

Gard Moe Hatlø
Steinar Helvig

Ramme for montering og transport av US CRP thruster

Bacheloroppgave i ingeniørfag, maskin

Veileder: Lars Petter Bryne

Medveileder: Stian Slyngstad Korsan

Mai 2023

Gard Moe Hatlø
Steinar Helvig

Ramme for montering og transport av US CRP thruster

Bacheloroppgave i ingeniørfag, maskin
Veileder: Lars Petter Bryne
Medveileder: Stian Slyngstad Korsan
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for havromsoperasjoner og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Bacheloroppgaven involverer konseptutvikling, modellering og dimensjonering av en monterings- og transportsramme som skal brukes i sammenheng med overhaling og transport av Kongsberg Maritime sine US205 CRP thrustere. Rammen skal ha mulighet for å tilpasses transport og overhaling av andre US CRP-thrustere i porteføljen.

Konseptutviklingen gjennomføres i to deler. Første del innebærer konseptskisser og enkle 3D-modeller. Modellene presenteres under første konseptpresentasjon.

Konsept 1: Bygger på første skisse og består hovedsaklig av hulprofiler.

Konsept 2: Bygger på andre skisse og består av plategods.

Konsept 3: Bygger på tredje skisse og kombinerer plater og hulprofiler.

Konsept 4: Bygger på fjerde skisse og bygger rundt thrusteren med plater.

Del to bygger på konsept 3 fra konseptpresentasjonen. Dette konseptet fokuserer på bruk av få deler, lite sveise- og skjærearbeid og har en størrelse som passer thrusteren. Nye konsepter modelleres detaljert med forslag til hvordan thrusteren skal festes til rammen.

Konsept 3.1: Kombinerer plateelement og hulprofiler. Stropper som feste.

Konsept 3.2: Består hovedsaklig av plateelement. Strekkfisk som feste.

Konsept 3.3: Vekt optimaliserte plater og hulprofiler. Låsesylinder som feste.

Med bakgrunn i estimering av sveise- og materialpriser, konseptets design og robuste utforming, ble konsept 3.3 valgt som grunnlag for videre utvikling.

Overslagsberegninger benyttes etter endt konseptutvikling slik omtrentlige materialdimensjoner kan fastsettes før optimaliseringsberegninger. Optimaliseringsberegningene utføres i Siemens NX, i form av en FE-analyse. En forenklet modell av rammen belastes for mest kritisk lasttilfelle. Mellom analysene kartlegges svakheter i konstruksjonen og nødvendige materialdimensjoner justeres deretter. Styrkeberegningen avsluttes med en mer avansert analyse hvor spenninger og deformasjon kartlegges for seks lasttilfeller.

Etter fullførte styrkeberegninger, lages maskin- og sveisetegninger samt dokumentasjon for lastsikring, løfteoperasjoner og en styrkeberegningsrapport for intern bruk hos Kongsberg Maritime.

Abstract

The bachelor thesis involves concept development, modeling and dimensioning of an assembly and transport frame to be used in connection with the overhaul and transport of Kongsberg Maritime's US205 CRP thrusters. The frame must have the possibility of being adapted to the transport and overhaul of other US CRP thrusters in the portfolio.

The concept development is carried out in two parts. The first part involves sketches and simple 3D models. The models are presented during the first concept presentation.

- Concept 1: Builds on the first sketch and mainly consists of hollow profiles.
- Concept 2: Builds on another sketch and is built up from sheet metal.
- Concept 3: Builds on the third sketch and combines plates and hollow profiles.
- Concept 4: Builds on the fourth sketch and embracing the thruster with plates.

Part two builds on concept 3 from the concept presentation. This concept focuses on the use of few components, minimal welding and cutting work, and has a size that fits the thruster. New concepts are modeled in detail with suggestions for how the thruster should be locked to the frame.

- Concept 3.1: Combines plate element and beams. Jacking straps for locking.
- Concept 3.2: Mainly consists of plate element. Stretching fish for locking.
- Concept 3.3: Optimized plates and beams. Lock cylinder for locking.

Based on estimation of welding and material prices, the design, and its robust construction, concept 3.3 was chosen as the basis for further development.

Estimated calculations are used after concept development has been completed so that approximate dimensions can be determined before optimization calculations. The optimization calculations are carried out in Siemens NX, in the form of an FE analysis. A simplified model of the frame is loaded for the most critical load case. Between the analyses, weaknesses in the construction are mapped and the necessary dimensions are adjusted accordingly. The strength calculation ends with a more advanced analysis where stresses and deformation are mapped for six load cases.

After strength calculations have been completed, machine and welding drawings as well as documentation for load securing, lifting operations and a FE analysis report are created for internal use at Kongsberg Maritime.

Forord

Bacheloroppgaven utgjør siste del av maskiningeniørutdanningen ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Ålesund.

Oppgaven er skrevet av prosjektgruppe bestående av Gard Moe Hatlø og Steinar Helvig. Med bakgrunn i studentenes arbeidserfaringer fra Kongsberg Maritime Ulsteinvik og fordypning i maskinkonstruksjon, ble oppgaven valgt.

I samspill med Kongsberg Maritime og drøfting av deres behov, tar oppgaven for seg utvikling av en monterings- og transportsramme for thrusteren US205 CRP, med mulighet for tilpasning til andre US CRP-thrusterer i porteføljen.

Gjennom en fullstendig utviklingsprosess, fra konseptutvikling til ferdig styrkeberegnet og dimensjonert produkt, sitter vi igjen med god erfaring og et godt bilde på hvordan oppgaver i arbeidslivet kan være.

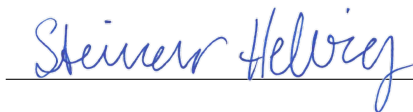
Stor takk til Kongsberg Maritime GCS Ulsteinvik som oppdragsgiver, og ikke minst veileder Stian Slyngstad Korsan. Takknemmligheten for tilgang på kontor-plasser og nødvendig utstyr er stor. Ekstra stor takk rettes til Igor Marusic, som har satt av mye tid for veiledning og feilsøking i FE-analysen. Prosessen har vært lærerik på alle områder, og samarbeid med en større bedrift har vært interessant og givende.

Vi ønsker til slutt å rette en stor takk til intern veileder, Lars Petter Bryne, universitetslektor ved NTNU i Ålesund. Oppmuntrende ord, gode tips og konstruktive tilbakemeldinger har vært til stor hjelp under prosessen.

Ålesund, 22. mai 2023



Gard Moe Hatlø



Steinar Helvig

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Problemstilling	1
1.2	Rapportens oppbygging	2
1.3	Beskrivelse av thrusteren	3
1.4	Kriterier	4
1.5	Kommentar	4
2	Betingelser	5
2.1	ISO og NS-EN Standarder	5
2.1.1	Flytsikkerhet	5
2.1.2	Transport	6
2.1.3	Løft	6
2.2	Materialvalg	7
2.3	Lasttilfeller	7
2.3.1	Lasttilfelle 1	8
2.3.2	Lasttilfelle 2	8
2.3.3	Lasttilfelle 3	8
2.3.4	Lasttilfelle 4	8
2.3.5	Lasttilfelle 5	8
2.3.6	Lasttilfelle 6	8
2.4	Tyngdepunkt	8
3	Konseptutvikling	11
3.1	Konseptskisser	11
3.1.1	Skisse 1	11
3.1.2	Skisse 2	12
3.1.3	Skisse 3	13
3.1.4	Skisse 4	13
3.2	Første konseptpresentasjon	14
3.2.1	Konsept 1	14

3.2.2	Konsept 2	15
3.2.3	Konsept 3	15
3.2.4	Konsept 4	15
3.2.5	Valg av konsept	16
3.3	Andre konseptpresentasjon	16
3.3.1	Konsept 3.1	16
3.3.2	Konsept 3.2	17
3.3.3	Konsept 3.3	18
3.4	Konseptavgjørelse	18
3.5	Mangler i konseptet	19
3.5.1	Slissespor	19
3.5.2	Adapterplate	20
3.6	Endelig konseptdesign	20
4	Teori	23
4.1	Materialteori	23
4.2	Bjelketeori	24
4.2.1	Elementærtillfeller	25
4.2.2	Skjærkraft	26
4.2.3	Moment	27
4.2.4	Nedbøyning	29
4.2.5	Bjelketverrsnitt	31
4.2.6	Spenninger	33
4.2.7	Buling	34
4.3	Sveis	34
4.4	Spenningskonsentrasjoner	35
4.5	Skrueforbindelse	35
4.5.1	Opptredende krefter	35
4.5.2	Tiltrekkingsmoment	37
4.5.3	Spenninger	38
4.5.4	Hullflatetrykk	39
4.6	Elementmetoden	40
5	Overslagsberegninger	41
5.1	Metode	42
5.1.1	Moment og skjærkraft	42
5.1.2	Nedbøyning	43
5.1.3	Tverrgående hulprofiler	43
5.1.4	Krybbe	44
5.2	Resultat	46
5.2.1	Moment og skjærkraft	46

5.2.2	Nedbøyning	47
5.2.3	Spenninger i tverrgående hulprofiler	48
5.2.4	Buling i fremre krybbe	48
5.2.5	Spenninger i krybbe	49
5.3	Diskusjon	49
5.3.1	Moment og skjærkraft	49
5.3.2	Tverrgående hulprofiler	50
5.3.3	Fremre krybbe	50
5.3.4	Bakre krybbe	50
5.3.5	Nedbøyning	51
5.3.6	Buling	51
6	Optimaliseringsberegninger	53
6.1	Metode	53
6.1.1	Geometri	54
6.1.2	Analysemodell	54
6.2	Resultat	56
6.2.1	Nye dimensjoner	57
6.3	Diskusjon	58
6.3.1	Tverrgående hulprofiler	58
6.3.2	Fremre krybbe	59
6.3.3	Bakre krybbe	59
6.3.4	Simplifisering av lasttilfelle	60
7	Lastberegning	61
7.1	Metode	61
7.1.1	Geometri	61
7.1.2	Analysemodell	62
7.1.3	Lasttilfellene	64
7.1.4	Boltforbindelse	67
7.2	Resultat	69
7.2.1	Lasttilfelle 1	70
7.2.2	Lasttilfelle 2	72
7.2.3	Lasttilfelle 3	75
7.2.4	Lasttilfelle 4	77
7.2.5	Lasttilfelle 5	80
7.2.6	Lasttilfelle 6	82
7.2.7	Boltforbindelse	83
7.3	Diskusjon	85
7.3.1	Usikkerhet i analysen	85
7.3.2	Boltforbindelse	87

8 Ferdigstilling	89
8.1 Design	89
8.2 Dokumentasjon	92
8.2.1 Struktur i Teamcenter	92
8.2.2 Maskintegninger	93
8.2.3 Lastsikring	93
8.2.4 Prosedyre	93
8.2.5 Rapport	93
9 Konklusjon	95
Bibliography	97
Vedlegg	99
A Boltberegninger for FE-analyse	99
B Boltberegninger	99
C Dimensjonering av ramme	99
D Fremdriftsplan	99
E Erfaringsverdier fra Kongsberg	99
F Lastsikringsberegninger	99
G Maskintegninger	99
H Møtereferat 01.03.2023	99
I Møtereferat 04.04.2023	99
J Møtereferat 09.05.2023	99
K Møtereferat 12.01.2023	99
L Møtereferat 14.02.2023	100
M Møtereferat 14.04.2023	100
N Møtereferat 06.03.2023	100
O Optimaliseringsberegninger	100
P Prisestimat	100
Q Prosedyre for løft og lastsikring	100
R Rapport Kongsberg	100
S Tiltrekkingsmoment	100

Figurer

1.1	Illustrasjon av US 205 CRP	3
2.1	Illustrasjon kjøreretning	7
2.2	Illustrasjon av tyngdepunktets plassering	9
3.1	Første konseptskisse	12
3.2	Andre konseptskisse	12
3.3	Tredje konseptskisse	13
3.4	Fjerde konseptskisse	13
3.5	Første konseptmodell	14
3.6	Første konseptmodell	15
3.7	Konsept 3	15
3.8	Konsept 4	16
3.9	Første konseptmodell fra andre konseptpresentasjon	17
3.10	Andre konseptmodell fra andre konseptpresentasjon	17
3.11	Tredje konseptmodell fra andre konseptpresentasjon	18
3.12	Konsept uten slissespor	19
3.13	Slissespor på konseptmodell	19
3.14	Adapterplate for varierende diameter på girhus	20
3.15	Endelig konseptmodell	21
4.1	Last-forlengelseskurve	24
4.2	Fast innspent bjelke	25
4.3	Fritt opplagret bjelke	25
4.4	Fritt opplagret bjelke med overheng	25
4.5	Skjærkraftdiagram for fast innspent bjelke	26
4.6	Skjærkraftdiagram for fritt opplagret bjelke	27
4.7	Skjærkraftdiagram for fritt opplagret bjelke med overheng	27
4.8	Momentdiagram for fast innspent bjelke	28
4.9	Momentdiagram for fritt opplagret bjelke	28

4.10	Momentdiagram for fritt opplagret bjelke med overheng	29
4.11	Deformert bjelkeelement	29
4.12	Nedbøyning på en bjelke med fast innspenning	30
4.13	Nedbøyning på en fritt opplagret bjelke	30
4.14	Nedbøyning på en bjelke med fri opplagring og overheng	31
4.15	Utvalgte tverrsnitt	31
4.16	Steiners Teorem	32
4.17	Spenninger i kilsveis	34
4.18	Spenningsbilde som følge av kjervvirkning	35
4.19	Skjematisk skruediagram	36
4.20	Fordeling av tiltrekkingsmoment	37
4.21	Elementtyper	40
5.1	Free-Body diagram av lasttilfelle 2	41
5.2	Moment og skjærkraft diagram fra overslagsberegning	42
5.3	Illustrasjon av nedbøyning	43
5.4	Tverrgående hulprofiler	44
5.5	Snitt i krybbe	44
5.6	Snitt A-A	45
5.7	Snitt E-E	45
6.1	Rammemodell etter overslagsberegninger	53
6.2	Illustrasjon av forenklet analysemodell.	55
6.3	Første optimaliseringberegning.	56
6.4	Resultat av optimaliseringberegning.	57
7.1	Løftepunkter og tyngdepunkt	62
7.2	Analysemodell for lastberegninger	63
7.3	Første lasttilfelle	64
7.4	Andre lasttilfelle	65
7.5	Tredje lasttilfelle	65
7.6	Fjerde lasttilfelle	66
7.7	Femte lasttilfelle	66
7.8	Sjette lasttilfelle	67
7.9	Deformasjon av rammen ved første lasttilfelle	70
7.10	von Mises spenninger	71
7.11	Deformasjon av rammen ved andre lasttilfelle	72
7.12	von Mises spenninger	73
7.13	Skjærspenninger i låsesylinder	73
7.14	Overflatetrykk på låsesylinder	74
7.15	Deformasjon av rammen ved tredje lasttilfelle	75
7.16	von Mises spenninger	76

7.17	Deformasjon av rammen ved fjerde lasttilfelle	77
7.18	von Mises spenninger	78
7.19	Skjærspenninger i låsesylinder	78
7.20	Overflatetrykk på låsesylinder	79
7.21	Deformasjon av rammen ved femte lasttilfelle	80
7.22	von Mises spenninger	81
7.23	Deformasjon av rammen ved sjette lasttilfelle	82
7.24	von Mises-spenninger	83
8.1	Rammen uten adapterplatene	89
8.2	Adapterplatene	90
8.3	Adapter festet til avstiver	90
8.4	Komplett låsesylinder	91
8.5	Komplett sammenstilling	91
8.6	Struktur i Teamcenter	92

Tabeller

1	Oversikt over programvare brukt i bacheloroppgaven	xvii
1.1	Geometrisk data for US205 CRP	3
2.1	Akselerasjonsfoeffisienter for veitransport	6
2.2	Akselerasjonsfoeffisienter for sjøtransport	6
2.3	Materialegenskaper	7
2.4	Tyngdepunkt på ferdigbygget thruster	9
3.1	Beskrivelse av rammens komponenter	21
4.1	Deformasjonsforhold mellom skru og underlag	36
4.2	Maks tillatt hullflatetrykk	39
5.1	Opptredende krefter på rammen	46
5.2	Moment i tverrgående hulprofiler	46
5.3	Moment ved fremre og bakre krybbe	47
5.4	Nedbøyning av rammen	47
5.5	Spenninger i tverrgående hulprofiler	48
5.6	Buling i fremre krybbe	48
5.7	Spenninger i fremre krybbe	49
5.8	Spenninger i bakre krybbe	49
6.1	Dimensjoner før optimalisering	54
6.2	Elementer på optimaliseringsmodell	55
6.3	Dimensjoner etter optimalisering	58
7.1	Elementer på lastmodell	63
7.2	Thrustermasse for lastberegninger	64
7.3	Data for metriske skruer fra ISO 898-1:2013	68
7.4	Tiltrekkingsmoment på bolter	83

7.5	Aksielle spenninger i boltene	84
7.6	Skjærspenning i boltene	84
7.7	Hullflatetrykk	84
7.8	Sikkerhet for boltforbindelse på adapterplater med slissespor . . .	88
7.9	Sikkerhet for boltforbindelsen på adapterplater for krybbediameter	88

Terminologi

Listen nedenfor beskriver flere symboler som senere vil bli brukt i hoveddelen av dokumentet.

Forkortelse

<i>CP</i>	Controllable Pitch
<i>CRP</i>	Contra Rotating Propellers
<i>FE</i>	Finite Element
<i>FP</i>	Fixed Pitch

Symbol

α	Formfaktor
β	Kjervfaktor
δ_1/δ_2	Deformasjonsforhold mellom skrue og underlag
ϵ_1	Friksjonsvinkel på skrue
η	Kjervfølsomhetsfaktor
μ	Friksjonskoeffisient
σ	Normalspenninger
σ_{CR}	Kritisk spenning
σ_{EU}	Euler spenning
σ_{max}	Maks tillatt spenning
σ_y	Strekkgrensen til en skrue

τ	Skjærspenning
φ	Stigningsvinkel på skruens gjenger
A	Areal
a	a-mål på sveis
A_s	Spenningsarealet til en skrue
E	E-modul
F	Kraft
f	Nedbøyning
HB	Brinell hardness
I	Annet arealmoment
l	Bjelkelengde
M	Moment
n_k	Klemsikkerhet
p	Hullflatetrykk
pre	Prosentandelen av sktrekkgrensen på en skrue
R_e	Flytegrensen til material
ν	Poissontall for material
W	Tverrsnittsmodul

Programvare

Tabell 1: *Oversikt over programvare brukt i bacheloroppgaven.*

Navn	Beskrivelse
Microsoft Visio	Dataverktøy for flytskjema og diagrammer
Microsoft PowerPoint	Presentasjonsverktøy
Microsoft Word	Tekstbehandlingsverktøy brukt til prosedyrer
Microsoft Excel	Regneark for overslagsberegninger
Siemens NX 10	Modellere ramme og lage maskintegninger
Siemens Nastran	Programvare bruk til styrkeberegning
Siemens Teamcenter	Database for modeller og dokumenter
Overleaf LaTeX	Tekstbehandlingsverktøy for bachelor

Kapittel 1

Introduksjon

Dette kapittelet gir en kort introduksjon av oppgaven. Introduksjonen tar for seg problemstillingen knyttet til denne oppgaven. Deretter gis en oversikt over rapportens oppbygning, og arbeidets fremgangsmåte presenteres. Til slutt beskrives thruster typen som skal transporteres og overhales i rammen. En liste over kriterier for rammen vil også bli nevnt.

1.1 Problemstilling

Hos Kongsberg Maritime GCS Ulsteinvik overhales thrusterne. Thrusterne transporteres som oftest med bil eller båt mellom verft og verksted. For trygg transport, brukes transportsrammer tilpasset de ulike thrustermodellene. Under overhalingen på verksted blir thrusterne montert og demontert på rammer konstruert for dette. Rammene sørger for stabilitet og sikkerhet for de som jobber på thrusteren under overhalingen.

Prosjektgruppen skal utvikle en ramme som kan brukes til montering og transport. Rammen skal være tilpasset thrusteren US205 CRP, med mulighet for tilpasning til US155 CRP. All utforming skal gjøres i henhold til gjeldende krav for vei- og sjøtransport, samt HMS, i form av prosedyrer. Idé- og konseptskisser skal utvikles for å kartlegge mulige løsninger og avgjøre hvilke løsninger som bør prioriteres i endelig konsept. Endelig rammekonsept vil gi grunnlag for videre dimensjonering og styrkeberegning. Dimensjonering og styrkeberegning skal gjøres i henhold til Kongsberg Maritime sine standarder.

Komplett beskrivelse av maskintegninger, produksjonstegninger, last- og sikringsinstruksjoner skal ferdigstilles i henhold til GCS Ulsteinvik sine standarder etter at rammen møter gitte krav til styrke i norsk og europeisk standard for transport og løft.

Det er viktig at rammen designes og utformes på en måte som gjør den lett skalerbar for hele porteføljen med US-thrustere. Slik kan kostnader og produsjonstid reduseres.

Gjennom å utføre hele utviklingsprosessen, fra idéskisser til ferdig utviklet produkt, klar for produksjon, vil gruppen få en mest mulig realistisk tilnærming til oppgaven. Videre er det et mål at oppgaven skal resultere i en god rammeløsning gjennom 3D-modellering og styrkeberegning i henhold til alle standarder.

Stikkord

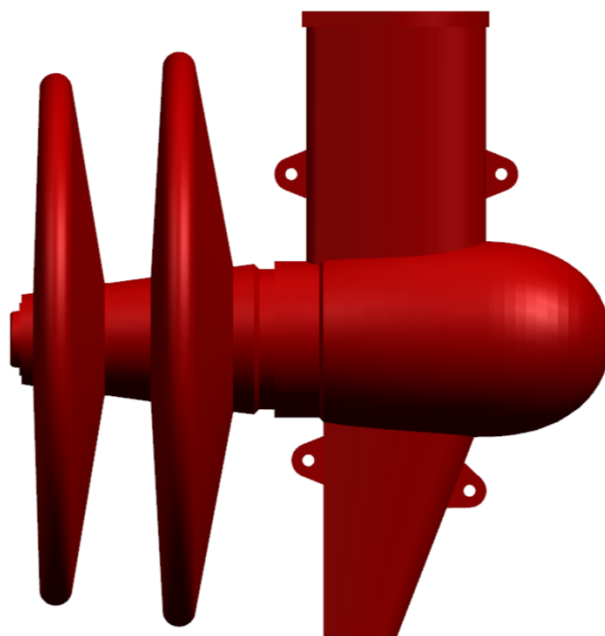
Stålkonstruksjon	Modulær
Utforming	FE-analyse
Dimensjonering	Sikkerhetsfaktor
Spenningsbilde	Regelverk
Belastningstilfeller	Prosedyre

1.2 Rapportens oppbygging

Rapportens oppbygging følger fremgangsmåten ved produktutvikling og består av 9 kapitler. Etter introduksjonen i kapittel 1, blir betingelsene for oppgaven presentert i kapittel 2. Kapittel 3 tar for seg selve konseptutviklingen, som utgjør første del av produktutviklingsprosessen. Neste kapittel, kapittel 4, tar for seg teorien som er nødvendig for å forstå bereningenes fremgangsmåte, hva resultatene betyr og hva som skiller overslagsberegningene fra FE-analysene. Teoridelen forteller også hvilke forutsetninger og forenklinger som er tatt. Metodene brukt til å utføre de forskjellige beregningstypene er beskrevet i respektive kapitler. Beregningsprosessene deles inn i tre individuelle kapitler. I kapittel 5 vil metode, resultat og diskusjon for overslagsberegningene presenteres. Tilsvarende tar kapittel 6 og 7 for seg optimaliseringsberegningene og lastberegningene. All dokumentasjon laget for Kongsberg Maritime, forklares i kapittel 8. Til slutt konkluderes arbeidet som er gjort i kapittel 9. Konklusjonen vurderer i hvilken grad arbeidet med oppgaven har løst problemstillingen. Den innebærer også en vurdering av resultatene.

1.3 Beskrivelse av thrusteren

Thrusteren rammen konstrueres for er illustrert i figur 1.1. For løft og installasjon er det fastmontert løfteøyne på halsen til thrusteren. På finnen er det montert tilsvarende løfteøyne som brukes ved snuoperasjoner. Som illustrert, har denne thrustertypen to kontraroterende propeller.



Figur 1.1: *Illustrasjon av US 205 CRP*

Geometrisk data om thrusteren, som er nødvendig å ta til betraktning ved konstruering av rammen, er presentert i tabell 1.1.

Tabell 1.1: *Geometrisk data for US205 CRP.*

Totalvekt [kg]	Høyde [mm]	Lengde [mm]	Bladdiameter [mm]
9400	2955	2820	2700

1.4 Kriterier

Med utgangspunkt i bruksområdene rammen er tiltenkt, er det flere kriterier rammen må oppfylle. Disse kriteriene er definert i listen under.

- Rammen må utvikles for lagring og transport.
- Det må være mulig å komme til inspeksjonsluker og dreneringspluggen.
- Alt arbeid knyttet til overhaling må være lett å utføre.
- Løse deler på rammen må ha sin respektive plassering.
- Rammen må være utformet slik at nødvendige løfteoperasjoner kan utføres.
- Dokumentmappe må være lett tilgjengelig.
- Rammen må tilpasses løft av thruster med rammen fastmontert.
- Rammen må være tilpasset trucker med tilstrekkelig løftekapasitet.
- Mulighet for å tilpasses transport og overhaling av andre US CRP-thruster.
- Rammen må tåle belastninger definert i regelverket for vei- og sjøtransport.

1.5 Kommentar

Underveis i oppgaven er det gjort nødvendige forandringer. I utgangspunkt var rammen tiltenkt en annen thrustermodell. I sedet for montering og transport, var tanken at rammen skulle anvendes til transport og installering av thruster på verft. På grunn av behovsendringen, avviker modeller og illustrasjoner fra faktisk thruster i kapittel 3. Problemstillingen definert tidligere i oppgaven er tilpasset det nye behovet.

Sent i utviklingen ble det også kjent at US205 CRP bygges i to forskjellige modeller hvor halefinnens lengde og diameter på girhuset varierer. Selv om prosjektgruppen ble informert om dette sent i prosessen, er utviklingen av en adapterplate for å løse problemet inkludert i slutten av kapittel 3. Alle maskintegninger er også sjekket for å kartlegge eventuelle andre mål som er forskjellig.

Adapterplaten som tar høyde for diameterforskjellene på US205 CRP er ikke inkludert i styrkeberegningene da disse ble utført før problemet ble kjent. Gitt belastningene denne platen vil utsettes for og dens utforming, er det avgjort at en ekstra analyse ikke er nødvendig. Dette beskrives mer i kapittel 3.

Alle forandringer gjort underveis, nevnes også i rapporten hvor dette er relevant.

Kapittel 2

Betingelser

Dette kapitlet tar for seg ulike betingelser som gjelder for utformingen og styrkeberegningen av rammen. Betingelsene gjelder både overslagsberegninger, optimeringsberegninger og lastberegninger. Betingelsene består av regler og standarder som stiller krav til transport, løft, sikkerhet mot flyt og materialvalg.

2.1 ISO og NS-EN Standarder

Det er utviklet egne standarder og regelverk for vei- og sjøtransport. Disse sørger for at lasten sikres forsvarlig og at eventuelle rammer og konstruksjoner er dimensjonert forsvarlig.

2.1.1 Flytsikkerhet

Løfteutstyr, sikkerhetskomponenter og maskiner som er designet av Kongsberg skal dimensjoneres i henhold til europaparlamentets direktiv [UNION, 2006]. I avsnitt 4.1.2.3, Mechanical strenght, er det spesifisert at maskiner, sikkerhetskomponenter og løfteutstyr skal designes på en slik måte at de tåler overbelastning uten permanent deformasjon. Sikkerheten mot flyt skal være minimum 1,5 for å sikre at konstruksjonen tåler overbelastning. For ekstra sikkerhet, benytter Kongsberg Maritime en sikkerhetsfaktor mot flyt på minimum 2.

2.1.2 Transport

Dimensjonsbegrensninger

De totale dimensjonene for rammen og thrusteren kan sette begrensninger for hvor de kan transporteres. For å eliminere eventuelle begrensninger bør ikke den totale høyden overstige 4,3 meter med hensyn til tunnel- og brohøyder. Med godsbredde over 2,4 - 2,55 meter, må dispensasjon søkes og følgebli blir nødvendig. Se informasjon fra møte i vedlegg K.

Akselerasjonskoeffisienter

For vei- og sjøtransport må rammen konstrueres i henhold til NS-EN 12195-1:2010 [ISO, 2010]. Dette for at rammen skal ha tilstrekkelig styrke under gitte lasttilfeller og godkjennes for bruk. Fra regelverket er det akselerasjon i og mot kjøreretning, samt sideveis akselerasjon, rammen må dimensjoneres for. Akselerasjonskoeffisienter for veitransport er presentert i tabell 2.1. Tabell 2.2 viser hvilke akselerasjonskoeffisienter som gjelder for sjøtransport. Tabellene er hentet direkte fra [ISO, 2010].

Tabell 2.1: *Akselerasjonskoeffisienter for veitransport.*

Securing	Acceleration coefficients				
	longitudinally, C_x		transversely, C_y		vertically, C_z
	Forward	Rearward	Sliding	Tilting	
Longitudial	0,8	0,5	-	-	1,0
Transverse	-	-	0,5	0,5/0,6	1,0

Tabell 2.2: *Akselerasjonskoeffisienter for sjøtransport.*

Securing	Acceleration coefficients		
	longitudinally, C_x	transversely, C_y	vertically, C_z
Longitudial	0,4	-	0,2
Transverse	-	0,8	1,0

2.1.3 Løft

Under overhaling vil det være behov for å løfte thruster å ramme. Under løftingen vil en kran løfte i løfteøye på girhusets hals. En annen kran løfter i rammen. Slik kan ramme og thruster roteres ved behov.

2.2 Materialvalg

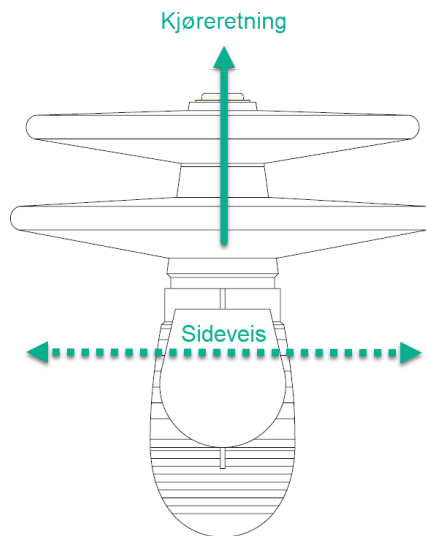
Det valgte materiale er oppgitt i tabell 2.3. S355J2+N er ofte brukt som konstruksjonsmateriale for rammer og annet verktøy. Tilgjengelige dimensjoner og pris på hulprofiler og plater hentes fra Norsk Stål [Stål, 2023].

Tabell 2.3: *Materialegenskaper.*

Materialnavn	Flytegrense [MPa]	E-modul [MPa]	Poissontall
S355J2+N	355	206940	0,3

2.3 Lasttilfeller

Med utgangspunkt i NS-EN 12195-1:2010 [ISO, 2010] defineres lasttilfellene for transport. Lasttilfelle 1 er ved lagring av thrusteren. De tre neste lasttilfellene, lasttilfelle 2, 3 og 4, tar for seg belastningstilfeller knyttet til transport. De siste lasttilfellene, lasttilfelle 5 og 6, omhandler belastninger under løfteoperasjon på verksted. Figur 2.1 illustrerer thrusterens posisjon i forhold til kjøreretning. Med utgangspunkt i illustrasjonen, forklares lasttilfellene under.



Figur 2.1: *Illustrasjon kjøreretning.*

2.3.1 Lasttilfelle 1

Dette lasttilfellet betrakter belastningen transportsrammen vil utsettes for når thrusteren hviler på rammen. Rammen står da stille på bakken.

2.3.2 Lasttilfelle 2

I henhold til tabell 2.1, skal rammen tåle en belastning på 0.8G i kjøreretning. Lasttilfelle 2 tar for seg denne belastningen hvor rammen og thrusteren er festet til lasteplan eller båtdekk i form av sjøgang eller nedbremsning.

2.3.3 Lasttilfelle 3

Mot kjøreretning skal rammen tåle en belastning på 0.5G. Dette er også en belastning som kan oppstå ved transport på vei og sjø i form av akselerasjon eller sjøgang.

2.3.4 Lasttilfelle 4

Siste lasttilfelle for transport tar for seg sideveis belastning. Denne belastningen kan oppstå i svinger på vei og ved krenkning av båt. Regelverket for sjøtransport stiller det strengeste kravet på 0.8G i sideveis belastning. Akselerasjonskoeffisienten er hentet fra tabell 2.2.

2.3.5 Lasttilfelle 5

Dette lasttilfellet tar for seg belastningen rammen utsettes for ved snuoperasjon på verksted. Ramme og thruster snus 90° for montering av propellaksel.

2.3.6 Lasttilfelle 6

Lasttilfelle 6 er likt lasttilfelle 5, men thruster og ramme roteres motsatt vei under montering. Baksiden peker i dette tilfellet ned mot bakken.

2.4 Tyngdepunkt

Thrusterens tyngdepunkt ville vært en kritisk faktor om rammen skulle designes for løfteoperasjoner. Om tyngdepunktet ligger over eventuelle løftepunkter, øker faren for at ramme og thruster velter under løfteoperasjoner. Nødvendige løfteoperasjoner ombord i båt eller bil, vil gjøres fra løfteøynene på girhushalsen mens rammen henger fast i thrusteren. Da holdes tyngdepunktet under løftepunktene.

For snuoperasjonen på verkstedet, er det nødvendig å kartlegge den endelige rammens tyngdepunkt slik at det ikke havner utenfor tiltenkte løftepunkt.

Selv om rammen ikke skal dimensjoneres for store løfteoperasjoner, er det viktig å adressere hvor thrustermodellens tyngdepunkt er. Tyngdepunktets plassering vil senere være nødvendig for styrkeberegningene. Det er gjennomført et estimat av thrusterens tyngdepunkt på verkstedet. Ved hjelp av to kraner løftes thrusteren etter løfteøynene. Belastningen på hver kran kartlegges før tyngdepunktets plassering beregnes ved momentlikevekt.

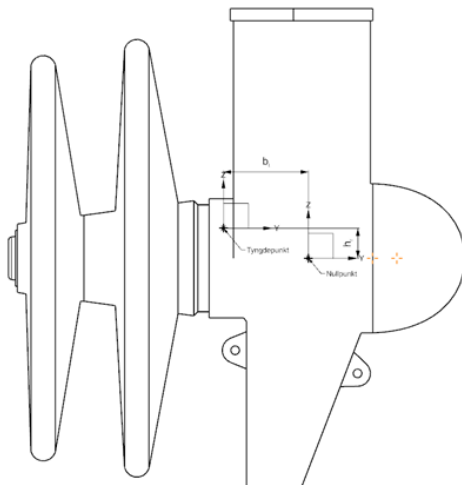
Om nødvendig kan tyngdepunktet beregnes ved likevekt mellom alle komponenters individuelle tyngdepunkt. Thrusteren er bygget opp av mange komponenter og et slikt estimat vil ta lang tid. Avvik vil uansett forekomme på en fysisk thruster og av den grunn vil ikke estimatet nødvendigvis gi mer nøyaktige verdier.

Tyngdepunktets plassering er hentet fra vedlegg N og presentert som koordinater i tabell 2.4. Koordinatsystemets nullpunkt er plassert i kryssningspunktet mellom pinjong og propellaksel.

Tabell 2.4: *Tyngdepunkt på ferdigbygget thruster.*

Thrusterstørrelse	x-retning [mm]	y-retning [mm]	z-retning [mm]
US 205 CRP	0	524	185

Figur 2.2 viser hvor tyngdepunktet er plassert. Figuren er representativ for alle thrusterstørrelsene og inneholder ikke eksakte mål.



Figur 2.2: *Illustrasjon av tyngdepunktets plassering.*

Kapittel 3

Konseptutvikling

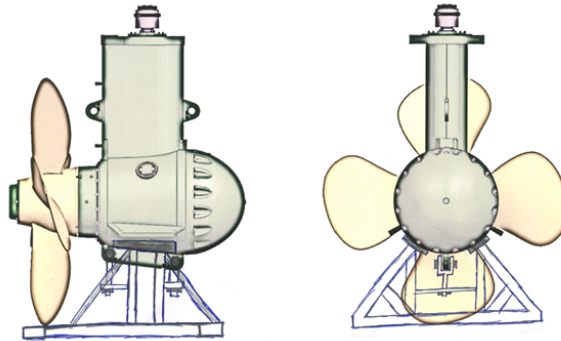
Dette kapitlet omhandler første del av utviklingsprosessen, konseptutvikling. Konseptutviklingen er delt opp i tre deler: første og andre konseptpresentasjon, og en konseptavgjørelse. Første konseptpresentasjon tar for seg konsepter med stor variasjon i utforming. Konseptene bygger på 3D-modeller basert på ideskisser. Et av konseptene velges som inspirasjon. Dette konseptet videreutvikles til nye konsepter. De nye konseptene er utfromet mer likt og er mer detaljerte. Under andre konseptpresentasjon vurderes det hvilket konsept som skal utvikles til ferdig ramme. Materialpris, sveiselengde og design vil påvirke hvilket konsept som velges til slutt.

3.1 Konseptskisser

Konseptskissene danner grunnlag for de første konseptmodellene. Hvert av gruppe-medlemmene lagde to idéskisser hver for seg for å lettere forklare idèer for rammens utforming. Skissene tegnes på utskrifter av US205 CP/FP uten propelldyse.

3.1.1 Skisse 1

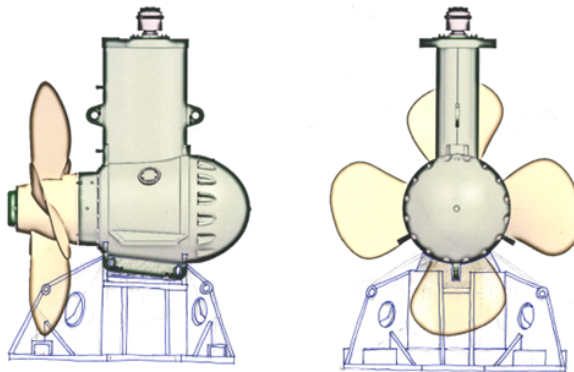
Første skisse viser en enkel rammekonstruksjon bestående av hulprofiler. Fundamentet består av gaffellommer og tverrgående hulprofiler. Thrusteren hviler på to plater tilpasset thrusterens geometri. Platene støttes av hulprofiler festet i ytterkant av fundamentet. Mindre hulprofiler brukes for å stive av rammen.



Figur 3.1: Første konseptskisse.

3.1.2 Skisse 2

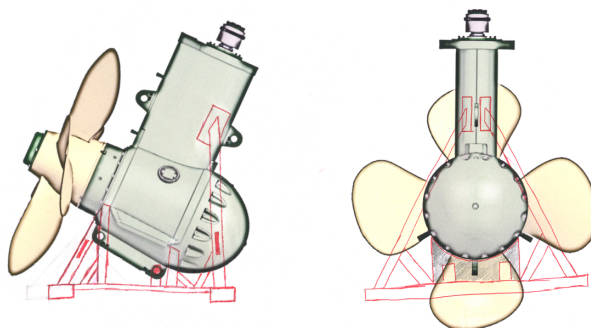
Andre skisse viser en mer avansert rammekonstruksjon oppbygget av stålplater. Fundamentet består av en større bunnsplate og gaffellommer. Thrusteren hviler på en krybbe tilpasset girhusets geometri. Krybben som thrusteren hviler på er avtagbar og kan byttes ut fra hvilken thrusterstørrelse som skal transporteres. Fire stående plater holder krybben oppe og stiver av fundamentet. Mindre plateelement brukes for å stive av rammen slik at platebuling ikke oppstår.



Figur 3.2: Andre konseptskisse.

3.1.3 Skisse 3

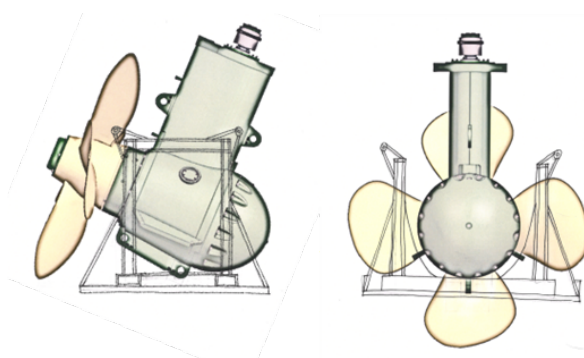
Tredje skisse viser et alternativ hvor thrusteren er skråstilt. Ved å skråstille thrusteren reduseres høyden slik at lasten ikke blir for høy under veitransport. Det er på lik linje med skisse 1 tenkt at hulprofiler skal brukes på det meste av rammekonstruksjonen. To stålplater skal utgjøre en krybbe som thrusteren hviler oppi.



Figur 3.3: Tredje konseptskisse.

3.1.4 Skisse 4

Fjerde konsept er også tiltenkt skråstilt thruster. I stedet for plater og hulprofiler, bygger konseptet på H-bjelker som former en boks rundt thrusteren. Boksen stives av med plater. Utformingen gir mulighet for løftepunkter som ligger over tyngdepunktet til thrusteren.



Figur 3.4: Fjerde konseptskisse.

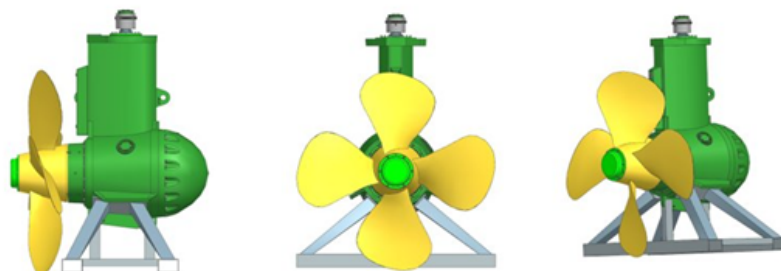
Etter at konseptskissene var ferdig, startet prosessen med å 3D-modellere de fire konseptene for å lettere presentere disse under første presentasjon. Selv om skissene gir en god oversikt over ideene, vil en 3D-modell gi et mer oversiktlig og rett bilde av hva som tenkes. Hvert konsept bygger på den respektive modellskissen over.

3.2 Første konseptpresentasjon

Det ble i starten av første konseptpresentasjon kjent at det var større behov for transportsrammer for Kongsberg sine US CRP thrustere, se møtereferat i vedlegg L. I tillegg var det ønskelig fra verkstedets side å fokusere på monteringsmuligheter i tillegg til transport, fremfor intallasjon. Thrusterne installeres ved hjelp av eksisterens løfteøyne på girhuset og en installasjonsramme er ikke nødvendig. På grunn av endret behov, må det gjøres forandringer på konseptenes geometri og utforming. Tross endret behov, er det flere deler ved konseptene som kan tas med videre i de nye konseptene til andre konseptpresentasjon.

3.2.1 Konsept 1

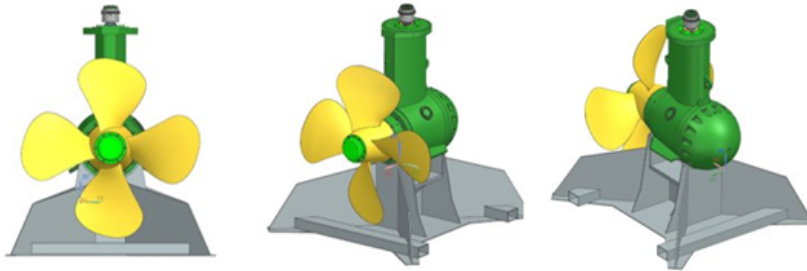
Første konsept bygger på første konseptskisse. Figur 3.5 viser rammemodellen med thruster fra forskjellige synsvinkler.



Figur 3.5: *Første konseptmodell.*

3.2.2 Konsept 2

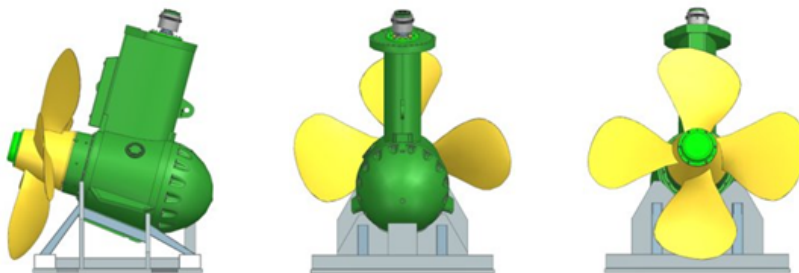
Andre konsept bygger på andre konseptskisse. Figur 3.6 viser rammemodellen med thruster fra forskjellige synsvinkler.



Figur 3.6: Andre konseptmodell.

3.2.3 Konsept 3

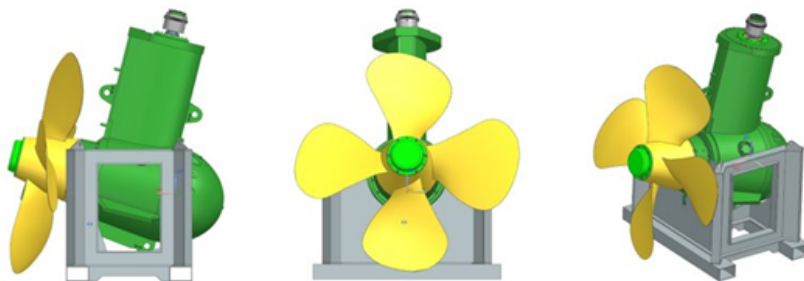
Tredje konsept bygger på tredje konseptskisse. Figur 3.7 viser rammemodellen med thruster fra forskjellige synsvinkler.



Figur 3.7: Tredje konseptmodell.

3.2.4 Konsept 4

Fjerde konsept bygger på fjerde konseptskisse. Figur 3.8 viser rammemodellen med thruster fra forskjellige synsvinkler.



Figur 3.8: Fjerde konseptmodell.

3.2.5 Valg av konsept

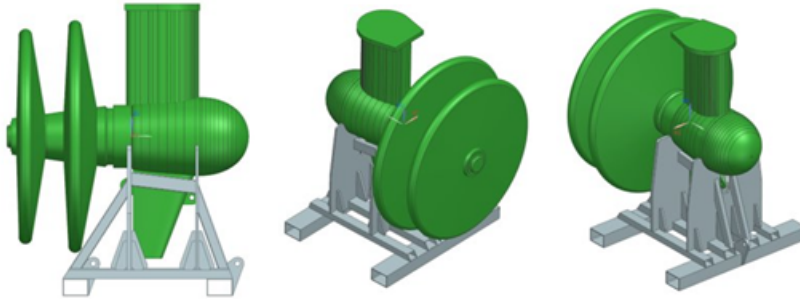
Det ble bestemt i slutten av konseptpresentasjonene at det skal jobbes videre med konsept 3. Konsept 3 ble valgt på grunn av den enkle geometrien. Det er stort potensial for at produksjonskostnadene vil være lave på grunn av lite sveise- og skjærearbeid. Konseptet vil være til inspirasjon for videre utvikling til tross for behovsendringen. Utfyllende vurderinger av alle rammekonseptene står i vedlegg L.

3.3 Andre konseptpresentasjon

Etter første konseptpresentasjon, startet arbeidet med å modellere de nye konseptene tilpasset US205 CRP for transport og montering. Fra første konseptpresentasjon er det kjent at thrusteren skal hvile på to krybbeplater, rammens fundament skal bygges opp av hulprofiler og tilstrekkelig med avstivere må brukes for at rammens styrke skal være tilstrekkelig.

3.3.1 Konsept 3.1

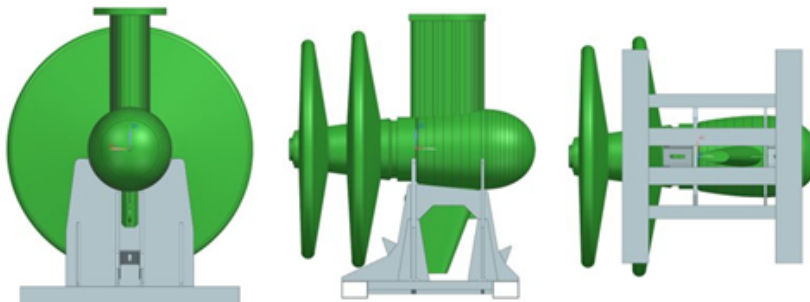
Fundamentet for første konsept består av gaffellommene og 4 tverrliggende hulprofiler som hviler på gaffellommene. Thrusteren hviler på krybbeplater. Krybbeplatene er ytterligere avstivet med hulprofiler. For å gjøre rammen stivere, er to hulprofiler festet mellom platene. For tilstrekkelig innfesting av thrusteren er det tiltenkt sikring med stropper mellom løfteøyne og øyne på gaffellommene.



Figur 3.9: Første konseptmodell fra andre konseptpresentasjon.

3.3.2 Konsept 3.2

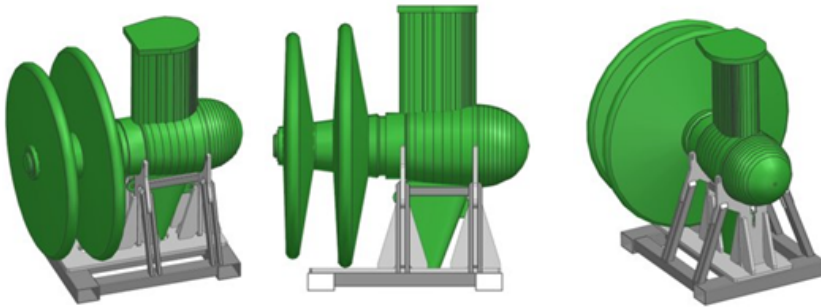
Andre konsept består av de samme krybbeplatene som første konsept. I stedet for hulprofiler, er platene avstivet med plater. De horisontale hulprofilene er flyttet ned og festet på innsiden av gaffellommene. I stedet for sikring med stropper, er det tiltenkt bruk av strekkfisk festet til løfteøynene på halefinnen til thrustern og de vinklede platene med slissespor.



Figur 3.10: Andre konseptmodell fra andre konseptpresentasjon.

3.3.3 Konsept 3.3

Tredje konsept har et tilsvarende fundament som andre konsept. Dette konseptet har en bunnplate som fordeler belastningen fra thrusteren. I stedet for store krybbeplater, er det valgt mindre platestykker som kombineres med hulprofiler. Slik som i konsept 1, er hulprofiler som avstiver krybbeplatene også brukt her. Avstivere er inkludert i områder hvor krybbeplatene trenger økt styrke. Det er tenkt at thrusteren skal sikres med låsebolter og slissespor.



Figur 3.11: Tredje konseptmodell fra andre konseptpresentasjon.

3.4 Konseptavgjørelse

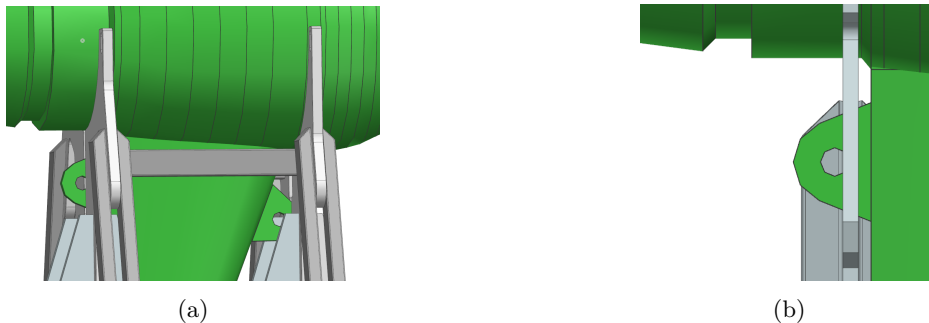
I slutten av andre konseptpresentasjon ble det bestemt at konsept 3.2 og 3.3 var begge gode konsepter for videre utvikling. Selv om materialvalg og design varierer, gir begge rammene samme nytte og tar like hensyn. Utfyllende vurderinger av de tre rammekonseptene står i vedlegg H. For å avgjøre hvilket konsept som er det beste, ble det utført et estimat for sveiselengde og materialpris for hver av rammene. Med utgangspunkt i sveiselengde og materialpris, er konsept 3.3 det beste. Fra estimatet av sveiselengde og materialpris i vedlegg P, skiller det omtrent 10m i sveiselengde og rundt 30 tusen kroner i materialpris mellom konseptene. Mindre behov for materialer indikerer også at en lavere vekt er mulig å oppnå for dette konseptet.

3.5 Mangler i konseptet

Fra vedlegg H er det kjent at låsesylindre og slissespor er foretrukket løsning for å feste thruster til rammen. Sent i prosessen ble det også kjent at US205 CRP finnes i versjoner med forskjellig girhusdiameter og er derfor behov for en adapteløsning for dette.

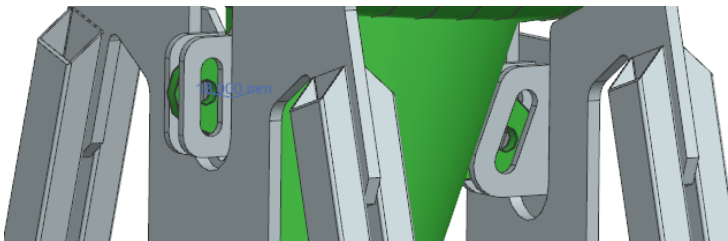
3.5.1 Slissespor

Figur 3.12a viser et nærbilde av thrusteren som hviler på valgt konseptramme. Da innfesting med slissespor ble avgjort under andre konseptpresentasjon, må dette implementeres i konseptet.



Figur 3.12: *Konsept uten slissespor.*

Som vist på figur 3.12b kommer thrusterens løfteøyne i konflikt med fremste krybbeplate. På grunn av sveisefuge på girhuset, kan ikke thrusteren flyttes lengre. Dette gir en åpning mellom thrusterfinnen og krybbeplaten. Denne plassen kan utnyttes ved å montere en plate på innsiden av krybbeplaten som vist på figur 3.13, som ikke kommer i konflikt med løfteøyet.

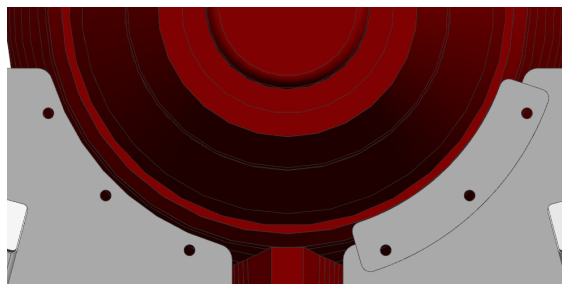


Figur 3.13: *Slissespor på konseptmodell.*

Siden rammen skal lett tilpasses flere størrelser av US CRP thrusteren, er boltforbindelse beste alternativ. Slissesporene blir da en del av et system med adapterplater som gjør det lett å tilpasse rammen etter behov. Slissesporenes størrelse og utforming er midlertidig og må tilpasses toleranser og plassering av thruster senere.

3.5.2 Adapterplate

For å ta høyde for diametervariasjonen på US205 CRP, ble det utviklet en enkel adapterplate som består av plategods med en utfreset flens. Slik vil adapterplaten overføre belastningen fra thrusteren som trykk ned på krybbeplaten. Flensen er kun tiltenkt sikring av adapterplate til krybbeplate. Figur 3.14, viser hvordan adapterplaten reduserer krybbediameteren

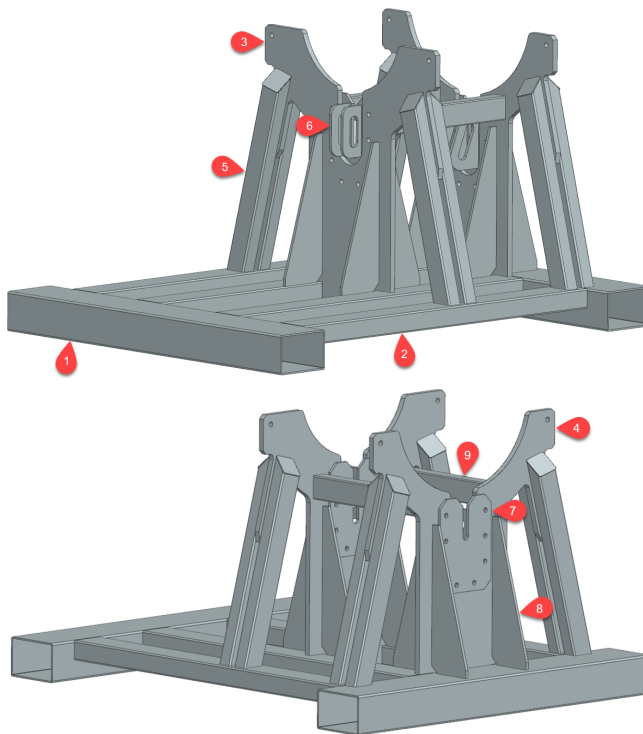


Figur 3.14: Adapterplate for varierende diameter på girhus.

Siden behovet for adapterplaten kom etter fullførte styrkeberegninger, er den ikke tatt høyde for i analysemodellen i lastberegningene. Det anses som unødvendig å foreta ytterligere styrkeberegninger av adapterplaten da den i hovedsak utsettes for trykk i gjeldende lasttilfeller.

3.6 Endelig konseptdesign

Endelig konseptdesign er illustrert i figur 3.15. Plateelementet i bunnen av rammekonsept 3.3 er borte. Krybbeplatene er forandret slik at de nye adapterplatene med slissespor kan monteres med boltforbindelser. Endelig konsept er designet skråstilte med hulprofiler på hver side krybbeplatene. Krybbeplatene er også utformet med skuldre som gir bedre plass til eventuelle løfte- og sikringspunkter. Platenes utforming kan lett forandres på senere i prosessen om nødvendig.

Figur 3.15: *Endelig konseptmodell.*

Tabell 3.1 gir en oversikt over hva de forskjellige rammekomponentene er definert som i rapporten.

Tabell 3.1: *Beskrivelse av rammens komponenter.*

Nummer	Beskrivelse
1	Gaffellomme
2	Tverrgående hulprofil
3	Fremre krybbeplate
4	Bakre krybbeplate
5	Skråstilt hulprofil
6	Fremre adapterplate
7	Bakre adapterplate
8	Avstivere
9	Avstivende hulprofil

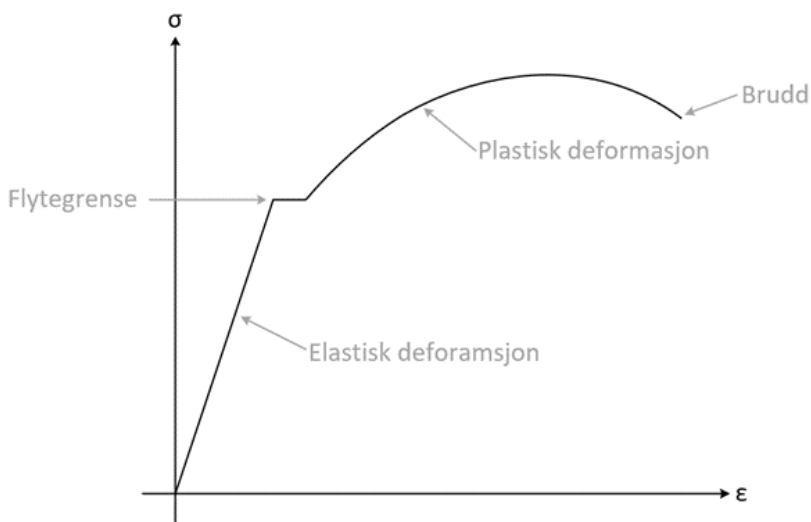
Kapittel 4

Teori

Dette kapitlet omhandler teorien som ligger bak utviklingen av rammen. Teorien bygger på bøkene Materialteknologi Del 1 [Falck-Ytter, 2009], Fasthetslære [Irgens, 2014] og Konstruksjonselementer [Dahlvig et al., 2000]. Kapitlet starter med materialteori som omhandler stålmaterialiets fysiske egenskaper. Videre presenteres bjelketeorien som overslagsberegningene bygger på. Sveise- og skrueforbindelser er også relevant for overslagsberegningene og forklares senere i kapitlet. Til slutt forklares elementmetoden som brukes i optimalisering- og lastberegningene.

4.1 Materialteori

Det er to typer deformasjon som kan oppstå i en konstruksjon som er påført en ytre kraft: elastisk og plastisk deformasjon. Elastisk deformasjon er midlertidig formendring i materialet som oppstår når materialet blir påført en ytre kraft som deformerer atomgitteret. Fjernes kraften, går materialet tilbake til opprinnelig form. Elastisk deformasjon oppstår så lenge opptredende spenninger er lavere enn materialets flytegrense. Går spenningene over flytegrensen, deformerer atomgitteret slik at atombindingene brytes. Materialet får varig formendring, plastisk deformasjon. Plastisk deformasjon svekker materialet og gjør det uforutsigbart som illustrert i figur 4.1.



Figur 4.1: Last-forlengelseskurve.

4.2 Bjelketeori

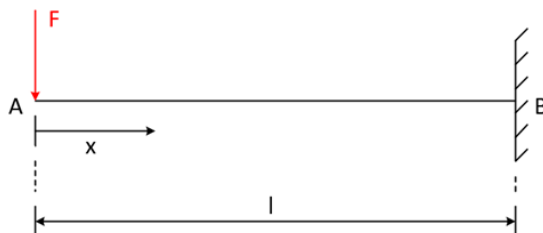
For å analysere og beregne krefter, spenninger og deformasjon i en bjelke belastet av ytre krefter, brukes bjelketeori. Tre hypoteser legges til grunn for å beregne spenninger i belastede bjelker:

1. *Deformasjshypotese I, Bernoullis hypotese:* Når en bjelke utsettes for ytre krefter vil plane tverrsnitt i bjelken forbli konstante.
2. *Spenningshypotese:* Under belastning av en bjelke vil det opptre normal-spenninger på plan, parallelle med bjelkeaksen. Disse spenningene er små og kan neglisjeres.
3. *Materialhypotese:* Materialeegenskapene vil være konstante gjennom hele bjelken.

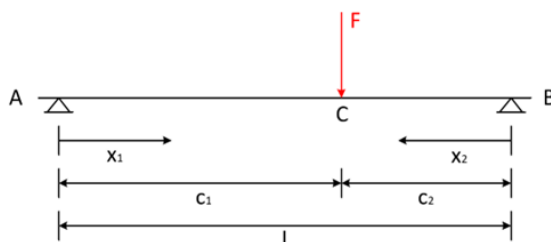
Når en bjelke belastes av en eller flere ytre krefter oppstår det motvirkende krefter i opplagingen.

4.2.1 Elementærtilfeller

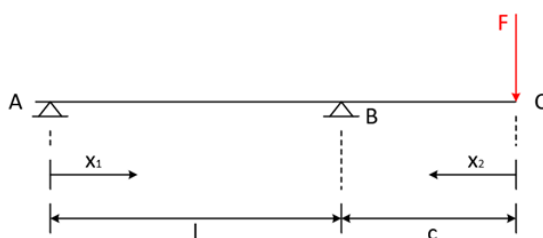
Det er bruk for tre av elementærtilfellene for overslagsberegning av rammen: fast innspent bjelke, figur 4.2, fritt opplagret bjelke, figur 4.3 og fritt opplagret bjelke belastet utenfor opplagringen, Figur 4.4.



Figur 4.2: Fast innspent bjelke.



Figur 4.3: Fritt opplagret bjelke.



Figur 4.4: Fritt opplagret bjelke med overheng

For en statisk bestemt bjelkekonstruksjon under belastning, vil kraft- og momentlikevekt opptre. Ukjente krefter og momenter kan derfor beregnes med formel 4.1 og 4.2.

$$\uparrow \sum F = 0 \quad (4.1)$$

$$\hat{\sum} M = 0 \quad (4.2)$$

I formel 4.1 og 4.2 er F vertikale krefter og M er moment rundt et vilkårlig punkt.

4.2.2 Skjærkraft

Med utgangspunkt i formel 4.1 kan skjærkreftene i bjelken beregnes og illustreres i et skjærkraftsdiagram. Hver elementærtilfelle har respektive skjærkraftdiagrammer.

Bjelken på figur 4.2 utsettes for like store skjærkrefter gjennom hele tverrsnittet. Figur 4.5 viser et skjematisk skjærkraftdiagram for dette tilfellet.



Figur 4.5: Skjærkraftdiagram for fast innspent bjelke.

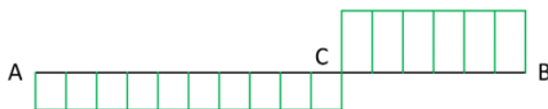
For den fritt opplagrede bjelken på figur 4.3, kan opplagerkreftene beregnes med formel 4.3 og 4.4.

$$F_A = \frac{F c_2}{l} \quad (4.3)$$

$$F_B = \frac{F c_1}{l} \quad (4.4)$$

I formel 4.3 og 4.4 er F_A og F_B opplagergrefter i henholdsvis punkt A og B. F er den ytre kraften, c_1 distansen fra A til C, c_2 distansen B til C og l er bjelkens totale lengde.

Skjærkraftdiagram for denne bjelken er illustrert i figur 4.6. Som illustrert, er skjærkreftene størst mellom B og C. Dette skyldes belastningens plassering.



Figur 4.6: Skjærkraftdiagram for fritt opplagret bjelke.

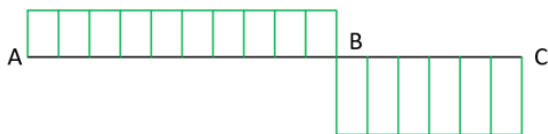
For den fritt opplagrede bjelken med overheng på figur 4.4, kan opplagerkreftene beregnes med formel 4.5 og 4.6.

$$F_A = \frac{Fc}{l} \quad (4.5)$$

$$F_B = \frac{F(l+c)}{l} \quad (4.6)$$

I formel 4.5 og 4.6 er F_A og F_B opplagerkrefter i henholdsvis punkt A og B. F er den ytre kraften, l distansen mellom A og B og c er distansen fra B til C.

Skjærkraftdiagramm for denne bjelken er illustrert i figur 4.7. Som illustrert, er skjærkreftene størst mellom B og C. Dette skyldes at bjelken belastes på utsiden av B.



Figur 4.7: Skjærkraftdiagram for fritt opplagret bjelke med overheng.

4.2.3 Moment

Med utgangspunkt i formel 4.2 beregnes opptredende momenter i bjelken. Deretter settes momentene opp i momentdiagrammer som illustrerer hvordan momentet forandres gjennom bjelken.

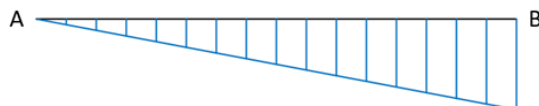
For elementært tilfellet med fast innspent bjelke på en side så kan momentet beregnes med formlene 4.7 og 4.8.

$$M_B = Fl \quad (4.7)$$

$$M_x = Fx \quad (4.8)$$

I formel 4.7 og 4.8 er M_B moment i B, M_x er moment ved avstand x fra den ytre kraften F og l er bjelkens totale lengde.

Momentdiagrammet for denne bjelken er illustrert i figur 4.8. Det er ingen moment i punkt A. Største moment i bjelken er i punkt B.



Figur 4.8: Momentdiagram for fast innspent bjelke.

For den fritt opplagrede bjelken på figur 4.3, kan momentene beregnes med formel 4.9, 4.10 og 4.11.

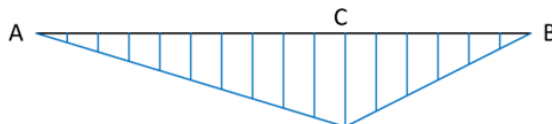
$$M_{maks} = \frac{F c_1 c_2}{l} \quad (4.9)$$

$$M_{A-C} = \frac{F c_2 x_1}{l} \quad (4.10)$$

$$M_{B-C} = \frac{F c_1 x_2}{l} \quad (4.11)$$

I formel 4.9, 4.10 og 4.11 er M_{maks} det største momentet, M_{A-C} moment mellom A og C, og M_{B-C} moment mellom B og C. F er den ytre kraften, c_1 er lengden fra A til C, c_2 er lengden fra B til C, x_1 er en valgt avstand fra opplager A, x_2 er en valgt avstand fra opplager B og l er bjelkens totale lengde.

Momentdiagram for denne bjelken er illustrert i figur 4.9. Som illustrert er største moment i angrepspunktet til den ytre kraften.



Figur 4.9: Momentdiagram for fritt opplagret bjelke.

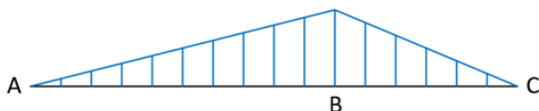
For den fritt opplagrede bjelken med overheng på figur 4.4, kan momentene i bjelken beregnes med formel 4.12 og 4.13.

$$M_B = Fc \quad (4.12)$$

$$M_x = F_A x \quad (4.13)$$

I formel 4.12 og 4.13 for moment i punktet B og en valgt distanse x så er F den ytre kraften og c lengden fra B til C.

Momentdiagram for fritt opplagret bjelke med overheng er illustrert i figur 4.10. Største moment opptrer i punkt B.



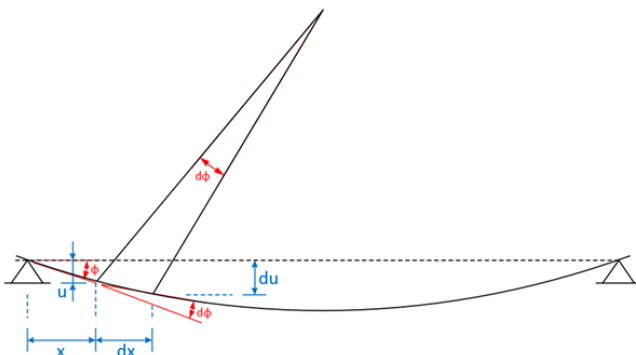
Figur 4.10: Momentdiagram for fritt opplagret bjelke med overheng.

4.2.4 Nedbøyning

En konstruksjon belastet av en ytre kraft vil utsettes for nedbøyning. Størrelsen på nedbøyningen avhenger av ytre krefter og bøyestivheten, EI .

Nedbøyningen på bjelkene i elementærtillfellene er utledet fra differensiallikningen for den elastiske linjen, illustrert i figur 4.11. Differensiallikningen bygger på de tre hypotesene fra kapittel 4.2. En fjerde hypotese ligger også til grunn:

4. *Deformasjønshypotese II*: Det forutsettes at absoluttverdien av helningsvinkelen er mindre enn en. Ifra enkel trigonometri viser figur 4.11 at tangens til helningsvinkelen ϕ er lik du/dx . Dermed blir $\phi = du/dx \ll 1$.



Figur 4.11: Deformert bjelkeelement.

Fra de fire hypotesene kan differensiallikningen for den elastiske linjen utledes til formel 4.14.

$$\frac{d^2u}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (4.14)$$

I formel 4.14 er M det påførte momentet og EI bjelkens bøyestivheten.

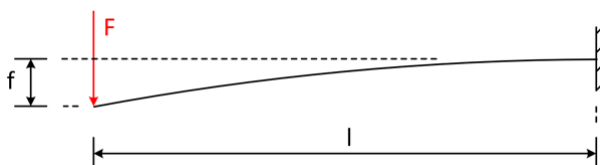
Fra formel 4.14 kan formler for nedbøyningen på de tre elementærtillfellene utledes. Formlene under er hentet fra Tekniske Tabeller, Johannessen [2002].

For en fast innspent bjelke kan nedbøyningen beregnes med formel 4.15.

$$f = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (4.15)$$

I formel 4.15 er f nedbøyningen, F er den ytre kraften, l lengden på bjelken og EI bøyestivhet til bjelken.

Figur 4.12 illustrerer nedbøyningen på en fast innspent bjelke. Største nedbøyningen oppstår der den ytre kraften virker på bjelken.



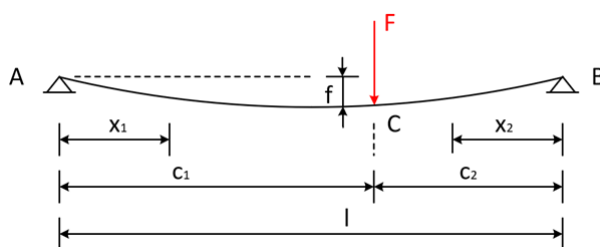
Figur 4.12: Nedbøyning på en bjelke med fast innspenning i en ende.

For en fritt opplagret bjelke kan nedbøyningen beregnes med formel 4.16.

$$f = \frac{F}{EI} \frac{l^3}{3} \frac{c_1^2}{l^2} \frac{c_2^2}{l^2} \quad (4.16)$$

I formel 4.16 er f nedbøyningen, F er den ytre kraften, EI bøyestivheten til bjelken, c_1 distansen fra A til B, c_2 distansen fra B til C og l belkens totale lengde.

Figur 4.13 illustrerer nedbøyningen av fritt opplagret bjelke. Største nedbøyning opptrer i området rundt midten av bjelken.



Figur 4.13: Nedbøyning på en fritt opplagret bjelke i hver ende.

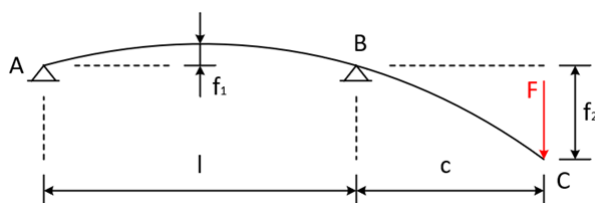
Nedbøyningen på den fritt opplagrede bjelken med overheng kan beregnes med formel 4.17 og 4.18.

$$f_1 = \frac{F}{EI} \frac{l^2 c}{9\sqrt{3}} \quad (4.17)$$

$$f_2 = \frac{F}{EI} \frac{(l+c)c^2}{3} \quad (4.18)$$

I formel 4.17 og 4.18 er F den ytre kraften, EI bjelkens bøyestivhet, c er distansen fra den ytre kraften til opplager B og l lengden mellom opplager A til opplager B.

Figur 4.14 illustrerer nedbøyningen av opplagret bjelke med overheng. Største nedbøyning opptrer i punkt C. Punkt A vil holde igjen bjelken.

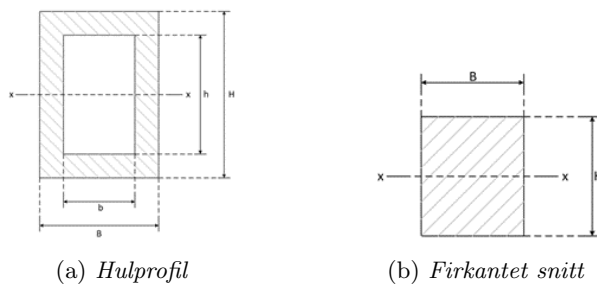


Figur 4.14: Nedbøyning på en bjelke med fri opplagring og overheng.

4.2.5 Bjelketverrsnitt

Annet arealmoment

For å beregne bøyepeningene i et snitt må annet arealmoment beregnes. For overslagsberegningene er det behov for å adressere to typer annet arealmoment, som vist i figur 4.15a og 4.15b.



Figur 4.15: Utvalgte tverrsnitt.

Annet arealmoment til en hulprofil er gitt i formel 4.19.

$$I_x = \frac{BH^3 - bh^3}{12H} \quad (4.19)$$

I formel 4.19 er I_x annet arealmoment rundt nøytralaksen $x-x$, B og b største og minste bredde på bjelken mens H og h er største og minste høyde.

Annet arealmoment til et firkantet snitt er gitt i formel 4.20.

$$I_x = \frac{1}{12}BH^3 \quad (4.20)$$

I formel 4.20 er I_x annet arealmoment rundt nøytralaksen $x-x$, B bredden og H tykkelsen.

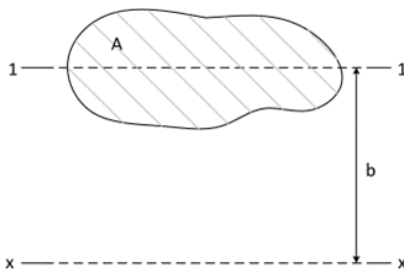
Steiners teorem

For usymmetriske snitt må annet arealmoment ved hjelp av Steiners teorem beregnes. Steiners teorem er gitt i formel 4.21.

$$I_x = I_1 + Ab^2 \quad (4.21)$$

I formel 4.21 er I_x annet arealmoment rundt nøytralaksen $x-x$, I_1 er annet arealmoment av legemet, A legemets areal og b er distansen mellom nøytralakse og legemets tyngdepunkt.

Steiners teorem er illustrert i figur 4.16.



Figur 4.16: Steiners teorem.

Tverrsnittsmodul

Med utgangspunkt i annet arealmoment, beregnes snittets tverrsnittsmodul med formel 4.22.

$$W_b = \frac{I_x}{y_{max}} \quad (4.22)$$

I formel 4.22 er W_b motstandsmomentet ved bøyning, I_x annet arealmoment og y_{max} er avstanden fra nøytralakse til snittets ytterpunkt hvor størst spenning opptrer.

4.2.6 Spenninger

Det er nødvendig å foreta spenningsberegninger i overslagsberegningene for å kartlegge kritiske områder på konstruksjonen. Spenningsformlene bygger på hypoteser om hvilke typer spenninger som er kritiske for brudd i forskjellige materialer. Dette kan være spenninger fra trykk, strekk og skjær. En konstruksjon utsatt for flere spenninger i samme område, er mer utsatt for deformasjoner og brudd, enn områder med en type spenning. Det er dermed viktig å kunne identifisere disse områdene for å avgjøre hvordan konstruksjonen vil påvirkes av belastningene den utsettes for.

Er kravet for sikkerhetsfaktoren kjent, kan største tillatt spenning beregnes med formel 4.23.

$$\sigma_{max} = \frac{R_e}{n} \quad (4.23)$$

I formel 4.23 er σ_{max} den største tillatte, R_e materialets flytegrense og n er sikkerhetsfaktoren.

For flerakset spenningsbilde beregnes von Mises-spenningen med formel 4.24.

$$\sigma_{mises} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (4.24)$$

I formel 4.24 er σ_{mises} von Mises spenningen, σ er aksiell spenning og τ er skjærspenning.

Opptredende normalspenninger beregnes med formel 4.25. Strekkspenninger beregnes med positivt fortegn mens trykkspenninger er negative.

$$\sigma_{s/t} = \frac{F}{A} \quad (4.25)$$

I formel 4.25 er F kraften som virker normalt i tverrsnittet, A er tverrsnittsarealet og $\sigma_{s/t}$ er strekk- eller trykkspenninger.

Formel 4.26 brukes for å finne nominell skjærspenning i et gitt tverrsnitt.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4.26)$$

I formel 4.26 er τ nominell skjærspenning, F er kraften skjærer over tverrsnittsarealet A .

For å beregne bøyespenningene i et tverrsnitt brukes formel 4.27.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \quad (4.27)$$

I formel 4.27 er σ_b bøyespenningen, M_b er bøyemomentet og W_b tverrsnittsmodulen til tverrsnittet.

4.2.7 Buling

Buling er en type deformasjon av smale konstruksjoner. Denne deformasjonen oppstår som regel på grunn av en ytre påkjenning på konstruksjonen, som fører til økte spenninger i materialet. Buling kan føre til svekkelse i materialet og i verste fall føre til brudd eller knekking.

For å forhindre buling, er det viktig at det unngås store og slanke flater som utsettes for store belastninger. Formel 4.28 viser hvordan Eulerspenningen beregnes.

$$\sigma_{EU} = \frac{CE\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_{steg}}{h}\right)^2 \quad (4.28)$$

I formel 4.28 C bulekoeffisienten, E er materialets elastisitetsmodul, ν er materialets poissontall, t_{steg} er tykkelsen, h er høyden og σ_{EU} er Euler-spenningen.

Dersom Eulerpenningen er større enn halvparten av flytegrnsen til materialet, må den kompenseres for. Formel 4.29 brukes for å kompensere Eulerspenningen.

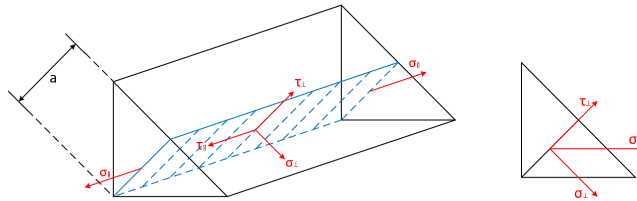
$$\sigma_{CR} = \sigma_{max} \left(1 - \frac{\sigma_{max}}{4\sigma_{EU}}\right) \quad (4.29)$$

I formelen 4.29 er σ_{max} materialets flytegrense, σ_{EU} er Eulerspenningen og σ_{CR} den kritiske spenningen.

For at det ikke skal oppstå buling i konstruksjonen, må normalspenningene være lavere enn de kritiske spenningene fra formelen over.

4.3 Sveis

For sveiseforbindelser vil det oppstå et anerledes spenningsbilde sammenlignet med bjelketeorien. Figur 4.17 illustrerer hvilke spenninger som kan opptre i sveisen.



Figur 4.17: Spenninger i kilsveis.

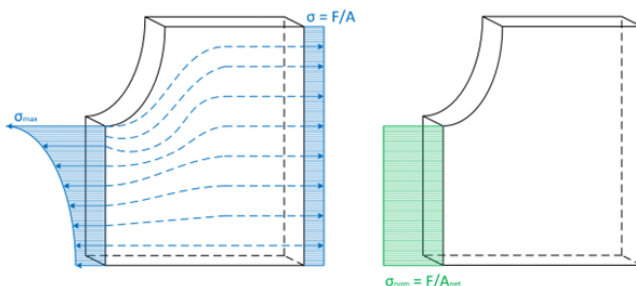
Som illustrert vil det oppstå en flerakset spenningstilstand i sveisen. Formel 4.30 brukes for å beregne von Mises-spenningen for kilsveisen.

$$\sigma_{mises} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2 - \sigma_{\perp}\sigma_{\parallel} + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \quad (4.30)$$

I formel 4.30 er σ normalspenninger og τ skjærspenninger.

4.4 Spenningskonsentrasjoner

I skarpe overganger på en belastet konstruksjon, vil det forekomme spenningskonsentrasjoner. Konsentrasjonene oppstår som en følge av at belastningen fordeles over et varierende tverrsnitt og spenninger samles i overgangene. Figur 4.18 illustrerer hvordan spenningene forandrer seg i et redusert tverrsnitt.



Figur 4.18: Spenningsbilde som følge av kjerrevirkning.

Spenningskonsentrasjonene kan gi uventede spenningstopper og gi lokale deformasjoner. Utsettes området for strekk, kan spenningskonsentrasjonene gi brudd og avrivning.

4.5 Skrueforbindelse

Boltforbindelser er nødvendig dersom montering og demontering skal være lett. For å unngå at boltforbindelsen svekkes ved belastning, er det nødvendig å gi bolten en tilstrekkelig forspenning. Forspenningen vil strekke bolten slik at tilstrekkelig kontakt mellom boltforbindelsene opprettholdes. Strekkes boltene for mye, vil spenningene i bolten overstige bruddstyrken, noe som resulterer i brudd.

4.5.1 Opptredende krefter

Boltforbindelsen vil utsettes for to typer aksial spenning. Ytre belastninger er en av årsakene til aksial spenning i bolten. Forspenningskraften er den andre kilden til aksial spenning i en boltforbindelse. Formel 4.31 brukes for å beregne forspenningskraften.

$$F_i = pre \times \sigma_y A_s \quad (4.31)$$

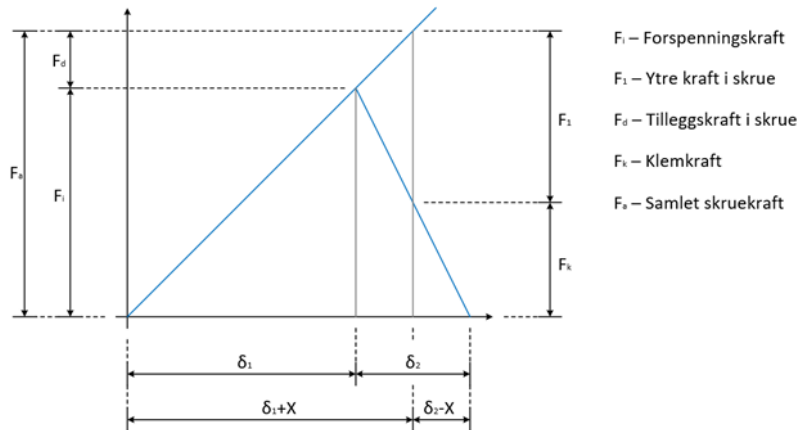
I formel 4.31 er pre prosentandelen av boltens strekkgrense σ_y , A_s er boltens spenningsareal og F_i er forspenningskraften.

Ved forspenning vil skruen forlenge seg med δ_1 mens underlaget vil bli sammentrykt med δ_2 . Deformasjonene kan analytisk beregnes med Hooke's lov, som sier at deformasjonen er proporsjonal med den påførte kraften F_a . Eventuelt kan erfaringsverdier for deformasjonsforholdet δ_1/δ_2 brukes. Tabell 4.1 gir en oversikt over erfaringsverdier for deformasjonsforhold.

Tabell 4.1: *Deformasjonsforhold mellom skru og underlag [Dahlvig et al., 2000].*

Med myk pakning	$\delta_1/\delta_2 = 0,5 - 1$
Med hard pakning	$\delta_1/\delta_2 = 1 - 2$
Uten pakning, normal flens	$\delta_1/\delta_2 = 2 - 3$
Uten pakning, tykk flens	$\delta_1/\delta_2 = 4 - 10$

For å finne total aksial belastning på bolten, kan et F- δ -diagram benyttes. Dette diagrammet gir en grafisk fremstilling av hvordan bolten og underlaget endrer seg på grunn av ytre belastning. Ønskede verdier kan måles direkte i diagrammet. Figur 4.19 gir en skjematisk illustrasjon av et F- δ -diagram.



Figur 4.19: *Skjematisk skruediagram.*

Alternativt kan boltens totale aksiale belastning beregnes ved bruk av formlikhet fra diagrammet. Formel 4.32 brukes for å beregne total aksial belastning.

$$F_a = F_i + \frac{F_1}{1 + \frac{\delta_1}{\delta_2}} = F_i + F_d = F_1 + F_k \quad (4.32)$$

I formel 4.32 er F_a den totale aksiale belastningen, F_i forspenningskraften, F_d er tilleggskraften i skruen, F_1 er den ytre belastningen i skruen, F_k klemkraften og δ_1/δ_2 er deformasjonsforholdet mellom underlag og bolt.

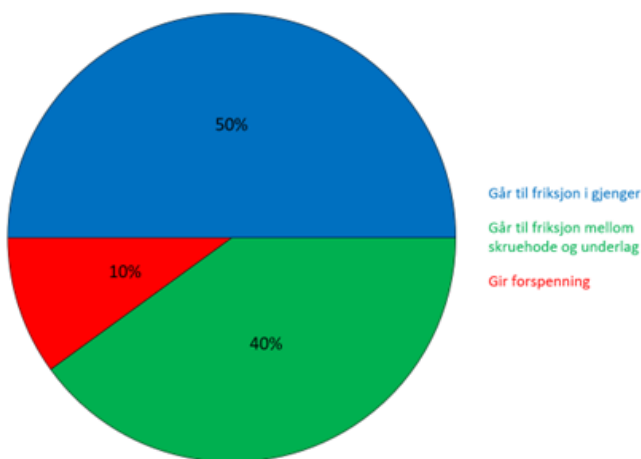
For å sikre at boldforbindelsen er tilstrekkelig ved aksiell belastning kan klemsikkerheten beregnes med formel 4.33.

$$n_k = \frac{F_i}{F_i - F_k} \quad (4.33)$$

I formel 4.33 er n_k klemsikkerheten, F_i forspenningskraften og F_k klemkraften.

4.5.2 Tiltrekkingsmoment

For å oppnå ønsket forspenning og klemkraft i skruen, må tiltrekkingsmomentet bestemmes. En viktig faktor som påvirker beregningen av tiltrekkingsmomentet, er friksjonen mellom skruen og materialet den skal festes til. Av det totale tiltrekkingsmomentet vil 90% gå til å overvinne friksjonen i gjenger og underlag. Resterende 10% går med til forspenning av skruen. Fordeling av tilsettingsmomentet er illustrert i figur 4.20.



Figur 4.20: Fordeling av tiltrekkingsmoment.

For å redusere friksjonen i gjengene, kan det benyttes ulike smøringer. Det nødvendige tiltrekningsmomentet og torsjonspenningene vil da reduseres i bolten.

Det totale tiltrekkingsmomentet kan beregnes med formel 4.34. Denne formelen tar høyde for nødvendig vrilmoment for å overvinne friksjon i både gjenger og underlag.

$$M = M_v + M_s \quad (4.34)$$

I formel 4.34 er M det totale tiltrekkingsmomentet, M_v nødvendig moment for å overvinne friksjon i gjenger og skruens stigningsmotstand, og M_s moment for å overvinne friksjon under bolthode.

Av det nødvendige momentet for å overvinne friksjon i gjenger og skruens stigningsmotstand, går 50% til friksjon og 10% til forspenning. For en trekantgjenget skru kan formel 4.35 benyttes.

$$M_v = F_a r_m \tan(\varepsilon_1 + \varphi) \quad (4.35)$$

I formel 4.35 er F_a totale kraften som virker aksielt i boltene, r_m gjengens middelradius, ε_1 friksjonsvinkel og φ er gjengens stigningsvinkel.

Av det totale tilsetningsmomentet, går 40% til friksjonen mellom underlag og skruehode. Momentet som kreves for å overvinne friksjonen mellom underlag og bolt kan beregnes med formel 4.36.

$$M_s = \mu' F_a r'_m \quad (4.36)$$

I formel 4.36 er μ' friksjonskoeffisienten mellom skruehode og flens, F_a er total aksial kraft og r'_m er radiusen som det antas at friksjonskraften virker på.

4.5.3 Spenninger

Spenningsbildet i en bolt kan være svært komplisert. For å dele spenningsbildet opp, skilles det mellom aksielle spenninger inkludert torsjon, og skjærspenninger. Kombinasjonen av torsjon og aksielle spenninger beregnes med formel 4.37. Denne spenningen kan sammenlignes opp mot strekkgrensen til boltene.

$$\sigma_{mises} = \sqrt{\sigma_d^2 + 3\tau_v^2} \quad (4.37)$$

I formel 4.37 er σ_d strekkspenningen og τ_v er torsjonspenningen.

Strekkspenningene opptrer som resultat av de totale aksiale kreftene som virker på boltene. Strekkspenningen kan beregnes med formel 4.38.

$$\sigma_d = \frac{F_a}{A_s} \quad (4.38)$$

I formel 4.38 er F_a den totale aksielle kraften og A_s er boltens tverrsnittsareal.

Grunnet torsjonsmomentet, vil det opptre torsjonspenninger i skruen. Torsjonspenningen kan beregnes med formel 4.39.

$$\tau_v = \frac{M_v}{W_v} \quad (4.39)$$

I formel 4.39 er M_v momentet som trengs for å overvinne friksjon i gjengene og W_v er skruens tverrsnittsmoment ved torsjon.

Skjærspenningene i skruen beregnes med formel 4.40.

$$\tau = \frac{F}{A_s} \quad (4.40)$$

I formel 4.40 er F den påførte kraften og A_s skruens spenningsareal.

For å ta det kompliserte spenningsbildet i betraktning, beregnes en egen von Mises-spennning ned formel 4.41.

$$\sigma_{mises} = \sqrt{3\tau^2} \quad (4.41)$$

I formel 4.41 er τ skjærspenningene i skruen.

4.5.4 Hullflatetrykk

Når skruhodet kommer i kontakt med underlaget, vil det oppstå et trykk mellom flatene. Størrelsen på hullflatetrykket beregnes med formel 4.42.

$$p = \frac{4F}{\pi(D^2 - d_h^2)} \quad (4.42)$$

I formel 4.42 er p hullflatetrykket, F den aksielle kraften i skruen, D er trykkflatens ytterdiameter og d_h er trykkflatens innerdiameter.

For å sikre et tilstrekkelig lavt hullflatetrykk, kan trykkverdiene sammenlignes opp mot erfaringsverdier beregnet ved testing. Trykket mellom flatene kan ikke overskride erfaringsverdiene i tabell 4.2.

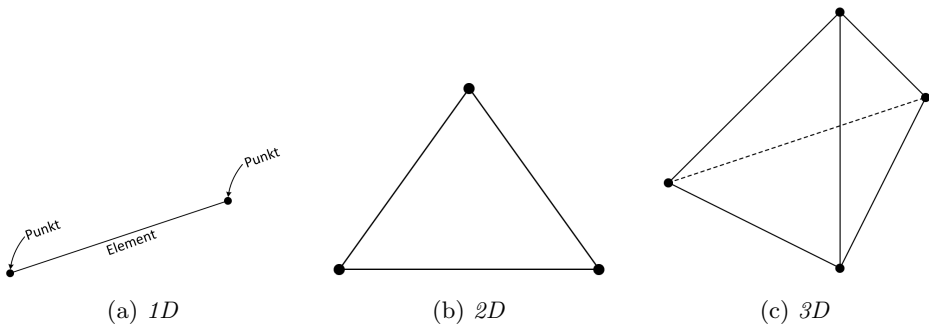
Tabell 4.2: Maks tillatt hullflatetrykk [Dahlvig et al., 2000].

Material		Maks hullflatetrykk
Stål	HB = 330	$p_{maks} = 1600 \text{ N/mm}^2$
Stål	HB = 280	$p_{maks} = 1400 \text{ N/mm}^2$
Stål	HB = 220	$p_{maks} = 1100 \text{ N/mm}^2$
Stål	HB = 170	$p_{maks} = 800 \text{ N/mm}^2$
Støpejern	HB = 200	$p_{maks} = 1000 \text{ N/mm}^2$
Støpejern	HB = 150	$p_{maks} = 700 \text{ N/mm}^2$
Messing	HB = 90	$p_{maks} = 400 \text{ N/mm}^2$
Kobber	HB = 60	$p_{maks} = 250 \text{ N/mm}^2$

4.6 Elementmetoden

Elementmetoden brukes for å dele avanserte systemer inn i mindre elementer. Elementene har bestemte egenskaper ut fra hvilke materialkonstanter som brukes. For å simulere egenskapene til det avanserte systemet, blir informasjon flyttet fra element til element og videre satt sammen til en helhet. Denne metoden brukes i alternativt til matematiske tilnærminger som tidligere presentert i teoridelen.

Det eksisterer flere typer elementer. Elementene kan være i 1D (*bjelke*), 2D (*skall*) og 3D (*volum*). Disse velges ut fra geometri og hva hensikten med styrkeberegningen er. På elementene finnes det punkter. Punktene knytter elementene sammen og deres forflyttelse vil senere bestemme spenningene som oppstår i de enkelte elementene [Lukasz Skotny, 2019].



Figur 4.21: *Elementtyper.*

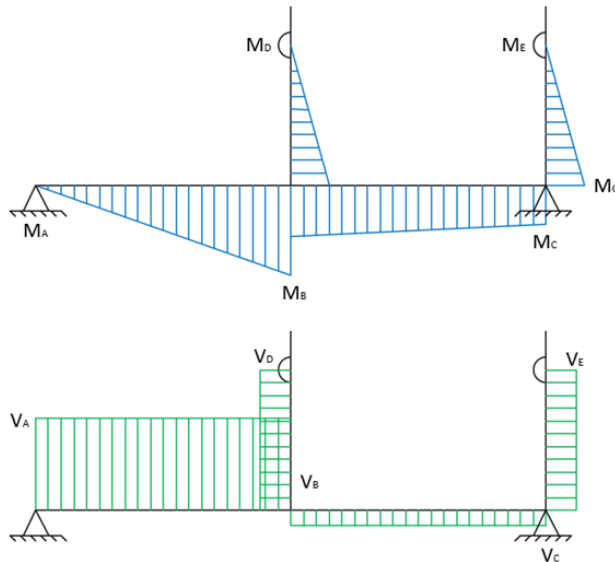
Et vanlig problem som kan oppstå ved bruk av elementmetoden, er singulariteter. Singulariteter er punkter på elementene som ender opp med urealistisk høye verdier konsentrert på et mindre område. Problemet oppstår ofte i skarpe overganger og kanter. Skulle de høye spenningsverdiene i et område vise seg å stemme, er ikke det nødvendigvis et problem. Rent fysisk vil ikke de høye spenningene på et lite område være kritiske, men skape en lokal deformasjon som jevner spenningstoppene ut [Bell og Meyer, 2022].

5.1 Metode

For å kartlegge alle kjente belastninger og videre beregne moment og skjærkrefter på monterings- og transportrammen, kan lasttilfellet settes opp i et free-body-diagram. Free-body-diagrammet er illustrert i figur 5.1. Alle beregninger er utført i henhold til formlene i kapittel 4. Styrkeberegning av maskinkomponenter er en iterativ prosess. Derfor er overslagsberegningene fra vedlegg C gjort i Microsoft Excel.

5.1.1 Moment og skjærkraft

Med utgangspunkt i elementærtillfellene, lages moment- og skjærkraftsdiagrammer for rammen. Som figur 5.1 viser, er de tverrgående hulprofilene på fundamentet fritt opplagret slik som bjelken i elementærtillfellet på figur 4.3. Krybbeplatene står vinkelrett på fundamentet med en forbindelse som tilsvarer to stive hjørner. Elementærtillfellet på figur 4.2 kan brukes for krybbeplatene. For å finne fordelingen av thrusterens vekt på krybbeplatene, kan thrusteren med opplagring på rammen betraktes som siste elementærtillfelle, figur 4.4. Belastningen lik $0,8G$ i kjøreretning fordeles likt mellom krybbeplatene siden thrusteren sees på som et uendelig stivt legeme. Momenter og skjærkrefter beregnes med utgangspunkt i formlene som er tilknyttet hvert av elementærtillfellene som rammen bygges opp av.

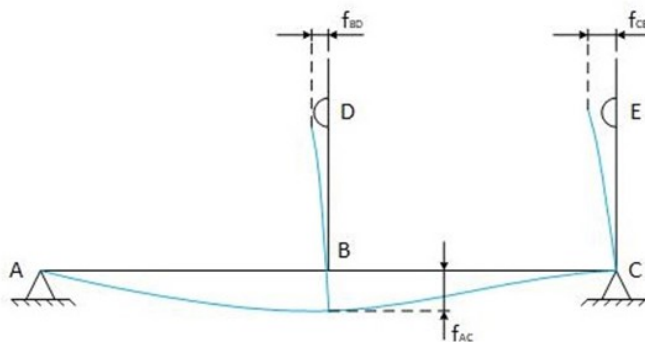


Figur 5.2: Moment og skjærkraft fra overslagsberegning.

5.1.2 Nedbøyning

Ved belastning vil deformasjoner i rammen oppstå. Deformasjonene og nedbøyninger viser hvordan rammen vil oppføre seg når ytre krefter virker på den. Tilsvarende som for moment- og skjærkraftdiagrammer, deles rammen opp i elementer tilsvarende elementærtillfellene. Rammens nedbøyning beregnes ved at den deles opp i de tre elementærbebjelkene AC, BD og CE, illustrert i figur 5.3. Videre betraktes hvert element hver for seg. Bjelke AC vil få en nedbøyning tilsvarende elementærtilfellet for en fritt opplagret bjelke beregnet med formel 4.16. For krybbeplatene BD og CE beregnes forflytningen tilsvarende en fast innspent bjelke med formel 4.15.

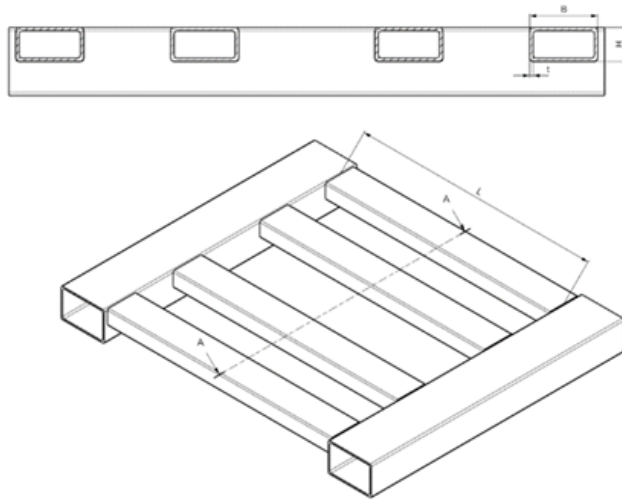
I punkt A og C vil det oppstå en nedbøyningsvinkel. På grunn av det stive hjørnet mellom AC og CE, vil nedbøyningsvinkelen påvirke forflytningen til CE. Forflytningen til CE vil dermed bli større enn hva formel 4.15 gir. Med antagelsene som er gjort, får ikke krybbeplate BD noe ekstra forflytning. Dette skyldes at krybbeplaten er plassert midt på AC hvor det ikke opptrer noen nedbøyningsvinkel.



Figur 5.3: Illustrasjon av nedbøyning.

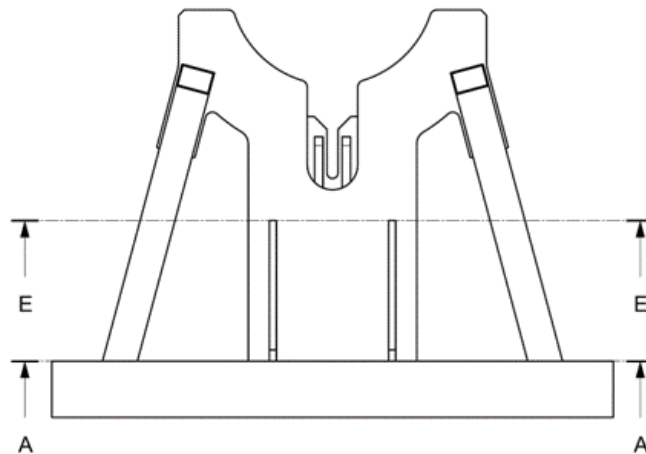
5.1.3 Tverrgående hulprofiler

Belastningen fra fremste krybbeplate fordeles jevnt over de fire tverrgående hulprofilene i fundamentet. Ved jevn fordeling beregnes annet arealmoment for en hulprofils tverrsnitt med formel 4.19. Med utgangspunkt i dette, er kritiske spenninger i tverrsnittet beregnet. Det vil oppstå både skjærspenninger og bøyespenninger i de tverrgående hulprofilene. Disse beregnes med formel 4.26 og 4.27. Videre beregnes von Mises-spenningen med formel 4.24. Von Mises-spenningene sammenlignes opp mot flytegrensen til konstruksjonsmaterialet for å få en indikasjon på om hulprofilene tåler belastningen.

Figur 5.4: *Tverrgående hulprofiler.*

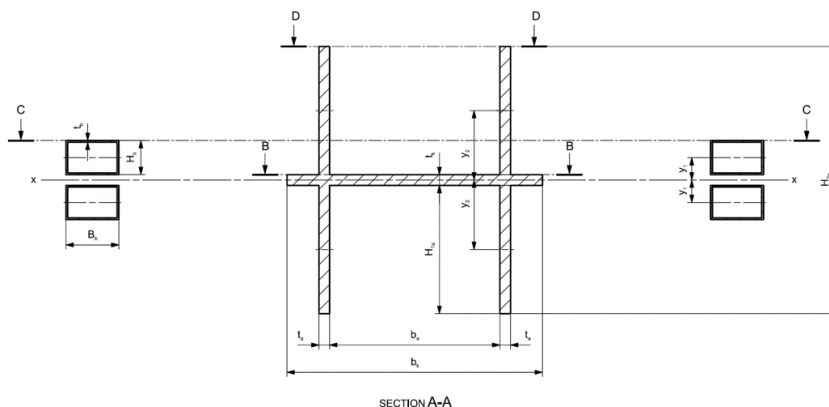
5.1.4 Krybbe

For å dimensjonere ut fra belastningen, fokuseres det på to snitt som anses å være mest kritiske på grunn av skarpe overganger i geometrien. Figur 5.5 illustrerer hvor de utvalgte snittene er plassert.

Figur 5.5: *Snitt i krybbe.*

Snitt A-A

Snitt A-A er lokalisert helt i overgangen mellom krybbe og fundament. Figur 5.6 illustrerer hvordan dette snittet er utformet. Krybbeplaten og avstiverene er sveiset med full gjennombrenning og annet arealmoment blir beregnet ut fra tverrsnittet. For hullprofilene vil ikke full gjennombrenning la seg gjøre og spenningene i dette snittet må betraktes som spenninger i kilsveis.

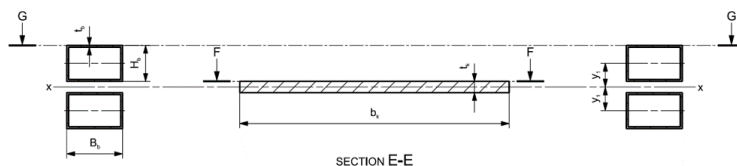


Figur 5.6: *Snitt A-A*.

Snittet er symmetrisk og annet arealmoment beregnes om nøytralaksen. Respektive formel fra kapittel 4 brukes i beregningen. Spenningene i tverrsnittet beregnes for posisjon B-B, C-C og D-D, som vist i figur 5.6. Fleraksede spenninger i disse områdene kombineres som von Mises-spenninger og sammenlignes opp mot materialets flytegrense.

Snitt E-E

Snitt E-E er lokalisert i overgangen mellom krybben og avstiverene i rammen. Dette tverrsnittet er illustrert i Figur 5.7.



Figur 5.7: *Snitt E-E*.

Metoden for beregning av dette tverrsnittet er lik metoden for snitt A-A, men beregningene må ikke ta høyde for spenninger i kilsveis.

Buling

Trykkbelastningen på fremste krybbeplate og dens utforming kan resultere i buling ved tilstrekkelig belastning. Eulerspenningen er beregnet med formel 4.28.

5.2 Resultat

Resultatene for overslagsberegningen er hentet fra beregningene gjort i vedlegg C. Disse presenteres i tabeller og diagrammer.

5.2.1 Moment og skjærkraft

Tabell 5.1 gir en oversikt over de opptredende kreftene på free-body-diagrammet illustrert i figur 5.1.

Tabell 5.1: *Opptredende krefter på rammen.*

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat [kN]
Tyngde av thruster	F_t	92,2
Reaksjonskraft ved opplager A	F_A	79,5
Reaksjonskraft ved opplager C	F_C	12,7
Reaksjonskraft ved krybbe BD	F_D	98,7
Reaksjonskraft ved krybbe CE	F_E	6,5

Momentresultatene for de tverrgående hulprofilene er presentert numerisk i tabell 5.2.

Tabell 5.2: *Moment i tverrgående hulprofiler.*

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat [kNm]
Moment ved A	M_A	0
Moment ved punkt 2	M_2	15,3
Moment ved punkt 3	M_3	30,6
Moment ved punkt 4	M_4	45,9
Moment ved punkt 5	M_5	61,2
Moment ved B_{max}	$M_{B,max}$	76,5
Moment ved B_{min}	$M_{B,min}$	47,5
Moment ved punkt 7	M_7	43,8
Moment ved punkt 8	M_8	40,1
Moment ved punkt 9	M_9	36,4
Moment ved punkt 10	M_{10}	32,7
Moment ved C	M_C	29,1

Momentet i krybbeplatene er presentert nummerisk i tabell 5.3.

Tabell 5.3: *Moment ved fremre og bakre krybbe.*

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat [kNm]
Moment ved D/E	$M_{D/E}$	0
Moment ved punkt 2	M_2	2,9
Moment ved punkt 3	M_3	5,8
Moment ved punkt 4	M_4	8,7
Moment ved punkt 5	M_5	11,6
Moment ved punkt 6	M_6	14,5
Moment ved punkt 7	M_7	17,4
Moment ved punkt 8	M_8	20,3
Moment ved punkt 9	M_9	23,2
Moment ved punkt 10	M_{10}	26,1
Moment ved B/C	$M_{B/C}$	29,1

5.2.2 Nedbøyning

Tabell 5.4 viser maksimal nedbøyningen som oppstår på rammen, illustrert i figur 5.3.

Tabell 5.4: *Nedbøyning av rammen.*

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat [mm]
Maksimal nedbøyning på AC	f_{AC}	3,2448
Maksimal nedbøyning på BD	f_{BD}	0,0023
Maksimal nedbøyning på CE	f_{CE}	0,0718

5.2.3 Spenninger i tverrgående hulprofiler

De opptredende spenningsene i de tverrgående hulprofilene er gitt i tabell 5.5. Tabellen viser spenningsene for hvert snitt og presenterer alle spenningsstypene.

Tabell 5.5: *Spenninger i tverrgående hulprofiler.*

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat [MPa]		
		Skjær	Bøy	von Mises
Posisjon A	σ_A	6	0	6
Posisjon 2	σ_2	0	35	35
Posisjon 3	σ_3	0	70	70
Posisjon 4	σ_4	0	105	105
Posisjon 5	σ_5	0	140	140
Posisjon B	σ_B	8	175	175
Posisjon 7	σ_7	0	100	100
Posisjon 8	σ_8	0	92	92
Posisjon 9	σ_9	0	83	83
Posisjon 10	σ_{10}	0	75	75
Posisjon C	σ_C	1	67	67

5.2.4 Buling i fremre krybbe

I tabell 5.6 er Eulerspenningen større enn halvparten av flytgrensen til materialet. Justert Eulerspenning er også illustrert.

Tabell 5.6: *Buling i fremre krybbe.*

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat [MPa]
Eulerspenning	σ_{EU}	12 456
Kritisk spenning	σ_{CR}	352

5.2.5 Spenninger i krybbe

Spenningene som oppstår i begge krybbene er gitt i tabellene nedenfor. På grunn av flerakset spenningstilstand, er alle opptredende spenninger i hvert snitt presentert i tabell 5.7 og 5.8.

Tabell 5.7: *Spenninger i fremre krybbe*

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat [MPa]			
		Skjær	Normal	Bøy	von Mises
Posisjon BB	σ_{B-B}	1	2	2	4
Posisjon C-C	σ_{C-C}	1	2	12	20
Posisjon D-D	σ_{D-D}	1	2	37	39
Posisjon F-F	σ_{F-F}	0	4	1	5
Posisjon G-G	σ_{G-G}	0	4	5	9

Tabell 5.8: *Spenninger i bakre krybbe.*

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat [MPa]			
		Skjær	Normal	Bøy	von Mises
Posisjon BB	σ_{B-B}	1	0,2	1	1
Posisjon C-C	σ_{C-C}	1	0,2	4	7
Posisjon D-D	σ_{D-D}	1	0,2	14	14
Posisjon F-F	σ_{F-F}	0	0,3	1	1
Posisjon G-G	σ_{G-G}	0	0,3	5	5

5.3 Diskusjon

I overslagsberegningene er det gjort antagelser som påvirker beregningene, og resultatene vil av den grunn ikke være uten avvik. I diskusjonsdelen er det av den grunn nødvendig å diskutere antagelsene gjort for de tverrgående hulprofilene og krybbeplattene.

5.3.1 Moment og skjærkraft

For å beregne moment og krefter i rammen er den forneklet i et free-body diagram. Kreftene på rammen er beregnet med utgangspunkt i thrusterens vekt. Tungdepunktet er kun estimert og gir ikke nødvendigvis rette resultater for moment og skjærkraft. Det er grunn til å tro at tyngdepunktets variasjon er tilstrekkelig liten til at resultatenes avvik ikke er for store.

5.3.2 Tverrgående hulprofiler

Ut fra overslagsberegninge så er det estimert at de tverrgående hulprofilene må minst være 180x100x6. Uten sikkerhetsfaktor vil spenningene som da oppstår ligge på 175 MPa som vist i tabell 5.5. Spenningene vil da ligge innenfor sikkerhetskravet til Kongsberg og Europeisk Standard [UNION, 2006].

For de tverrgående hulprofilene er det antatt at kreftene fordeler seg likt. Gitt rammens geometri, er det grunn til å tro at hulprofilene i midten vil belastes mer enn hva overslagsberegningene tilsier. Dette betyr at valgte dimensjoner for tverrgående hulprofiler kan være for svake, og etter mer omfattende styrkeberegning må dimensjonene økes. I beregningene er det isolert sett på de tverrliggende hulprofilenes snitt i belastningspunktet. Ved å gjøre dette utelukkes en viktig faktor i beregningen, det totale tverrsnittet inkludert krybbeplate med avstivere. De reelle spenningene vil dermed ikke oppstå midt på de tverrgående hulprofilene, men på utsiden av krybbeplaten og avstiverne.

5.3.3 Fremre krybbe

Det er i spenningsberegningene for krybbeplatene kun tatt hensyn til belastningen i kjøreretning. I et reelt tilfelle ville thrusterens egenvekt gradvis bidratt til å øke momentet i bunnen av krybbeplaten, etterhvert som krybbeplatene deformeres. Da dette er utelatt, vil faktiske spenninger trolig overstige de som er beregnet. Stor usikkerhet er også knyttet til angrepspunktet i slissesporene grunnet toleranseavvik og variasjon i plassering av thusterens løfteøyne. Øker avstanden fra fundamentet til slissesporet vil momentet og spenningen øke.

Resultatene viser at de høyeste spenningene opptrer ytterst på tverrsnittet til krybbeplaten. Gitt de skarpe overgangene fra avstivere til tverrliggende hulprofiler vil spenningene i dette området trolig være mye høyere. For å finne disse, vil det være nødvendig å foreta en FE-analyse da dokumentasjon for kjerrvirkning i et tilsvarende tilfelle ikke eksisterer. Spenningstoppene kan vise seg å være så store at det er behov for ytterligere forandringer på tverrsnittet, selv om det i overslagsberegningen ikke viser seg å være tilfellet. Selv om beregningene ikke tar høyde for spenningskonsentrasjoner, er det antatt at sikkerheten mot flyt i begge snittene vil være tilstrekkelig stor til å redusere arealet på tverrsnittet. Av den grunn fjernes hulprofilene på innsiden av krybbeplatene.

5.3.4 Bakre krybbe

For den bakre krybben er det gjort de samme antagelsene som i den fremre krybben. Den eneste forskjellen er at normalspenningene vil oppstå som strekkspenninger og ikke trykkspenninger. Kreftene som opptrer i denne krybben er vesentlig lavere og det vil dermed også oppstå vesentlig lavere spenninger i den bakre krybben. I realiteten vil belastningen på denne krybbeplaten påvirkes av de avstivende hulprofilene mellom krybbeplatene. Dette, kombinert med nedbøyningen, vil trolig gi høyere strekkspenninger i overgangen mellom avstivere og gaffellommer på baksiden av rammen.

5.3.5 Nedbøyning

En viktig faktor som beregningen av nedbøyning ikke inkluderer, er det varierende tverrsnittet for krybbeplatene og fundamentet. Nedbøyningsformlene i kapittel 4 inkluderer tverrsnittets bøyestivhet. Beregningene inkluderer kun bøyestivheten til det største tverrsnittet. Ved å utelukke variasjonen i bøyestivheten vil ikke resultatene i tabell 5.4 nødvendigvis være representativ for hvor store nedbøyningene faktisk blir. Nedbøyningen i elementærtilfellet for fritt opplagret bjelke tar ikke det lokale vrilmomentet fra fremre krybbeplate i betraktning. Vrilmomentet vil vri hulprofilene og gi fremre krybbeplate en større forflytning enn beregnet. Nedbøyningene presentert i resultatene er lave og mer nøyaktige beregninger for nedbøyningen vil trolig ikke gi noe kritiske verdier. I beregningene er belastningen på hulprofilene konsentrert i ett punkt, men i praksis vil lasten bli fordelt gjennom avstiverene. Dette vil ytterligere påvirke den faktiske nedbøyningen. Trolig vil dette resultere i lavere nedbøyning på grunn av det store området som stives av.

5.3.6 Buling

På grunn av strekkspenningene i bakre krybbeplaten, er det ikke nødvendig å sjekke denne for buling. Som resultatet i tabell 5.6 viser, er det heller ikke fare for buling i fremre krybbeplate, før de opptredende normalspenningene i krybbeplaten nærmer seg 352 MPa. Siden det i posisjon F-F i snitt E-E ikke er høyere normalspenninger enn 4 MPa, tabell 5.7, er det høy sannsynlighet for at det ikke vil opptre noen form for buling. Dette resultatet er troverdig med tanke på at plåtens tykkelse. Buling anses først og fremst å være kritisk for tynnere gods.

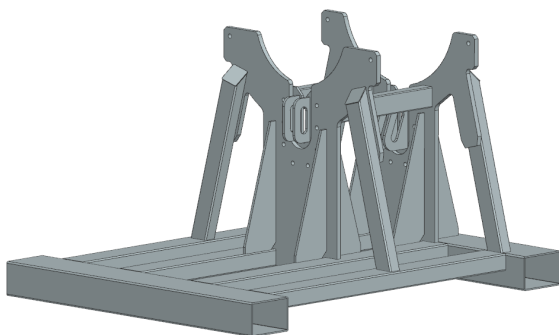
Kapittel 6

Optimaliseringsberegninger

I dette kapitlet vil metode og resultater for optimaliseringsberegningene bli presentert. Kapitlet begynner med metode hvor rammens geometri fra overslagsberegningene presenteres. Analysemodellen og betingelser for analysen blir så gjennomgått. Til slutt vil resultatene presenteres stegvis fra den iterative optimaliseringsprosessen. Før endelige dimensjoner presenteres i en tabell. Til slutt vil resultatene drøftes i diskusjonen.

6.1 Metode

Etter overslagsberegninger av thrusteramme med forenklete håndberegninger, er det nødvendig å optimalisere geometrien ved å utføre forenklete styrkeberegninger i en FE-analyse. Optimaliseringen tar hensyn til geometri som er utelatt i de forenklete håndberegningene. Dette gjør at spenningsbildets plassering og størrelse vil endre seg. Endringene kan gi økte spenninger og dermed et behov for å øke eller redusere noen av materialdimensjonene på rammen.



Figur 6.1: Rammemodell etter overslagsberegninger.

Grunnet lave spenninger for beregningene av krybbeplatene, er det valgt å fjerne de skråstilte hulprofilene som står på innsiden av krybbeplatene. I tillegg er det usikkert om det er tilstrekkelig plass mellom to hulprofiler for å oppnå en god sveis. Forandringen er vist i figur 6.1.

6.1.1 Geometri

Fra konseptfasen er det gjort forandringer på rammen med bakgrunn i overslagsberegningene. I tabell 6.1 er dimensjonene for rammen før optimaliseringsberegningene presentert.

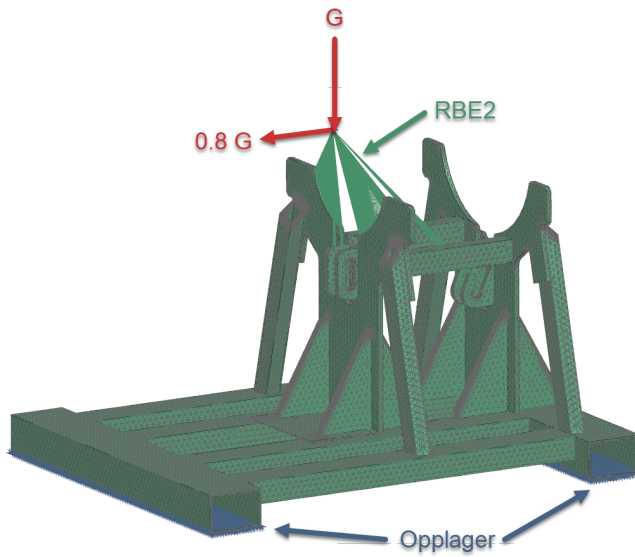
Tabell 6.1: *Dimensjoner før optimalisering.*

Del	Lengde [mm]	Høyde [mm]	Bredde [mm]	Tykkelse [mm]
Gaffellommer	2000	200	300	8
Tverrgående hulprofiler	1925	100	180	6
Krybbeplater	-	-	-	30
Avstivere	-	750	300	15
Skråstilte hulprofiler	1075	120	80	4
Adapterplater	-	-	-	16
Slissesporplater	-	-	-	16
Avstivende hulprofiler	775	120	80	6

6.1.2 Analysemodell

For at den iterative prosessen med optimaliseringsberegningen skal ta kortest mulig tid, er det nødvendig å foreta forenklinger av analysemodellen. Unødvendig geometri som bolthull, radiuser på hulprofiler og faser er fjernet. Komponentene i rammen består av sammenføyes slik at modellen blir en enhet. Dette eliminerer behovet for å simulere kontaktflater og boltforbindelser. Med forenklet geometri uten behov for simulering av kontaktflater og boltforbindelser, kan elementstrukturen i modellen være veldig grov. Grovere struktur gir kortere arbeidstid.

Figur 6.2 illustrerer forenklet modell med angitte elementer. I tillegg til CTETRA(10)-elementer på rammen, er det benyttet REB2-elementer for å simulere thrusterens kontaktpunkt til rammen. RBE2-elementene samles i thrusterens angitte tyngdepunkt. I tyngdepunktet er det påsatt punktkrefter. Punktkreftene simulerer tyngdekraften som virker på thrusteren samt belastningen på 0.8G i kjøreretning. Rammen er opplagret uten frihetsgrader på undersiden av gaffellommene. Dette skal tilsvare kontakten mellom ramme og lasteplan.



Figur 6.2: *Illustrasjon av forenklet analysemodell.*

Rammeelementene er angitt materialkonstanter som flytegrense, E-modul og possiontall for S355J2+N i simuleringen som presentert i tabell 2.3.

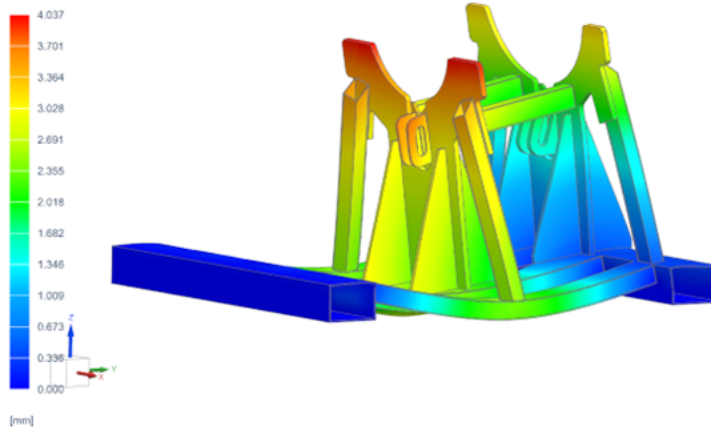
Tabell 6.2: *Elementer på optimaliseringsmodell.*

Del	Elementtype	Antall	Størrelse [mm]
Ramme	CTETRA(10)	978125	34
Thruster	RBE2	2	-

6.2 Resultat

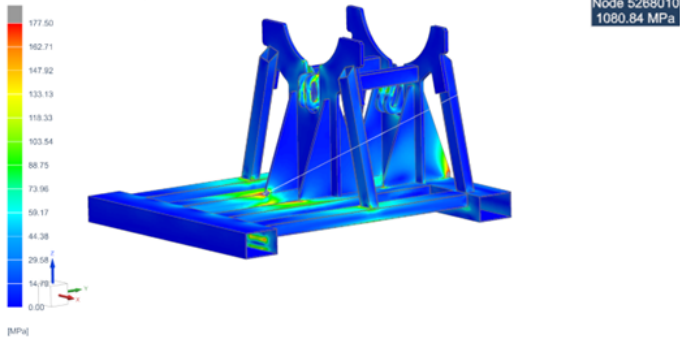
I den iterative prosessen fokuseres det på bestemte deler av rammen underveis i optimaliseringen. For hver analyse forandres valgte dimensjoner for å redusere spenningsbildet.

Frame_FEA_sim1 : Solution 1 Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Magnitude
Min : 0.000, Max : 5.417, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



(a) Nedbøyning

Frame_FEA_sim1 : Solution 1 Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Element-Nodal, Averaged, Von-Mises
Shell Section - Top
Min : 0.00, Max : 1080.84, Units = MPa
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



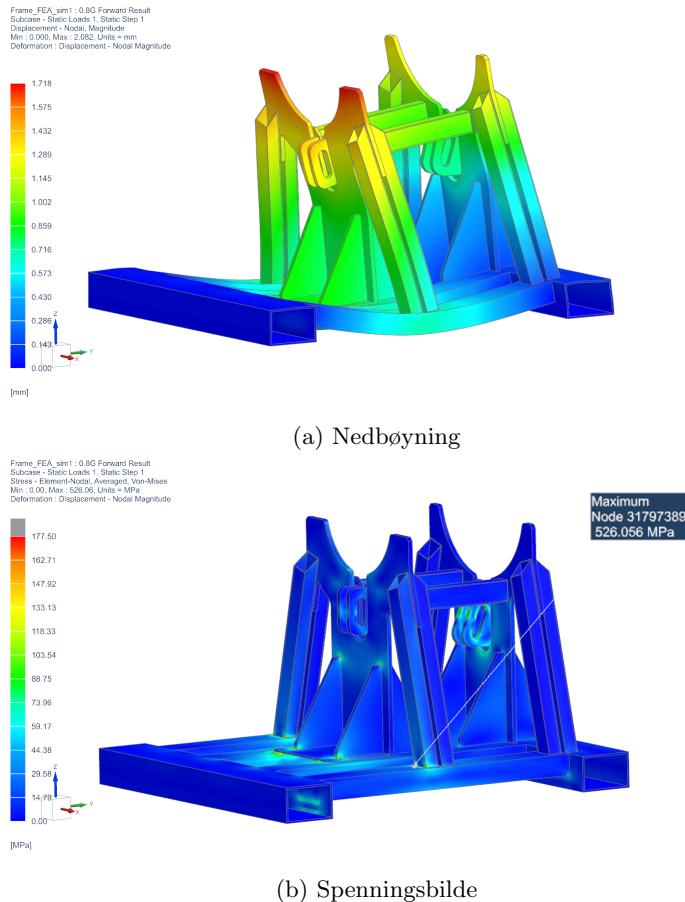
(b) Spenningsbilde

Figur 6.3: Første optimaliseringsberegning.

Før optimaliseringen viser første analyse på figur 6.3 at rammen har største forflytning på 4,04 mm. Største spenning i et punkt er 1080,84 MPa.

6.2.1 Nye dimensjoner

Den iterative optimaliseringsprosessen er dokumentert i vedlegg O. Fra møtet i vedlegg M ble det avklart at det ikke vil være noe problem å benytte skråstilte hulprofiler på begge sider av krybbeplatene. Som illustrert i figur 6.4, ble de skråstilte hulprofilene lagt til underveis i optimaliseringen.



Figur 6.4: Resultat av optimaliseringberegning.

Figur 6.4 viser endringen i nedbøyning og høyeste spenninger som oppstår på den optimaliserte rammen. Etter optimaliseringen er største forflytning redusert fra 4,04 mm til 1,72 mm. Maksimal spenning er redusert fra 1080,84 MPa til 526,06 MPa. Spenningen er ikke under kravet, men oppstår kun i enkelte punkter på grunn av singularitet i analysen.

Tabell 6.3: Dimensjoner etter optimalisering.

Del	Lengde [mm]	Høyde [mm]	Bredde [mm]	Tykkelse [mm]
Gaffellommer	2000	200	300	10
Tverrgående hulprofiler	1925	120	200	8
Krybbeplater	-	-	-	25
Avstivere	-	500	300	30
Skråstilte hulprofiler	1075	120	80	4
Adapterplater	-	-	-	16
Slissesporplater	-	-	-	30
Avstivende hulprofiler	775	120	80	6

Tabell 6.3 viser en oversikt over nye dimensjoner for de forskjellige rammedelene etter fullførte optimaliseringsberegninger.

6.3 Diskusjon

Ved å bygge på samme lasttilfelle som overslagsberegningene, vil optimaliseringsberegningene være sammenlignbar med tidligere resultat. Resultatene fra optimaliseringen viser behov for å forandre dimensjoner fastsatt av overslagsberegningene. Dette viser resultatet av antagelser og forenklinger gjort i overslagsberegningene. Usikkerhetene finnes også i optimaliseringsberegningene, som et resultat av forenklinger i modellen og lasttilfellet.

6.3.1 Tverrgående hulprofiler

Resultatene for største nedbøyning og von Mises-spenning fra overslagsberegningene vises nedbøyning på 3,25 mm i tabell 5.4 og største spenning på 175 MPa i tabell 5.5. Fra optimaliseringsberegningene og figur 6.3a og 6.3b viser en nedbøyning på 2,70 mm og spenninger på 180,13 MPa.

Flere faktorer gir lavere nedbøyning i optimaliseringsberegningene. Som illustrert i figur 6.3 er gaffellommene fast innspent på undersiden. Dette vil redusere nedbøyningen av tverrliggende hulprofiler. Overslagsberegningene bygger på fritt opplagrede bjelker. Modellen for overslagsberegningene betrakter en belastning som virker i et punkt. Optimaliseringsberegningene tar hensyn til sverrstnittet med avstivere. Avstiverne som er festet i krybbeplaten og fundamentet er med på å stive av fundamentets tverrstnitt og redusere nedbøyningen ytterligere.

Mens nedbøyningen er lavere for optimaliseringsbereningen er høyere spenninger observert i samme tilfelle. Optimaliseringsberegningene gir en mer naturlig fordeling av belastningen mellom diagonale hulprofiler og krybbeplaten med avstivere. En større del av belastningen tas opp i hulprofilene midt på fundamentet. Slik oppstår større momenter og derav større spenninger i midten av fundamentet. Overslagsberegningen baserer seg på lik lastfordeling på alle fire hulprofiler i fundamentet. Faste innspente gaffellommer bidrar til lavere moment i fundamentet sammenlignet med fritt opplagrede bjelker og forklarer hvorfor spenningsforskjellen ikke er større enn 5 MPa.

6.3.2 Fremre krybbe

For fremste krybbe er det fra overslagsberegningene funnet en nedbøyning på 0,0023 mm, tabell 5.4. Høyeste von Mises-spenning for krybbeplaten er 39 MPa, hentet fra tabell 5.7. For samme område er det observert en nedbøyning på 3 mm og en spennings-topp på 996,29 MPa samt gjennomsnittlige spenninger på 164,94 MPa i FE-analysen.

Store forskjeller skiller nedbøyningen mellom overslagsberegningene og optimaliseringsberegningene. Overslagsberegningen betrakter samme tverrsnitt gjennom hele nedbøyningen. Dette gir en betydelig sterkere konstruksjon sammenlignet med hvordan tverrsnittet faktisk forandrer seg fra fundamentet og opp til øverste del av krybbeplaten i modellen. Ved redusert tverrsnitt vil krybbens bøyestivhet reduseres og nedbøyningen øker som vist i formlene i kapittel 4.2. Etterhvert som krybbeplaten forskyves i kjøreretning vil normalkraften gradvis få større arm som igjen gir ekstra moment og forskyvning av krybbeplaten. Høyere nedbøyning skyldes også vridning i fundamentet som følge av momentet i punkt B. Dette tas det heller ikke hensyn til i overslagsberegningene. Uten de avstivende hulprofilene mellom krybbeplatene, ville forflytningen vært enda større.

Spennignstoppen på 996,29 MPa skyldes singularitet og kan ignoreres. Ved å redusere elementstørrelsen vil det være mulig å foreta mer nøyaktige beregninger, og sjansen for at det oppstår singulariteter reduseres. Fremdeles er spenningene høyere i resultatet fra optimaliseringsberegningene. Dette skyldes blant annet den skarpe overgangen fra avstiver til fundamentet. En slik overgang vil gi høye spenninger under belastning. I tillegg er ikke fundamentet uendelig stivt, noe som blir antatt i overslagsberegningen. I realiteten vil deformeringen og høyere momenter forsterke spenningene.

6.3.3 Bakre krybbe

Fra tabell 5.4 har bakre krybbeplate en nedbøyning på 0,07 mm. Største spenning er beregnet til 14 MPa i overgang fra avstiver til fundament. Optimaliseringsberegningene gir større verdier. Forflytningen er 1,63 mm og største spenning er 344,61 MPa med gjennomsnittspenninger på 158,16 MPa.

Forskjellen mellom nedbøyningverdiene skyldes i stor grad samme faktorer som for fremste krybbeplate. På grunn av hulprofilene som kobler krybbeplatene sammen, vil belastningen på fremste krybbeplate påvirke bakre. Forflytningen hadde også blitt større om rammen var fritt opplagret fremfor fast innspent. Da ville nedbøyningen av fundamentet påvirket total nedbøyning på bakerste krybbeplate.

Spenningsforskjellene mellom overslag og optimalisering skyldes blant annet geometrien. I de skarpe overgangene som utsettes fra strekk, vil kjervvirkning gi spenningstopper. Slik kjervvirkning blir ikke tatt hensyn til i overslagsberegningene. En annen faktor er at opplagringen påvirker dette resultatet i likhet med foregående resultater. Gaffellommen vil virke som et stivt hjørne som ikke kan vrís. Deformasjonen begrenses og forflytningen til krybbeplatene vil forsøke å rive avstiverene av gaffellommen.

6.3.4 Simplifisering av lasttilfelle

Det er i optimaliseringsberegningene gjort forenklinger som vil påvirke resultatet. Forenklingene er gjort både i geometri og lasten påført modellen.

Geometrisk er det selve modellforenklingen og elementstørrelsen som påvirker resultatet. Ved å sammenføye adapterplatene med rammemodellen vil disse gi et større bidrag til krybbeplatenes styrke og tverrsnitt. Med boltforbindelse vil krybbeplatene bøye seg uavhengig av selve adapterplaten på utsiden av boltforbindelsene. Nedbøyningen kan potensielt være en del høyere enn hva optimaliseringsmodellen gir. For spenningsresultatene er elementstørrelsen avgjørende. Store elementer gir dårligere resultat som følge av store avstander mellom punktene. Eventuelle belastninger som oppstår mellom punktene blir dermed utelatt i simuleringen av dataprogrammet. Med mindre elementer vil denne usikkerheten reduseres og resultatene gir mer nøyaktige verdier.

Kontakten mellom RBE2-elementene, krybbeplatene og slissesporene gir en sterk forenkling av det faktiske lasttilfellet. Elementene som er festet til fremste krybbeplate vil fordele kraften som er angitt over hele kontaktområdet. Dette vil gi lavere spenninger enn hva som vil oppstå når thrusteren hviler på krybbene. Siden RBE2-elementene er uendelig stive, vil de opptre lokale momentet i alle element de er festet til. Dette vil forårsake strekk i geometrien som ikke vil strekkes i et reelt tilfelle. Kontaktflatene i slissesporene er større enn hva som er reelt når låsesylinderen kommer i kontakt med slissesporene. Spenningene som er observert i slissesporene kan av den grunn være lavere enn hva som vil oppstå i en analyse med låsesylinder og thruster.

Fast innspent opplagring i bunnen av gaffellommene vil gi konservative resultater, men vil ikke være mulig i virkeligheten. Rammen vil bøyes ned om innerhjørnene til gaffellommene og oppføre seg som en fritt opplagret bjelke.

Kapittel 7

Lastberegning

I dette kapitlet vil metode og resultater for lastberegningene bli presentert. I metoddelen vil rammens geometri fra optimaliseringsberegningen presenteres. Analysemodellens elementer og modellbetingelser vil forklares, etterfulgt av en presentasjon av lasttilfellene. Deretter vil resultatene presenteres for hver av belastningstilfellene. I diskusjonen vil resultatene drøftes.

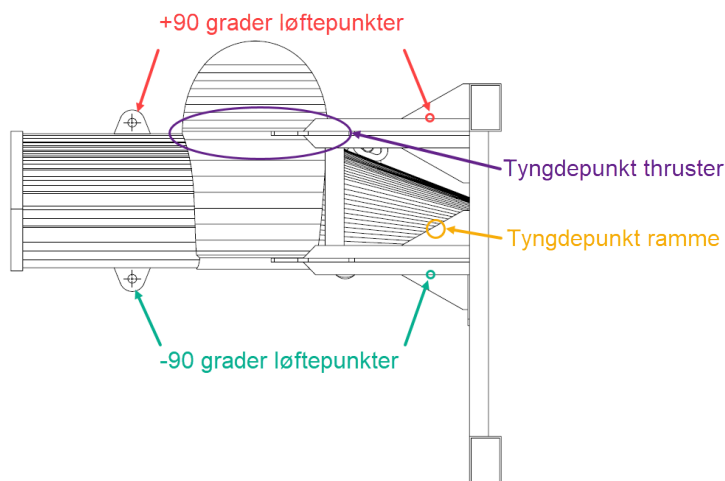
7.1 Metode

Etter optimaliseringsberegningene av rammen, er det til slutt nødvendig å foreta mer detaljerte analyser som tar for seg hvert enkelt lasttilfelle. Dette gjøres for å kartlegge eventuelle, kritiske, spenninger som kan oppstå utenfor det verst tenkelige lasttilfellet. Observeres spenninger utenfor tillatt grense, vil det være nødvendig å utføre geometriske forandringer etterfulgt av nye analyser.

7.1.1 Geometri

Rammemodellen som brukes i lastberegningene bygger på resultatene fra optimaliseringsprosessen, men adapterplatene med slissespor er ikke sammenslått med resten av rammen. I tillegg er en forenklet modell av thrusteren lagt inn i modellen slik at en realistisk simulering med kontaktflater kan utføres. Propellaksel med blader er fjernet fra modellen for å redusere analysetiden. Forenklede modeller av låsesylindrene er også lagt inn slik at thrustermodellen er festet til rammen som tiltenkt.

For lasttilfellene på verkstedet, vil thrusterens tyngdepunkt endre seg som følge av at girhus, aksel og lager er eneste komponenter på rammen. Posisjonen til det nye tyngdepunktet er ikke kjent, men etter samtale med Mikko Knuuti, vedlegg N, er det antatt å være innenfor lilla ellipse illustrert i figur 7.1. Med bakgrunn i thrusterens vekt og posisjonen til de forskjellige tyngdepunktene, er det bestemt at løfteøynene skal plasseres 250 mm over fundamentet.



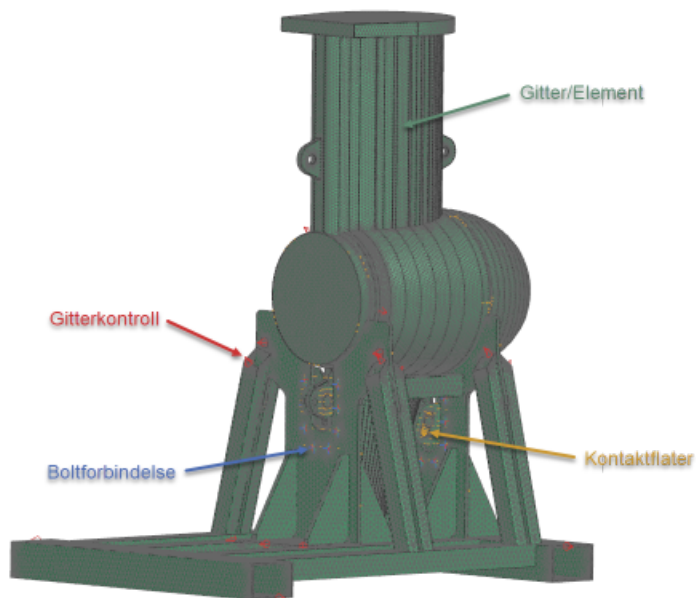
Figur 7.1: Løftepunkter og tyngdepunkt.

For å simulere løftetillfellene er det lagt inn løfteøyne på thrusteren og punkt for opplagring på lasterammen som vist i figur 7.1.

7.1.2 Analysemodell

I analysemodellen er det benyttet CTETRA(10) 3D-elementer. Disse elementene består av 10 numeriske punkt som gir nøyaktig resultat i analysen. Det er valgt forskjellig elementstørrelse på geometrien for å unngå konflikter i modellen, samt øke resultatenes nøyaktighet. I tillegg til angitt elementstørrelse, er det brukt elementkontroll for å overstyre elementgenereringen i områder hvor det er behov for mindre elementstørrelse enn først angitt. Disse kan brukes i områder hvor det oppstår feil i elementene eller en mer nøyaktig beregning i et område er ønskelig. Modellen består av totalt 907443 CTETRA(10) elementer.

For å simulere boltforbindelsen mellom ramme og slisseplatene, er det benyttet RBE3-elementer som simulere skivene og PBARL3-elementer som selve boltene.



Figur 7.2: Analysemodell for lastberegninger.

For å simulere kontakttflater mellom thruster, låsesylindre, adapterplater og ramme, er det angitt hvilke flater som vil være i kontakt og hva friksjonskoeffisienten mellom disse er. For denne analysen er det valgt en friksjonskoeffisient på 0,2 fra vedlegg E, erfaringsverdier fra Kongsberg Maritime. Slik vil programmet kunne simulere forskjellige komponenters påvirkning på hverandre.

Tabell 7.1: Elementer på lastmodell.

Del	Elementtype	Antall	Størrelse [mm]
Ramme	CTETRA(10)	643984	32
Adapterplater	CTETRA(10)	51995	34
Låsesylindere	CTETRA(10)	9559	18
Thruster	CTETRA(10)	201905	20
Skiver	RBE3	32	-
Bolt	PBARL3	16	-

Alle komponenter er angitt med materialkonstanter som flytegrense, E-modul og poisson tall for S355J2+N i simuleringen, presentert i tabell 2.3.

Siden thrustermodellen er solid, vil ikke den ha rett angitt masse i simuleringen. For å angi riktig masse, er det angitt materialer med massetetthet tilpasset modellens volum. Det er kjent at fullstendig thruster med propellblader veier 9400 kg. Ved løfteoperasjon veier girhus med lager og propellaksel 2570 kg, vedlegg I. Tabellen 7.2 viser en oversikt over massetettheten som er angitt for modellen i de forskjellige lasttilfellene.

Tabell 7.2: Thrustermasse for lastberegninger.

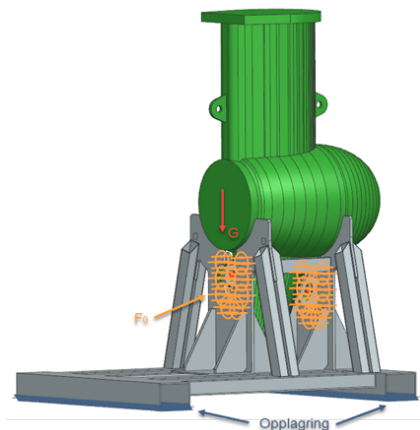
Tilfelle	Vekt [kg]	Modellvolum [m ³]	Massetetthet [$\frac{kg}{m^3}$]
Full vekt	9400	1,25	7524
Redusert vekt	2570	1,25	2056

7.1.3 Lasttilfellene

Lasttilfellene er inndelt i tre situasjoner. Første situasjon er ved lagring av thrusteren, lasttilfelle 1. Den andre situasjonen er transport og gjelder lasttilfelle 2, 3 og 4. Lasttilfelle 5 og 6 omhandler løftesituasjoner på verkstedet. Boltforbindelsen mellom adapterplatene med slissespor og rammen, er forspent etter boltberegninger gjort i vedlegg A. Dette gjelder alle lasttilfellene

Lasttilfelle 1

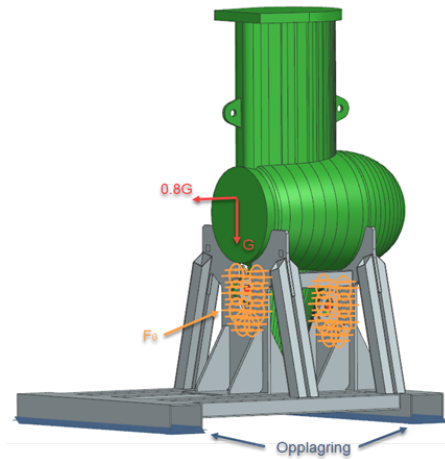
For første lasttilfelle er det lagt inn tyngdekraft i simuleringen. Denne tyngdekraften vil virke på thrusteren og rammens masse og geometri. Simuleringen er begrenset med en fast opplagring på undersiden av gaffellommene for å simulere overflaten rammen står på.



Figur 7.3: Første lasttilfelle.

Lasttilfelle 2

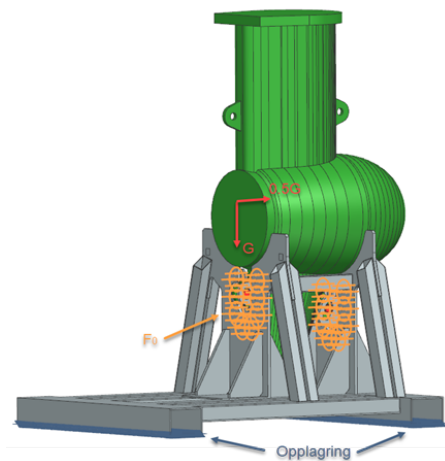
Andre lasttilfelle tilsvarer første lasttilfelle, utsatt for 0,8G i kjøreretning i henhold til transportsregelverket.



Figur 7.4: Andre lasttilfelle.

Lasttilfelle 3

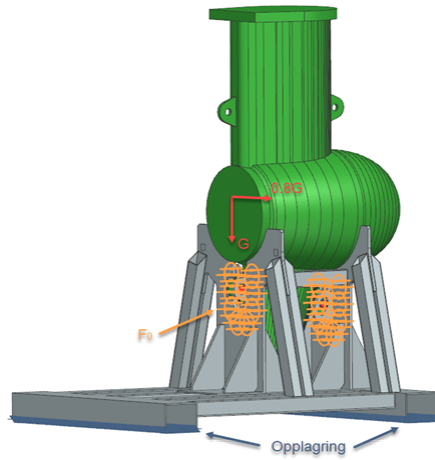
Tyngdekraft, forspenning og opplagring fra første lasttilfelle er også likt for tredje. Belastningen mot kjøreretning er 0.5G.



Figur 7.5: Tredje lasttilfelle.

Lasttilfelle 4

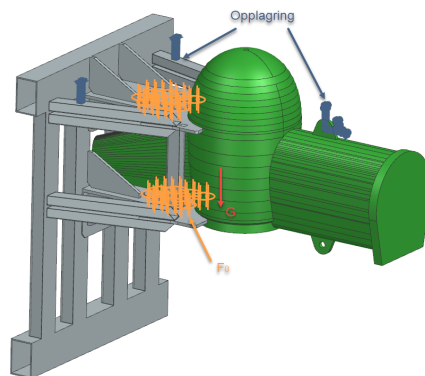
Siste lasttilfelle for transport tilsvarer første lasttilfelle, utsatt for 0,8G sideveis.



Figur 7.6: Fjerde lasttilfelle.

Lasttilfelle 5

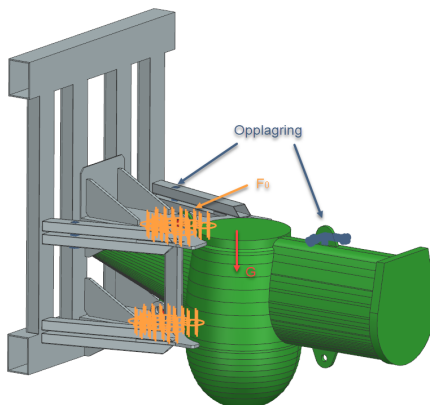
For femte lasttilfelle virker kun tyngdekraften. Ramme og thruster er opplagret i respektive løftepunkter under $+90^\circ$ rotasjon.



Figur 7.7: Femte lasttilfelle.

Lasttilfelle 6

Sjette lasttilfelle er tilsvarende som femte lasttilfelle, men ramme og thruster roteres -90° .



Figur 7.8: Sjette lasttilfelle.

7.1.4 Boltforbindelse

På grunn av potensielle belastninger ved transport og løft, må boltforbindelsene som kobler adapterplatene til rammen sjekkes med boltberegninger. For boltforbindelsene er det valgt M24x75 bolter med materialkvalitet 8.8.

Opptredende krefter

For å oppnå sikkerhet mot flyt på 2 i boltene, velges det at forspenningen skal gi aksielle spenninger tilsvarende 40% av strekkgrænse. Med dette bestemt, beregnes boltens forspenning med formel 4.31.

Det er brukt erfaringsbaserte verdier for deformasjonsforholdet. Mellom adapterplater og ramme, vil det ikke være noe pakning, men stål mot stål. Fra tabell 4.1 vil deformasjonsforholdet ligge mellom 2-3. Etter at forspenningskraften og deformasjonsforholdet er bestemt, beregnes total aksial kraft ut fra F - δ -diagrammet illustrert i figur 4.19.

Tiltrekkingsmoment

Boltene er tenkt smurt med Gleitmo 805, et oljebasert smøremiddel, for å redusere friksjonen i gjengene. Ved smøring reduseres friksjonsfaktoren fra 0,2 til 0,08 i gjengene som presentert i vedlegg E. Nødvendig tiltrekningsmoment beregnes deretter ut med relevante formler i kapittel 4.

Opptredende spenninger

Formel 4.38 og 4.39 brukes for å beregne strekk- og torsjonsspenningene i boltene. Data for beregning av metriske skruer er hentet fra tabell 7.3.

Tabell 7.3: Data for metriske skruer hentet fra ISO 898-1:2013 [ISO, 2013].

Størrelse	Stigning [mm]	Spenningsareal [mm ²]	Lillediameter [mm]
M3	0,50	5,0	2,387
M4	0,70	8,8	3,141
M5	0,80	14,2	4,019
M6	1,00	20,1	4,773
M8	1,25	36,6	6,466
M10	1,50	58,0	8,160
M12	1,75	84,3	9,853
M14	2,00	115,0	11,550
M16	2,00	157,0	13,550
M18	2,50	192,0	14,930
M20	2,50	245,0	16,930
M22	2,50	303,0	18,930
M24	3,00	353,0	20,320
M30	3,50	561,0	25,710
M36	4,00	817,0	31,090
M42	4,50	1120,0	36,480

Skjærspenningene og von Mises-spenningene som oppstår på grunn av skjærkrefene i skruene, beregnes med formel 4.40 og 4.41.

Hullflatetrykk

Hullflatetrykket beregnes med utgangspunkt i formel 4.42. Minste og største diameter bestemmes ut fra skivene som velges for M24 boltene. Skivene i boltforbindelsen vil gi lave verdier for hullflatetrykk da trykket blir fordelt over et større areal. Videre sammenlignes hullflatetrykket med erfaringsverdiene i tabell 4.2.

7.2 Resultat

Under lastberegningene fokuseres det på å kartlegge belastninger i rammen, adapterplatene og låseskruene. Alle komponentene spiller en viktig rolle for rammens styrke og sikkerhet. For hvert lasttilfelle hentes det ut relevante resultater hvor de mest kritiske belastningene oppstår. Resultatene presenteres i skjermbilder fra Siemens NX.

På skjermbildene for forflytning, illustrerer fargeskalaen hvor stor forflytningen er for de forskjellige områdene på rammen. I noen av tilfellene avviker største verdi som står i går skrevet øverst til venstre på bildene, med høyeste verdi angitt på fargeskalaen. Dette skyldes at det fokuseres kun på rammens forflytning og ikke thrusteren og låsesylindrene.

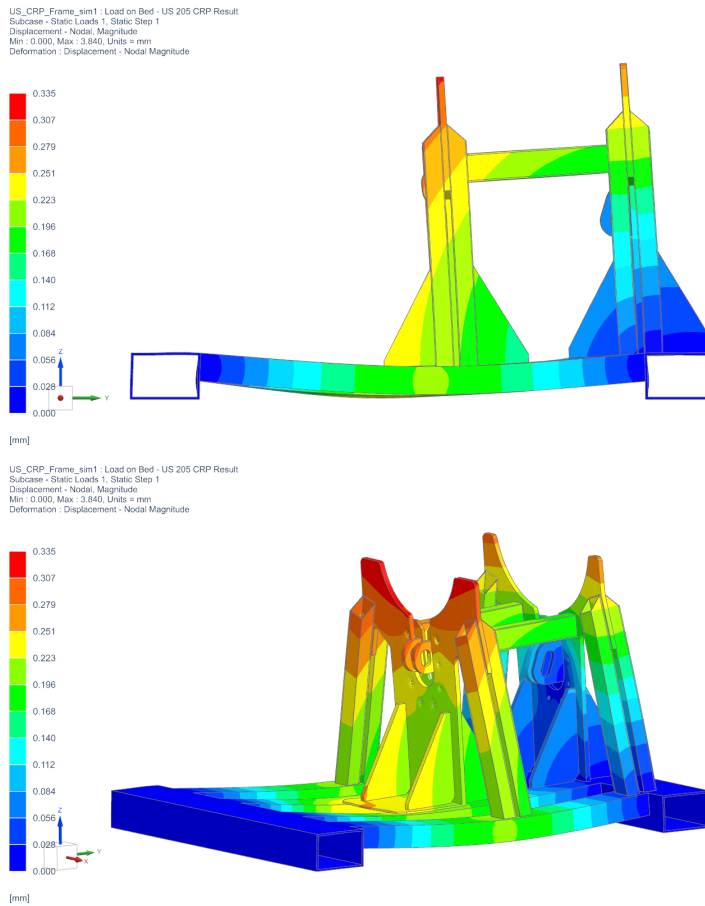
Fargeskalaen for von Mises spenningene er også forandret. Slik viser skalaen alle områder med spenning høyere enn 177,5 MPa som grå områder på modellen. Slik er det lettere å se hvor spenningstoppe befinner seg og presentasjon av resultatet blir mer oversiktlig. For von Mises-spenningene er det valgt "Element Nodal - Averaged" for at spenningene skal glattes ut på modellen og gi en gjennomsnittsverdi for alle punkt hvor verdier for hver element mangler.

7.2.1 Lasttilfelle 1

Som det minst kritiske belastningstilfellet, kartlegges kun rammens deformasjon og von Mises spenning.

Forskyvning

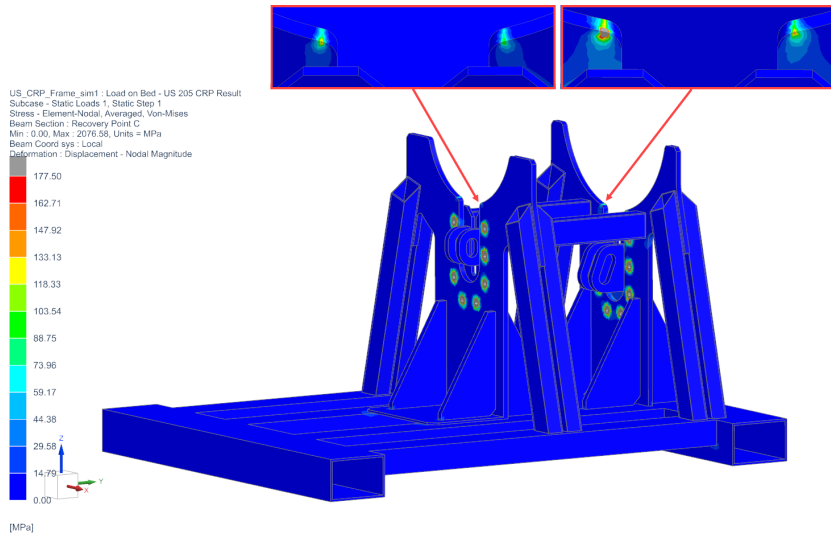
Figur 7.9 viser rammens deformasjon under belastning av thrusterens egenvekt. Største forflytning, lokalisert på fremste krybbeplate, er 0,34 mm.



Figur 7.9: Deformasjon av rammen ved første lasttilfelle.

von Mises

Kun små områder hvor girhuset hviler på rammen, viser opptredende spenninger. Som illustrert på figur 7.10 er et lite område på bakerste krybbeplate grått.



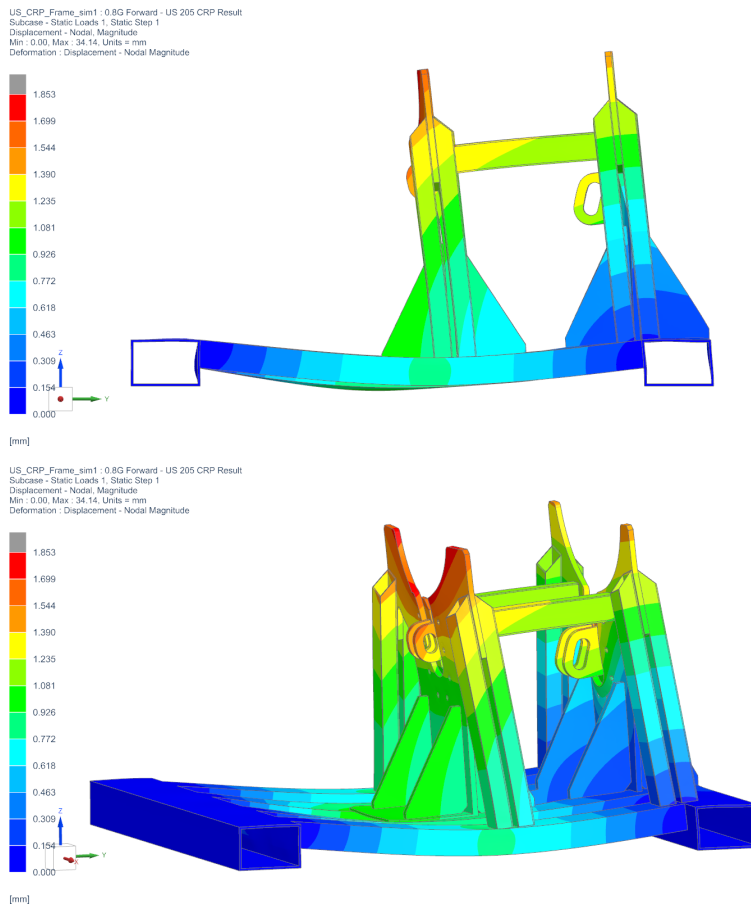
Figur 7.10: *von Mises* spenninger.

7.2.2 Lasttilfelle 2

Ved andre lasttilfelle er det behov for å kartlegge spenningene som virker i låsesylindrene i tillegg til vanlig forskyvning og von Mises-spenninger. Dette gjøres for å sjekke om låsesylindernes dimensjoner er tilstrekkelige for trygg sikring av thrusteren.

Forskyvning

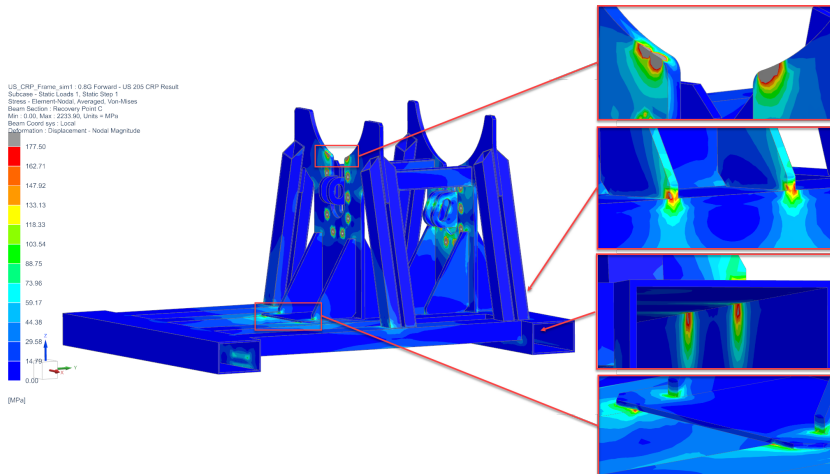
Ved belastning på 0.8G øker rammens største forflytning til 1.85 mm, som vist i figur 7.11.



Figur 7.11: Deformasjon av rammens ved andre lasttilfelle.

von Mises

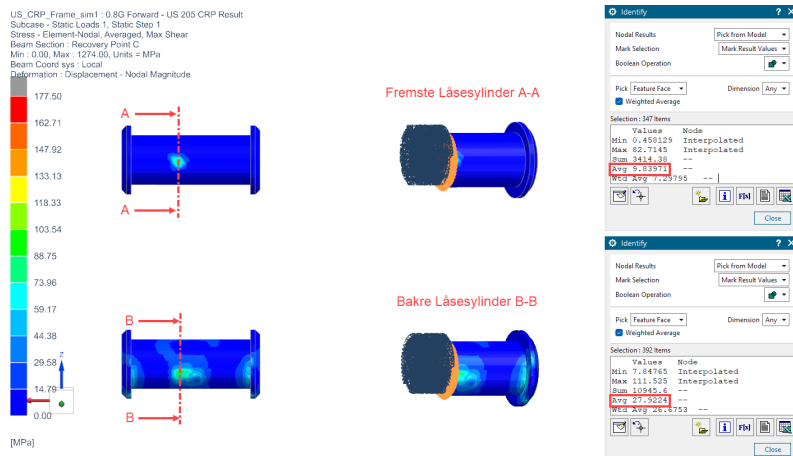
Det er observert fire kritiske spenningsområder på rammen, som illustrert i figur 7.12.



Figur 7.12: von Mises spenninger.

Skjærspenning i låsesylinder

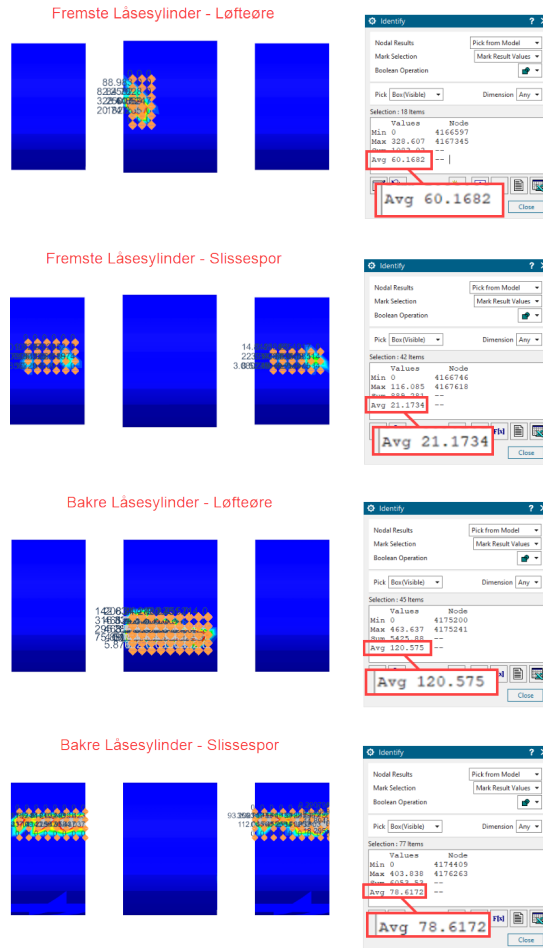
Bakerste låsesylinder utsettes for de største skjærspenningene med en gjennomsnittlig verdi på 27.92 MPa, som vist i figur 7.13



Figur 7.13: Skjærspenninger i låsesylinder.

Overflatetrykk på låsesylinder

Figur 7.14 viser en oversikt over overflatetrykkene som låsesylinderene utsettes for i gjeldende belastningstilfelle. Største overflatetrykk på 120.56 MPa er registrert på bakerste låsesylinder.



Figur 7.14: Overflatetrykk på låsesylinder.

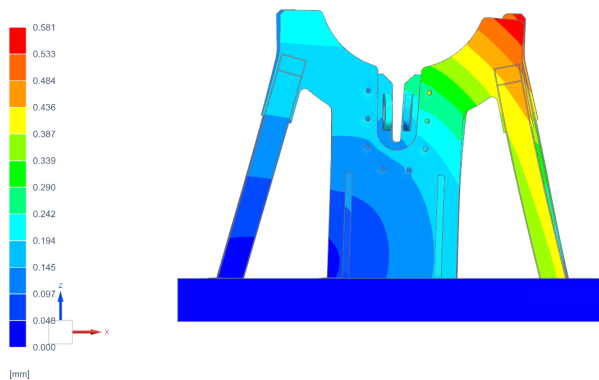
7.2.3 Lasttilfelle 3

Under tredje lasttilfelle vil sideveis belastning resultere i at låsesylindrene ikke belastes i stor grad, da bevegelsen skjer i sylindrens lengderetning. Selv om belastningen er like stor i andre tilfelle, vil ikke det være like kritisk på grunn av rammens motstandsmoment i sideveis retning.

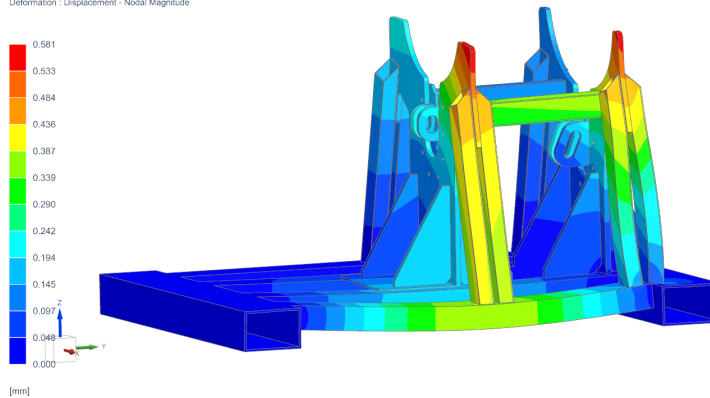
Forskyvning

Fra figur 7.15 har rammen en forflytning på 0.58 mm sideveis.

US_CRP_Frame_sim1 : 0.8G Sideways - US 205 CRP Result
Subcase = Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal Magnitude
Min = 0.00, Max = 14.89, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



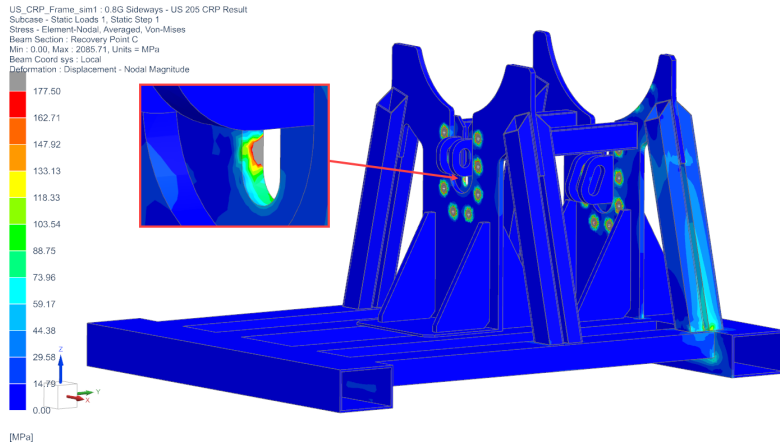
US_CRP_Frame_sim1 : 0.8G Sideways - US 205 CRP Result
Subcase = Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal Magnitude
Min = 0.00, Max = 14.89, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Figur 7.15: Deformasjon av rammen ved tredje lasttilfelle.

von Mises

Under den sideveis deformasjonen vil spenningstopper ligge i sporet på adapterplatene. På fremste adapterplate er det observert spenninger over 177.5 MPa. Disse skyldes trykk fra løfteøyet på girhuset når dette vrir seg i krybben.



Figur 7.16: von Mises spenninger.

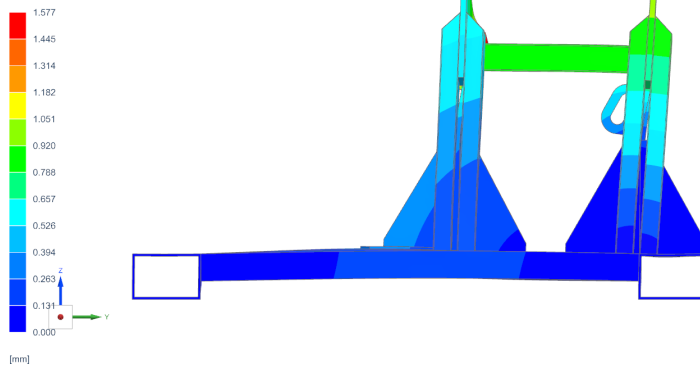
7.2.4 Lasttilfelle 4

Som i andre lasttilfelle, må skjærspenninger og overflatetrykk undersøkes i låsesylindrene. Låsesylindrene utsettes for skjær. Foskyvning og von Mises-spenninger kartlegges som vanlig.

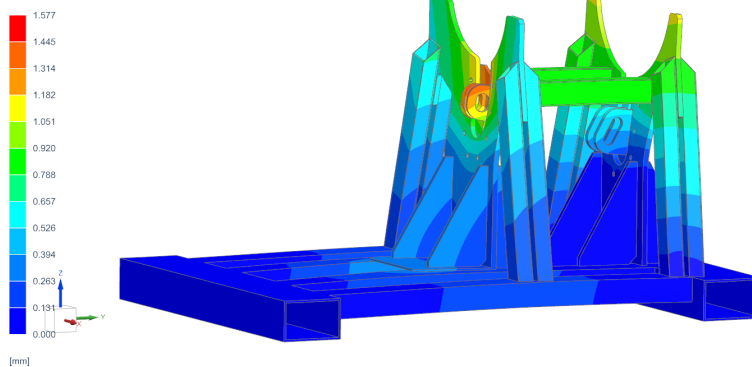
Forskyvning

Belastet med 0.5G mot kjøreretning, er største forflytning på rammen 1.58 mm. Den største forflytningen befinner seg i toppen av fremste adapterplate som vist i figur 7.17 under.

US_CRP_Frame_sim1 : 0.5G Backward - US 205 CRP Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal Magnitude
Min : 0.00, Max : 58.58, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



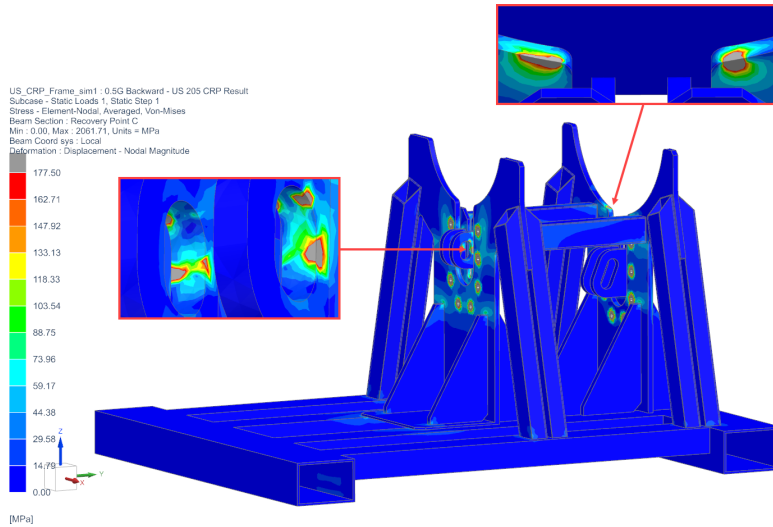
US_CRP_Frame_sim1 : 0.5G Backward - US 205 CRP Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal Magnitude
Min : 0.00, Max : 58.58, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Figur 7.17: Deformasjon av rammen ved fjerde lasttilfelle.

von Mises

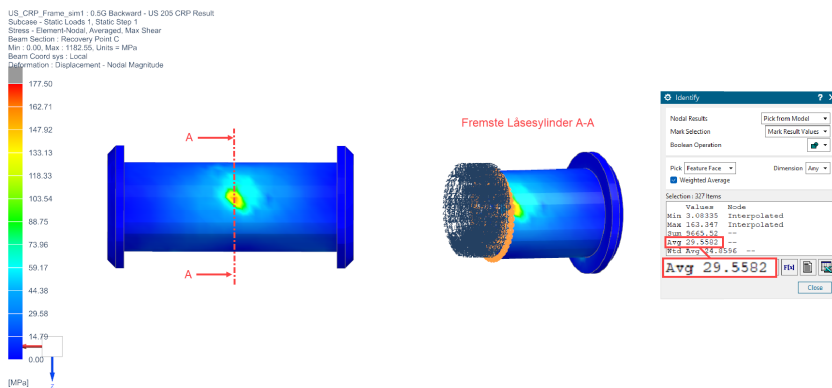
Figur 7.18 illustrerer hvor spenningsstoppene ligger. På både krybbeplate og slissespor er det trykkspenninger.



Figur 7.18: von Mises spenninger.

Skjærspenning i låsesylinder

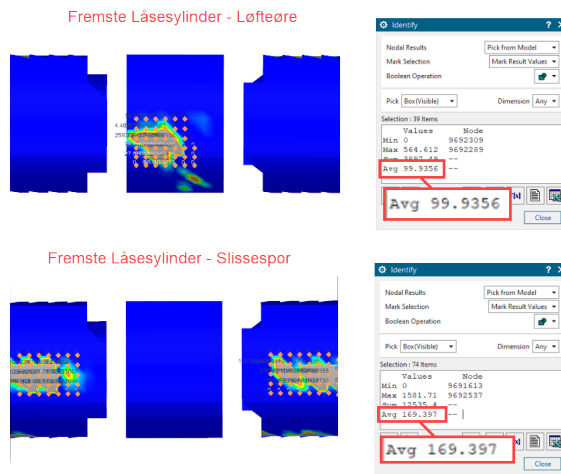
Belastningstilfellet vil gir skjærbelastning på låsesylinderen. Figur 7.19 viser at største gjennomsnittlig skjærspenning er 29.56 MPa, høyere enn i andre lasttilfelle.



Figur 7.19: Skjærspenninger i låsesylinder.

Overflatetrykk på låsesylinder

Belastningene på bakerste låsesylinder er så lav at det ikke er tatt med i figur 7.20. De kritiske spenningene er å finne i fremste låsesylinder. Største overflatetrykk er 169.40 MPa fordelt på kontaktflaten mellom låsesylinder og slissespor. Dette er innenfor, men nært maksimal tillatt spenning.



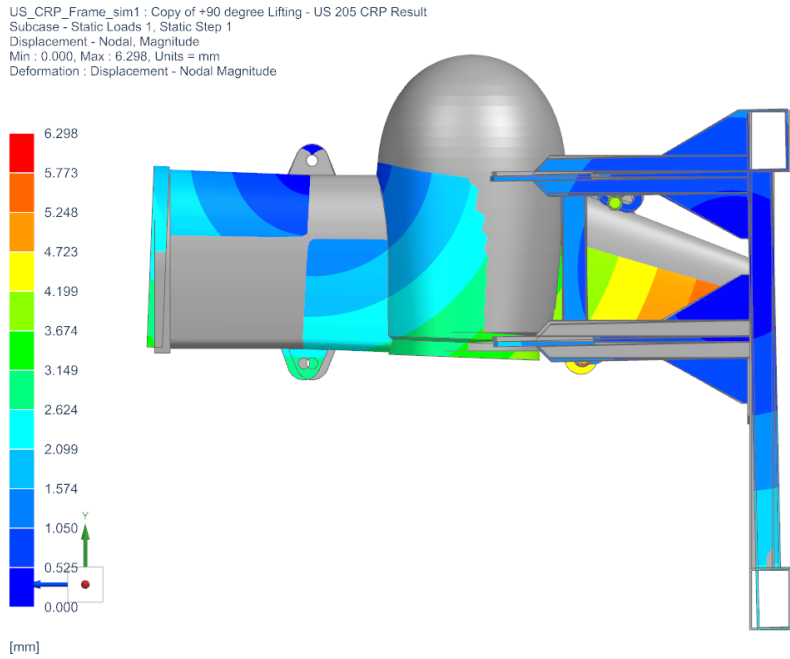
Figur 7.20: Overflatetrykk på låsesylinder.

7.2.5 Lasttilfelle 5

Låsesylindrene vil utsettes for overflatetrykk og skjærspenninger, men gitt den lave vekten thrusteren har i belastningstilfellet, oppstår det ingen høye, kritiske, spenninger som må dokumenteres.

Forskyvning

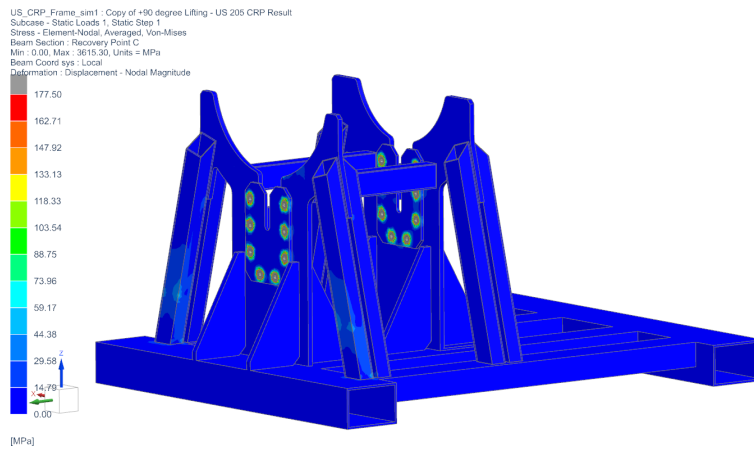
Som illustrert i figur 7.21, er største forflytning 6,21 mm. På figuren er forflytningen overdrevet for lett sammenligning med ubelastet modell i grå.



Figur 7.21: Deformasjon av rammen ved femte lasttilfelle.

von Mises

I figur 7.22 er det ikke observert kritiske spenninger. Noe høyere spenninger er observert i området hvor løfteøynene er tenkt innfestet.



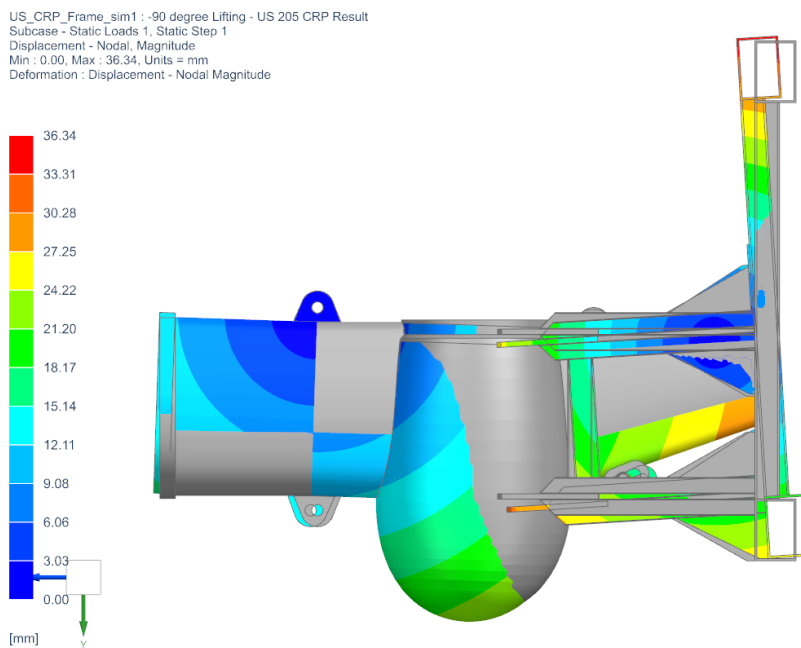
Figur 7.22: von Mises spenninger.

7.2.6 Lasttilfelle 6

I likehet med femte lasttilfelle, vil det oppstå nye spenningsbilder i hullprofilene som går skrått ned til fundamentet hvor løfteøynene er innfestet. Låsesylindrene vil ikke belastes noe kritisk i dette tilfellet heller.

Forskyvning

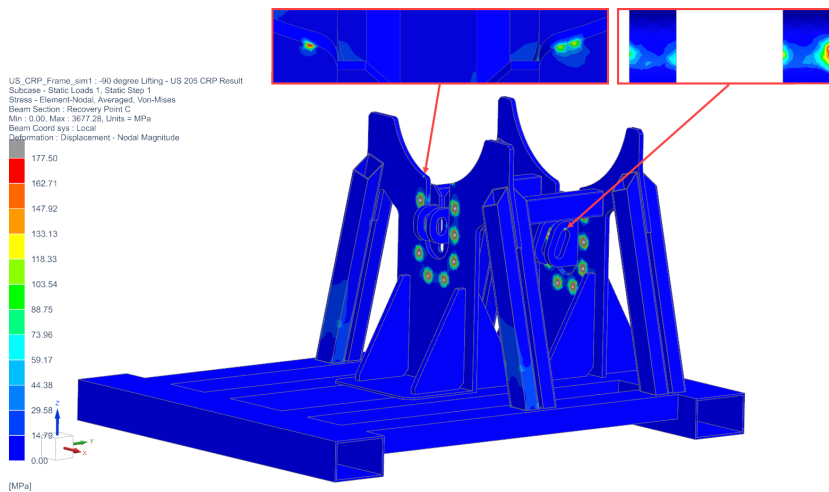
Figur 7.23 viser hvordan rammen og thrusteren forflytter seg i forhold til hverandre. Grå modell viser utgangspunktet før belastning. Farget modell viser fem prosent overdrivelse av forflytning etter belastning. Største forflytning er 36,34 mm.



Figur 7.23: Deformasjon av rammen ved fjerde lasttilfelle.

von Mises

Det er lave spenninger i området hvor løfteøynene festes. Spenningstopkene er få og fordeler seg i enkelte punkt slik som figur 7.24 viser.



Figur 7.24: von Mises-spenninger.

7.2.7 Boltforbindelse

Forspenningen som er angitt i analysen er vilkårlig valgt fra regneark, vedlegg A, og det er ikke tatt hensyn til hvilken boltkvalitet som faktisk skal brukes. Derfor er det utført manuelle boltberegninger. Boltberegningene er gjort i vedlegg B. Resultatene er presentert under.

Tiltrekkingsmoment

Resultatet for tiltrekkingsmomentet er vist i tabell 7.4.

Tabell 7.4: Tiltrekkingsmoment på bolter.

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat [Nm]
Adapterplate med slissespor	M	252
Adapterplate for krybbediameter	M	83

Opptredende strekk- og torsjon-spenninger

Spenningsene som oppstår på grunn av de aksielle kreftene i boltene er oppgit i tabell 7.5.

Tabell 7.5: *Aksielle spenninger i boltene.*

Beskrivelse	Resultat [MPa]		
	Strekk [σ_d]	Torsjon [τ_v]	von Mises [σ_{mises}]
Adapterplate med slissespor	261	84	299
Adapterplate for krybbediameter	289	92	330

Opptredende skjærspenninger

Skjærspenningsresultatene for adapterplatene er gitt i tabell 7.6.

Tabell 7.6: *Skjærspenning i boltene.*

Beskrivelse	Resultat [MPa]	
	Skjær [τ]	von Mises [σ_{mises}]
Adapterplate med slissespor	74	129
Adapterplate for krybbediameter	0	0

Hullflatetrykk

Resultatet av hullflatetrykksberegningene er presentert i tabell 7.7.

Tabell 7.7: *Hullflatetrykk.*

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat [N/mm^2]
Adapterplate med slissespor	p	90
Adapterplate for krybbediameter	p	94

7.3 Diskusjon

Resultatene fra lastberegningene viser at beregningsprosessen med overslag- og optimaliseringsberegninger har gitt troverdige resultater. Dette betyr at antagelsen om at andre lasttilfelle er mest kritisk stemmer. Usikkerheter i resultatene må fremdeles forventes, selv om simuleringen er mer avansert. Avansert simulering kan ofte gi rom for flere feil enn ved lettere beregninger på grunn av et større antall parametre.

7.3.1 Usikkerhet i analysen

En faktor som påvirker resultatene og deres sikkerhet, er låsesylindrenes plassering i slissesporene. Gitt toleransene som gjelder for plassering av løfteøynene på thrusteren og for målene på selve løfteøyet, vil kontakten mellom låsesylinder og slissespor variere mellom hver thruster. Simuleringen tar kun for seg en bestemt plassering og representerer ikke alle variasjonene. Dette kan forklare hvorfor trykk og skjærspenning på låsesylindren er lavere i lasttilfelle 2 sammenlignet med lasttilfelle 4. I andre lasttilfelle er avstandsforskjellene mellom låsesylindere og slissespor liten nok til at fremre låsesylinder kommer i kontakt med respektivt slissespor før majoriteten av belastningen tas opp av bakre sylinder. I fjerde lasttilfelle ender fremste låsesylinder opp med å ta opp all belastning før bakre sylinder kommer i kontakt med respektivt slissespor.

Slissesporene har store geometriske forskjeller som også kan virke inn på resultatet. Det skråstilte slissespolet på baksiden tillater større bevegelse om fremste låsesylinder. Lasttilfelle 6 illustrerer godt hvordan slissesporenes geometri gir store forflytninger. Største forflytning ligger rundt 36 mm på figur 7.23. Tilsvarende verdier gjelder for thrusteren i lasttilfellene for transport, men er ikke tatt med i resultatene da thrusteren vil sikres til selve lastepanet og trykkes ned i rammen. Selv om de største forflytningene er små, gitt konstruksjonens størrelse, vil det være nødvendig å stoppe thrusteren fast til rammen. Det er ikke hensyn tatt til dette i analysen. Dette betyr at resultatene fra analysen er anslagsvis konservative og virkelige belastninger på slissesporene vil være betydelig lavere. Stopper vil gi mindre forflytning og tar opp belastningen som før virket på låsesylindrene.

Hvordan thrusterens vekt fordeles over krybben er vanskelig å forutsi. Fordelingen vil variere mellom toleransene for thruster og krybbeplate. I analysemodellen er diameterforskjellen mellom thruster og ramme økt med 1 mm, for å unngå kollisjon mellom geometrier i analysen. Slik konsentreres thrusterens vekt i bunnen av krybbeplatene. Dette gir høyere belastning fordelt på mindre områder slik at spenningene øker. Dette gir konservative resultater i form av at spenningene som opptrer er mer konsentrert sammenlignet med optimaliseringsberegningen hvor thrusterens vekt fordeles over hele krybben. Illustrert i resultatene for lasttilfelle 1, 2 og 4 oppstår spenninger over 177,5 MPa på grunn av trykk. Trykkbelastningene vil i verste fall gi lokale deformasjoner som utjevner spenningstoppene. Lokale deformasjoner i krybbene vil ikke påvirke rammens styrke og stabilitet i noen stor grad.

For alle lasttilfellene er thrustermodellen blitt simplificert. All geometri som skal forestille propellblokker og aksel er fjernet. Slik blir det mindre elementer i modellen og analysen går forttere. Ved å bruke tyngdekraft som belastning i analysen, vil programmet belaste hvert element like mye og plasseringen av thrusterens tyngdepunkt blir ikke medregnet. Dette kan medføre belastninger noe ulikt virkeligheten, spesielt for første lasttilfelle. Fra overslags- og optimaliseringsberegningene er det kjent at thrusterens tyngdepunkt vil ligge foran fremste krybbeplate. Dette vil medføre at bakenden av thrusteren løftes opp fra krybben og bevegelsen stoppes av bakre låsesylinder. Figur 7.10 viser at begge krybbeplatene blir utsatt for trykk og ingen belastning i bakre slissespor. Dette er det minst belastende tilfellet og det er kjent fra de foregående beregningsmetodene at rammen tåler belastningen. I tillegg vil avstandsforskjellen mellom tyngdepunkt til fremste krybbeplate og bakre låsesylinder være så stor at belastningen på låsesylinderen og slissesporene blir veldig lav. For de andre transporttilfellene vil ikke den forenklete modellen påvirke resultatene i like stor grad da både spenningsbilder og deformasjonsresultater er sammenlingbare mellom optimalisering- og lastberegningene. Resultatene for lasttilfelle 5 og 6 vil ikke påvirkes av dette i noen særlig grad da tyngdepunktets posisjon er uansett er ukjent for dette tilfellet. I tillegg er den forenklete modellen veldig lik hvordan thrusteren er under løfteoperasjon på verkstedet.

Alle resultatene inneholder former for singulariteter. På grunn av grov elementstørrelse og skarpe katner, er det ikke mulig å foreta beregninger som ikke gir singulariteter. Store elementer vil gi et inntrykk av at de høye spenningene er fordelt på et mye større område enn hva som er reelt. For å sjekke dette kan elementstørrelsene blant annet reduseres. Dette er relevant i områder som slissesporene og kontaktflaten mellom thruster og krybbeplater. Spenningstoppene fra boltforbindelsene er tilfeller av singulariteter. RBE3-elementene som fordeler forspenningen rundt hullene fordeles over punkter på overflateelementene. Dette begrenser området forspenningen fordeles på og gir et urealistisk resultat. Lasttilfelle 2 viser tydelig områder hvor singulariteter oppstår i skarpe overganger. Om det ikke skyldes singulariteter, vil påførte sveiser gi en mykere overgang og spenningstoppene reduseres.

Fremfor å legge til sveiser i modellen er det antatt full gjennombrenning i alle forbindelser. I tillegg til singulariteter og spenningstopper i skarpe overganger, fører denne antagelsen til at enkelte forbindelser blir mye mer robust enn hva de blir med sveiseforbindelser. Dette gjelder blant annet skråstilte hulprofiler og platen som ligger under fremste avstivere. Foenklingen kan medføre lavere spenninger og nedbøyning enn hva som vil være reelt med sveiseforbindelser. For å sjekke dette, kan det være nødvendig å foreta beregninger hvor sveiseforbindelser er lagt inn i modellen. Gitt resultatene og sikkerheten mot fly, er det stor sikkerhet for at rammen vil holde selv uten å foreta beregninger med sveiseforbindelser inkludert.

7.3.2 Boltforbindelse

For boltberegningene i de tre boltforbindelsene på rammen er det gjort antagelser for å forenkle beregningene.

Opptredende krefter

For de aksielle spenningene i boltforbindelsene er det tatt utgangspunkt i at belastningen på 0,5G mot kjøreretning fordeles likt over alle 16 bolter. Gitt slissespores utforming, vil belastningen trolig ikke fordeles likt, noe som gjenspeiles i spenningsverdiene for slissespoene. Dette kan medføre at boltene på en av adapterplatene belastes mye mer enn hva det er tatt hensyn for om låsesylindrene skal ta opp all belastning. Det er ikke hensyn tatt til at thrusteren vil sikres til rammen med jekkestropper og til lasteplanet med kjetting. Reelle belastninger på boltene vil av den grunn trolig være mye lavere. Dimensjonering for 0,5G fordelt på alle boltene anses som tilstrekkelig.

Kritiske skjærkrefter kan opptre i rammen under transport og løft. For skjærspenningene boltforbindelsene utsettes for, er det valgt å dimensjonere boltene etter skjærbelastning som tilsvarende thrusterens egenvekt. Dette gir et konservativt estimat siden det er egenvekten til rammen som gir skjær i boltforbindelsene under løft. Bruk av jekkestropper er heller ikke tatt hensyn til her og reelle skjærspenninger vil være betydelig lavere enn antatt.

Tiltrekkingsmoment

Hvilken metode for beregning av tiltrekkingsmoment på skruer som er den mest nøyaktige er vanskelig å avgjøre. Med hensyn til hva Kongsberg benytter, er det valgt å utføre beregningene av tiltrekkingsmomentet med den mer teoretiske metoden fra kapittel 4, fremfor den som er beskrevet i Maskindeler 2 [Åge Ø. Waløen, 1993]. Det er vanskelig å vurdere troverdigheten av beregningene på grunn av alle faktorene som påvirker tiltrekkingsmomentet.

Resultat

På grunn av store usikkerheter i resultatene for boltberegningene, er det med utgangspunkt i resultatene fra tabell 7.5 og 7.6 beregnet en sikkerhet i boltene. Sikkerhetene er presentert i tabell 7.8 for adapterplatene med slissespor og tabell 7.9 for adapterplaten for krybbediameteren. Sikkerhetsmaringene er innenfor akseptable verdier og tyder på at det er valgt tilstrekkelig store bolter.

Tabell 7.8: Sikkerhet for boltforbindelse på adapterplater med slissespor.

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat [MPa]
Klemsikkerhet	η_k	23,5
Sikkerhet for overføring	η_t	3,2
Sikkerhet mot flyt, strekk og torsjon	η_y	2,1
Sikkerhet mot flyt, skjær	η_s	5,0

Tabell 7.9: Sikkerhet for boltforbindelsen på adapterplater for krybbediameter.

Beskrivelse	Betegnelse	Resultat
Klemsikkerhet	η_k	3,9
Sikkerhet mot flyt, strekk og torsjon	η_t	1,9

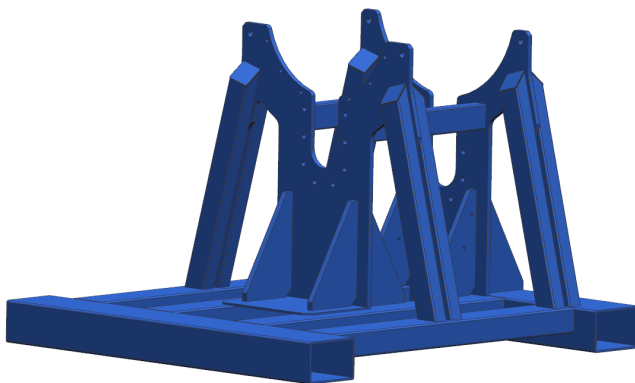
Kapittel 8

Ferdigstilling

I dette kapittelet vil arbeidet med ferdigstilling av rammen og dokumentasjon for Kongsberg Maritime presenteres. Først presenteres rammen, adapterplatene, låsesylinderene og endelige dimensjoner. Deretter forklares strukturen som er bygget opp i Teamcenter. Arbeidet bak prosedyren nevnes også. Til slutt nevnes arbeidet som er gjort med styrkeberegningsrapporten laget for Kongsberg Maritime.

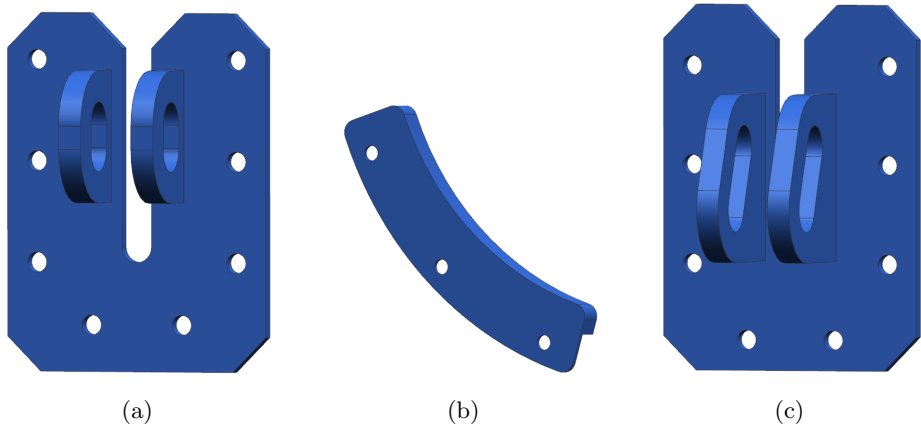
8.1 Design

Etter endt styrkeberegning, gjenstår ferdigstilling av rammen. Ferdigstillingen omhandler å lage en fullstendig sammenstilling av rammen og thrusteren. Figur 8.1 viser ferdig ramme uten noe påmontert.



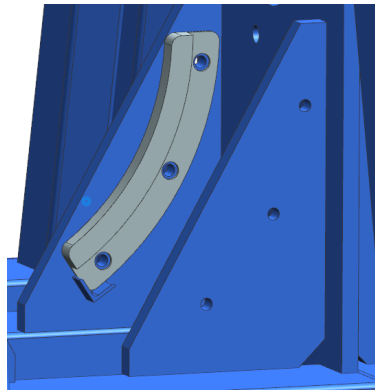
Figur 8.1: *Rammen uten adapterplatene.*

Figur 8.2 viser de tre tilhørende adapterplatene for US205 CRP. Adapterplatene byttes avhengig av hvilken US CRP-modell som skal transporteres og monteres.



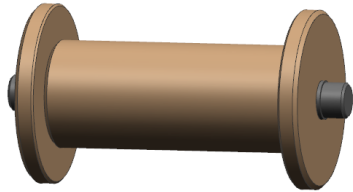
Figur 8.2: Adapterplatene.

Ved behov for større diameter på fremre krybbeplate, kan adapterplate på figur 8.2b skrues av og festes på til avstiverne som illustrert i figur 8.3. Et vinkeljern støtter opp adapterplaten ved montering.



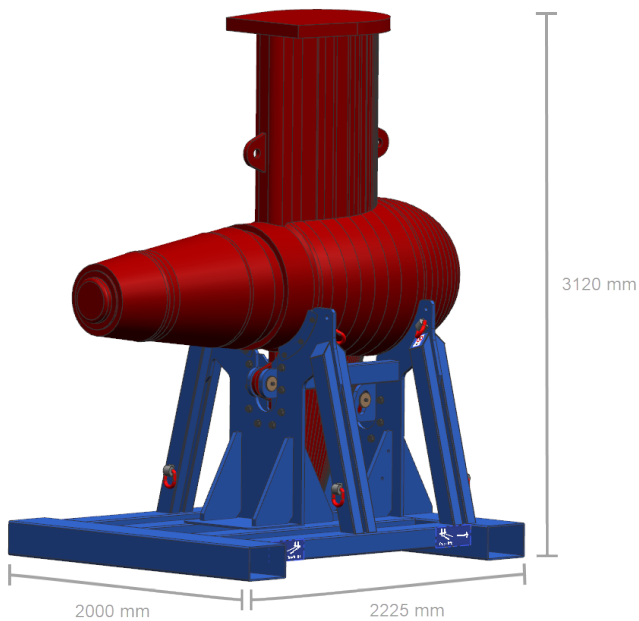
Figur 8.3: Adapter festet til avstiver.

Figur 8.4 viser endelig modell av låsesylinderen som anvendes i slissesporene.



Figur 8.4: *Komplett låsesylinder.*

Endelige dimensjoner for thruster og ramme kombinert, er illustrert i figur 8.5. Alt av skilt, løfteøyne, dokumentboks, adaptere og låsesylindere er påmontert.

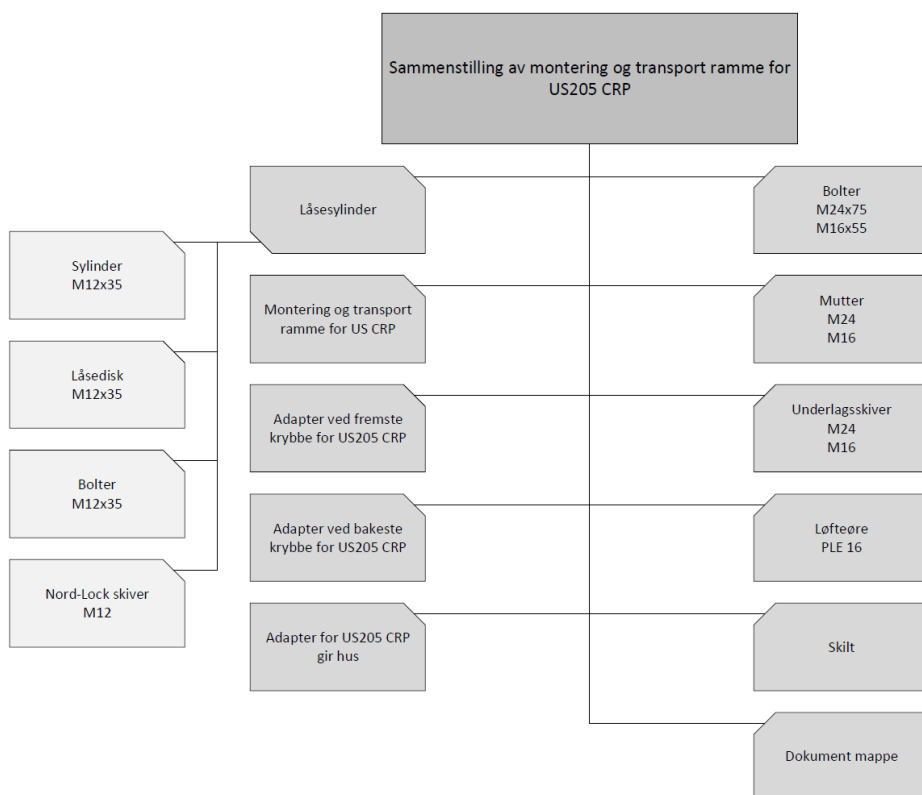


Figur 8.5: *Komplett sammenstilling.*

8.2 Dokumentasjon

8.2.1 Struktur i Teamcenter

Teamcenter er en skybasert løsning for lagring av 3D-modeller, maskintegninger og annen dokumentasjon. Poenget med å lage en struktur i Teamcenter er å skape oversikt over rammen og hvilke deler som hører til i konfigurasjonen for bestemte thrustere. Ved behov for å gjøre endringer, kan nødvendige revisjoner lages, uten at alt arbeid må gjøres på nytt. Slik kartlegger også Teamcenter alle forandringer som er gjort. Figur 8.6 viser skjematisk hvordan strukturen er bygget opp i Teamcenter.



Figur 8.6: Struktur i Teamcenter.

8.2.2 Maskintegninger

Alle maskintegninger er tegnet i henhold til Kongsberg Maritime sin stadard. Se vedlegg G for fullstendige maskintegninger.

8.2.3 Lastsikring

Nødvendig kapasitet på kjettingene som brukes i sammenheng med lastsikring er valgt ut fra beregningene i vedlegg F, som er gjort i henhold til NS-EN12195-1:2010 [ISO, 2010].

8.2.4 Prosedyre

Det er viktig å utarbeide en god prosedyre for å sikre at rammen anvendes rett. Prosedyren bygger på en mal utviklet av Kongsberg Maritime. Det er kun listene over utstyr, illustrasjonene og tekst som beskriver hver av operasjonene som ikke er skrevet fra før av.

Prosedyren tar for seg tre operasjoner, montere thruster til rammen, snu thruster og ramme på verkstedet og sikring av last før transport. Siden lastsikringen gjøres av ekstern part, bør prosedyren for lastsikringen ligge lett tilgjengelig. Første del av prosedyren omhandler derfor lastsikring. For hver av de tre delene er det utviklet respektive utstyrslister og beskrivelse av operasjonene. For ferdigstilt prosedyre, se vedlegg Q.

Kapasiteten på utsyr som sjakler, løfteøyne og jekkestropper er bestemt av Kongsberg Maritime. Se vedlegg J for hvilken kapasitet utstyret må ha.

8.2.5 Rapport

Styrkeberegningsrapporten utarbeidet for Kongsberg Maritime følger en egen mal. Malens oppdeling er lik bacheloroppgaven, men tar kun for seg siste steg av styrkeberegningen. Rapporten er skrevet for å møte Kongsberg sine krav og inneholder ikke noe teori. Dermed er ingen instillinger og presentasjon av resultatene forklart. Alle innstillinger og teori benyttet i rapporten i vedlegg R er forklart og begrunnet i selve bacheloroppgaven.

Kapittel 9

Konklusjon

Å utvikle en ramme for transport og montering av en thruster er en lang prosess. Prosessen krever godt arbeid fra ideer tidlig i konseptfasen og avgjørelse av hvilket design det skal jobbe videre med, til avsluttende arbeid i form av dokumentasjon og maskintegninger.

I denne rapporten har arbeidet blitt presentert i kronologisk rekkefølge. Etter oppgaven var definert startet arbeidet med å utvikle konseptskisser og modeller for å enkelt kartlegge ideene. Gjennom å utvikle konsepter i flere omganger og presentere disse underveis, er det utviklet en ramme som er optimalisert for bruksområdet. Etter to konseptpresentasjoner og en prisestimering er det tydelig at konseptet er godt utviklet og tilpasset montering og transport.

Styrkeberegningen, som utgjør den største delen av oppgaven, ble nøye utført i tre steg for å kvalitetssikre resultatene og diskutere enkelte avvik. Først ble overslagsberegninger gjort for å skape et godt utgangspunkt for hvilke materialdimensjoner analysemodellen skulle modelleres i. For å raskt sjekke hvor uønskede spenninger ville oppstå, ble det gjennomført en iterativ prosess med forenklet styrkeberegningsanalyse i Siemens NX. Til slutt ble en mer avansert styrkeberegning utført for å sikre tilstrekkelig styrke i alle komponentene under alle lasttilfeller. De små forskjellene i resultatene til de tre beregningsstegene, viser at det er gjort gode estimat og at resultatene er høyst troverdige.

Styrkeberegningen som ble gjennomført i prosjektet, har medført mye læring. Det er først og fremst styrkeberegningen i Siemens NX som har vært nytt. Fra kjente metoder brukt i overslagsberegningene og forenklet styrkeberegning under optimaliseringen, var det nødvendig å tilegne seg ny kunnskap og ferdigheter for å beherske den mer avanserte delen ved lastberegningene. De mest avanserte beregningene har vært en sentral del av styrkeberegningsrapporten ment for intern bruk hos Kongsberg Maritime.

Resultatet av prosjektarbeidet er en fullstendig utviklet ramme for montering og transport av US205 CRP. Rammen oppfyller alle krav som ble stilt av arbeidsgiver i begynnelsen av prosjektet. I tillegg er rammen og medfølgende prosedyrer godkjent av oppdragsgiver, og en prototype vil bli produsert for testing.

Bibliografi

- Bell, K. og Meyer, R. W. (2022). Elementmetoden. <https://snl.no/elementmetoden>.
- Dahlvig, G., Christensen, S., og Strømsnes, G. (2000). *Konstruksjonselementer*. Gyldendal Norsk Forlag AS, 2. utgave.
- Falck-Ytter, H. (2009). *Materialteknologi Del 1 Grunnlag*. Gyldendal Norsk Forlag AS, 9. utgave.
- Irgens, F. (2014). *Fasthetslære*. Fagbokforlaget Vigmostad og Bjørke AS, 7. utgave.
- ISO, N.-E. (2010). Lastsikring på kjøretøy - sikkerhet - del 1: Beregning av surringskrefter. <https://www.standard.no/no/nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=474202>.
- ISO, N.-E. (2013). Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel - part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes - coarse thread and fine pitch thread (iso 898-1:2013). <https://www.standard.no/no/nettbutikk/produktkatalogen/produktpresentasjon/?ProductID=630501>.
- Johannessen, J. (2002). *Tekniske Tabeller*. J.W. Cappelens Forlag A/S, 2. utgave.
- Stål, N. (2023). Produkter fra norsk stål. <https://www.norskstaal.no/produktkategorier>.
- UNION, E. (2006). Directive 2006/42/ec of the european parliament and of the council of 17 may 2006 on machinery, and amending directive 95/16/ec. 2006. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32006L0042>.
- Åge Ø. Waløen (1993). *Maskindeler 2*. Tapir Forlag, 2. utgave.
- Lukasz Skotny (2019). What are nodes and elements in finite element analysis? <https://enterfea.com/what-are-nodes-and-elements-in-finite-element-analysis/>.

Vedlegg

Alle vedlegg i listen har tilsvarende navn som respektive filer i vedlagt zip-fil. Deler av vedleggene er interne dokumenter tilhørende Kongsberg Maritime og ligger derfor ikke ved i rapporten.

- A Boltberegninger for FE-analyse**
- B Boltberegninger**
- C Dimensjonering av ramme**
- D Fremdriftsplan**
- E Erfaringsverdier fra Kongsberg**
- F Lastsikringsberegninger**
- G Maskintegninger**
- H Møtereferat 01.03.2023**
- I Møtereferat 04.04.2023**
- J Møtereferat 09.05.2023**
- K Møtereferat 12.01.2023**

- L Møtereferat 14.02.2023**
- M Møtereferat 14.04.2023**
- N Møtereferat 06.03.2023**
- O Optimaliseringsberegninger**
- P Prisestimat**
- Q Prosedyre for løft og lastsikring**
- R Rapport Kongsberg**
- S Tiltrekkingsmoment**

