

# Utvikling av inspeksjonsverktøy for prosesstanker

**Pål Vindegg Isungset**  
**Magnus Øren**

Produktutvikling og produksjon  
Innlevert: juni 2014  
Hovedveileder: Terje Rølvåg, IPM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for produktutvikling og materialer



**MASTEROPPGAVE VÅR 2014  
FOR  
STUD.TECHN. PÅL ISUNGSET**

**UTVIKLING AV INSPEKSJONSVERKTØY FOR PROSESSTANKER  
Development of inspection tool for processing tanks**

Denne oppgaven skal bygge videre på utviklingsarbeidet som ble gjort i høstsemesteret. Konseptet som ble funnet i prosjektoppgaven skal videreutvikles slik at en prototyp kan bygges. Oppgaven er spisset mot leddmekanisme og kraftoverføring i inspeksjonsarmen. Oppgaven skal resultere i beregningsunderlag og nødvendig dokumentasjon for produksjon av armens ledd og seksjoner. Det skal også lages en animasjon som viser hvordan armen løser tilkomst inne i den utfordrende scrubber tanken lokalisert på Shell Nyhamna.

Prosjektoppgaven skal inkludere følgende aktiviteter:

1. Finne nødvendige bruks- og lasttilfeller for design og dimensjonering av inspeksjonsarmen og integrere disse i kravspesifikasjonen gitt av Linjebygg Offshore AS.
2. Designe ledd, seksjoner og kraftoverføring for inspeksjonsarmen. Herunder geometri, materialvalg, drivmedium for kraftoverføring og valg av standardkomponenter.
3. Gjennomføre og dokumentere nødvendige styrkeberegninger og FEM analyser. Studentene må i denne forbindelse også lære seg Abaqus.
4. Lage en animert presentasjon av innføring og inspeksjon inne i scrubber tanken for Linjebygg Offshore AS.
5. Produsere en kravspesifikasjon for innfesting av inspeksjonsarmen slik at denne kan utvikles internt hos Linjebygg Offshore AS.
6. Produsere arbeidstegninger og en liste over komponenter for leddene i inspeksjonsarmen.
7. Bygge og teste en prototyp som skal demonstrere konseptet for Linjebygg Offshore AS.

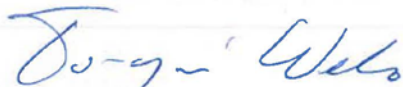
Senest 3 uker etter oppgavestart skal et A3 ark som illustrerer arbeidet leveres inn. En mal for dette arket finnes på instituttets hjemmeside under menyen masteroppgave (<http://www.ntnu.no/ipm/masteroppgave>). Arket skal også oppdateres en uke før innlevering av masteroppgaven.

Arbeidet i masteroppgaven skal risikovurderes. Hovedaktiviteter som er kjent/planlagt skal risikovurderes ved oppstart og skjema skal leveres innen 3 uker etter utlevering av oppgavetekst. Alle prosjekt skal vurderes, også de som kun er teoretiske og virtuelle. Skjemaet må signeres av veileder. Risikovurdering er en løpende dokumentasjon og skal gjøres før oppstart av enhver aktivitet som KAN være forbundet med risiko. Kopi av signert risikovurdering skal være inkludert i vedlegg ved levering av rapport

Besvarelsen skal ha med signert oppgavetekst, og redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse, etc. Ved utarbeidelse av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelse legges det stor vekt på at resultater er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte og diskuteres utførlig.

Besvarelsen skal leveres i elektronisk format via DAIM, NTNUs system for Digital arkivering og innlevering av masteroppgaver.

Kontaktperson:

  
Torgeir Welø  
Instituttleder

  
Terje Rølvåg  
Faglærer

 **NTNU**  
Norges teknisk-  
naturvitenskapelige universitet  
Institutt for produktutvikling  
og materialer

**MASTEROPPGAVE VÅR 2014  
FOR  
STUD.TECHN. MAGNUS ØREN**

**UTVIKLING AV INSPEKSJONSVERKTØY FOR PROSESSTANKER  
Development of inspection tool for processing tanks**

Denne oppgaven skal bygge videre på utviklingsarbeidet som ble gjort i høstsemesteret. Konseptet som ble funnet i prosjektoppgaven skal videreutvikles slik at en prototyp kan bygges. Oppgaven er spisset mot leddmekanisme og kraftoverføring i inspeksjonsarmen. Oppgaven skal resultere i beregningsunderlag og nødvendig dokumentasjon for produksjon av armens ledd og seksjoner. Det skal også lages en animasjon som viser hvordan armen løser tilkomst inne i den utfordrende scrubber tanken lokalisert på Shell Nyhamna.

Prosjektoppgaven skal inkludere følgende aktiviteter:

1. Finne nødvendige bruks- og lasttilfeller for design og dimensjonering av inspeksjonsarmen og integrere disse i kravspesifikasjonen gitt av Linjebygg Offshore AS.
2. Designe ledd, seksjoner og kraftoverføring for inspeksjonsarmen. Herunder geometri, materialvalg, drivmedium for kraftoverføring og valg av standardkomponenter.
3. Gjennomføre og dokumentere nødvendige styrkeberegninger og FEM analyser. Studentene må i denne forbindelse også lære seg Abaqus.
4. Lage en animert presentasjon av innføring og inspeksjon inne i scrubber tanken for Linjebygg Offshore AS.
5. Produsere en kravspesifikasjon for innfesting av inspeksjonsarmen slik at denne kan utvikles internt hos Linjebygg Offshore AS.
6. Produsere arbeidstegninger og en liste over komponenter for leddene i inspeksjonsarmen.
7. Bygge og teste en prototyp som skal demonstrere konseptet for Linjebygg Offshore AS.


Senest 3 uker etter oppgavestart skal et A3 ark som illustrerer arbeidet leveres inn. En mal for dette arket finnes på instituttets hjemmeside under menyen masteroppgave (<http://www.ntnu.no/ipm/masteroppgave>). Arket skal også oppdateres en uke før innlevering av masteroppgaven.

Arbeidet i masteroppgaven skal risikovurderes. Hovedaktiviteter som er kjent/planlagt skal risikovurderes ved oppstart og skjema skal leveres innen 3 uker etter utlevering av oppgavetekst. Alle prosjekt skal vurderes, også de som kun er teoretiske og virtuelle. Skjemaet må signeres av veileder. Risikovurdering er en løpende dokumentasjon og skal gjøres før oppstart av enhver aktivitet som KAN være forbundet med risiko. Kopi av signert risikovurdering skal være inkludert i vedlegg ved levering av rapport

Besvarelsen skal ha med signert oppgavetekst, og redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse, etc. Ved utarbeidelse av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelse legges det stor vekt på at resultater er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte og diskuteres utførlig.

Besvarelsen skal leveres i elektronisk format via DAIM, NTNUs system for Digital arkivering og innlevering av masteroppgaver.

Kontaktperson:

  
Torgeir Weib  
Instituttleder

  
Tørje Rølvåg  
Faglærer

 **NTNU**  
Norges teknisk-  
naturvitenskapelige universitet  
Institutt for produktutvikling  
og materialer

## Sammendrag

Denne rapporten dokumenterer utviklingen av et inspeksjonsverktøy for prosesstanker. Oppgaven bygger videre på en prosjektrapport som ble utarbeidet i høstsemesteret 2013. Beste konsept ble funnet i prosjektoppgaven fra 2013 og i denne rapporten dokumenteres utvikling av dette konseptet. Dette innebærer valg av geometri, material og standardkomponenter for en seksjon i verktøyet. Det er funnet nødvendige bruks- og lasttilfeller basert på tanken som skal inspiseres. Disse er i tillegg til den opprinnelige kravspesifikasjonen gitt av Linjebygg Offshore AS lagt til grunn for design og dimensjonering av inspeksjonsarmen. Alle understøttende analyser og beregninger er dokumentert og seksjonen anses som ferdig utviklet med unntak av aktuatorer og noe gjenstående arbeid med tanke på vektreduksjon. Disse punktene er beskrevet i kapittelet om videre arbeid. Det er bygget en prototyp med to seksjoner for å verifisere prinsippene i designet.

## **Abstract**

This report documents the development of an inspection tool for process tanks. The project builds upon a project report that was prepared in the fall semester 2013. Best concept was found in the project work from 2013 and this report documents the development of this concept. This involves the selection of geometry, materials and standard components for a section of the tool. Necessary operating and load conditions based on the tank to be inspected have been found. These are in addition to the original requirements specification given by Linjebygg Offshore AS basis for the design and dimensioning of inspection arm. All supporting analyzes and calculations are documented and the section considered fully developed except for actuators and some remaining work in terms of weight reduction. These items are described in the section on future work. A prototype with two sections to verify the principles of design has been built.



## Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet av to studenter ved Institutt for produktutvikling og material på NTNU våren 2014. Prosjektet er gjennomført som fortsettelsen av en prosjektoppgave som ble skrevet høsten 2013.

Vi vil gjerne takke vår bedriftskontakt Johan Monkan hos Linjebygg Offshore AS for god oppfølging og tilrettelegging av kontakten mellom studentene og bedrift. Eilif Nerland, Trond Svartvatn og Bård Lund Johansen og i LBO for innspill underveis. Vår veileder ved IPM Terje Rølvåg for gode innspill og alltid en åpen dør ved behov. Synnøve, Hilde, Guro, Martin og alle andre på kontoret for det hyggelige felleskapet under skriveprosessen. Og sist men ikke minst våre bedre halvdelene Lene K. Opsiøn og Linn S. Herbro som solide støttespillere og motivatorer.



Magnus Øren



sted/dato



Pål V. Isungset



sted/dato

# Innholdsfortegnelse

SAMMENDRAG .....	V
ABSTRACT .....	VI
FORORD .....	VII
INNHOLDSFORTEGNELSE .....	VIII
FIGURLISTE.....	X
TABELLISTE.....	XIV
ORDLISTE .....	XVI
1 INNLEDNING .....	1
2 KRAVSPESIFIKASJON .....	2
2.1 OPPDATERT KRAVSPESIFIKASJON FRA PROSJEKTOPPGAVE .....	2
2.2 BRUKSSITUASJON .....	3
2.3 LASTTILFELLER.....	6
2.4 BRUKSBEGRENSING .....	14
3 DESIGN.....	15
3.1 KONSEPT .....	15
3.2 LEDD .....	18
3.3 RØR OG ENDESTYKKE.....	20
3.4 STREKKSTAG .....	22
3.5 PITCH AKTUATOR .....	24
3.6 YAW AKTUATOR .....	30
3.7 BOLTER .....	37
3.8 STANDARDKOMPONENTER.....	38
4 STYRKEBEREGNINGER OG ANALYSER .....	43
4.1 TOPOLOGIOPTIMALISERING.....	43
4.2 FEM ANALYSER .....	49
5 KRAVSPESIFIKASJON FOR INNFESTING .....	81
6 PROTOTYPING.....	84

<b>7</b>	<b>RESULTAT OG VIDERE ARBEID</b> .....	<b>89</b>
<b>7.1</b>	<b>RESULTAT</b> .....	<b>89</b>
<b>7.2</b>	<b>VIDERE ARBEID</b> .....	<b>93</b>
<b>8</b>	<b>LITTERATURLISTE</b> .....	<b>94</b>
<b>VEDLEGG A</b>	<b>FEM ANALYSER</b> .....	<b>95</b>
<b>VEDLEGG B</b>	<b>ARBEIDSTEGNINGER</b> .....	<b>155</b>
<b>VEDLEGG C</b>	<b>BEREGNINGER</b> .....	<b>163</b>
<b>VEDLEGG D</b>	<b>MATERIALDATA</b> .....	<b>185</b>
<b>VEDLEGG E</b>	<b>STANDARDKOMPONENTER</b> .....	<b>197</b>
<b>VEDLEGG F</b>	<b>PROTOTYPING</b> .....	<b>214</b>

# Figurliste

Figur 1 Scrubber-tank.....	3
Figur 2 Manipulatorarm .....	4
Figur 3 Manipulatorarm 1 .....	5
Figur 4 Manipulatorarm 2 .....	5
Figur 5 Manipulatorarm 3 .....	6
Figur 6 1. og 2. leddforbindelse .....	7
Figur 7 Kraftplan i pitch -leddet ved bøyning.....	8
Figur 8 Kraftplan i pitch -leddet ved torsjon.....	9
Figur 9 Fordeling av krefter .....	10
Figur 10 Kraftplanet i yaw-leddet .....	11
Figur 11 Lasttilfelle.....	12
Figur 12 Lasttilfellets variasjon ved pitch og yaw .....	12
Figur 13 Kraftplanets variasjon med pitch-vinkel.....	13
Figur 14 Yaw-bevegelsens begrensning på rekkevidden.....	14
Figur 15 - Evalueringsdiagram.....	15
Figur 16 – AIA-armens prinsipper [2] .....	17
Figur 17 – Pitch-ledd.....	18
Figur 18 – Yaw-ledd .....	19
Figur 19 - Rørstykke .....	20
Figur 20 - Endestykke .....	21
Figur 21 - Strekkstag .....	22
Figur 22 – Øyeterminal fra Blue Wave.....	23
Figur 23 – Vaier fra Blue Wave .....	23
Figur 24 – Slaglengde for pitch-aktuator .....	24
Figur 25 – Illustrasjon av aktuator .....	27
Figur 26 – Illustrasjonsmodell av pitch-aktuator .....	29

Figur 27 – Trinsesystem for vaier og resulterende geometriendring .....	32
Figur 28 – Utdrag av katalog fra National .....	32
Figur 29 – Innfesting av vaier i yaw-ledd .....	33
Figur 30 – Gaffelterminal fra Blue Wave .....	35
Figur 31 – Aktuatorsystem for yaw-bevegelse .....	36
Figur 32 - Bolteforbindelser .....	37
Figur 33 - Bolter .....	37
Figur 34 – Plassering av lager .....	38
Figur 35 – Lagerdata .....	39
Figur 36 – Pasning mellom aksling og lager .....	39
Figur 37 – Pasning mellom Boring og lager .....	39
Figur 38 – Data for komposittskiver .....	40
Figur 39 – Plassering av bøssinger .....	41
Figur 40 – Data for kompositt-bøssinger .....	41
Figur 41 – Pasninger for kompositt-bøssing .....	42
Figur 42 Forenkling av geometri .....	43
Figur 43 Statisk analyse for optimalisering .....	44
Figur 44 Restriksjoner .....	44
Figur 45 Produksjonsområder .....	45
Figur 46 Designvariabler .....	45
Figur 47 Topologiresultat .....	46
Figur 48 STL-fil av resultat .....	46
Figur 49 Forenkling av geometri .....	47
Figur 50 Statisk analyse for optimalisering .....	47
Figur 51 Produksjonsområder .....	47
Figur 52 Topologiresultat .....	48
Figur 53 STL-fil av resultat .....	48

Figur 54 Pitch ledd .....	49
Figur 55 Kontaktsett for pitch-leddet .....	50
Figur 56 Fastholdinger av pitch-leddet .....	51
Figur 57 Krefter på pitch-ledd.....	51
Figur 58 Mesh av pitch-leddet .....	52
Figur 59 Største vonMises spenninger .....	53
Figur 60 h-adaptiv analyse på pitch-leddet .....	54
Figur 61 Pitch-ledd med yaw design.....	54
Figur 62 Største vonMises spenninger på ny pitch-ledd design.....	55
Figur 63 Yaw-ledd .....	56
Figur 64 Fastholdinger av yaw-ledd.....	57
Figur 65 Krefter ved nedbøyning av yaw-ledd .....	57
Figur 66 Krefter ved torsjon av yaw-ledd .....	58
Figur 67 Mesh av yaw-ledd.....	58
Figur 68 h-adaptiv analyse med største spenninger av yaw-ledd.....	59
Figur 69 Yaw-ledd med yaw design .....	60
Figur 70 Største vonMises spenninger av modell med ny yaw-design.....	61
Figur 71 Endestykke.....	61
Figur 72 Symmetrisnitt for endestykke .....	62
Figur 73 Fastholdinger for endestykke.....	63
Figur 74 Krefter for endestykke .....	63
Figur 75 Mesh for endestykke.....	64
Figur 76 Spenninger for endestykke .....	64
Figur 77 Konvergens for endestykke .....	65
Figur 78 Spenninger og innfesting for endestykke .....	65
Figur 79 Mesh for endestykke.....	66
Figur 80 Største vonMises spenninger for endestykke .....	66

Figur 81 Konvergens for endestykke .....	67
Figur 82 Boltene plassering .....	68
Figur 83 Krefter og fastholdinger for horisontalbolt.....	68
Figur 84 Symmetrisnitt for horisontalbolt.....	69
Figur 85 Krefter for horisontalbolten .....	69
Figur 86 Mesh for horisontalbolten.....	70
Figur 87 vonMises spenninger for horisontalbolten .....	70
Figur 88 Konvergens for horisontalbolten .....	71
Figur 89 Krefter og fastholdinger for Ø16 bolt.....	72
Figur 90 Mesh for Ø16 bolt.....	72
Figur 91 Analyseresultater for Ø16 bolt .....	73
Figur 92 Konvergens for Ø16 bolt .....	74
Figur 93 Krefter og fastholdinger for vertikalbolt .....	75
Figur 94 Symmetrisnitt for vertikalbolt .....	75
Figur 95 Mesh for vertikalbolt .....	76
Figur 96 spenninger fra analyse til vertikalbolt .....	76
Figur 97 Konvergens for vertikalbolt.....	77
Figur 98 Krefter og fastholdinger for rør .....	78
Figur 99 Mesh for rør .....	78
Figur 100 vonMises spenninger for vertikalbolt.....	79
Figur 101 Konvergens for rør.....	80
Figur 102 Nedbøyning for rør .....	80
Figur 103 – Bøyemoment og Vekt.....	82
Figur 104 - Torsjonsmoment.....	82
Figur 105 – Rørstykke til prototyp .....	85
Figur 106 – Ledd til prototyp .....	85
Figur 107 – Vaierstag til prototyp .....	86

Figur 108 – Forenklede stag til prototyp .....	86
Figur 109 – Testtrigg med barduner .....	88
Figur 110 – Prototype modell.....	88
Figur 111 – Modell av ledd og seksjon .....	89

## Tabelliste

Tabell 1 Oppdatert kravspesifikasjon.....	3
Tabell 2 Manipulatorarmens lengdespesifikasjoner.....	6
Tabell 3 Dimensjonerende konfigurasjoner .....	8
Tabell 4 Krefter og opplagerreaksjoner i leddets dimensjonerende konfigurasjoner .....	10
Tabell 5 Dimensjonerende laster for rør, stag og aktuator .....	10
Tabell 6 Yaw-leddets dimensjonerende krefter .....	11
Tabell 7 Dimensjonerende krefter på røret fra torsjonsmoment .....	13
Tabell 8 – Konsept 1 fra prosjektrapport .....	15
Tabell 9 – Konsept 5 fra prosjektrapport .....	16
Tabell 10 – Data for pitch-ledd .....	18
Tabell 11 – Data for yaw-ledd.....	19
Tabell 12 – Data for rørstykke .....	20
Tabell 13 – Data for endestykke .....	21
Tabell 14 – Data for strekkstag .....	22
Tabell 15 – Kravspesifikasjon for pitch-aktuator.....	25
Tabell 16 – Oversikt over aktuatorer.....	26
Tabell 17 – Aktuelle samarbeidspartnere ved utvikling av aktuator.....	28
Tabell 18 – Alternativer for innfesting av vaier i yaw-ledd.....	30
Tabell 19 – Endelig løsning for innfesting av vaier i yaw-ledd.....	31
Tabell 20 – Kravspesifikasjon for yaw-aktuator .....	33
Tabell 21 – Lnearaktuatorer fra Concens .....	34



Tabell 22 – Dimensjonerende krefter i lager.....	38
Tabell 23 Analyserte konfigurasjoner for pitch-leddet .....	49
Tabell 24 vonMises spenninger på pitch-leddet.....	52
Tabell 25 vonMises spenninger på ny pitch-ledd design .....	55
Tabell 26 Største vonMises spenninger på yaw-ledd.....	59
Tabell 27 Største vonMises spenninger med ny yaw-design .....	60
Tabell 28 Mesh og spenninger for endestykke.....	65
Tabell 29 Mesh og spenninger for endestykke.....	67
Tabell 30 Mesh og spenninger for horisontalbolten.....	71
Tabell 31 Mesh og spenninger for Ø16 bolt .....	73
Tabell 32 Mesh og spenninger for vertikalbolt .....	77
Tabell 33 Mesh og spenninger for rør.....	79
Tabell 34 – Utdrag fra kravspesifikasjon gitt av LBO .....	81
Tabell 35 – Moment og krefter i innfesting .....	81
Tabell 36 – Kravspesifikasjon for innfesting .....	83
Tabell 37 – Aktuatorer til prototyp .....	87
Tabell 38 – Innfrielse av kravspesifikasjon.....	90
Tabell 39 – Komponenter i seksjon.....	92

## Ordliste

ITER	– International Thermonuclear Experimental Reactor
AIA	– Articulated Inspection Arm
LBO	– Linjebygg Offshore AS
Nyhamna	- Shell sitt gassmottaksanlegg vest for Molde
Mesh pad	- Plate som skiller scrubber tank i to indre rom
Scrubber tank	– Tank hvor man fjerner oljepartikler fra gass
Separator tank	– Tank for separasjon av olje, vann og gass
NTNU	– Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
IPM	– Institutt for produktutvikling og material
Yaw	– rotasjon om vertikal akse
Pitch	– rotasjon om horisontal akse
ATEX	– Atmosphères Explosibles
Solidworks	- Dataassistert konstruksjon- og analyseprogramvare
NX	- Dataassistert konstruksjon- og analyseprogramvare
NDT	- Ikke-ødeleggende metode for testing av materiale
Splitline	- Funksjon i Solidworks som deler inn en flate med en linje
Curvature based mesh	- mesh som tar høyde for kurver og radier

# 1 Innledning

Tankinspeksjon er et område som byr på mange utfordringer. Risikoen ved å sende personell inn i en prosesstank er uønsket, og produksjonslinjen må stenges ned for å utføre inspeksjonen. En operasjon for å koble ifra et stort rør fra en prosesstank og flytte det så et blendingsspjeld kommer på plass kan være omfattende både utstyrs- og tidsmessig. Ved å entre med et fjernstyrt verktøy vil man kunne spare store kostnader for operatørselskapene som da slipper å blende tanken i forkant av en inspeksjon. Verdiene som blir produsert i løpet av en dag er på mangfoldige millioner, og ved å kutte ned tiden på driftsstansen vil man kunne spare store beløp i tapt produksjon.

Tankene som skal inspiseres er forskjellige i utforming og plassering. Det kan være tanker på noen få meters lengde til tanker på over 20 meter. At tankene er så forskjellige i utforming og plassering er med på å gjøre inspeksjonsoppgaven kompleks og utfordrende. En løsning bør derfor være konstruert slik at den med enkle grep kan tilpasses den enkelte tankenes spesielle utforming og plassering.

Oppgaven som er beskrevet i denne rapporten er gitt av Linjebygg Offshore AS og går parallelt med deres eget utviklingsprosjekt. Rapporten bygger videre på prosjektoppgaven skrevet høsten 2013, som kartla hvilke løsninger for tilkomst og inspeksjon som finnes i forskjellige industrier og vurderte hvilke konsepter som kunne gjennomføre en tankinspeksjon. Beste løsning ble vurdert til å være konsepter basert på et produkt som kalles AIA, en inspeksjonsarm med lang rekkevidde som ble utviklet for inspeksjon inne i den eksperimentelle ITER reaktoren i Frankrike.

Oppgaven følger en kravspesifikasjon gitt av Linjebygg Offshore AS samt bruks og lasttilfeller er basert på inspeksjon av en spesifikk tank som står på Nyhamna. Det ble også i et koordineringsmøte med Linjebygg Offshore AS bestemt at oppgaven skulle spisses mot bruk av elektromekaniske aktuatorer.

## 2 Kravspesifikasjon

### 2.1 Oppdatert kravspesifikasjon fra prosjektoppgave

I oppgaven benyttes samme kravspesifikasjon fra LBO som ble benyttet i prosjektoppgaven. Det er derimot noen punkter som faller bort på grunn av at oppgavens omfang er begrenset til den rent mekaniske løsningen. Kravspesifikasjonen er listet i Tabell 1 og de punkter som ikke er relevante i forhold til oppgavens omfang er markert med rødt.

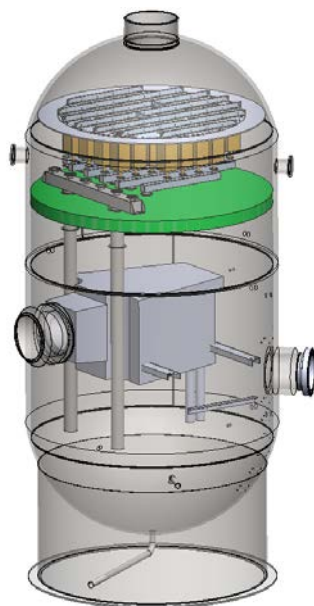
Temperaturer	Operasjon: -10...30 °C	
	Design: -10...40 °C	
	Tillatt: -10...60 °C	
Fjernstyringsavstand	Minimum 50m	Styring og lengde på kabler faller utenfor oppgavens omfang
Belastning på ende	100N	Redusert fra opprinnelige 300N
Posisjon	En skal vite eksakt posisjon for hvert ledd. Gjerne visning i 3D modell	Legges til grunn. Aktuatorer bør ha mulighet for posisjonssensorer.
Tilgjengelig strøm	230VAC og 440VAC	
Styring	Fra sikkert område	Styring er ikke en del av oppgavens omfang
Rekkevidde	Må kunne føres inntil 350mm fra overflatene som skal inspiseres.	
Sikring av deler	Det skal ikke være mulig for deler å falle ned inne i tanken, det må tenkes sikring.	Innebærer sikring av bolter og andre deler som ikke er en permanent del av konstruksjonen.
Montering	Armen må kunne monteres i mannhull, gjerne med en fleksibel ordning. Tilgjengelig sone for innføring er inntil 1,5m fra mannhull.	Ikke den del av oppgavens omfang. Kravspesifikasjon for monteringsanordning utarbeides slik at denne kan utvikles på et senere tidspunkt.
<b>Opsjon (må legges til grunn, men må ikke implementeres i første runde)</b>		
Rengjøring	Vann 400bar 1000l/time 350mm fra inspeksjonsflate	Minimum 100bar 1000l/time, ca. 70N reaksjonskraft.

Inspeksjon	Video HD 1920x1080	Stillbilder må være mulig, vekt ca. 10 kg.
ATEX godkjenning	ATEX Sone 1	Prototypen trenger ikke være sertifisert, men det bør være tanker om materialvalg og løsning som kan føre til det uten for store endringer.

**Tabell 1 Oppdatert kravspesifikasjon**

## 2.2 Brukssituasjon

For å kunne anses som et alternativ må manipulatoren først og fremst kunne gjennomføre en inspeksjon med samme grad av kompleksitet som dagens løsning. Eksempelvis er inspeksjon av nedre kammer i scrubber-tanken som står på Nyhamna ansett å være en utfordrende oppgave. Med nedre kammer menes den delen av tanken som er under «mesh pad». Denne inspeksjonsjobben er blitt utført av dagens løsning og er derfor en god referanse. LBO har laget en 3D-modell av scrubber-tanken som vist i Figur 1. Det er denne modellen som er benyttet for å definere manipulatorens rekkevidde og fleksibilitet.



**Figur 1 Scrubber-tank**

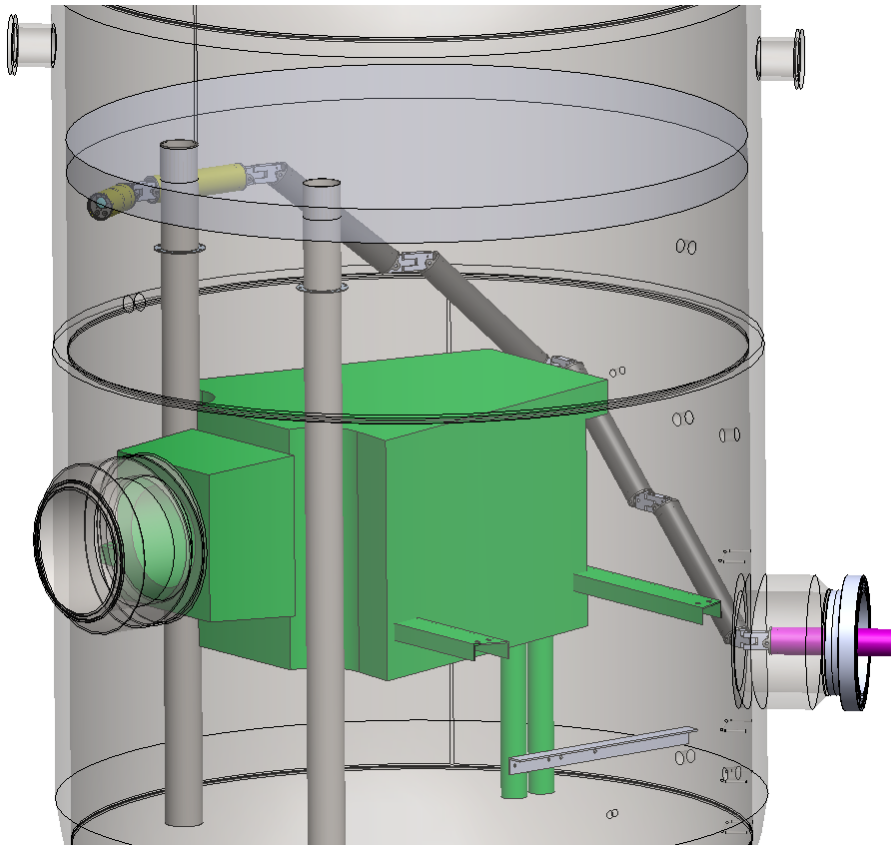
For å kunne gjøre inspeksjonen må manipulatoren føre en utstyrspakke på 10kg frem til en avstand på 350mm fra overflaten som skal inspiseres. Utstyrspakken består av kamera, lys, spyledyser og NDT-utstyr. For å visualisere inspeksjonsjobben i Solidworks er det modellert opp en manipulatorarm som vist i Figur 2. Det er forsøkt å holde antallet seksjoner så lavt

som mulig på grunn av vekt, men samtidig gi nok fleksibilitet til å nå alle områder i tanken. Dette har gjennom prøving og feiling i modellen resultert i en arm med fire seksjoner, samt en ytre seksjon som er noe kortere enn de øvrige for å gi ekstra fleksibilitet i enden av armen. Verktøyet på enden har samme diameter som resten av armen, med innebygget utstyrspakke for å lette innføringen i tanken. Dette designet tjener som utgangspunkt for lasttilfellene og som et utgangspunkt for videre utvikling.

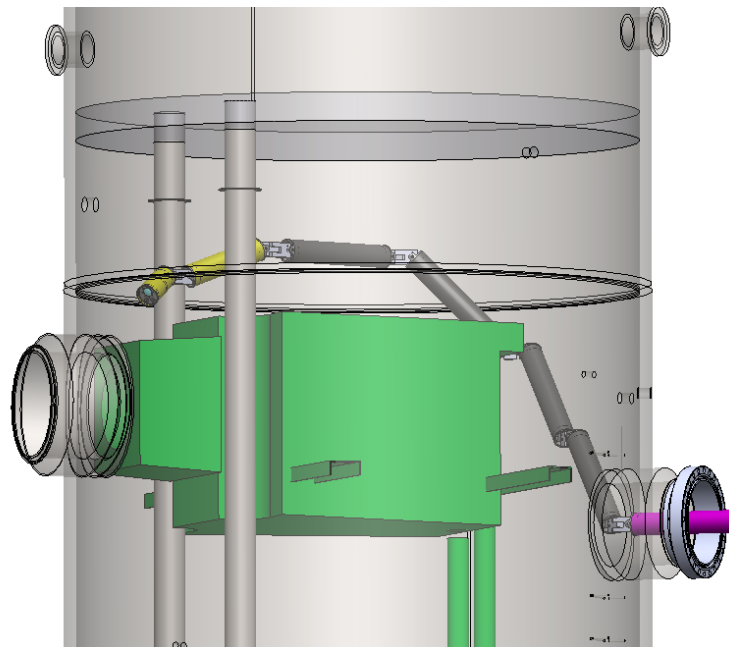


**Figur 2 Manipulatorarm**

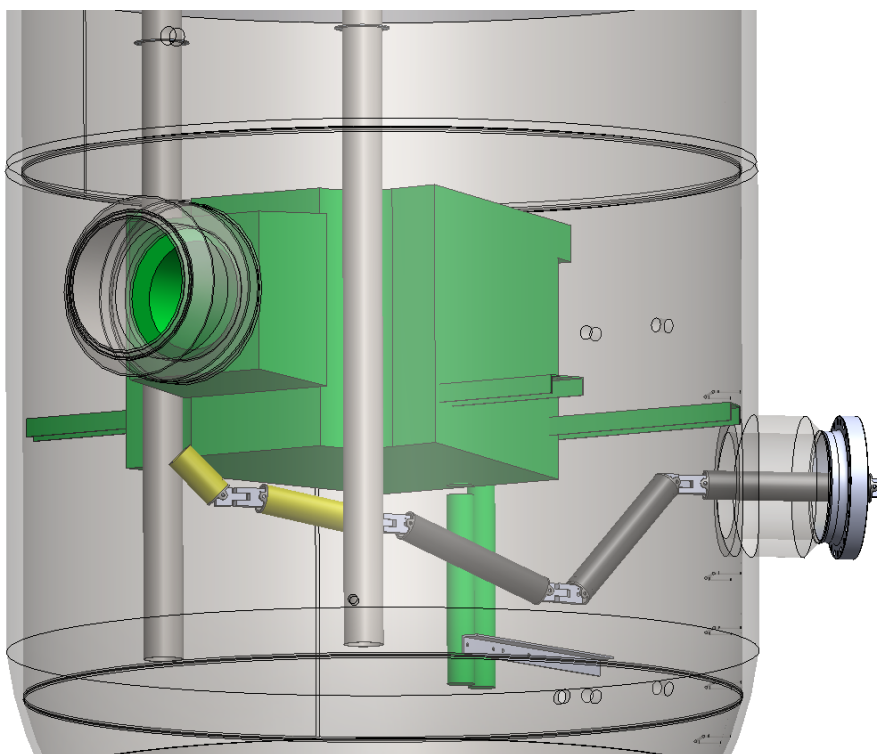
Hovedutfordringen ved inspeksjon av scrubber-tanken er å komme til i områdene i bakkant av innmaten sett i forhold til mannhullet. Med en modulær design vil de øvrige områdene kunne nås ved å gjøre inspeksjonen i to eller flere omganger og føre inn det antall ledd som behøves. Figur 3, Figur 4 og Figur 5 viser hvordan man ved å tilpasse antall ledd kan komme til både i bakkant av innmat og i områder under innmaten.



**Figur 3 Manipulatorarm 1**



**Figur 4 Manipulatorarm 2**



Figur 5 Manipulatorarm 3

## 2.3 Lasttilfeller

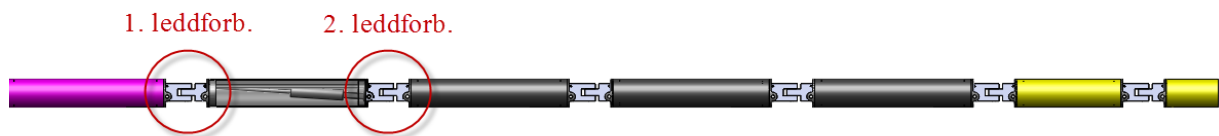
Brukssituasjonen dikterer at det er nødvendig med tilkomst i bakkant av innmaten i scrubber-tanken. Med den valgte kombinasjonen av seksjoner gir dette en arm med spesifikasjoner som listet i Tabell 2. Vekt er estimert ut i fra gjennomsnittsvekten på AIA-armens ledd. Dette innebærer sannsynligvis utstrakt bruk av titan eller kompositter i rør, ledd og stag, samt spesialtilpassede og svært kompakte aktuatorer.

Komponent	Lengde	Vekt	Antall
Lang seksjon	1170 mm	20 kg	4
Kort seksjon	870 mm	15 kg	1
Verktøy	435 mm	10 kg	1
Total	5985 mm	105 kg	6

Tabell 2 Manipulatorarmens lengdespesifikasjoner

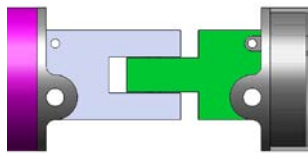
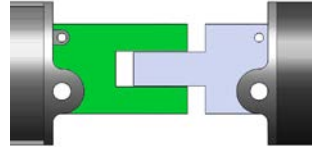
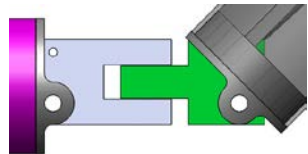
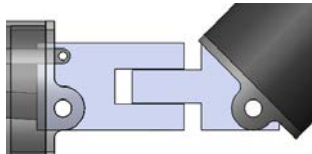
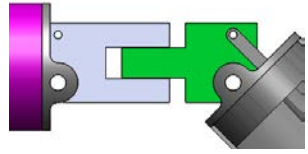
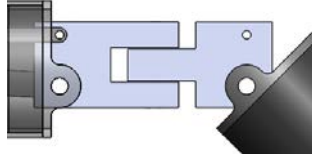


Basert på lengde og de estimerte tyngdene av hver seksjon er det regnet ut hvilket moment og hvilke krefter som vil virke på konstruksjonen. Ved å se på de mest ekstreme scenarioer når dimensjonerende krefter beregnes, sikres det at komponentene er dimensjonert for alle andre konfigurasjoner. I dette tilfelle vil det si at det dimensjoneres for at armen kan strekkes helt ut og svinges +/- 90 grader i horisontalplanet (yaw) i 1. leddforbindelse. I tillegg må man ta høyde for kreftenes fordeling og angrepsretning i 2. leddforbindelse når første seksjon heves og senkes +/- 45 grader i vertikalplanet (pitch). 1. og 2. leddforbindelse er markert på Figur 6.



**Figur 6 1. og 2. leddforbindelse**

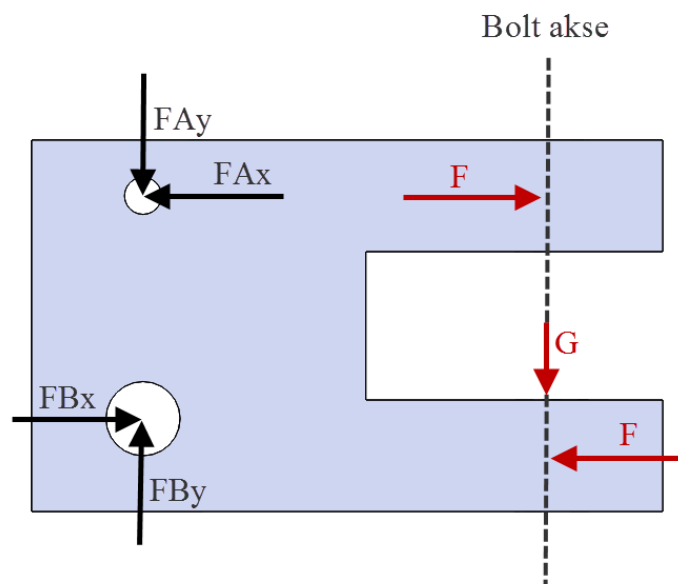
For videre analyse av kreftene må de to leddene i hver leddforbindelse ses på separat ettersom de vil få forskjellig kraftpåvirkning når armen gis utslag i høyde og side (pitch/yaw). De forskjellige dimensjonerende konfigurasjonene for hvert ledd er angitt i Tabell 3, hvor de er markert med grønt. Det bør for ordens skyld nevnes at «Pitch +/-45» ikke er tatt med fordi de sett fra de enkelte komponenters synspunkt ikke er dimensjonerende konfigurasjoner.

	1. Leddforbindelse	2. Leddforbindelse
Pitch 0/0		
Pitch 0/+45		
Pitch 0/-45		

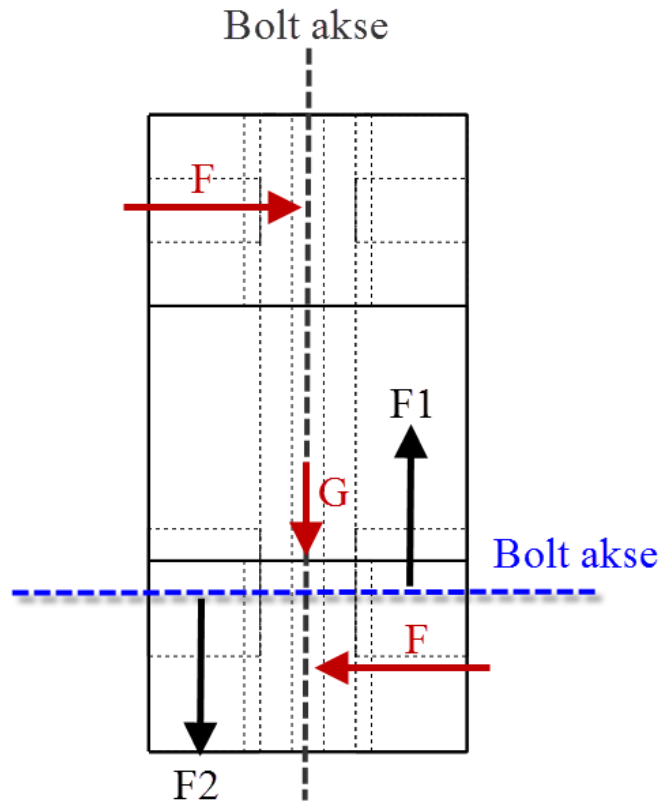
Pitch +45/0	N/A	
Pitch -45/0	N/A	
Yaw 90		

Tabell 3 Dimensjonerende konfigurasjoner

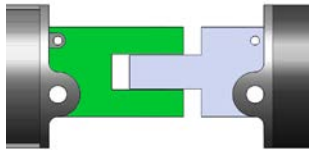
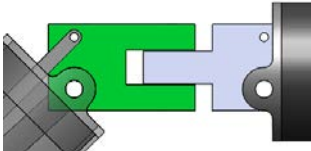
Leddets med størst åpning vil heretter omtales som pitch-leddet og det motstående vil kalles yaw-leddet. Dette er gjort på grunn av at det sistnevnte vil ha festepunkter for vaierdraget fra yaw-aktuatorene. I Figur 7 og Figur 8 vises en forenklet skisse av kraftplanene i pitch-leddet for hhv bøyning og torsjon. I Tabell 4 finnes en oversikt over krefter og opplagerreaksjoner i leddets dimensjonerende konfigurasjoner. Utrekninger finnes i Vedlegg C.

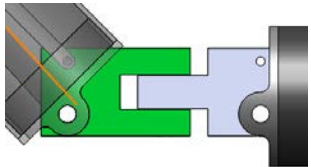
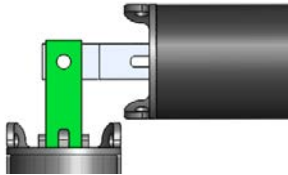


Figur 7 Kraftplan i pitch -leddet ved bøyning



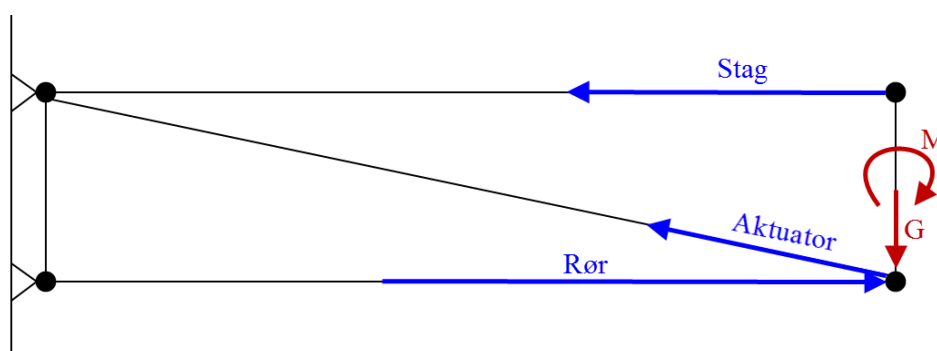
Figur 8 Kraftplan i pitch -leddet ved torsjon

Pitch-leddets dimensjonerende krefter og opplagerreaksjoner		
	$F = 24505 \text{ N}$ $G = 834 \text{ N}$	$F_{Ax} = 36313 \text{ N}$ $F_{Ay} = 0 \text{ N}$ $F_{Bx} = 36313 \text{ N}$ $F_{By} = 834 \text{ N}$
	$F = 24505 \text{ N}$ $G = 834 \text{ N}$	$F_{Ax} = 36313 \text{ N}$ $F_{Ay} = 36313 \text{ N}$ $F_{Bx} = 36313 \text{ N}$ $F_{By} = 37147 \text{ N}$

	$F = 24505 \text{ N}$ $G = 834 \text{ N}$	$F_{Ax} = 36313 \text{ N}$ $F_{Ay} = 36313 \text{ N}$ $F_{Bx} = 36313 \text{ N}$ $F_{By} = 35480 \text{ N}$
	$F = 41659$ $G = 834 \text{ N}$	$F_1 = 41144 \text{ N}$ $F_2 = 42174 \text{ N}$

**Tabell 4** Krefter og opplagerreaksjoner i leddets dimensjonerende konfigurasjoner

Basert på opplagerreaksjonene finnes største krefter som virker i seksjonenes komponenter. Disse fordeler seg som trykk/torsjon i røret og dets endestykker, strekk i to langsgående parallelle stag og strekk i høydeaktuatoren. Dette er illustrert i Figur 9. Dimensjonerende laster for hhv rør, stag og aktuator er listet i Tabell 5. Utregninger ligger i Vedlegg C.

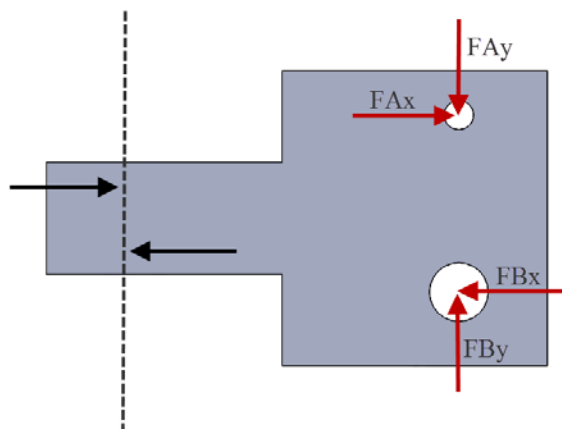


**Figur 9** Fordeling av krefter

Komponent	Maksimal belastning
Rør og endestykke	65950 N trykk
Parallellstag	51355 N strekk
Høydeaktuator	15269 N strekk

**Tabell 5** Dimensjonerende laster for rør, stag og aktuator

Krefter som overføres rør, aktuator og stag fra 2. leddforbindelse gir resultantene som virker i yaw-leddet i 1. leddforbindelse. I Figur 10 vises en forenklet skisse av kraftplanet i yaw-leddet og kraftkomponentene er listet i Tabell 6. Utregninger ligger i Vedlegg C.

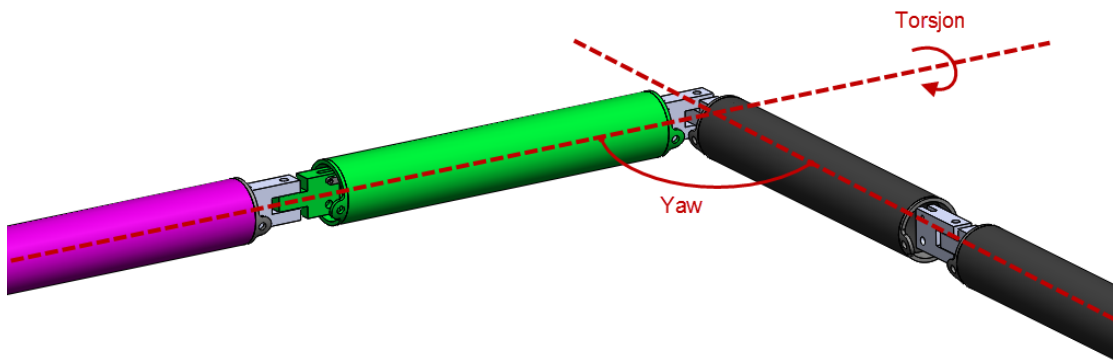


Figur 10 Kraftplanet i yaw-leddet

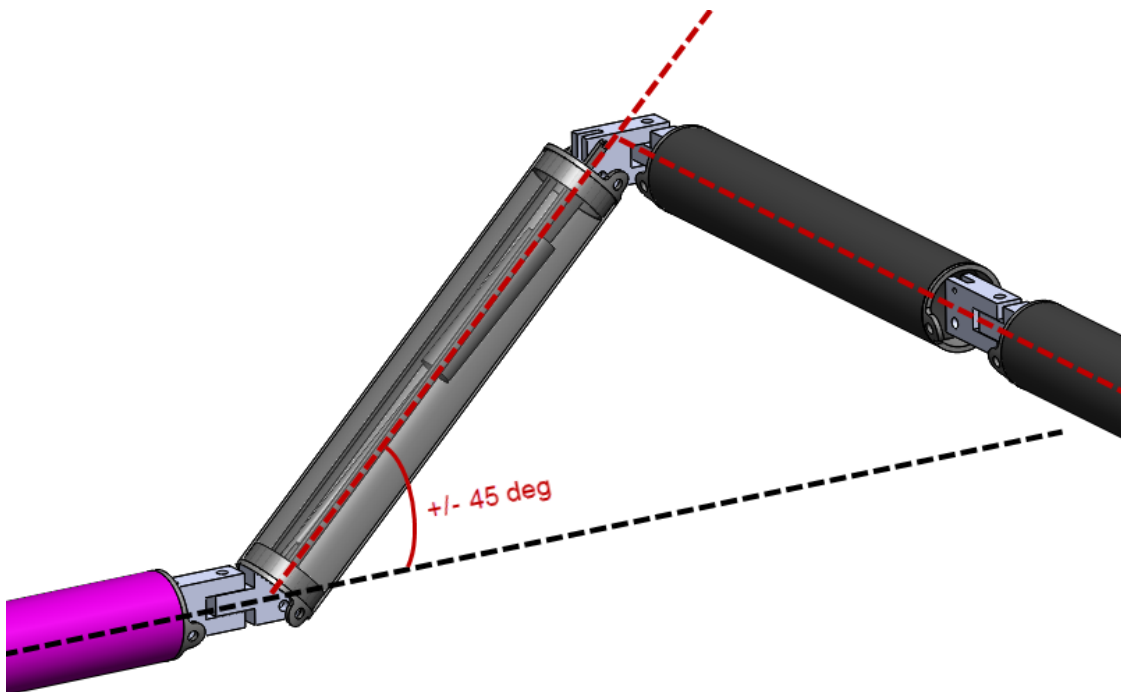
Yaw-leddets dimensjonerende krefter		
$F_{Ax} = 50869 \text{ N}$	$F_{Ax} = 46634 \text{ N}$	$F_{Ax} = 46634 \text{ N}$
$F_{Ay} = 981 \text{ N}$	$F_{Ay} = 45751 \text{ N}$	$F_{Ay} = 47615 \text{ N}$
$F_{Bx} = 50869 \text{ N}$	$F_{Bx} = 45453 \text{ N}$	$F_{Bx} = 46634 \text{ N}$
$F_{By} = 49 \text{ N}$	$F_{By} = 45502 \text{ N}$	$F_{By} = 46683 \text{ N}$

Tabell 6 Yaw-leddets dimensjonerende krefter

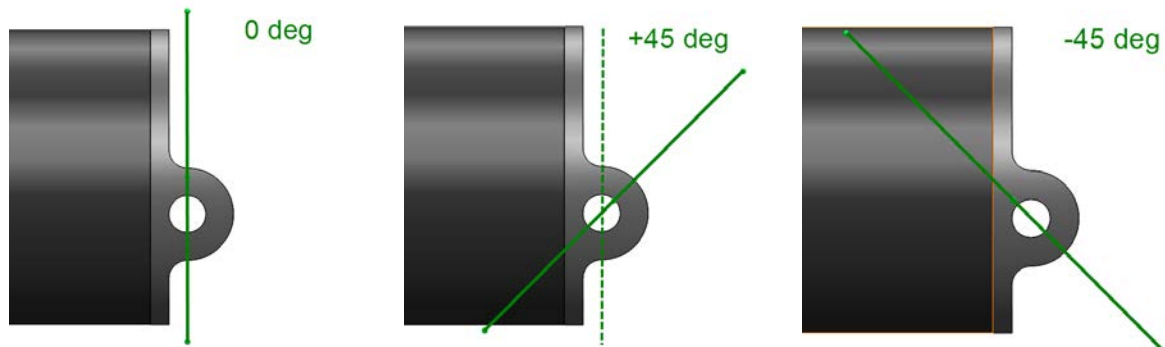
I tillegg til trykkrefter vil røret også utsettes for torsjon når armens andre leddforbindelse får utslag i horisontalplanet (yaw). Dette torsjonsmomentet vil være det samme som pitch-leddet utsettes for. Dette momentet vil også overføres til yaw-leddet i første leddforbindelse. Som tidligere må konstruksjonens vektcomponent «G» inkluderes i regnestykket. Angrepsvinkelen for torsjonsmomentets resultanter krefter i rørets boltehull vil igjen være avhengig av pitch vinkelen på første seksjon. Figur 11 viser lasttilfelle, Figur 12 og Figur 13 viser hvordan kraftplanet varierer med pitch vinkel, og Tabell 7 viser de dimensjonerende krefter på røret fra torsjonsmoment.



Figur 11 Lasttilfelle



Figur 12 Lasttilfellets variasjon ved pitch og yaw



Figur 13 Kraftplanets variasjon med pitch-vinkel

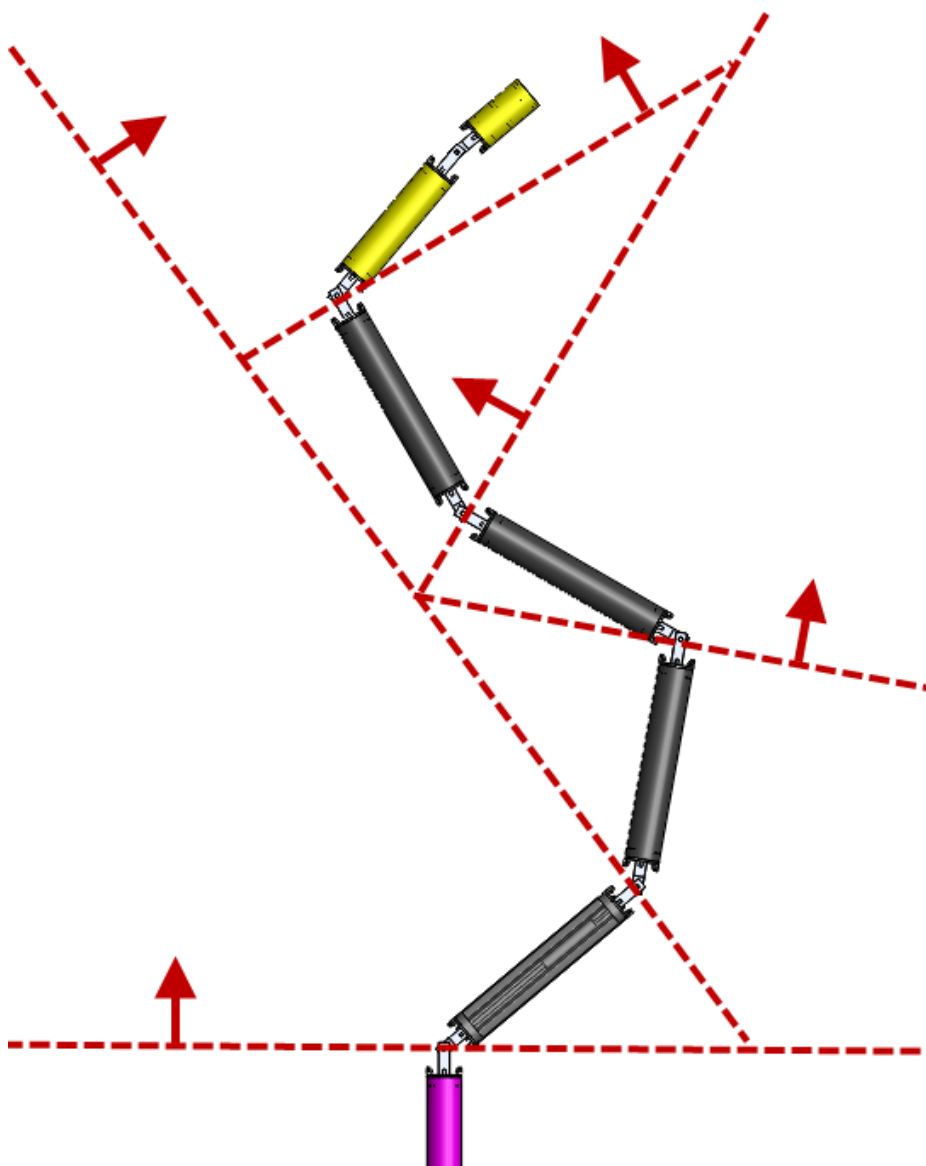
Dimensjonerende krefter på røret fra torsjonsmoment	
	Avstand mellom boltehull:
	$L = 110 \text{ mm}$
	Egenvekt i kraftplanet:
	$G = 834 \text{ N}$
	Torsjonsmoment:
	$M = 2083 \text{ Nm}$
	Opplagerkrefter:
$F1 = 18421 \text{ N}$	
$F2 = 19451 \text{ N}$	

Tabell 7 Dimensjonerende krefter på røret fra torsjonsmoment

Opplagerkreftene som er beskrevet i dette kapittelet er et sammendrag av utregningene som er gjort. For en beskrivelse av utregningene i sin helhet, se Vedlegg C. Kraftene danner grunnlaget for design og dimensjonering av komponentene i inspeksjonsarmen og benyttes i alle beregninger og FEM- analyser.

## 2.4 Bruksbegrensning

En viktig bruksbegrensning må innføres for at beregningene skal være gyldige. Armen må aldri styres i en slik posisjon at momentet i ett eller flere ledd reverseres. Konsekvensen vil avta jo lengre ut i armen man kommer, men det er uansett en lastsituasjon som det ikke er dimensjonert for. Designet baserer seg på at trykkreftene tas opp i røret, som har den best egnede geometrien for slike belastninger, og at strekkstag og aktuator kan gjøres veldig slanke som følge av at de kun utsettes for strekk. Figur 14 illustrerer hvordan utslaget på hvert yaw-ledd begrenser rekkevidden på etterfølgende seksjoner i armen.



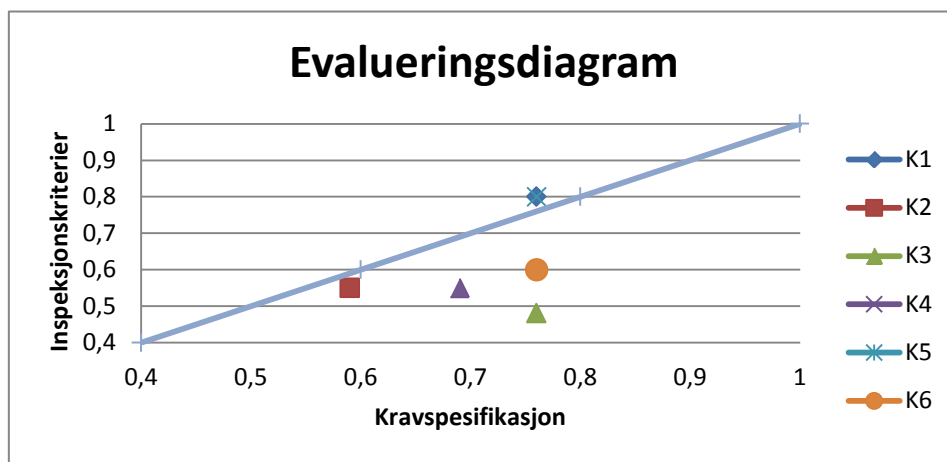
Figur 14 Yaw-bevegelsens begrensning på rekkevidden



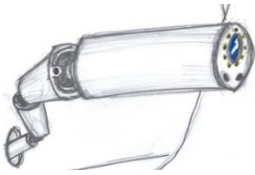
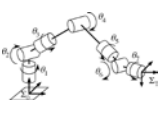
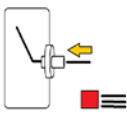
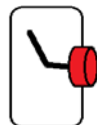

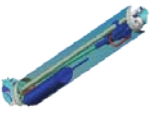
### 3 Design

#### 3.1 Konsept

I prosjektoppgaven som ble skrevet høstsemesteret 2013 ble de tre første fasene av IPM sin produktutviklingsmetodikk [1] fulgt og gjennomført. De tre fasene er henholdsvis: Fase 1: visjon, Fase 2: Behovs og teknologianalyse og Fase 3: Konseptutvikling. I fase 3 ble det evaluert seks konsepter som ble vurdert opp mot kravspesifikasjon og inspeksjonskriterier. Konseptet leddarm/parallellogramarm (K1 og K5) fikk da de høyeste samlede verdiene slik det er vist i evalueringsdiagrammet i Figur 15. Begge konseptene baserte seg på designelementer fra AIA armen, men med litt forskjellige løsninger for innføring.

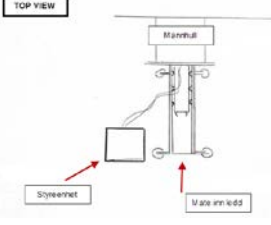

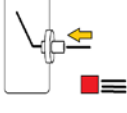
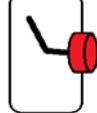

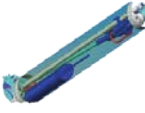


Figur 15 - Evalueringsdiagram

Konsept 1 - Leddarm					
	Prinsipp	Innføring	Opplagring	Drivmedium	Bevegelse
					
<p>Baserer seg på teknologi fra AIA armen. Elektriske aktuatorer erstattes med pneumatikk og kabler føres i en kabel gate på armen. Ventilstyring plasseres i egen modul utenfor tanken.</p> <p>Opplagringen skjer ved hjelp av en flens som festes på mannhullet. Denne inneholder et rør som tjener som innføringsvei for armen og som ankring for siste ledd. Armen bygges sammen etter hvert som den mates inn i tanken.</p>					

Tabell 8 – Konsept 1 fra prosjektrapport

## Konsept 5 – Parallellogram arm

	Prinsipp	Innføring	Opplagring	Drivmedium	Bevegelse
					
<p>Konseptet er en arm i flere ledd der hvert ledd består av en parallellogramstruktur, konseptet baserer seg på AIA-armen.</p> <p>Innføringskonseptet består av en skinne hvor armens ledd blir ført inn i spor som låser den fast til skinnen. Selve skinnen kan lagres opp mot mann hull og ned mot struktur.</p>					

Tabell 9 – Konsept 5 fra prosjektrapport

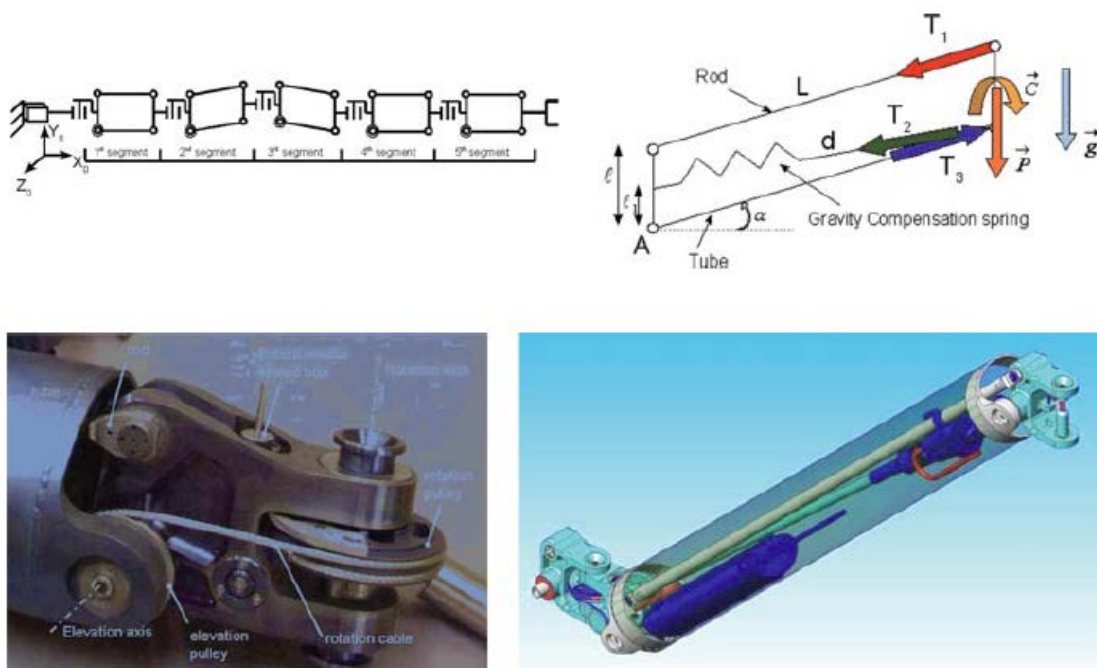
Konseptfasen ble avsluttet med prosjektrapporten, og for det videre arbeidet følger fase 4: struktur og utforming. I produktutviklingsmetoden til IPM [1] foreslås følgende sekvenser:

1. Studer/benytt eksisterende løsninger og komponenter
2. Identifiserer enkeltkomponenter i den kvantitative strukturen og utfør:
  - a. Identifisere funksjon, grensebetingelser, krav/kriterier og «flyt»
  - b. Foreslå material og produksjonsprosess
  - c. Konstruer funksjonsflatene, bruk funksjonsflatevariasjonsmetoden
  - d. Utform komponenter, bruk formvariasjonsmetoden, raffiner
  - e. Gå til punkt a. og gjenta prosessen for alle komponentene
3. integrer mange funksjoner til hver komponent ved å omorganisere og raffinere, bruk fordelingsmetoden

Disse sekvensene har vært verktøy for å utvikle en modell i Solidworks, med tilhørende dokumentasjon av analyser og håndberegninger.

## Kort om AIA - armen

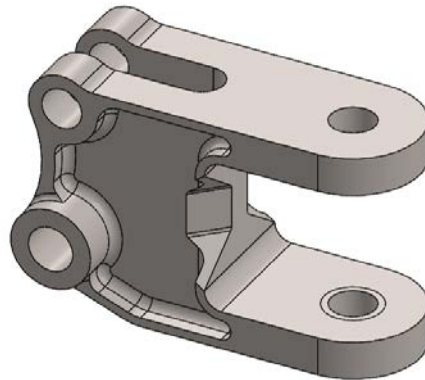
Konseptet som skal utvikles er som nevnt basert på designelementer fra AIA-armen. Denne er nærmere beskrevet i prosjektoppgaven som denne rapporten bygger på, men det gis her for ordens skyld en kort beskrivelse av prinsippene. Armen består av flere rørseksjoner forbundet med ledd som kan artikuleres i horisontalplanet. Seksjonene består av en parallelogramstruktur hvor røret tar opp trykkrefter og strekkrefter tas opp i to parallelle stag som går gjennom røret. Inne i røret sitter aktuatorer som styrer høydeutslag ved å endre lengden på diagonalen i parallelogrammet. Inne i røret sitter også aktuatoren som styrer yaw-bevegelsen ved å trekke i vaiere forbundet med forrige seksjonens ledd. Parallelogramstrukturen sørger også for å holde aksene i forbindelsene mellom seksjonene vertikale slik at aktuatorene som styrer yaw-bevegelsen kan holdes små. I Figur 16 finnes skisser og bilder hentet fra en rapport om AIA-armen [2] som beskriver prinsippene godt.



Figur 16 – AIA-armens prinsipper [2]

## 3.2 Ledd

### Pitch-ledd



Figur 17 – Pitch-ledd

Navnet er gitt ut ifra aktuatoren som er festet inn mot leddets nedre bolt og gir seksjonen +-45 grader pitch. Pitch-leddet er designet for:

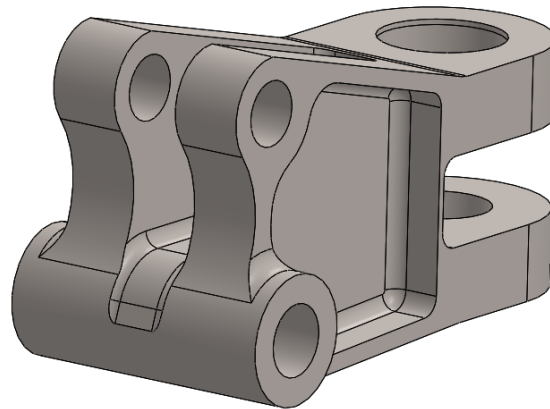
- feste mot parallellstag
- feste mot endestykke
- feste mot vertikalbolt

Utgangspunktet for designet er gjort gjennom en optimaliseringsanalyse i NX, deretter ble det gjort en rekke FEM analyser for å kontrollere spenningene i delen. For å få akseptabel vekt og styrke er delen tenkt maskinert eller printet i titan med flytegrense på 800 MPa, med sikkerhetsverdi på 1.6 gir dette en dimensjonerende flytegrense på 500 MPa. Det er gjort FEM analyser på delen som konvergerer på 402 MPa.

Design data	Arbeidstegninger: Vedlegg B
Materiale	Titan
Tetthet	4730 kg/m <sup>3</sup>
Flytespenning materiale	800 MPa
Dimensjonerende flytespenning	500 MPa
FEM-analyse konvergens	402 MPa
Vekt	1,644 kg

Tabell 10 – Data for pitch-ledd

## Yaw-ledd



Figur 18 – Yaw-ledd

Navnet er gitt ut ifra vaieren som er festet inn mot leddet og gir leddet  $\pm 90$  grader yaw-bevegelse. Yaw-leddet er designet for:

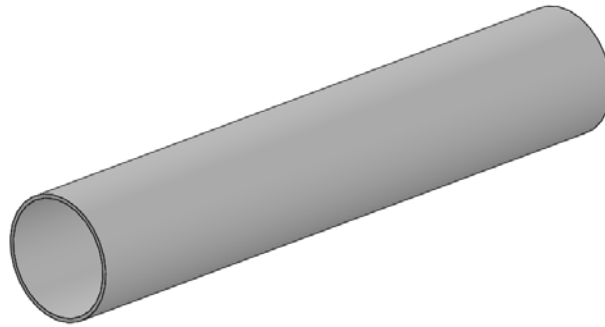
- feste mot parallellstag
- feste mot endestykke
- feste mot vertikalbolt

Utgangspunktet for designet er gjort gjennom en optimaliseringsanalyse i NX, deretter ble det gjort en rekke FEM analyser for å kontrollere spenningene i delen. For å få akseptabel vekt og styrke er delen tenkt maskinert eller printet i titan med flytegrense på 800 MPa, med sikkerhetsverdi på 1.6 gir dette en dimensjonerende flytegrense på 500 MPa. Det er gjort FEM analyser på delen som konvergerer på 451 MPa.

Design data	Arbeidstegninger: Vedlegg B
Materiale	Titan
Tetthet	4730 kg/m <sup>3</sup>
Flytespenning materiale	800 MPa
Dimensjonerende flytespenning	500 MPa
FEM-analyse konvergens	451 MPa
Vekt	1,614 kg

Tabell 11 – Data for yaw-ledd

### 3.3 Rør og endestykke

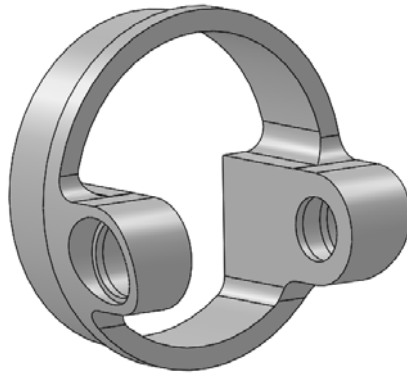


Figur 19 - Rørstykke

Røret utsettes for trykk og torsjon, spenningene er ikke større en at det kan brukes aluminium som materiale. Veggtykkelse er funnet gjennom å kjøre FEM analyser i SolidWorks på forskjellige tykkelser. Dimensjonerende faktor har vært utbøying av røret under kompresjon ettersom dette kan føre til skjevstilling av vertikalaksene i leddforbindelsene. Det har vært vanskelig å vurdere hvor mye som kan tillates, men med 5mm tykkelse vil røret ha en utbøying i overkant av 1mm. Design data for rørdelen er vist i Tabell 12.

Design data	Arbeidstegninger: Vedlegg B
Materiale	Aluminium – 6082 T6
Tetthet	6,74 kg/m
Flytespenning materiale	255 MPa
Dimensjonerende flytespenning	159,3 MPa
FEM-analyse konvergens	46,3 MPa
Vekt	5,86 kg
Veggtykkelse/lengde/ytre dia.	5mm/870mm/160mm

Tabell 12 – Data for rørstykke



**Figur 20 - Endestykke**

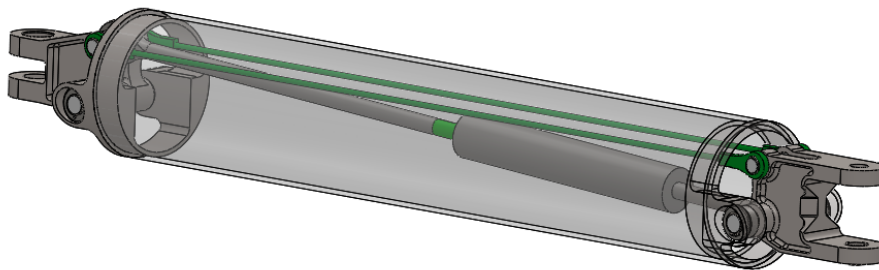
Dersom bolteforbindelsen til leddene skulle gått direkte i røret vil det kreve stor veggtykkelse for å få akseptable spenninger i bolthullene. Det må også monteres glidelagre på akslingen og det er ønskelig at disse står i rørseksjonen for å spare materiale på leddene. Dermed blir det nødvendig med endestykker på rørene som kan holde lagrene og overføre trykk og torsjonsspenninger til røret. De dimensjonerende spenningene er ikke større en at det kan brukes aluminium som materiale. Modellen kan maskineres ut ifra en aluminiums bolt på 160 mm. Design data for rørdelen er vist i Tabell 13.

<b>Design data</b>	<i>Arbeidstegninger: Vedlegg B</i>
Materiale	Aluminium – 6082 T6
Tetthet	2700 kg/m <sup>3</sup>
Flytespenning materiale	255 MPa
Dimensjonerende flytespenning	159,3 MPa
FEM-analyse konvergens	141,5 MPa
Vekt	0,99 kg

**Tabell 13 – Data for endestykke**

For å sammenføye rør og endestykke er det planlagt å bruke sveis. Dette vil i verste fall redusere materialegenskapene med 40 % i forhold til oppgitte materialdata for aluminiumen. Dette skjer på grunn av at oppvarming av HAZ fjerner styrkebidraget fra herdingsprosessen. I og med at det er brukt 6000 serie aluminium som kan varmebehandles er det mulig å motvirke dette til en viss grad ved å varmebehandle sveisen. Akkurat hvor stor HAZ blir og hvor stort styrketap man får, må bli gjenstand for testing eller vurderes av eksperter på fagområdet. FEM-analysene som er gjennomført viser imidlertid at spenningene i området hvor sveisen vil ligge er lave, om lag 40-50 % av dimensjonerende flytespenning.

### 3.4 Strekkstag



Figur 21 - Strekkstag

Strekkestag er en samlet betegnelse på alle delene som utgjør forbindelsen mellom pitch- og yaw-leddet. Strekkstagene utsettes kun for strekk og det er sett på tre forskjellige løsninger.

- Helsmidde eller ekstruderte stag
- Gjengestag eller rør med stanghoder
- Vaier med øyetermineringer

Av disse tre er det vaier med øyetermineringer som kommer best ut når man ser på styrke/vekt forhold, i tillegg kan de kjøpes som standardkomponenter. Det er derfor denne løsningen som er valgt.

<b>Design data</b>	
Maksimal belastning – parallellstag	51355 N strekk
Sikkerhetsfaktor	1.6
Dimensjonerende belastning	82168 N (41084N per stag)

Tabell 14 – Data for strekkstag



Det kan brukes maritime komponenter som brukes på seilbåter, leverandøren Blue Wave har en løsning med øyeterminal som kobles sammen med wire. Figur 22 viser valgt størrelse på øye og Figur 23 viser eksempel på tilhørende vaier. Utdrag av katalogen til Blue Wave marine ligger under Vedlegg E.

The Blue Wave Eye Terminals all features, engraved wire size, Blue Wave logo, and swage depth marking for faster and easier swaging.



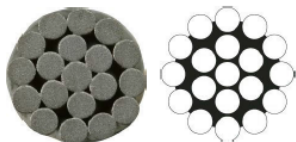
ART. NO.	WIRE	D1	D2	L1	L2	T	BL/KG	KG/100	PACK
190002	2,0 1/16"	5,5	5,5	49	32	3	1200	0,9	100
190025	2,5 3/32"	5,5	5,5	49	32	3	1000	0,8	100
190003	3,0 1/8"	6,35	6,5	58	38	4	1300	1,3	100
190004	4,0 5/32"	7,5	8,5	67	45	5	1700	2,3	100
190005	5,0 3/16"	9,0	10,5	79	51	6	2400	3,9	25
190055	7/32"	10,8	10,5	85	59	6	3900	6,0	25
190006		12,58	13,0	94	64	8	5500	8,7	10
190006X		12,58	13,2	105	64	10	5500	13,2	10
190063	1/4"	12,58	13,0	95	64	8	5200	8,5	10
190063X	1/4"	12,58	13,2	105	64	10	5200	11,0	10
190007	7,0 9/32"	14,2	13,0	104	70	9	6800	11,5	10
190007X	7,0 9/32"	14,2	13,2	110	70	10	6800	13,5	10
190008	8,0 5/16"	16,0	14,5	124	83	10	8700	17,0	10
190008X	8,0 5/16"	16,0	16,5	141	83	12	8700	23,5	10
190095	3/8"	17,8	16,3	137	89	11	10200	25,3	10
190095X	3/8"	17,8	19,5	165	100	16	10200	38,1	10
190010	10,0	17,8	16,3	137	89	11	9700	25,0	10
190010BW	10,0	17,8	16,3	165	100	16	9700	38,0	10
190010X	10,0	17,8	19,5	165	100	16	9700	38,0	10
190012	12,0	20,0	19,3	156	105	15	11400	41,5	5
* 190012X		21,4	19,3	178	120	15	14200	41,0	5
* 190013	1/2"	21,4	19,3	178	120	15	13300	41,0	5
190014	14,0	25,0	23,0	206	140	18	15900	75,6	5
190016	16,0 5/8"	28,0	26,0	232	160	20	19000	102,0	5
190019	19,0	34,5	28,5	302	200	25	31000	209,0	BULK
190022	22,0	40,4	33,0	348	230	30	42000	314,0	BULK
190026	26,0	46,0	36,0	400	280	30	53000	425,0	BULK

Figur 22 – Øyeterminal fra Blue Wave

### S.S. WIRE ROPE

Stainless Steel - AISI 316

1 x 19 AISI 316 BS MA 29 : 1982



ART. NO.	DIM. MM	TENSILE STRENGTH KN	CA. KG/100 M
WR11902	2,0	3,3	1,99
WR11925	2,5	5,15	3,10
WR11903	3,0	7,42	4,47
WR11904	4,0	13,20	7,95
WR11905	5,0	20,60	12,40
WR11906	6,0	29,69	17,90
WR11907	7,0	40,40	24,30
WR11908	8,0	52,00	31,80
WR11910	10,0	78,80	49,70
WR11912	12,0	109,70	71,30

Figur 23 – Vaier fra Blue Wave

### 3.5 Pitch aktuator

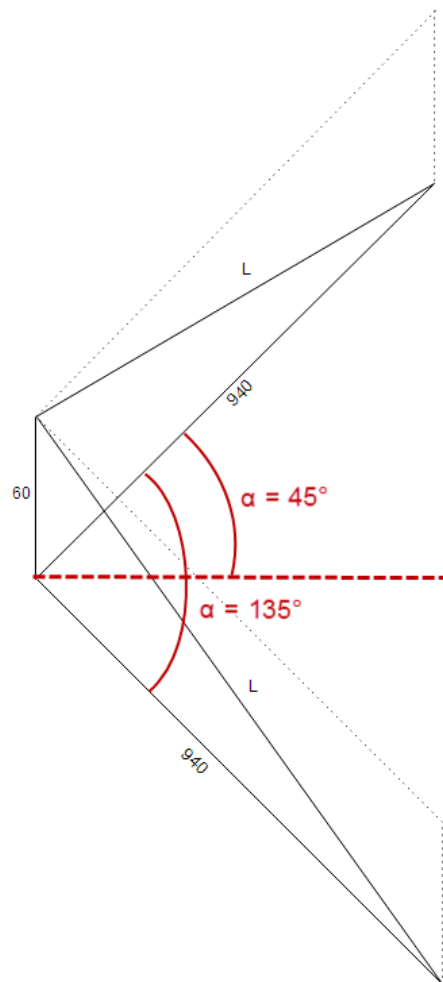
Som det fremgår av lasttilfellene i kapittel 3.1 må høydeaktuatoren ta strekkrefter på 15269N og dersom bruksbegrensningen nevnt i kapittel 2.4 overholdes vil ikke aktuatoren måtte dimensjoneres for trykkrefter. Det er også regnet ut at nødvendig slaglengde er i underkant av 85mm for å oppnå +/-45 grader pitch, dette er vist i Figur 24. Når det gjelder vekt er det dimensjonert for en modulvekt på 20kg, hvor aktuatoren må inngå. Et grovt overlag over de øvrige komponentene i konstruksjonen viser at det gjenstår om lag 7kg til aktuator. Ved å teste forskjellige volum i 3D modellen kan man anslå en maksimal tillatt diameter på 80mm, men dette vil avhenge av geometrien på aktuatoren. En oversikt over kravspesifikasjonen er gitt i Tabell 15.

$$L^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha$$

$$L_{\min} = 898\text{mm}$$

$$L_{\max} = 983\text{mm}$$

$$dL = 85\text{mm}$$



Figur 24 – Slaglengde for pitch-aktuator

Kravspesifikasjon pitch aktuator	
Strekklast	$\geq 15\,269\text{ N}$
Trykklast	0 N
Slaglengde	$\geq 85\text{mm}$
Vekt	$\leq 7\text{kg}$
Diameter	$\leq 80\text{mm}$

Tabell 15 – Kravspesifikasjon for pitch-aktuator

Det er gjort grundige søk på internett for å finne ut hvilke ferdige aktuatorer som finnes på markedet i dag, og hvordan disse passer til kravspesifikasjonen. I Tabell 16 er aktuatorer fra et utvalg leverandører presentert, disse er plukket ut fordi de har relativt små dimensjoner og samtidig klarer kravet til strekklast. De produkttegenskapene som derimot ikke innfrir kravspesifikasjonen er merket med rødt.

Tilgjengelige aktuatorer	
SKF CEMC3004 Kapasitet: 39500N <b>Vekt: 34,3kg</b> <b>Diameter: 227mm</b> Slaglengde: 170mm	
Festo ESBF100 Kapasitet: 17000N <b>Vekt: 13kg + motor</b> <b>Diameter: □100mm</b> Slaglengde: 1-1500mm	
Exlar GSX50-0601 Kapasitet: 19568N <b>Vekt: 24kg</b> <b>Diameter: □140mm</b> Slaglengde: 152mm	

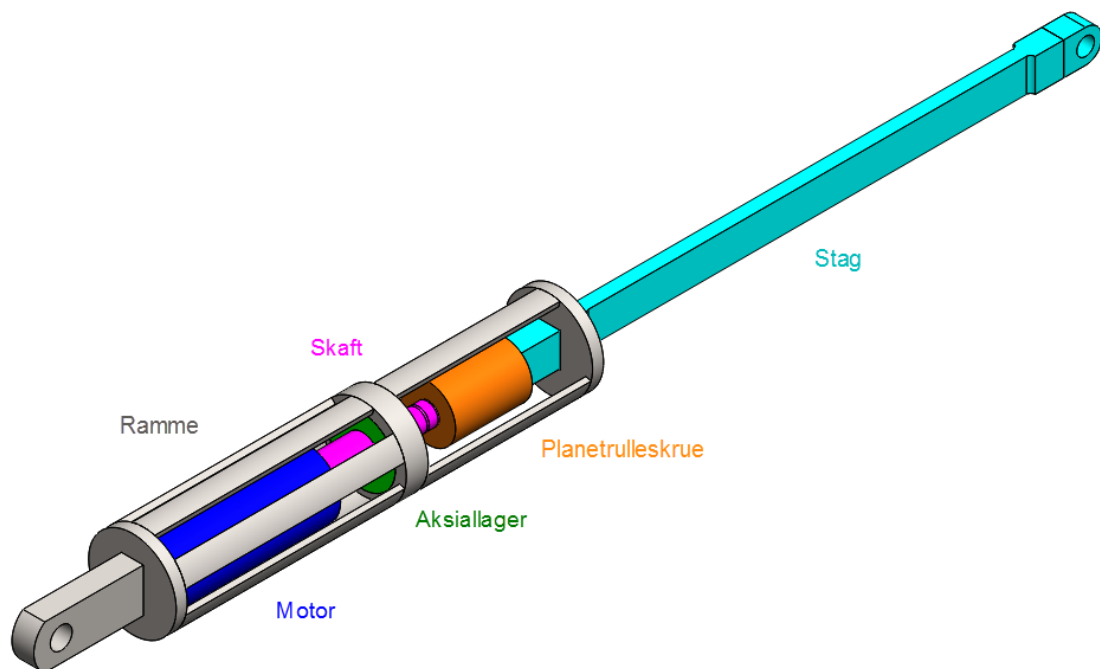
<p>Thomson ECT90  Kapazität: 20000N  <b>Vekt: 25kg</b>  <b>Diameter: 90x92mm</b>  Slaglengde: 1-1500mm</p>	
<p>Tolomatic RSM50  Kapazität: 18278N  <b>Vekt: 8kg + motor og gir</b>  <b>Diameter: □100mm</b>  Slaglengde: 1-1200mm</p>	
<p>Linak LA37  Kapazität: <b>15000N</b>  Vekt: N/A  <b>Diameter: 148mm</b>  Slaglengde: 100-400mm</p>	
<p>Elero Econom 02  Kapazität: 20000N  Vekt: N/A  <b>Diameter: 97mm</b>  Slaglengde: 50-750mm</p>	
<p>Parker ETH080  Kapazität: 25100N  <b>Vekt: 9,5kg + motor og gir</b>  <b>Diameter: □95mm</b>  Slaglengde: 50-1600mm</p>	

Tabell 16 – Oversikt over aktuatorer

Det er brukt mye tid på å skaffe en god oversikt over leverandører og modeller og det kan med stor sikkerhet påstås at det ikke finnes ferdige aktuatorer på markedet som klarer å innfri kravspesifikasjonen. Grunnen til dette antas å være at disse har urelevante produktkrav med svært negativ påvirkning på størrelse og vekt. Figur 25 illustrerer hvordan man kan redusere antall komponenter i aktuatoren til et minimum for å imøtekomme produktspesifikasjonens krav til vekt og størrelse.



#### Produktkrav som øker vekt og ytre dimensjoner:

- Beskyttelse mot forurensninger
  - Beskyttelseskapper
  - Tetninger og foringer
- Modulær oppbygging
  - Braketter, flenser, avstandsstykker og bolter
  - Overdimensjonering av komponenter for å passe i flere konfigurasjoner.
- Dimensjonering for trykkrefter
  - Overdimensjonerte tverrsnitt for å motstå knekking

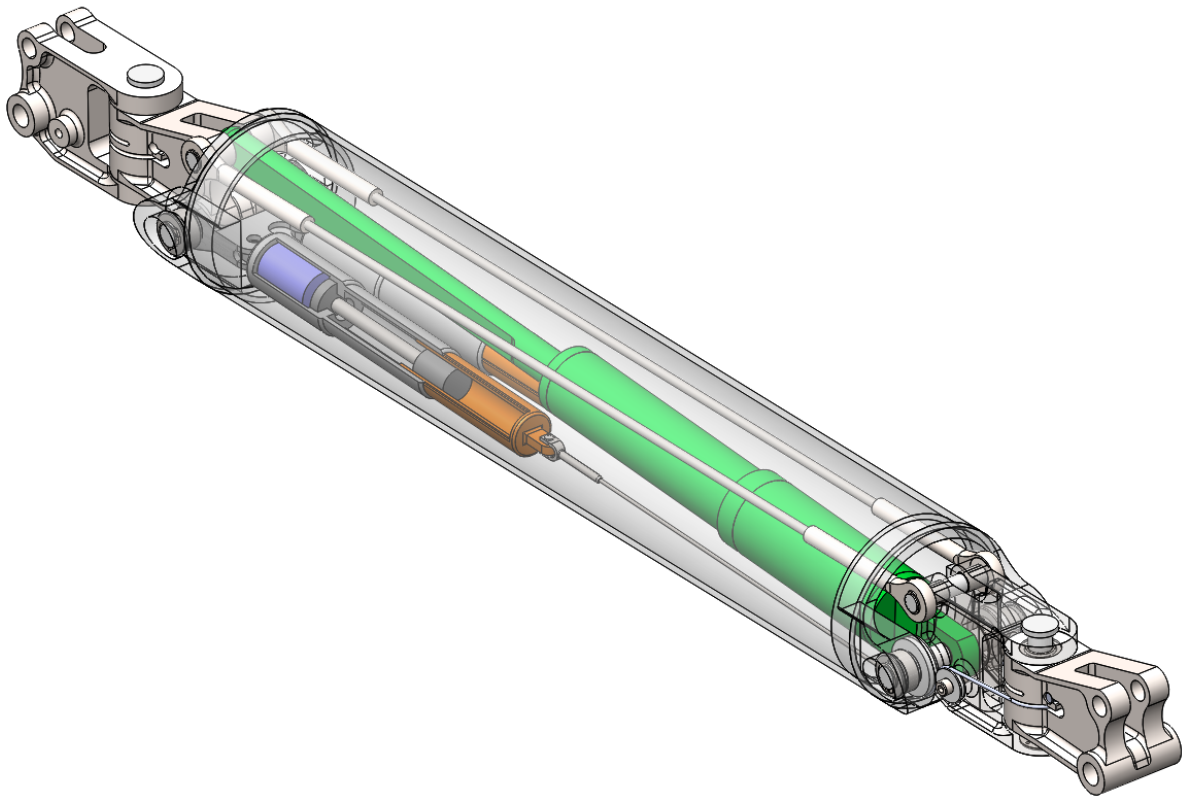


Figur 25 – Illustrasjon av aktuator

Ettersom det ikke finnes ferdige aktuatorer på markedet som tilfredsstiller kravene må det utvikles en løsning. Dette gjøres best i samarbeid med en etablert produsent ettersom de allerede innehar kompetansen og underleverandørene som skal til. Utvikling av aktuatoren er noe som i sin helhet overføres til videre arbeid ettersom dette er en svært kompleks oppgave og vil stjele for mye tid i forhold til design av øvrig komponenter i armen. I Tabell 8 er det listet tre produsenter av aktuatorer som fremstår som innovative og markedsfører kundetilpassede løsninger. Figur 26 viser en modell av hvordan en aktuator kan tenkes å bli seende ut.

Aktuatorleverandører	
	<p>Global teknologileverandør med fokus på lager, tetninger, mekatronikk og smøresystemer. Har gjennom mailkorrespondanse via Rekvisitt AS i Trondheim signalisert en vilje til å tilpasse produkter.</p> <p>Hjemmeside: <a href="http://www.skf.com">www.skf.com</a></p>
	<p>Ledende global leverandør innenfor automasjon. Hovedvekt på pneumatiske og elektriske løsninger. Markedsfører seg selv som veldig innovasjonsdrevet.</p> <p>Hjemmeside: <a href="http://www.festo.com/">http://www.festo.com/</a></p>
	<p>Dansk selskap med stort utvalg av forskjellige lineæraktuatorer. Påstår å ha markedets største utvalg av aktuatorsystemer. Markedsfører seg som en sterk partner i utvikling av nye applikasjoner.</p> <p>Hjemmeside: <a href="http://www.linak.com">www.linak.com</a></p>

Tabell 17 – Aktuelle samarbeidspartnere ved utvikling av aktuator

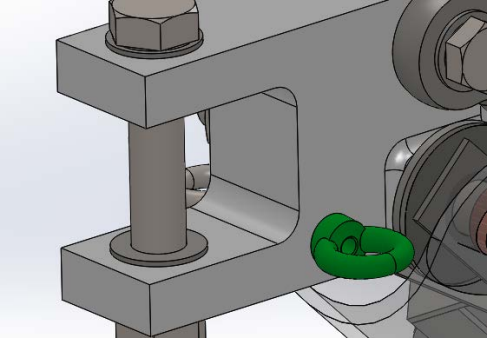
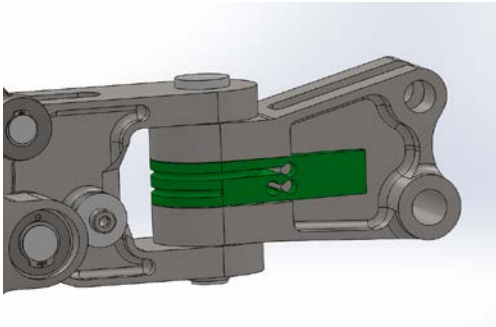


**Figur 26 – Illustrasjonsmodell av pitch-aktuator**

### 3.6 Yaw aktuator

Gjennom bruk av oppgitte verdier fra lagerfriksjon fra SKF er det estimert et totalt friksjonsmoment i lagrene i andre leddforbindelse på 105Nm. Disse utregningene finnes i Vedlegg C.

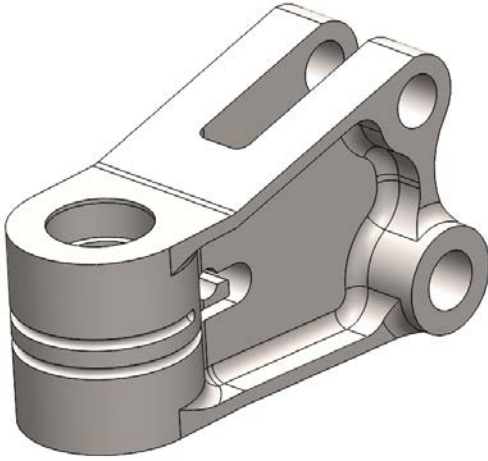
Det er besluttet å benytte et vaierstrekk for å overføre bevegelse fra aktuatorene montert inne i rørseksjonen til rotasjon om vertikalbolten. Dette er et prinsipp som har blitt brukt i AIA-armen og det er ikke funnet noen argumenter for å erstatte dette konseptet med andre former for overføring som eksempelvis stag eller kjettinger. Det er vurdert to forskjellige løsninger for innfesting i yaw-leddet, disse er beskrevet i Tabell 18. Se Vedlegg C for illustrasjoner og utregninger.

<p>Alternativ 1 - Fester i godset på yaw-ledd</p> 	<p>Fordeler:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Lite vektøkning</li><li>• Enkel konstruksjon</li></ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Øker nødvendig slaglengde på aktuatorer</li><li>• Skaper en vaier geometri som endrer seg gjennom utslaget</li></ul>
<p>Alternativ 2 - Brakett montert i vertikalbolt</p> 	<p>Fordeler:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Konstant avstand til aksesenter</li></ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Høy vektøkning</li><li>• Kompleks geometri</li><li>• Krever utradisjonell type vaierterminering</li></ul>

Tabell 18 – Alternativer for innfesting av vaier i yaw-ledd



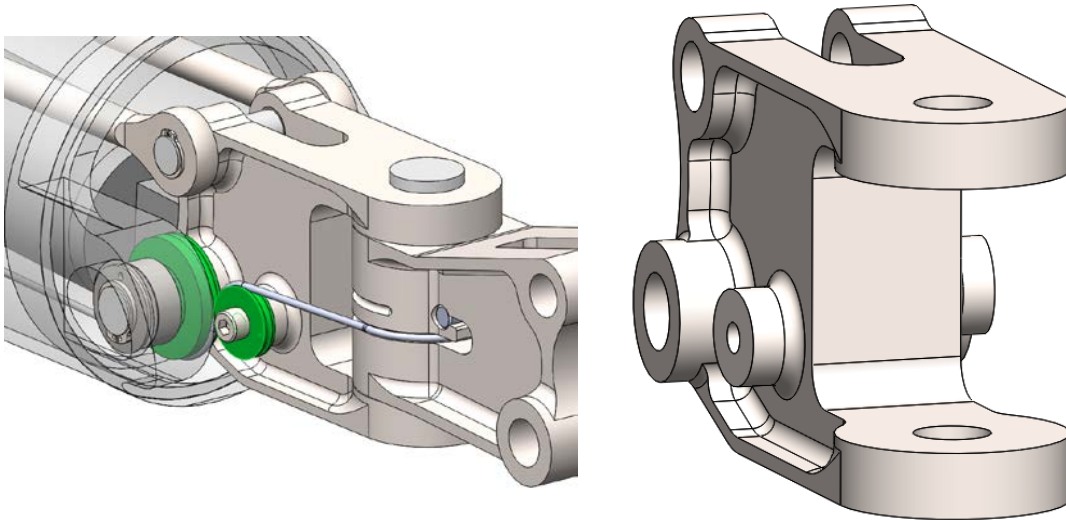
For å unngå ulempene ved endring av vaiergeometri, noe som igjen ville komplisert vaiarføringen inn mot innfestingen, ble det besluttet å gå for alternativ 2. Ettersom det er besluttet å lage leddene i en titanlegering ble det deretter sett på hvordan man kunne integrere vaierefestene i selve leddet i stedet for å frese ut store deler dyrt materiale. Det resulterende alternativ 3 er beskrevet i Tabell 19.

<p>Alternativ 3 – Vaierefester integrert i geometri</p> 	<p>Fordeler:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Utnyttelse av dyrt materiale i delen</li> <li>• Lite vektøkning (ca 200g)</li> <li>• Konstant avstand til aksesenter</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompliserer delens geometri.</li> <li>• Kan resultere i økte produksjonskostnader</li> <li>• Krever utradisjonell vaierterminering</li> </ul>
--	--

Tabell 19 – Endelig løsning for innfesting av vaier i yaw-ledd

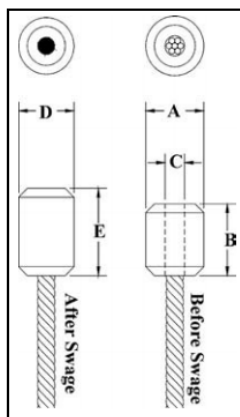
Med den valgte geometrien vil vaierdragets kraftkomponent angripe mer eller mindre tangentielt på sylindere som omslutter boltene. Denne har en radius på 30mm, noe som igjen resulterer i et nødvendig vaierdrag på 3510N for å overvinne lagrenes estimerte friksjonsmoment. Det nødvendige utslaget for å gi leddet et utslag på 90° er beregnet til å være 95 mm. Disse utregningene finnes i Vedlegg C.

For å sikre pålitelig påløp av vaieren på yaw-leddet, samt sørge for at vaiergeometrien holder seg konstant inne i rørseksjonen, er det blitt nødvendig å gjøre modifikasjoner på pitch leddet. Figur 27 viser trinsesystemet for vaieren og resulterende endring av pitch-leddets geometri. For å kontrollere at geometriendringene på begge ledd ikke fører til uakseptable spenningskonsentrasjoner er det gjennomført nye analyser. Dette arbeidet er dokumentert i kapittel 4.



Figur 27 – Trinsesystem for vaier og resulterende geometriendingring

I enden av vaieren er det benyttet en spesiell vaierterminering som kalles «swage buttons». Disse komponentene produseres under varemerket COLD TUFF® av National. Ved bruk av disse termineringene reduseres bruddstyrken for det ståltauet som benyttes til 90 % av opprinnelig verdi. Figur 28 viser hvilke termineringer som er brukt og Figur 30 viser hvordan vaieren festes i yaw-leddet.

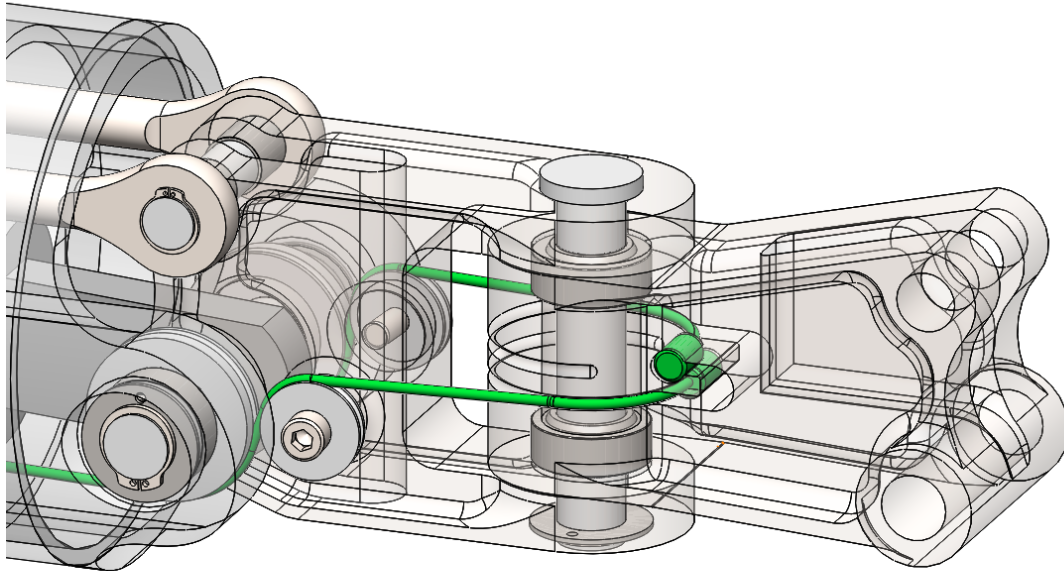


**S-409  
COLD TUFF® Buttons**

S-409 Steel Swage Button Specifications								Press / Die Data			
S-409 Stock No.	Size No.	Rope Size		Weight Per 100 Pcs. (lbs.)	Before Swage Dimensions (in.)			After Swage Dimensions (in.)		Die Desc.	Stock No. 500 Tons 1000 Tons 1500 Tons 5 x 7
		(in.)	(mm)		A	B	C	D Maximum After Swage Dimensions	E Length*		
1040171	1 SB	1/8	3	2	.42	.50	.14	.40	.61	1/8 - 1/4 Button	1191621
1040215	3 SB	3/16	5	4	.56	.70	.20	.52	.84	1/4 1st Stage	1197528
1040251	5 SB	1/4	6-7	8	.68	1.06	.31	.58	1.41	1/8 - 1/4 Button	1191621
1040297	7 SB	5/16	8	16	.88	1.13	.36	.77	1.33	3/8 1st Stage	1192364
1040313	8 SB	3/8	9-10	15	.88	1.48	.42	.77	1.69	3/8 1st stage	1192364
1040331	9 SB	7/16	11	30	1.13	1.63	.48	1.03	1.94	1/2 1st Stage	1192408
1040359	10 SB	1/2	13	50	1.31	1.89	.55	1.16	2.17	5/8 socket	1192907
1040377	11 SB	9/16	14	70	1.44	2.02	.61	1.29	2.41	9/16 - 5/8 Button	1191665
1040395	12 SB	5/8	16	100	1.56	2.42	.67	1.42	2.89	3/4 Socket	1192925
1040411	13 SB	3/4	18-20	131	1.68	2.74	.80	1.55	3.25	3/4 1st Stage	1192462
1040439	14 SB	7/8	22	220	2.00	3.27	.94	1.80	3.86	7/8 1st Stage	1192480
1040457	15 SB	1	25-26	310	2.25	3.67	1.06	2.05	4.36	1 1st Stage	1192505
1040475	16 SB	1-1/8	28-29	450	2.56	4.05	1.19	2.30	4.81	1-1/8 1st Stage	1192523
1040493	17 SB	1-1/4	31-32	650	2.81	4.57	1.33	2.56	5.42	1-3/8 Socket	1193023

\* NOTE: Length is measured from outside end of termination.

Figur 28 – Utdrag av katalog fra National



**Figur 29 – Innfesting av vaier i yaw-ledd**

Når det gjelder aktuator står valget i hovedsak mellom en roterende aktuator og en eller to lineæraktuatorer. De to avgjørende faktorene vil være vekt og tilgjengelighet. Det er ikke ønskelig å velge et aktuatorssystem som krever mye utvikling. Man ønsker heller å basere systemet på tilgjengelige komponenter, eller komponenter som krever lite utvikling for å passe. Kravspesifikasjon for yaw-aktuator er listet i Tabell 20.

Kravspesifikasjon yaw-aktuator	
Strekraft	$\geq 3510\text{N}$
Trykklast	0N
Slaglengde	$\geq 95\text{mm}$
Totalvekt system	$\leq 3\text{kg}$
Diameter	$\leq 80\text{mm}$

**Tabell 20 – Kravspesifikasjon for yaw-aktuator**

Det er undersøkt på nett etter eksempler på begge typer aktuatorer og de som havner nærmest kravspesifikasjonen er lineæraktuatorer fra danske Concens. Se Tabell 21.

	<p><b>con50 (100mm utslag)</b>          Kraft: 4500N          Diameter: 50mm          Vekt: ~2,3kg</p>
	<p><b>Con35 (100mm utslag)</b>          Kraft: 2200N          Diameter: 35mm          Vekt: ~0,9kg</p>

Tabell 21 – Lneæraktuatorer fra Concens

Et ideelt produkt ville altså vært en mellomting mellom de to aktuatorene fra Concens. Det er denne rapportens anbefaling å inngå et samarbeid med enten Concens eller en lignende produsent for å utvikle en aktuator med de rette egenskapene.

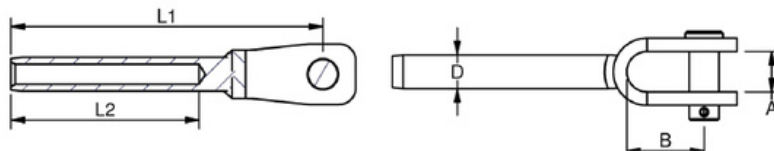
Basert på dimensjonene til Concens aktuatorene er det modellert opp et aktuatorsystem bestående av to lineæraktuatorer og en brakett til å feste disse i armen. For terminering av vaieren mot aktuatorene er det benyttet en gaffelterminering fra Blue Wave. Gaffeltermineringens dimensjoner er vist i Figur 30 og aktuatorsystemet montert i seksjonen er vist i Figur 31.

## WELDED FORK TERMINALS

Polished Stainless Steel - AISI 316

ART. NO.	WIRE	PIN	A	B	D	L1	L2	BL	KG/100	PACK
100502	2 1/16"	5,0	7,5	12	5,50	58	32	800	2,0	25
100525	2,5 3/32"	5,0	7,5	12	5,50	58	32	800	2,0	25
100503	3 1/8"	5,0	7,5	12	6,35	67	38	800	2,3	25
100603	3 1/8"	6,0	9,5	13	6,35	68	38	1300	2,8	25
106303	3 1/8"	6,4	9,5	13	6,35	68	38	1300	2,8	25
100504	4 5/32"	5,0	7,5	12	7,50	71	45	800	2,7	25
100604	4 5/32"	6,0	9,5	13	7,50	73	45	1500	3,4	25
100804	4 5/32"	8,0	11,0	15	7,50	77	45	1700	4,9	25
100605	5 3/16"	6,0	9,5	13	9,00	83	51	1500	4,1	25
100805	5 3/16"	8,0	11,0	15	9,00	87	51	2400	5,5	10
109505	5 3/16"	9,5	12,0	19	9,00	91	51	2400	7,2	10
100806	6 -	8,0	11,0	15	12,58	99	64	3200	10,0	10
109506	6 -	9,5	12,0	19	12,58	104	64	3800	11,3	10
101106	6 -	11,0	13,0	23	12,58	108	64	5000	13,9	10
101163	- 1/4"	11,0	13,0	23	12,58	108	64	4800	13,9	10
101206	6 -	12,0	14,0	25	12,58	110	64	5200	17,6	10
101207	7 9/32"	12,0	14,0	25	14,20	119	70	6500	18,1	10
101208	8 5/16"	12,0	14,0	25	16,00	136	83	6500	21,6	10
101308	8 5/16"	12,7	14,0	25	16,00	136	83	6500	21,6	10
101608	8 5/16"	16,0	18,0	33	16,00	145	83	8500	25,5	10
101495	- 3/8"	14,0	18,0	30	17,80	151	89	10200	35,0	10
101410	10 -	14,0	18,0	32	17,80	151	89	9400	35,0	10
101410L	10 -	14,0	22,0	30	17,80	149	89	9400	35,0	10
101610	10 -	16,0	18,0	33	17,80	151	89	9400	35,0	10
101612	12 -	16,0	18,0	33	20,00	174	105	11200	60,0	5
101612L	12 -	16,0	22,0	31	20,00	171	105	11200	60,0	5
101912	12 -	19,0	24,0	48	20,00	189	105	11200	66,0	5
101912L	12 -	19,0	30,0	47	20,00	187	105	11200	66,0	5
* 101912X	12 -	19,0	24,0	48	21,40	205	120	14000	75,0	5
* 101913	- 1/2"	19,0	24,0	48	21,40	205	120	12900	75,0	5
101914L	14 -	19,0	30,0	47	25,00	221	140	15000	75,0	5
102214	14 -	22,0	30,0	57	25,00	232	140	15000	112,7	5
102514	14 -	25,4	30,0	62	25,00	235	140	15000	125,0	5
102516	16 -	25,4	30,0	62	28,00	264	160	19000	140,0	5

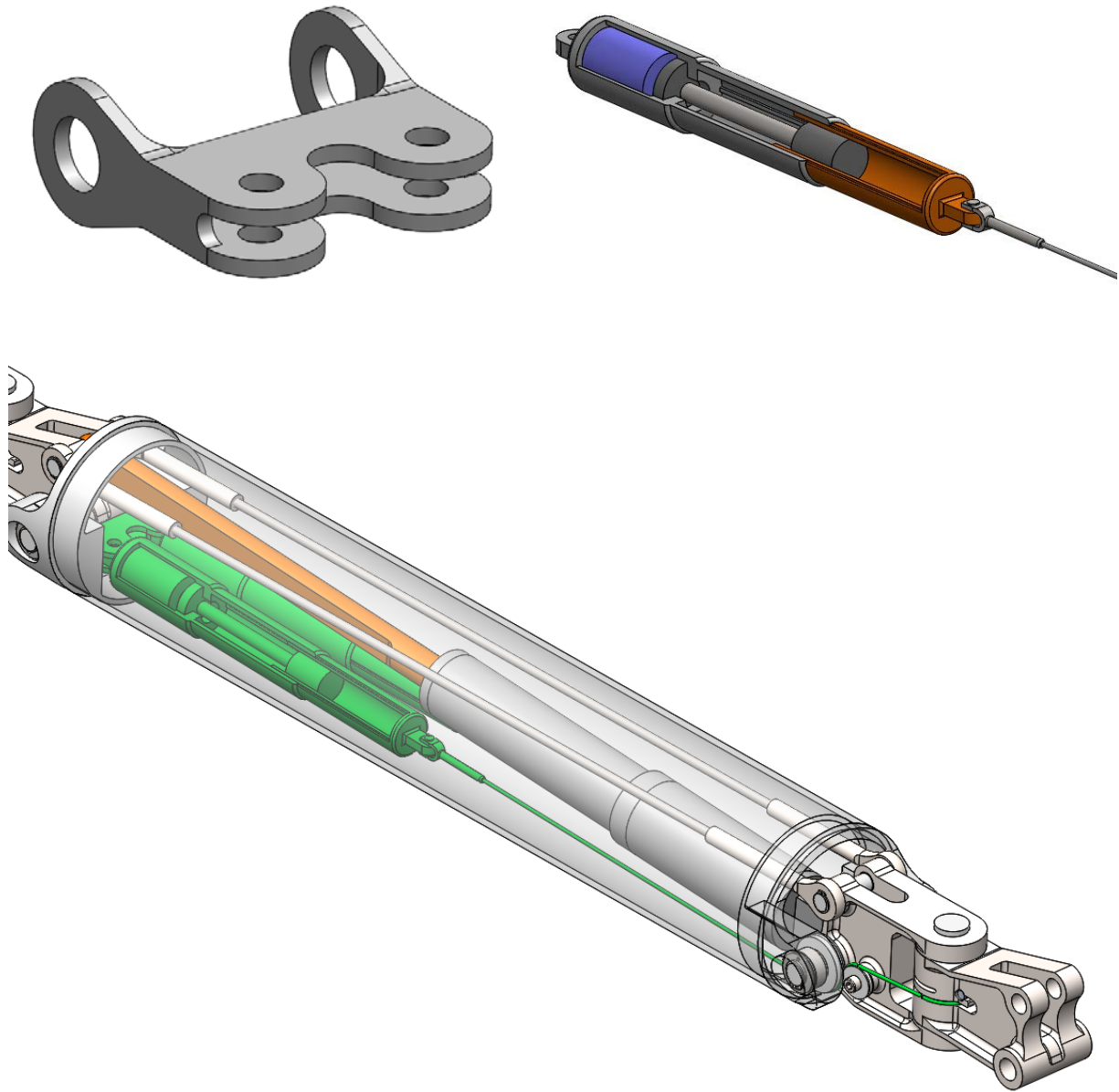
\* Note: Terminal OD. = 21,4 mm



Figur 30 – Gaffelterminal fra Blue Wave



The wide range of hand welded fork terminals by Blue Wave has been setting standards for many years. Featured here are the most common size / fork variations: - all with wire size and swage depth marking. Fork terminals are amongst the most commonly used wire end fittings, they are normally attached to pre drilled anchor plates or steel constructions. Also used in combination with toggles, eyes or U-bolts.

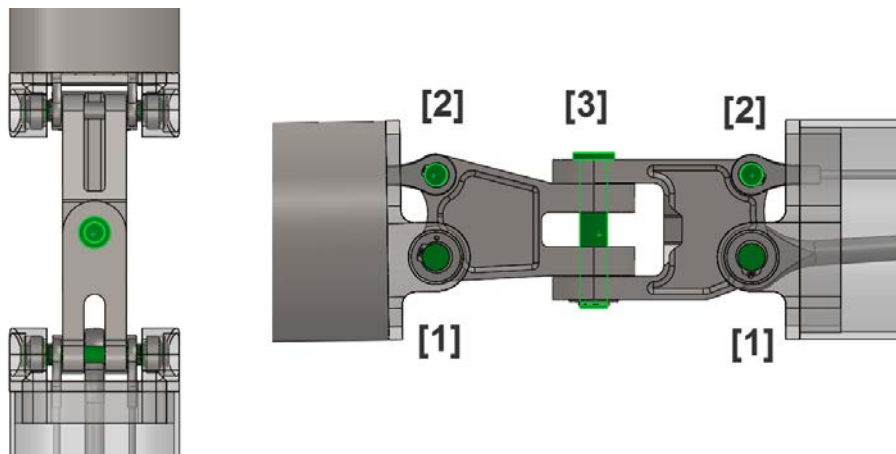


**Figur 31 – Aktuatorssystem for yaw-bevegelse**

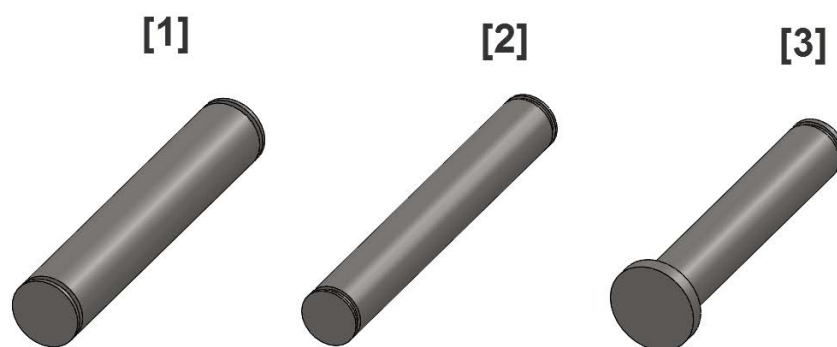
### 3.7 Bolter

I hvert ledd skal det brukes tre forskjellige typer bolter, plassering og type er vist i Figur 32. De tre boltene ble dimensjonert ut i fra kreftene i første og andre leddforbindelse. Designet er deretter kontrollert med simuleringer i SolidWorks. Figur 33 viser de forskjellige boltene. Materiale til boltene er Orvar Supreme fra Uddeholm. Orvar Supreme er et stål som blir brukt til aksler under store påkjenninger. Materialdata finnes i Vedlegg D, og i Vedlegg B ligger arbeidstegninger for alle boltene.

1. Bolt mellom innfesting i rør og ledd
2. Bolt mellom strekkstag og ledd
3. Bolt mellom pitch-ledd og yaw-ledd



Figur 32 - Bolteforbindelser



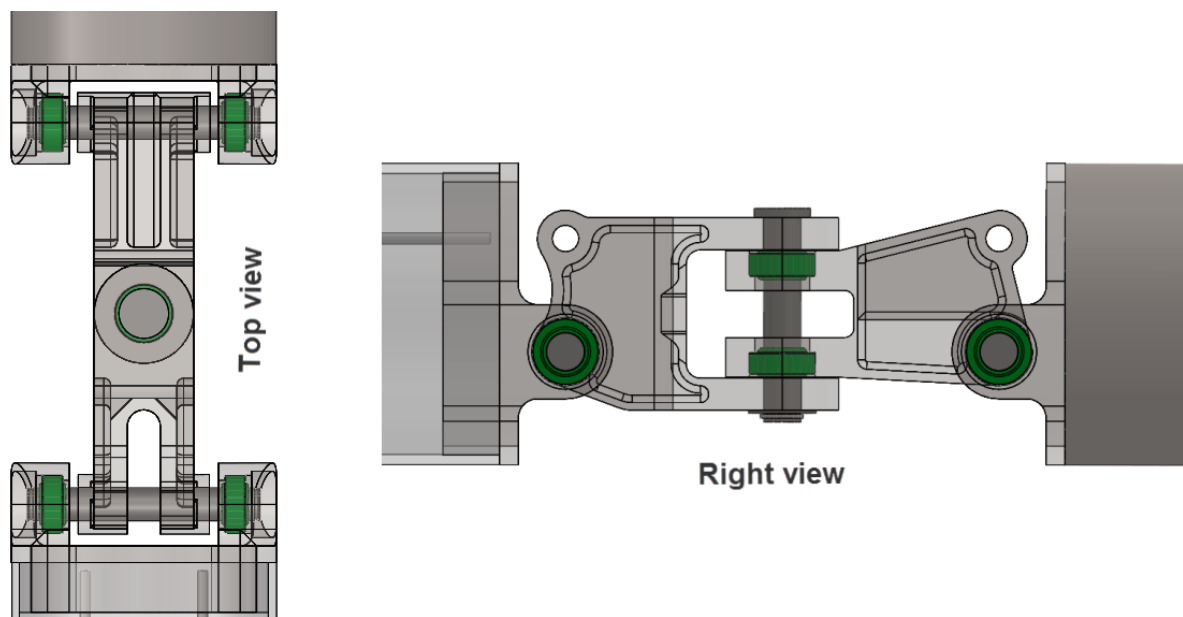
Figur 33 - Bolter

### 3.8 Standardkomponenter

Hvert ledd består av en rekke standardkomponenter i tillegg til de maskinerte delene. Det er i dette kapittelet laget en oversikt over hva slags komponenter som er valgt.

#### Lager

Det er plukket ut vedlikeholdsfrie sfæriske glidelager fra SKF. I Hvert ledd er det plassert seks lager. Lagrene er av samme type, GE 20 TXE-2LS. Alle lagrene er plassert mot  $\text{Ø}20\text{mm}$  akslinger. Se Figur 34 for plassering av lager. I Vedlegg E er det lagt ved beregninger fra SKF sine hjemmesider med utgangspunkt i de dimensjonerende kreftene i kapittel 2.3.



Figur 34 – Plassering av lager

Lagrene er dimensjonert ut i fra festet mellom pitch-ledd og yaw-ledd i første leddforbindelse som er det tilfellet med de største kreftene. Se Tabell 22 og Figur 35.

Moment i første leddforbindelse	3172Nm
Senteravstand mellom lager	52mm
Resulterende dimensjonerende radiallast	61000N
Dimensjonerende aksiallast	1030N

Tabell 22 – Dimensjonerende krefter i lager



Bearing Data

Bearing designation	d	D	B	C	Co
GE 20 TXE-2LS	20 mm	35 mm	16 mm	83 kN	140 kN

1. Basic rating life for spherical plain bearings and rod ends

Result

G <sub>h</sub> Basic rating life	559.4 hour
G Basic rating life, No. of oscillations	201372.1
P Equivalent dynamic bearing load	63.5 kN
p Specific bearing load	229.4 N/mm <sup>2</sup>
v Mean sliding velocity	0.01 m/s

Figur 35 – Lagerdata

Levetiden er beregnet til 559 timer.

Pasninger for aksel mot lager er vist i Figur 36, og er h6 - skyvepasning

Table 1 - Shaft fits

Operating conditions	Tolerance	
	Sliding contact surface combination	
	steel-on-steel (standard and SKF Extended Life Plain Bearings)	maintenance-free
<b>Radial bearings</b>		
Loads of all kinds, interference fit	m6 (n6)	k6
Loads of all kinds, clearance or transition fit	h6 (hardened shaft)	h6 or g6 (hardened shaft)

Figur 36 – Pasning mellom aksling og lager

Pasning for boringen til lagrene er vist i Figur 37 og er K7 – lett drivpasning

table 2 - Housing fits

Operating conditions	Tolerance	
	Sliding contact surface combination	
	steel-on-steel (standard and SKF Extended Life Plain Bearings)	maintenance-free
<b>Radial bearings</b>		
Light loads, axial displacement required	H7	H7
Heavy loads	M7 (N7)	K7
Light alloy housings	N7	M7

Figur 37 – Pasning mellom Boring og lager

## Skiver

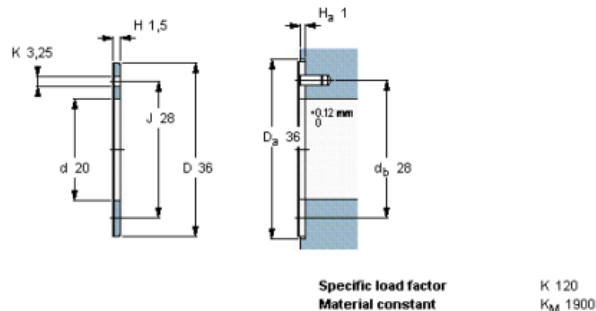
Det er plukket ut tørre kompositt skiver fra SKF. De trenger ikke vedlikehold og er gode i områder der ting kan bli tørt og sette seg fast. Figur 38 viser de aktuelle skivene. I hvert ledd er det:

- 5 X M20 – i enden av alle M20 bolteforbindelser – vare nr: PCMW 203601.5 M
- 4 X M12 – i enden av alle M12 bolteforbindelser – vare nr: PCMW 122401.5 E

**SKF**

Composite dry sliding bushings, Composite dry sliding thrust washers

Principal dimensions					Basic load ratings		Mass	Designation
d	D	H	J	K	dynamic C	static C0		
mm	36	1,5	28	3,25	kN		kg	-
<b>20</b>					<b>85</b>	<b>176</b>	<b>0,007</b>	<b>PCMW 203601.5 M</b>

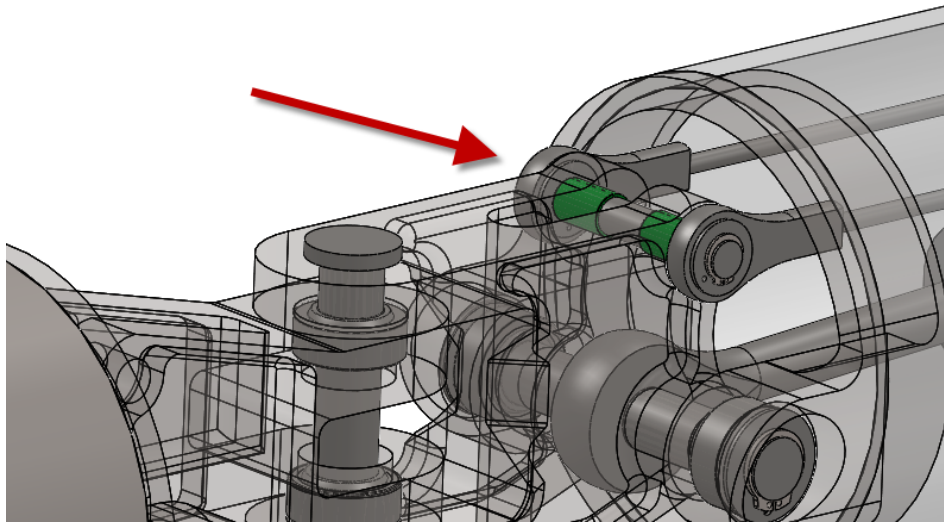


Figur 38 – Data for komposittskiver

## Bøssinger

Det er plukket ut tørre kompositt-bøssinger fra SKF. Det er tørre lager som er ment for radiell belastning og trenger ikke vedlikehold eller smøring. I Vedlegg E er det lagt ved beregninger fra SKF sine hjemmesider med utgangspunkt i de dimensjonerende kreftene i kapittel 2.3. I hvert ledd er det plassert fire bøssinger Figur 39 og Figur 40 viser plassering og størrelse.

- To i boring feste mellom pitch-ledd og parallellstag (se figur) - var nr: PCM 161820 M
- To i boring feste mellom yaw-ledd og parallellstag – vare nr: PCM 161820 M

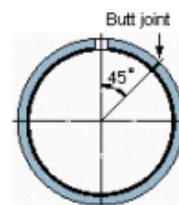
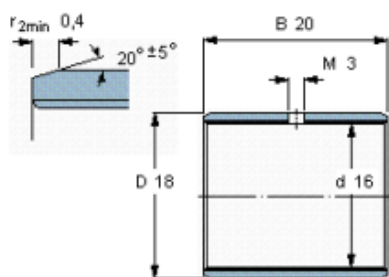


Figur 39 – Plassering av bøssinger



Composite dry sliding bushings, metric dimensions

Principal dimensions			Basic load ratings		Mass	Designation
d	D	B	dynamic C	static C0	kg	-
mm			kN			
<b>16</b>	18	20	38	80	0,006	PCM 161820 M



Specific load factor K 120  
Material constant  $K_M$  1900

Figur 40 – Data for kompositt-bøssinger

Pasninger for bøssinger er vist i Figur 41, den gir

- Boring – H7 - skyvepasning
- Aksel – f7 - løpepasning

table - Composite bushings, B/E material (metric sizes) - Shaft and housing tolerances, bearing clearance

Bushing dimensions			Diameter limits						Operating			
Bore diameter	Outside diameter	Wall thickness	Shaft		Housing bore		Bore diameter of mounted bushing		clearance			
d	D	max	min	max	min	max	min	max	min	max		
			(f7 for d ≤ 75 mm) (h8 for d > 75 mm)									
mm			mm								µm	
3	4,5	0,750	0,730	3,000(h6)	2,994(h6)	4,508(H6)	4,500(H6)	3,048	3,000	0	54	
4	5,5	0,750	0,730	4,000(h6)	3,992(h6)	5,508(H6)	5,500(H6)	4,048	4,000	0	56	
5	7	1,005	0,980	4,990	4,978	7,015	7,000	5,055	4,990	0	77	
6	8	1,005	0,980	5,990	5,978	8,015	8,000	6,055	5,990	0	77	
7	9	1,005	0,980	6,987	6,972	9,015	9,000	7,055	6,990	3	83	
8	10	1,005	0,980	7,987	7,972	10,015	10,000	8,055	7,990	3	83	
10	12	1,005	0,980	9,987	9,972	12,018	12,000	10,058	9,990	3	86	
12	14	1,005	0,980	11,984	11,966	14,018	14,000	12,058	11,990	6	92	
13	15	1,005	0,980	12,984	12,966	15,018	15,000	13,058	12,990	6	92	
14	16	1,005	0,980	13,984	13,966	16,018	16,000	14,058	13,990	6	92	
15	17	1,005	0,980	14,984	14,966	17,018	17,000	15,058	14,990	6	92	
16	18	1,005	0,980	15,984	15,966	18,018	18,000	16,058	15,990	6	92	
17	19	1,005	0,980	16,984	16,966	19,021	19,000	17,061	16,990	6	95	
18	20	1,005	0,980	17,984	17,966	20,021	20,000	18,061	17,990	6	95	

Figur 41 – Pasninger for kompositt-bøssing

## Låseringer

Det er plukket ut låseringer som står i alle bolteender. Et eksempel på en leverandør som leverer disse er [www.grene.no](http://www.grene.no). I hvert ledd er det 10 låseringer.

- 6 X M16 – vare nr: 1115-220016
- 4 X M22 – vare nr: 1115-220022

## 4 Styrkeberegninger og analyser

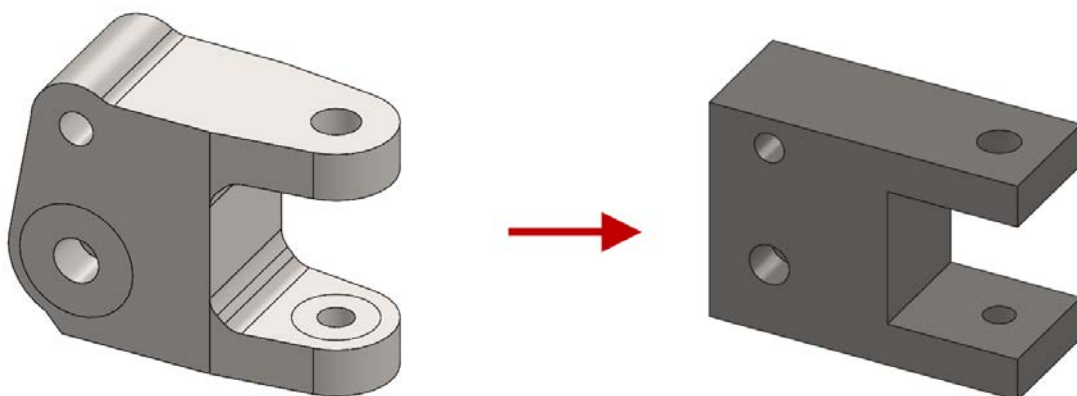
Det er gjort FEM analyser av alle maskinerte deler i sammenstillingen. De er gjort i programvaren Solidworks Simulation, i tillegg er det gjort kontrollberegninger av bolter og rørstykke. Topologioptimalisering er gjennomført i programvaren Siemens NX, ikke i Abaqus slik det var beskrevet i oppgaveteksten. Grunnen til det var manglende tilgang på Abaqus lisens, mens lisens til NX eksisterte på instituttet og ble ansett som et fullgodt alternativ. Styrkeberegninger som er gjort for å understøtte analysene finnes i Vedlegg C.

### 4.1 Topologioptimalisering

#### Pitch-ledd

For de to delene som utgjør leddet i konstruksjonen pitch-ledd og yaw-ledd, er det utført en topologioptimalisering i NX. Optimaliseringsverktøy er en nyttig hjelp når man går frem for å lage et design som er avhengig av å være en solid konstruksjon, samtidig som geometrien blir utnyttet optimalt.

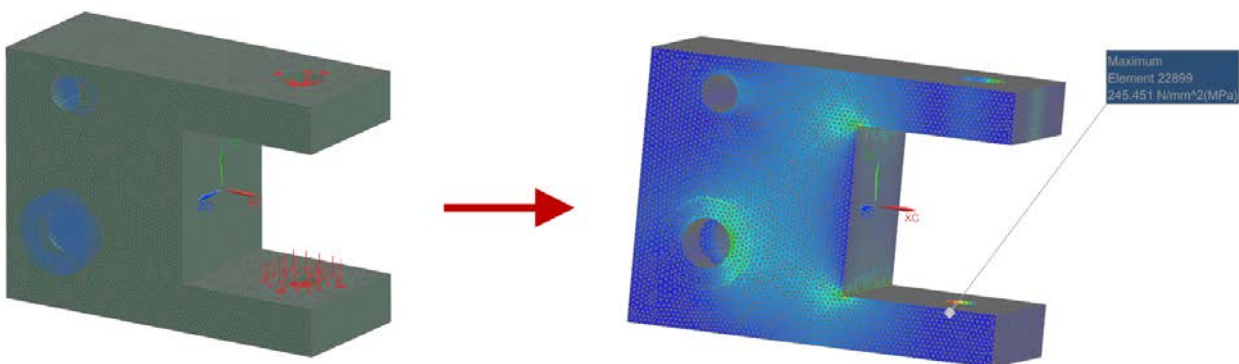
Analysen er gjennomført ved å forenkle den originale geometrien, ved å ta bort geometri som kompliserer designet utover de sentrale nøkkelmål. I Figur 42 er alle radier og kanter som gjør modellen mer komplisert enn nødvendig fjernet.



Figur 42 Forenkling av geometri

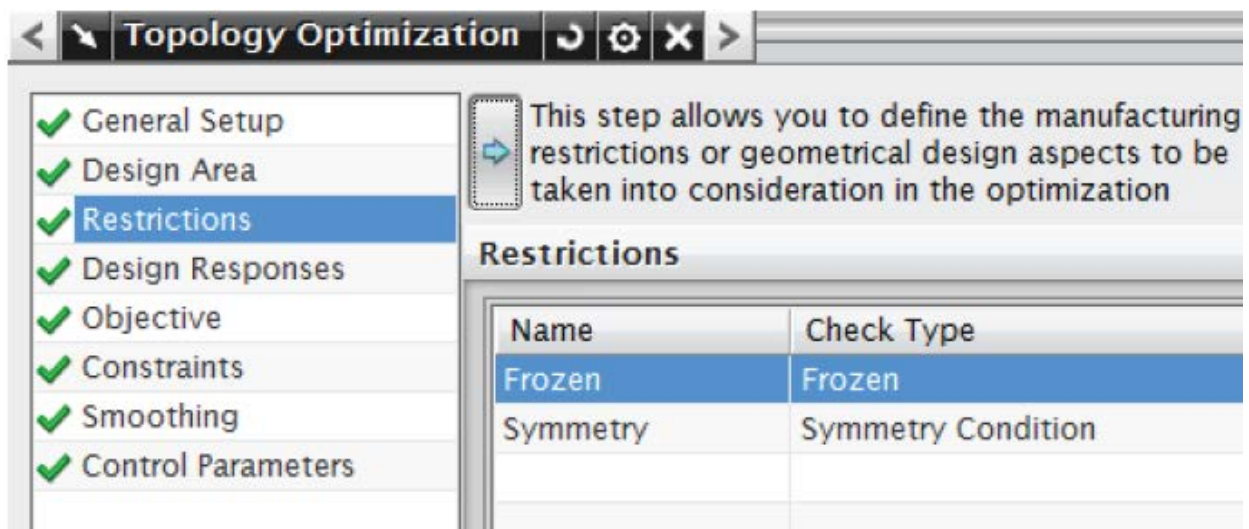
Når dette er gjort gjennomfører man en statisk analyse av modellen, som må inneholde de grensebetingelsene man vil ha med seg videre i topologianalysen. I denne analysen er

modellen fastholdt i horisontalboltene med frihetsgrader som simulerer en bolteforbindelse i den nedre bolten, og parallellstagen i den øvre bolten, med krefter langs stagenes lengdeakse, dette er vist i Figur 43. Kraftene er påført i vertikalboringen i forkant av modellen. Det er påført halv kraft for nedbøyning, og halv kraft for 90 grader utslag i yaw ledd i samme analyse. Dette slik at man i topologianalysen får et bilde av hvordan modellens påkjenning blir med hensyn til kombinerte grensebetingelser påført i samme modell. Kraftene i vertikalboringen har en sinusodial fordeling over 180 grader av overflaten. Målet med topologianalysen er å få hjelp av programvaren til å markere materiale som i vårt tilfelle er overflødig og derfor kan fjernes for å redusere vekten.



Figur 43 Statisk analyse for optimalisering

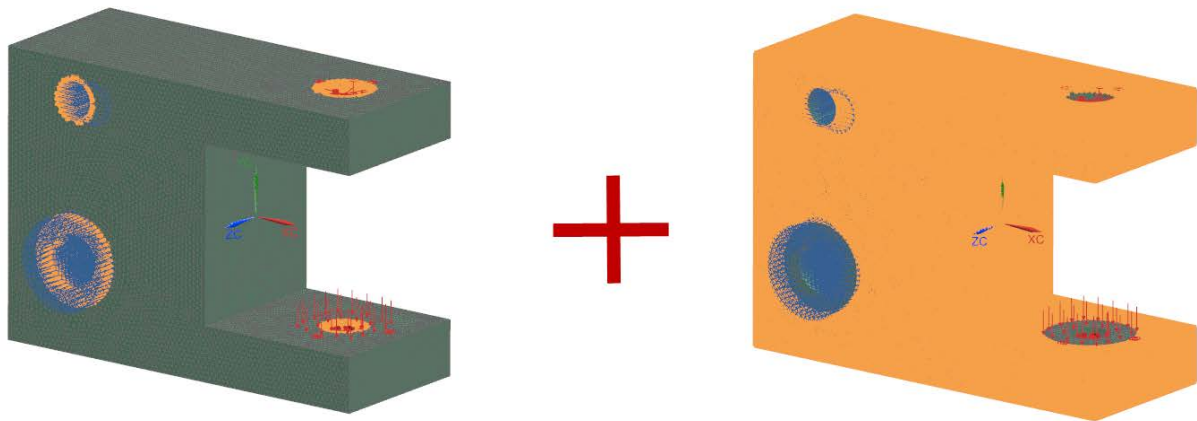
Når den statiske analysen er gjennomført kan man starte optimaliseringsverktøyet i NX. Det første man gjør er å definere navn på analysen og design område.



Figur 44 Restriksjoner

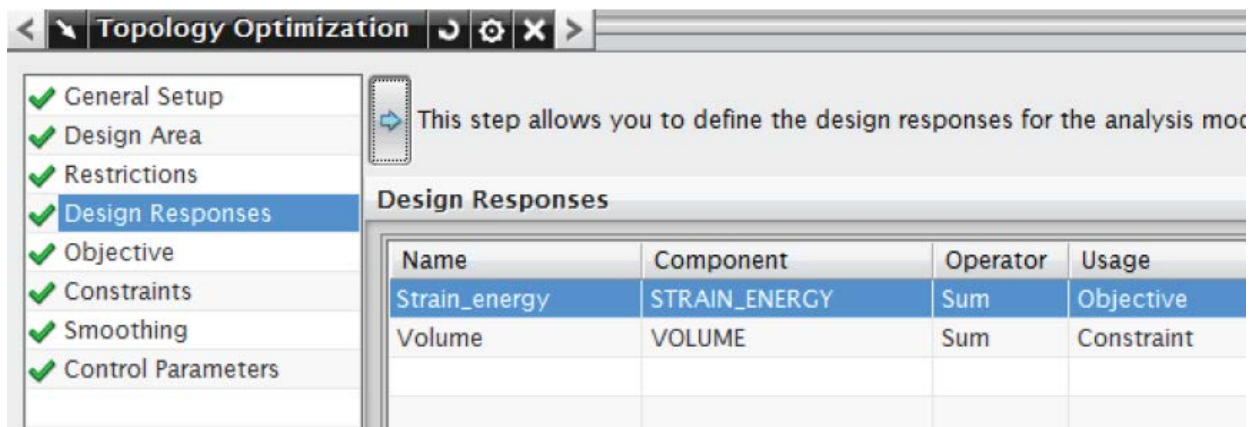
Når det er gjort, gjør man videre et av de viktigste oppsettene i forberedelsen med analysen som er å angi hvilke geometriske begrensninger modellen skal ha. I Figur 44 til venstre er

områdene som skal være «frost» under analysen markert, det vil være områder som ikke vil bli berørt av selve analysen. Til høyre er de områdene som skal være «produksjonsområder» markert. I Figur 45 ser man hvordan optimaliseringsvalgene ser ut etter de valgte restriksjonene. Under restriksjonsoppsettet angir man også hva slags produksjonsmetode som er tiltenkt modellen. I dette tilfelle skal modellen maskineres, og det velges derfor en symmetrisk betingelse. Man har også muligheten til å få resultater der modellen skal støpes, ekstruderes eller smis.



Figur 45 Produksjonsområder

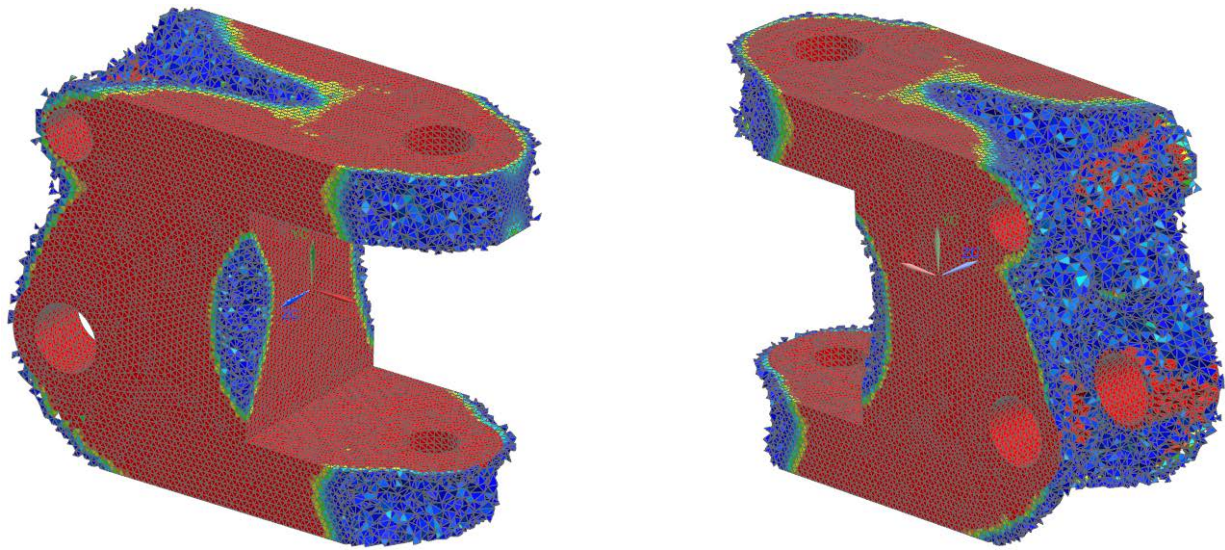
Videre i forberedelsen til analysen blir designvariabler valgt. Det er de modellegenskaper som vil være med å påvirke analysen. I denne analysen er det tøyingsenergi og volum som vist i Figur 46.



Figur 46 Designvariabler

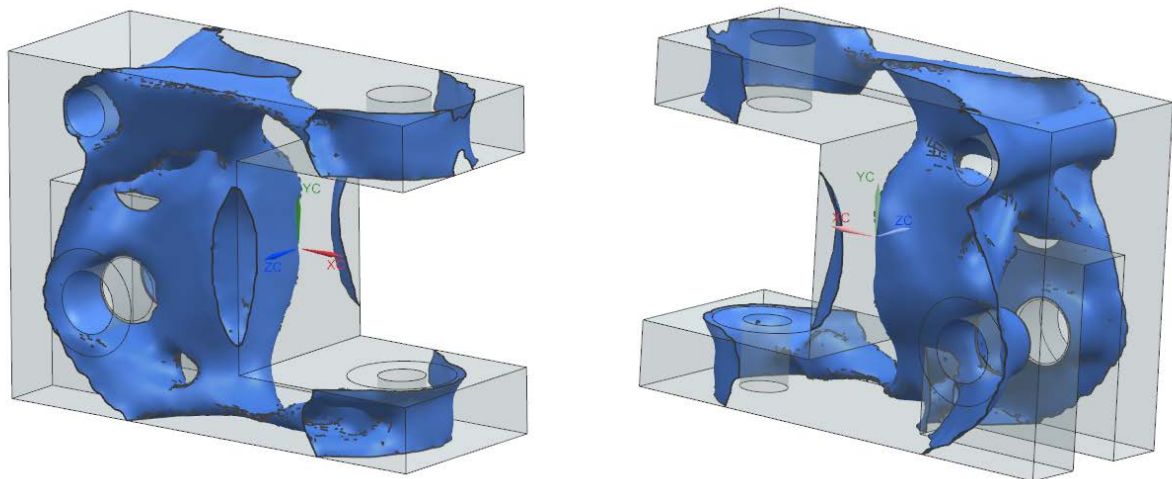
Analysens mål blir satt til å minimere tøyingsenergien, for å gi maks stivhet til modellen. Og en volumbegrensning blir satt til å være mindre eller lik 60 % av det opprinnelige volumet.

Figur 47 viser resultatet av analysen, alle elementer under 5 % av modellens normaliserte tetthet er nå fjernet.



**Figur 47 Topologieresultat**

Programvaren oppretter en STL fil av resultatet. For etterbehandlingen av modellen kan STL filen legges sammen med den opprinnelige modellen for å få frem de områdene som kan trimmes vekk. Figur 48 viser hvordan STL-filen er lagt oppå den originale modellen som er gjort transparent for å se resultatet.

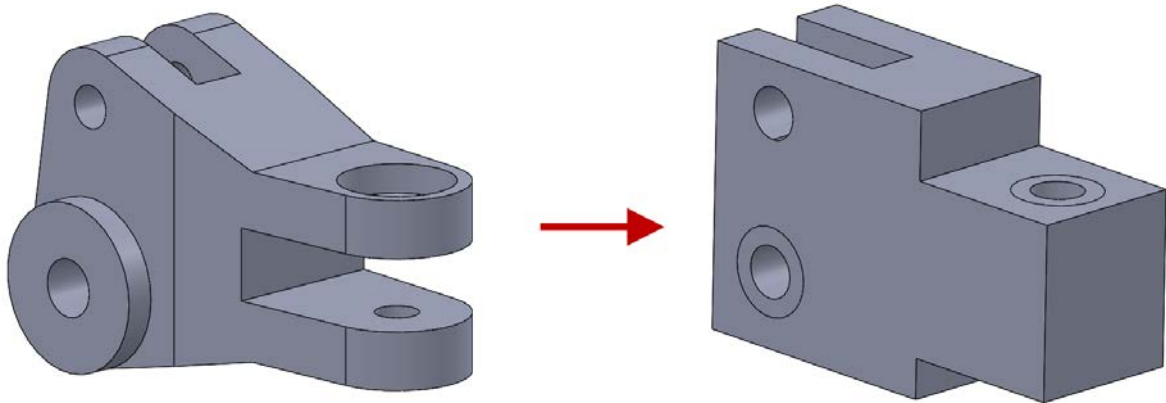


**Figur 48 STL-fil av resultat**

## **Yaw-ledd**

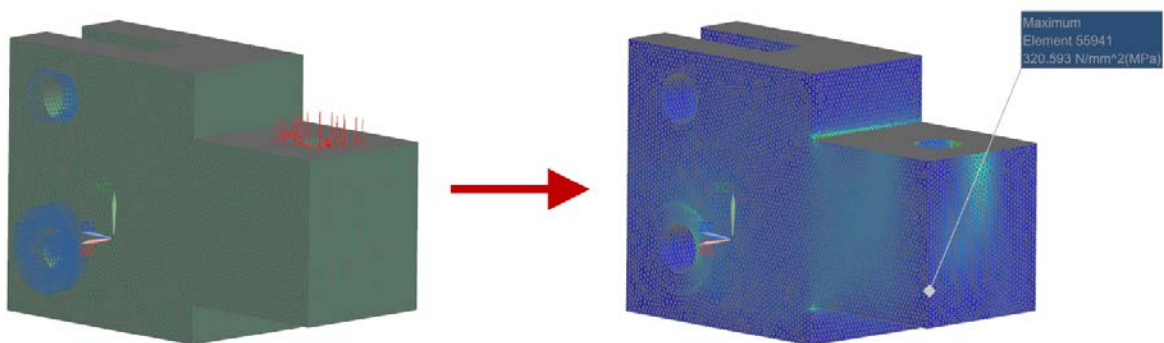
Den samme prosessen ble gjort på yaw-leddet, med de samme betingelsene som ble gjort i pitch-ledd analysen. Figur 49 viser forenklingen i modellens geometri.





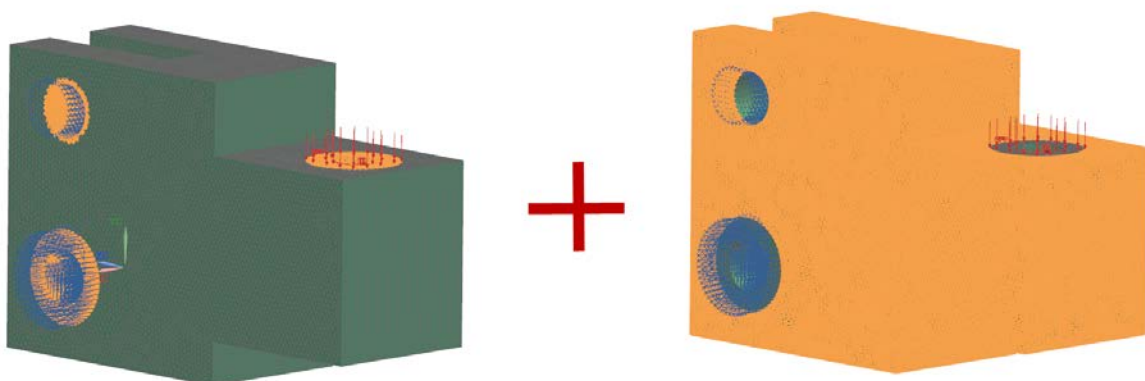
**Figur 49 Forenkling av geometri**

Den forenklede modellen ble først testet i en statisk analyse med fastholdninger i de horisontale boltene i bakkant og belastninger i den vertikale boltene i forkant. Det er påført halv kraft for nedbøyning, og halv kraft for 90 grader utslag i yaw ledd i samme analyse. Grensebetingelsene er vist i Figur 50.



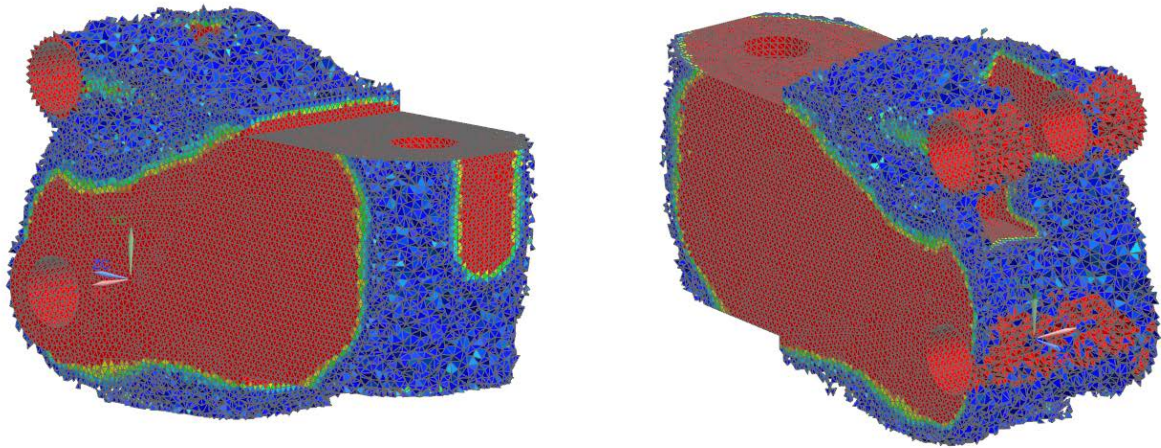
**Figur 50 Statisk analyse for optimalisering**

Figur 51 viser til venstre de områdene som er «frost» og ikke skal berøres av analysen markert med gult, til høyere er det markert de områdene som skal maskineres.



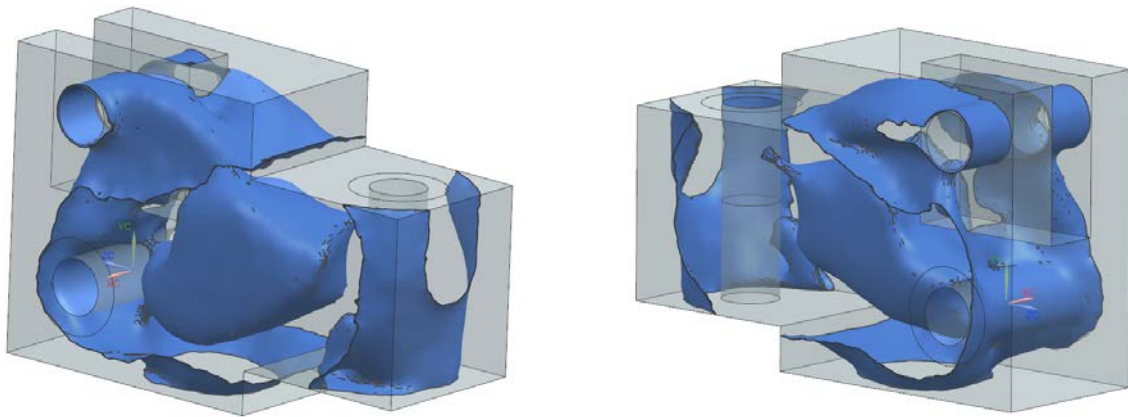
**Figur 51 Produksjonsområder**

Analysens mål blir satt til å minimere tøyingsenergien, for å gi maks stivhet til modellen. Og en volumbegrensning blir satt til å være mindre eller lik 60 % av det opprinnelige volumet. Figur 52 viser resultatet av analysen, alle elementer under 5 % av modellens normaliserte tetthet er nå fjernet.



**Figur 52 Topologireultat**

Figur 53 viser STL filen som er lagt over den opprinnelige modellen.



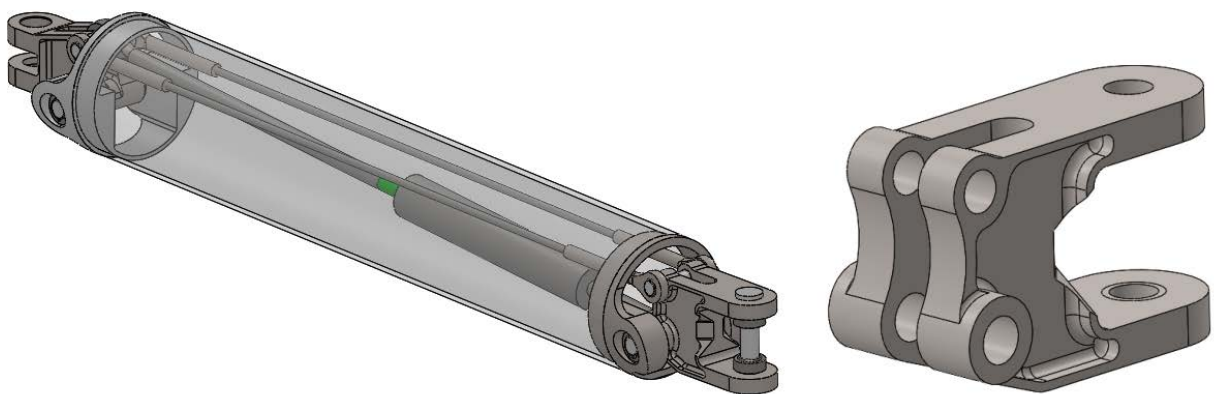
**Figur 53 STL-fil av resultat**

## 4.2 FEM Analyser

I dette kapittelet er det gjort en gjennomgang av analysene i sammenstillingen, og de valgene som ligger bak. I kapittel 2.1 lasttilfeller og Vedlegg C er det en oversikt av størrelsesorden på krefter og de dimensjonerende konfigurasjoner for hvert ledd.

### Pitch-ledd

Figur 54 viser pitch-leddets plassering og utforming.



Figur 54 Pitch ledd

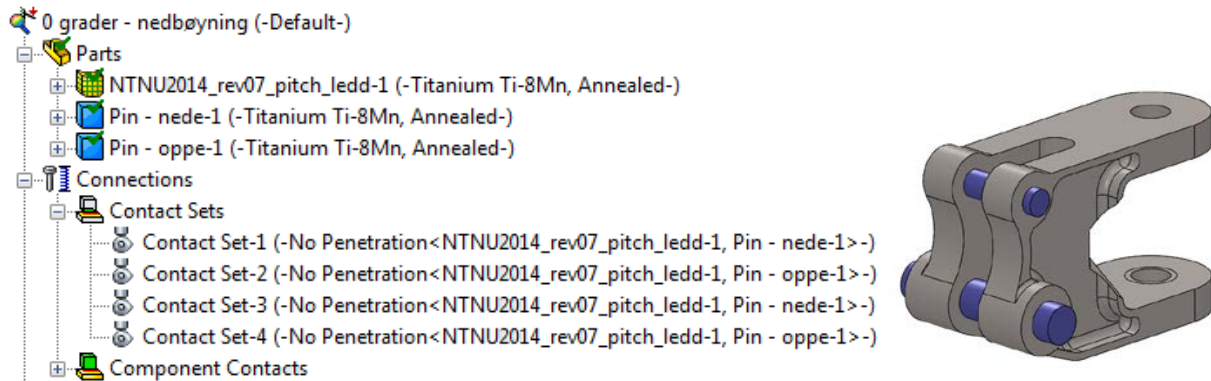
Pitch-leddet er designet med utgangspunkt i topoljialysen. Den er tenk maskinert ut i titan grade 5 med en flytespenning på  $800 \text{ N/mm}^2$ , og massetetthet rundt  $4500 \text{ kg/m}^3$ . Med en sikkerhetsfaktor på 1.6 gir dette en dimensjonerende spenning på  $500 \text{ N/mm}^2$ , dette er utgangspunktet for FEM analysene av pitch-leddet.

Pitch-leddet er likt i alle leddforbindelser bortsett fra i 1.leddforbindelse hvor man tenker seg en del med eget design i innfestingen. Pitch-leddet analyseres derfor for lasttilfeller i 2. leddforbindelse som vist i Tabell 23.

<b>1. Pitch 0/yaw 0</b>	<b>2. Pitch +45/yaw 0</b>	<b>3. Pitch -45/yaw 0</b>
<b>4. Pitch 0/yaw 90</b>	<b>5. pitch +45/yaw 90</b>	<b>6. pitch -45/yaw 90</b>

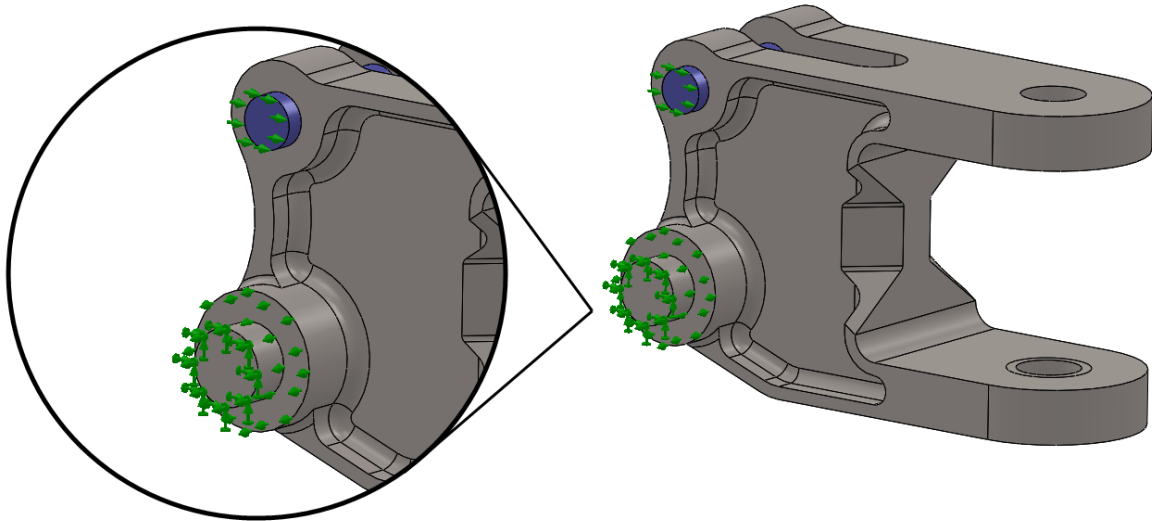
Tabell 23 Analyserte konfigurasjoner for pitch-leddet

Analysene blir først gjennomført i en sammenstilling med stive pinner som simulerer bolteforbindelsen i bakkant av modellen, dette er vist i Figur 55. Kontaktsettet mellom pitch-leddet og boltene er satt til «no penetration».



**Figur 55 Kontaktsett for pitch-leddet**

Grensebetingelsene er satt i bakkant der den øverste boltene er fastholdt i en normal som representerer parallellstagenes akse, som igjen vil endres ut i fra pitch-vinkel ved de ulike konfigurasjonene i 2. leddforbindelse. Den nedre boltene er holdt fast i alle 6 frihetsgrader. Området inn mot nedre bolteforbindelse tar aksielle krefter. Fastholdinger er vist i Figur 56.



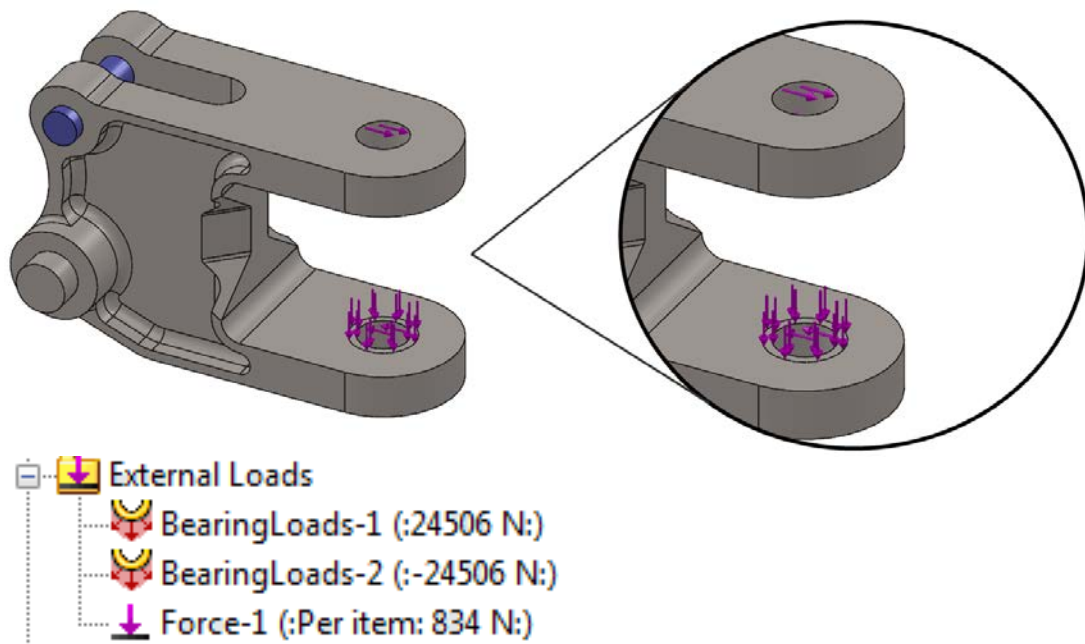
Figur 56 Fastholdinger av pitch-leddet

De påførte kreftene for konfigurasjon 1. er vist på Figur 57, angrepskreftene er påført i den vertikale bolten med en sinusoidal fordeling over 180 grader av boringen. Normalt på overflaten kommer trykk fra armens egenvekt, overført via lageret.

Det totale momentet i 2. leddformindelse  $M_{2tott} = 2083 \text{ Nm}$

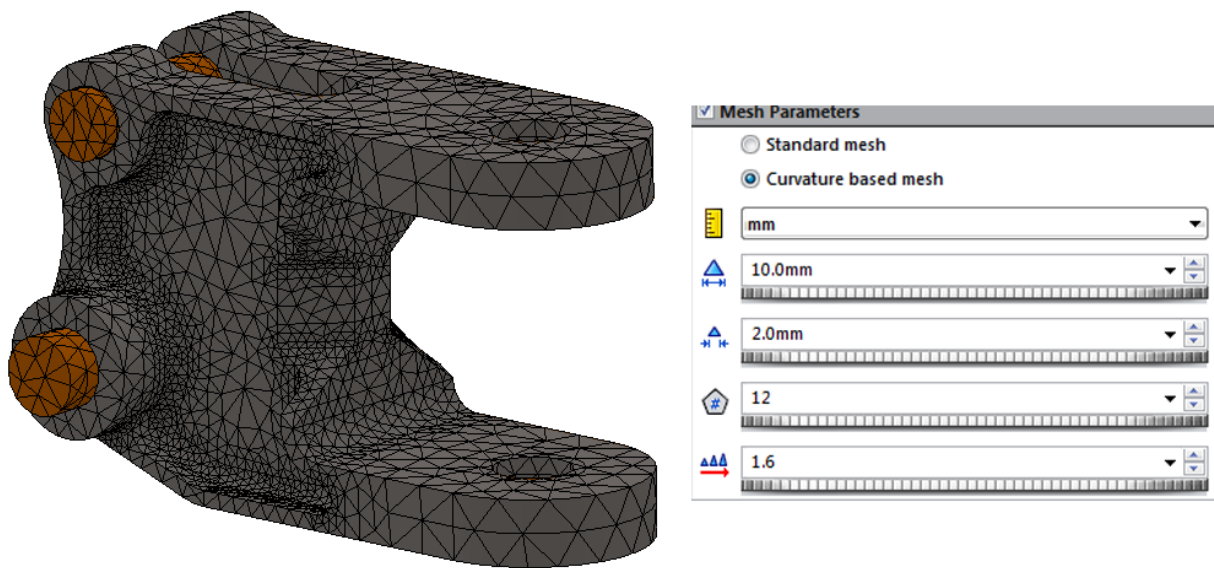
Last og egenvekt i 2. leddforbindelse  $F_{y2} = 834 \text{ N}$

Avstand mellom senter av boltehull:  $L_4 = 85 \text{ mm}$



Figur 57 Krefter på pitch-ledd

Figur 58 viser hva slags mesh som er brukt, og hvilke verdier som er benyttet. Alle seks konfigurasjonene ble kjørt med dette meshet.



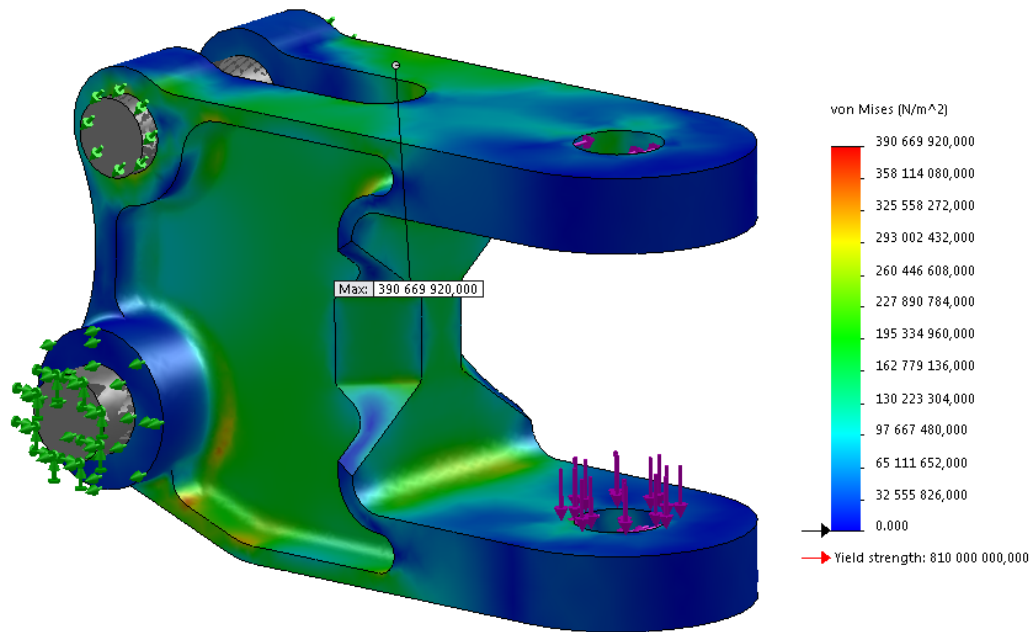
Figur 58 Mesh av pitch-leddet

De seks konfigurasjonene i 2. leddforbindelse ble gjennomført og de største vonMises spenningene ble som vist i Tabell 24.

<b>1. 203 MPa</b>	<b>2. 256 MPa</b>	<b>3. 203 MPa</b>
<b>4. 391 MPa</b>	<b>5. 391 MPa</b>	<b>6. 391 MPa</b>

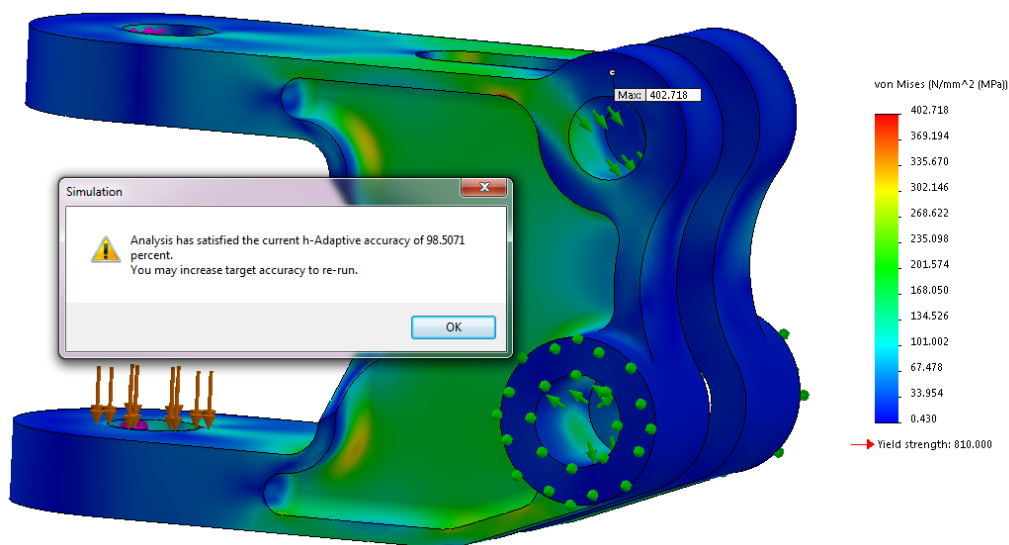
Tabell 24 vonMises spenninger på pitch-leddet

Figur 59 viser konfigurasjon 6. pitch -45/yaw 90 med den største vonMises spenningen 391 MPa



**Figur 59 Største vonMises spenninger**

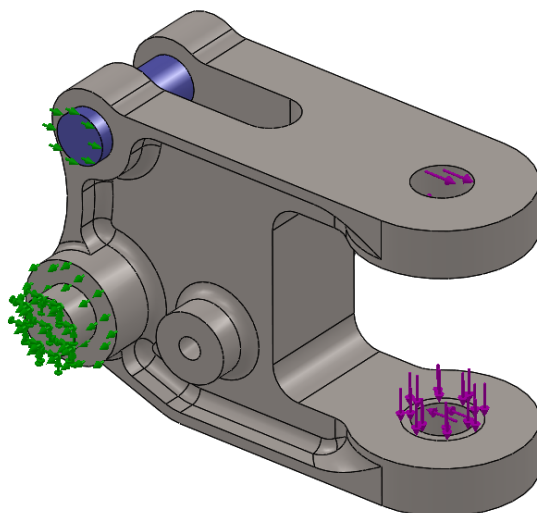
I solidworks kan man kjøre en adaptiv analyse for en part som skal øke nøyaktigheten på statiske analyser. H-adaptiv metoden lager mindre elementstørrelser i områder med høye spenninger og man velger hvor mange runder med forfining som skal kjøres før ønsket nøyaktighet skal være oppnådd. For å sikre at analysen konvergerer kontrolleres konfigurasjon 6. som hadde de største spenningene med en h-Adaptive nøyaktighet satt til 98 %. Resultatet er vist i Figur 60.



**Figur 60 h-adaptiv analyse på pitch-leddet**

### **Pitch-ledd med yaw-bevegelse design**

For festing av vaiertrenser til yaw-bevegelsen ble det implementert ny design i pitch-leddet. Det er gjort en tilleggs analyse som viser at disse endringene ikke gjør noen endringer med styrken til delen. Designet til delen er sammen med krefter og fastholdinger vist i Figur 61.



**Figur 61 Pitch-ledd med yaw design**

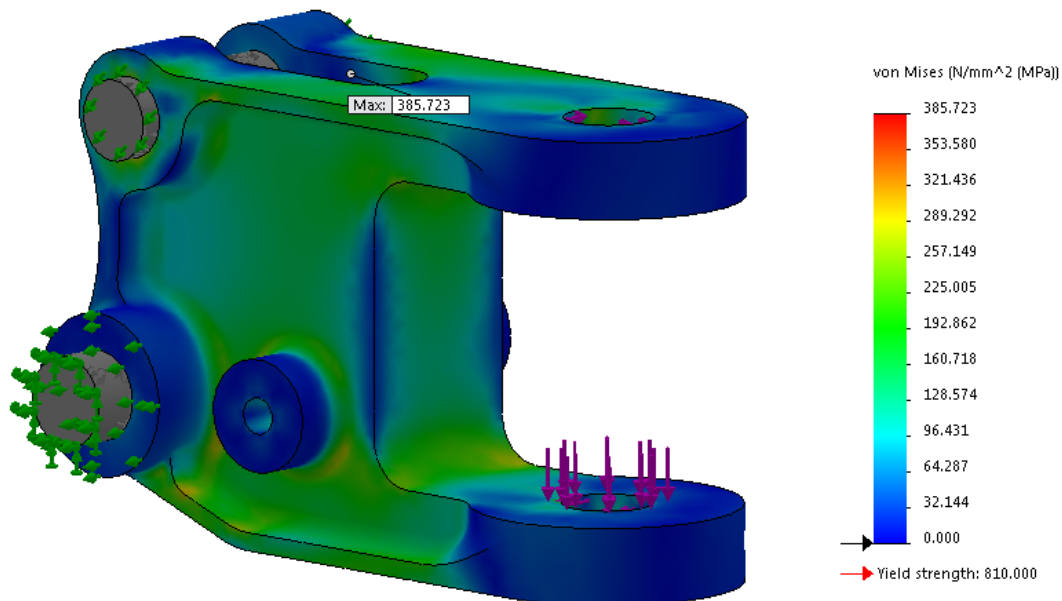
Det er gjennomført de samme analysene som i den originale delen. De seks konfigurasjonene i 2. leddforbindelse ble gjennomført og de største vonMises spenningene er vist i Tabell 25.



<b>1. 201 MPa</b>	<b>2. 265 MPa</b>	<b>3. 212 MPa</b>
<b>4. 351 MPa</b>	<b>5. 353 MPa</b>	<b>6. 385 MPa</b>

Tabell 25 vonMises spenninger på ny pitch-ledd design

Figur 62 viser konfigurasjon 6. pitch -45/yaw 90 med den største vonMises spenningen 385 MPa. Analysene viser at det nye designet ikke gjør noen endringer i styrken til delen.

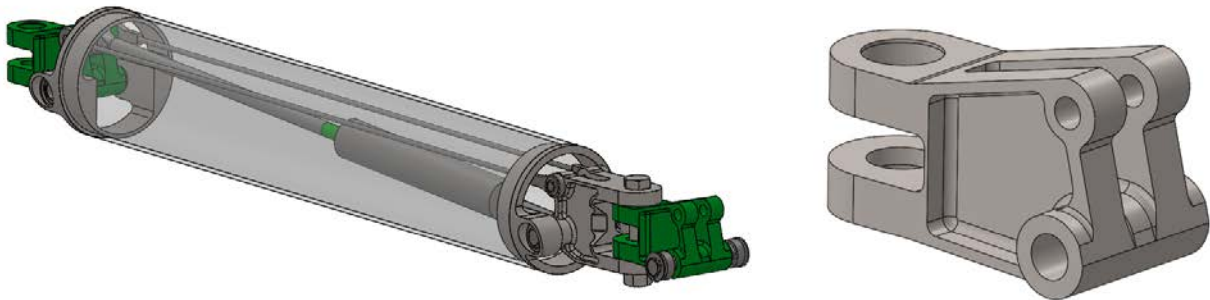


Figur 62 Største vonMises spenninger på ny pitch-ledd design

En rapport i fra analysen med de høyeste vonMises spenningene ligger under Vedlegg A der er det en samlet oversikt over alle resultater og valg som ligger til grunn for analysen. Analysene viser at resultatet konvergerer og er innenfor sine dimensjonerende styrkeverdier.

## Yaw-ledd

Figur 63 viser yaw-leddets plassering og utforming.

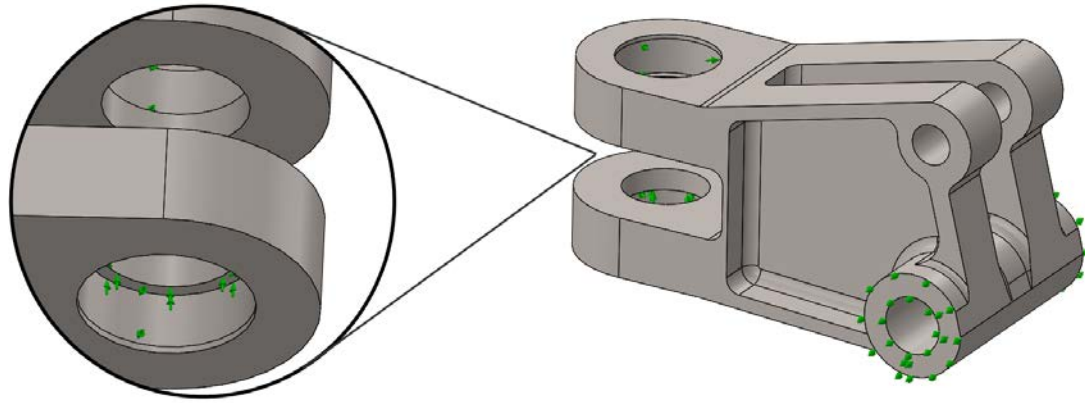


**Figur 63 Yaw-ledd**

Yaw-leddet er designet med utgangspunkt i topoljialysen. Den er tenk maskinert ut i titan grade 5 med en flytespenning på  $800 \text{ N/mm}^2$ , og massetetthet rundt  $4500 \text{ kg/m}^3$ . Med en sikkerhetsfaktor på 1.6 gir dette en dimensjonerende spenning på  $500 \text{ N/mm}^2$ .

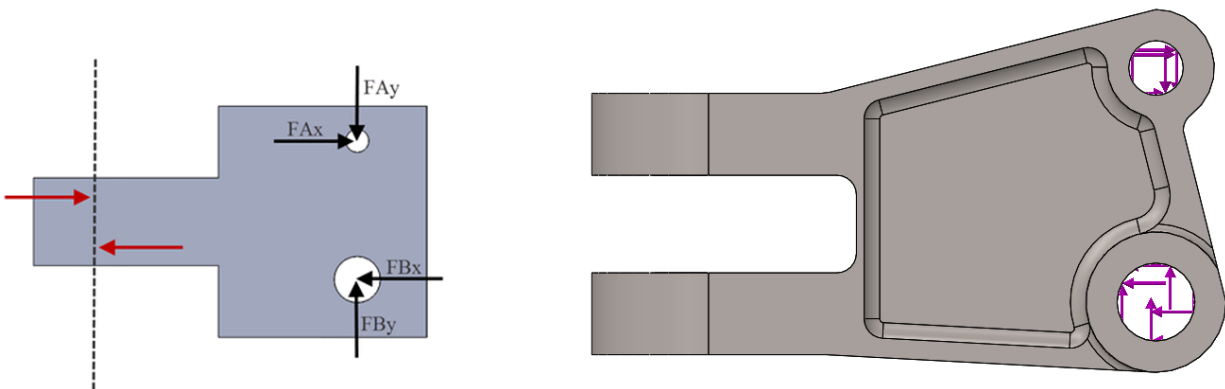
Yaw-leddet er likt i alle leddforbindelser og dimensjoneres ut i fra krefter som opptrer i 1. leddforbindelse. I konfigurasjoner hvor det er 90 grader utslag i 2. leddforbindelse vil torsjonskreftene fra momentet i 2. leddforbindelse overføres til yaw-leddet i 1. leddforbindelse. Alle konfigurasjoner er vist i kapittel 2 – kravspesifikasjon.

Analysene blir gjennomført på yaw-leddet som en part. Glidelagrene sin kontaktflate i vertikalboringen er delt inn med splitline og fastholdt der de to områdene tar krefter radielt på den sylindriske overflaten. Toppen av glidelageret i den nedre boringen tar aksielle krefter fra armens egenvekt. Endene av den nedre horisontalboringen tar krefter sideveis. Figur 64 viser alle fastholdinger.



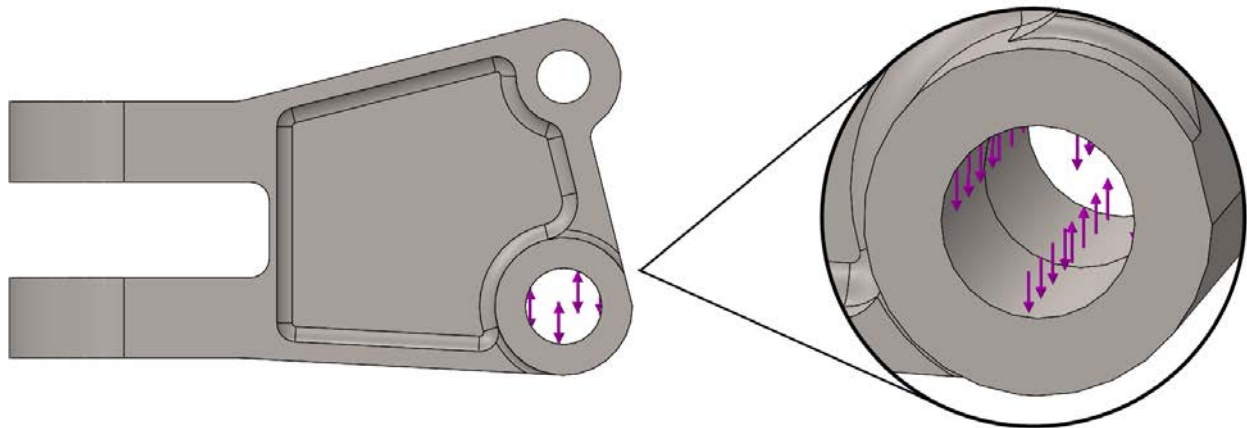
**Figur 64** Fastholdinger av yaw-ledd

I konfigurasjonene hvor det kun er nedbøyning og ingen torsjon fra 2. leddforbindelse, blir kreftene påført yaw-leddet slik som vist på Figur 65. Kraftene er da påført i boringen over hele lengden



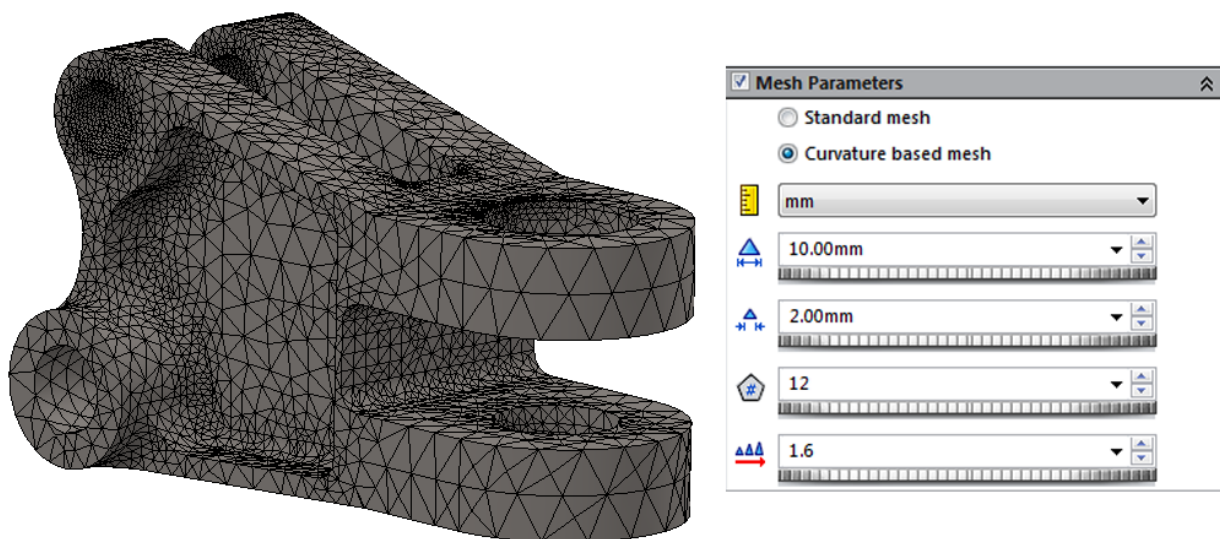
**Figur 65** Krefter ved nedbøyning av yaw-ledd

I de konfigurasjoner hvor det er torsjon, og de dimensjonerende kreftene er fra 2. leddforbindelse, er den nedre boringen delt i midtplanet med splitline og påført krefter i motsatte retninger. Figur 66 viser tilfelle med torsjon.



**Figur 66** Krefter ved torsjon av yaw-ledd

Figur 67 viser mesh som er brukt, og verdiene som er benyttet. De største spenningene forekommer i radier og sirkulære overflater, det er derfor benyttet curvature based mesh med minimum 12 elementer på en sirkel for å sikre gode resultater.



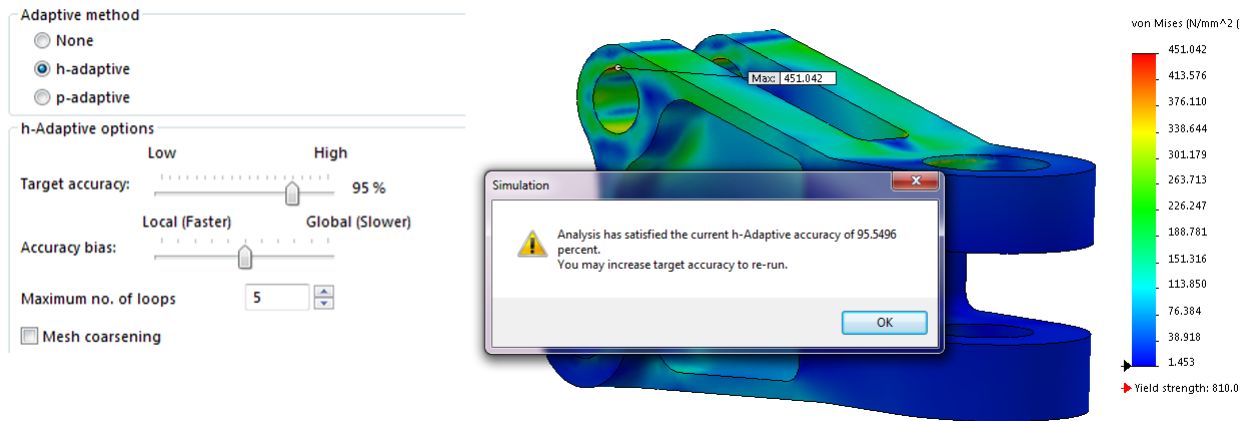
**Figur 67** Mesh av yaw-ledd

Alle analysene ble gjennomført med en H-adaptiv metode med en nøyaktighet satt til 95 prosent. De seks konfigurasjonene ble analysert og de største vonMises spenningene ble som vist i Tabell 26.

Pitch 0 grader	<b>451 MPa</b>	Pitch 0 grader – yaw 90 grader	<b>384 MPa</b>
Pitch -45 grader	<b>412 MPa</b>	Pitch 45 grader – yaw 90 grader	<b>272 MPa</b>
Pitch 45 grader	<b>345 MPa</b>	Pitch -45 grader – yaw 90 grader	<b>311 MPa</b>

**Tabell 26 Største vonMises spenninger på yaw-ledd**

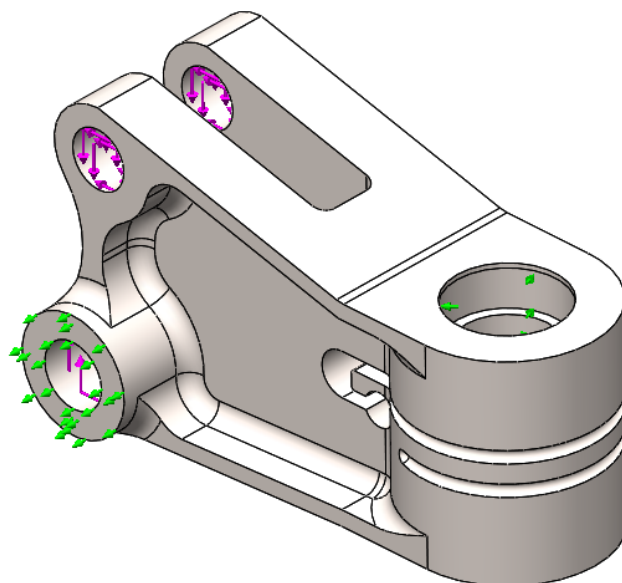
Figur 68 viser konfigurasjon «pitch 45 grader» med den største vonMises spenningen 451 MPa. Med gjennomført h-Adaptive metode satt til 95 prosent.



**Figur 68 h-adaptiv analyse med største spenninger av yaw-ledd**

### **Yaw-ledd med yaw-bevegelse design**

For festing av vaiere til yaw-bevegelsen ble det implementert et nytt design i yaw-leddet. Det er gjort en tilleggs-analyse som viser at disse endringene ikke fører til uakseptable spenningskonsentrasjoner. Designet til delen er i likhet med krefter og fastholdinger vist i Figur 69.



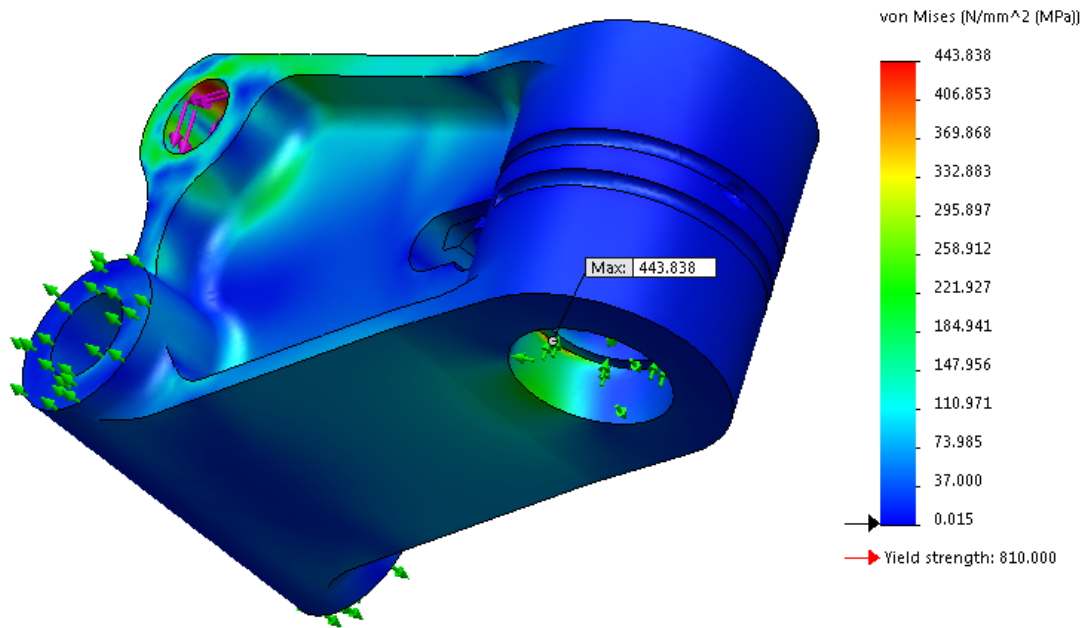
Figur 69 Yaw-ledd med yaw design

Alle analysene ble gjennomført med en h-adaptiv metode med en nøyaktighet satt til 95 prosent. De seks konfigurasjonene ble analysert og de største vonMises spenningene er vist i Tabell 27.

Pitch 0 grader	<b>443 MPa</b>	Pitch 0 grader – yaw 90 grader	<b>355 MPa</b>
Pitch -45 grader	<b>406 MPa</b>	Pitch 45 grader – yaw 90 grader	<b>258 MPa</b>
Pitch 45 grader	<b>335 MPa</b>	Pitch -45 grader – yaw 90 grader	<b>295 MPa</b>

Tabell 27 Største vonMises spenninger med ny yaw-design

Figur 70 viser konfigurasjon 1. Pitch 0 grader med den største vonMises spenningen 443 MPa. Analysene viser at det nye designet ikke gjør noen endringer i styrken til delen.

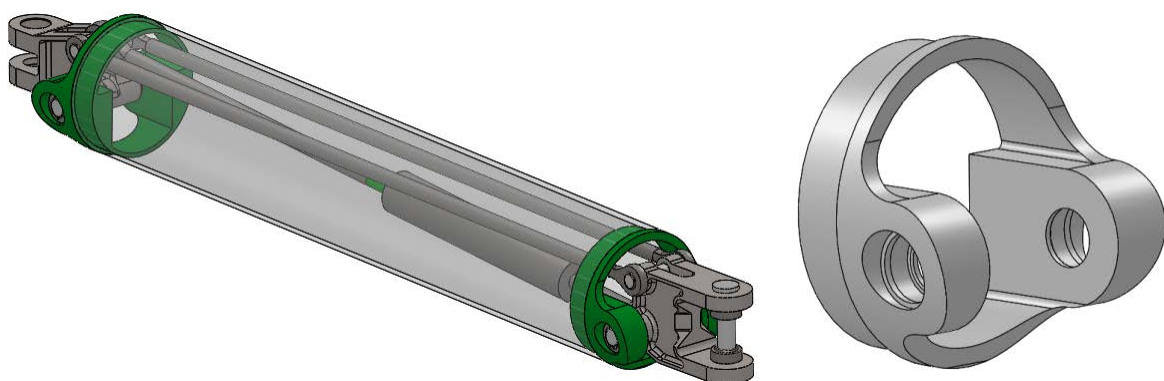


**Figur 70 Største vonMises spenninger av modell med ny yaw-design**

En rapport i fra analysen med de høyeste vonMises spenningene ligger under Vedlegg A der er det en samlet oversikt over alle resultater og valg som ligger til grunn for analysen. Analysene viser at resultatet konvergerer og er innenfor sine dimensjonerende styrkeverdier.

## Endestykke

Figur 71 viser endestykkets plassering og utforming.



**Figur 71 Endestykke**

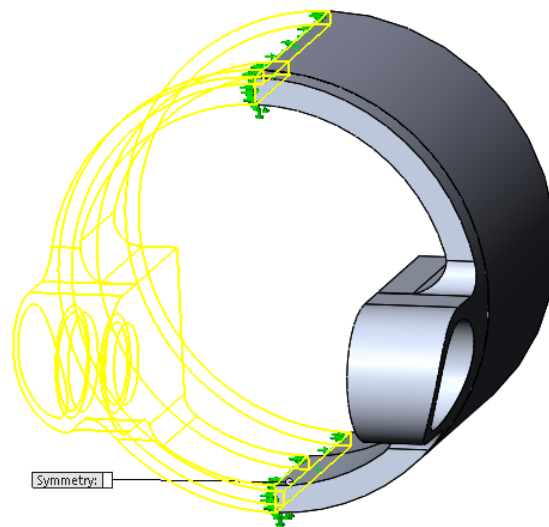
Endestykket er tenkt maskinert ut i aluminium med en flytespenning på 255 N/mm<sup>2</sup>, og massetetthet 2700 kg/m<sup>3</sup>. med en sikkerhetsfaktor på 1.6 gir dette en dimensjonerende

spenning på 159,3 N/mm<sup>2</sup>. Endestykket er likt i alle leddforbindelser og dimensjoneres ut i fra trykkpåkjenninger og torsjonskrefter i 2. leddforbindelse.

Analysene blir gjort med hensyn til trykk og torsjon i en sammenstilling med en stiv rørdel som simulerer rørforbindelsen mellom to endestykker.. Kontaktsettet mellom endestykket og rørdelen er satt til «bonded».

Dimensjonerende krefter for endestykke ved trykk er 65950 N og dimensjonerende krefter for endestykke ved torsjon er gitt ved det totale moment i 2. leddforbindelse på 2083 Nm. Avstanden mellom senter av glidelagrene er 111mm, dette er markert med splittlines i boringene.

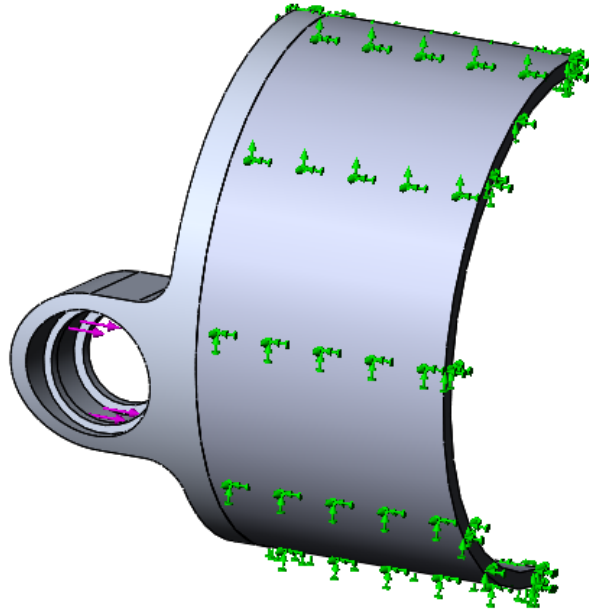
Symmetrisnittet til modellen er utnyttet for å gjøre det lettere å kjøre analysen. Symmetrisnittet er vist på Figur 72.



Figur 72 Symmetrisnitt for endestykke

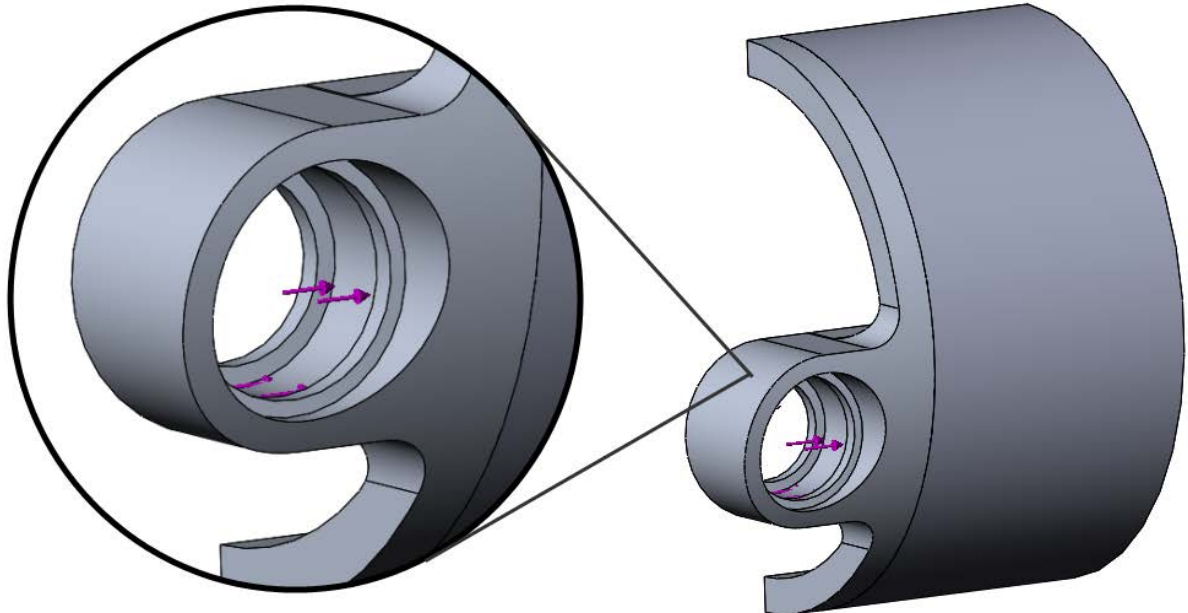
Endestykke er låst med alle seks frihetsgrader i rørdelen slik som vist i Figur 73.





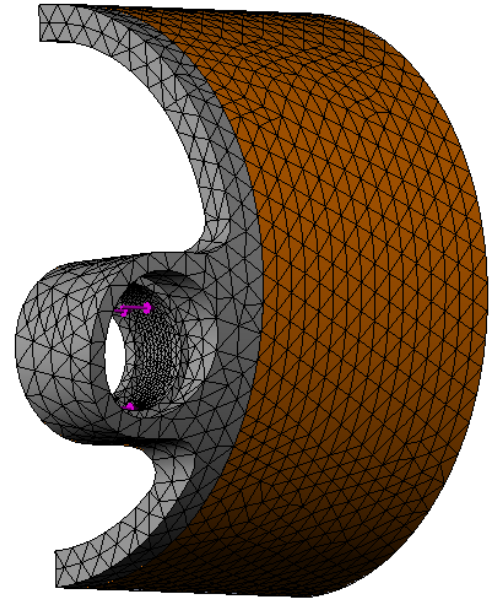
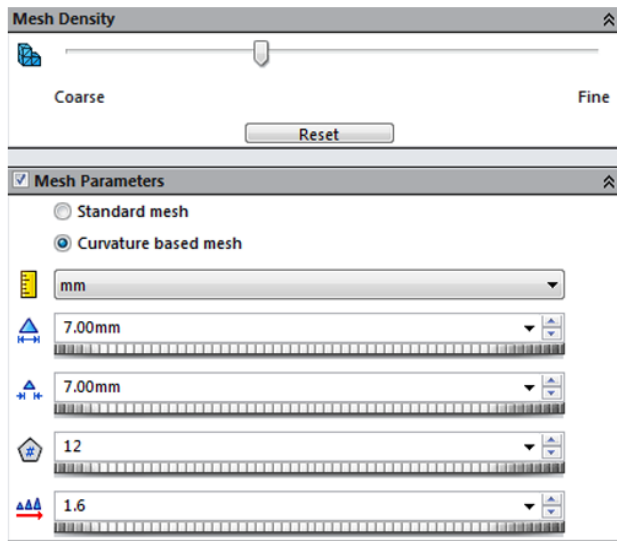
Figur 73 Fastholdinger for endestykke

De dimensjonerende kreftene blir påført endestykke i området som er skilt av for glidelagrene ved hjelp av splittlines, se Figur 74.



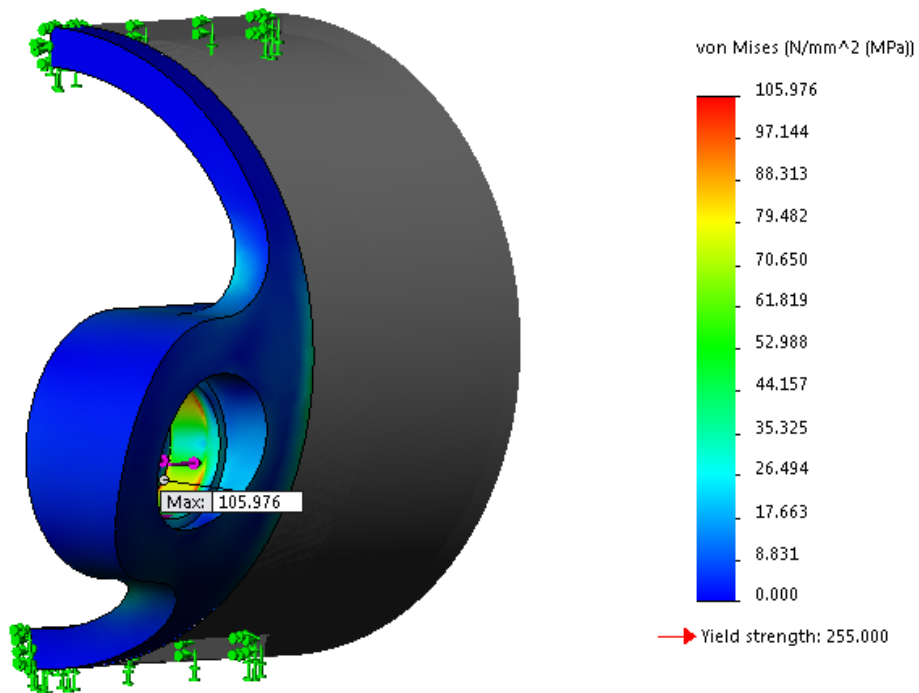
Figur 74 Krefter for endestykke

I Figur 75 ser man hva slags mesh som er brukt, og hvilke verdier som er benyttet.



Figur 75 Mesh for endestykke

De største vonMises spenningene på 89,4 MPa inne i bolteøret er vist på Figur 76.

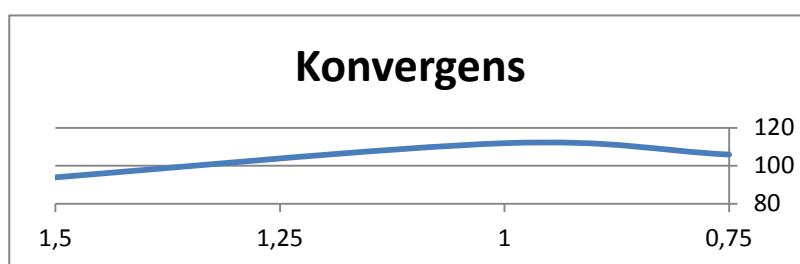


Figur 76 Spenninger for endestykke

Etter første analyse ble det gjort to analyser med forfining av mesh ved hjelp av «mesh control» Verdiene konvergerer og spenningene og størrelsen på mesh i de tre analysene kan leses ut i fra Tabell 28 og Figur 77.

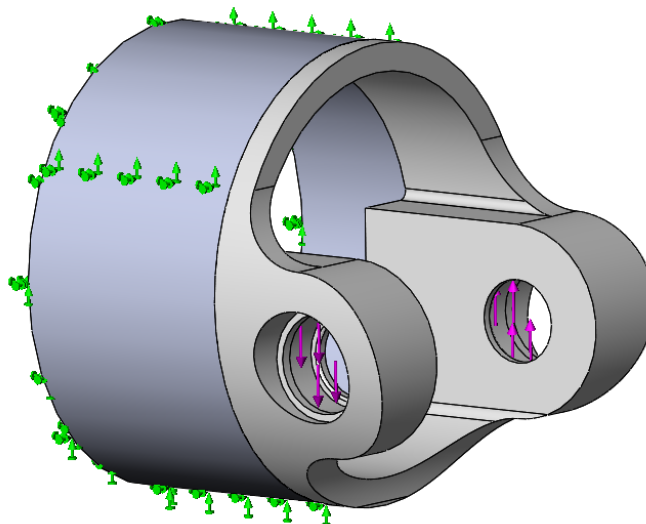
Analysenavn	Mesh størrelse	vonMises spenninger
Static – mesh 200	2,00	92,6 MPa
Static – mesh 125	1,25	98,5 MPa
Static – mesh 100	0.5 mm	105,9 MPa

Tabell 28 Mesh og spenninger for endestykke



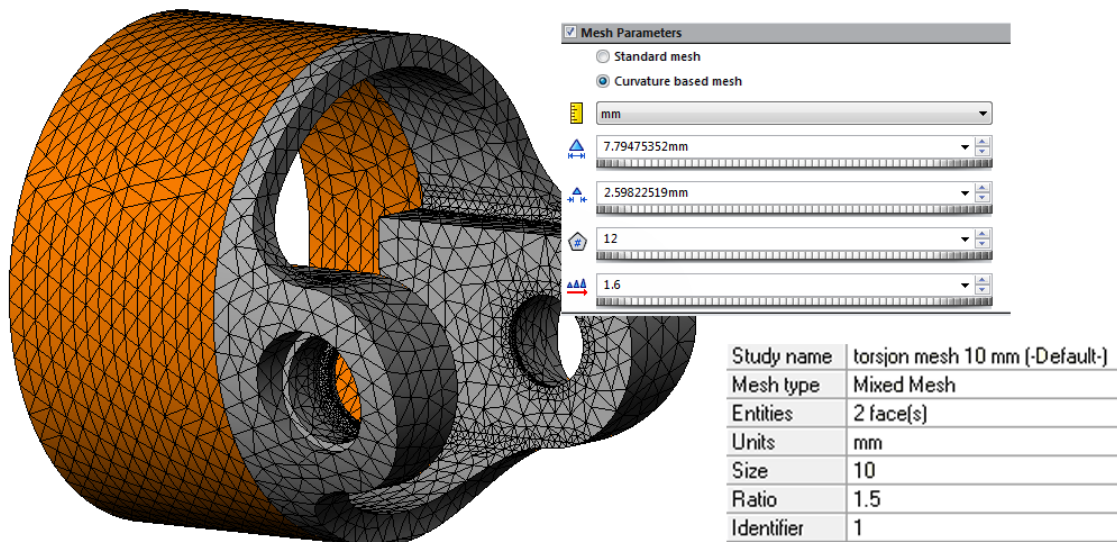
Figur 77 Konvergens for endestykke

Spenninger og innfesting for torsjonsanalysen er vist på Figur 78.



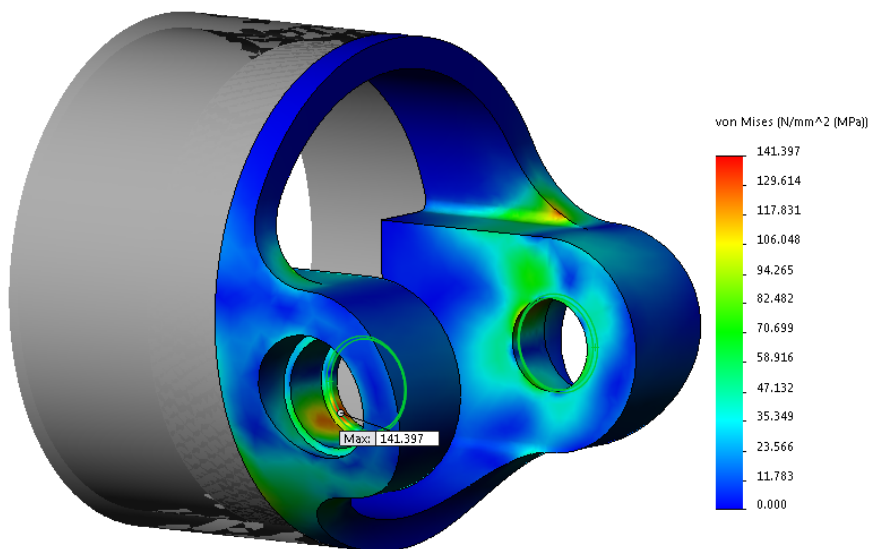
Figur 78 Spenninger og innfesting for endestykke

Mesh er vist i Figur 79. Det er brukt curvature based mesh, i ørene hvor de høyeste spenningene opptrer er det påført mesh control.



Figur 79 Mesh for endestykke

De høyeste vonMises spenningene er vist i Figur 80.



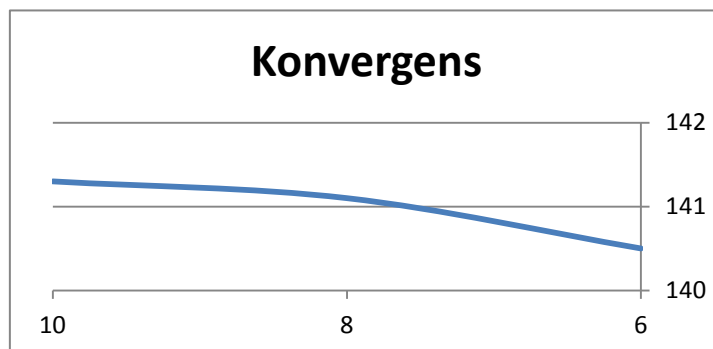
Figur 80 Største vonMises spenninger for endestykke

Etter første analyse ble det gjort to analyser med forfining av mesh ved hjelp av «Mesh control» Verdier konvergerer og spenningene og størrelsen på mesh i de tre analysene kan leses ut i fra Tabell 29 og Figur 81.

Analysenavn	Mesh størrelse	vonMises spenninger
Torsjon mesh 10 mm	10 mm	141,3 MPa

Torsjon mesh 8 mm	8 mm	141,1 MPa
Torsjon mesh 6 mm	6 mm	140,5 MPa

Tabell 29 Mesh og spenninger for endestykke



Figur 81 Konvergens for endestykke

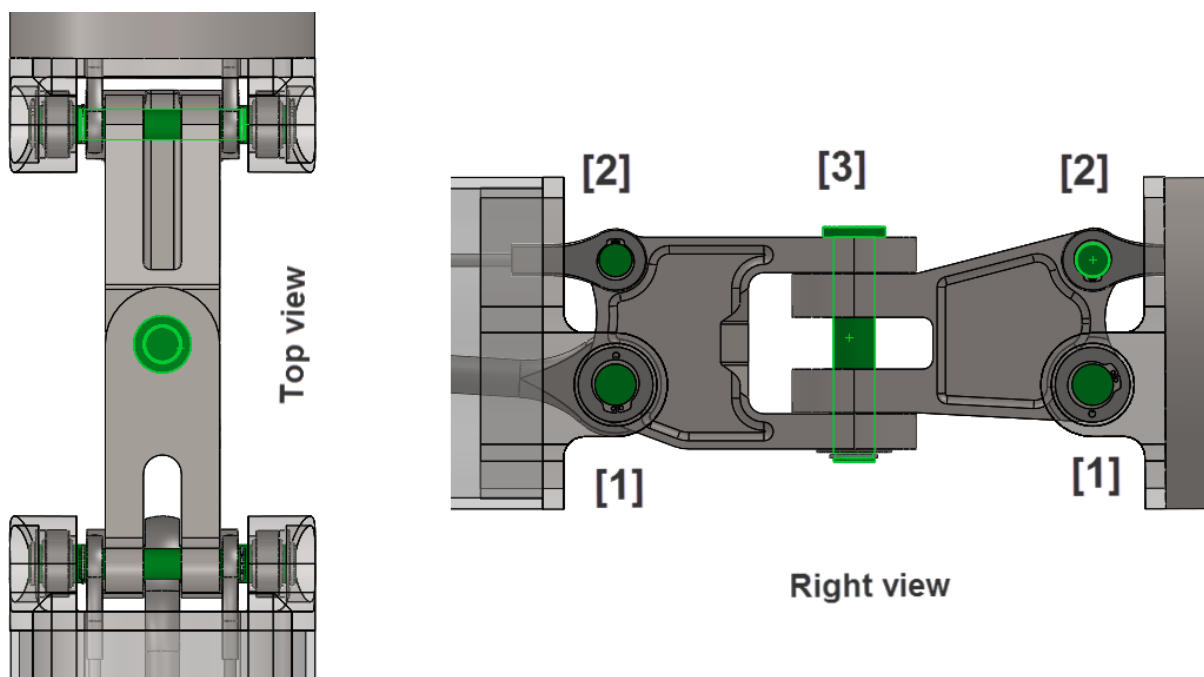
En rapport i fra analysen med de høyeste vonMises spenningene ligger under Vedlegg A der er det en samlet oversikt over alle resultater og valg som ligger til grunn for analysen. I tillegg er det gjort en kontrollberegning av delen som ligger i Vedlegg A. Alle beregninger og analyser viser at resultatet konvergerer og er innenfor sine dimensjonerende styrkeverdier.

## Bolter

I sammenstillingen er det tre bolter mellom forbindelsene:

- Ø20 – ledd/endestykke [1]
- Ø16 – ledd/parallelstag [2]
- Ø20 - Yaw-ledd/pitch-ledd [3]

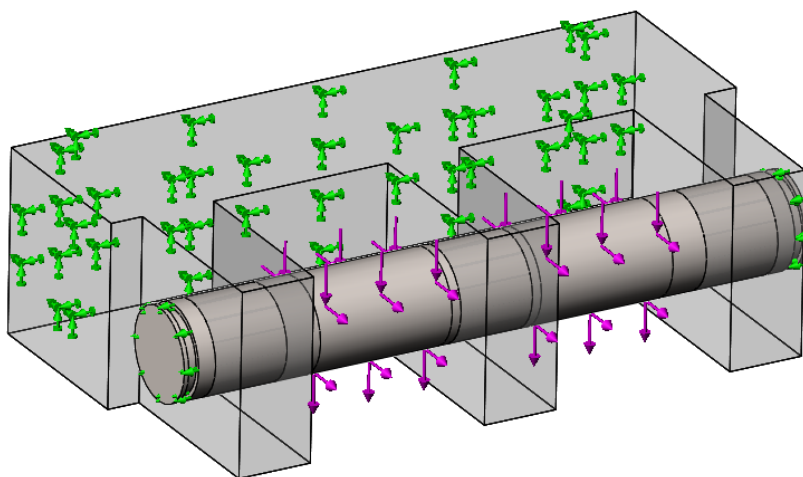
Figur 82 viser boltene plassering.



Figur 82 Boltenes plassering

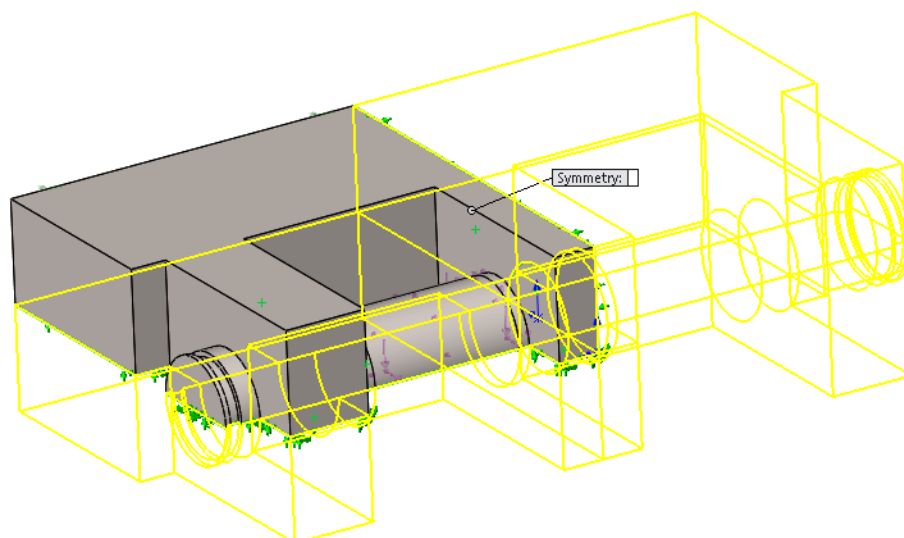
### Ø20 – ledd/endestykke

Bolten blir dimensjonert ut i fra kreftene i 1.leddforbindelse. Fastholdingen er satt i bakkant av modellen som representerer leddforbindelsene i sammenstillingen. I mellom de to delene er det kontaktflatene satt til «no penetration» Figur 83 viser krefter og fastholdinger for bolten.



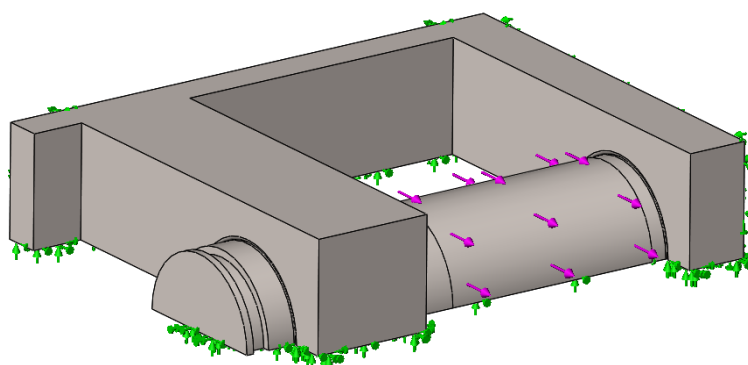
Figur 83 Krefter og fastholdinger for horisontalbolt

På grunn av alle kontaktsettene som er i analysen ble den tung å kjøre. Modellen ble derfor snittet i to symmetrisnitt slik det er vist i Figur 84.



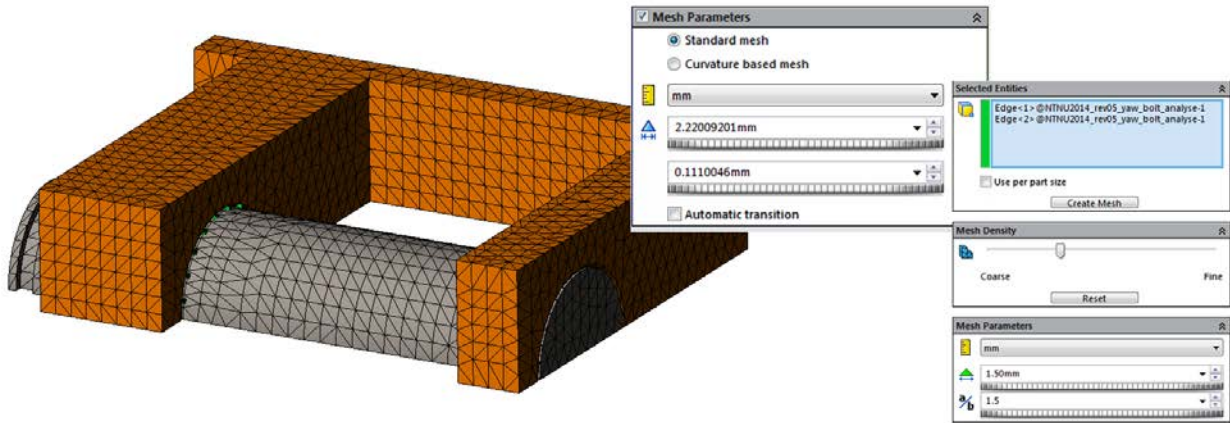
**Figur 84 Symmetrisnitt for horisontalbolt**

Når det er brukt symmetri for å analysere delen er de dekomponerte kreftene erstattet med resultantkraften, dette er vist på Figur 85.



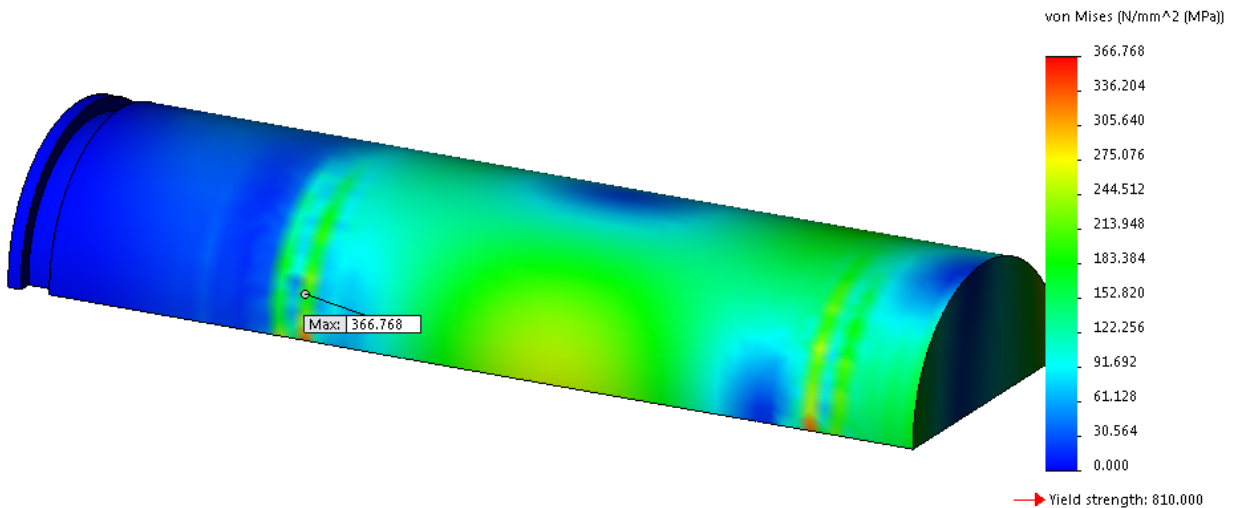
**Figur 85 Krefter for horisontalbolten**

Det er brukt standard mesh med mesh control plassert der det oppstår spenningskonsentrasjoner, verdiene som er brukt er vist i Figur 86.



Figur 86 Mesh for horisontalbolten

Verdiene fra analysen kan man se på Figur 87.



Figur 87 vonMises spenninger for horisontalbolten

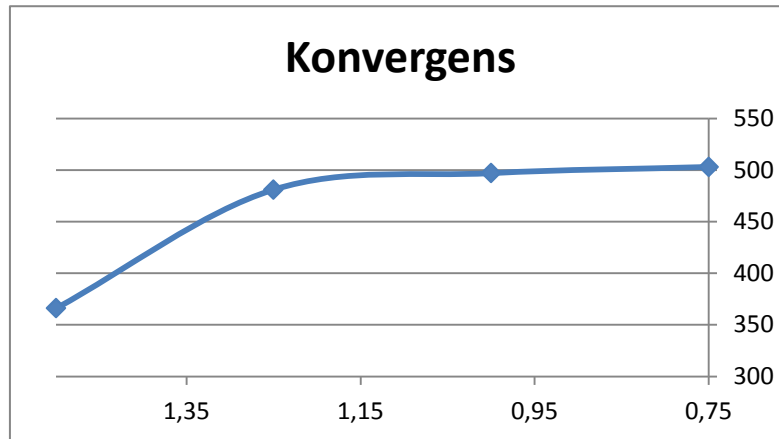
Etter analysen ble det satt på en mesh kontroll i områdene hvor de største spenningene forekommer. Størrelsen på mesh og de største vonMises spenningene er vist i Tabell 30 og Figur 88.

Analysenavn	Mesh størrelse	vonMises spenninger
Mesh 150	Se Figur 87	367 MPa
Mesh 125	1,25 mm	481 MPa
Mesh 100	1,0 mm	497 MPa



Mesh 075	0,75 mm	503 MPa
----------	---------	---------

Tabell 30 Mesh og spenninger for horisontalbolten

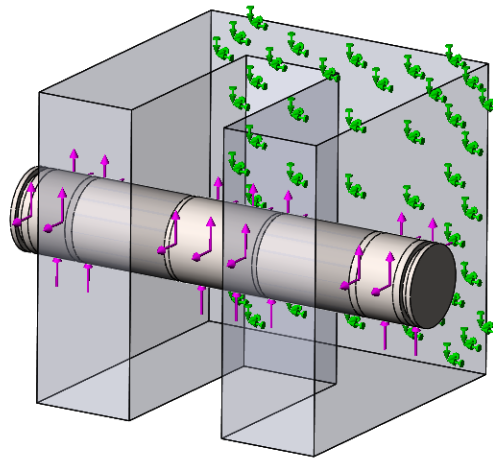


Figur 88 Konvergens for horisontalbolten

En rapport i fra analysen med de høyeste vonMises spenningene ligger under Vedlegg A der er det en samlet oversikt over alle resultater og valg som ligger til grunn for analysen. I tillegg er det gjort en kontrollberegning av delen som ligger i Vedlegg C. Analysene viser at resultatet konvergerer og er innenfor sine dimensjonerende styrkeverdier.

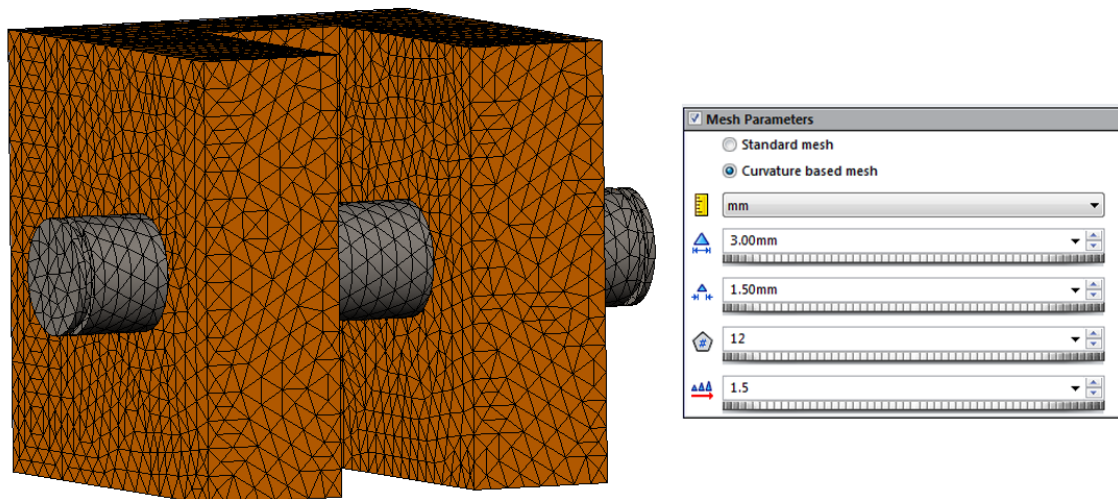
### Ø16 – ledd/parallelsteg

Bolten blir dimensjonert ut i fra kreftene i 1.leddforbindelse og høydeaktuatoren. Fastholdingen er satt i bakkant av modellen som er en forenkling av leddforbindelsene i sammenstillingen. I mellom de to delene er det en kontaktflatene satt til «no penetration» Figur 89 viser krefter og fastholdinger for bolten.



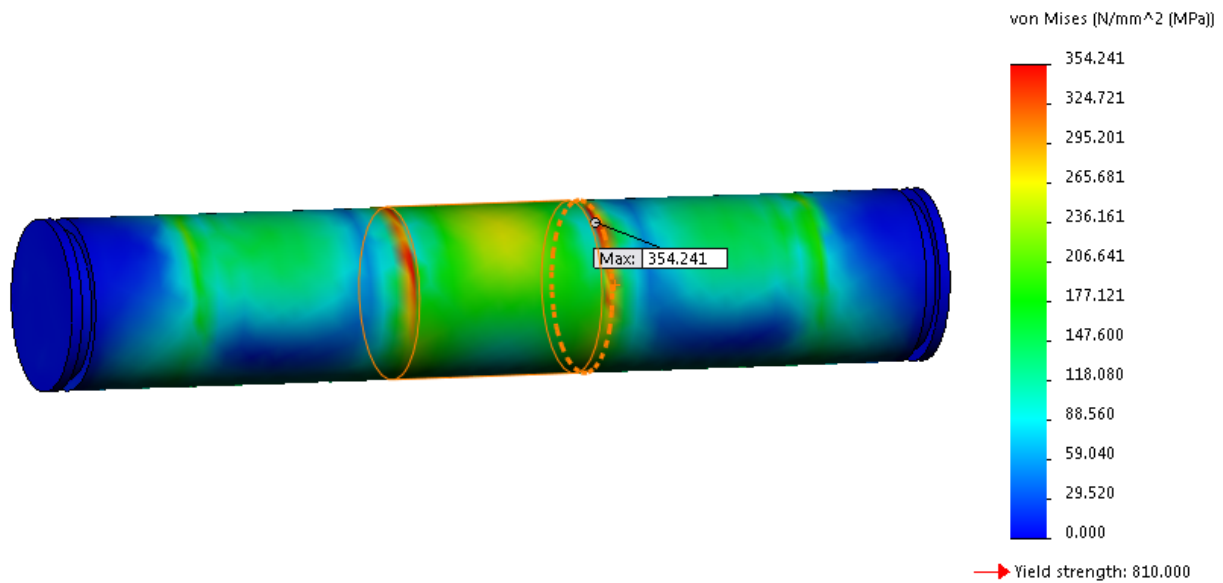
Figur 89 Krefter og fastholdinger for Ø16 bolt

Det er brukt curvature based mesh, verdiene som er brukt er vist i Figur 90.



Figur 90 Mesh for Ø16 bolt

Resultatet fra analysen er vist i Figur 91.

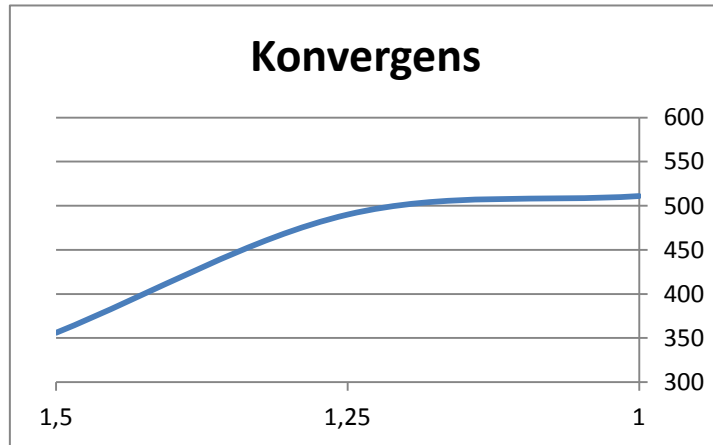


**Figur 91 Analyseresultater for Ø16 bolt**

Etter analysen ble det satt på en mesh kontroll i områdene hvor de største spenningene forekommer. Størrelsen på mesh og de største vonMises spenningene er vist i Tabell 31 og Figur 92.

<b>Analysenavn</b>	<b>Mesh størrelse</b>	<b>vonMises spenninger</b>
Static – bolt	Se Figur 90	356,3 MPa
Static – bolt – finere mesh 1	1,25 mm	490,9 MPa
Static – bolt – finere mesh 2	1,0 mm	511,5 MPa

**Tabell 31 Mesh og spenninger for Ø16 bolt**

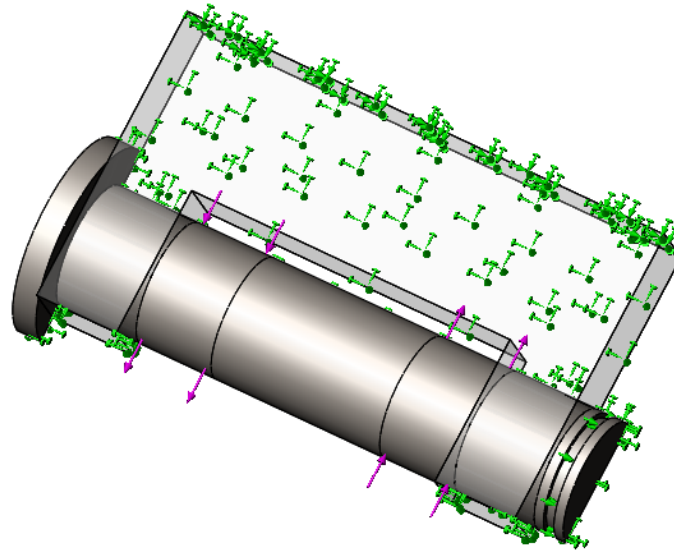


**Figur 92 Konvergens for Ø16 bolt**

En rapport i fra analysen med de høyeste vonMises spenningene ligger under Vedlegg A der er det en samlet oversikt over alle resultater og valg som ligger til grunn for analysen. I tillegg er det gjort en kontrollberegning av delen som ligger i Vedlegg C. Analysene viser at resultatet konvergerer og er innenfor sine dimensjonerende styrkeverdier.

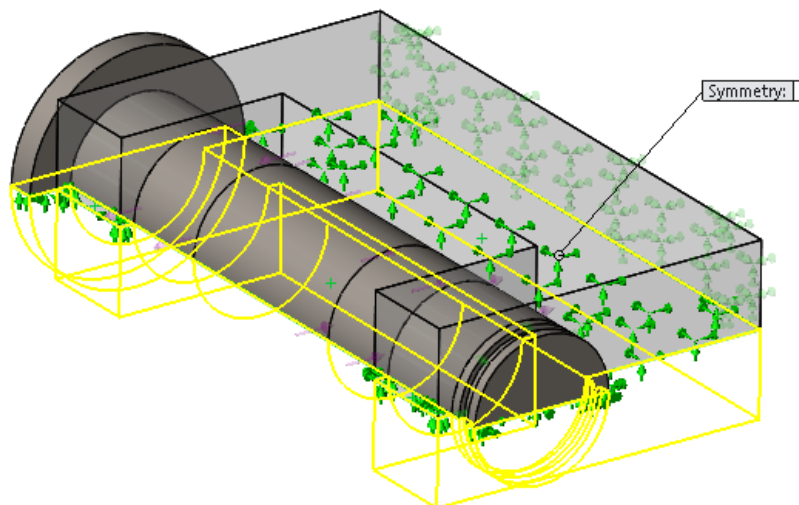
### **Ø20 - Yaw-ledd/pitch-ledd**

Bolten blir dimensjonert ut i fra kreftene i 2.leddforbindelse. Fastholdingen er satt i bakkant av modellen som er en forenkling av leddforbindelsene i sammenstillingen. I mellom de to delene er kontaktflatene satt til «no penetration» Figur 93 viser krefter og fastholdinger for bolten.



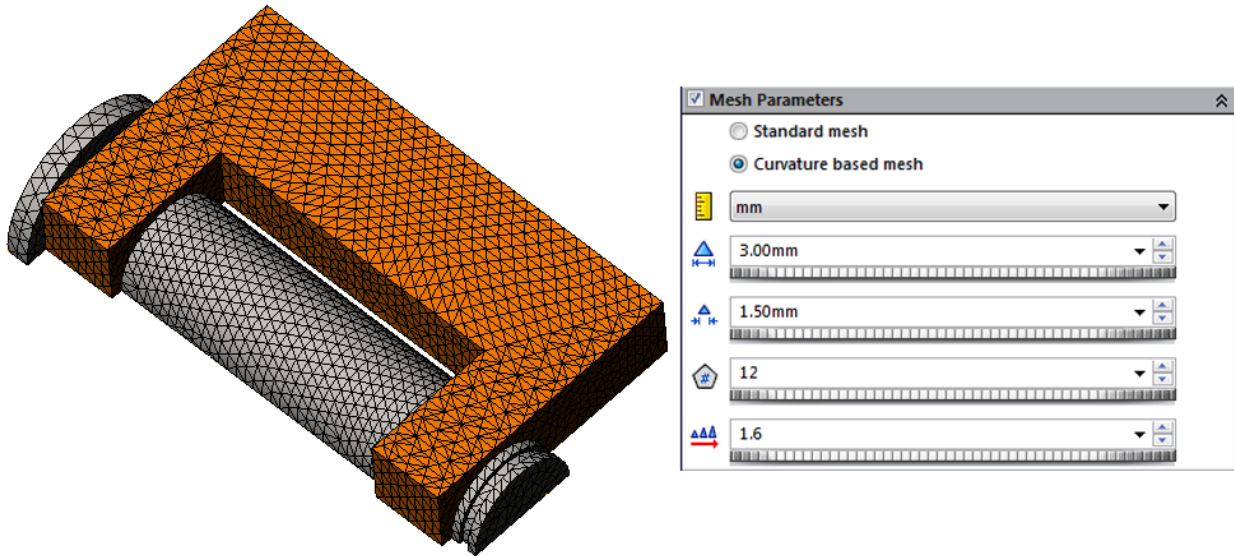
**Figur 93** Krefter og fastholdinger for vertikalbolt

På grunn av alle kontaktsett som er satt i analysen ble analysen krevende å gjennomføre. Modellen ble derfor snittet i to symmetrisnitt slik det er vist i Figur 94.



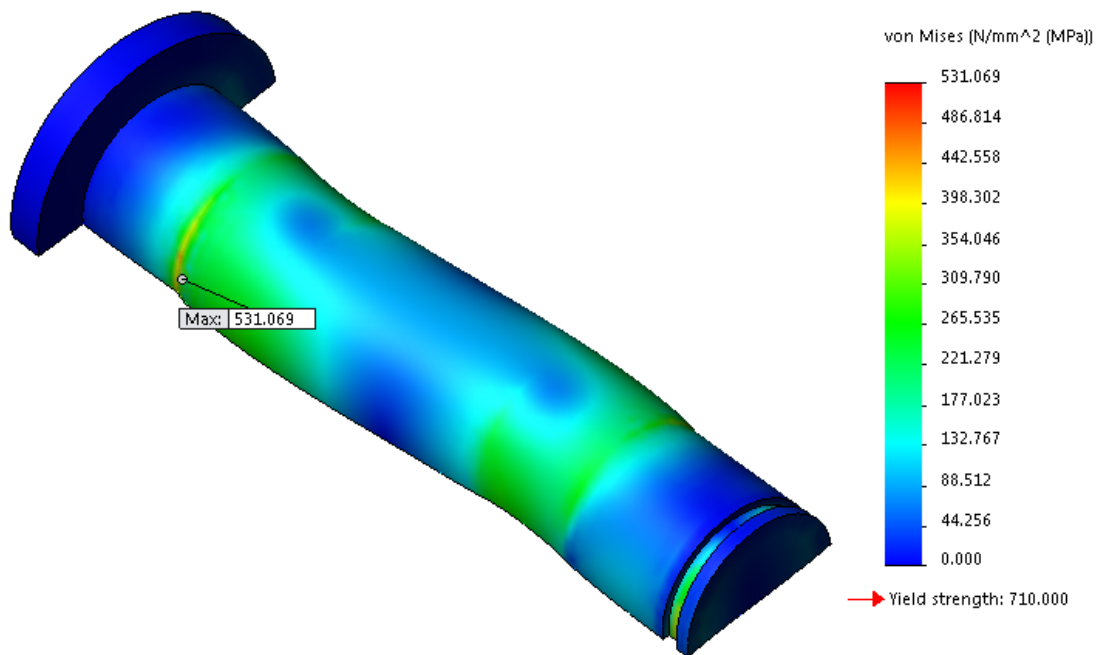
**Figur 94** Symmetrisnitt for vertikalbolt

Det er brukt et curvature based mesh, verdiene som er brukt er vist i Figur 95.



Figur 95 Mesh for vertikalbolt

Resultatet fra analysen er vist i Figur 96.

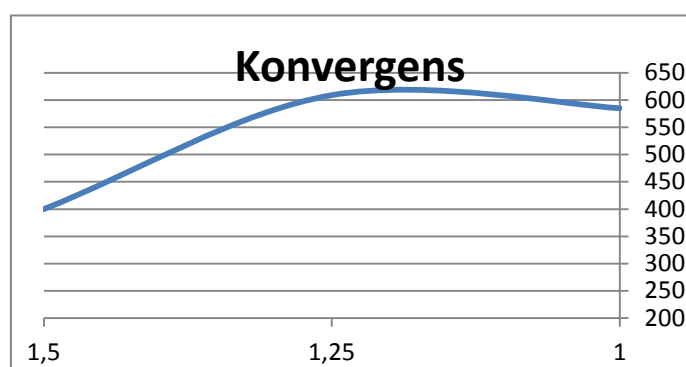


Figur 96 spenninger fra analyse til vertikalbolt

Etter analysen ble det satt på en mesh kontroll i områdene hvor de største spenningene forekommer. Størrelsen på mesh og de største vonMises speningene er vist i Tabell 32 og Figur 97.

<b>Analysenavn</b>	<b>Mesh størrelse</b>	<b>vonMises spenninger</b>
Static – mesh 150	Se Figur 95	401,5 MPa
Static – mesh 125	1,25 mm	609,3 MPa
Static – mesh 100	1,0 mm	585,2 MPa

Tabell 32 Mesh og spenninger for vertikalbolt

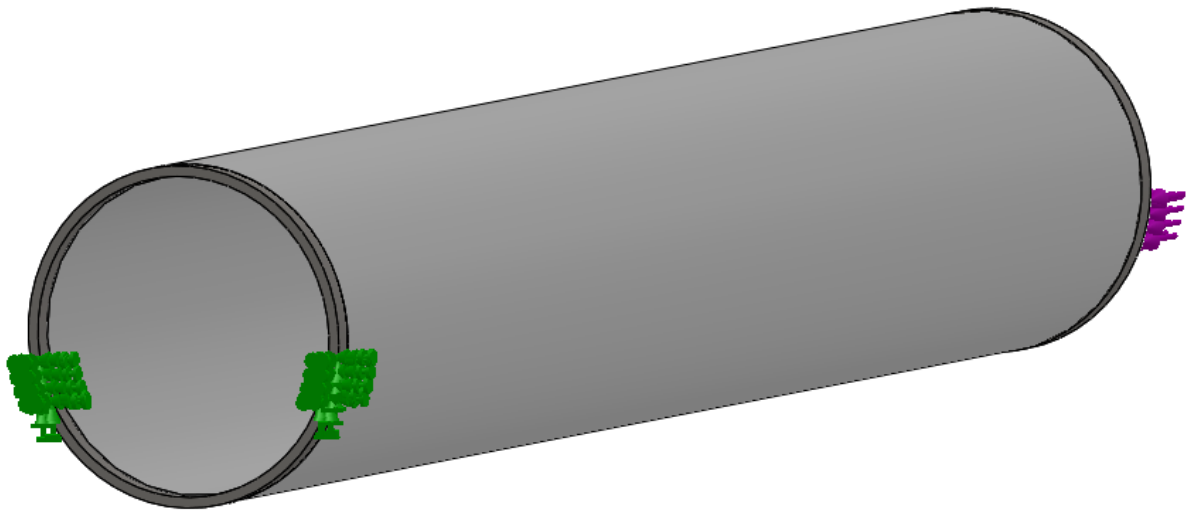


Figur 97 Konvergens for vertikalbolt

En rapport i fra analysen med de høyeste vonMises spenningene ligger under Vedlegg A der er det en samlet oversikt over alle resultater og valg som ligger til grunn for analysen. I tillegg er det gjort en kontrollberegning av delen som ligger i Vedlegg C. Analysene viser at resultatet konvergerer og er innenfor sine dimensjonerende styrkeverdier.

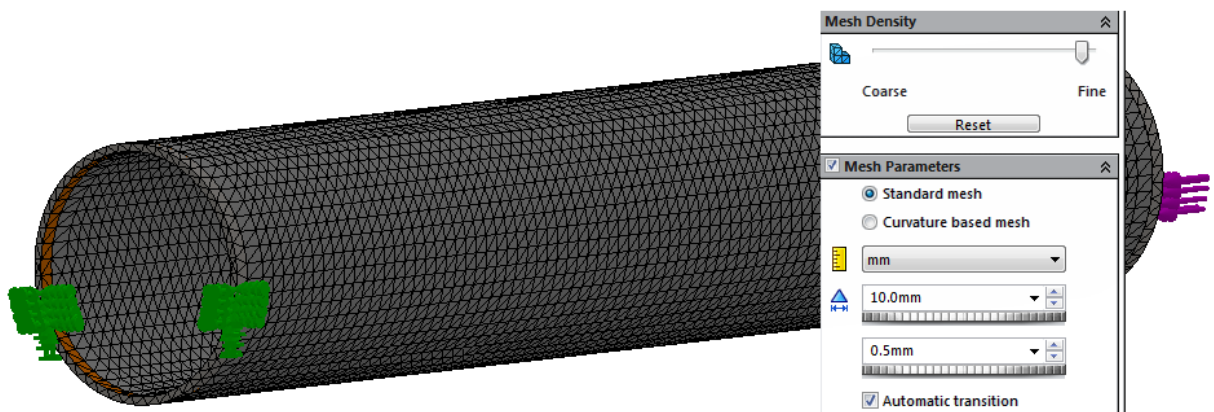
## Rør

Røret blir dimensjonert ut i fra kreftene i 2.leddforbindelse.. I endene av røret er det satt på to ringer som simulerer endestykkene festet mot røret i hver sin ende. I mellom de tre delene er kontaktflatene satt til «bonded». Figur 98 viser krefter og fastholdinger for røret.



Figur 98 Krefter og fastholdinger for rør

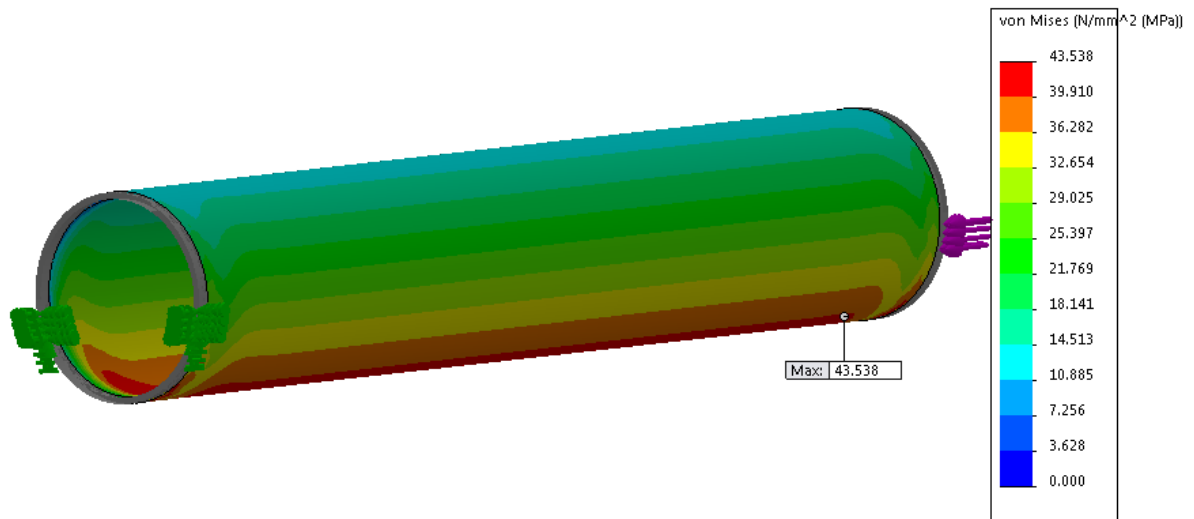
Det er brukt et standard mesh, verdiene som er brukt er vist i Figur 99.



Figur 99 Mesh for rør

Resultatet fra analysen er vist i Figur 100.



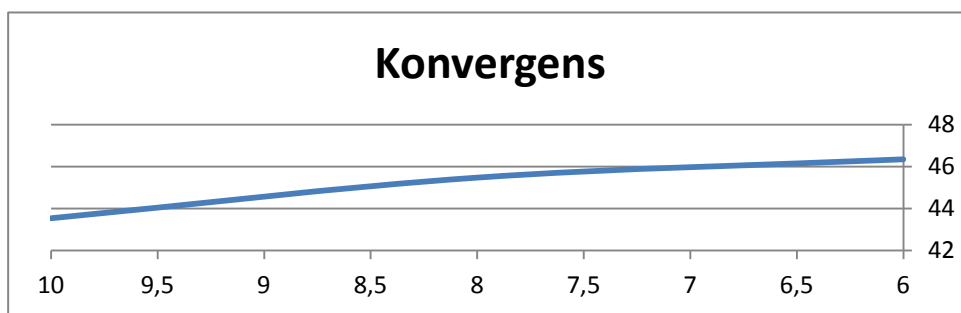


**Figur 100** vonMises spenninger for vertikalbolt

Røret blir utsatt for rene trykkspenninger og torsjonsspenninger, resultatene fra analysene er vist i Tabell 33 og Figur 101 viser konvergens i analysen med trykk, som er analysen hvor de største spenningskonsentrasjonene opptrer.

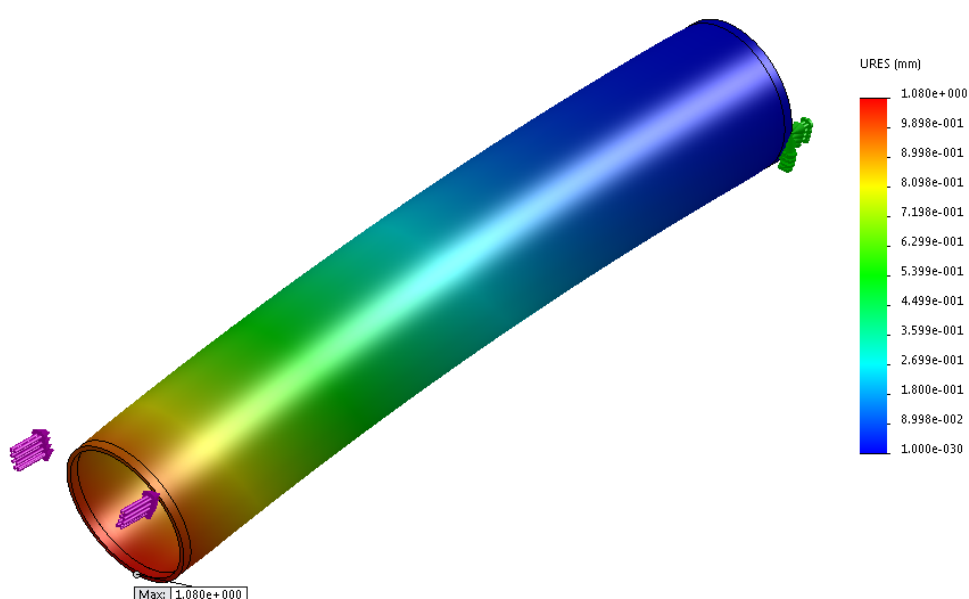
<b>Analysenavn</b>	<b>Mesh størrelse</b>	<b>vonMises spenninger</b>
Trykklast 10mm mesh	Se Figur 99	43,5 MPa
Trykklast 8mm mesh	8 mm	45,4 MPa
Trykklast 6mm mesh	6 mm	46,3 MPa
Torsjon 10mm mesh	10 mm	19,9 MPa
Torsjon 8mm mesh	8 mm	19,9 MPa
Torsjon 6mm mesh	6 mm	20,1 MPa

**Tabell 33** Mesh og spenninger for rør



Figur 101 Konvergens for rør

Nedbøyningen ved de største vonMises spenninger er vist i Figur 102.



Figur 102 Nedbøyning for rør

En rapport i fra analysen med de høyeste vonMises spenningene ligger under Vedlegg A der er det en samlet oversikt over alle resultater og valg som ligger til grunn for analysen. I tillegg er det gjort en kontrollberegning av delen som ligger i Vedlegg C. Analysene viser at resultatet konvergerer og er innenfor sine dimensjonerende styrkeverdier.

## 5 Kravspesifikasjon for innfesting

For å sikre at resultatet av prosjektet har nok dybde til å være av nytte for LBO ble det besluttet å begrense oppgavens omfang til armens seksjoner. Dette betyr at det ikke er gjort noen videre utvikling av innfestingen. Det var allikevel et ønske fra LBO at det skulle utarbeides en kravspesifikasjon slik at denne utviklingen kan gjøres på et senere tidspunkt av LBO. Det er derfor i dette kapitlet laget en kravspesifikasjon samt en beskrivelse av hvilke faktorer som bør tas hensyn til når denne skal designes.

To viktige punkter fra kravspesifikasjonen er vist i Tabell 34. Det første sier at innfestingen må kunne monteres i mannullet, samt at det er veldig begrenset med plass på utsiden for innføring av armen. Dette tilsier at innfestingen bør konstrueres med en gripemekanisme som gjør at armen kan bygges inn i tanken seksjon for seksjon. Videre sier kravspesifikasjonen at armen skal kunne godkjennes for ATEX Sone 1. Dette innebærer at innfestingen må være helt tett for å ikke slippe inn oksygen, eventuelt må det tilføres en konstant strøm av nitrogen i åpninger for å skape en barriere mot oksygeninntrengning.

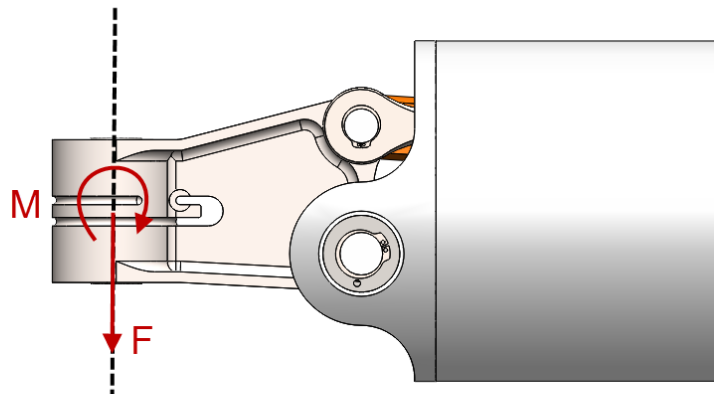
Montering	Armen må kunne monteres i mannull, gjerne med en fleksibel ordning. Tilgjengelig sone for innføring er inntil 1,5m fra mannull.	
ATEX godkjenning	ATEX Sone 1	

Tabell 34 – Utdrag fra kravspesifikasjon gitt av LBO

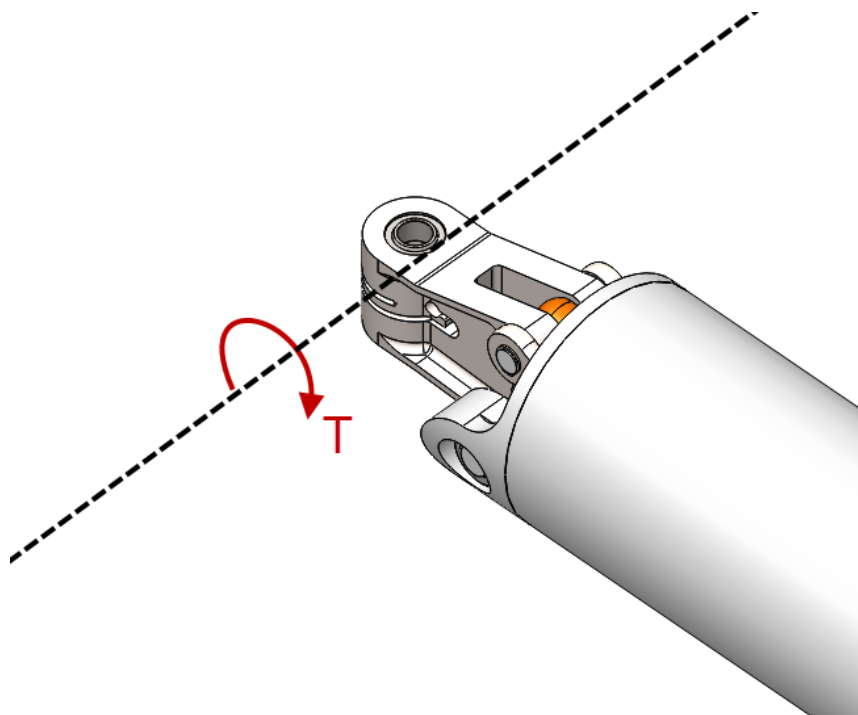
I forbindelse med dimensjonering av armens seksjoner er det regnet ut moment og last i armens to innerste leddforbindelser. For innfestingen blir de kreftene i armens første ledd relevante ettersom det er disse som må tas opp i innfestingen når armen er innført i sin helhet. Moment og krefter er listet i Tabell 35, Figur 103 og Figur 104 viser forklarende skisser av kraftkomponentene.

Bøyemoment (M)	3172Nm
Torsjonsmoment (T)	3172Nm
Vekt (F)	1030N

Tabell 35 – Moment og krefter i innfesting



**Figur 103 – Bøyemoment og Vekt**



**Figur 104 - Torsjonsmoment**

Det må også tas hensyn til at rørene ikke er dimensjonert for å ta opp bøyepenninger. Det må derfor konstrueres et system som ikke overbelaster rørene når armen bygges inn, eventuelt må rørene designes om for å takle en slik belastning. Det må også tas hensyn til kablene fra aktuatorene som vil rutes gjennom armen. Disse må på en hensiktsmessig måte kunne mates etter hvert som armen bygges inn i tanken. En komplett kravspesifikasjon for innfestningen finnes i Tabell 36.

Montering	Armen må kunne monteres i mannhull, gjerne med en fleksibel ordning. Tilgjengelig sone for innføring er inntil 1,5m fra mannhull	
Innføring	Gripemekanisme må konstrueres slik at armen kan bygges inn i tanken.	Må ta hensyn til at rørene i armen ikke er dimensjonert for å ta opp bøyespenninger. Eventuelt designe om disse for å tåle en slik belastning.
Kabelføring	Må kunne mate inn kabel etter hvert som armen bygges inn ledd for ledd.	Hurtigkoblinger for hvert ledd kan være en løsning.
ATEX godkjenning	ATEX Sone 1.	Sørge for at oksygen ikke slipper inn enten ved å tette eller å tilføre nitrogen i åpning.
Dimensjonerende laster fra armen		
Maks bøyemoment (M)	3172Nm	Verdier representerer belastning i innfesting når hele armen er inne i tanken.
Maks torsjonsmoment (T)	3172Nm	
Vekt (F)	1030N	

Tabell 36 – Kravspesifikasjon for innfesting

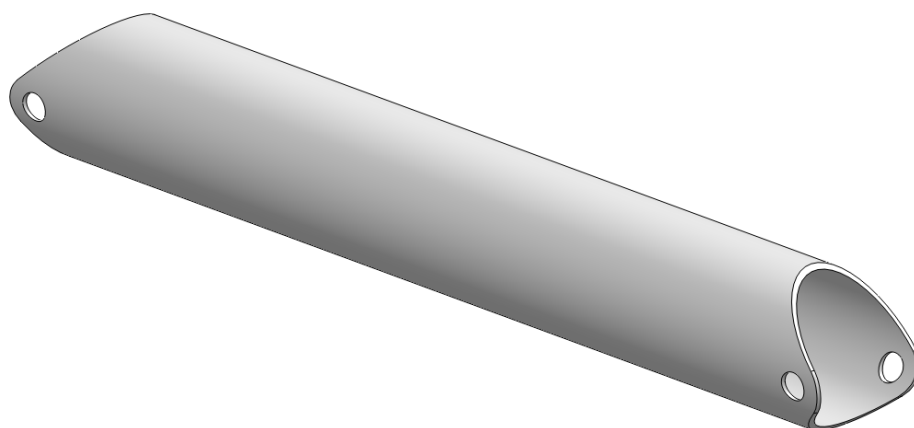
## 6 Prototyping

Det ble bestemt under oppstart av prosjektet at det skulle bygges en prototyp av armen. Dette var et ønske både fra LBO og studentene, primært for å demonstrere armens prinsipper og for å verifisere at disse prinsippene fungerer som tiltenkt. Skala og omfang ble imidlertid ikke fastsatt, men opp til studentene å bestemme underveis i prosjektet. Etterhvert oppstod et behov for å teste forskjellige prinsipper for yaw-aktuatorsystem og det var ønskelig å gjøre dette med fullskala komponenter, dog med reduserte krefter for å kunne benytte aktuatorer som er tilgjengelige på markedet. Det ble derfor besluttet å bygge en prototyp så nær fullskala som mulig med de materialer og produksjonsmetoder som er tilgjengelige på NTNU. I tillegg måtte den la seg produsere og bygge med tilgjengelige midler og den begrensede tiden som var til rådighet. Prototypen ble derfor begrenset til å kun inneholde to leddseksjoner. Man fikk dermed demonstrert prinsippene i armen, men med langt mindre belastning på komponentene. Dette gjorde igjen at man kunne benytte billigere materialer som aluminium i stedet for titan og man kan benytte standard bolter og enkle bøsninger i stedet for spesiallagde akslinger og dyre glidelager.

Reaksjonskrefter for armen med to seksjoner ble regnet ut og en modell med forenklet geometri i ledd og rørdel ble modellert opp i SolidWorks. Deretter ble arbeidstegninger av røret og leddene oversendt finmekanisk verksted på NTNU for produksjon. Bøsninger og bolter ble levert av Tingstad og Abra. Øvrige braketter og stag ble produsert opp studentene i samarbeid med ansatte på IPM verkstedet.

### Rør

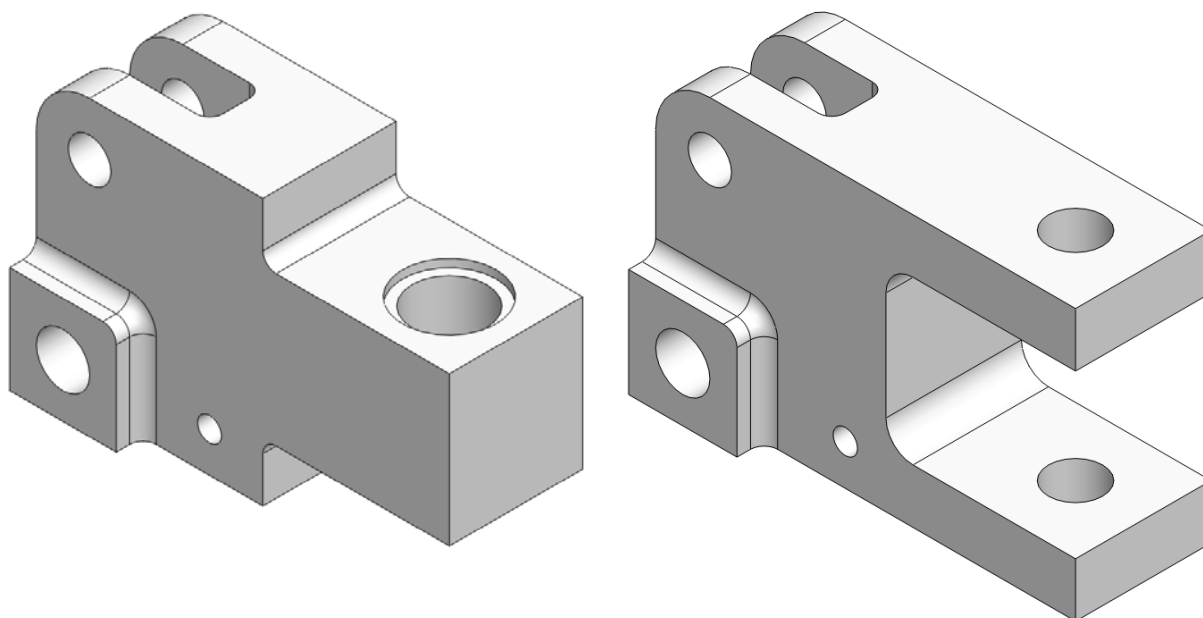
I og med at det ikke skal tas opp like store trykkrefter i røret og det ikke trenger å dimensjoneres for mange brukssykluser var det hensiktsmessig å fjerne endestykkene med sine lager fra designet slik at produksjon kunne gjøres hurtigere og billigere. Figur 105 viser modell av rørstykket som ble produsert.



**Figur 105 – Rørstykke til prototyp**

### **Ledd**

Ettersom leddene var dimensjonert for å bære kun to seksjoner kunne disse produseres i aluminium og med enklere geometri for å gjøre produksjonen raskere og billigere. Figur 106 viser modell av de to leddene som ble produsert for prototypen.



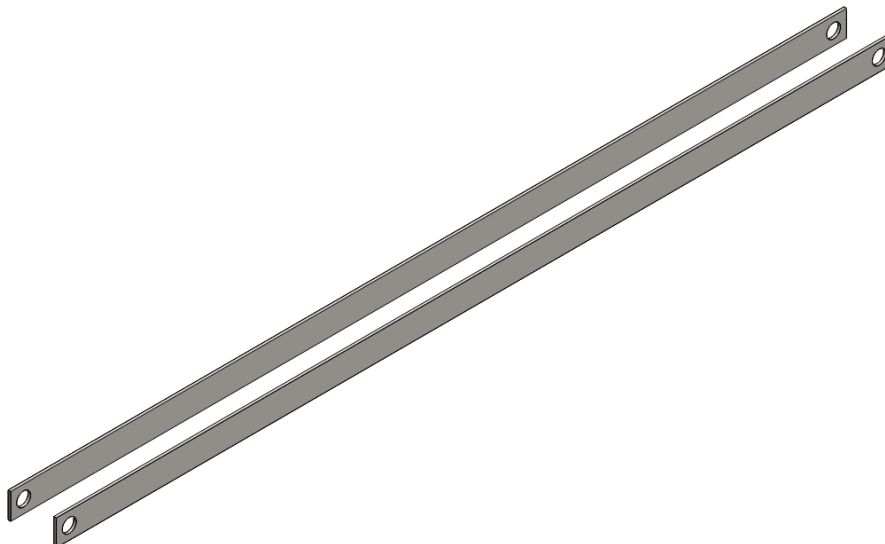
**Figur 106 – Ledd til prototyp**

## Stag

Opprinnelig ble det planlagt å få produsert opp strekkstag av stålvaier med øyetermineringer. Dessverre viste det seg at produsenten ikke fikk tid til å gjennomføre ordren innen tidsfristen. Denne komponenten var heldigvis ikke viktig i forhold til demonstrasjon av prinsippet, de kritiske faktorene er vekt og dimensjoner som passer inn i konstruksjonen. Det ble derfor besluttet å lage en forenklet versjon av tilskåret platematerial på IPM verkstedet. Figur 107 viser vaierstagene som var planlagt å inkludere i prototypen og Figur 108 viser stagene som ble brukt.



**Figur 107 – Vaierstag til prototyp**



**Figur 108 – Forenklete stag til prototyp**



## Aktuatorer

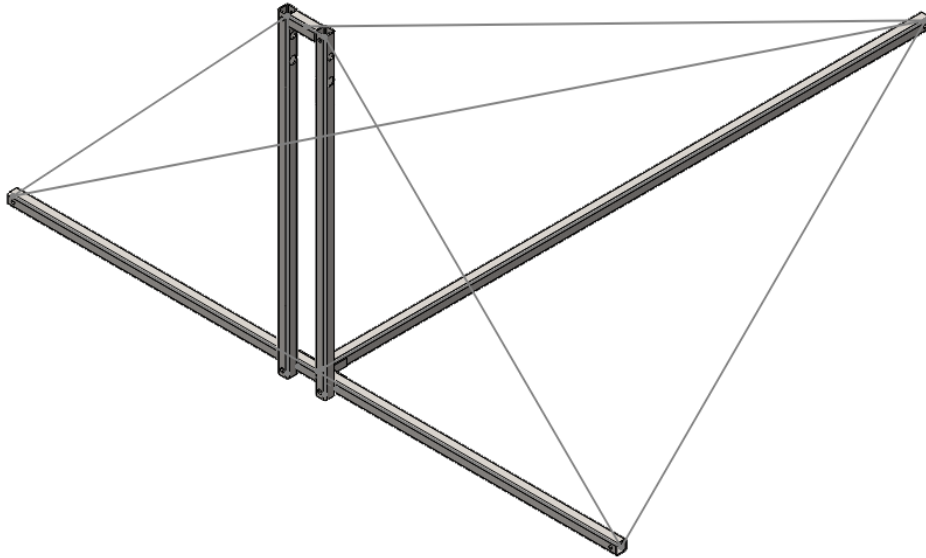
For å styre armen ble vurdert aktuatorer fra forskjellige leverandører. Alle alternativene tilfredsstillt kravet til last og dimensjonene passer inn i konstruksjonen. Det viktigste kriteriet ble derfor leveringstid. Den eneste produsenten som kunne levere innen fristen var danske Concens og aktuatorene deres ble derfor valgt og bestilt. Tabell 37 viser hvilke leverandører og modeller som ble vurdert.

Produsent	Pitch aktuatorer	Yaw aktuatorer
	Magdrive 	Cala 36A 
	Econom 01 	Junior 0E 
 - excellent electric actuators	Con35 	Con50 

Tabell 37 – Aktuatorer til prototyp

## Testrigg

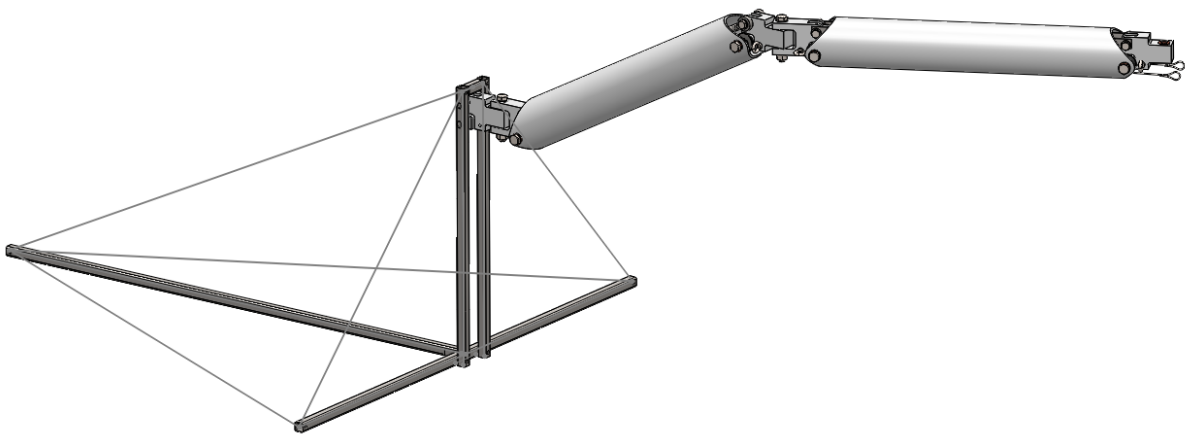
For å spenne opp armen ble det laget en rigg på IPM verkstedet. Denne består av tre separate seksjoner som boltes sammen for enklere transport. Seksjonene barduneres opp med vaiere mellom seg for å ta opp kreftene fra bøyemomentet i innfestingen. Figur 109 viser riggen med barduner tegnet inn.



Figur 109 – Testrigg med barduner

## Testing

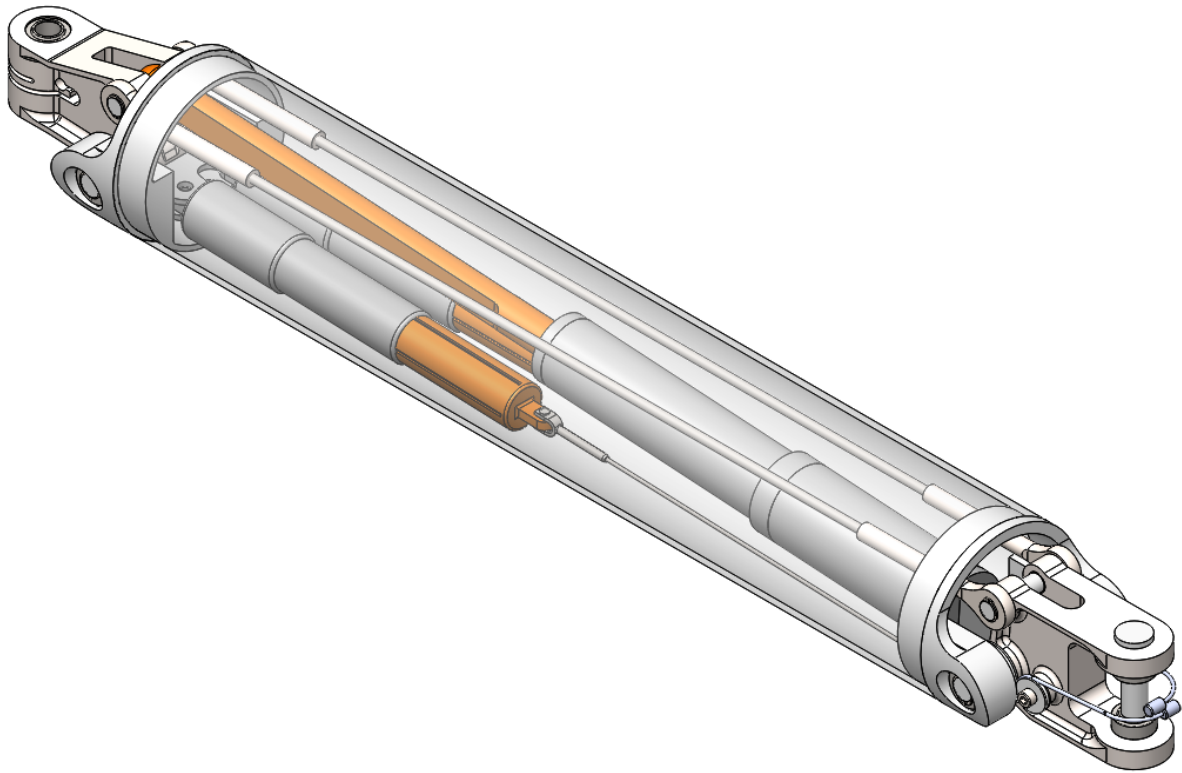
Bygging og testing av prototypen er dokumentert i vedlegg F. En modell av konstruksjonen er vist i Figur 110.



Figur 110 – Prototype modell

## 7 Resultat og videre arbeid

### 7.1 Resultat



**Figur 111 – Modell av ledd og seksjon**

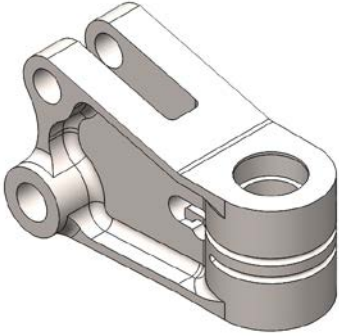
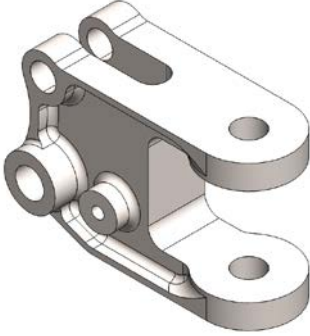
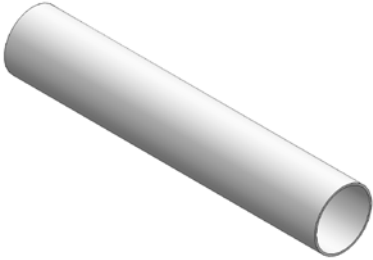
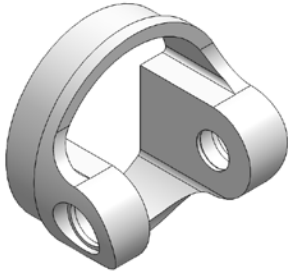

Målet med dette prosjektet har vært å utvikle ledd, seksjoner og kraftoverføring i inspeksjonsarmen med nødvendige styrkeberegninger og FEM analyser for å forsvare geometrien. Underveis har det vært viktig å forholde seg til de relevante punktene i kravspesifikasjonen gitt av LBO. Tabell 38 lister de relevante punktene fra kravspesifikasjonen og hvordan de er tatt høyde for under utviklingen. Utviklingsarbeidet har resultert i modellen som er vist Figur 111. Et sammendrag av designelementer i hver enkelt komponent er gitt i Tabell 39.



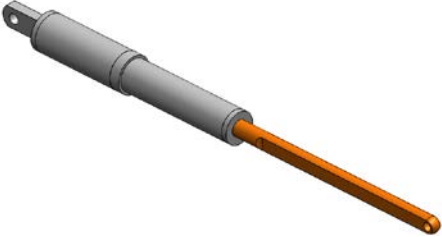
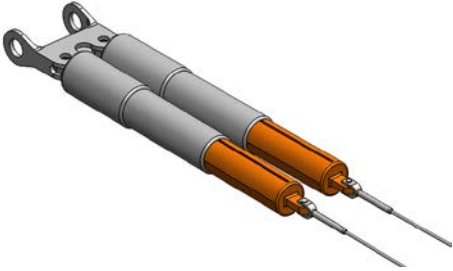
Det har også vært en målsetning å produsere en kravspesifikasjon for innfestingen, slik at denne kan utvikles internt hos LBO. Denne er beskrevet i kapittel 5. Etter ønske fra LBO er det også laget en animasjonsvideo som viser hvordan designet kan gjennomføre en inspeksjon av scrubber tanken.

I prosjektets omfang inngikk det også å lage arbeidstegninger for komponentene i armen. For leddene er det derimot ikke hensiktsmessig å produsere detaljerte tegninger, men heller å oversende STEP-filer med delenes geometri for CNC maskinering. Disse filene vil bli vedlagt digitalt mens tegninger med hovedmål finnes i vedlegg B. Standardkomponenter som er brukt er dokumentert i kapittel 3.8.

100N belastning på ende.	Tatt høyde for under utregning av moment og laster i armen.
Verktøy må kunne føres inntil 350 mm fra overflatene som skal inspiseres.	Tatt høyde for under utarbeiding av lasttilfeller.
Sikring av bolter og andre deler som ikke er en permanent del av konstruksjonen.	Tatt høyde for ved valg av festeanordninger for bolter.
Design temperatur: -10...40 °C.	Ingen spesielle begrensninger for materialer ved dette temperaturområdet er avdekt.
For aktuatorer:	
Mulighet for posisjonssensorer.	Se videre arbeid
230VAC og 440VAC tilgjengelig spenning.	
Design temperatur: -10...40 °C.	

**Tabell 38 – Innfrielse av kravspesifikasjon**

	<p>Yaw-ledd:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Forbinder strekkstag, rørseksjon og motstående pitch-ledd.</li> <li>• Inneholder festepunkter og trinsespor for vaier.</li> <li>• Inneholder lager for vertikalbolt.</li> <li>• Topologi-optimalisert for å spare vekt.</li> <li>• Produseres i grade 5 titan for optimalisert styrke/vekt forhold. Se vedlegg D for materialdata.</li> </ul>
	<p>Pitch-ledd:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Forbinder strekkstag, rørseksjon og motstående yaw-ledd.</li> <li>• Inneholder festepunkter for vaiertinns.</li> <li>• Topologi-optimalisert for å spare vekt.</li> <li>• Produseres i grade 5 titan for optimalisert styrke/vekt forhold. Se vedlegg D for materialdata.</li> </ul>
	<p>Rørstykke:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tar opp trykkkomponenten fra bøyemomentet i armen samt torsjonsmomentet ved utslag i horisontalplanet.</li> <li>• Optimalisert med tanke på rørtykkelse for å spare vekt.</li> <li>• Produseres i 6082-T6 aluminium for å spare vekt.</li> </ul>
	<p>Endestykker:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Overfører trykkrefter og torsjonsmoment mellom ledd og rørstykke.</li> <li>• Huser glidelager for bolteforbindelsen mellom endestykke og ledd.</li> <li>• Produseres i 6082-T6 aluminium for å spare vekt.</li> </ul>
	<p>Strekkstag:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Overfører strekkkomponenten fra bøyemomentet i armen.</li> <li>• Vaier med øyeterminering er benyttet for best styrke/vekt forhold.</li> </ul>

	<p><b>Bolter:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Forbinder ledd med rørseksjon og strekkstag.</li> <li>• Holdes på plass med låseringer ettersom ingen aksielle laster er forventet.</li> <li>• Produseres i spesialstålet Orvar Supreme fra Uddeholm for nødvendig styrke.</li> </ul>
	<p><b>Lager</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sørger for lav friksjon ved rotasjon av bolter mellom ledd og endestykker.</li> <li>• Reduserer belastning på aktuatorer, samt forhindrer varmeutvikling og skade på materiale i ledd og endestykker.</li> <li>• Valgt fra SKF sitt sortiment av sfæriske glidelager</li> </ul>
	<p><b>Pitch-aktuator</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sørger for pitch-bevegelse i inspeksjonsarmen og holder armen i posisjon.</li> <li>• Ikke utviklet i denne oppgaven, se videre arbeid</li> </ul>
	<p><b>Yaw-aktuatorer</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sørger for yaw-bevegelse i inspeksjonsarmen og holder armen i posisjon.</li> <li>• Ikke utviklet i denne oppgaven, se videre arbeid</li> </ul>

Tabell 39 – Komponenter i seksjon

## **7.2 Videre arbeid**

### **Aktuatorer**

Som beskrevet i kapittel 3 har det ikke lyktes å finne aktuatorer på markedet som tilfredsstiller kravspesifikasjonen. Det vil derfor være nødvendig å utvikle disse internt. Det er denne rapportens anbefaling å gjøre dette i samarbeid med en etablert leverandør for å dra nytte av deres kompetanse. En liste med aktuelle leverandører finnes i kapittel 3. Designet i denne rapporten baserer seg på et eksisterende produkt som er utviklet for ITER reaktoren i Frankrike, så det finnes dermed et eksempel på at det er mulig å lage disse aktuatorene. Parker har også nylig fått sine ETH ATEX aktuatorer sertifisert for utstyrsguppe II, kategori 2 i eksplosive gassmiljøer, noe som bør tjene som inspirasjon for satsing på en elektromekanisk løsning.

### **Vekt**

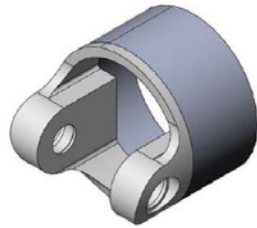
Slik som designet står nå, med en estimert vekt totalvekt av aktuatorer på 10kg, veier seksjonen i underkant av 25 kg. Det er 5kg mer enn hva som er lagt til grunn for lasttilfellene. Det må derfor enten gjøres ytterligere slanking av komponentene i armen, utvikles veldig lette aktuatorer, eller forsøke å dimensjonere opp armen for å tåle vekten uten å legge til enda mer vekt. Sannsynligvis bør man se på en kombinasjon av disse løsningene.

## 8 Litteraturliste

1. Hildre, H.P., Produktutvikling, in TMM 4150 PuMa 7. 2004, NTNU: IPM.
2. Yann, P., et al., Long-reach articulated robots for inspection and mini-invasive interventions in hazardous environments: Recent robotics research, qualification testing, and tool developments. *Journal of Field Robotics*, 2012. 29(1): p. 175-185.



## **Vedlegg A    FEM analyser**



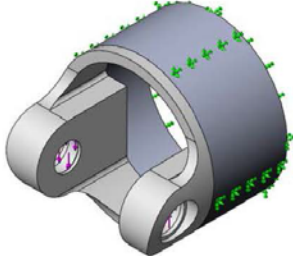

## Simulation of NTNU2014\_rev06\_end estykke\_assem

**Date:** 7. juni 2014  
**Designer:** Solidworks  
**Study name:** torsjon mesh 6  
**Analysis type:** Static

### Table of Contents

Model Information .....	2
Study Properties .....	2
Units .....	3
Material Properties .....	4
Loads and Fixtures.....	4
Contact Information.....	6
Mesh Information .....	6
Resultant Forces .....	7
Study Results .....	8

## Model Information

			
<b>Model name:</b> NTNU2014_rev06_endestykke_assem <b>Current Configuration:</b> Default			
Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Fillet4 	Solid Body	Mass: 0.991389 kg Volume: 0.000367181 m <sup>3</sup> Density: 2700 kg/m <sup>3</sup> Weight: 9.71561 N	C:\Users\paisu\Dropbox\M asteroppgave2014\Design \Rev02\NTNU2014_rev07 _endestykke.SLDPRT Jun 07 13:21:07 2014

## Study Properties

<b>Study name</b>	torsjon mesh 6
<b>Analysis type</b>	Static
<b>Mesh type</b>	Mixed Mesh
<b>Thermal Effect:</b>	On
<b>Thermal option</b>	Include temperature loads
<b>Zero strain temperature</b>	298 Kelvin
<b>Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation</b>	Off
<b>Solver type</b>	FFEPlus
<b>Inplane Effect:</b>	Off



SOLIDWORKS

Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of NTNU2014\_rev06\_endestykke\_assem

2

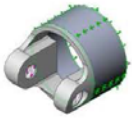

<b>Soft Spring:</b>	Off
<b>Inertial Relief:</b>	Off
<b>Incompatible bonding options</b>	Automatic
<b>Large displacement</b>	Off
<b>Compute free body forces</b>	On
<b>Friction</b>	Off
<b>Use Adaptive Method:</b>	Off
<b>Result folder</b>	SolidWorks document (C:\Users\paisu\Desktop\NX analyser\Endestykke\Endestykke - originaldel)

### Units

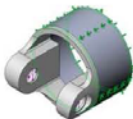
<b>Unit system:</b>	SI (MKS)
<b>Length/Displacement</b>	mm
<b>Temperature</b>	Kelvin
<b>Angular velocity</b>	Rad/sec
<b>Pressure/Stress</b>	N/m <sup>2</sup>



## Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<b>Name:</b> Alloy Steel <b>Model type:</b> Linear Elastic Isotropic <b>Default failure criterion:</b> Max von Mises Stress <b>Yield strength:</b> 6.20422e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Tensile strength:</b> 7.23826e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Elastic modulus:</b> 2.1e+011 N/m <sup>2</sup> <b>Poisson's ratio:</b> 0.28 <b>Mass density:</b> 7700 kg/m <sup>3</sup> <b>Shear modulus:</b> 7.9e+010 N/m <sup>2</sup> <b>Thermal expansion coefficient:</b>	SolidBody 1(Boss-Extrude1)(NTNU2014_rev06_endestykke_ring_testassem-1)
Curve Data:N/A		
	<b>Name:</b> EN-AW 6082-T6 <b>Model type:</b> Linear Elastic Isotropic <b>Default failure criterion:</b> Unknown <b>Yield strength:</b> 2.55e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Tensile strength:</b> 3e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Elastic modulus:</b> 7e+010 N/m <sup>2</sup> <b>Poisson's ratio:</b> 0.3 <b>Mass density:</b> 2700 kg/m <sup>3</sup> <b>Shear modulus:</b> 2.7e+010 N/m <sup>2</sup> <b>Thermal expansion coefficient:</b>	SolidBody 1(Fillet4)(NTNU2014_rev07_endestykke-1)
Curve Data:N/A		

## Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fixed-1		<b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Type:</b> Fixed Geometry		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	3066.5	321.338	2700.6	4098.77
Reaction Moment(N. m)	0	0	0	1e-033

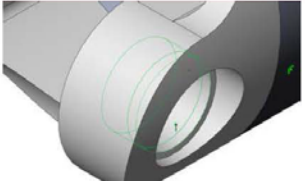
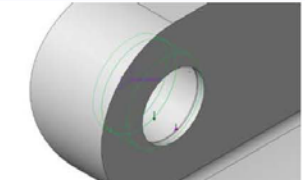


SOLIDWORKS

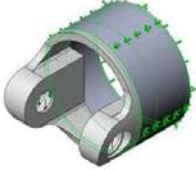
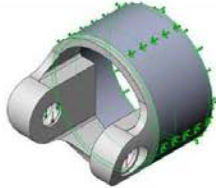
Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of NTNU2014\_rev06\_endestykke\_assem

4

Load name	Load Image	Load Details
BearingLoads-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System1 <b>Force Values:</b> 0 18765 0 N
BearingLoads-2		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System1 <b>Force Values:</b> 0 -18765 0 N

## Contact Information

Contact	Contact Image	Contact Properties
Contact Set-7		<b>Type:</b> Bonded contact pair <b>Entites:</b> 2 face(s)
Contact Set-8		<b>Type:</b> Bonded contact pair <b>Entites:</b> 2 face(s)

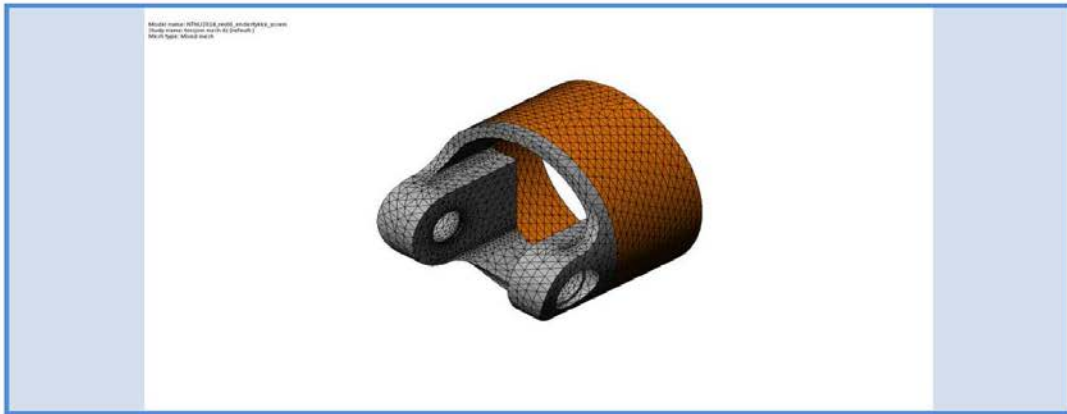
## Mesh Information

Mesh type	Mixed Mesh
Mesher Used:	Curvature based mesh
Jacobian points	4 Points
Jacobian check for shell	On
Maximum element size	7.79475 mm
Minimum element size	2.59823 mm
Mesh Quality	High
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off

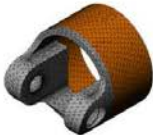
## Mesh Information - Details

Total Nodes	65140
Total Elements	39053
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:03
Computer name:	LBO-PASU





#### Mesh Control Information:

Mesh Control Name	Mesh Control Image	Mesh Control Details
Control-1		<b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Units:</b> mm <b>Size:</b> 6 <b>Ratio:</b> 1.5

#### Resultant Forces

##### Reaction Forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	0.00618211	-0.00158789	0.00482403	0.00800069

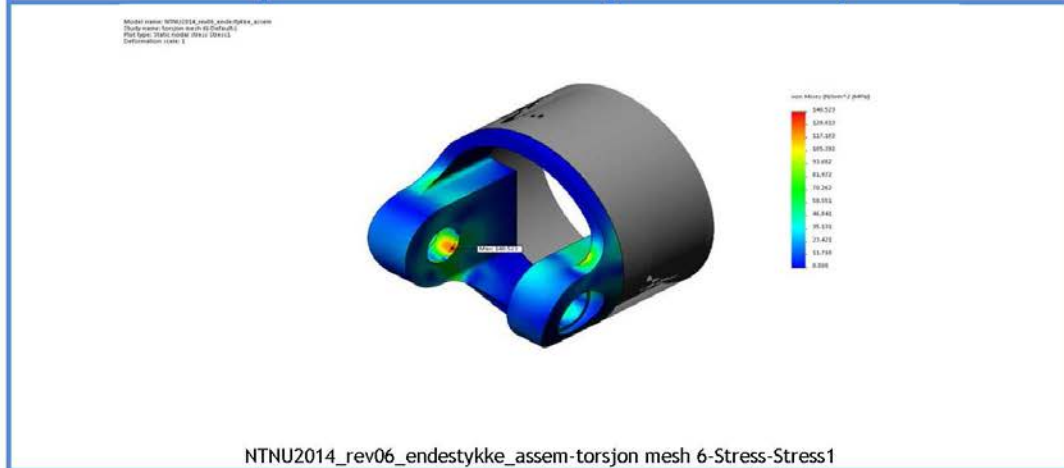
##### Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	1e-033

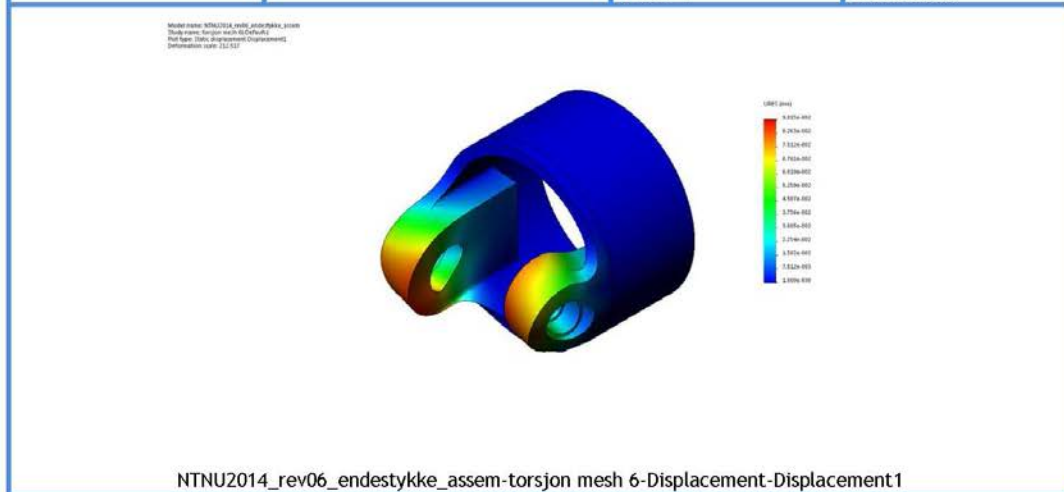


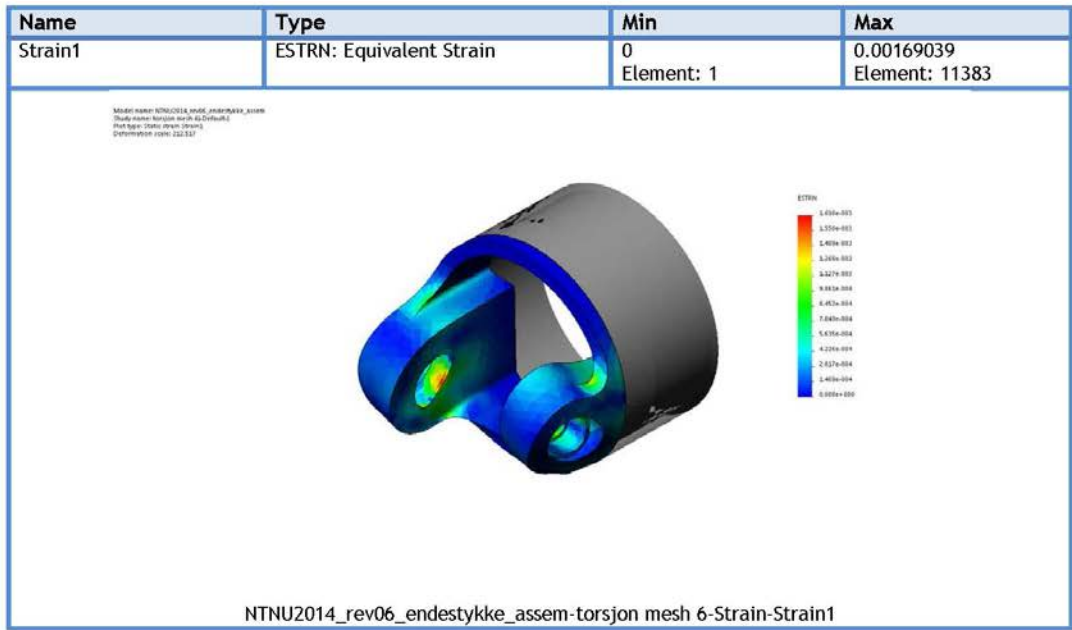
## Study Results

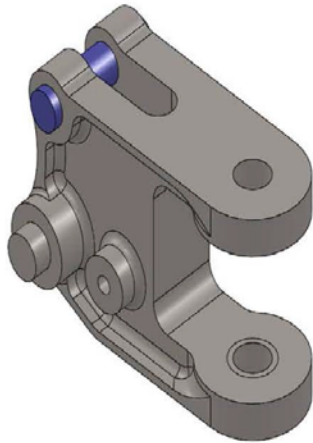
Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	0 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Node: 1	140.523 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Node: 30446



Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 1	0.0901471 mm Node: 8340







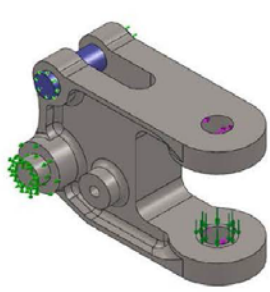

## Simulation of Pitch ledd - endelige krefter - 0,45,-45

**Date:** 13. juni 2014  
**Designer:** Solidworks  
**Study name:** 45 grader - torsjon  
**Analysis type:** Static

### Table of Contents

Model Information .....	2
Study Properties .....	2
Units .....	3
Material Properties .....	3
Loads and Fixtures.....	4
Contact Information.....	5
Mesh Information .....	6
Resultant Forces .....	7
Study Results .....	8

## Model Information

			
<b>Model name:</b> Pitch ledd - endelige krefter - 0,45,-45 <b>Current Configuration:</b> Default			
Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Cut-Extrude21 	Solid Body	Mass: 1.65658 kg Volume: 0.000350228 m <sup>3</sup> Density: 4730 kg/m <sup>3</sup> Weight: 16.2345 N	C:\Users\paisu\Desktop\NX analyser\Pitch ledd\Pitch ledd - endelig krefter\Pitch ledd - endelige design 0,45,-45\NTNU2014_rev08_pitch_ledd.SLDPRT Jun 08 16:07:01 2014

## Study Properties

<b>Study name</b>	45 grader - torsjon
<b>Analysis type</b>	Static
<b>Mesh type</b>	Mixed Mesh
<b>Thermal Effect:</b>	On
<b>Thermal option</b>	Include temperature loads
<b>Zero strain temperature</b>	298 Kelvin
<b>Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation</b>	Off
<b>Solver type</b>	FFEPlus
<b>Inplane Effect:</b>	Off



SOLIDWORKS

Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of Pitch ledd - endelige krefter - 0,45,-45


2

<b>Soft Spring:</b>	Off
<b>Inertial Relief:</b>	Off
<b>Incompatible bonding options</b>	Automatic
<b>Large displacement</b>	Off
<b>Compute free body forces</b>	On
<b>Friction</b>	Off
<b>Use Adaptive Method:</b>	Off
<b>Result folder</b>	SolidWorks document (C:\Users\paisu\Desktop\NX analyser\Pitch ledd\Pitch ledd - endelig krefter\Pitch ledd - endelige krefter - 0,45,-45)

## Units

<b>Unit system:</b>	SI (MKS)
<b>Length/Displacement</b>	mm
<b>Temperature</b>	Kelvin
<b>Angular velocity</b>	Rad/sec
<b>Pressure/Stress</b>	N/m <sup>2</sup>

## Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<b>Name:</b> Titanium Ti-8Mn, Annealed <b>Model type:</b> Linear Elastic Isotropic <b>Default failure criterion:</b> Max von Mises Stress <b>Yield strength:</b> 8.1e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Tensile strength:</b> 9e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Compressive strength:</b> 8.75e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Elastic modulus:</b> 1.15e+011 N/m <sup>2</sup> <b>Poisson's ratio:</b> 0.33 <b>Mass density:</b> 4730 kg/m <sup>3</sup> <b>Shear modulus:</b> 4.9e+010 N/m <sup>2</sup> <b>Thermal expansion coefficient:</b> 8.6e-006 /Kelvin	SolidBody 1(Cut-Extrude21)(NTNU2014_rev08_pitch_ledd-1), SolidBody 1(Boss-Extrude1)(Pin - nede-1), SolidBody 1(Boss-Extrude1)(Pin - oppe-1)
Curve Data:N/A		



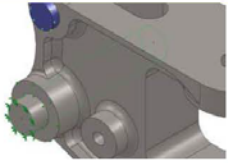
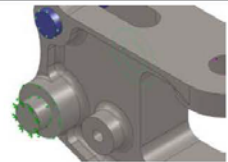
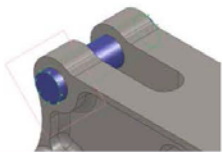
SOLIDWORKS

Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of Pitch ledd - endelige krefter - 0,45,-45

3

## Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fixed-1		<b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Type:</b> Fixed Geometry		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	0	0	0	1e-033
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	1e-033
Roller/Slider-1		<b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Type:</b> Roller/Slider		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	-0.000456618	-0.000710479	3.2903	3.2903
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	1e-033
Reference Geometry-1		<b>Entities:</b> 2 face(s), 1 plane(s) <b>Reference:</b> positiv 45 grader <b>Type:</b> Use reference geometry <b>Translation:</b> ---, ---, 0 <b>Rotation:</b> ---, ---, --- <b>Units:</b> mm, rad		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	0	0	0	1e-033
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	1e-033

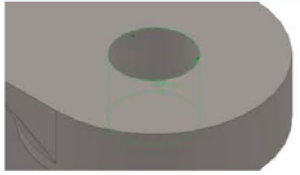
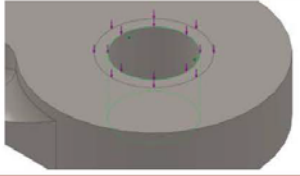
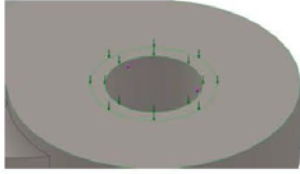


SOLIDWORKS

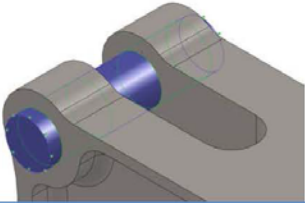
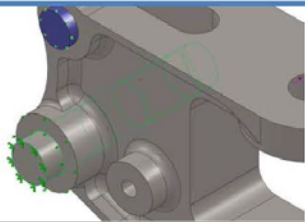
Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of Pitch ledd - endelige krefter - 0,45,-45

4

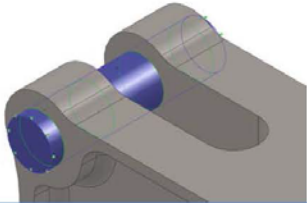
Load name	Load Image	Load Details
BearingLoads-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System1 <b>Force Values:</b> 0 24506 0 N
BearingLoads-2		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System1 <b>Force Values:</b> 0 -24506 0 N
Force-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Type:</b> Apply normal force <b>Value:</b> 834 N <b>Phase Angle:</b> 0 <b>Units:</b> deg

### Contact Information

Contact	Contact Image	Contact Properties		
Contact Set-9		<b>Type:</b> No Penetration contact pair <b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Advanced:</b> Node to surface		
<b>Contact/Friction forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Contact Force(N)	14002	16902	0.029007	21948
Contact Set-10		<b>Type:</b> No Penetration contact pair <b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Advanced:</b> Node to surface		

Contact/Friction forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Contact Force(N)	-13936	29660	1.0086	32770

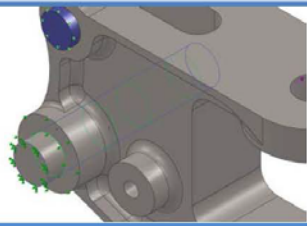
  

Contact Set-11		<b>Type:</b> No Penetration contact pair <b>Entites:</b> 2 face(s) <b>Advanced:</b> Node to surface
----------------	---	---

Contact/Friction forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Contact Force(N)	-12255	-15154	-0.042602	19490

Contact Set-12		<b>Type:</b> No Penetration contact pair <b>Entites:</b> 2 face(s) <b>Advanced:</b> Node to surface
----------------	---	---

Contact/Friction forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Contact Force(N)	12188	-32224	2.2953	34452


## Mesh Information

Mesh type	Mixed Mesh
Mesher Used:	Curvature based mesh
Jacobian points	4 Points
Jacobian check for shell	On
Maximum element size	10 mm
Minimum element size	2 mm
Mesh Quality	High
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off

## Mesh Information - Details





<b>Total Nodes</b>	62816
<b>Total Elements</b>	39127
<b>Time to complete mesh(hh:mm:ss):</b>	00:00:08
<b>Computer name:</b>	LBO-PASU
	

## Resultant Forces

### Reaction Forces

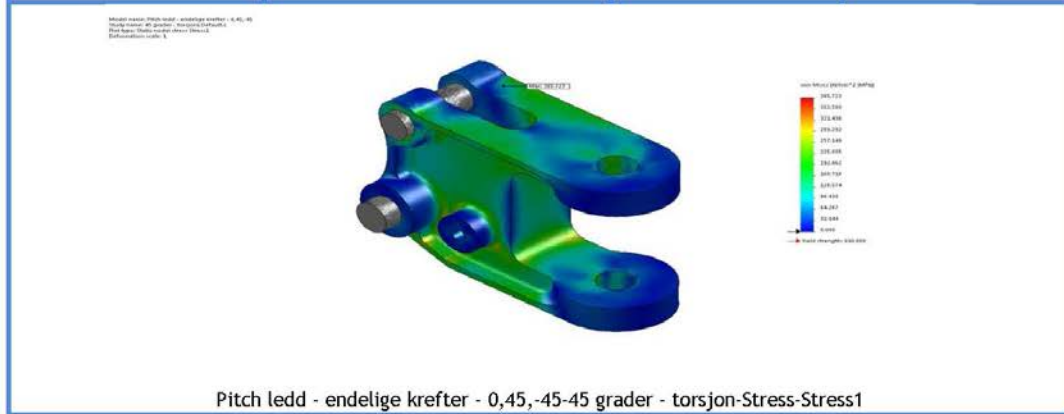
Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	1747.24	2563.95	-0.0135716	3102.69

### Reaction Moments

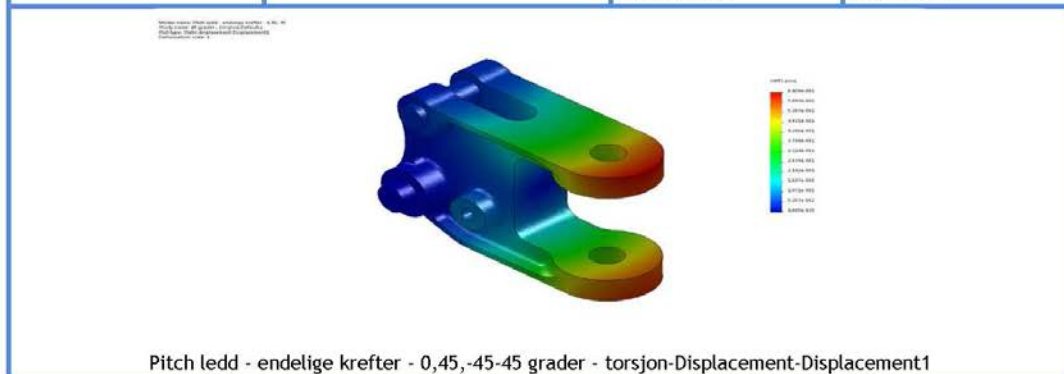
Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	1e-033

## Study Results

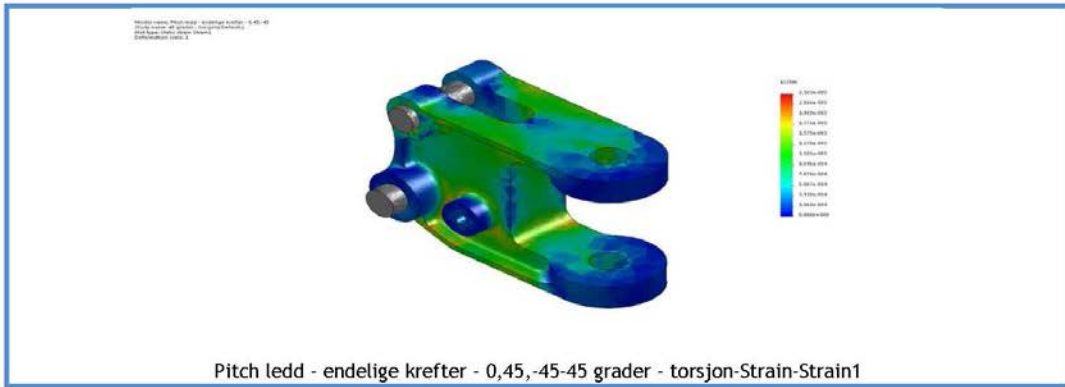
Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	0 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Node: 61177	385.723 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Node: 937



Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 61177	0.642836 mm Node: 9836



Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	0 Element: 38310	0.00236284 Element: 22322





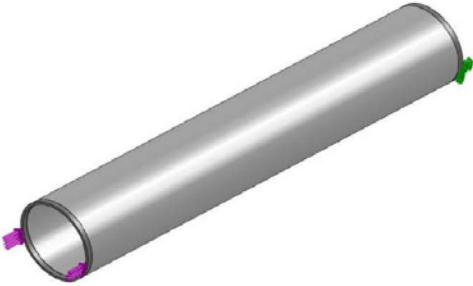

## Simulation of NTNU2014\_rev05\_hyls e\_test\_assembly

**Date:** 6. juni 2014  
**Designer:** Solidworks  
**Study name:** Trykklast 6mm mesh  
**Analysis type:** Static

### Table of Contents

Model Information .....	2
Study Properties .....	2
Units .....	3
Material Properties .....	3
Loads and Fixtures.....	4
Contact Information.....	5
Mesh Information .....	5
Resultant Forces .....	6
Study Results .....	7

## Model Information

 <p><b>Model name:</b> NTNU2014_rev05_hylse_test_assembly <b>Current Configuration:</b> Default</p>			
Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Boss-Extrude1 	Solid Body	Mass: 5.71919 kg Volume: 0.00211822 m <sup>3</sup> Density: 2700 kg/m <sup>3</sup> Weight: 56.0481 N	C:\Users\paisu\Desktop\N X analyser\Rørstykke\Rørsty kke assem - endelig analyse\NTNU2014_rev05 _hylse_test.SLDPRT Jun 05 13:37:17 2014

## Study Properties

<b>Study name</b>	Trykklast 6mm mesh
<b>Analysis type</b>	Static
<b>Mesh type</b>	Mixed Mesh
<b>Thermal Effect:</b>	On
<b>Thermal option</b>	Include temperature loads
<b>Zero strain temperature</b>	298 Kelvin
<b>Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation</b>	Off
<b>Solver type</b>	FFEPlus
<b>Inplane Effect:</b>	Off
<b>Soft Spring:</b>	Off



SOLIDWORKS

Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of NTNU2014\_rev05\_hylse\_test\_assembly

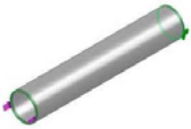
2


<b>Inertial Relief:</b>	Off
<b>Incompatible bonding options</b>	Automatic
<b>Large displacement</b>	Off
<b>Compute free body forces</b>	On
<b>Friction</b>	Off
<b>Use Adaptive Method:</b>	Off
<b>Result folder</b>	SolidWorks document (C:\Users\paisu\Desktop\NX analyser\Rørstykke\Rørstykke assem - endelig analyse)

## Units


<b>Unit system:</b>	SI (MKS)
<b>Length/Displacement</b>	mm
<b>Temperature</b>	Kelvin
<b>Angular velocity</b>	Rad/sec
<b>Pressure/Stress</b>	N/m <sup>2</sup>

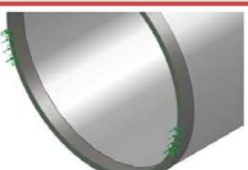
## Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<b>Name:</b> S355J0 / EN10025 <b>Model type:</b> Linear Elastic Isotropic <b>Default failure criterion:</b> Unknown <b>Yield strength:</b> 3.35e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Tensile strength:</b> 4.5e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Elastic modulus:</b> 2.1e+011 N/m <sup>2</sup> <b>Poisson's ratio:</b> 0.3 <b>Mass density:</b> 7850 kg/m <sup>3</sup> <b>Shear modulus:</b> 8.1e+010 N/m <sup>2</sup> <b>Thermal expansion coefficient:</b> 1.2e-005 /Kelvin	SolidBody 1(Split Line1)(NTNU2014_rev05_end estykke_test-2), SolidBody 1(Split Line1)(NTNU2014_rev05_end estykke_test-3)
Curve Data:N/A		

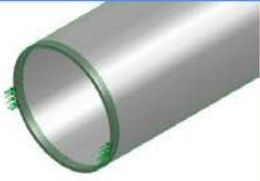

	<b>Name:</b> EN-AW 6082-T6 <b>Model type:</b> Linear Elastic Isotropic <b>Default failure criterion:</b> Unknown <b>Yield strength:</b> 2.55e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Tensile strength:</b> 3e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Elastic modulus:</b> 7e+010 N/m <sup>2</sup> <b>Poisson's ratio:</b> 0.3 <b>Mass density:</b> 2700 kg/m <sup>3</sup> <b>Shear modulus:</b> 2.7e+010 N/m <sup>2</sup> <b>Thermal expansion coefficient:</b> 2.3e-005 /Kelvin	SolidBody 1(Boss-Extrude1)(NTNU2014_rev05_hylse_test-1)
	Curve Data:N/A	

### Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fixed-1		<b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Type:</b> Fixed Geometry		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	0	0	0	1e-033
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	1e-033

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		<b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Type:</b> Apply normal force <b>Value:</b> 65950 N <b>Phase Angle:</b> 0 <b>Units:</b> deg

## Contact Information

Contact	Contact Image	Contact Properties
Contact Set-2		<b>Type:</b> Bonded contact pair <b>Entites:</b> 2 face(s)
Contact Set-4		<b>Type:</b> Bonded contact pair <b>Entites:</b> 2 face(s)

## Mesh Information

<b>Mesh type</b>	Mixed Mesh
<b>Mesher Used:</b>	Curvature based mesh
<b>Jacobian points</b>	4 Points
<b>Jacobian check for shell</b>	On
<b>Maximum element size</b>	19.8817 mm
<b>Minimum element size</b>	19.8817 mm
<b>Mesh Quality</b>	High
<b>Remesh failed parts with incompatible mesh</b>	Off

## Mesh Information - Details

<b>Total Nodes</b>	152289
<b>Total Elements</b>	77824
<b>Time to complete mesh(hh:mm:ss):</b>	00:01:31
<b>Computer name:</b>	LBO-PASU



SOLIDWORKS

Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of NTNU2014\_rev05\_hylse\_test\_assembly

5





## Resultant Forces

### Reaction Forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	-0.039362	-96.2795	65861.9	65862

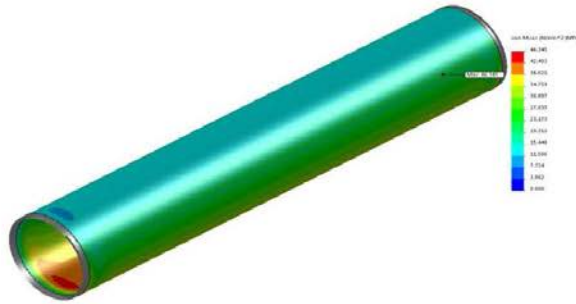
### Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	1e-033

## Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	0 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Node: 148322	46.3452 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Node: 30

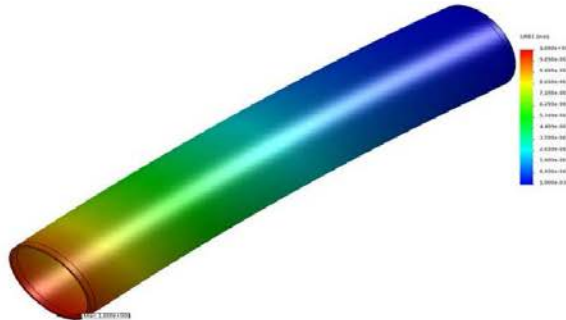
Model name: NTNU2014\_rev05\_hylse\_test\_assembly  
 Study name: NTNU2014\_rev05\_hylse\_test\_assembly\_1  
 Plot type: Stress (von Mises Stress)  
 Enhancement: none



NTNU2014\_rev05\_hylse\_test\_assembly-Trykklast 6mm mesh-Stress-Stress1

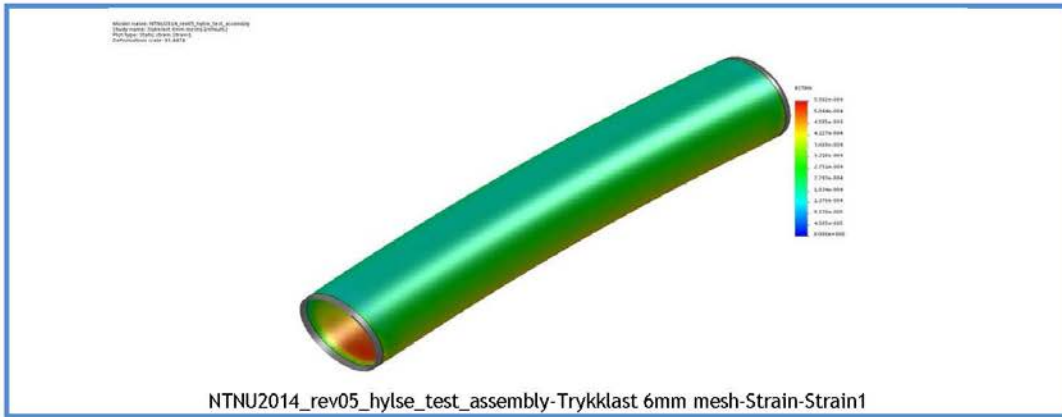
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 148322	1.07975 mm Node: 150657

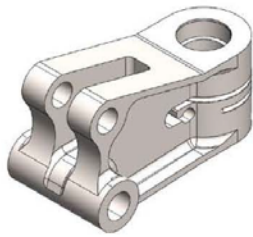
Model name: NTNU2014\_rev05\_hylse\_test\_assembly  
 Study name: NTNU2014\_rev05\_hylse\_test\_assembly\_1  
 Plot type: Displacement (Resultant Displacement)  
 Enhancement: none



NTNU2014\_rev05\_hylse\_test\_assembly-Trykklast 6mm mesh-Displacement-Displacement1

Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	0 Element: 75841	0.000550226 Element: 21010





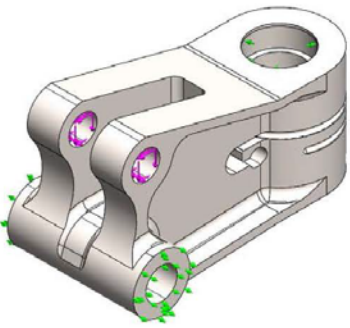

## Simulation of NTNU2014\_rev07\_yaw \_ledd

**Date:** 13. juni 2014  
**Designer:** Solidworks  
**Study name:** Pitch 0 grader  
**Analysis type:** Static

### Table of Contents

Model Information .....	2
Study Properties .....	2
Material Properties .....	3
Loads and Fixtures.....	4
Mesh Information .....	5
Resultant Forces .....	6
Study Results .....	6

## Model Information

			
<p>Model name: NTNU2014_rev07_yaw_ledd Current Configuration: Default</p>			
Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Cut-Revolve5 	Solid Body	Mass: 1.81849 kg Volume: 0.00038446 m <sup>3</sup> Density: 4730 kg/m <sup>3</sup> Weight: 17.8212 N	C:\Users\paisu\Desktop\NX analyser\Yaw ledd\Yaw ledd - endelig krefter og design\NTNU2014_rev07_yaw_ledd.SLDPRT Jun 08 17:40:36 2014

## Study Properties

Study name	Pitch 0 grader
Analysis type	Static
Mesh type	Solid Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation	Off



SOLIDWORKS

Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of NTNU2014\_rev07\_yaw\_ledd

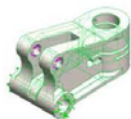
2

<b>Solver type</b>	FFEPlus
<b>Inplane Effect:</b>	Off
<b>Soft Spring:</b>	Off
<b>Inertial Relief:</b>	Off
<b>Incompatible bonding options</b>	Automatic
<b>Large displacement</b>	Off
<b>Compute free body forces</b>	Off
<b>Friction</b>	Off
<b>Use Adaptive Method:</b>	h-Adaptive
<b>Result folder</b>	SolidWorks document (C:\Users\paisu\Desktop\NX analyser\Yaw ledd\Yaw ledd - endelig krefter og design)

#### h-Adaptive Options

<b>Target accuracy</b>	95 %
<b>Accuracy bias</b>	50
<b>Maximum no. of loops</b>	5
<b>Mesh coarsening</b>	Off

#### Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<b>Name:</b> Titanium Ti-8Mn, Annealed <b>Model type:</b> Linear Elastic Isotropic <b>Default failure criterion:</b> Max von Mises Stress <b>Yield strength:</b> 8.1e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Tensile strength:</b> 9e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Compressive strength:</b> 8.75e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Elastic modulus:</b> 1.15e+011 N/m <sup>2</sup> <b>Poisson's ratio:</b> 0.33 <b>Mass density:</b> 4730 kg/m <sup>3</sup> <b>Shear modulus:</b> 4.9e+010 N/m <sup>2</sup> <b>Thermal expansion coefficient:</b> 8.6e-006 /Kelvin	SolidBody 1(Cut-Revolve5)(NTNU2014_rev07_yaw_ledd)
Curve Data:N/A		



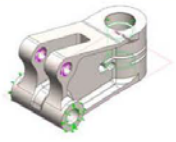
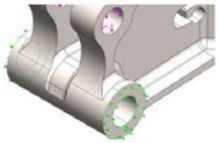
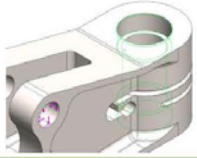
SOLIDWORKS

Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of NTNU2014\_rev07\_yaw\_ledd

3

## Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Reference Geometry-1		<b>Entities:</b> 1 face(s), 1 plane(s) <b>Reference:</b> Top Plane <b>Type:</b> Use reference geometry <b>Translation:</b> ---, ---, 0 <b>Units:</b> mm		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	77.0173	930.918	5009.21	5095.56
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0
Roller/Slider-1		<b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Type:</b> Roller/Slider		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	2.37212	3.9485	-1.45812	4.83154
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0
On Cylindrical Faces-2		<b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Type:</b> On Cylindrical Faces <b>Translation:</b> 0, ---, --- <b>Units:</b> mm		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	-7.49216	-538.039	-2.57199	538.098
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0

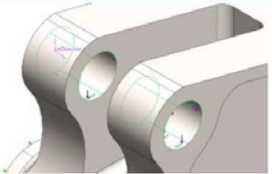
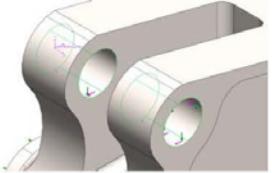
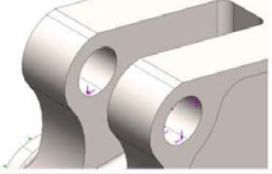
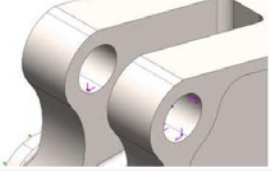


SOLIDWORKS

Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of NTNU2014\_rev07\_yaw\_ledd

4

Load name	Load Image	Load Details
A0x		<b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System2 <b>Force Values:</b> -50870 0 0 N
A0y		<b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System2 <b>Force Values:</b> 0 -981 0 N
B0x		<b>Coordinate System:</b> Coordinate System3 <b>Force Values:</b> 50870 0 0 N
B0y		<b>Coordinate System:</b> Coordinate System3 <b>Force Values:</b> 0 49 0 N

### Mesh Information

<b>Mesh type</b>	Solid Mesh
<b>Mesher Used:</b>	Curvature based mesh
<b>Jacobian points</b>	4 Points
<b>Maximum element size</b>	10 mm
<b>Minimum element size</b>	2 mm
<b>Mesh Quality</b>	High



## Resultant Forces

### Reaction Forces

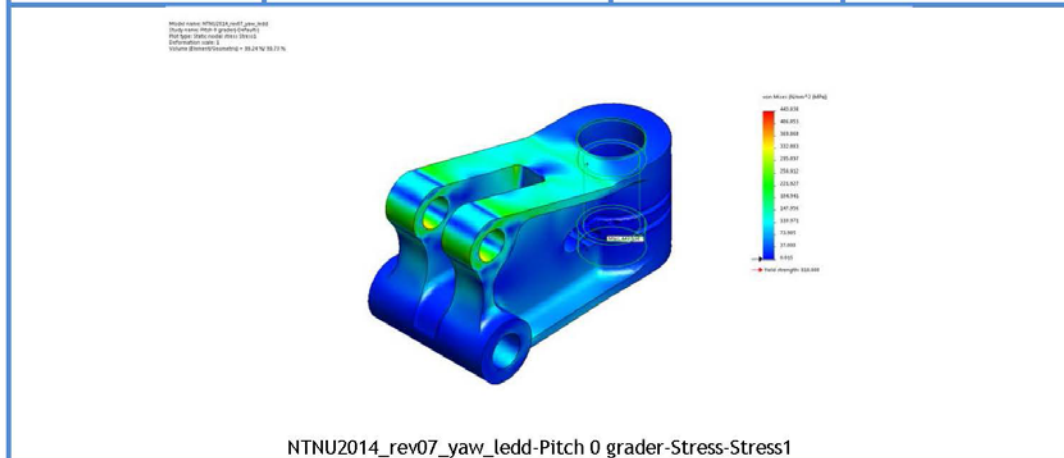
Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	-4.49311	934.05	-4.93293	934.073

### Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	0

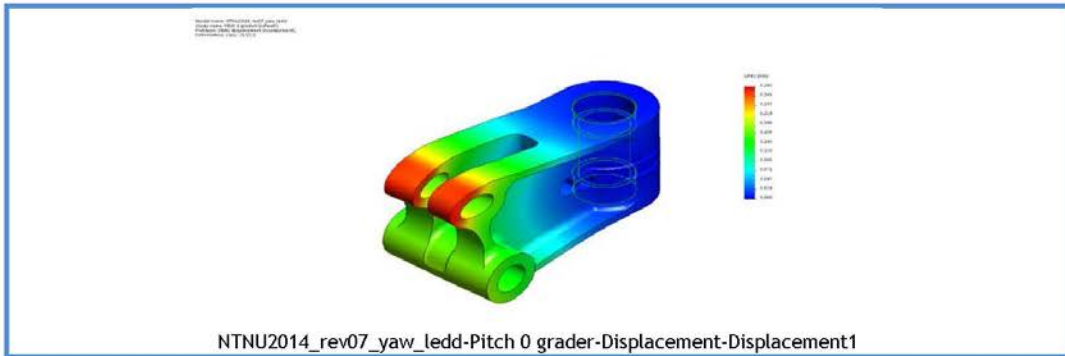
## Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	0.0148879 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Node: 69861	443.838 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Node: 20473

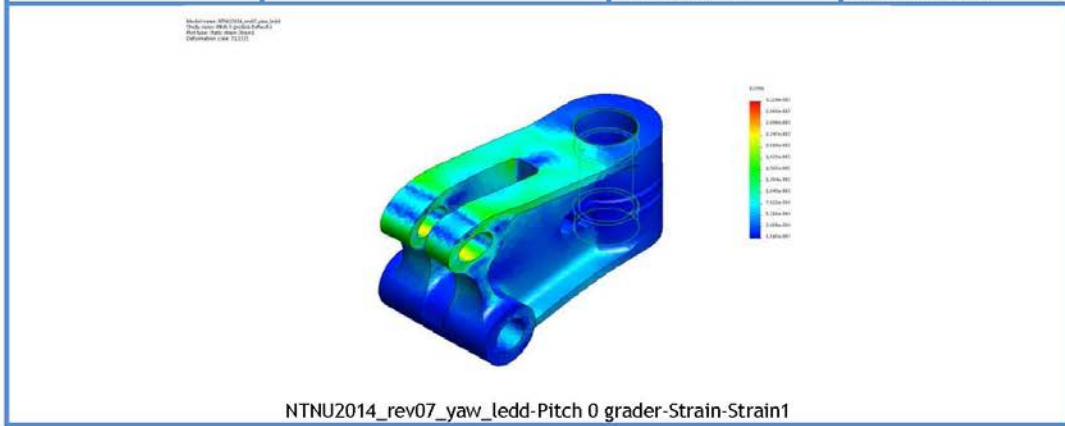


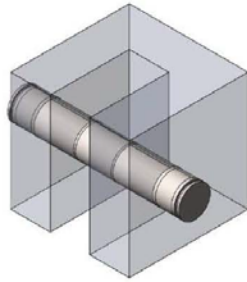
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	4.78467e-006 mm Node: 1192	0.284883 mm Node: 20314





Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	1.04735e-007 Element: 9384	0.00312906 Element: 85583





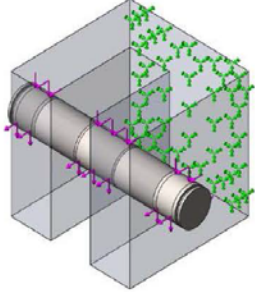
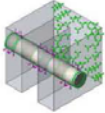
## Simulation of NTNU2014\_rev05\_par allelstag\_bolt\_analyse

**Date:** 29. mai 2014  
**Designer:** Solidworks  
**Study name:** static - bolt - finere mesh 1  
**Analysis type:** Static

### Table of Contents

Model Information .....	2
Study Properties .....	2
Units .....	3
Material Properties .....	3
Loads and Fixtures.....	4
Contact Information.....	5
Mesh Information .....	6
Resultant Forces .....	7
Study Results .....	8

## Model Information

			
<p><b>Model name:</b> NTNU2014_rev05_parallelstag_bolt_analyse  <b>Current Configuration:</b> Default</p>			
Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Split Line3 	Solid Body	Mass: 0.0817791 kg Volume: 1.72894e-005 m <sup>3</sup> Density: 4730 kg/m <sup>3</sup> Weight: 0.801435 N	C:\Users\paisu\Desktop\NX analyser\Bolt parallelstag\Rev 5 - endelige krefter - parallelstag\NTNU2014_rev05_parallelstag_bolt_analyse.SLDPRT May 28 11:11:53 2014

## Study Properties

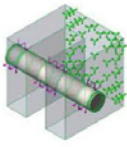
<b>Study name</b>	static - bolt - finere mesh 1
<b>Analysis type</b>	Static
<b>Mesh type</b>	Mixed Mesh
<b>Thermal Effect:</b>	On
<b>Thermal option</b>	Include temperature loads
<b>Zero strain temperature</b>	298 Kelvin
<b>Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation</b>	Off
<b>Solver type</b>	FFEPlus

Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SolidWorks document (c:\users\paisu\appdata\local\temp)

## Units

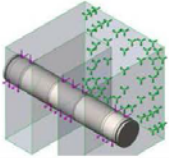
Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/m <sup>2</sup>

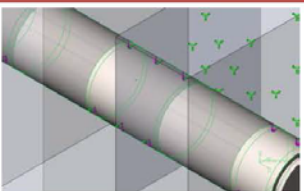
## Material Properties

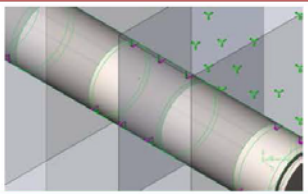
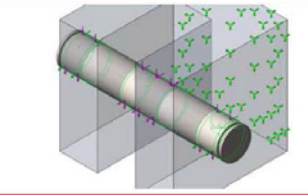
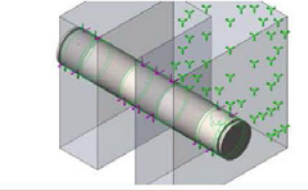
Model Reference	Properties	Components
	<p><b>Name:</b> Titanium Ti-8Mn, Annealed</p> <p><b>Model type:</b> Linear Elastic Isotropic</p> <p><b>Default failure criterion:</b> Max von Mises Stress</p> <p><b>Yield strength:</b> 8.1e+008 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Tensile strength:</b> 9e+008 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Compressive strength:</b> 8.75e+008 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Elastic modulus:</b> 1.15e+011 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Poisson's ratio:</b> 0.33</p> <p><b>Mass density:</b> 4730 kg/m<sup>3</sup></p>	SolidBody 1(Split Line3)(NTNU2014_rev05_parallelstg_bolt_analyse-1), SolidBody 1(Cut- Extrude2)(NTNU2014_rev05_parallelstg_bolt_feste_analys 1)

	<b>Shear modulus:</b> 4.9e+010 N/m <sup>2</sup> <b>Thermal expansion coefficient:</b> 8.6e-006 /Kelvin	
Curve Data:N/A		

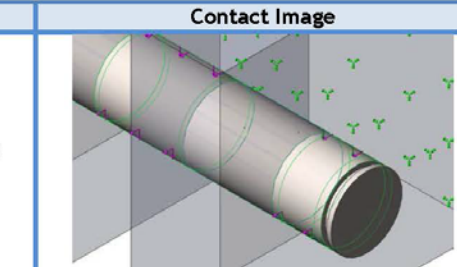
### Loads and Fixtures

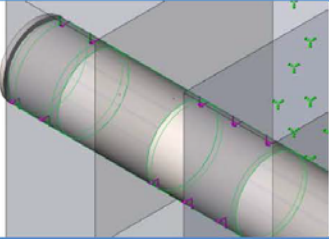
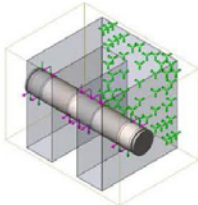
Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fixed-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Type:</b> Fixed Geometry		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	-8.86789e-007	-3.80707e-006	-1.95156e-005	1.99033e-005
Reaction Moment(N.m)	-4.97444e-008	-8.37864e-008	1.39596e-009	9.74505e-008

Load name	Load Image	Load Details
BearingLoads-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System1 <b>Force Values:</b> -10321 0 0 N

BearingLoads-2		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System1 <b>Force Values:</b> 0 -11252 0 N
BearingLoads-3		<b>Entities:</b> 3 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System1 <b>Force Values:</b> -36313 0 0 N
BearingLoads-4		<b>Entities:</b> 3 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System1 <b>Force Values:</b> 0 -36313 0 N

### Contact Information

Contact	Contact Image	Contact Properties		
Contact Set-3		<b>Type:</b> No Penetration contact pair <b>Entites:</b> 2 face(s) <b>Advanced:</b> Node to surface		
<b>Contact/Friction forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Contact Force(N)	-2.0843E-014	-8.4752E-011	-1.7055E-011	8.6451E-011

Contact Set-4		<b>Type:</b> No Penetration contact pair <b>Entites:</b> 2 face(s) <b>Advanced:</b> Node to surface		
<b>Contact/Friction forces</b>				
Components	X	Y	Z	Resultant
Contact Force(N)	4.1153E-015	1.5731E-010	-3.8653E-011	1.6199E-010
Global Contact		<b>Type:</b> Bonded <b>Components:</b> 1 component(s) <b>Options:</b> Incompatible mesh		

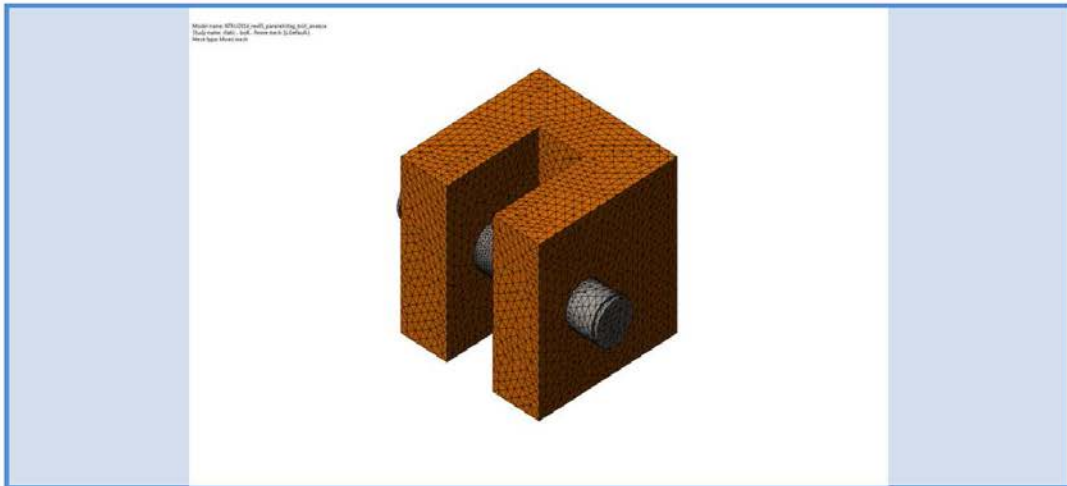
### Mesh Information

Mesh type	Mixed Mesh
Mesher Used:	Curvature based mesh
Jacobian points	4 Points
Jacobian check for shell	On
Maximum element size	3 mm
Minimum element size	1.5 mm
Mesh Quality	High
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off

### Mesh Information - Details

Total Nodes	119426
Total Elements	80187
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:04
Computer name:	LBO-PASU





**Mesh Control Information:**

Mesh Control Name	Mesh Control Image	Mesh Control Details
Control-2		<b>Entities:</b> 5 face(s) <b>Units:</b> mm <b>Size:</b> 1 <b>Ratio:</b> 1.5

**Resultant Forces**

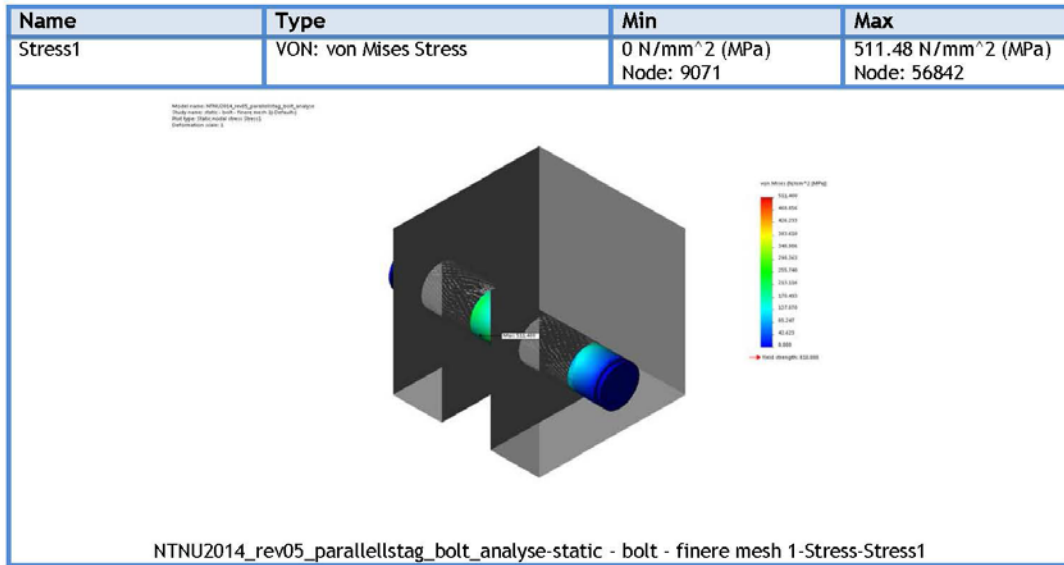
**Reaction Forces**

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	-0.00065733	47565.3	-46633.4	66611.7

**Reaction Moments**

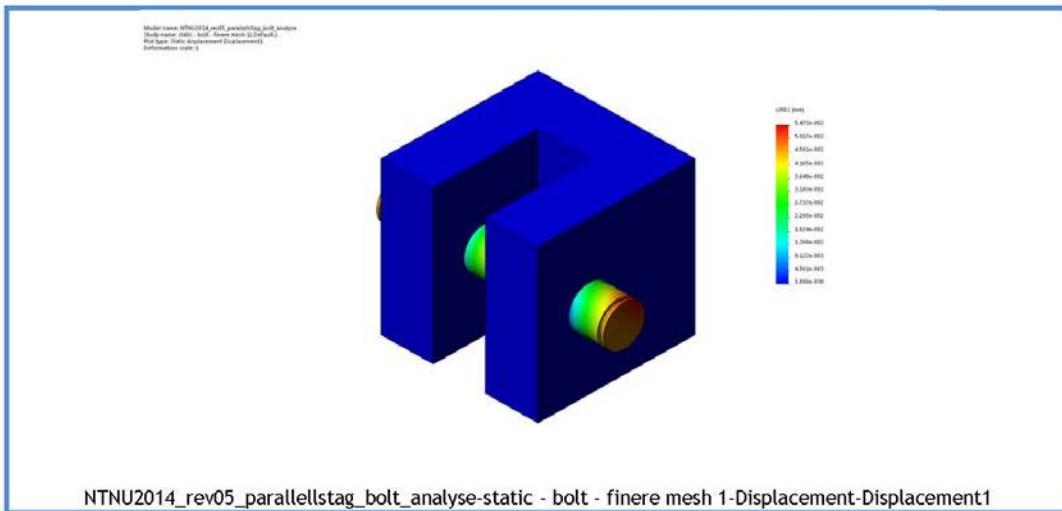
Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	-5.04844e-008	-1.2344e-007	-1.17534e-007	1.77765e-007

## Study Results

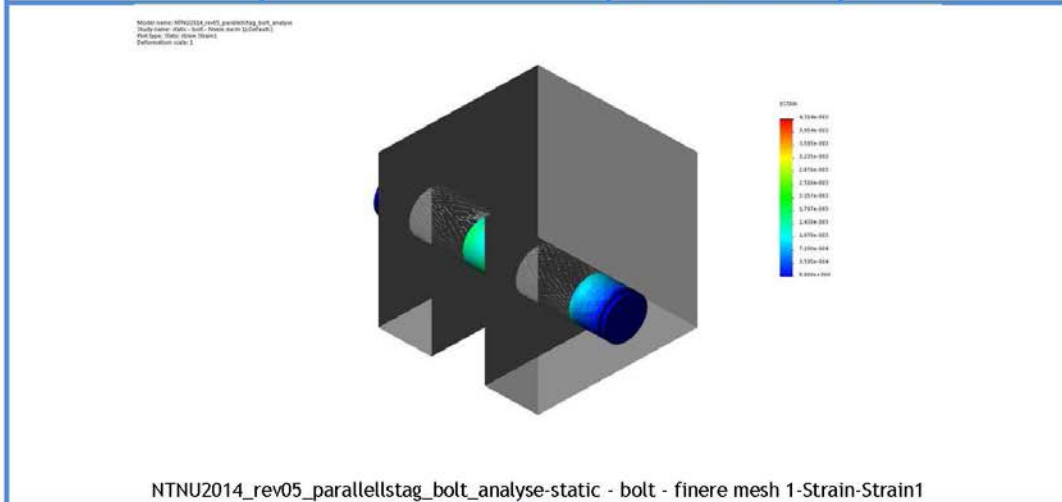


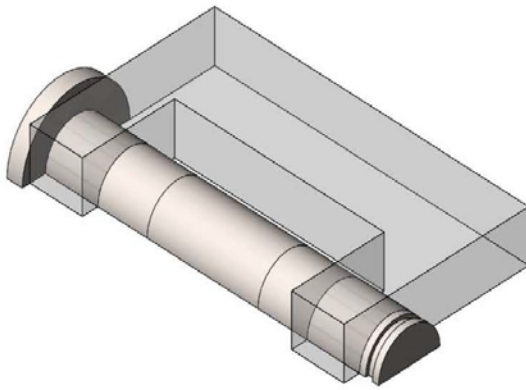
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 9076	0.0547314 mm Node: 447





Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	0 Element: 73278	0.00431381 Element: 12063





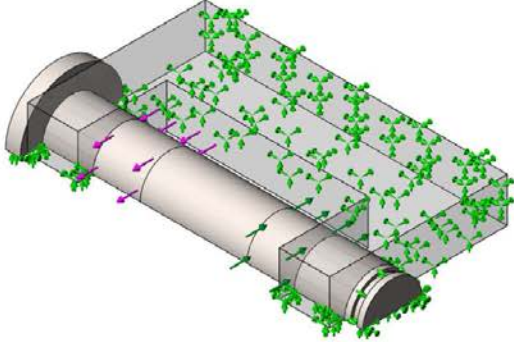
## Simulation of assem\_vertikalbolt\_an alyse

**Date:** 2. juni 2014  
**Designer:** Solidworks  
**Study name:** static - mesh 125  
**Analysis type:** Static

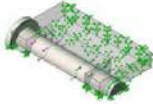
### Table of Contents

Model Information .....	2
Study Properties .....	2
Units .....	3
Material Properties .....	3
Loads and Fixtures.....	4
Contact Information.....	5
Mesh Information .....	6
Resultant Forces .....	7
Study Results .....	7

## Model Information



Model name: assem\_vertikalbolt\_analyse  
Current Configuration: Default

Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
 Cut-Extrude1	Solid Body	Mass: 0.0914576 kg Volume: 1.93356e-005 m <sup>3</sup> Density: 4730 kg/m <sup>3</sup> Weight: 0.896284 N	C:\Users\paisu\Desktop\NX analyser\Ø20 - Vertikalbolt\NTNU2014_rev05_vertikal_bolt_analyse.SLDPRT Jun 02 13:34:35 2014

## Study Properties

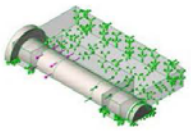
Study name	static - mesh 125
Analysis type	Static
Mesh type	Mixed Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin

Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation	Off
Solver type	FFEPlus
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SolidWorks document (C:\Users\paisu\Desktop\NX analyser\Ø20 - Vertikalbolt)

## Units

Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/m <sup>2</sup>

## Material Properties

Model Reference	Properties	Component
	<p><b>Name:</b> Titanium Ti-8Mn, Annealed</p> <p><b>Model type:</b> Linear Elastic Isotropic</p> <p><b>Default failure criterion:</b> Max von Mises Stress</p> <p><b>Yield strength:</b> 8.1e+008 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Tensile strength:</b> 9e+008 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Compressive strength:</b> 8.75e+008 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Elastic modulus:</b> 1.15e+011 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Poisson's ratio:</b> 0.33</p> <p><b>Mass density:</b> 4730 kg/m<sup>3</sup></p> <p><b>Shear modulus:</b> 4.9e+010 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Thermal expansion coefficient:</b> 8.6e-006 /Kelvin</p>	<p>SolidBody 1(Cut-Extrude1)(NTNU2014_rev05_vertikal_I</p> <p>SolidBody 1(Cut-Extrude3)(NTNU2014_rev05_vertikal_I 1)</p>
Curve Data:N/A		



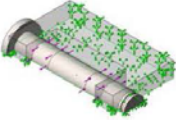
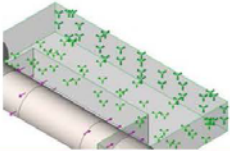
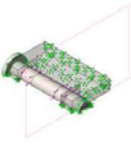
SOLIDWORKS

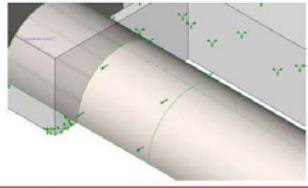
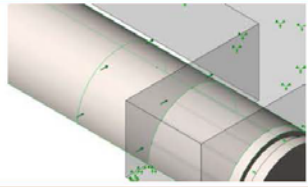
Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of assem\_vertikalbolt\_analyse

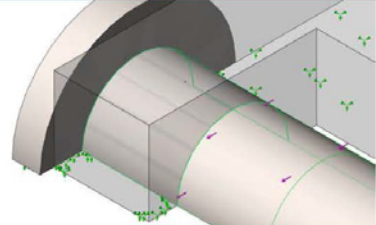
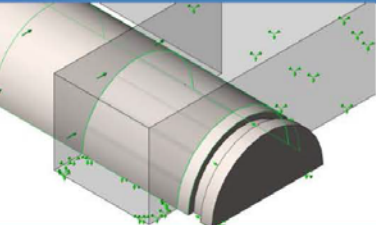
3

## Loads and Fixtures

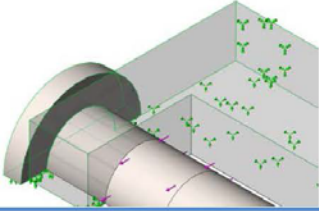
Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Symmetry-1		<b>Entities:</b> 4 face(s) <b>Type:</b> Symmetry		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	43.58	28561.1	-15.8689	28561.1
Reaction Moment(N.m)	-8.34396e-008	-6.64058e-009	4.2451e-009	8.3811e-008
Fixed-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Type:</b> Fixed Geometry		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	-8.08791e-007	1.78884e-006	-4.33867e-006	4.76216e-006
Reaction Moment(N.m)	-1.27477e-008	-1.47122e-009	-4.57807e-011	1.28324e-008
Reference Geometry-1		<b>Entities:</b> 1 face(s), 1 plane(s) <b>Reference:</b> Right <b>Type:</b> Use reference geometry <b>Translation:</b> ---, ---, 0 <b>Rotation:</b> ---, ---, --- <b>Units:</b> mm, rad		
<b>Resultant Forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Reaction force(N)	219.016	-4.84063	-0.000180212	219.07
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	1e-033

Load name	Load Image	Load Details
BearingLoads-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System1 <b>Force Values:</b> 20029 0 0 N
BearingLoads-2		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Coordinate System:</b> Coordinate System1 <b>Force Values:</b> -20029 0 0 N

### Contact Information

Contact	Contact Image	Contact Properties		
Contact Set-7		<b>Type:</b> No Penetration contact pair <b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Advanced:</b> Node to surface		
<b>Contact/Friction forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Contact Force(N)	-8.9552E-016	5.2434E-012	1.2983E-010	1.2994E-010
Contact Set-8		<b>Type:</b> No Penetration contact pair <b>Entities:</b> 2 face(s) <b>Advanced:</b> Node to surface		
<b>Contact/Friction forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Contact Force(N)	-4.9599E-017	-2.3492E-011	1.0454E-011	2.5713E-011



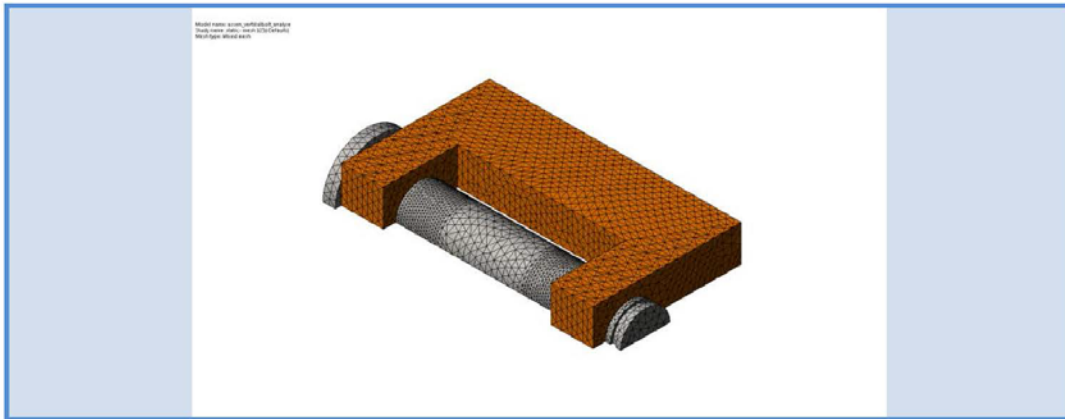
Contact Set-9		<b>Type:</b> No Penetration contact pair <b>Entites:</b> 2 face(s) <b>Advanced:</b> Node to surface		
<b>Contact/Friction forces</b>				
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultant</b>
Contact Force(N)	-0.010488	217.95	-351.29	413.41

### Mesh Information

Mesh type	Mixed Mesh
Mesher Used:	Curvature based mesh
Jacobian points	4 Points
Jacobian check for shell	On
Maximum element size	3 mm
Minimum element size	1.5 mm
Mesh Quality	High
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off

### Mesh Information - Details

Total Nodes	44899
Total Elements	27408
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:03
Computer name:	LBO-PASU



**Mesh Control Information:**

Mesh Control Name	Mesh Control Image	Mesh Control Details
Control-1		<b>Entities:</b> 4 face(s) <b>Units:</b> mm <b>Size:</b> 1.25 <b>Ratio:</b> 1.5

**Resultant Forces**

**Reaction Forces**

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	-0.000435222	-0.0241318	-0.148761	0.150706

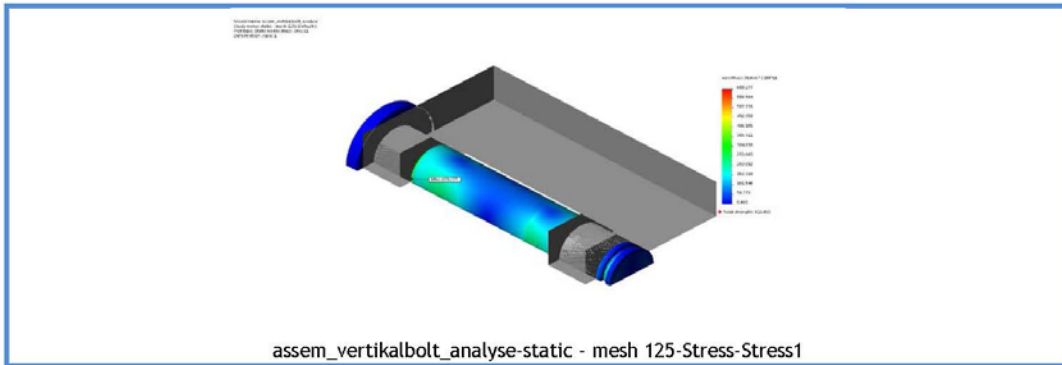
**Reaction Moments**

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	-9.61145e-008	1.29779e-007	-4.13117e-008	1.66695e-007

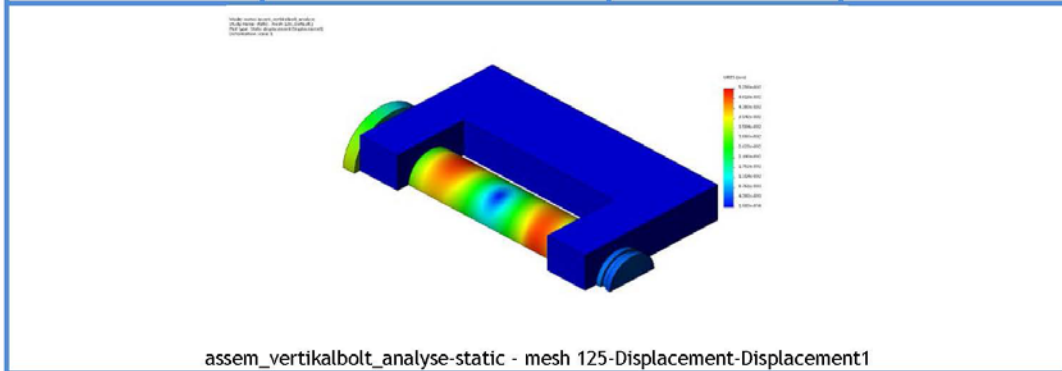
**Study Results**

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	0 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Node: 36686	609.277 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Node: 28191

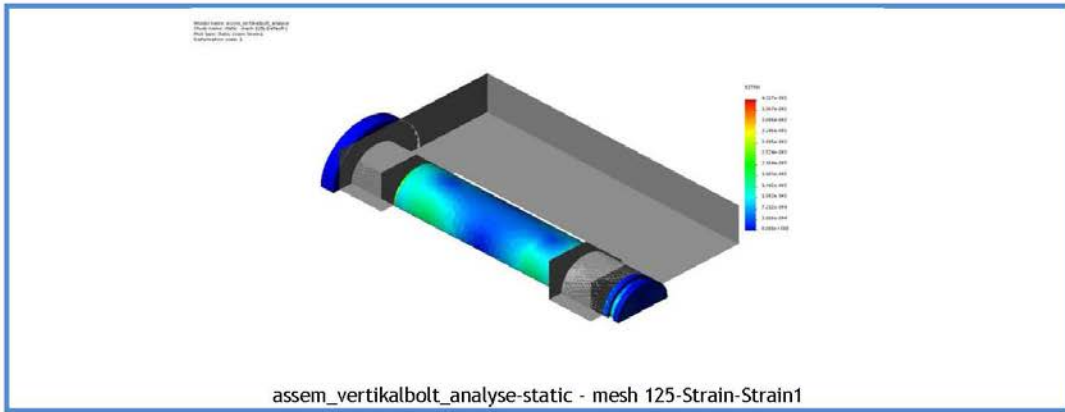


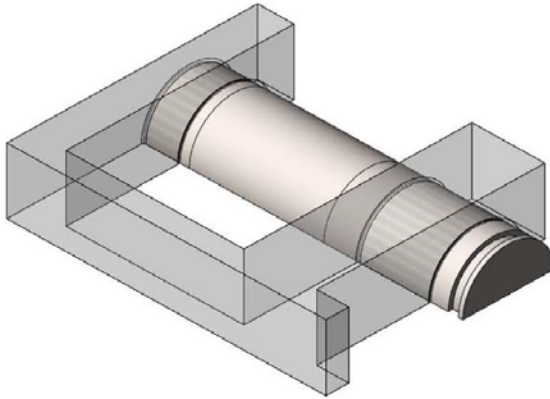


Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 36686	0.0525632 mm Node: 8176



Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	0 Element: 23303	0.00432738 Element: 3982





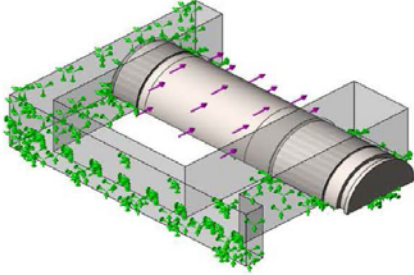
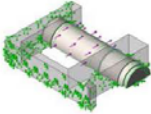
## Simulation of assembly\_analyse\_020

**Date:** 2. juni 2014  
**Designer:** Solidworks  
**Study name:** mesh 075  
**Analysis type:** Static

### Table of Contents

Model Information .....	2
Study Properties .....	2
Units .....	3
Material Properties .....	3
Loads and Fixtures.....	4
Contact Information.....	5
Mesh Information .....	5
Resultant Forces .....	6
Study Results .....	7

## Model Information

			
Model name: assembly_analyse_020 Current Configuration: kvart			
Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Cut-Extrude2 	Solid Body	Mass: 0.0516985 kg Volume: 1.09299e-005 m <sup>3</sup> Density: 4730 kg/m <sup>3</sup> Weight: 0.506645 N	C:\Users\paisu\Desktop\NX analyser\020 - yaw bolt\NTNU2014_rev05_yaw_bolt_analyse.SLDPRT May 31 16:56:32 2014

## Study Properties

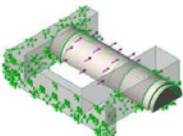
<b>Study name</b>	mesh 075
<b>Analysis type</b>	Static
<b>Mesh type</b>	Mixed Mesh
<b>Thermal Effect:</b>	On
<b>Thermal option</b>	Include temperature loads
<b>Zero strain temperature</b>	298 Kelvin
<b>Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation</b>	Off
<b>Solver type</b>	FFEPlus
<b>Inplane Effect:</b>	Off
<b>Soft Spring:</b>	Off

<b>Inertial Relief:</b>	Off
<b>Incompatible bonding options</b>	Automatic
<b>Large displacement</b>	Off
<b>Compute free body forces</b>	On
<b>Friction</b>	Off
<b>Use Adaptive Method:</b>	Off
<b>Result folder</b>	SolidWorks document (C:\Users\paisu\Desktop\NX analyser\Ø20 - yaw bolt)

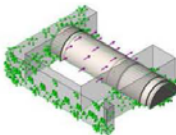
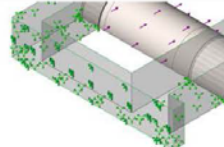
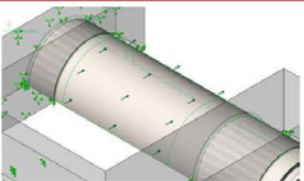
## Units

<b>Unit system:</b>	SI (MKS)
<b>Length/Displacement</b>	mm
<b>Temperature</b>	Kelvin
<b>Angular velocity</b>	Rad/sec
<b>Pressure/Stress</b>	N/m <sup>2</sup>

## Material Properties

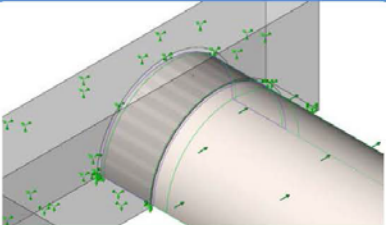
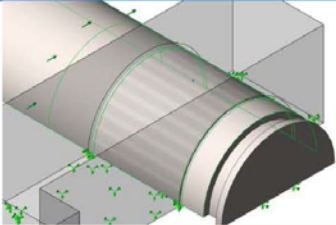
Model Reference	Properties	Components
	<b>Name:</b> Titanium Ti-8Mn, Annealed <b>Model type:</b> Linear Elastic Isotropic <b>Default failure criterion:</b> Max von Mises Stress <b>Yield strength:</b> 8.1e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Tensile strength:</b> 9e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Compressive strength:</b> 8.75e+008 N/m <sup>2</sup> <b>Elastic modulus:</b> 1.15e+011 N/m <sup>2</sup> <b>Poisson's ratio:</b> 0.33 <b>Mass density:</b> 4730 kg/m <sup>3</sup> <b>Shear modulus:</b> 4.9e+010 N/m <sup>2</sup> <b>Thermal expansion coefficient:</b> 8.6e-006 /Kelvin	SolidBody 1(Cut-Extrude2)(NTNU2014_rev05_yaw_bolt_SolidBody 1(Fillet1)(NTNU2014_rev05_yaw_bolt_1)
Curve Data: N/A		

## Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Symmetry-1		Entities: 6 face(s) Type: Symmetry		
<b>Resultant Forces</b>				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	-0.00483997	23872.3	795.317	23885.6
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	1e-033
Fixed-1		Entities: 1 face(s) Type: Fixed Geometry		
<b>Resultant Forces</b>				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	0	0	0	1e-033
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	1e-033
Load name	Load Image	Load Details		
BearingLoads-1		Entities: 1 face(s) Coordinate System: Coordinate System1 Force Values: -25973.7 0 0 N		



## Contact Information

Contact	Contact Image	Contact Properties		
Contact Set-12		<b>Type:</b> No Penetration contact pair <b>Entites:</b> 2 face(s) <b>Advanced:</b> Node to surface		
<b>Contact/Friction forces</b>				
Components	X	Y	Z	Resultant
Contact Force(N)	5.4761E-020	-4.0789E-011	-3.2506E-012	4.0918E-011
Contact Set-13		<b>Type:</b> No Penetration contact pair <b>Entites:</b> 2 face(s) <b>Advanced:</b> Node to surface		
<b>Contact/Friction forces</b>				
Components	X	Y	Z	Resultant
Contact Force(N)	2.6143E-017	6.0714E-011	1.0159E-010	1.1835E-010

## Mesh Information

Mesh type	Mixed Mesh
Mesher Used:	Curvature based mesh
Jacobian points	4 Points
Jacobian check for shell	On
Maximum element size	3 mm
Minimum element size	0.136067 mm
Mesh Quality	High
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off



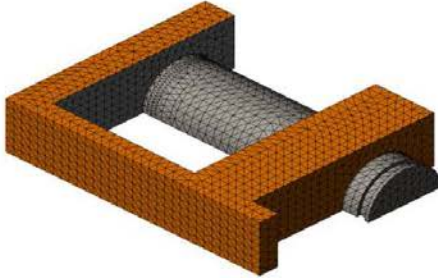
SOLIDWORKS

Analyzed with SolidWorks Simulation

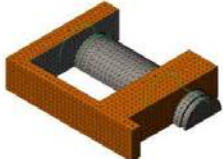
Simulation of assembly\_analyse\_020

5

### Mesh Information - Details

<b>Total Nodes</b>	25162
<b>Total Elements</b>	15036
<b>Time to complete mesh(hh:mm:ss):</b>	00:00:01
<b>Computer name:</b>	LBO-PASU
	

### Mesh Control Information:

Mesh Control Name	Mesh Control Image	Mesh Control Details
Control-4		<b>Entities:</b> 4 edge(s) <b>Units:</b> mm <b>Size:</b> 0.75 <b>Ratio:</b> 1.5

### Resultant Forces

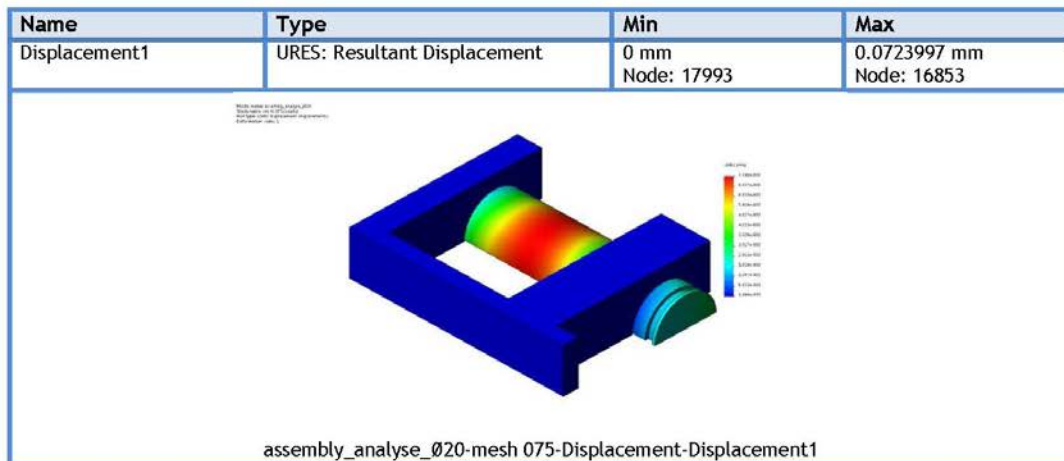
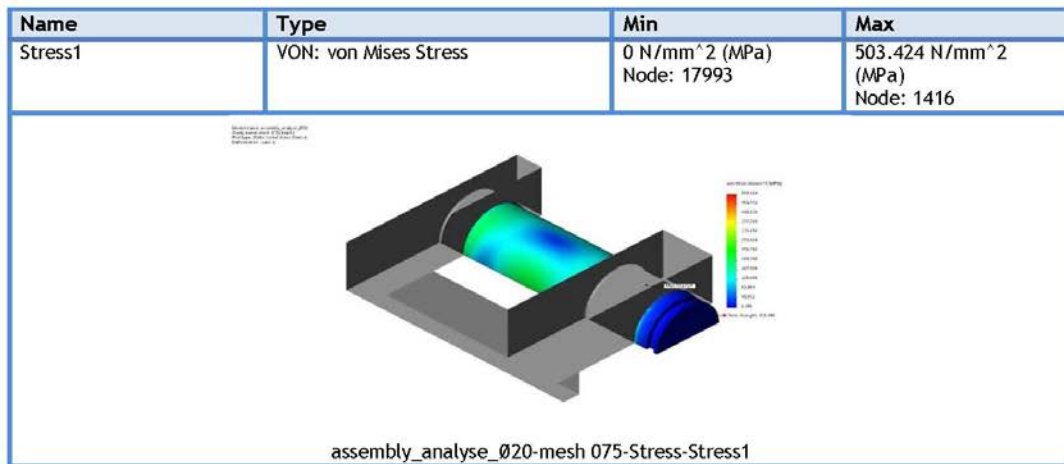
#### Reaction Forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	0.000764749	-0.00756598	25973.9	25973.9

#### Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	1e-033

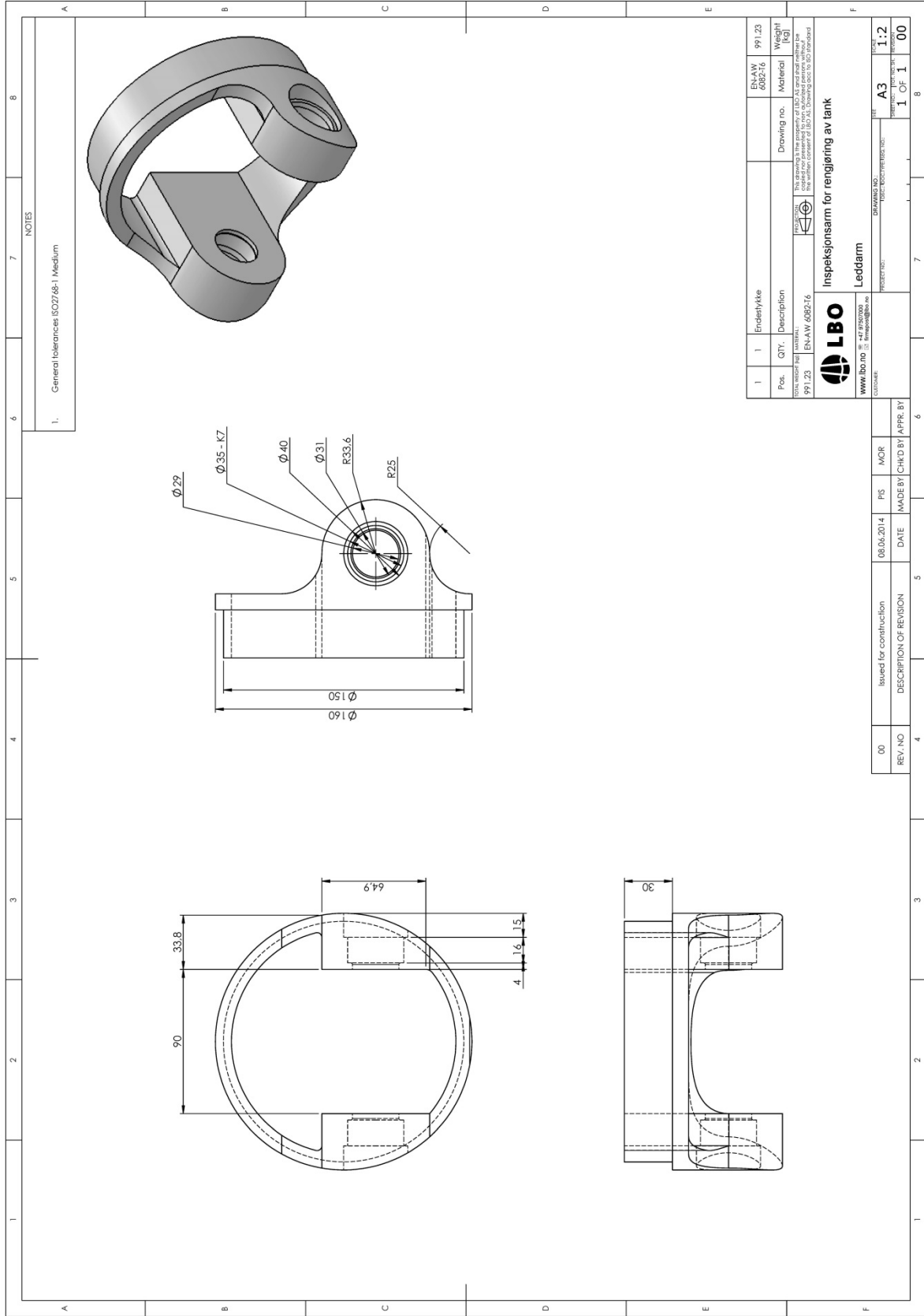
## Study Results

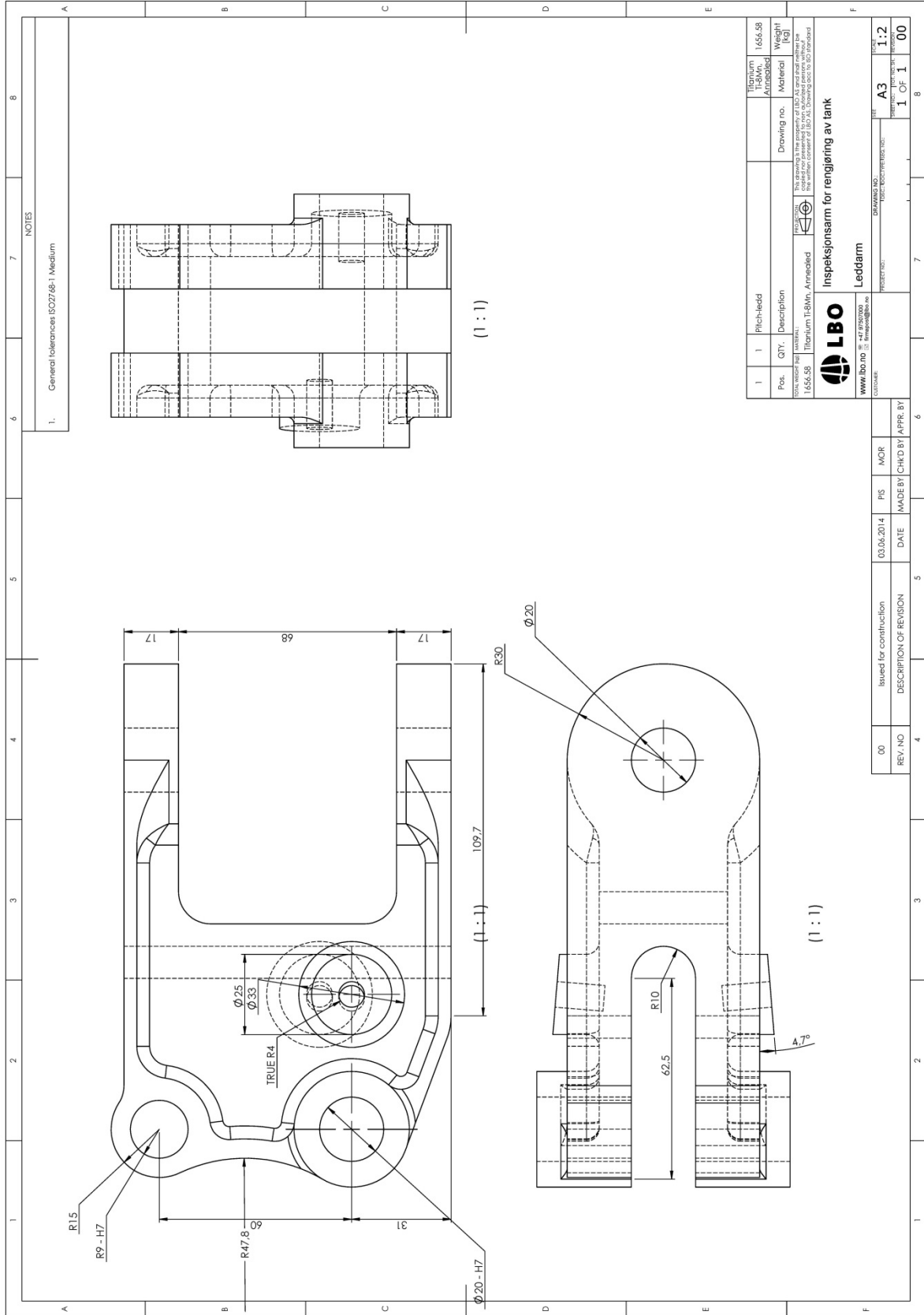


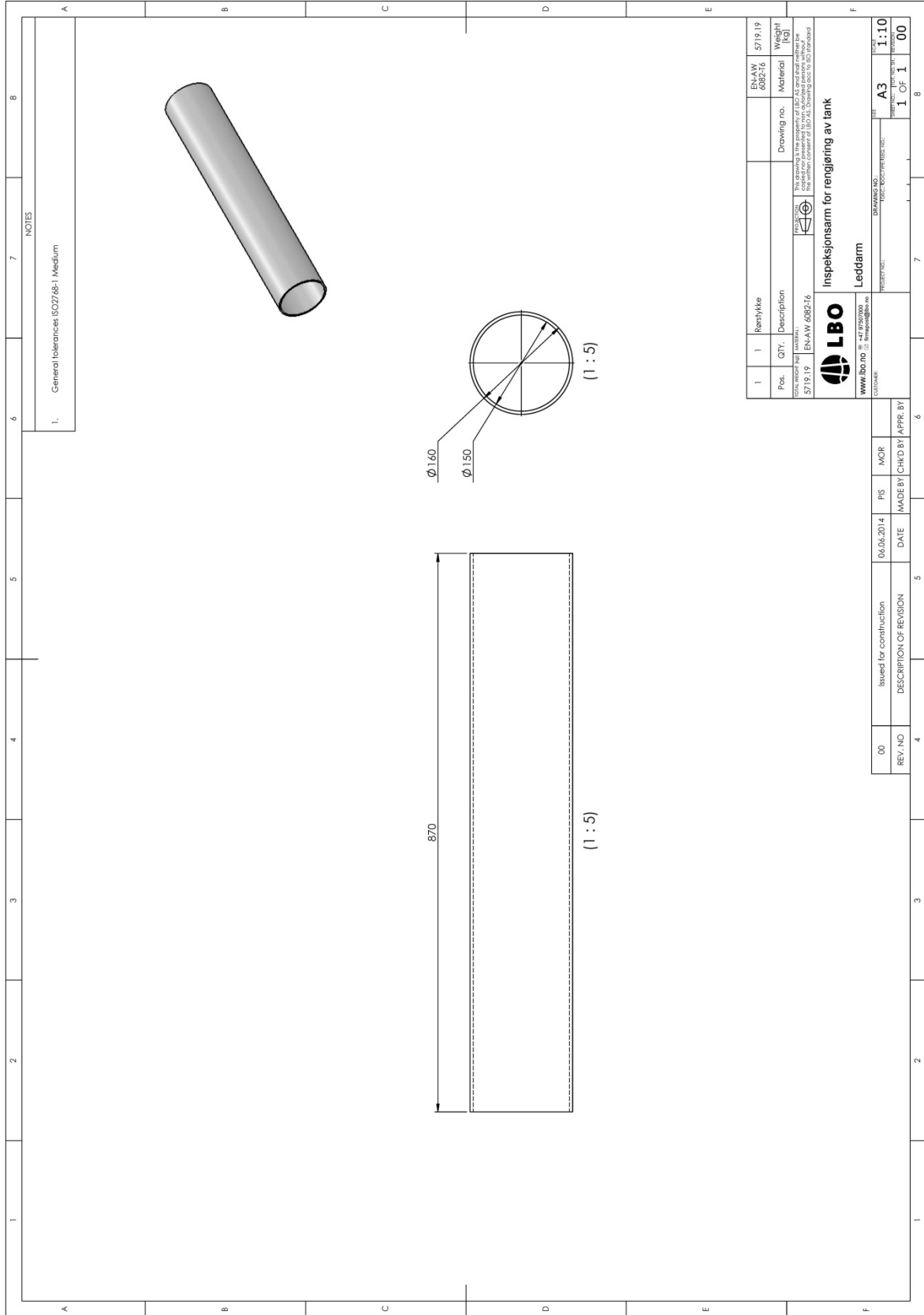
Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	0 Element: 11453	0.00319796 Element: 2154

assembly\_analyse\_020-mesh 075-Strain-Strain1

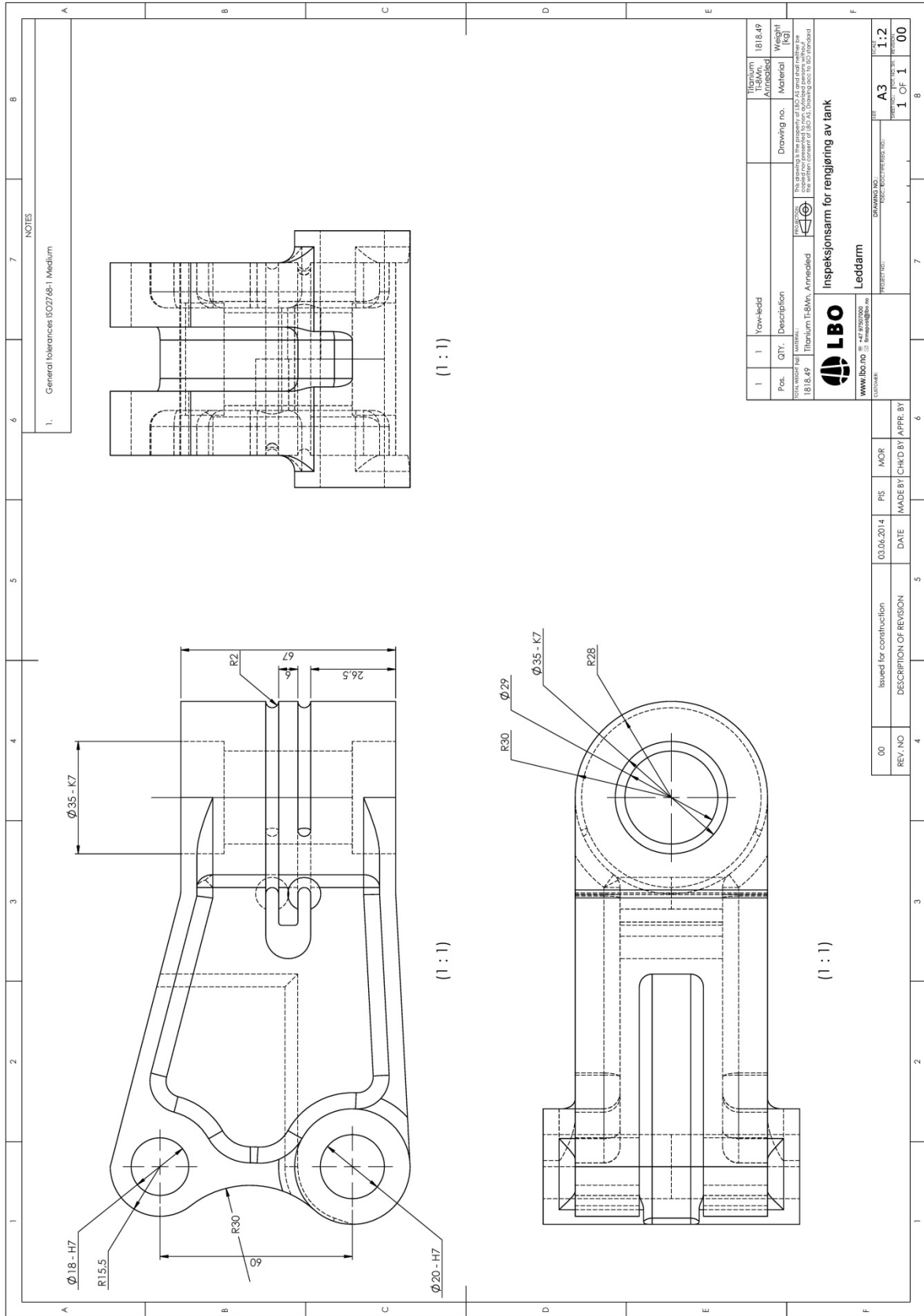
## **Vedlegg B    Arbeidstegninger**











NOTES

1. General tolerances (ISO 2768-1) Medium

Pos.	QTY	Description	Drawing no.	Titanium Ti-5Mn Annesled	Weight [kg]
1	1	Yow-ledd		Titanium Ti-5Mn Annesled	1818.49

The drawing is the property of LBO AS and shall neither be reproduced nor used for any other purpose without the written consent of LBO AS. Drawing not to be shared.

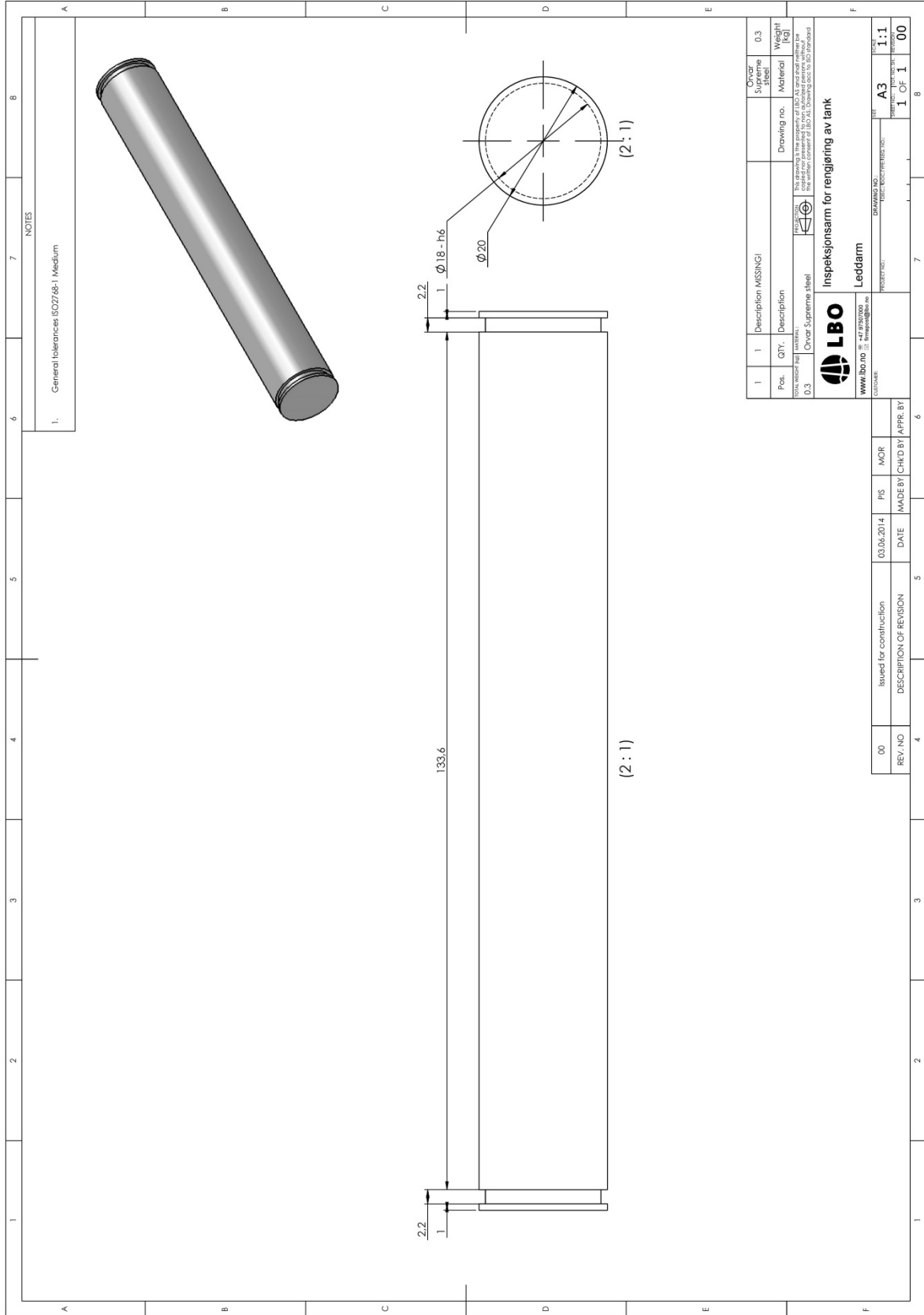
**LBO**  
 www.lbo.no  
 447 0200200  
 15. Industriparken  
 1300 Sandnessjøen

**Inspeksjonsarm for rengjøring av tank**  
**Leddarm**

PROJECT NO:	DRAWING NO:	SCALE:
		A3
DATE:	ISSUED BY:	1:2
		1:1
REV. NO:	DESCRIPTION OF REVISION:	1:1
		00

00	Issued for construction	03.06.2014	PS	MOR
REV. NO	DESCRIPTION OF REVISION	DATE	MADE BY	CHK'D BY / APPR. BY






7 NOTES

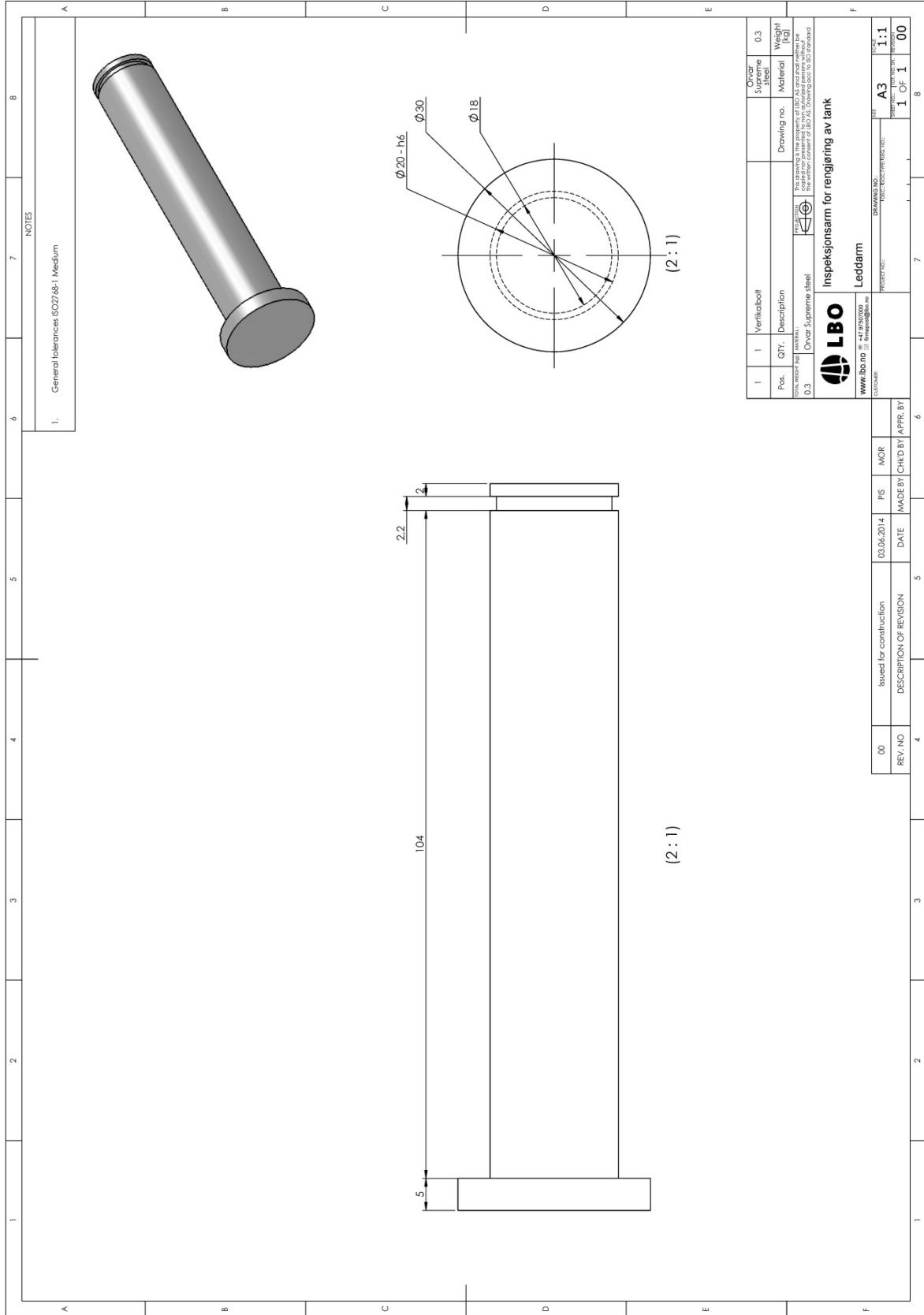
1. General tolerances (ISO 2768-1) Medium

Pos.	QTY	Description	Drawing no.	Material	Weight [kg]
1	1	Description MISSING!		Char Supreme Steel	0.3


**LBO**  
 www.lbo.no  
 47 67 02 00 00  
 15 44 00 00 00 00  
 15 44 00 00 00 00

**Inspeksjonsarm for rengjøring av tank**  
**Leddarm**  
 PROJECT NO.:  
 DRAWING NO.:  
 TITLE:

00 Issued for construction  
 03.06.2014 PIS MOR  
 REV. NO. DESCRIPTION OF REVISION DATE MADE BY CHK'D BY APPR. BY  
 00  
 1 CF: 1 00



## **Vedlegg C    Beregninger**

# Beregning av bolteforbindelser i manipulator.

Kilder: Maskindeler 1, Arne Dørum, Tekniske tabeller, J. Johannessen

## M16 bolt:

Største belastning på M16 bolt forekommer på yaw-ledd i første leddforbindelse.

Diameter, tverrsnittsareal og tverrsnittsmodul:

$$d_{M16} := 16\text{mm}$$

$$A_{M16} := \frac{\pi}{4} \cdot d_{M16}^2 = 201.062 \cdot \text{mm}^2$$

$$W_{M16} := \frac{\pi}{32} \cdot d_{M16}^3 = 402.124 \cdot \text{mm}^3$$

Kraft fra hvert enkelt stag:

$$F_{s,M16} := \frac{51355\text{N}}{2} = 25677.5\text{N}$$

Kraft fra høydeaktuator:

$$F_{h,M16} := 15269\text{N}$$

Resultant:

$$F_{r,M16} := 66647\text{N}$$

Skjærspenning i bolt:

$$\tau_{a,M16} := \frac{F_{s,M16}}{A_{M16}} = 127.709 \cdot \text{MPa}$$

Bøyemoment i bolt:

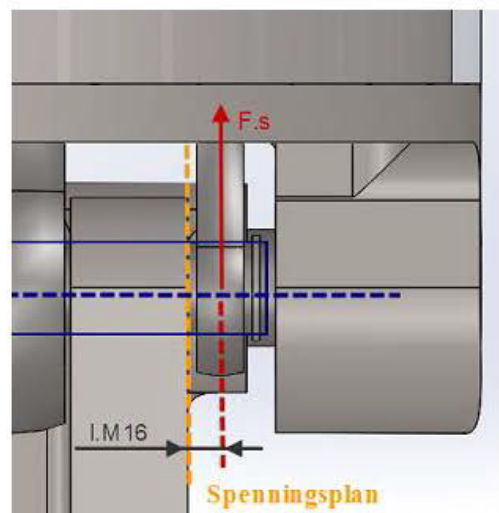
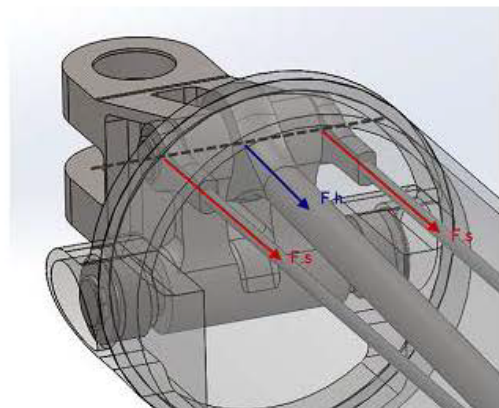
$$h_{M16} := 4\text{mm} + 1.5\text{mm} = 5.5\text{mm}$$

$$M_{d,M16} := F_{s,M16} \cdot h_{M16} = 141.226 \cdot \text{N}\cdot\text{m}$$

$$\sigma_{d,M16} := \frac{M_{d,M16}}{W_{M16}} = 351.201 \cdot \text{MPa}$$

Sammensatt spenning:

$$\sigma_{s,M16} := \sqrt{\sigma_{d,M16}^2 + (3 \cdot \tau_{a,M16}^2)} = 415.056 \cdot \text{MPa}$$



Hullkanttrykk i ledd:

Total materialtykkelse i leddets bolteforbindelse:

$$t_{M16} := 20\text{mm} \cdot 2 = 40\text{mm}$$

Projektert areal av hullkant:

$$A_{M16,h} := t_{M16} \cdot d_{M16} = 640\text{mm}^2$$

Spenninger i hullkant:

$$f_{u,M16} := \frac{F_{r,M16}}{A_{M16,h}} = 104.136\text{MPa}$$

(forenklet resultat, i realiteten noe lavere)

## M20 bolt:

Største belastning på M20 bolt forekommer på pitch ledd i andre leddforbindelse.

Diameter, tverrsnittsareal og tverrsnittsmodul:

$$d_{M20} := 20\text{mm}$$

$$A_{M20} := \frac{\pi}{4} \cdot d_{M20}^2 = 314.159\text{mm}^2$$

$$W_{M20} := \frac{\pi}{32} \cdot d_{M20}^3 = 785.398\text{mm}^3$$

Kraft fra hvert festeøre på endestykke:

$$F_{e,M20} := \frac{65950\text{N}}{2} = 32975\text{N}$$

Kraft fra høydeaktuator:

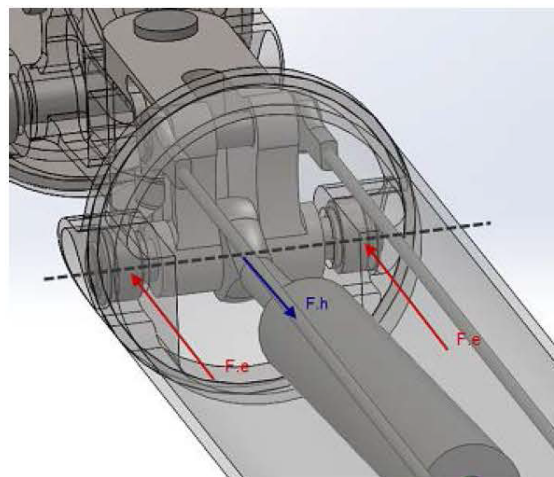
$$F_{h,M20} := 15269\text{N}$$

Resultant:

$$F_{r,M20} := 51947\text{N}$$

Skjærspenning i bolt:

$$\tau_{a,M20} := \frac{F_{e,M20}}{A_{M20}} = 104.963\text{MPa}$$



Bøyemoment i bolt:

$$l_{M20} := 7.5\text{mm} + 8\text{mm} = 15.5\text{mm}$$

$$M_{d,M20} := F_{e,M20} \cdot l_{M20} = 511.113\text{N}\cdot\text{m}$$

$$\sigma_{dM20} := \frac{M_{d,M20}}{W_{M20}} = 650.769\text{MPa}$$

Sammensatt spenning:

$$\sigma_{s,M20} := \sqrt{\sigma_{dM20}^2 + (3 \cdot \tau_{a,M20})^2} = 675.686\text{MPa}$$

Hullkanttrykk i ledd:

Total materialtykkelse i leddets bolteforbindelse:

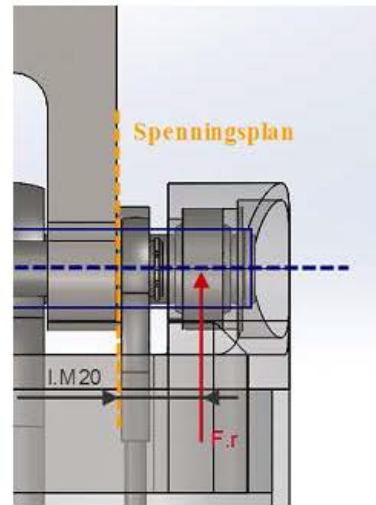
$$t_{M20} := 39.5\text{mm} \cdot 2 = 79\text{mm}$$

Projektert areal av hullkant:

$$A_{M20,h} := t_{M20} \cdot d_{M20} = 1580\text{mm}^2$$

Spenninger i hullkant:

$$f_{u,M20} := \frac{F_{r,M20}}{A_{M20,h}} = 32.878\text{MPa}$$



### M20 vertikalbolt:

Diameter, tverrsnittsareal og tverrsnittsmodul:

$$d_{\text{vertikal}} := 20\text{mm}$$

$$A_{\text{vertikal}} := \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{vertikal}}^2 = 314.159\text{mm}^2$$

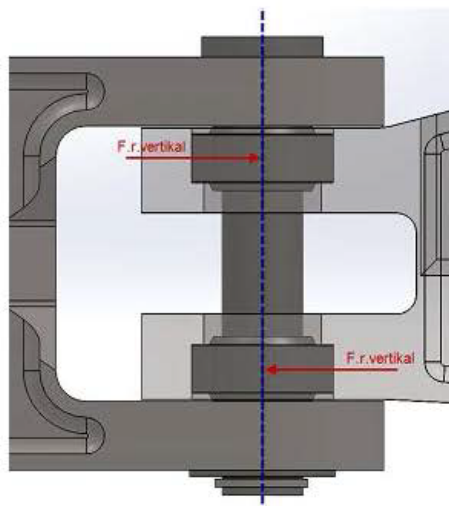
$$W_{\text{vertikal}} := \frac{\pi}{32} \cdot d_{\text{vertikal}}^3 = 785.398\text{mm}^3$$

Moment i andre leddforbindelse:

$$M_2 := 2083\text{N}\cdot\text{m}$$

Avstand mellom lager:

$$l_a := 52\text{mm}$$





Radiallast i lager:

$$F_{r,\text{vertikal}} := \frac{M_2}{l_a} = 40057.692 \text{ N}$$

Momentarm:

$$l_m := 8 \text{ mm}$$

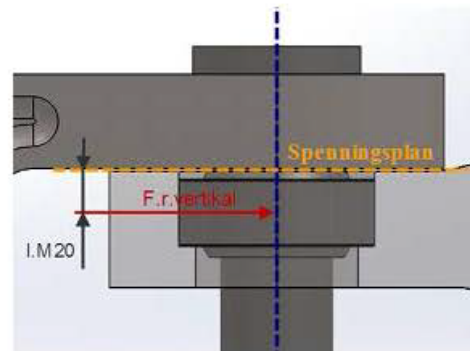
Bøyemoment i bolt: (Forenklet)

$$M_{d,\text{vertikal}} := F_{r,\text{vertikal}} \cdot l_m = 320.462 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\sigma_{d,\text{vertikal}} := \frac{M_{d,\text{vertikal}}}{W_{\text{vertikal}}} = 408.024 \text{ MPa}$$

Skjærspenning i bolt:

$$\tau_{a,\text{vertikal}} := \frac{F_{r,\text{vertikal}}}{A_{\text{vertikal}}} = 127.508 \text{ MPa}$$



Sammensatt spenning:

$$\sigma_{s,\text{vertikal}} := \sqrt{\sigma_{d,\text{vertikal}}^2 + (3 \cdot \tau_{a,\text{vertikal}})^2} = 463.959 \text{ MPa}$$

Hullkanttrykk i ledd:

Materialtykkelse i lager:

$$t_{\text{lager}} := 16 \text{ mm}$$

Prosjektert areal av hullkant:

$$A_{\text{vertikal1}} := t_{\text{lager}} \cdot d_{\text{vertikal}} = 320 \text{ mm}^2$$

Spenninger i hullkant:

$$f_{u,\text{vertikal}} := \frac{F_{r,\text{vertikal}}}{A_{\text{vertikal1}}} = 125.18 \text{ MPa}$$

## Kontrollberegning av rørstykke i manipulator

(Formelverk fra Tekniske tabeller, J. Johannessen)

Dimensjoner:

Ytre diameter:	$D := 160\text{mm}$
Indre diameter:	$d := 154\text{mm}$
Lengde bolt-til-bolt:	$l_1 := 940\text{mm}$
Tverrsnittsareal:	$A_t := \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 1479.7 \cdot \text{mm}^2$
Annet arealmoment:	$I_0 := \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4)$
Polar tverrsnittsmodul:	$W_p := \frac{\pi}{16} \cdot \frac{(D^4 - d^4)}{D}$

Materalegenskaper:

E-modul aluminium:	$E_a := 70000\text{MPa}$
E-modul titan:	$E_t := 110000\text{MPa}$

Maks belastning:

Trykkbelastning:	$F_t := 65.95\text{kN}$
Torsjonsmoment:	$M := 2083\text{N}\cdot\text{m}$

Flytemotstand:

Trykkspenning:	$\sigma := \frac{F_t}{A_t} = 44.6 \cdot \text{MPa}$	OK
Torsjonsspenning:	$\tau := \frac{M}{W_p} = 18.3 \cdot \text{MPa}$	OK

Knekkberegning:

Fri knekk lengde:	$L_f := l_1$	
Treghetsradius:	$i := \sqrt{\frac{I_0}{A_t}}$	
Slankhetsforhold:	$\lambda := \frac{L_f}{i} = 16.931$	$10 < \lambda < 105 \Rightarrow$ Tetmajers formel

Benytter reduksjonsfaktor for stål for utregning av maksimal knekkspenning ettersom dette er eneste tilgjengelige:

$$\sigma_K := 255\text{MPa} - (1.14\text{MPa} \cdot \lambda) = 235.7 \cdot \text{MPa}$$

Sikkerhetsfaktor:  $n := 1$

Tillatt knekkraft:

$$F_k := \frac{\sigma_K}{n} \cdot A_t = 348.8 \cdot \text{kN} \quad \text{OK}$$

## Dimensjonering av Yaw aktuatorer

### Rotasjonsmoment som følge av lagerfriksjon:

Kilder: [www.skf.com](http://www.skf.com) Maskindeler 2

Lagerkrefter:

Avstand mellom lagersenter:

$$l_a := 52\text{mm}$$

Bøyemoment i tverrsnitt:

$$M_b := 2083\text{N}\cdot\text{m}$$

Radiell kraftkomponent:

$$F_r := \frac{M_b}{l_a} = 40057.692\text{N}$$

Aksiell kraftkomponent:

$$F_a := 834\text{N}$$

Friksjonskoeffisient:

Steel/PTFE fabric

$$\mu_{\min} := 0.03$$

$$\mu_{\max} := 0.15$$

$$\mu_{\text{mid}} := \frac{\mu_{\min} + \mu_{\max}}{2} = 0.09$$

Kontaktdiameter for GE20 TXE-2LS:

$$d_k := 29\text{mm}$$

Midlere lagerdiameter:

For radielle lager:

$$d_{m,r} := d_k$$

For aksielle lager:

$$d_{m,a} := 0.7 \cdot d_k$$

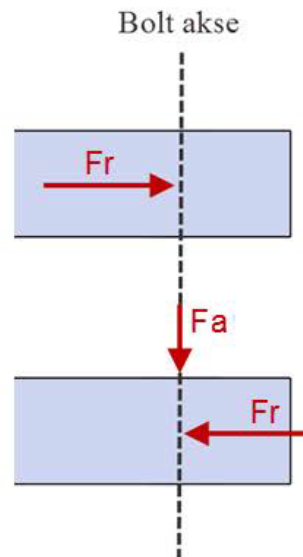
Friksjonsmoment:

Fra radielle krefter:

$$M_r := 2(0.5 \cdot \mu_{\text{mid}} \cdot F_r \cdot d_{m,r}) = 104.551\text{N}\cdot\text{m}$$

Fra aksielle krefter

$$M_a := 0.5 \cdot \mu_{\text{mid}} \cdot F_a \cdot d_{m,a} = 0.762\text{N}\cdot\text{m}$$



Totalt friksjonsmoment:

$$M_t := M_r + M_a = 105.312 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

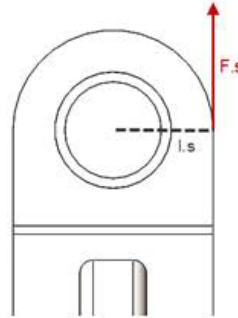
**Nødvendig snordrag for rotasjon om Yaw-akse i andre leddforbindelse:**

Minste arm til aksesenter:

$$l_s := 30 \text{ mm}$$

Snordrag:

$$F_s := \frac{M_t}{l_s} = 3510.415 \text{ N}$$



**Nødvendig utslag på yaw aktuator:**

Alternativ 1 - Skive om bolt

$$r_1 := 30 \text{ mm}$$

$$u_1 := 2 \left( 2\pi \cdot r_1 \cdot \frac{90}{360} \right) = 94.248 \cdot \text{mm}$$

Alternativ 2 - Føstøøre i gods

$$x := 30 \text{ mm}$$

$$y := 65 \text{ mm}$$

$$a_1 := 80 \text{ mm} + y = 145 \cdot \text{mm}$$

$$r_2 := \sqrt{x^2 + y^2} = 71.589 \cdot \text{mm}$$

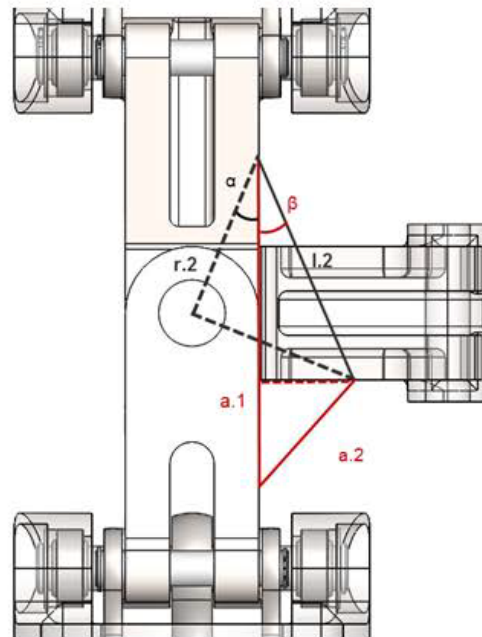
$$l_2 := \sqrt{2 \cdot r_2^2} = 101.242 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha := \text{atan} \left( \frac{x}{y} \right) = 0.432$$

$$\beta := \frac{\pi}{4} - \alpha = 0.353$$

$$a_2 := \sqrt{\left[ a_1 - (l_2 \cdot \cos(\beta)) \right]^2 + (l_2 \cdot \sin(\beta))^2} = 61.033 \cdot \text{mm}$$

$$u_2 := 2 \left( a_1 - a_2 \right) = 167.934 \cdot \text{mm}$$



# Reaksjonskrefter i manipulator som følge av last og egenvekt

(Formelverk fra Tekniske Tabeller, J. Johannesen, 2. utgave)

## Fysiske egenskaper

Lengde fra bolt til bolt i ledd  $l_{bb} := 115\text{mm}$

### Kort seksjon

Lengde  $l_k := 640\text{mm} + (2 \cdot l_{bb}) = 870\text{mm}$

Egenvekt  $m_k := 15\text{kg} \cdot g = 147.1\text{N}$

### Lang seksjon

Lengde  $l_l := 940\text{mm} + (2l_{bb}) = 1170\text{mm}$

Egenvekt  $m_l := 20\text{kg} \cdot g = 196.1\text{N}$

### Verktøy

Lengde  $l_v := 320\text{mm} + l_{bb} = 435\text{mm}$

Egenvekt  $m_v := 10\text{kg} \cdot g = 98.1\text{N}$

## Moment og opplager i leddforbindelse #1

Lengde uten verktøy  $l_{t1} := l_k + 4l_l = 5550\text{mm}$

Egenvekt  $m_{e1} := m_k + 4 \cdot m_l = 931.6\text{N}$

Moment fra egenvekt  $M_{l_{egen}} := \frac{(m_{e1} \cdot l_{t1})}{2} = 2585.3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$

Moment fra verktøy  $M_{l_{nytte}} := (l_{t1} + l_v) \cdot m_v = 586.9 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$

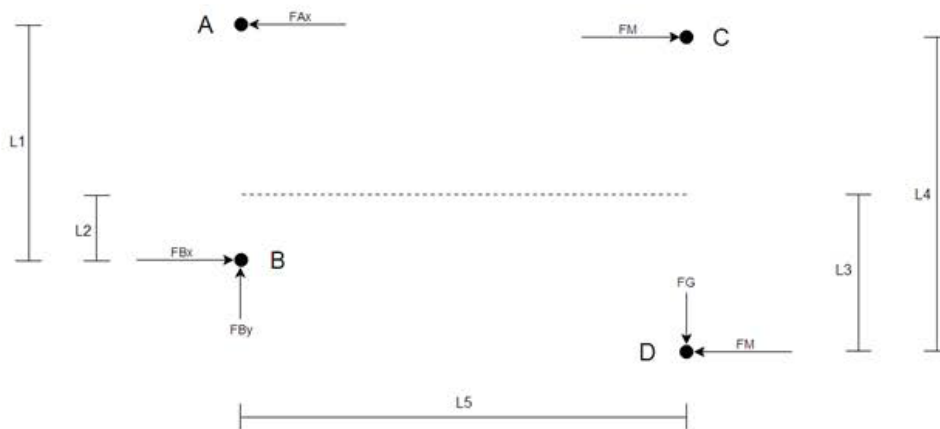
Moment totalt  $M_{l_{tot}} := M_{l_{egen}} + M_{l_{nytte}} = 3172.2 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$

Last og egenvekt  $F_{y1} := m_{e1} + m_v = 1029.7\text{N}$

## Moment og opplager i leddforbindelse #2

Lengde uten verktøy	$lt2 := lk + 3ll = 4380 \text{ mm}$
Egenvekt	$me2 := mk + 3 \cdot ml = 735.5 \text{ N}$
Moment fra egenvekt	$M2_{\text{egen}} := \frac{(me2 \cdot lt2)}{2} = 1610.7 \text{ N}\cdot\text{m}$
Moment fra verktøy	$M2_{\text{nytte}} := (lt2 + lv) \cdot mv = 472.2 \text{ N}\cdot\text{m}$
Moment totalt	$M2_{\text{tot}} := M2_{\text{egen}} + M2_{\text{nytte}} = 2082.9 \text{ N}\cdot\text{m}$
Last og egenvekt	$Fy2 := me2 + mv = 833.6 \text{ N}$

FBD Pitch ledd,  $\alpha = 0$  grader:



$$L1 := 60\text{mm} \quad L2 := 20\text{mm} \quad L3 := 42.5\text{mm} \quad L4 := 85\text{mm} \quad L5 := 115\text{mm}$$

## L1-0: Opplagerkrefter i pitch ledd #1

$$FG1 := Fy1 = 1029.7\text{N} \quad FM1 := \frac{M1_{\text{tot}}}{L4} = 37320.1\text{N}$$

Momentlikevekt gir:

$$\Sigma M_{B1} := FM1 \cdot (L3 + L2) + FM1 \cdot (L3 - L2) + FG1 \cdot L5 - FA1_x \cdot L1 = 0$$

$$FA1_x := \frac{(FM1 \cdot 2L3) + (FG1 \cdot L5)}{L1} = 54843.7\text{N}$$

$$\Sigma F_x := 0 \quad FB1_x := FA1_x = 54843.7\text{N}$$

$$\Sigma F_y := 0 \quad FB1_y := FG1 = 1029.7\text{N}$$

$$FB1 := \sqrt{FB1_x^2 + FB1_y^2} = 54853.4\text{N}$$

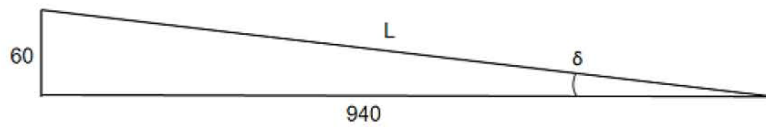
Vinkel mellom FB1 og x-aksen:

$$\eta_0 := \text{atan}\left(\frac{FB1_y}{FB1_x}\right) = 0.019$$

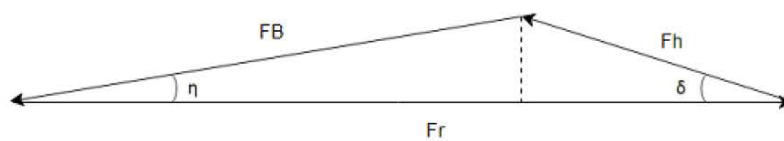
Kraftfordeling mellom rør og høydeaktuator (dersom dette design benyttes i opplagring)

L = Avstand mellom aktuatorens festepunkter

$\delta$  = vinkel mellom rørets akse og høydeaktuatorens akse



$$\delta_0 := \tan\left(\frac{60}{940}\right) = 0.064$$



$$Fh_{l0} := \frac{\sin(\eta_0)}{\sin(\delta_0)} \cdot FB1 = 16121\text{N}$$

$$Fr_{l0} := \frac{\sin(\pi - \eta_0 - \delta_0)}{\sin(\delta_0)} \cdot FB1 = 70931.8\text{N}$$



## L2-0: Opplagerkrefter i pitch ledd #2

$$FG2 := Fy2 = 833.6\text{N} \quad FM2 := \frac{M2_{\text{tot}}}{L4} = 24505.1\text{N}$$

Momentlikevekt gir:

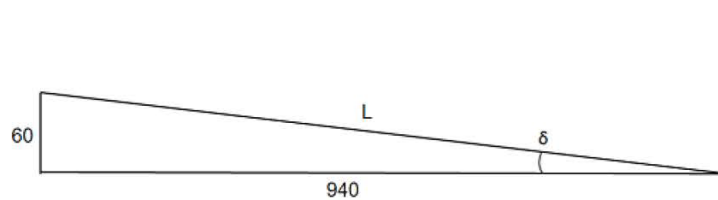
$$\Sigma M_{B1} := FM2 \cdot (L3 + L2) + FM2 \cdot (L3 - L2) + FG2 \cdot L5 - FA2_x \cdot L1 = 0$$

$$FA2_x := \frac{(FM2 \cdot 2L3) + (FG2 \cdot L5)}{L1} = 36313.2\text{N}$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad FB2_x := FA2_x = 36313.2\text{N}$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad FB2_y := FG2 = 833.6\text{N}$$

### Kraftfordeling mellom rør og høydeaktuator



L = Avstand mellom  
aktuatorens festepunkter

$\delta$  = vinkel mellom rørets akse og  
høydeaktuatorens akse

$$\delta_0 = 0.064$$

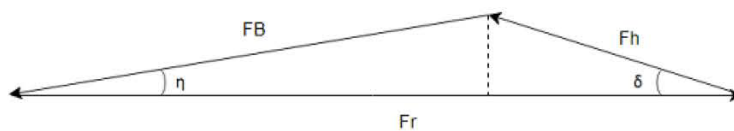
Tillegg fra egenvekt:

$$FB2_{yt} := FB2_y + \frac{ml}{2} = 931.632\text{N}$$

$$FB2_r := \sqrt{FB2_x^2 + FB2_{yt}^2} = 36325.2\text{N}$$

Vinkel mellom  $FB2_r$  og x-aksen:

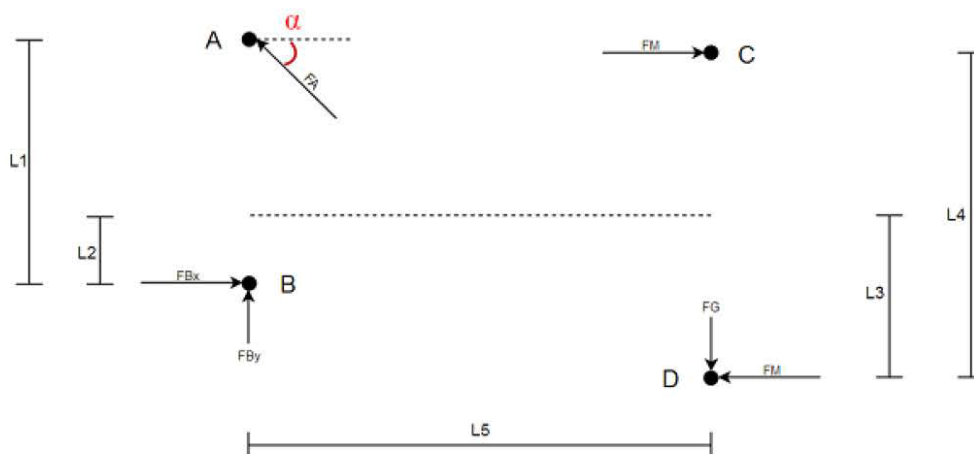
$$\eta_2 := \text{atan}\left(\frac{FB2_{yt}}{FB2_x}\right) = 0.026$$



$$F_{h2_0} := \frac{\sin(\eta_{2_0})}{\sin(\delta_0)} \cdot F_{B2_T} = 14585.7 \text{ N}$$

$$F_{r2_0} := \frac{\sin(\pi - \eta_{2_0} - \delta_0)}{\sin(\delta_0)} \cdot F_{B2_T} = 50869.1 \text{ N}$$

### L2-0: Opplagerkrefter i pitch ledd #2, $\alpha = -45$ grader



Punkt A:

$$F_{A2_{x45neg}} := F_{A2_x} = 36313.2 \text{ N}$$

$\alpha = 45$

$$F_{A2_{y45neg}} := F_{A2_{x45neg}} = 36313.2 \text{ N}$$

$$F_{A2_{r45neg}} := \sqrt{2 \cdot F_{A2_x}^2} = 51354.6 \text{ N}$$

Punkt B:

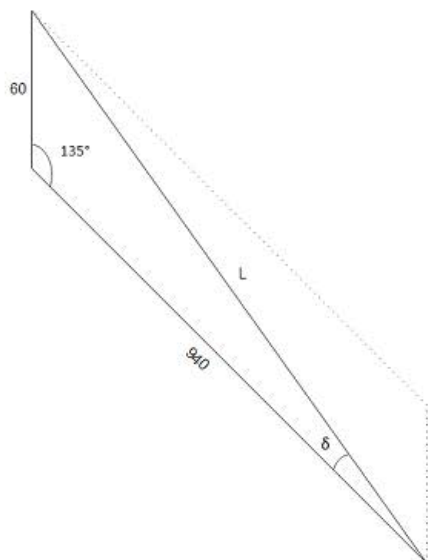
$\Sigma F_x = 0$

$$F_{B2_{x45neg}} := F_{A2_{x45neg}} = 36313.2 \text{ N}$$

$\Sigma F_y = 0$

$$F_{B2_{y45neg}} := F_{A2_{y45neg}} - F_{G2} = 35479.6 \text{ N}$$

## Kraftfordeling mellom rør og høydeaktuator



$L$  = Avstand mellom  
aktuatorens festepunkter

$\delta$  = vinkel mellom rørets akse og  
høydeaktuatorens akse

Tillegg fra egenvekt:

$$FB_{y45neg,t} := FB_{y45neg} - \frac{ml}{2} = 35381.6 \text{ N}$$

$$FB_{r45neg} := \sqrt{FB_{x45neg}^2 + FB_{y45neg,t}^2} = 50700.1 \text{ N}$$

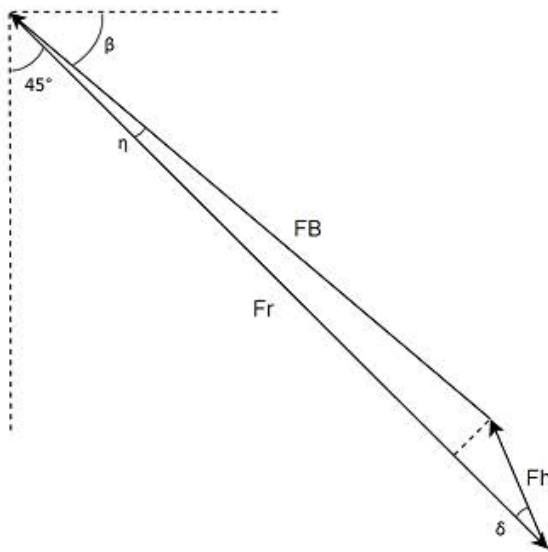
Vinkel mellom  $FB_{r45neg}$  og x-aksen:

$$\beta_{45neg} := \text{atan} \left( \frac{FB_{y45neg,t}}{FB_{x45neg}} \right) = 0.772$$

135 grader i radianer, for utregninger:  $\theta_{135} := \frac{3\pi}{4}$

$$L_{45neg} := \sqrt{(60)^2 + (940)^2 - (2 \cdot 60 \cdot 940 \cdot \cos(\theta_{135}))} \text{ mm} = 983.342 \text{ mm}$$

$$\delta_{45neg} := \text{asin} \left( \sin(\theta_{135}) \cdot \frac{60 \text{ mm}}{L_{45neg}} \right) = 0.043$$

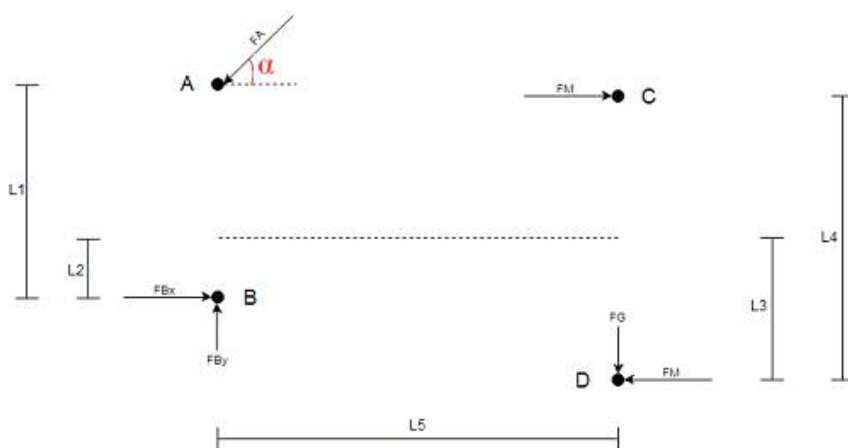


$$\eta_{245neg} := \left( \frac{\pi}{4} - \beta_{45neg} \right) = 0.013$$

$$F_{h245neg} := \frac{\sin(\eta_{245neg})}{\sin(\delta_{45neg})} \cdot F_{B2r45neg} = 15268.5 \text{ N}$$

$$F_{r245neg} := \frac{\sin(\pi - \eta_{245neg} - \delta_{45neg})}{\sin(\delta_{45neg})} \cdot F_{B2r45neg} = 65950.2 \text{ N}$$

### L2-0: Opplagerkrefter i pitch ledd #2, $\alpha = +45$ grader



Punkt A:

$$\alpha = 45$$

$$FA_{x45pos} := FA_{2x} = 36313.2\text{N}$$

$$FA_{y45pos} := FA_{x45pos} = 36313.2\text{N}$$

$$FA_{r45pos} := \sqrt{2 \cdot FA_{2x}^2} = 51354.6\text{N}$$

Punkt B:

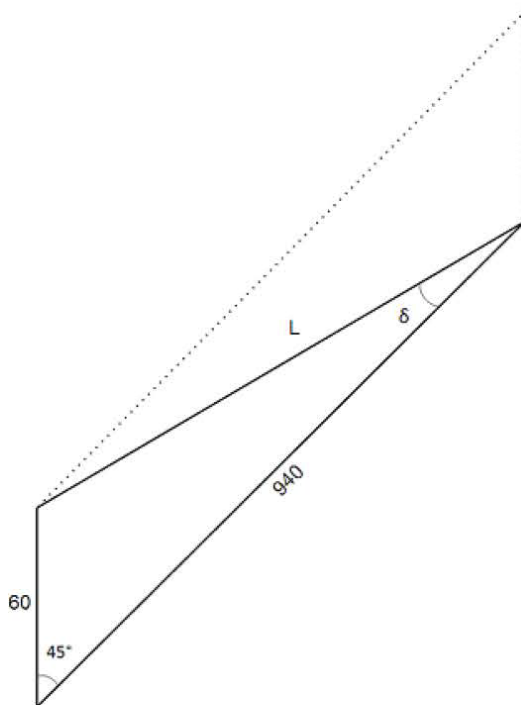
$$\Sigma F_x = 0$$

$$FB_{x45pos} := FA_{x45pos} = 36313.2\text{N}$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$FB_{y45pos} := FA_{y45pos} + FG_2 = 37146.8\text{N}$$

### Kraftfordeling mellom rør og høydeaktuator



L = Avstand mellom  
aktuatorens festepunkter

$\delta$  = vinkel mellom rørets akse og  
høydeaktuatorens akse

Tillegg fra egenvekt:

$$FB_{y45pos.t} := FB_{y45pos} + \frac{ml}{2} = 37244.8\text{N}$$

$$FB_{r45pos} := \sqrt{FB_{x45pos}^2 + FB_{y45pos.t}^2} = 52017.6\text{N}$$

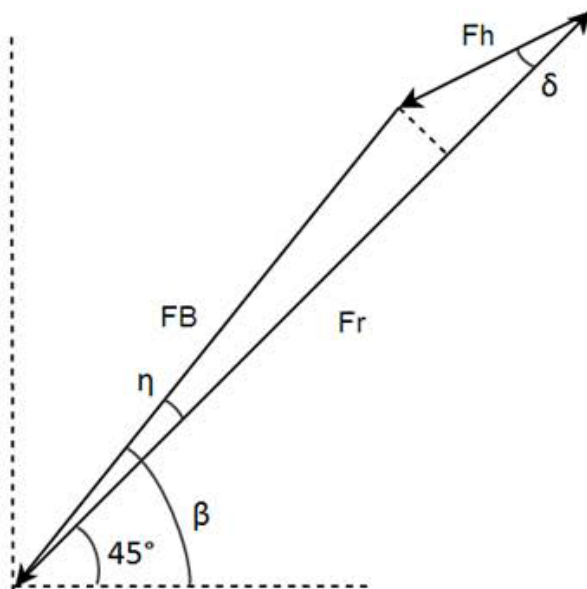
Vinkel mellom  $FB_{r45neg}$  og x-aksen:

$$\beta_{45pos} := \text{atan}\left(\frac{FB_{y45pos.t}}{FB_{x45pos}}\right) = 0.798$$

45 grader i radianer, for utregninger:  $\theta_{45} := \frac{\pi}{4}$

$$L_{45pos} := \sqrt{(60)^2 + (940)^2 - (2 \cdot 60 \cdot 940 \cdot \cos(\theta_{45}))} \text{ mm} = 898.576 \text{ mm}$$

$$\delta_{45pos} := \text{asin}\left(\sin(\theta_{45}) \cdot \frac{60 \text{ mm}}{L_{45pos}}\right) = 0.047$$

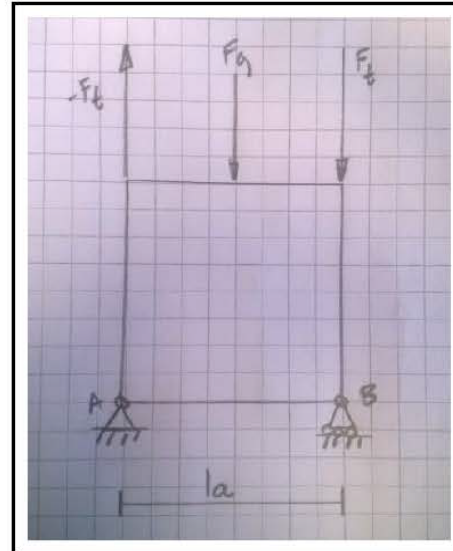
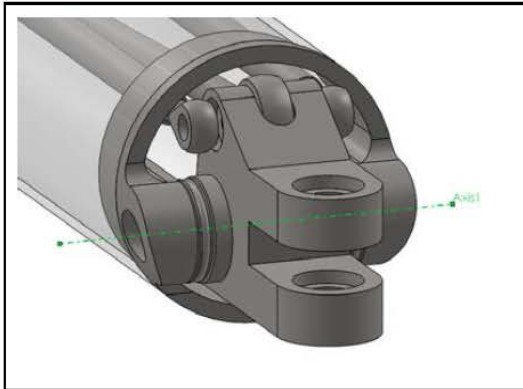
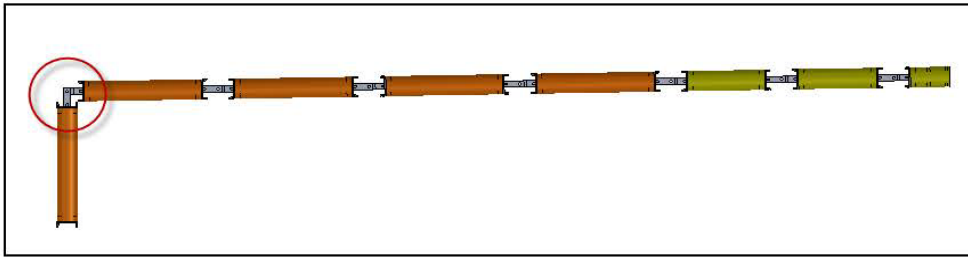


$$\eta_{245pos} := \beta_{45pos} - \frac{\pi}{4} = 0.013$$

$$F_{h245pos} := \frac{\sin(\eta_{245pos})}{\sin(\delta_{45pos})} \cdot FB_{r45pos} = 13952.4 \text{ N}$$

$$F_{r245pos} := \frac{\sin(\pi - \eta_{245pos} - \delta_{45pos})}{\sin(\delta_{45pos})} \cdot FB_{r45neg} = 64279.9 \text{ N}$$

## Opplagerkrefter i ledd #2 med 90 grader vinkelutslag



Antar at alle krefter tas opp i stiveste aksling

Akselavstand  $l_a := 80\text{mm}$

$$F_{\text{torsjon}} := \frac{M2_{\text{tot}}}{l_a} = 26036.66\text{ N}$$

$$F_a := \frac{F_{y2}}{2} - F_{\text{torsjon}} = -25619.87\text{ N}$$

$$F_b := \frac{F_{y2}}{2} + F_{\text{torsjon}} = 26453.44\text{ N}$$

For rør:

Akselavstand  $l_{aR} := 110\text{mm}$

$$F_{\text{torsjon.R}} := \frac{M2_{\text{tot}}}{l_{aR}} = 18935.7\text{ N}$$

$$F_{aR} := \frac{F_{y2}}{2} - F_{\text{torsjon.R}} = -18518.97\text{ N}$$

$$F_{bR} := \frac{F_{y2}}{2} + F_{\text{torsjon.R}} = 19352.53\text{ N}$$

For yaw ledd i første leddforbindelse:

$$F_{aY} := \frac{F_{y1}}{2} - F_{\text{torsjon}R} = -18420.9\text{N}$$

$$F_{bY} := \frac{F_{y1}}{2} + F_{\text{torsjon}R} = 19450.6\text{N}$$

### Oppsummering:

Ledd 1, 0 grader yaw, 0 grader pitch:

Opplagerreaksjoner i pitch ledd:

$$FA1_x = 54843.7\text{N}$$

$$FB1_x = 54843.7\text{N}$$

$$FB1_y = 1029.7\text{N}$$

Fordeling i høydeaktuator, rør og strekkstag:

$$F_{h1_0} = 16121\text{N}$$

$$F_{r1_0} = 70931.8\text{N}$$

$$F_{s1_0} := FA1_x = 54843.7\text{N}$$

Ledd 2, 90 grader yaw, 0 grader pitch:

Torsjonsmoment og opplagerkrefter:

$$M_{\text{torsjon}} := M2_{\text{tot}} = 2082.9 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$F_a = -25619.9\text{N}$$

$$F_b = 26453.4\text{N}$$

Ledd 2, 0 grader pitch:

Opplagerreaksjoner i pitch ledd:

$$FA2_x = 36313.2\text{N}$$

$$FB2_x = 36313.2\text{N}$$

$$FB2_y = 833.6\text{N}$$

Fordeling i høydeaktuator, rør og strekkstag:

$$F_{h2_0} = 14585.7\text{N}$$

$$F_{r2_0} = 50869.1\text{N}$$

$$F_{s2_0} := FA2_x = 36313.2\text{N}$$



## Ledd2, -45 grader pitch:

Opplagerreaksjoner i pitch ledd:

$$FA2_{x45neg} = 36313.2N$$

$$FA2_{y45neg} = 36313.2N$$

$$FB2_{x45neg} = 36313.2N$$

$$FB2_{y45neg} = 35479.6N$$

Fordeling i høydeaktuator, rør og strekkstag:

$$Fh2_{45neg} = 15268.5N$$

$$Fr2_{45neg} = 65950.2N$$

$$Fs2_{45neg} := FA2_{r45neg} = 51354.6N$$

## Ledd2, +45 grader pitch:

Opplagerreaksjoner i pitch ledd:

$$FA2_{x45pos} = 36313.2N$$

$$FA2_{y45pos} = 36313.2N$$

$$FB2_{x45pos} = 36313.2N$$

$$FB2_{y45pos} = 37146.8N$$

Fordeling i høydeaktuator, rør og strekkstag:

$$Fh2_{45pos} = 13952.4N$$

$$Fr2_{45pos} = 64279.9N$$

$$Fs2_{45pos} := FA2_{r45pos} = 51354.6N$$

## Krefter i yaw ledd:

Pitch 0 grader:

Fra strekkstag:  $Fs0_x := FA2_x = 36313.2N$

$$Fs0_y := 0$$

Fra aktuator:  $Fa0_x := Fh2_0 \cdot \cos(\delta_0) = 14555.9N$

$$Fa0_y := Fh2_0 \cdot \sin(\delta_0) = 931.6N$$

Fra rør:  $Fr0_x := Fr2_0 = 50869.1N$

Øvre knutepunkt:

$$A0_x := Fs0_x + Fa0_x = 50869.1N$$

$$A0_y := Fs0_y + Fa0_y + \frac{ml}{4} = 980.7N$$

Nedre knutepunkt:

$$B0_x := Fr0_x = 50869.1N$$

$$B0_y := \frac{ml}{4} = 49N$$

Pitch -45 grader:

Fra strekkstag:  $F_{s45neg_x} := FA_{2_x} = 36313.2N$

$$F_{s45neg_y} := FA_{2_x} = 36313.2N$$

Fra aktuator:  $F_{a45neg_x} := F_{h245neg} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} + \delta_{45neg}\right) = 10320.6N$

$$F_{a45neg_y} := F_{h245neg} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + \delta_{45neg}\right) = 11252.3N$$

Fra rør:  $F_{r45neg_x} := F_{r245neg} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 46633.8N$

$$F_{r45neg_y} := F_{r245neg} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = 46633.8N$$

Øvre knutepunkt:

$$A_{45neg_x} := F_{s45neg_x} + F_{a45neg_x} = 46633.8N$$

$$A_{45neg_y} := F_{s45neg_y} + F_{a45neg_y} + \frac{m_l}{4} = 47614.5N$$

Nedre knutepunkt:

$$B_{45neg_x} := F_{r45neg_x} = 46633.8N$$

$$B_{45neg_y} := F_{r45neg_y} + \frac{m_l}{4} = 46682.9N$$

Pitch +45 grader:

Fra strekkstag:  $F_{s45pos_x} := FA_{2_x} = 36313.2N$

$$F_{s45pos_y} := FA_{2_x} = 36313.2N$$

Fra aktuator:  $F_{a45pos_x} := F_{h245pos} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \delta_{45pos}\right) = 10320.6N$

$$F_{a45pos_y} := F_{h245pos} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \delta_{45pos}\right) = 9389N$$

Fra rør:  $F_{r45pos_x} := F_{r245pos} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 45452.8N$

$$F_{r45pos_y} := F_{r245pos} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = 45452.8N$$

Øvre knutepunkt:

$$A_{45pos_x} := F_{s45pos_x} + F_{a45pos_x} = 46633.8N$$

$$A_{45pos_y} := F_{s45pos_y} + F_{a45pos_y} + \frac{m_l}{4} = 45751.2N$$

Nedre knutepunkt:

$$B_{45pos_x} := F_{r45pos_x} = 45452.8N$$

$$B_{45pos_y} := F_{r45pos_y} + \frac{m_l}{4} = 45501.8N$$

## **Vedlegg D    Materialdata**



## UDDEHOLM ORVAR SUPREME

Uddeholm Orvar Supreme can be regarded as an “all-round” steel used in several application areas. Except for hot work application areas the steel is also used in moulds for plastics and as a material in high stressed axles.

The high degree of purity and the very fine structure shows improvement in dies and components where high mechanical and thermal stresses are involved.

© UDDEHOLMS AB

No part of this publication may be reproduced or transmitted for commercial purposes without permission of the copyright holder.

---

This information is based on our present state of knowledge and is intended to provide general notes on our products and their uses. It should not therefore be construed as a warranty of specific properties of the products described or a warranty for fitness for a particular purpose.

Classified according to EU Directive 1999/45/EC

For further information see our "Material Safety Data Sheets".

Edition 8, Revised 09.2013, not printed

The latest revised edition of this brochure is the English version, which is always published on our web site [www.uddeholm.com](http://www.uddeholm.com)



SS-EN ISO 9001  
SS-EN ISO 14001

## General

Uddeholm Orvar Supreme is a chromium-molybdenum-vanadium-alloyed steel which is characterized by:

- High level of resistance to thermal shock and thermal fatigue
- Good high-temperature strength
- Excellent toughness and ductility **in all directions**
- Good machinability and polishability
- Excellent through-hardening properties
- Good dimensional stability during hardening

Typical analysis %	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	0.39	1.0	0.4	5.2	1.4	0.9
Standard specification	Premium A13 H13, W.Nr. 1.2344					
Delivery condition	Soft annealed to approx. 180 HB					
Colour code	Orange					

### Improved tooling performance

The name "Supreme" implies that by special processing techniques and close control, the steel attains high purity and a very fine structure. Further, Uddeholm Orvar Supreme shows significant improvements in isotropic properties compared to conventionally produced AISI H13 grades.

These improved isotropic properties are particularly valuable for tooling subjected to high mechanical and thermal fatigue stresses, e.g. die casting dies, forging tools and extrusion tooling. In practical terms, tools may be used at somewhat higher working hardnesses (+1 to 2 HRC) without loss of toughness. Since increased hardness slows down the formation of heatchecking cracks, improved tool performance can be expected.

Uddeholm Orvar Supreme meets the North American Die Casting Association (NADCA) #207-2008 for premium high quality H-13 die steel.

## Applications

### Tools for die casting

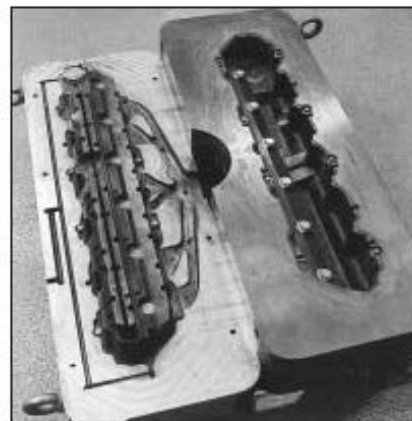
Part	Tin, lead zinc alloys HRC	Aluminium, magnesium alloys, HRC	Copper alloys HRC
Dies	46-50	42-48	(Q RO 90 S)
Fixed inserts			
cones	46-52	44-48	(Q RO 90 S)
Sprue parts	48-52	46-48	(Q RO 90 S)
Nozzles	35-42	42-48	(Q RO 90 S)
Ejector pins (nitrided)	46-50	46-50	46-50
Plunger, shot sleeve (normally nitrided)	42-46	42-48	(Q RO 90 S)
Austenitising temperature	1020-1030 C (1870-1895 F)		1040-1050 C (1900-1920 F)

### Tools for extrusion

Part	Aluminium, magnesium alloys, HRC	Copper alloys HRC	Stainless steel HRC
Dies	44-50	43-47	45-50
Reducers, die holders, liners, dummy blocks, stems	41-50	40-48	40-48
Austenitising temperature (approx.)	1020-1030 C (1870-1895 F)		1040-1050 C (1900-1920 F)

### Tools for hot pressing

Material	Aust. temp. (approx.)	HRC
Aluminium, magnesium	1020-1030 C (1870-1895 F)	44-52
Copper alloys	1040-1050 C (1900-1920 F)	44-52
Steel	1040-1050 C (1900-1920 F)	40-50



### Moulds for plastics

Part	Austenitizing temp.	HRC
Injection moulds Compression/ transfer moulds	1020–1030°C (1870–1885°F)  Tempering 1. ≥ 550°C (1020°F) or 2. 250°C (480°F)	40–52 50–53

### Other applications

Application	Austenitizing temp.	HRC
Severe cold punching, scrap shears	1020–1030°C (1870–1885°F) Tempering 250°C (480°F)	50–53
Hot shearing	1020–1030°C (1870–1885°F) Tempering 1. 250°C (480°F) or 2. 575–600°C (1070–1110°F)	50–53 45–50
Shrink rings (e.g. for cemented carbide dies)	1020–1030°C (1870–1885°F) Tempering 575–600°C (1070–1110°F)	45–50
Wear- resisting parts	1020–1030°C (1870–1885°F) Tempering 575°C (1070°F) Nitriding	Core 50–52 Surface ~1000HV <sub>1</sub>

### Properties

All specimens are taken from the centre of a 407 × 127 mm (16" × 5") bar. Unless otherwise is indicated all specimens were hardened 30 minutes at 1025°C (1875°F), quenched in air and tempered 2 + 2 h at 610°C (1130°F). The hardness were 45 ± 1 HRC.

### Physical data

Data at room and elevated temperatures.

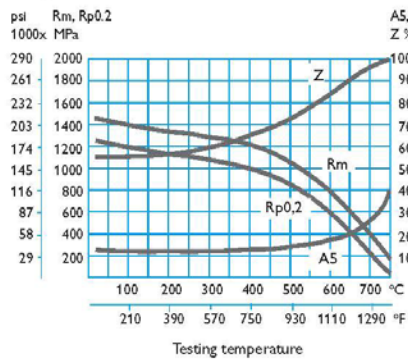
Temperature	20°C (68°F)	400°C (750°F)	600°C (1110°F)
Density kg/m <sup>3</sup> lbs/in <sup>3</sup>	7 800 0.281	7 700 0.277	7 600 0.274
Modulus of elasticity MPa psi	210 000 30.5 × 10 <sup>6</sup>	180 000 26.1 × 10 <sup>6</sup>	140 000 20.3 × 10 <sup>6</sup>
Coefficient of thermal expansion per °C from 20°C °F from 68°F	–	12.6 × 10 <sup>-6</sup> 7.0 × 10 <sup>-6</sup>	13.2 × 10 <sup>-6</sup> 7.3 × 10 <sup>-6</sup>
Thermal conductivity W/m °C Btu in/(ft <sup>2</sup> h°F)	25 176	29 204	30 211

### Mechanical properties

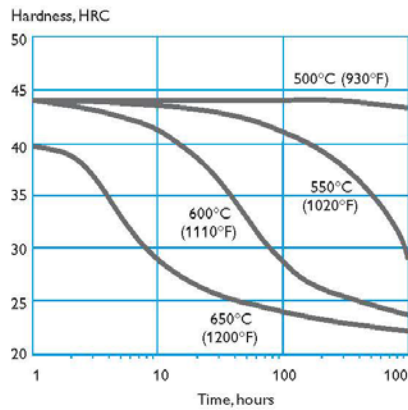
Approximate tensile strength at room temperature.

Hardness	52 HRC	45 HRC
Tensile strength R <sub>m</sub>	1820 MPa 185 kp/mm <sup>2</sup> 117 tsi 263 000 psi	1420 MPa 145 kp/mm <sup>2</sup> 92 tsi 206 000 psi
Yield strength R <sub>p0.2</sub>	1520 MPa 155 kp/mm <sup>2</sup> 98 tsi 220 000 psi	1280 MPa 130 kp/mm <sup>2</sup> 83 tsi 185 000 psi

APPROXIMATE STRENGTH AT ELEVATED TEMPERATURES  
Longitudinal direction.

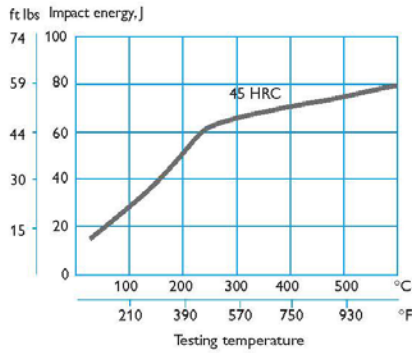


EFFECT OF TIME AT HIGH TEMPERATURES ON HARDNESS



EFFECT OF TESTING TEMPERATURE ON IMPACT ENERGY

Charpy V specimens, short transverse direction.



Stress relieving

After rough machining the tool should be heated through to 650°C (1200°F), holding time 2 hours. Cool slowly to 500°C (930°F), then freely in air.

Hardening

Pre-heating temperature: 600–850°C (1110–1560°F), normally in two pre-heating steps.  
Austenitizing temperature: 1020–1050°C (1870–1920°F), normally 1020–1030°C (1870–1885°F).

Temperature		Soaking* time minutes	Hardness before tempering
°C	°F		
1025	1875	30	53±2 HRC
1050	1920	15	54±2 HRC

\* Soaking time = time at hardening temperature after the tool is fully heated through

Heat treatment—general recommendations

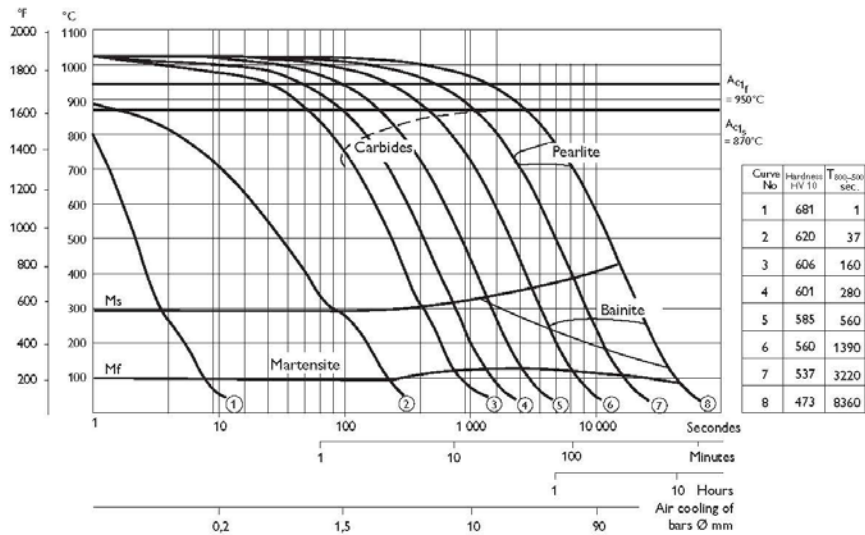
Soft annealing

Protect the steel and heat through to 850°C (1560°F). Then cool in the furnace at 10°C (20°F) per hour to 650°C (1200°F), then freely in air.

Protect the part against decarburization and oxidation during hardening.

CCT GRAPH

Austenitizing temperature 1020°C (1870°F). Holding time 30 minutes.



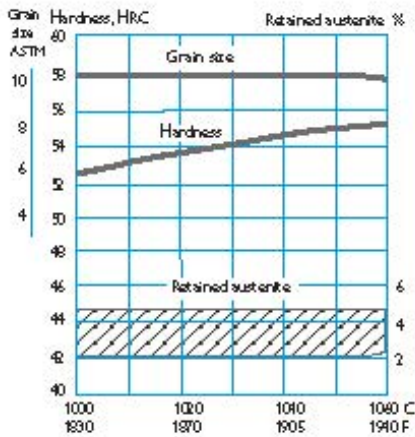


**Quenching media**

- High speed gas/circulating atmosphere
- Vacuum (high speed gas with sufficient positive pressure). An interrupted quench is recommended where distortion control and quench cracking are a concern
- Martempering bath or fluidized bed at 450–550° C (840–1020° F), then cool in air
- Martempering bath or fluidized bed at approx. 180–220° C (360–430° F) then cool in air
- Warm oil

Note 1: Temper the tool as soon as its temperature reaches 50–70° C (120–160° F).  
 Note 2: In order to obtain the optimum properties for the tool, the cooling rate should be fast, but not at a level that gives excessive distortion or cracks.

**HARDNESS, GRAIN SIZE AND RETAINED AUSTENITE AS FUNCTIONS OF AUSTENITIZING TEMPERATURE**

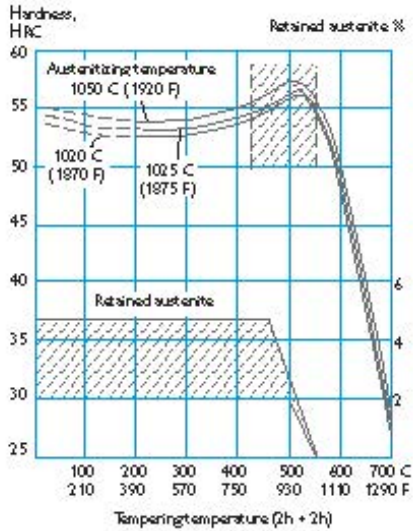


**Tempering**

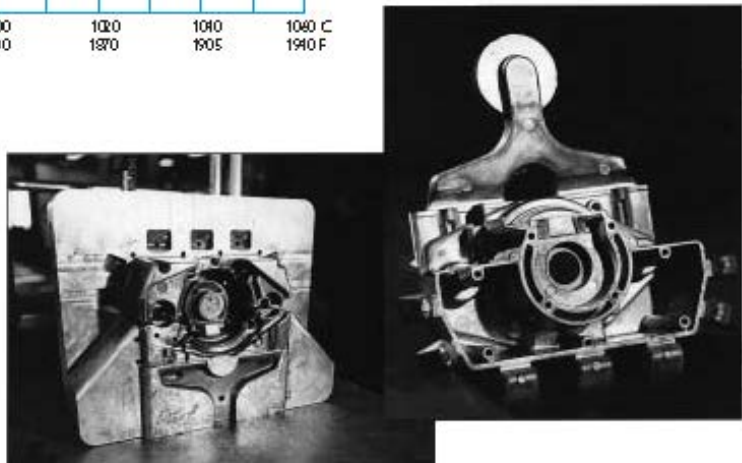
Choose the tempering temperature according to the hardness required by reference to the tempering graph. Temper minimum twice with intermediate cooling to room temperature. Lowest tempering temperature 250° C (480° F). Holding time at temperature minimum 2 h.

To avoid "temper brittleness", do not temper in the range 425–550° C (800–1020° F), see graph.

**TEMPERING GRAPH**

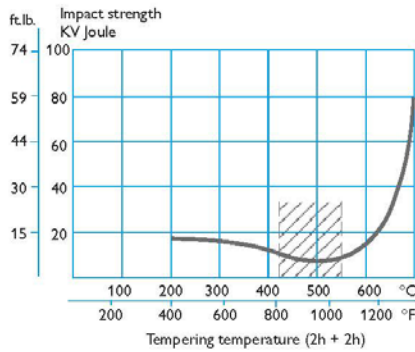


Above tempering curves are obtained after heat treatment of samples with a size of 15 x 15 x 40 mm, cooling in forced air. Lower hardness can be expected after heat treatment of tools and dies due to factors like actual tool size and heat treatment parameters.



APPROXIMATE IMPACT STRENGTH AT DIFFERENT TEMPERING TEMPERATURES

Charpy V specimens, short transverse direction.



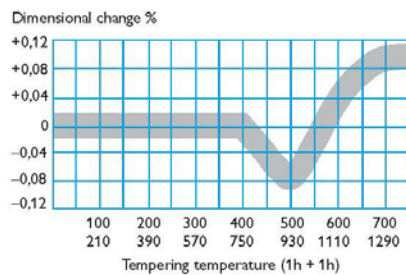
Tempering within the range 425–550°C (800–1020°F) is normally not recommended due to the reduction in toughness properties.

Dimensional changes during hardening

Sample plate, 100 x 100 x 25 mm, 4" x 4" x 1".

		Width %	Length %	Thickness %
Oil hardened from 1020°C (1870°F)	Min.	-0.08	-0.06	±0
	Max.	-0.15	-0.16	+0.30
Air hardened from 1020°C (1870°F)	Min.	-0.02	-0.05	±0
	Max.	+0.03	+0.02	+0.05
Vac hardened from 1020°C (1870°F)	Min.	+0.01	-0.02	+0.08
	Max.	+0.02	-0.04	+0.12

Dimensional changes during tempering



Note: The dimensional changes in hardening and tempering should be added.

Nitriding and nitrocarburizing

Nitriding and nitrocarburizing result in a hard surface layer which is very resistant to wear and erosion. The nitrided layer is, however, brittle and may crack or spall when exposed to mechanical or thermal shock, the risk increasing with layer thickness. Before nitriding, the tool should be hardened and tempered at a temperature at least 25–50°C (45–90°F) above the nitriding temperature.

Nitriding in ammonia gas at 510°C (950°F) or plasma nitriding in a 75% hydrogen/25% nitrogen mixture at 480°C (895°F) both result in a surface hardness of about 1100 HV<sub>0.2</sub>. In general, plasma nitriding is the preferred method because of better control over nitrogen potential; in particular, formation of the so-called white layer, which is not recommended for hot-work service, can readily be avoided. However, careful gas nitriding can give perfectly acceptable results.

Uddeholm Orvar Supreme can also be nitrocarburized in either gas or salt bath. The surface hardness after nitrocarburizing is 900–1000 HV<sub>0.2</sub>.

DEPTH OF NITRIDING

Process	Time	Depth	
		mm	inch
Gas nitriding at 510°C (950°F)	10 h	0.12	0.0047
	30 h	0.20	0.0079
Plasma nitriding at 480°C (895°F)	10 h	0.12	0.0047
	30 h	0.18	0.0071
Nitrocarburizing – in gas at 580°C (1075°F)	2.5 h	0.11	0.0043
	1 h	0.06	0.0024

Nitriding to case depths >0.3 mm (>0.012 inch) is not recommended for hot work applications.

Uddeholm Orvar Supreme can be nitrided in the soft-annealed condition. The hardness and depth of case will, however, be reduced somewhat in this case.

## Machining recommendations

The cutting data below are to be considered as guiding values, which must be adapted to existing local conditions.

More information can be found in the Uddeholm publication "Cutting data recommendation".

### Turning

Cutting data parameters	Turning with carbide		Turning with high speed steel Fine turning
	Rough turning	Fine turning	
Cutting speed ( $v_c$ ) m/min f.p.m.	200–250 660–820	250–300 820–985	25–30 82–100
Feed ( $f$ ) mm/r i.p.r.	0.2–0.4 0.008–0.016	0.05–0.2 0.002–0.008	0.05–0.3 0.002–0.012
Depth of cut ( $a_p$ ) mm inch	2–4 0.08–0.16	0.5–2 0.02–0.08	0.5–2 0.02–0.08
Carbide designation ISO	P20–P30 Coated carbide	P10 Coated carbide or cermet	–

### Drilling

#### HIGH SPEED STEEL TWIST DRILL

Drill diameter mm	inch	Cutting speed, $v_c$		Feed, $f$	
		m/min	f.p.m.	mm/r	i.p.r.
– 5	– 3/16	16–18*	52–59*	0.05–0.15	0.002–0.006
5–10	3/16–3/8	16–18*	52–59*	0.15–0.20	0.006–0.008
10–15	3/8–5/8	16–18*	52–59*	0.20–0.25	0.008–0.010
15–20	5/8–3/4	16–18*	52–59*	0.25–0.35	0.010–0.014

\* For coated high speed steel drill  $v_c = 28–30$  m/min (92–98 f.p.m.)

#### CARBIDE DRILL

Cutting data parameters	Type of drill		
	Indexable insert	Solid carbide	Carbide tip <sup>1)</sup>
Cutting speed ( $v_c$ ) m/min f.p.m.	220–240 720–785	130–160 425–525	80–110 260–360
Feed ( $f$ ) mm/r i.p.r.	0.03–0.12 <sup>2)</sup> 0.001–0.005 <sup>2)</sup>	0.08–0.20 <sup>2)</sup> 0.003–0.008 <sup>2)</sup>	0.15–0.25 <sup>3)</sup> 0.006–0.010 <sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Drill with replaceable or brazed carbide tip

<sup>2)</sup> Feed rate for drill diameter 20–40 mm (0.8"–1.6")

<sup>3)</sup> Feed rate for drill diameter 5–20 mm (0.2"–0.8")

<sup>4)</sup> Feed rate for drill diameter 10–20 mm (0.4"–0.8")

## Milling

#### FACE AND SQUARE SHOULDER MILLING

Cutting data parameters	Milling with carbide	
	Rough milling	Fine milling
Cutting speed ( $v_c$ ) m/min f.p.m.	180–260 590–850	260–300 850–985
Feed ( $f$ ) mm/tooth inch/tooth	0.2–0.4 0.008–0.016	0.1–0.2 0.004–0.008
Depth of cut ( $a_p$ ) mm inch	2–5 0.08–0.20	–2 –0.08
Carbide designation ISO	P20–P40 Coated carbide	P10–P20 Coated carbide or cermet

#### END MILLING

Cutting data parameters	Type of end mill		
	Solid carbide	Carbide indexable insert	High speed steel
Cutting speed ( $v_c$ ) m/min f.p.m.	160–200 525–660	170–230 560–755	35–40 <sup>1)</sup> 115–130 <sup>1)</sup>
Feed ( $f$ ) mm/tooth inch/tooth	0.03–0.20 <sup>2)</sup> 0.001–0.008 <sup>2)</sup>	0.08–0.20 <sup>2)</sup> 0.003–0.008 <sup>2)</sup>	0.05–0.35 <sup>2)</sup> 0.002–0.014 <sup>2)</sup>
Carbide designation ISO	–	P20, P30	–

<sup>1)</sup> For coated high speed steel end mill  $v_c = 55–60$  m/min (180–195 f.p.m.)

<sup>2)</sup> Depending on radial depth of cut and cutter diameter

## Grinding

A general grinding wheel recommendation is given below. More information can be found in the Uddeholm brochure "Grinding of Tool Steel" and can also be obtained from the grinding wheel manufacturer.

#### WHEEL RECOMMENDATION

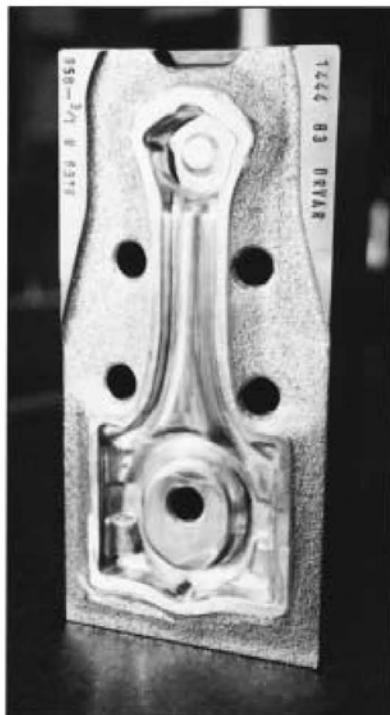
Type of grinding	Soft annealed condition	Hardened condition
Face grinding straight wheel	A 46 HV	A 46 HV
Face grinding segments	A 24 GV	A 36 GV
Cylindrical grinding	A 46 LV	A 60 KV
Internal grinding	A 46 JV	A 60 IV
Profile grinding	A 100 KV	A 120 KV

## Welding

Welding of tool steel can be performed with good results if proper precautions are taken regarding elevated temperature, joint preparation, choice of consumables and welding procedure.

Welding method	TIG	MMA
Working temperature	325–375°C 620–710°F	325–375°C 620–710°F
Filler metal	QRO 90 TIG-WELD DIEVAR TIG-WELD	QRO 90 WELD
Cooling rate	20–40°C/h (40–70°F/h) the first 2–3 h then freely in air.	
Hardness after welding	50–55 HRC	50–55 HRC
<i>Heat treatment after welding</i>		
Hardened condition	Temper at 10–20°C (20–40°F) below the original tempering temperature.	
Soft annealed condition	Soft-anneal the material at 850°C (1560°F) in protected atmosphere. Then cool in the furnace at 10°C (20°F) per hour to 650°C (1200°F) then freely in air.	

More detailed information can be found in the Uddeholm brochure “Welding of Tool Steel”.



## Electrical-discharge machining

If spark-erosion is performed in the hardened and tempered condition, the white re-cast layer should be removed mechanically e.g. by grinding or stoning. The tool should then be given an additional temper at approx. 25°C (50°F) below the previous tempering temperature.

## Hard-chromium plating

After plating, parts should be tempered at 180°C (360°F) for 4 hours within 4 hours of plating to avoid the risk of hydrogen embrittlement.

## Polishing

Uddeholm Orvar Supreme has good polishability in the hardened and tempered condition because of a very homogeneous structure. This coupled with a low level of non metallic inclusions, due to ESR process, ensures good surface finish after polishing.

*Note:* Each steel grade has an optimum polishing time which largely depends on hardness and polishing technique. Overpolishing can lead to a poor surface finish, “orange peel” or pitting.

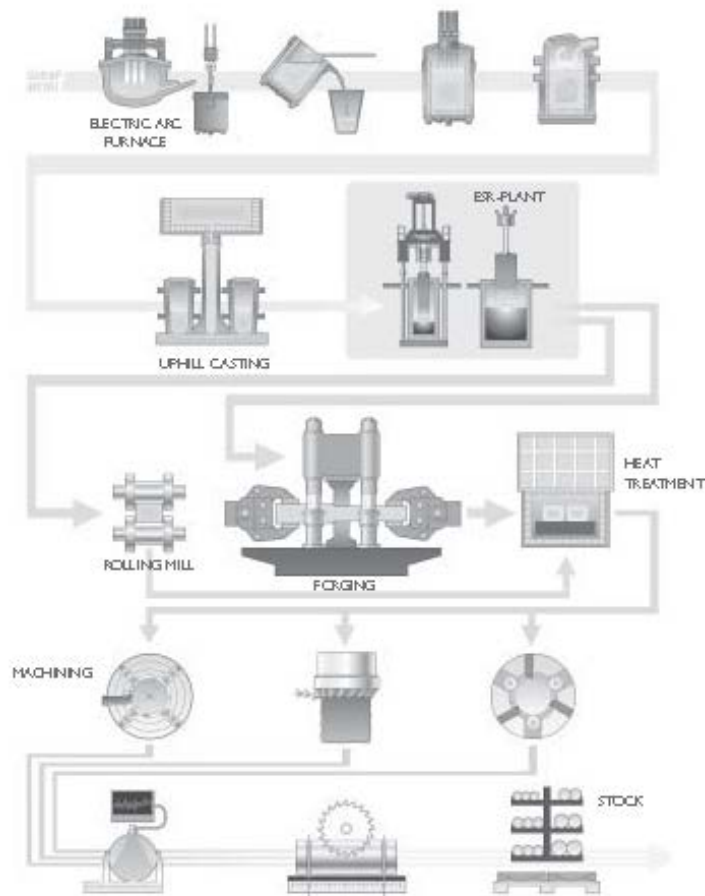
Further information is given in the Uddeholm publication “Polishing of mould steel”.

## Photo-etching

Uddeholm Orvar Supreme is particularly suitable for texturing by the photo-etching method. Its high level of homogeneity and low sulphur content ensures accurate and consistent pattern reproduction.

## Further information

Please contact your local Uddeholm office for further information on the selection, heat treatment, application and availability of Uddeholm tool steel.



### The ESR Tool Steel Process

The starting material for our tool steel is carefully selected from high quality recyclable steel. Together with ferroalloys and slag formers, the recyclable steel is melted in an electric arc furnace. The molten steel is then tapped into a ladle.

The de-slagging unit removes oxygen-rich slag and after the de-oxidation, alloying and heating of the steel bath are carried out in the ladle furnace. Vacuum de-gassing removes elements such as hydrogen, nitrogen and sulphur.

#### ESR PLANT

In uphill casting the prepared moulds are filled with a controlled flow of molten steel from the ladle.

From this, the steel can go directly to our rolling mill or to the forging press, but also to our ESR furnace where our most sophisticated steel grades are melted once again in an electro slag remelting process. This is done by melting a consumable electrode immersed in an overheated slag bath. Controlled solidification in the steel bath results in an ingot of high homogeneity, thereby

removing macro segregation. Melting under a protective atmosphere gives an even better steel cleanliness.

#### HOT WORKING

From the ESR plant, the steel goes to the rolling mill or to our forging press to be formed into round or flat bars.

Prior to delivery all of the different bar materials are subjected to a heat treatment operation, either as soft annealing or hardening and tempering. These operations provide the steel with the right balance between hardness and toughness.

#### MACHINING

Before the material is finished and put into stock, we also rough machine the bar profiles to required size and exact tolerances. In the lathe machining of large dimensions, the steel bar rotates against a stationary cutting tool. In peeling of smaller dimensions, the cutting tools revolve around the bar.

To safeguard our quality and guarantee the integrity of the tool steel we perform both surface- and ultrasonic inspections on all bars. We then remove the bar ends and any defects found during the inspection.



# Ti-6Al-4V (Grade 5)

# DATA SHEET

## TITANIUM ALLOY

### TYPICAL APPLICATIONS

Aero-engine components, Airframe components, Marine equipment, Offshore oil & gas equipment, Power generation industry, Autosport components, Medical equipment.

### PRODUCT DESCRIPTION

Ti-6Al-4V (Grade 5), classed as an alpha-beta alloy, is the most widely used of the high strength titanium alloys. The alloy combines its good mechanical strength and low density (4.42 kg/dm<sup>3</sup>) with excellent corrosion resistance in many media. Grade 5 titanium is fully heat treatable (solution heat treatment plus aging) in sections up to 25mm and can be employed up to around 400°C.

Ti-6Al-4V ELI (Grade 23) has a reduced oxygen content (0.13% max.) compared with Grade 5. This confers improved ductility and fracture toughness with some reduction in mechanical strength. Uses include fracture critical airframe structures and for offshore tubulars.

### CORROSION RESISTANCE

Grade 5 titanium offers excellent resistance to many marine and offshore oil & gas environments. Titanium and its alloys resist a wide range of acid conditions being highly resistant to oxidising acids, possessing useful resistance to reducing acids and offering good

resistance to most organic acids at lower concentrations and temperatures. Titanium should not be used with red fuming nitric acid and is rapidly attacked by hydrofluoric acid. The addition of 0.05% palladium (grade 24), 0.1% ruthenium (grade 29) and 0.05% palladium and 0.5% nickel (grade 25) significantly increases corrosion resistance in reducing acid chloride and sour environments, raising the threshold temperature to well over 200°C.

### MATERIAL SPECIFICATIONS

- UNS R56400
- ASTM B348 Grade 5
- BS 2TA11
- AMS 4911
- AMS 4928
- MIL-STD-2154

### FABRICATION

Weldability – fair

Specified bend radius for <0.070 in. x thickness - 4.5

Specified bend radius for >0.070 in. x thickness - 5.0  
(typical values)

### AVAILABILITY

Bar, wire, sheet, plate, extrusions, forgings, seamless pipe/tube.

### CHEMICAL COMPOSITION (Bar to ASTM B348 Grade 5)

Weight %	N	C	H	Fe	O	Al	V
Min.						5.5	3.5
Max.	0.05	0.08	0.015	0.40	0.20	6.75	4.5

### MECHANICAL PROPERTIES (Bar to ASTM B348 Grade 5)

	Minimum	Typical
UTS, MPa	895	1,000
0.2%PS, MPa	828	910
Elongation, % in 4D	10	18
Reduction of area, %	25	-
Elastic modulus, GPa	-	114
Hardness, HRC	-	36
Charpy V-notch impact, J	-	24

### TECHNICAL SALES ASSISTANCE

Our resident team of highly qualified metallurgists and engineers will be pleased to assist further on any technical topic.

### Smiths High Performance

Unit O, Stratton Business Park, London Road, Biggleswade, Bedfordshire SG18 8QB United Kingdom

Tel: +44 (0) 1767 604 708

Fax: +44 (0) 01767 312 885

Email: sales@smithshp.com

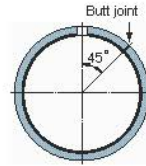
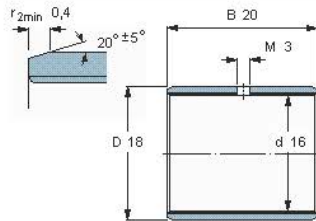
Website: www.smithshp.com

*All information in this data sheet is based on approximate testing and is stated to the best of our knowledge and belief. It is presented apart from contractual obligations and does not constitute any guarantee of properties or of processing or application possibilities in individual cases. Our warranties and liabilities are stated exclusively in our terms of trading. © Smiths Metal Centres Ltd 2010*

## **Vedlegg E    Standardkomponenter**

Composite dry sliding bushings, metric dimensions

Principal dimensions			Basic load ratings		Mass	Designation
d	D	B	dynamic C	static C0		
mm	18	20	kN		kg	-
<b>16</b>			38	80	0,006	PCM 161820 M



Specific load factor K 120  
Material constant  $K_M$  1900





# SKF Bearing Calculator

---

**Calculation summary report**

Published on 2014-05-28 09.43.51 GMT

---

SKF General Conditions for technical assistance and advice (available at [www.skf.com](http://www.skf.com)) shall apply to this report.  
SKF accepts no variation of any of these conditions unless confirmed in writing by SKF.

® SKF is a registered trademark of the SKF Group.

© SKF Group 2013

The contents of this publication are the copyright of SKF and may not be reproduced, duplicated, copied, transferred, distributed, stored, modified, downloaded or otherwise exploited for any commercial use without the prior written approval of SKF.

## Table of Contents

Designation - PCM 161820 M

1. Basic rating life for composite dry sliding bearings

### Bearing Data

Bearing designation	d	D	B	C	Co
PCM 161820 M	16 mm	18 mm	20 mm	38 kN	80 kN

### 1. Basic rating life for composite dry sliding bearings

#### Result

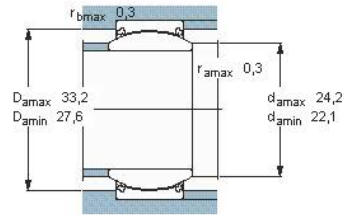
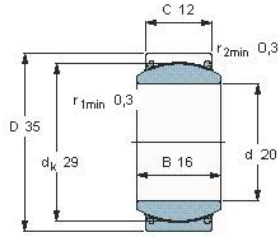
G <sub>h</sub> Basic rating life	1269 hour
p Specific bearing load	105.8 N/mm <sup>2</sup>
v Mean sliding velocity	0 m/s

#### Input Parameters

F <sub>r</sub> Radial load	33.5 kN
Operating temperature Bearing outer ring	0 °C
β Half the angle of oscillation	45 °
Type of Load Select from list	Point load
f Frequency of oscillation or rotational speed	6 min <sup>-1</sup>
t Time taken to pass through complete oscillation (4β)	10 sec
R <sub>a</sub> Surface roughness of pin	0.5 μm

Radial spherical plain bearings requiring maintenance, Maintenance-free radial spherical plain bearings

Principal dimensions				Angle of tilt	Basic load ratings		Designation
d	D	B	C	±	dynamic C	static C0	
mm				degrees	kN		-
<b>20</b>	35	16	12	9	83	140	GE 20 TXE-2LS



**Specific load factor**  
K 300  
**Material constant**  
K<sub>M</sub> 770/4000/40000



# SKF Bearing Calculator

---

**Calculation summary report**

Published on 2014-05-08 10.49.03 GMT

---

SKF General Conditions for technical assistance and advice (available at [www.skf.com](http://www.skf.com)) shall apply to this report.  
SKF accepts no variation of any of these conditions unless confirmed in writing by SKF.

® SKF is a registered trademark of the SKF Group.

© SKF Group 2013

The contents of this publication are the copyright of SKF and may not be reproduced, duplicated, copied, transferred, distributed, stored, modified, downloaded or otherwise exploited for any commercial use without the prior written approval of SKF.

## Table of Contents

Designation - GE 20 TXG3E-2LS

1. Basic rating life for spherical plain bearings and rod ends

### Bearing Data

Bearing designation	d	D	B	C	Co
GE 20 TXG3E-2LS	20 mm	35 mm	16 mm	83 kN	140 kN

#### 1. Basic rating life for spherical plain bearings and rod ends

#### Result

<b>G<sub>h</sub></b> Basic rating life	1014.2 hour
<b>G</b> Basic rating life, No. of oscillations	365109.2
<b>P</b> Equivalent dynamic bearing load	70 kN
<b>p</b> Specific bearing load	253 N/mm <sup>2</sup>
<b>v</b> Mean sliding velocity	0 m/s

#### Input Parameters

<b>F<sub>r</sub></b> Radial load	70 kN
<b>F<sub>a</sub></b> Axial load	0 kN
<b>Operating temperature</b> Bearing outer ring	10 °C
<b>β</b> Half the angle of oscillation	45 °
<b>Type of Load</b> Select from list	Constant direction load
<b>f</b> Frequency of oscillation or rotational speed	6 min <sup>-1</sup>
<b>t</b> Time taken to pass through complete oscillation (4β)	10 sec



# SKF Bearing Calculator

---

**Calculation summary report**

Published on 2014-05-27 08.54.13 GMT

---

SKF General Conditions for technical assistance and advice (available at [www.skf.com](http://www.skf.com)) shall apply to this report.  
SKF accepts no variation of any of these conditions unless confirmed in writing by SKF.

® SKF is a registered trademark of the SKF Group.

© SKF Group 2013

The contents of this publication are the copyright of SKF and may not be reproduced, duplicated, copied, transferred, distributed, stored, modified, downloaded or otherwise exploited for any commercial use without the prior written approval of SKF.



## Table of Contents

Designation - GE 20 TXE-2LS

1. Basic rating life for spherical plain bearings and rod ends

### Bearing Data

Bearing designation	d	D	B	C	Co
GE 20 TXE-2LS	20 mm	35 mm	16 mm	83 kN	140 kN

#### 1. Basic rating life for spherical plain bearings and rod ends

#### Result

<b>G<sub>h</sub></b> Basic rating life	559.4 hour
<b>G</b> Basic rating life, No. of oscillations	201372.1
<b>P</b> Equivalent dynamic bearing load	63.5 kN
<b>p</b> Specific bearing load	229.4 N/mm <sup>2</sup>
<b>v</b> Mean sliding velocity	0.01 m/s

#### Input Parameters

<b>F<sub>r</sub></b> Radial load	61 kN
<b>F<sub>a</sub></b> Axial load	1 kN
<b>Operating temperature</b> Bearing outer ring	0 °C
<b>β</b> Half the angle of oscillation	90 °
<b>Type of Load</b> Select from list	Constant direction load
<b>f</b> Frequency of oscillation or rotational speed	6 min <sup>-1</sup>
<b>t</b> Time taken to pass through complete oscillation (4β)	10 sec





Welcome to the Blue Wave Marine Catalogue.

#### Information and contact

You are kindly asked to contact your local Blue Wave dealer/distributor, or Blue Wave direct, should you have any questions or need further documentation.

#### Blue Wave A/S

H.C. Øerstedsvej 2  
DK 6100 Haderslev  
Denmark

Mail: [bluewave@bluewave.dk](mailto:bluewave@bluewave.dk)  
Homepage: [www.bluewave.dk](http://www.bluewave.dk)

Phone: + 45 73 22 14 14  
Fax: + 45 73 22 14 24

#### Blue Wave - Australia Pty Ltd

Unit 3 / 75 Casua Drive  
Varsity Lakes QLD 4227  
Australia

Mail: [bwa@bluewaveaus.com](mailto:bwa@bluewaveaus.com)  
Homepage: [www.bluewaveaus.com](http://www.bluewaveaus.com)

Phone: + 61 7 5593 8178  
Fax: + 61 7 5593 7365

### Blue Wave Rigging Hardware

We have been in business since 1932 with headquarter located in Haderslev, Denmark. Blue Wave A/S is currently in its third generation, as a family owned and lead Manufacturing Company. The Blue Wave crews consist of 60 dedicated and skilled employees, some of them has been with us for more than 20 years.

We are currently among the top three largest manufacturers of high quality stainless steel rigging hardware in the world. Our focus has for years been the Marine, Architectural and Industrial sectors.

In the fifties Blue Wave mainly produced shackles and thimbles, later on came the wire fittings and in the nineties the rod program was introduced. By constant development and investments in high tech production machinery, focus on customer needs and wishes, a well known brand name has been established.

Today Blue Wave's product range covers one of the most extensive ranges of stainless steel wire fittings, ranging from 2mm to 32mm.

Key factor for Blue Wave's future development and production, is a continued development driven by customer demand. Applying efficient production, good design, low weight and optimal strength to its products.

Blue Wave strives to become the number one chosen supplier of rigging hardware.

## Wire Rigging Facts and Information

### Facts and information - working with wire fittings..

When planning a wire construction the ultimate break load, as well as the work load, must be calculated, as it will determine the minimum wire size and maybe the wire construction needed.

Blue Wave's fitting's, unless otherwise stated, are constructed after termination to meet 90% of the break load on the wire ropes that are standard in the market. PLEASE NOTE : in order to guarantee safety in a wire construction you should calculate a safety factor of 2-3 on static constructions and a minimum of 5 on dynamic constructions. As a general rule working loads should never exceed 20% of the break loads stated in this catalogue.

For further details ask your Blue Wave/Marine distributor or contact Blue Wave A/S.



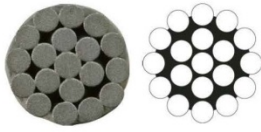
### Break loads

UNF THREAD SIZE	WIRE Ø METR.	WIRE Ø INCH	BREAK LOAD
1/4"	3	1/8"	1300 KG
1/4"	4	5/32"	1300 KG
5/16"	4	5/32"	1700 KG
5/16"	5	3/16"	2200 KG
3/8"	5	3/16"	2400 KG
3/8"	6	-	3400 KG
3/8"	-	1/4"	3400 KG
7/16"	6	-	4600 KG
7/16"	7	9/32"	4600 KG
1/2"	6	-	5400 KG
1/2"	-	1/4"	5200 KG
1/2"	7	9/32"	6100 KG
1/2"	8	5/16"	6100 KG
5/8"	8	5/16"	8700 KG
5/8"	-	3/8"	9900 KG
5/8"	10	-	9900 KG
3/4"	-	3/8"	10200 KG
3/4"	10	-	9700 KG
3/4"	12	-	11400 KG
3/4"	-	1/2"	12900 KG
7/8"	14	-	15900 KG
1"	16	5/8"	19400 KG
1-1/8"	19	3/4"	27600 KG
1-1/4"	22	7/8"	34600 KG
1-3/8"	26	1"	49000 KG

### Swage dimensions

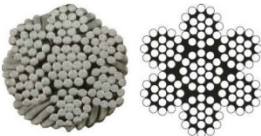
Wire Ø mm	Wire Ø Inch	Inside diameter in mm (+/-0,2)	Outside diameter in mm (+/-0,10)	Depth in mm (+/-1,5)	After Swaging mm
2,0	1/16"	2,2	5,50	32	4,7-4,82
2,5	3/32"	2,8	5,50	32	4,7-4,82
3,0	1/8"	3,5	6,35	38	5,44-5,56
4,0	5/32"	4,4	7,50	45	6,23-5,35
5,0	3/16"	5,3	9,00	51	7,03-7,95
5,5	7/32"	5,8	10,80	59	8,35-9,50
6,0	-	6,5	12,58	64	10,95-11,12
6,3	1/4"	6,8	12,58	64	10,95-11,12
7,0	9/32"	7,5	14,20	70	12,5-12,7
8,0	5/16"	8,4	16,00	83	14,07-14,3
9,5	3/8"	10,0	17,80	89	15,7-15,9
10,0	-	10,5	17,80	89	15,7-15,9
12,0	-	12,5	20,00	105	17,6-17,8
13,0	1/2"	13,5	21,40	120	18,82-19,05
14,0	-	14,8	25,00	140	22,0-22,23
16,0	-	17,0	28,00	160	25,15-25,40
19,0	-	20,0	34,50	200	31,44-31,75
22,0	-	23,5	40,50	230	36,2-36,50
26,0	-	27,5	46,00	280	40,97-41,28

**S.S. WIRE ROPE**  
Stainless Steel - AISI 316



1 x 19 AISI 316 BS MA 29 : 1982

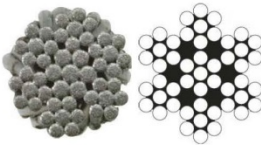
ART. NO.	DIM. MM	TENSILE STRENGTH KN	CA. KG/100 M
WR11902	2,0	3,3	1,99
WR11925	2,5	5,15	3,10
WR11903	3,0	7,42	4,47
WR11904	4,0	13,20	7,95
WR11905	5,0	20,60	12,40
WR11906	6,0	29,69	17,90
WR11907	7,0	40,40	24,30
WR11908	8,0	52,00	31,80
WR11910	10,0	78,80	49,70
WR11912	12,0	109,70	71,30



7 x 19 AISI 316 BS MA 29 : 1982

ART. NO.	DIM. MM	TENSILE STRENGTH KN	CA. KG/100 M
WR71902 #	2,0	2,08	1,58
WR71925 #	2,5	3,26	2,40
WR71903	3,0	4,69	3,84
WR71904	4,0	8,34	6,49
WR71905	5,0	13,00	9,14
WR71906	6,0	18,76	13,80
WR71908	8,0	33,30	23,87
WR71910	10,0	52,10	40,30
WR71912	12,0	75,00	55,00

# = According to DIN 3060



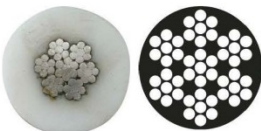
7 x 7 AISI 316 BS MA 29 : 1982

ART. NO.	DIM MM	TENSILE STRENGTH KN	CA. KG/100
WR70702	2	2,25	1,71
WR70725	2,5	3,52	2,6
WR70703	3	5,07	3,85
WR70704	4	9,01	7
WR70705	5	14,08	10,5
WR70706	6	20,28	14,6
WR70708	8	36,05	25,5
WR70710	10	56,30	38,8



1 x 19 AISI 316 COATED WHITE

ART. NO.	DIM MM	TENSILE STRENGTH KN	CA. KG/100 M
CW119460	4,0-6,0	13,20	9,50
CW119480	4,0-8,0	13,20	13,50
CW119580	5,0-8,0	20,60	17,20



7 x 7 AISI 316 COATED WHITE

ART. NO.	DIM MM	TENSILE STRENGTH KN	CA. KG/100 M
CW707460	4,0-6,0	9,01	8,75
CW707480	4,0-8,0	9,01	9,50

Note: The user is responsible for choosing the proper cable diameter and for correct assembly.

BLUE WAVE deliver wire rope in following standard reel sizes:

For 125 Meter Reels Please add 1 Eg. WR119021 = 1x19, Dia. 2mm x 125 M.

For 250 Meter Reels Please add 2 WR119022 = 1x19, Dia. 2mm x 250 M.

For 500 Meter Reels Please add 3 WR119023 = 1x19, Dia. 2mm x 500 M.

## EYE TERMINAL

High Polished Stainless Steel - AISI 316

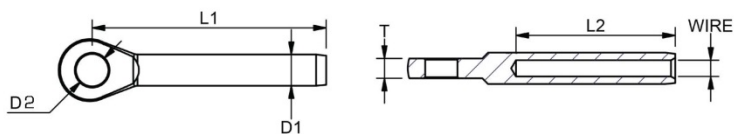
The Blue Wave Eye Terminals all features, engraved wire size, Blue Wave logo, and swage depth marking for faster and easier swaging.



ART. NO.	WIRE	D1	D2	L1	L2	T	BL/KG	KG/100	PACK
190002	2,0 1/16"	5,5	5,5	49	32	3	1200	0,9	100
190025	2,5 3/32"	5,5	5,5	49	32	3	1000	0,8	100
190003	3,0 1/8"	6,35	6,5	58	38	4	1300	1,3	100
190004	4,0 5/32"	7,5	8,5	67	45	5	1700	2,3	100
190005	5,0 3/16"	9,0	10,5	79	51	6	2400	3,9	25
190055	7/32"	10,8	10,5	85	59	6	3900	6,0	25
190006	6,0	12,58	13,0	94	64	8	5500	8,7	10
190006X	6,0	12,58	13,2	105	64	10	5500	13,2	10
190063	1/4"	12,58	13,0	95	64	8	5200	8,5	10
190063X	1/4"	12,58	13,2	105	64	10	5200	11,0	10
190007	7,0 9/32"	14,2	13,0	104	70	9	6800	11,5	10
190007X	7,0 9/32"	14,2	13,2	110	70	10	6800	13,5	10
190008	8,0 5/16"	16,0	14,5	124	83	10	8700	17,0	10
190008X	8,0 5/16"	16,0	16,5	141	83	12	8700	23,5	10
190095	3/8"	17,8	16,3	137	89	11	10200	25,3	10
190095X	3/8"	17,8	19,5	165	100	16	10200	38,1	10
190010	10,0	17,8	16,3	137	89	11	9700	25,0	10
190010BW	10,0	17,8	16,3	165	100	16	9700	38,0	10
190010X	10,0	17,8	19,5	165	100	16	9700	38,0	10
190012	12,0	20,0	19,3	156	105	15	11400	41,5	5
* 190012X	12,0	21,4	19,3	178	120	15	14200	41,0	5
* 190013	1/2"	21,4	19,3	178	120	15	13300	41,0	5
190014	14,0	25,0	23,0	206	140	18	15900	75,6	5
190016	16,0 5/8"	28,0	26,0	232	160	20	19000	102,0	5
190019	19,0	34,5	28,5	302	200	25	31000	209,0	BULK
190022	22,0	40,4	33,0	348	230	30	42000	314,0	BULK
190026	26,0	46,0	36,0	400	280	30	53000	425,0	BULK

The user is responsible for choosing the proper cable diameter and for correct assembly

\* Note: Terminal OD. = 21,4 mm



## **Vedlegg F    Prototyping**

Se vedlagt perm.