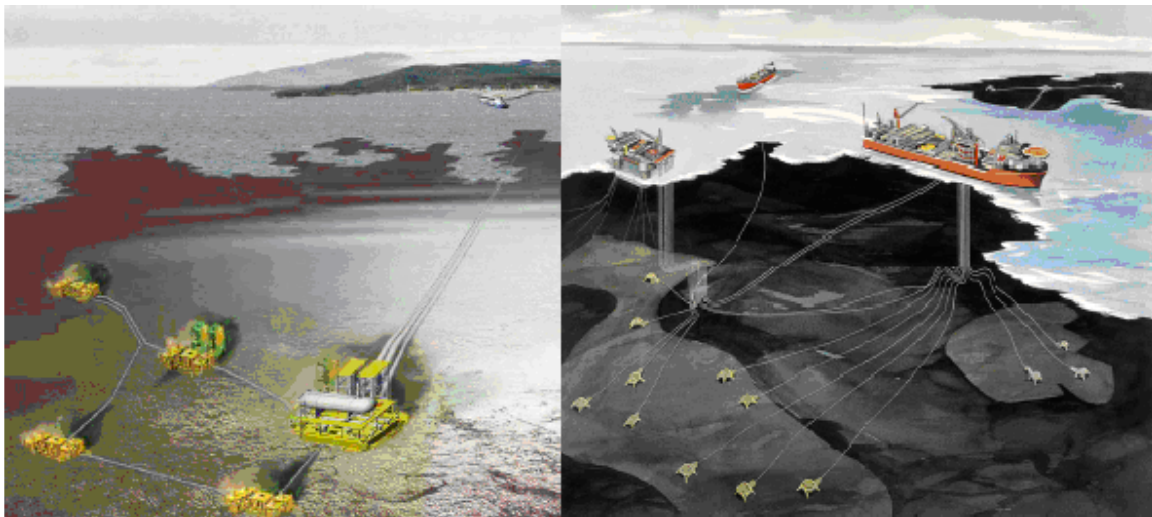
For marine operasjoner er planlegging en stor og tidkrevende prosess. Det kan være den delen det blir brukt lengst tid på. Det hender at planleggingsperioden er lenger enn selve byggefasen. Før en kan begynne å løse de tekniske oppgavene er det mye forarbeid som kreves. Dette arbeidet er kartlegging av alle forhold som er relevante for byggingen av bunnrammen.

En kan dele opp planleggingen i sekvenser.

Den første sekvensen er å identifisere hvilke relevante lover og regler som gjelder for området en skal operere i. En må få klarhet i hvilke standarder, selskapsspesifikasjoner og koder en skal designe etter.

Det neste skrittet i planleggingen er å identifisere de fysiske begrensingene som eksisterer. Etter at en har gjort dette, bør en utarbeide en oversiktsplan over hovedelementene som inngår for å få et ønskelig sluttprodukt. I denne delen av planleggingen kartlegger en hvilke konseptløsninger en kan benytte seg av. Dette betyr at en må få en oversikt over hva som er tilgjengelig av utstyr, teknologi, begrensninger og om det en ønsker å gjøre er økonomisk forsvarlig.

Når en har fått et oversiktsbilde om hva som er tilgjengelig og hvilke begrensninger en må ta hensyn til, vil en utarbeide en designbasis som en vil ta som utgangspunkt for videre designarbeid. Dette danner grunnlaget for analysearbeidet og det endelige designet som sluttproduktet får. Etter designarbeidet er ferdig utarbeides operasjonsprosedyrer [ref. 3]



Figur 17: Konseptløsninger

Figur 17 viser to forskjellige konseptløsninger. Konseptløsningen til venstre er Ormen lange feltet. Dette er en løsning hvor brønnstrømmen blir ført til land og videre prosessert. I konseptløsningen til høyre er det benyttet et eksisterende felt for videreføring av brønnstrømmen

Filosofien bak planlegging er at en skal kunne utføre operasjonen på en sikker og trygg måte i henhold til gjellende lover og regler. Operasjonen skal ha som utgangspunkt at de følger prinsippet om feilsikkerhet, dvs. hvis en komponent eller delsystem svikter skal systemet være utformet på en slik måte at ikke flere feil oppstår.

Planleggingen for å sette ned en bunnramme på havbunnen krever mye forundersøkelser før en kan begynne selve designet av rammen. For en bunnramme som er brukt som modell i denne oppgaven, er det foretatt mange operasjoner før beslutning om å bygge bunnrammen for produksjon av hydrokarboner. Det har blitt foretatt seismiske undersøkelser, leteboring, avgrensingsboring osv.

Når beslutning om utbygging er foretatt, begynner arbeidet med å hente inn flere data. For design av hvor kraftig rammen skal være med hensyn på utvinning, må en ha reservoardata. Det er viktig for designen å vite hvilke trykk og temperaturer en operer under og hvilken levetid en ser for seg for produksjonen.

Det viktigste i denne oppgaven er planlegging i forhold til miljøet hvor bunnrammen er besluttet plassert. Med miljø i denne sammenheng menes de fysiske omgivelsene en kan forvente seg i dette området, samt hvilke miljøkrefter det er forventet vil opptre. Dette er med på å bestemme hvilket konsept en velger for bunnrammen og hvilke operasjoner som er nødvendige for å sette ned bunnrammen på en forsvarlig måte, samt at den står stabilt på havbunnen etter installasjon. Hovedelementene som må kartlegges for selve rammen er hvilket havdyp rammen skal stå på, hvordan grunnforholdene er, og om det er fare for utglidning, og hvordan topografien er i området. Dette er viktige elementer som må tas hensyn til ved konstruksjonen av bunnrammen. I området som er utpekt som destinasjonspunkt i denne oppgaven, er det et område med jevne bunnforhold og en masse som egner seg for å bruke sugeanker som fundament. Dette er et konsept som gjør selve rammen tyngre, men selve installasjonsarbeidet blir enklere enn om det er nødvendig med pæling og en annen form for festeanordning til havbunnen. Dette danner grunnlaget for den videre planleggingen for hvordan en skal få installert bunnrammen til destinasjonspunktet.

Ved å ha kartlagt de fysiske forholdene rundt rammen har en fått hva som kreves av selve rammen. Ut i fra det konstrueres rammen, og en får en størrelse og vekt av rammen. Dette benyttes videre i planleggingen av hvordan en skal frakte rammen til destinasjonspunktet. I denne oppgaven er det bestemt at det skal benyttes våttauing med vektlegging på den delen hvor en senker bunnrammen ned til havbunnen.

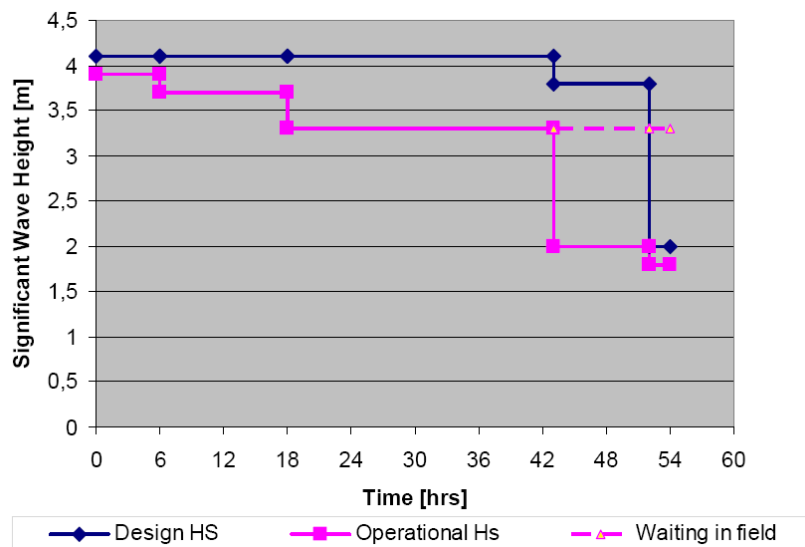
En praksis som benyttes er å analysere hvilke miljøbetingelser operasjonen kan takle, for deretter å planlegge når og hvordan en kan utføre operasjonen.

Det er vanlig å dele operasjonen i flere deler der en har forskjellige kriterier for hva som er akseptable miljøkrefter. Ved analyse og innhenting av værdata hvor en bestemmer hva som er akseptabelt, er det vanlig å dele operasjonen inn slik:

- Tauing
- Installasjon
 - Plassering av rammen (finner riktig posisjon)
 - Landing av bunnrammen
- Venting på feltet. Det er nødvendig å ha en tidsbuffer for enten å vente på bedre vær eller for å kunne ha slakk i operasjonene som skal utføres på feltet.

For at tauing skal starte er det et krav om et værvindu som er langt nok til at hele operasjonen skal kunne utføres. Ved denne typen operasjoner er det strenge krav i henhold til hvordan og hvor ofte værdata skal hentes inn. I følge DNV sine krav kommer denne operasjonen inn under nivå A. Det betyr at værdata skal hentes inn for hver 12 time, men det er vanlig å gå ned til hver 6 time. Det er også et krav om at meteorologkyndig person skal være til stede på fartøyet under operasjonen.

De forskjellige delene av operasjonene har ikke like kriterier for værbetingelser. Det er et aspekt som det blir tatt hensyn til under avgjørelsen om når tauingen kan begynne. For selve tauingen aksepterer en større bølgehøyder enn ved selve nedsettingen og tilretteleggingen for nedsetting ute på feltet. Dette gjør at tauing kan igangsettes ved værmeldinger som vil gi bedre betingelser utover i tauingen.

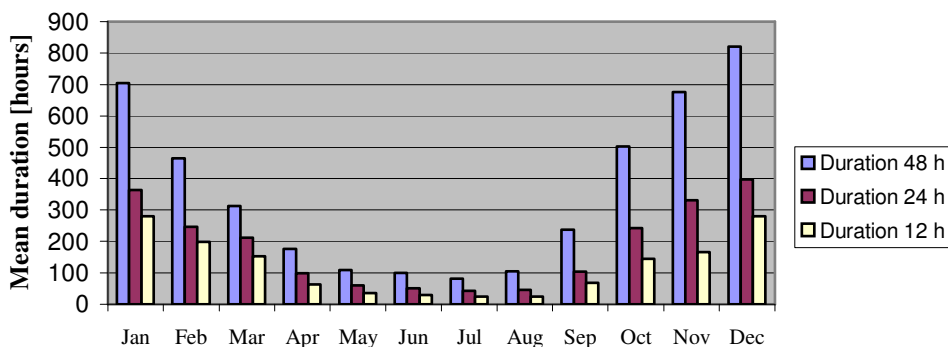


Figur 18: Bølgehøyde for operasjoner

Figur 18 viser de bølgehøydene som kan aksepteres ved forskjellige operasjoner. Dette eksempelet er tatt fra installering av Yttergryta. Det er skissert tidsforbruk for hele operasjonen, fra tauing til nedsetting av bunnrammen. Ved tauing er grensen på H_s 4,1 m. For forberedelser ute på feltet er grensen H_s 3,8 m. For å senke bunnrammen ned på havbunnen er grensen H_s 2,0 m [ref. 12]

Ved valg av starttidspunkt for tauingen blir det ikke bare benyttet værmeldinger. Det blir også hentet inn store mengder med data for å utarbeide statistikker. Statistikkene inneholder data om bølgeførhold, strømninger, perioder på bølger, temperatur og vind. Dette blir gjort for å finne ut om når en med størst sannsynlighet vil kunne få værforhold som tillater operasjonene som en vil ha utført. Da henter en inn statistikk for det aktuelle området og finner ut når en med størst sannsynlighet kan forvente å få et værvindu som kan tilfredsstillende kravene en har for bølgehøyde.

Hs < 2 m



Figur 19: Gjennomsnittstiden for utførelse av operasjon

Figur 19 viser gjennomsnittstiden for en operasjon på henholdsvis 12, 24, og 48 timer med et krav om H_s 2m eller mindre. Dataene som en leser i figuren tar også med seg ventetiden for å få godt nok værvindu. Fra figuren kan en da se at det vil være gode forhold for en nedsetting av bunnrammen i perioden mai til og med august. Bølgehøyden har stor sammenheng med vindstyrken. En kan derfor anta at det er i sommerperioden med gode bølgeførholdene en vil ha minst vind. Det vil derfor være mest naturlig å planlegge for utførelse av uttauing og nedsetting i denne perioden. [ref. 13]

Strømningene som opptrer i Snorreområdet varierer i liten grad i forhold til vanndybden. Dette kan ha sin årsak i topografien som er i området. Området rundt Snorre er forholdsvis flatt. Operasjonsverdiene oppgitt fra Statoil viser at det sjelden er en strømning på mer enn 0,4 m/s ved havoverflaten og 0,25 m/s 3m over havbunnen. Størrelsen varierer med strømretningen. Normalt er strømmen kraftigst når den setter i østlig og nordøstlig retning.

Et viktig punkt i planleggingen er å planlegge ruten for taueoperasjonen. Her er det mange hensyn å ta, samt at det kan være et potensial i å gjøre tauingen mer robust i forhold til miljøkreftene. Forhold som kan gjøre tauingen mer robust er kartlegging av ruten slik at taueoperasjonen kan avbrytes i påvente på et nytt værvindu hvis uvær vil opptre under tauing. Alternativene kan være å legge ruten fra byggeplass og langs kysten for å få minst mulig tauing i åpent hav. Med å gjøre det på den måten har en mulighet til å søke inn i fjorder om dårlig vær skulle inntre. Det kan også planlegges i forhold til muligheten med å mellomlagre bunnrammen langs taueruten. Ved dette alternativet må bunnforholdene kartlegges langs ruten i forhold til nedsetting. Problemstilling med dette

alternativet er å hente bunnrammen opp fra bunnen igjen. Bunnrammen kan suge seg fast i bunnen slik at det blir en vanskelig og tidkrevende prosess å starte selve taueoperasjonen igjen. En kan risikere at fartøyet som er tiltenkt taueoppdraget ikke er kraftig nok til å hente opp bunnrammen.

Foruten selve bunnforholdene er det viktig å få en oversikt om hva som ligger på bunnen og dybdeforhold for hele ruten. Dette er forhold som er viktige hvis uhell skulle inntreffe og en mister lasten. Det er mange hydrokarbonførende rørledninger som ligger på havbunnen. Ved et uhell hvor en mister lasten kan dette få store miljøkonsekvenser. Det er derfor viktig at dette blir tatt hensyn til under planleggingen av ruten for tauingen.

Et av de viktigste forholdene en må planlegge rundt er tidsaspektet for operasjonene. Ved planlegging av tidsbehov deler en operasjonen inn i de enkelte elementene som hele operasjonen består av. Dette gjøres for å få et bilde av hvilke operasjoner som er tidkrevende og hvor det kan være mulig å ha litt slakk i forhold til de andre operasjonene som skal utføres. Ved denne planleggingen kartlegger en tidsforbruk samt hvilke restriksjoner det er ved den enkelte oppgaven som skal utføres. Det er vanlig å dele selve transportetappen inn i mindre deler. Dette er et ledd i finne ut hvor sårbar operasjonen er. Ved uttauing kan en da finne punktene hvor en eventuelt har kartlagt en mellomagringsplass, eller det punktet hvor det tar lenger tid til å søke smulere farvann kontra det å fullføre taueoperasjonen. Hvis taueoperasjonen er fullført og det blir venting på bedre vær ute på feltet, må det tas med i planleggingen at utstyrer tåler den ekstra tidsbelastningen som ventingen resulterer. Det kan i verste fall komme et utfall der det blir besluttet å taue bunnrammen til smulere farvann. Ved planlegging og design av taueutstyr må det derfor kalkuleres med en utmattingslevetid som er lang nok til disse ekstra operasjonene. Det er også viktig å få klarlagt hvor lang tid en vil bruke ute på feltet til forberedning av nedsenking og hvilke operasjoner som trengs å gjøres for å få en trygg nedsenking av bunnrammen. Når bunnrammen er overført til det løfteutstyret som skal senke bunnrammen ned til havbunnen, er det viktig å vite hvor lang tid som er nødvendig for å posisjonere og stabilisere lasten. Dette er bl.a. avhengig av hvilke strømninger det er i området. Er strømningene store og lasten liten, kan en få store avdrifter i forhold til posisjonen fartøyet står i. Dette er forhold som det må planlegges i forhold til.

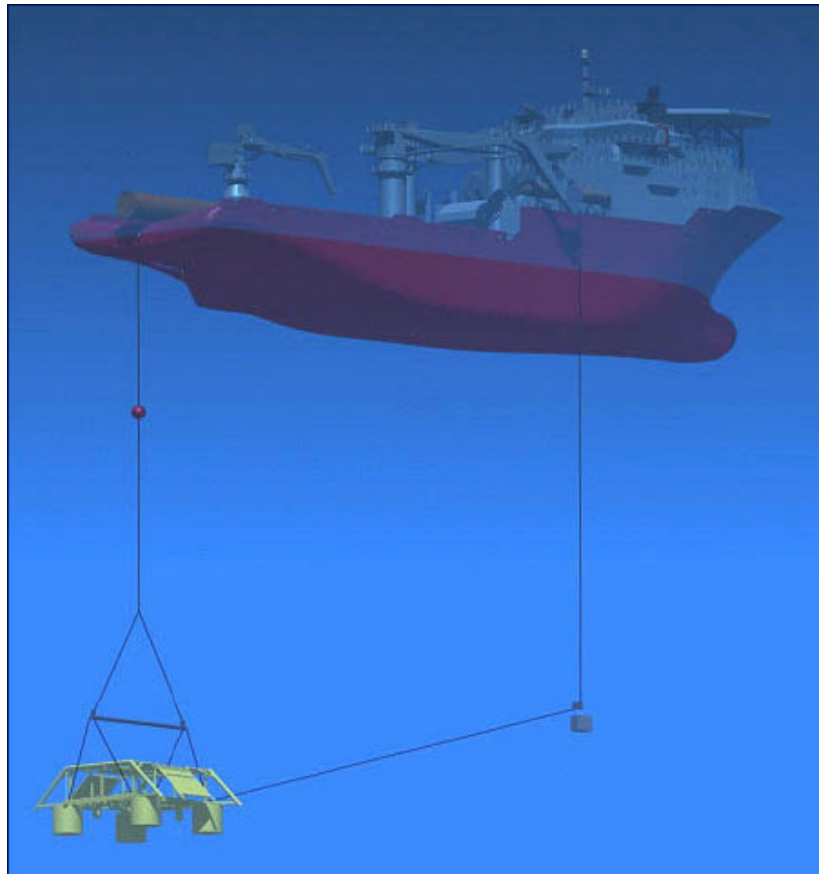
Totaltiden for hele operasjonen er viktig å få klarlagt. Grunnen til det er hvordan en planlegger operasjonen i forhold til DNV regelverket. Ved operasjoner hvor det er planlagt å bruke en totaltid mindre enn 72 timer, er det mindre krav til de statistiske data som blir brukt for å kartlegge når på året en kan planlegge å utføre operasjonen.

Overstiger operasjonen 72 timer kreves det mye mer bakrunsmateriale for å kunne bestemme når en skal utføre operasjonene. Grunnen til dette er usikkerheten som finnes i værmeldingen. Påliteligheten til værmeldingene blir mindre og mindre i forhold til hvor lang tid fram en melder været. Dette har sammenheng med de mange parametrene som må bestemmes for å kartlegge hvordan været kommer til å bli. Foreløpig eksiterer det ikke kraftige nok datamaskiner for å melde været pålitelig mer enn noen få dager. Det er derfor nødvendig med større krav til statistikken som omhandler bølger, vind og strømforhold. Det stilles også mer krav til utregninger av sannsynligheter om hva som kan opptre av miljøkrefter og hvor ofte de største miljøkreftene vil opptre.

5.1. PLASSERING AV BUNNRAMME

Ved beskrivelse av plassering av bunnrammen tar en utgangspunkt i at en har benyttet seg av pennmetoden for frakt av bunnrammen. Når en ankommer destinasjonsstedet blir bunnrammen overført fartøyet som skal senke lasten ned til havbunnen. Bunnrammen blir overført til en vinsj, og blyantbøyen blir fjernet. Det er nå viktig å få stabilisert fartøyet i forhold til de ytre miljøkreftene. En må ta hensyn til bølgeretning og strømretning for å få et riktig landingspunkt. Det vil bli brukt litt tid på å måle de bevegelsene som fartøyet har for å kunne utnytte det dynamiske posisjonssystemet og hivkompensatoren.

5.1.1. POSISJONERING

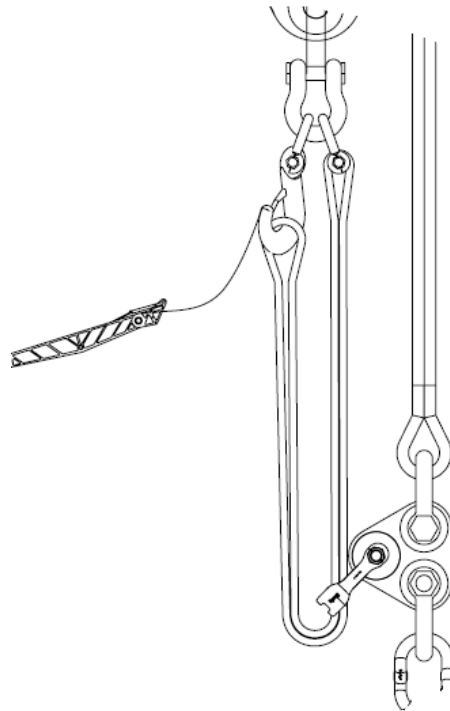


Figur 20: Posisjonering av bunnramme

Figur 20 fremstiller posisjoneringen av bunnrammen. Bunnrammen er overført til vinsjen som skal foreta nedsenkingen, og styrevekten er montert for å holde riktig posisjon på bunnrammen.

Ved posisjonering tar en hensyn til at en kan få avdrift ved nedsenkingen, ved plassering av fartøyet vil en ta høyde for dette. I dette området som blir omhandlet i oppgaven er det relativt små strømminger. Når riktig posisjon er funnet i forhold til hvor bunnrammen skal

bli plassert kan den videre nedsenkingen begynne. Det er i denne fasen det vil være naturlig å klargjøre for oppdriftslegemene. Det vil bli benyttet en ROV under hele nedsettingsopparasjonen. Denne vil bli benyttet til å feste oppdriftslegemene på bunnrammen. Oppdriftslegemene blir festet i hvert hjørne av rammen ved hjelp av ROV. Oppdriftslegemene er festet ved hjelp av ROVsjakkell og fibertau. Oppdriftslegemene er planlagt å flyte 50 m under havoverflaten. Dette blir gjort pga at det ikke er behov for å bruke hivkompensering før en er i landingsfasen. Oppdriftslegemene blir satt ut på havet etter at de er festet på bunnrammen, men vil ikke bli fullt neddykket før bunnrammen er ca 50 m over sjøbunnen. Når bunnrammen er ca 10 m over sjøbunnen vil en overføre lasten til den hivkompenserte kranen for å ta siste del av løftet. Det er her det er behov for hivkompensering for å få en så skånsom landing som mulig. Figur 21 viser et løfteverktøy som blir benyttet for å overføre lasten fra tauewire til den hivkompenserte kranen. Ved å vente til bunnrammen er nær bunn før en overfører kreftene til den hivkompenserte kranen, er en sikker på at oppdriftslegemene ikke blir påvirket av overflatebølgene. Når lasten er overført til den hivkompenserte kranen vil det bli sjekket at en er ved riktig posisjon og lasten henger stabilt før siste fase med landing på havbunnen blir utført.



Figur 21: Omkoblingsblokk fra en wire til en annen wire

Etter landing sjekkes det ved hjelp av ROV hvordan bunnrammen er landet. Bunnforholdene er nøye kartlagt og det kan eventuelt ha blitt preparert en landingsplass. Dette er viktig fordi det kreves et minimums mål på hvor stor gjennomtrenging av havbunnen bunnrammen må ha for å stå stabilt i fremtiden. Det er også et krav om hvor mye helning en kan ha på selve rammen før en må sette inn tiltak for å rette den opp, eller det kreves en dypere gjennomtrengning av havbunnen. Er det for store avvik på posisjon

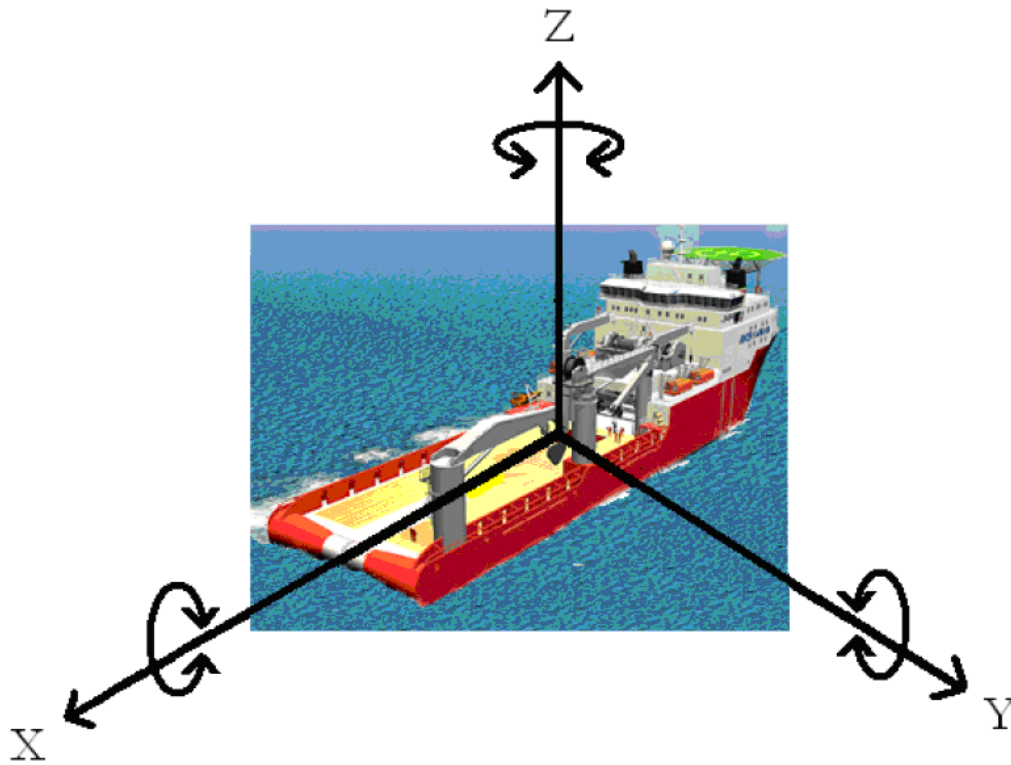
eller er den for skjev, kan det være aktuelt å måtte heve bunnrammen igjen. Er bunnrammen på riktig posisjon, men det er ikke nok gjennomtrengning eller den er for skjev, finnes det metoder for både å rette den opp og for å øke inntrengningen i havbunnen. Da går en inn i sugeankerne og spyles ut massene for deretter å pumpe bunnrammen lenger ned i havbunnen.

Etter landing og verifisering av landing starter arbeidet med å fjerne løfteutstyret. En vanlig metode for å fjerne løftewire på, er å kutte den nede ved bunnrammen og la sjakler henge igjen på bunnrammen. Dette gjøres for å spare operasjonstid for ROV. Festeutstyret som er igjen på bunnrammen kan eventuelt fjernes ved en senere anledning.

Etter at løfteutstyret er fjernet kan oppdriftslegemene fjernes. Dette blir det ventet med for å unngå skader på fartøyene. Når løftewire er fjernet fra bunnrammen kan fartøyet trekke seg unna. Fartøyet posisjoneres i forhold til strøm, bølger og vind for å unngå kollisjon med oppdriftslegemene når de når overflaten. Det er også en fare for at fibertauet kan vikle seg inn i propeller og gjøre skader. Oppdriftslegemene frigjøres ved hjelp av ROV som kutter fibertauet slik at oppdriftslegemet stiger opp til overflaten. Oppdriftslegemene er designet med festeanordninger på to sider for lettere å plukke dem opp igjen når de flyter i overflaten. Når fibertauet er kuttet, klarer ROV å løse ut sjaklene som oppdriftslegemene var festet i slik at en får med seg disse opp igjen.

5.1.2. KOMPENSERING

Det er viktig for nedsenking at en har så jevn vertikal bevegelse som mulig for både å ha en skånsom landing og for å treffe riktig posisjon. Det er derfor svært viktig at det hele tiden er kontroll på den vertikale bevegelsen til løftet samt at en har riktig posisjon. Fartøyet er utstyrt med forskjellig utstyr som skal kompensere for bevegelsene som blir påført fartøyet av miljøkreftene.



Figur 22: Frihetsgradene til et fartøy

Båten har seks frihetsgrader som det blir kompensert for enten ved hjelp av den hivkompenserte kranen eller ved hjelp av det dynamiske posisjoneringssystemet. Dette blir gjort for å redusere kreftene i løfteutstyr og på selve rammen.

De seks frihetsgradene det innføres tiltak for, er lineær bevegelse og rotasjon om de tre aksene vist på Figur 22. I fagfeltet har bevegelsene følgende betegnelser:

- Jaging er horisontal bevegelse langs x-aksen.
- Sidejaging er horisontal bevegelse langs y-aksen.
- Giring er horisontal rotasjon om z-aksen.
- Stamping er rotasjon om x-aksen.
- Rulling er rotasjon om y-aksen.
- Hiv er vertikal bevegelse langs z-aksen.

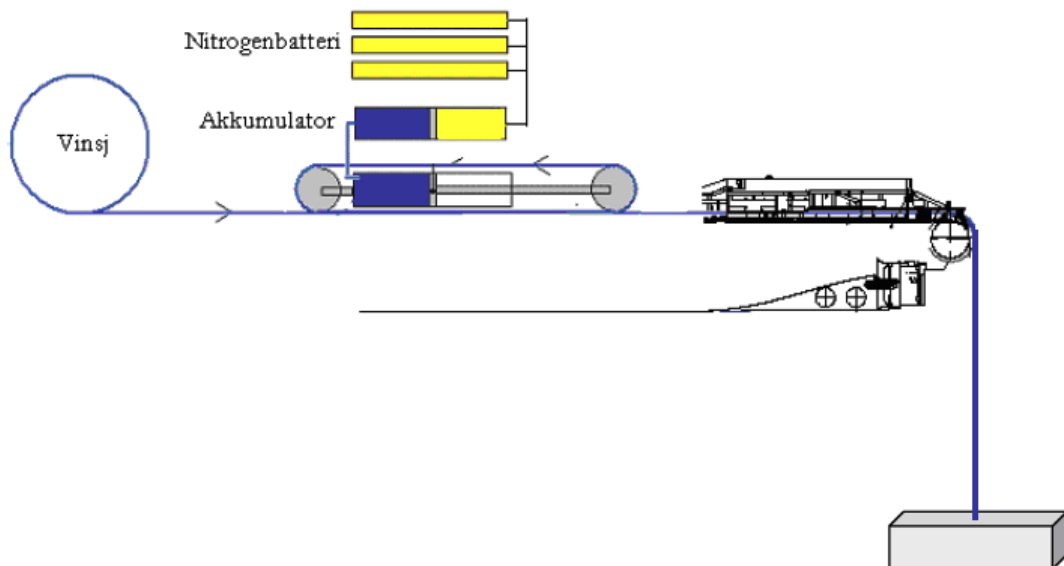
Det hivkompenserende systemet skal kompensere for stamping, rulling og hiv [ref.10]. Hivbevegelsen kan bli større enn selve båtens bevegelse. Dette har med plassering av kranen. Henger kranen utover skipssiden, vil bevegelsene bli forsterket. For å redusere bevegelsene på det en ønsker å løfte, virker det hivkompenserende systemet i motfase med bevegelsene som bølgene påfører skipet. Systemet blir brukt for å få en kontrollert landing og løftefase. Det er viktig å få en mest mulig konstant løftingshastighet på løftet. Dette er viktig for å unngå rykk og støt som kan føre til skader på både løftesystem og lasten.

Det er to forskjellige moduser for kompenseringen. Den ene modusen er kraftstyrt, den kalles konstant strekk. Det betyr at en vil ha minst mulig variasjon av last i wire uavhengig av hvor stor bevegelsen er. Dette er for eksempel viktig hvis lasten står på havbunnen og en ønsker å løfte den.

Den andre modusen er posisjonsstyrt modus, hvor det er ønskelig å kontrollere posisjon og landingshastighet. Man kan da tillate variasjoner i lasten som opptrer i wire. Det er viktigere i dette tilfellet med en skånsom landing i riktig posisjon, enn om det er lastvariasjoner i løfteutstyret.

Ved oppbygging av det hivkompenserende systemet er det to forskjellige løsninger som kan bli benyttet. Det kan enten bli bygget som et passivt system eller det kan bli bygget som et aktivt system.

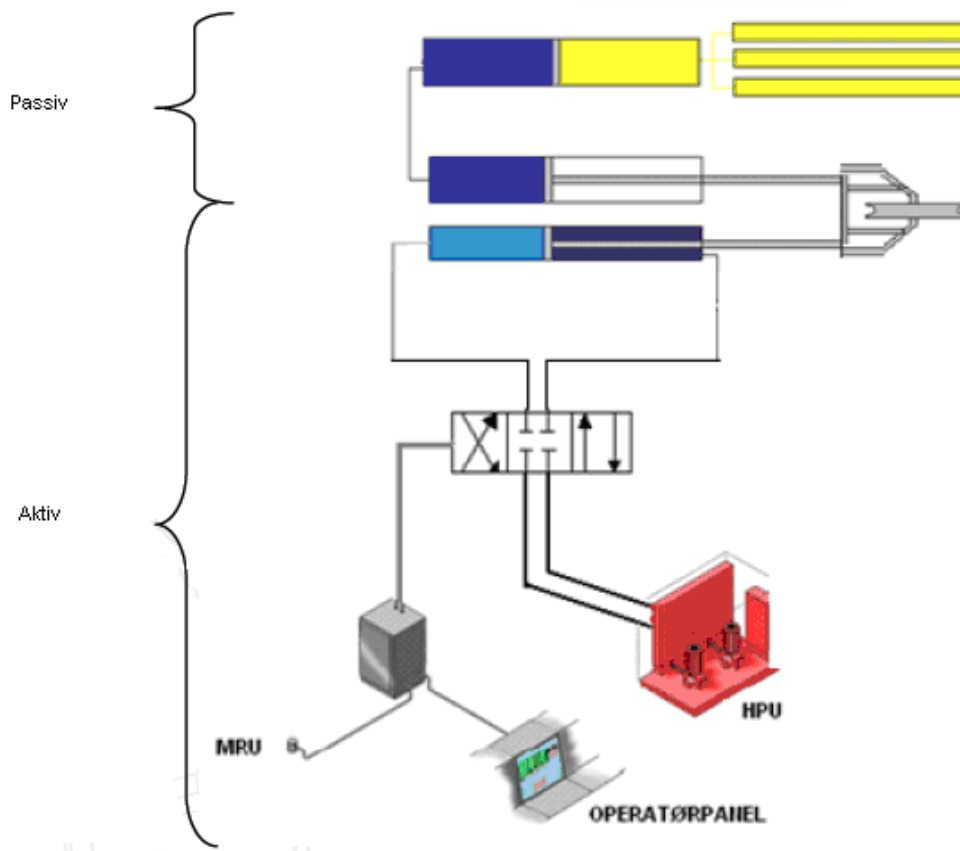
Det passive systemet kan en beskrive som en fjær uten eksternt styringssystem og energitilførsel.



Figur 23: Oppbyggingen til det passive hivsystemet

Figur 23 viser hvordan sylinderen går inn og ut i forhold til bevegelsen til lasten. Systemkreftene avhenger av lastens masse og forflytning av vann i tilknytning til lasten. Når nitrogenet komprimeres går vaieren ut, når nitrogenet utvider seg tas vaieren inn.

Det aktive systemet kan fjerne opptil 95 % av hivbevegelsene [ref.16]. Dette systemet har reguleringssystemer med sensorer, tilbakeføringsløyper og korreksjonspådrag. Dette er et dyrere og mer komplisert system enn det passive systemet.



Figur 24: Oppbyggingen til det aktive systemet

Det aktive systemet, Figur 24, bruker eksterne krefter for å kompensere i forhold til bølgekraftene. Pådraget blir styrt ved å måle bevegelsene (MRU) til fartøyet. Bevegelsene blir behandlet av en datamaskin for å styre kompenseringen. Datamaskinen styrer ventilen slik at kraften fra hydraulikken kommer i riktig tid

Fordeler og ulemper med aktiv kontra passiv hivkompensering.

Aktiv kompensering

- Gir svært nøyaktig kompensering.
- Mindre avhengig av lastens geometri
- Energikrevende
- Avansert styringssystem.

Passiv kompensering

- Større vertikale bevegelser på lasten.
- Nøyaktighet i kompensering svært avhengig av lastens geometri.
- Gir i de fleste tilfellene god nok kompensering.
- Enkelt system → få ting som kan gå galt.
- Påvirkes ikke ved en black out

Det dynamiske posisjoneringssystemet skal motvirke jaging, sidejaging, og giring. Dette er horisontale bevegelser som DP systemet skal motvirke. De ytre kreftene som påvirker posisjonen til fartøyet er vind, strøm og bølger. Hvor mye vinden påvirker fartøyet avhenger av retningen vinden kommer fra og hvordan fartøyet er utformet fra vannlinjen og oppover. Vinden skifter ofte i retning og styrke. Strømningen som påvirker fartøyet er forholdsvis konstant i retning og styrke, den forandres som regel av tidevann og stormsenter. Bølgene som påvirker fartøyet slik at posisjonen endres, er bygget opp av vinden. Det tar lang tid før bølgene bygger seg opp i størrelse, det tar også lang tid før sjøen legger seg igjen.

DP systemet bruker propeller og ror for å motvirke miljøkreftene slik at posisjonen til fartøyet holder seg stabil. Det blir brukt flere typer propeller. Propelltype varierer etter hvor på fartøyet propellen er plassert. Propelltypen varierer også i forhold til hvilken type fartøy som benytter seg av DP systemet.

DP systemet består av sensorer som registrerer den reelle posisjon i forhold til et gitt referansepunkt som fartøyet skal ha. De innhentede data blir behandlet ved hjelp av datamaskin for å korrigere posisjonen. Datasystemet beregner hvor stor kraft som må til for å oppnå riktig posisjon, samt hvor kraften skal settes inn.

Det finnes tre forskjellige grader av DP system. Hvilken grad som det er behov for er angitt i NORSOK standarden for marine operasjoner. En grov inndeling vil være

- Grad 1: Tap av posisjon utgjør små materielle skader og små forurensninger.
- Grad 2: Tap av posisjon kan utgjøre skader på personell, materiell, og forårsake forurensning med store økonomiske konsekvenser.
- Grad 3: Tap av posisjon kan utgjøre tap av menneskeliv. Store materielle skader og forurensninger, som kan gi alvorlige økonomiske konsekvenser.

Forskjellen mellom gradene av DP system er hvor robuste de er i forhold til feil. DP klasse 1 har kun et redudantsystem, et dobbelt sett sensorer som måler posisjon og vind. DP klasse 2 har tre sensorer for posisjonsmåling, en enkel komponentsvikt skal ikke føre til avdrift. DP klasse 3 skal oppfylle alle kravene som stilles til DP klasse 2, samt at det skal tåle en avdelingssvikt. Dvs hvis et maskinrom faller ut skal ikke det føre til avdrift.

6. KONKLUSJON

Oljeselskapene utvider hele tiden områdene hvor de ønsker å utvinne hydrokarboner. Det betyr at det blir utforsket områder som tidligere ikke var tilgjengelig for utvinning av hydrokarboner, pga dybde, størrelse på felt osv. Det er derfor blitt bygget opp en teknologi som baserer seg mer på bruk av strukturer som blir plassert på havbunnen. Disse strukturene ønsker en å bruke istedenfor å bygge plattformer. Dette blir gjort for å få mindre felt til å bli lønnsomme utbygginger. Det er derfor sannsynlig at det blir en økning i antall bunnrammer som skal bli plassert ut på nye små felt og på eksisterende felt for å øke utvinningsraten.

Utviklingen av teknologien innbefatter at det blir foretatt prosessering av brønnstrømmen på havbunnen. Dette fører ikke bare til at det blir et økt antall bunnrammer som skal installeres, men vekt og størrelse vil trolig øke på bunnrammene. Dette fører til knapphet på fartøyer som kan utføre installasjon av bunnrammer som veier mer enn 225 tonn [stat]

Denne hovedoppgaven handler derfor om muligheten til å bruke oppdriftslegemer for å senke den statiske vekten på konstruksjonen. Dette for å gjøre det mulig å benytte seg av mindre fartøy til installering av bunnrammer. Tilgjengeligheten på fartøy som kan løfte opp til 225 er bedre samtidig som de er billigere å leie.

Ved arbeidet med oppgaven kom det fram argumenter mot oppdriftslegemer som måtte behandles nærmere for kunne avgjøre om dette er alternativ til de tradisjonelle metodene. Et argument er at oppdriftslegemene vil føre til et stort ekstra bidrag av tilleggsmasse. Et annet argument var sikkerheten til fartøyene som skulle utføre installasjonen av bunnrammen. Det er en frykt for at oppdriftslegemet skal komme til overflaten med stor hastighet ved frakoblingen av oppdriftslegemet. I oppgaven er det derfor sett nærmere på disse to problemstillingene.

Oppdriftslegemene vil føre til økt tilleggsmasse når de forårsaker akselrasjoner på vannpartikler. Dette vil inntre når oppdriftselementet er i skvalpesonen og bryter vannoverflaten. Det vil også bli akselrasjoner ved start og stopp i løftet samt ved endret strømningshastigheter ned mot havbunnen. Når oppdriftlegemene er i skvalpesonen, er fortsatt bunnrammen festet i løfteinnretningen som fraktet bunnrammen ut til feltet. Denne er normalt dimensjonert kraftigere enn det hivkompenserte løfteredskapet. Det er derfor ikke så kritisk med økt tilleggsmasse i den fasen som når lasten er overført til den hivkompenserte løfteinnretningen. I denne oppgaven skal bunnrammen plasseres på Tampenområdet. I Tampenområdet er det liten forskjell på strømningshastigheten ved vannoverflaten og ned til havbunnen. Ved konstant strømming vil det ikke oppstå økt tilleggsmasse. Dette betyr at strømmen i Tampen området ikke vil føre til store ekstra bidrag til tilleggsmasse. Ved start og stopp av det hivkompenserte løfteutstyret er det lave hastigheter, en kan derfor anta at akselrasjonen også er lav. For å gi en klar konklusjon på om en kan benytte oppdriftslegemer i forhold til det økte bidraget av tilleggsmasse, må en ha en helt konkret konstruksjon og fartøy som en analyserer i forhold til bevegelser og

hastigheter. Dette er ikke blitt gjort i denne oppgaven, men ved slike forhold som er i Tampenområdet ser det ut som om bruk av oppdriftslegemer er et egnet alternativ.

I problematikken rundt hastighet ved utløsning av oppdriftslegemer, er det gjort beregninger i oppgaven. Dragkraften i vannet gir en dempingseffekt. Dempingen fra vannet fører til at hastigheten på oppdriftselementet ved vannoverflaten er på 4,82 m/s. Dette er en relativ lav hastighet, men hvis oppdriftslegemet har en stor masse, kan det resultere i mye energi ved et sammenstøt med fartøy. Forslaget til utforming av oppdriftslegemet er slik at ved et sammenstøt skal det treffe med en stor flate. Dette for å redusere faren for skader på fartøy. Det er også en fare for at fibertauet kan vikle seg inn i propeller. Men ved å posisjonere seg i forhold til strømming og vindretning bør disse problemene unngås.

En kan derfor konkludere med at bruk av oppdriftselementer er et alternativ som det verdt å se nærmere på for anvendelse. Et annet alternativ for å redusere den statiske vekten på en neddykket konstruksjon kan være å fylle konstruksjonen med et lettere medium enn vann. Bunnrammene som blir benyttet i dag, har perforeringer som gjør at de blir vannfylt ved neddykking [ref. 6]. Konstruksjonene består av store volumer som er vannfylt, det kan derfor redusere den statiske vekten. Dette alternativet må utredes i forhold til hva egenvekten på fyllmassen blir ved de aktuelle dypene som bunnrammen skal settes på. Det må også utredes hva dette betyr for korrosjonsbestandigheten til konstruksjonen. Bunnrammer er ofte designet for å ha en levetid på mange år.

Et annet alternativ for å få bunnrammene lettere er å se på alternative materialer. I de siste årene har det blitt utviklet mange nye former for kompositter. Dette er materialer med en lavere egenvekt enn stål som i mange sammenhenger kan erstatte de tradisjonelle ståltypene. Det kan derfor være interessant å arbeide videre med dette alternativet for å kunne vurdere om dette er materialer som er anvendbare til utforming av bunnrammer.

REFERANSER

- [1] Brennen, C. E. (1982): A review of added mass and fluid inertial forces, Naval civil engineering Laboratory, California,USA
<http://authors.library.caltech.edu/233/01/BRE052.pdf>
- [2] Carl Stahl: Katalog nr 1, Hovedkatalog for industri, offshore, fiskeri og oppdrettsnæringen
<http://www.carlstahl.no/visKatalog.aspx>
- [3] Det Norske Veritas: Rules for planning and execution of marine operations, Part 1 chapter 2, Planning of operations,DNV 1996
- [4] Det Norske Veritas: Rules for planning and execution of marine operations, Part 2 chapter 5, Lifting, DNV 1996
- [5] Det Norske Veritas: Rules for planning and execution of marine operations, Part 2 chapter 6, Sub sea operations, DNV 1996
- [6] Personlig referanse: Fjæstad Ole, FMC Technologies
- [7] Fra forelesning: Marin teknologi og marine operasjoner MOM 210, UiS 2006
- [8] Fra forelesning: Undervannsteknologi MOM 230, UiS 2006
- [9] Haver Sverre og Langen Ivar (1991): Kompendium i Marin teknologi
- [10] Krantekniske forening (2006): Løfteoperasjoner under vann, Stavanger
- [11] Martinsen Lars Olav: Transportation of large subsea structures, hovedoppgave Ved UiS 2002
- [12] Statoil Dokument: Structure Installation analyses document no: C104-SS-YGSS-N-CE-0003
- [13] Statoil Dokument: Snorre Metocean Design Basis document no: PTT-NKG-RA 64-3
- [14] Statoil Nettveverksmøte marine operasjoner 08.11.2005
- [15] Professor Techet A.: Added mass formulation
<http://web.mit.edu/2.016/www/handouts/Added-Mass-Derivation.pdf>

[16] Teknisk ukeblad 14.11.2001
<http://www.tu.no/nyheter/samferdse/article6981.ece>

[17] Trelleborg, CRP Group Ltd., Produktkatalog

VEDLEGG

FORSTUDIERAPPORT

TIDSPLANN FOR HOVEDOPPGAVE

TEGNIINGER OPPDRIFTSELEMENT OG STÅLKJERNE

COSMOSWORKS ANALYSE AV STÅLKJERNE

FORSTUDIE AV HOVEDOPPGAVE

VÅTTAUNG AV BUNNRAMME

HOVEDOPPGAVE FOR KJELL KORNELIUSSEN

INNLEDNING

Hovedoppgaven omhandler å se på en bunnramme som skal fraktes fra kaianlegg og fram til et destinasjonspunkt offshore.

I denne oppgaven vil det spesielt bli sett på hvordan det kan gjøres ved å senke konstruksjonen ned i vannet for så å taue konstruksjonen til destinasjonspunktet.

Dette kan bli gjort på flere måter, fram til nå har det vært vanlig å benytte seg av to forskjellige metoder. Den ene metoden er å bruke en flytebøye, som har nok oppdrift til å kunne holde konstruksjonen på en bestemt vanddybde fram til bestemmelsesstedet.

Den andre metoden bruker kran/vinsj på som holder konstruksjonen flytende på siden av fraktesfartøyet, eller bak fraktesfartøyet. En tredje metode bruker kran/vinsj og et lukesystem midt i fartøyet hvor linen som konstruksjonen er festet i går gjennom.

FORMÅL

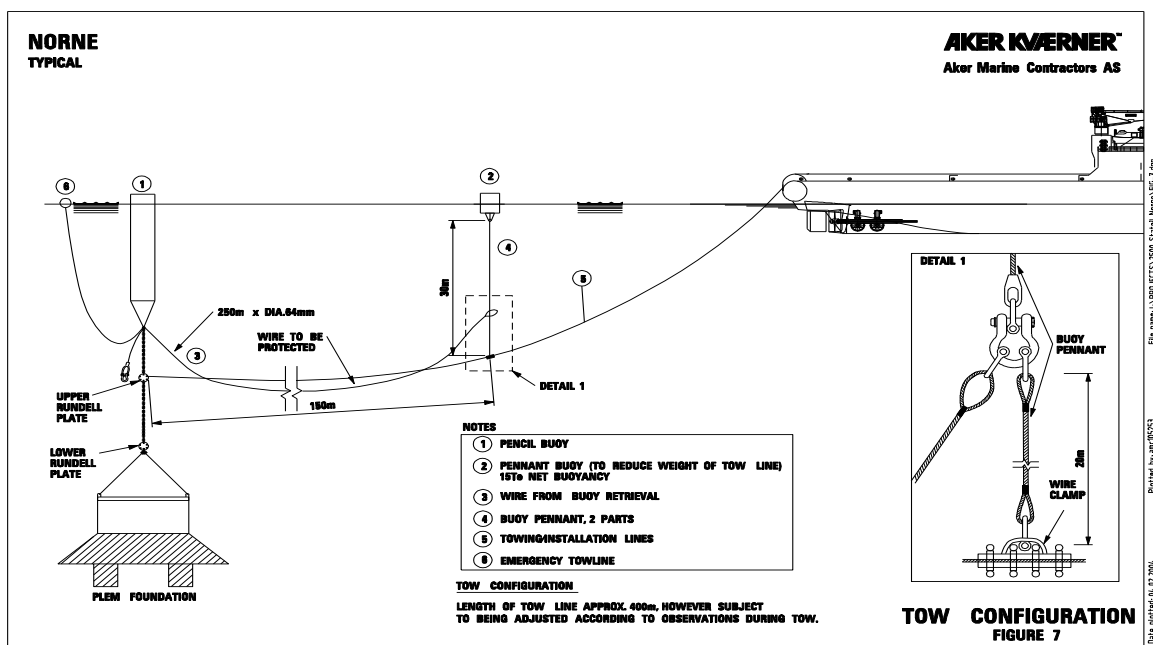
Formålet med oppgaven er å se på muligheten til å bruke oppdriftslegemer på en konstruksjon som har en tørr vekt på 300 tonn, slik at neddykket vekt på konstruksjonen blir 180 tonn. Det er ønske om å belyse denne problemstillingen pga tilgangen på fartøy som kan takle konstruksjoner med en vekt på mer enn ca 225 tonn.

Det er mange fartøy som kan behandle laster opp mot 225 tonn, men over dette nivået er det et stort sprang i størrelsen på fartøy som er tilgjengelig. Den neste størrelsen på fartøyer har kraner som takler laster på 7000 tonn. Dette er svært kostbare fartøyer og det er stort press i markedet på disse fartøyene.

METODENE FOR TAUING

Metode1

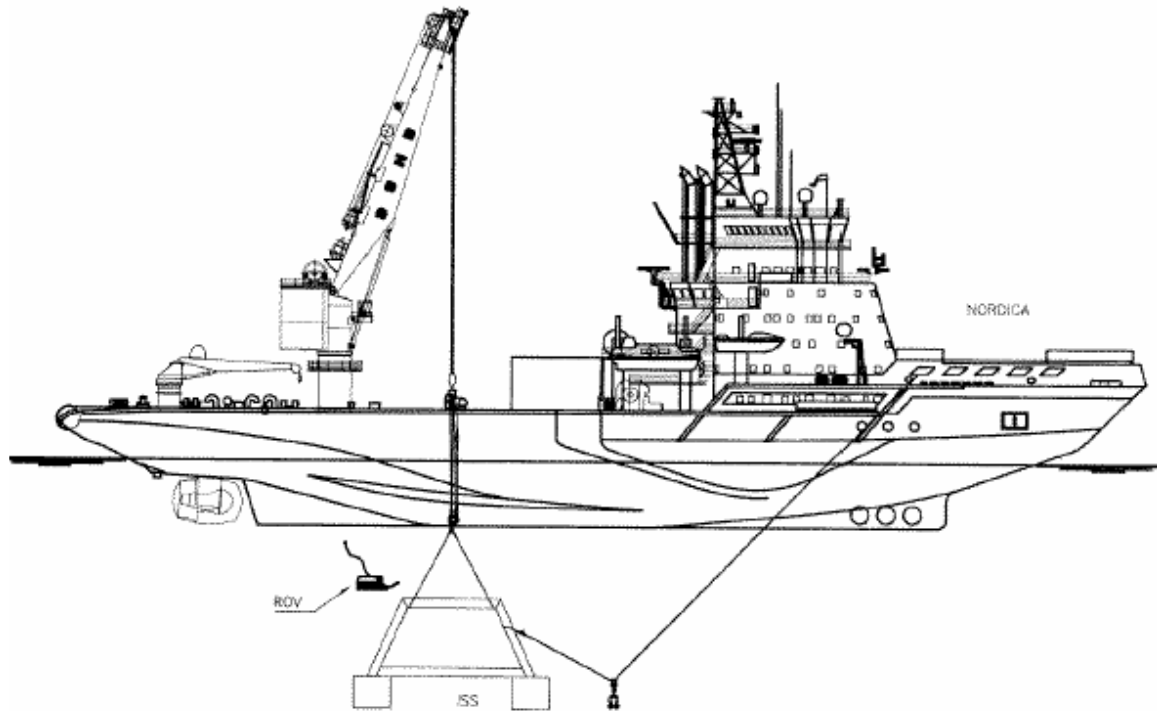
Det er den såkalte penn metoden, da blir det brukt en "flytebøye" som konstruksjon er festet i. Pennen har nok oppdrift til å holde konstruksjonen flytende på et bestemt dybdenivå. Pennen holder konstruksjonen flytende, mens en bruker et tauefartøy for å få framdrift på penn og konstruksjon.



Denne figuren viser prinsippet for penn metoden. Det som blir kalt pennen er nummerert som nummer 1. Bunnrammen henger under i et løftearrangement, en båt trekker med seg både bunnramme og pennen. Ved destinasjonspunktet blir konstruksjonen overført fra pennen og over på en kran som senker konstruksjonen ned på havbunnen.

Metode 2

Denne metoden bruker en kran eller vinsj til å frakte bunnrammen fram til destinasjonspunkt. Kran/vinsj blir brukt til å holde bunnrammen i riktig dybde. Kran/vinsj blir også brukt til å senke konstruksjonen ned på havbunnen. Her er det til nå ikke vært vanlig å bruke oppdriftslegemer for å avlaste vekt fra kran/vinsj.



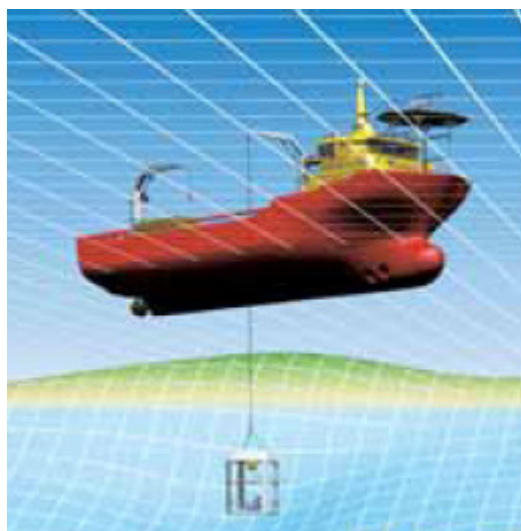
Figuren viser bruk av kran med konstruksjonen hengende på siden av båten.

Det er også vanlig å plassere en vinsj med en konstruksjon som går ut over hekken til båten. Det som avgjør hvilken metode en bruker av kran eller vinsj og plassering er tilgjengelighet på fartøy, størrelse/vekt på konstruksjon som skal fraktes, samt hvilke miljøkrefter der er forventet operasjonene kan bli utsatt for.

Metode 3

Dette er en metode hvor kran blir brukt for å holde konstruksjonen i riktig høyde og til nedsenking når fartøyet har kommet fram til destinasjonspunktet. Forskjellen mellom denne metoden og metode 2 er at her går kranlinen gjennom luker midt i båten.

Denne metoden blir brukt pga det er mindre bevegelse i dette området av båten sammenlignet med å ha kran på siden eller i hekken av båten.



Figuren viser et løft som blir foretatt gjennom båten.

PROBLEMSTILLINGER

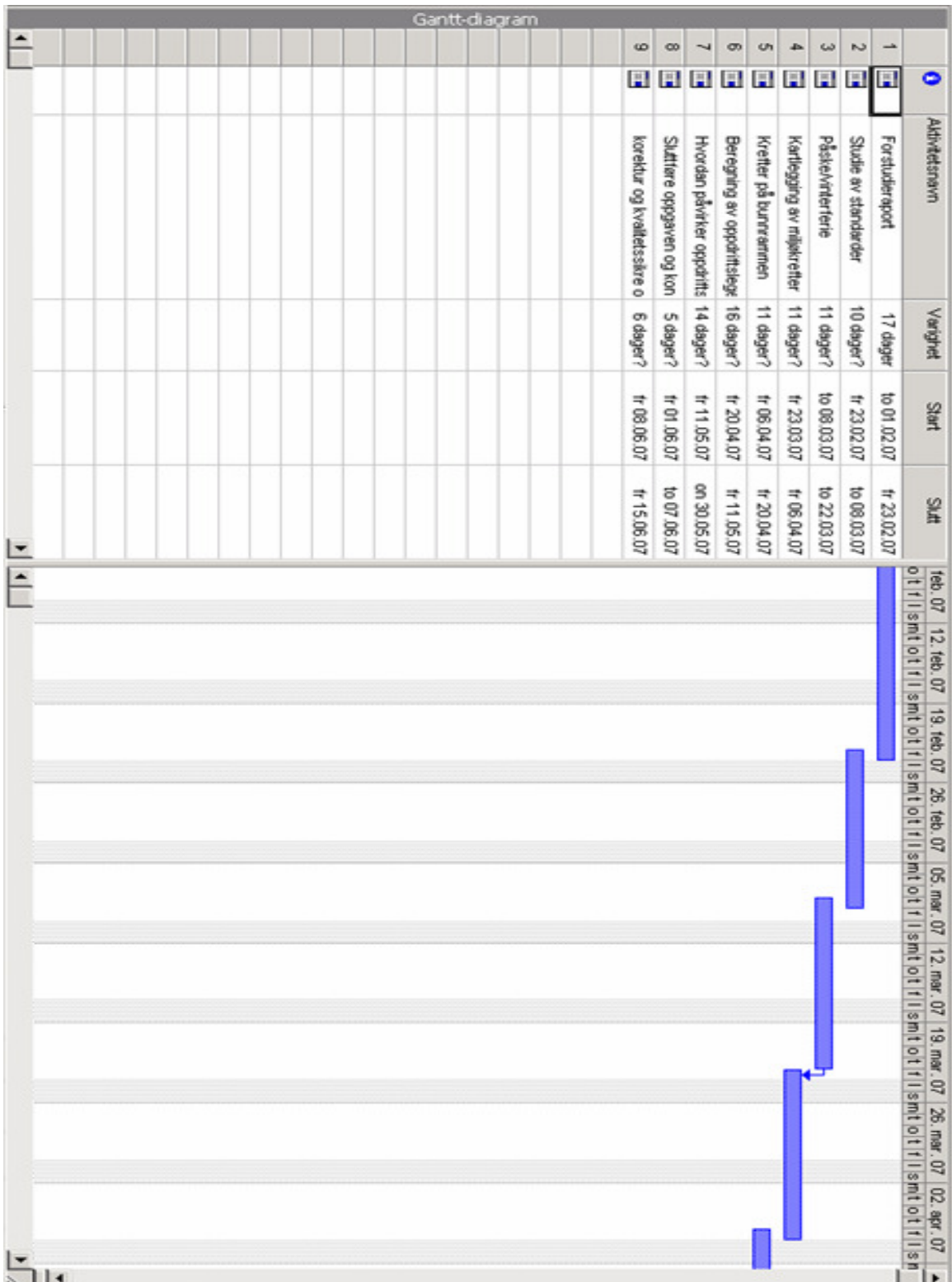
Problemstillingene som vil bli tatt opp i oppgaven er å se hva som vil påvirke de forskjellige operasjonene under tauingen.

Det er nødvendig for oppgaven å se på hvilke krefter som vil virke på løftearrangementet. For å kunne analysere disse kreftene vil i stor grad Det Norske Veritas (DNV) forskrifter bli brukt. I hovedsak vil det være forskriften for marine operasjoner.

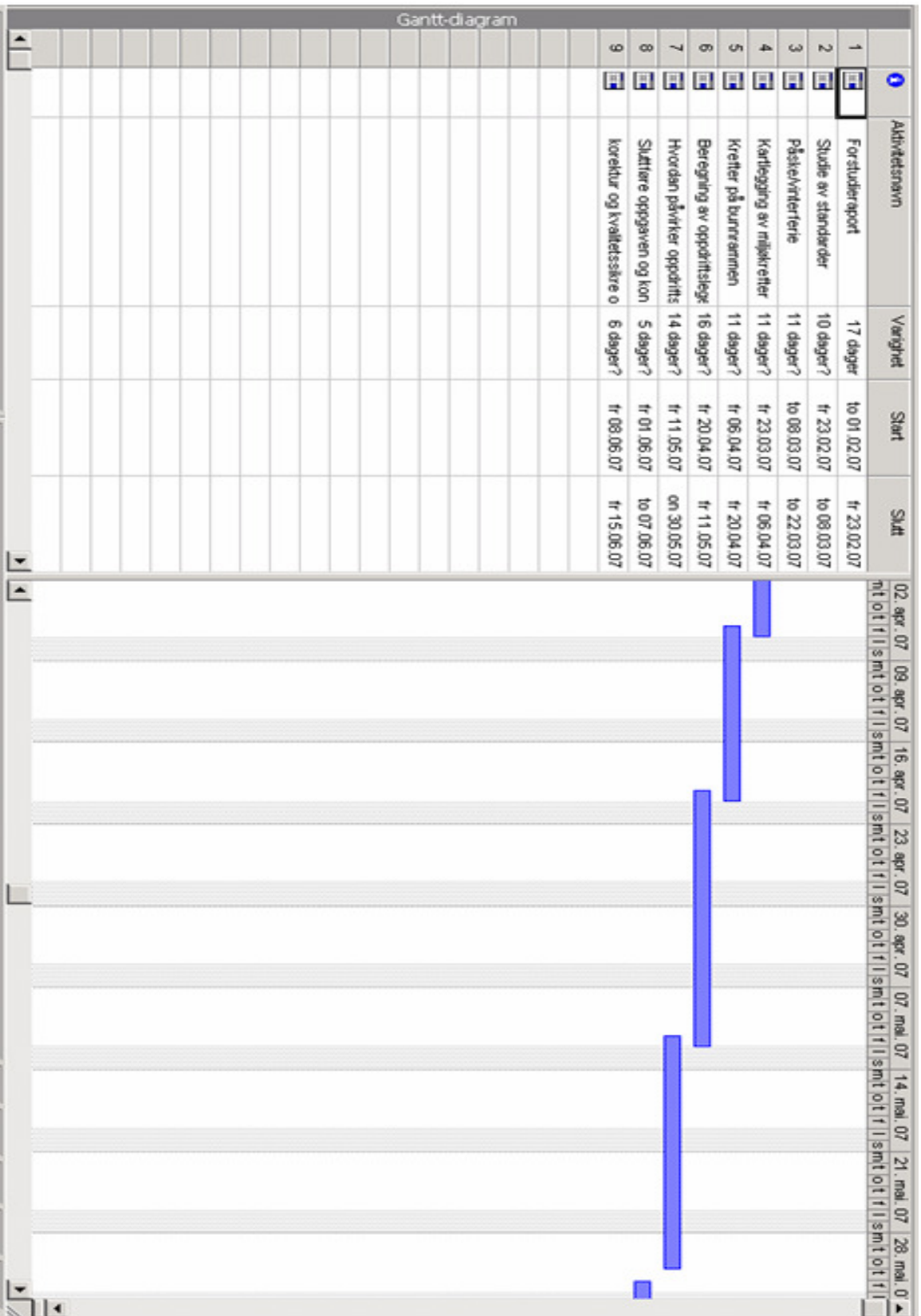
For å kunne beregne kreftene i løftearrangement og kreftene som virker på selve konstruksjonen er det viktig å vite hvilke miljøkrefter som en kan forvente seg under tauing og nedsenking. For å kunne gjøre dette vil en benytte DNV standard for å finne retningslinjer for hvordan dette bør gjøres. Det er viktig å få tilgang til historiske data om hvilke miljøkrefter en kan forvente seg under operasjonen, bølger, vind, strømninger osv.

Med de alternative fartøyene som er tilgjengelige i dag er det aktuelt å se på oppdriftslegemer. I denne oppgaven vil det bli sett på hvordan dette kan gjøres, og hvordan oppdriftslegeme påvirker operasjonene. I denne oppgaven vil det bli lagt størst vekt på metode 1. Da en allerede bruker oppdriftslegeme for å frakte konstruksjonen til destinasjonspunkt.

TIDSPLAN FOR HOVEDOPPGAVE

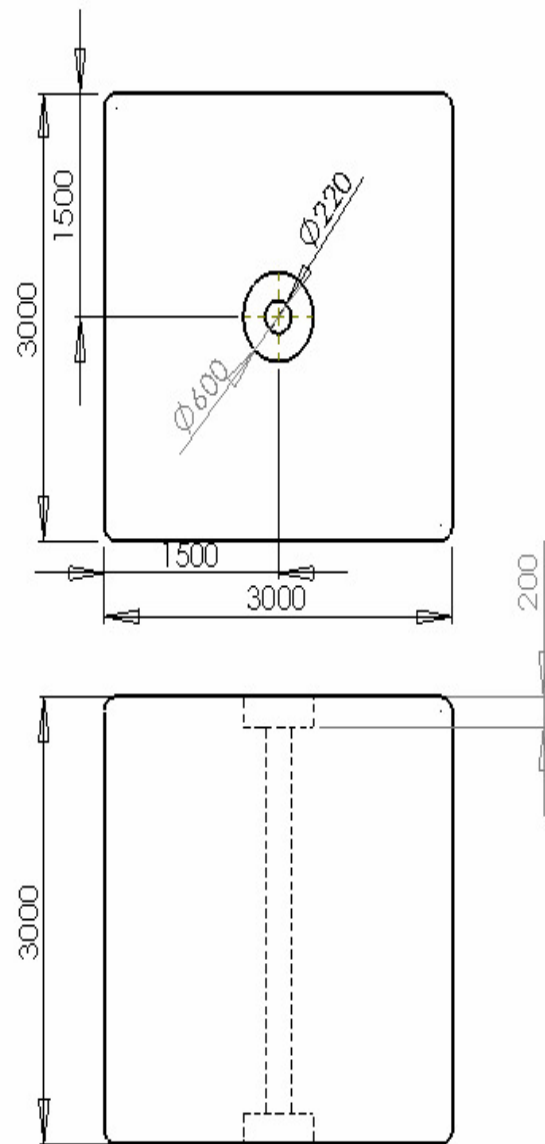


Gantt-diagram

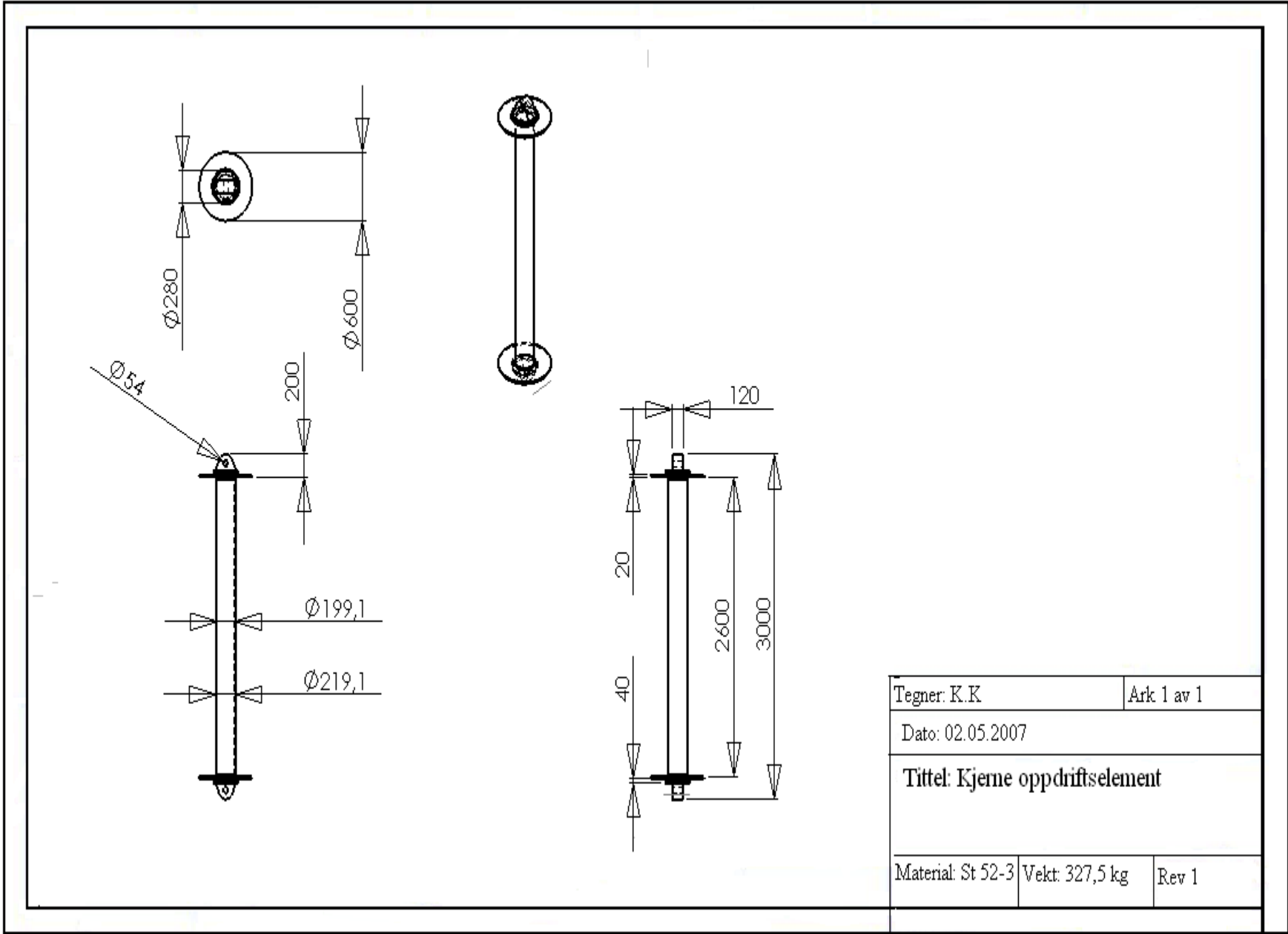


Gantt-diagram





| | | |
|--------------------------|----------------|-------|
| Tegner: K.K | Ark 1 av 1 | |
| Dato: 02.05.2007 | | |
| Tittel: Oppdriftselement | | |
| Material: St 52-3 | Vekt: 327,5 kg | Rev 1 |



| | | |
|---------------------------------|----------------|-------|
| Tegner: K.K | Ark 1 av 1 | |
| Dato: 02.05.2007 | | |
| Tittel: Kjerne oppdriftselement | | |
| Material: St 52-3 | Vekt: 327,5 kg | Rev 1 |

SPENNINGSANALYSE AV STÅLKJERNE

RAPPORT 1

- [1. Materials](#)
- [2. Load & Restraint Information](#)
- [3. Study Property](#)
- [4. Stress Results](#)

FEM analysen er gjort ved hjelp av programmet COSMOSWorks. Grunnen til analysen er å få en pekepinne om hvor tung og kraftig stålkjernen må være for det aktuelle oppdriftselementet. Analysen er veiledene, det er nødvendig med videre kontrollberginger for å verifisere resultatene av analysen.

1. Materials

| No. | Part Name | Material | Mass | Volume |
|-----|------------|----------|------------|--------------------------|
| 1 | Stålkjerne | St-52 | 327.539 kg | 0.0409424 m ³ |

I Norsk Stål sin Produktkatalog er det oppgitt at St-52-3 har en flytegrense på minimum 355 MPa og en bruddstyrke på 490-630 MPa.

2. Load & Restraint Information

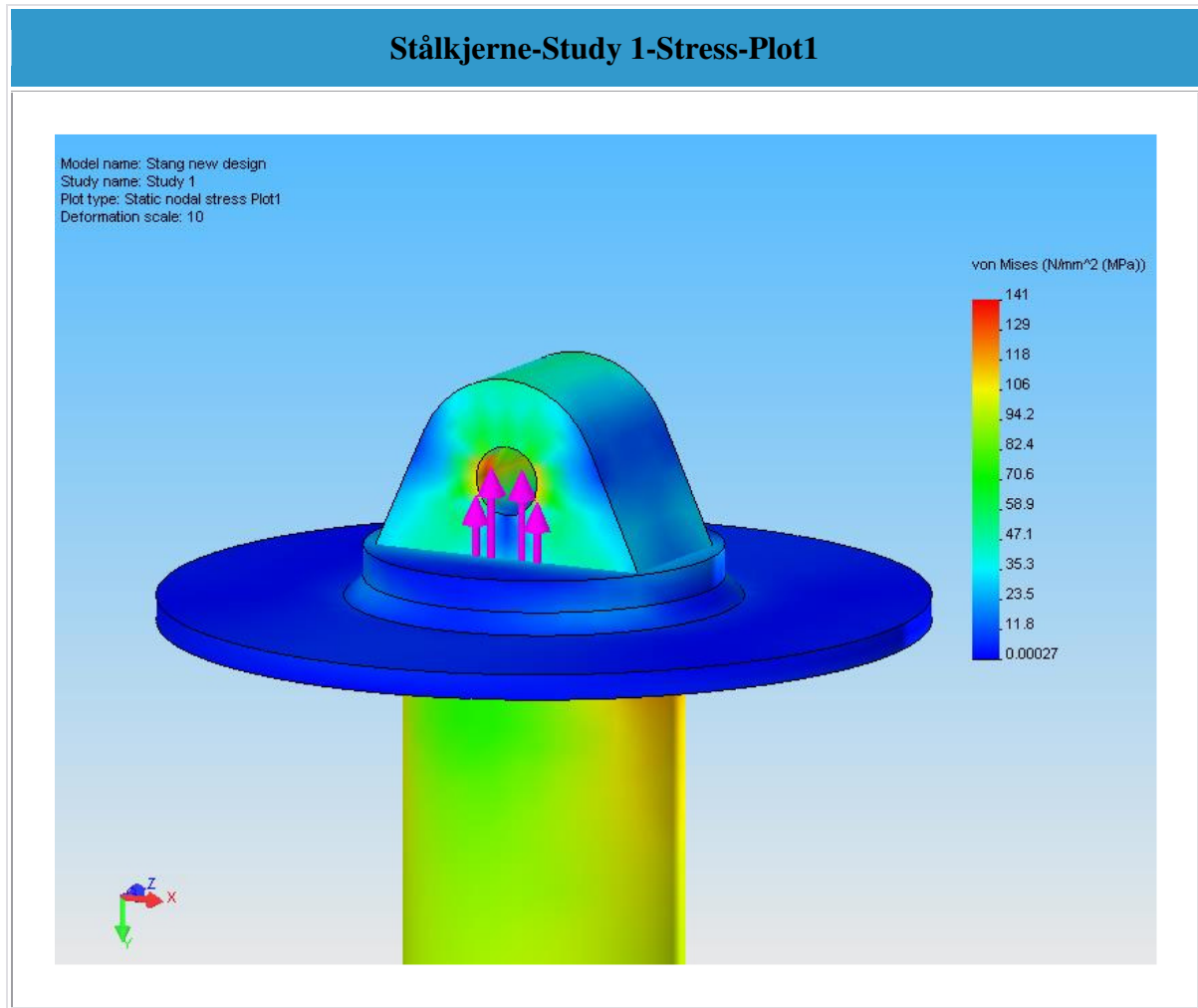
| Restraint | | |
|-------------------------------------|---|--------------------|
| Restraint-1 <Stålkjerne > | on 1 Face(s) fixed. | |
| Load | | |
| Force-1 <Stålkjerne > | on 1 Face(s) apply force 6.41e+005 N normal to reference plane with respect to selected reference Face< 1 > using uniform distribution | Sequential Loading |

3. Study Property

| Mesh Information | |
|-------------------------|------------|
| Mesh Type: | Solid mesh |
| Mesher Used: | Standard |
| Automatic Transition: | Off |
| Smooth Surface: | On |
| Jacobian Check: | 4 Points |
| Element Size: | 32.066 mm |
| Tolerance: | 1.6033 mm |
| Quality: | High |
| Number of elements: | 18497 |
| Number of nodes: | 34790 |

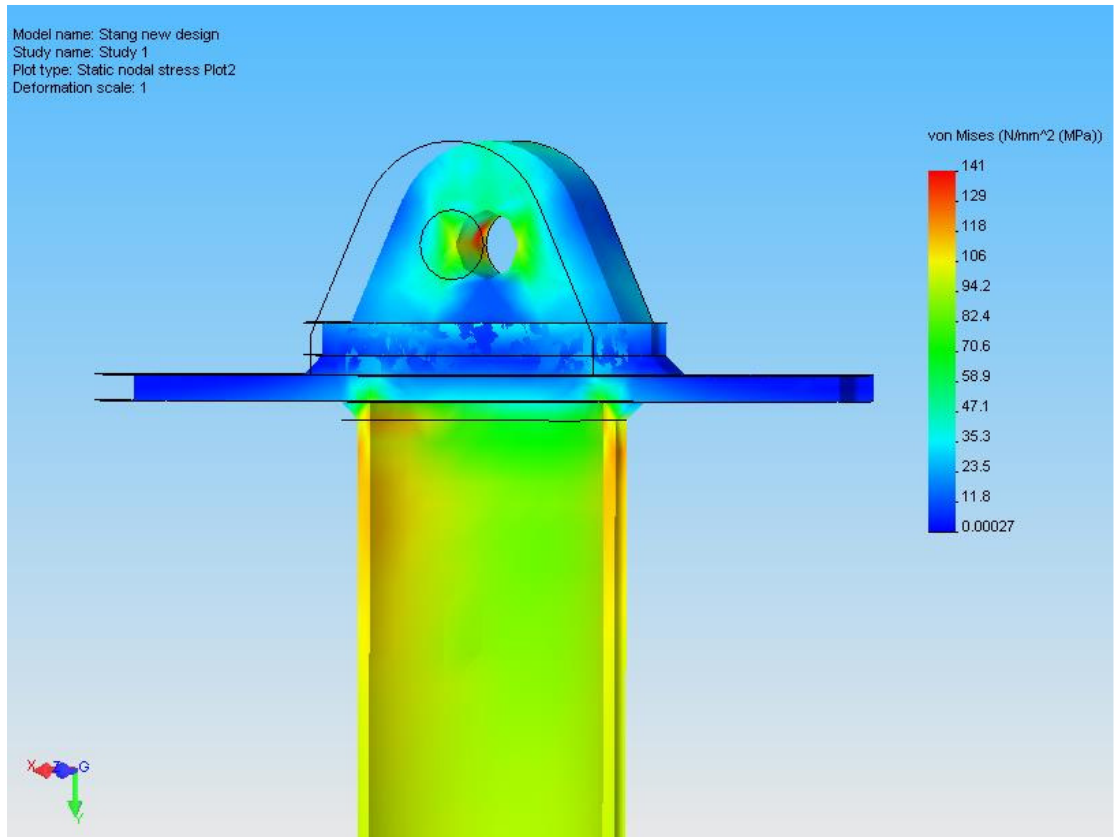
| Solver Information | |
|---------------------------|--|
| Quality: | High |
| Solver Type: | FFEPlus |
| Option: | Include Thermal Effects |
| Thermal Option: | Input Temperature |
| Thermal Option: | Reference Temperature at zero strain: 298 Kelvin |

4. Stress Results



| Name | Type | Min | Location | Max | Location |
|-------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|--|-------------------------------|
| Plot1 | VON: von Mises stress | 0.00027 N/mm ² (MPa) | (-16.9 mm, 0 mm, -438.8 mm) | 141.267 N/mm ² (MPa) Node: 32304 | (-225. mm, -2750 mm, -295 mm) |

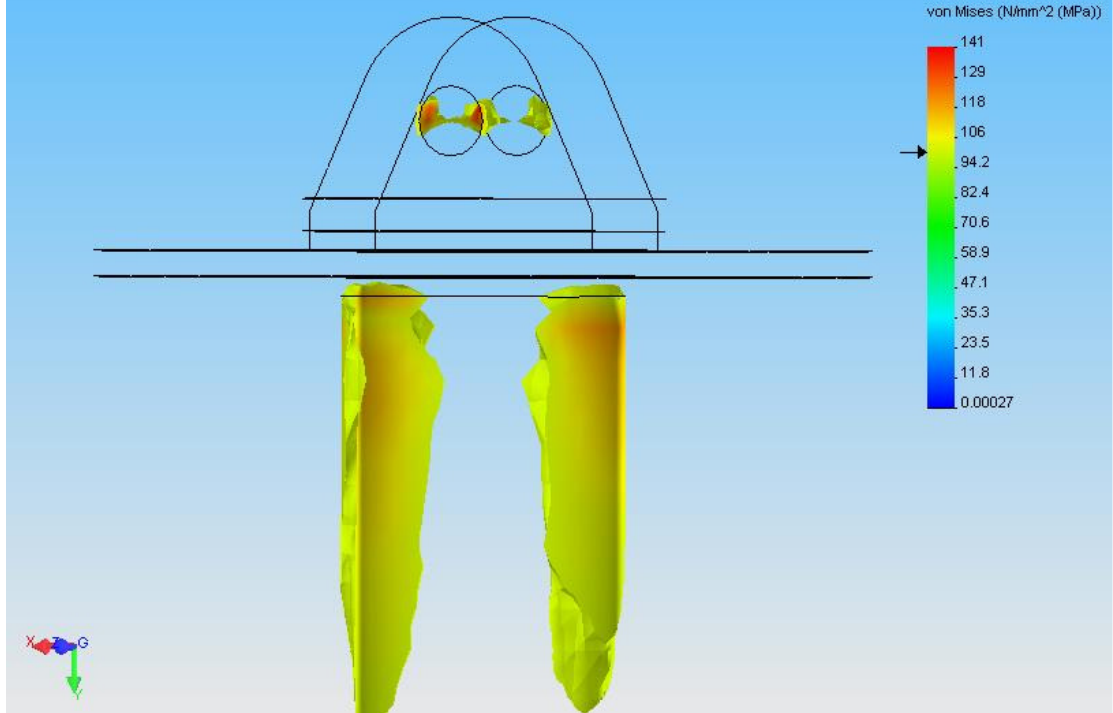
Stålkjerne-Study 1-Stress-Plot2



| Name | Type | Min | Location | Max | Location |
|-------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|--|-------------------------------|
| Plot2 | VON: von Mises stress | 0.00027 N/mm ² (MPa) | (-16.9 mm, 0 mm, -438.8 mm) | 141.267 N/mm ² (MPa) Node: 32304 | (-225. mm, -2750 mm, -295 mm) |

Stålkjerne-Study 1-Stress-Plot3

Model name: Stang new design
 Study name: Study 1
 Plot type: Static nodal stress Plot3
 Deformation scale: 1
 Element Volume = 6.07 %



| Name | Type | Min | Location | Max | Location |
|-------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|--|-------------------------------|
| Plot3 | VON: von Mises stress | 0.00027 N/mm ² (MPa) | (-16.9 mm, 0 mm, -438.8 mm) | 141.267 N/mm ² (MPa) Node: 32304 | (-225. mm, -2750 mm, -295 mm) |

SPENNINGSANALYSE AV STÅLKJERNE

RAPPORT 2

- [1. Materials](#)
- [2. Load & Restraint Information](#)
- [3. Study Property](#)
- [4. Stress Results](#)

FEM analysen er gjort ved hjelp av programmet COSMOSWorks. Grunnen til analysen er å få en pekepinne om hvor tung og kraftig stålkjernen må være for det aktuelle oppdriftselementet. Analysen er veiledene, det er nødvendig med videre kontrollberginger for å verifisere resultatene av analysen

1. Materials

| No. | Part Name | Material | Mass | Volume |
|-----|-----------|----------|------------|--------------------------|
| 1 | Stang | St-52 | 327.539 kg | 0.0409424 m ³ |

I Norsk Stål sin Produktkatalog er det oppgitt at St-52-3 har en flytegrense på minimum 355 MPa og en bruddstyrke på 490-630 MPa.

2. Load & Restraint Information

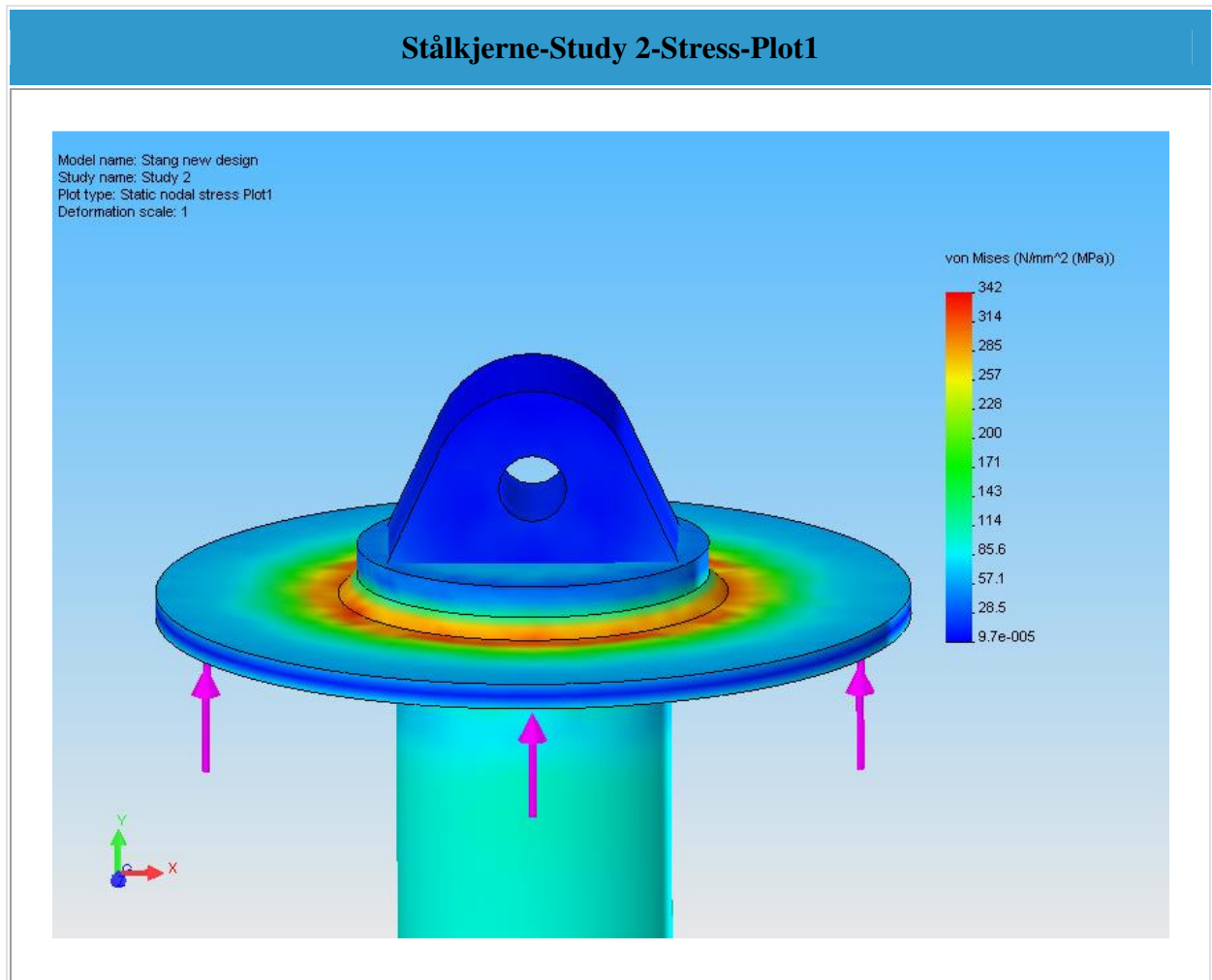
| Restraint | | |
|-------------------------------------|---|--------------------|
| Restraint-1 <Stålkjerne > | on 1 Face(s) fixed. | |
| Load | | |
| Force-1 <Stålkjerne > | on 1 Face(s) apply force 6.41e+005 N normal to reference plane with respect to selected reference Face< 1 > using uniform distribution | Sequential Loading |

3. Study Property

| Mesh Information | |
|-----------------------|------------|
| Mesh Type: | Solid mesh |
| Mesher Used: | Standard |
| Automatic Transition: | Off |
| Smooth Surface: | On |
| Jacobian Check: | 4 Points |
| Element Size: | 32.066 mm |
| Tolerance: | 1.6033 mm |
| Quality: | High |
| Number of elements: | 18816 |
| Number of nodes: | 35399 |

| Solver Information | |
|--------------------|--|
| Quality: | High |
| Solver Type: | FFEPlus |
| Option: | Include Thermal Effects |
| Thermal Option: | Input Temperature |
| Thermal Option: | Reference Temperature at zero strain: 298 Kelvin |

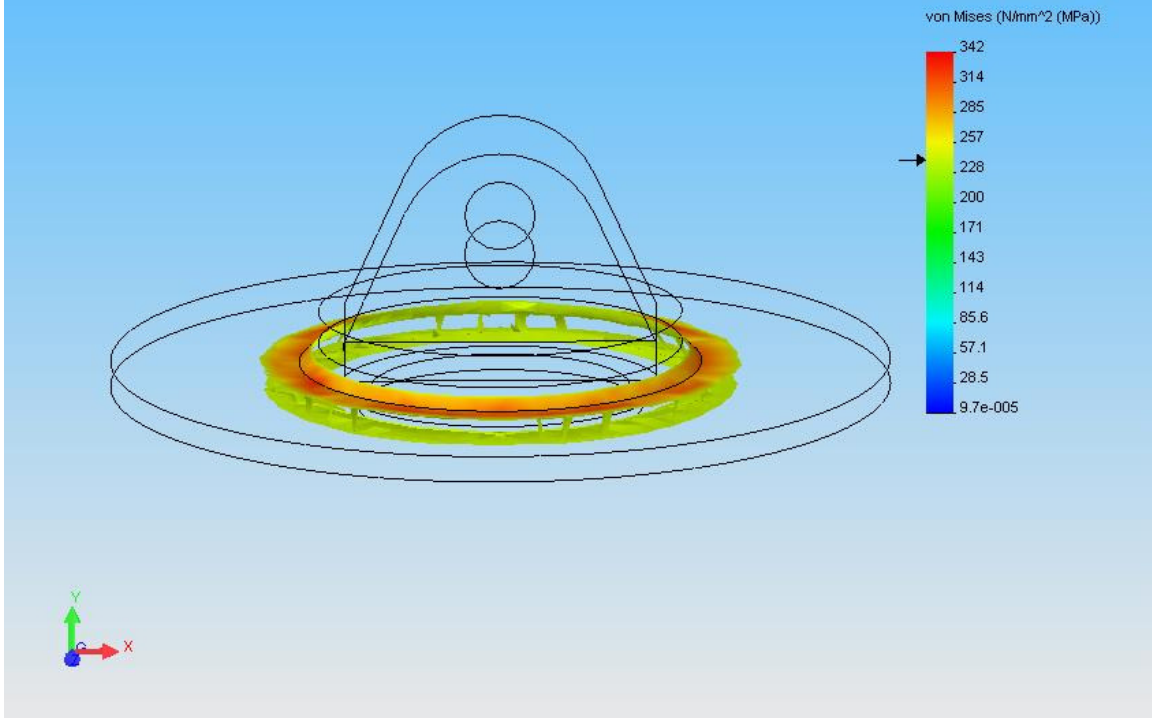
4. Stress Results



| Name | Type | Min | Location | Max | Location |
|-------|-----------------------------|---|--|---|--------------------------------------|
| Plot1 | VON: von Mises stress | 9.7e-005 N/mm ² (MPa) Node: 2023 | (-468.7 mm, -2680 mm, -165.8 mm) | 342.5 N/mm ² (MPa) Node: 31339 | (-122 mm, 20 mm, -353.9 mm) |

Stålkjerne-Study 2-Stress-Plot2

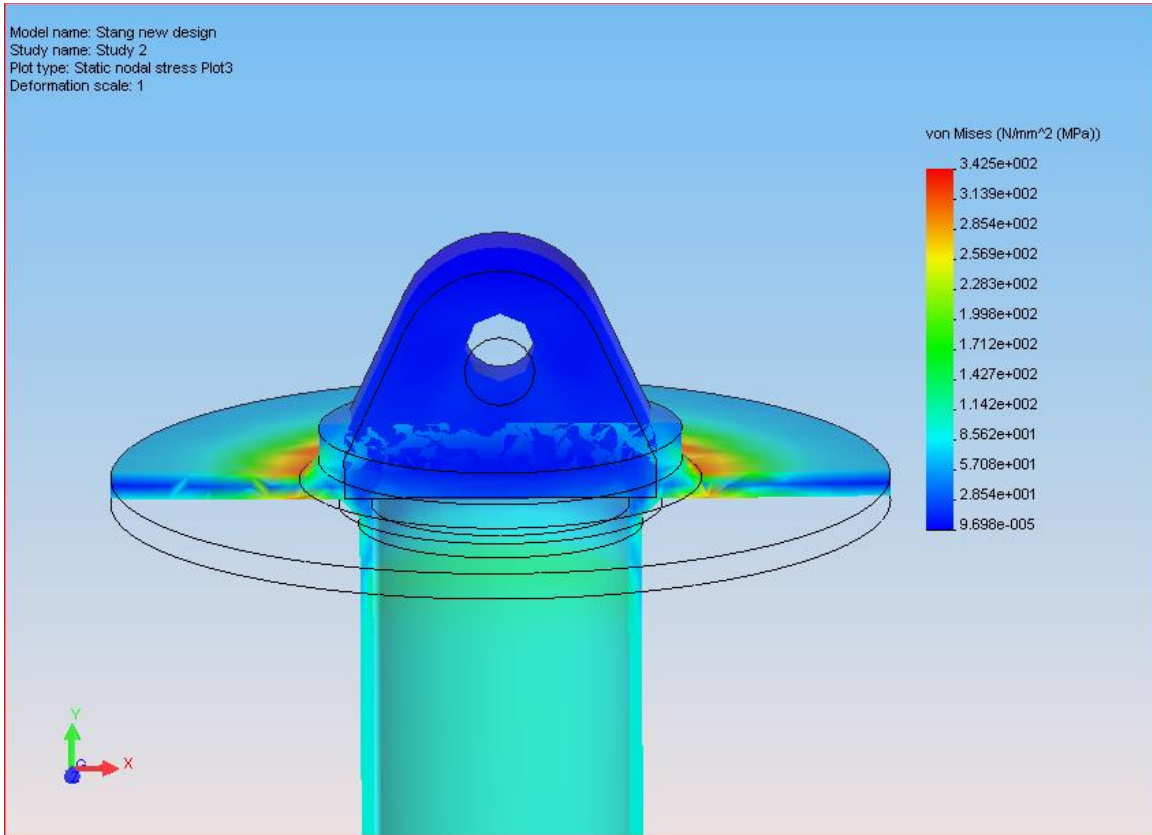
Model name: Stang new design
 Study name: Study 2
 Plot type: Static nodal stress Plot2
 Deformation scale: 1
 Element Volume = 2.94 %



| Name | Type | Min | Location | Max | Location |
|-------|-----------------------------|---|--|---|--------------------------------------|
| Plot2 | VON: von Mises stress | 9.7e-005 N/mm ² (MPa) Node: 2023 | (-468.7 mm, -2680 mm, -165.8 mm) | 342.5 N/mm ² (MPa) Node: 31339 | (-122 mm, 20 mm, -353.9 mm) |

Stålkjerne-Study 2-Stress-Plot3

Model name: Stang new design
 Study name: Study 2
 Plot type: Static nodal stress Plot3
 Deformation scale: 1



| Name | Type | Min | Location | Max | Location |
|-------|-----------------------------|---|--|---|--------------------------------------|
| Plot3 | VON: von Mises stress | 9.7e-005 N/mm ² (MPa) Node: 2023 | (-468.7 mm, -2680 mm, -165.8 mm) | 342.5 N/mm ² (MPa) Node: 31339 | (-122 mm, 20 mm, -353.9 mm) |