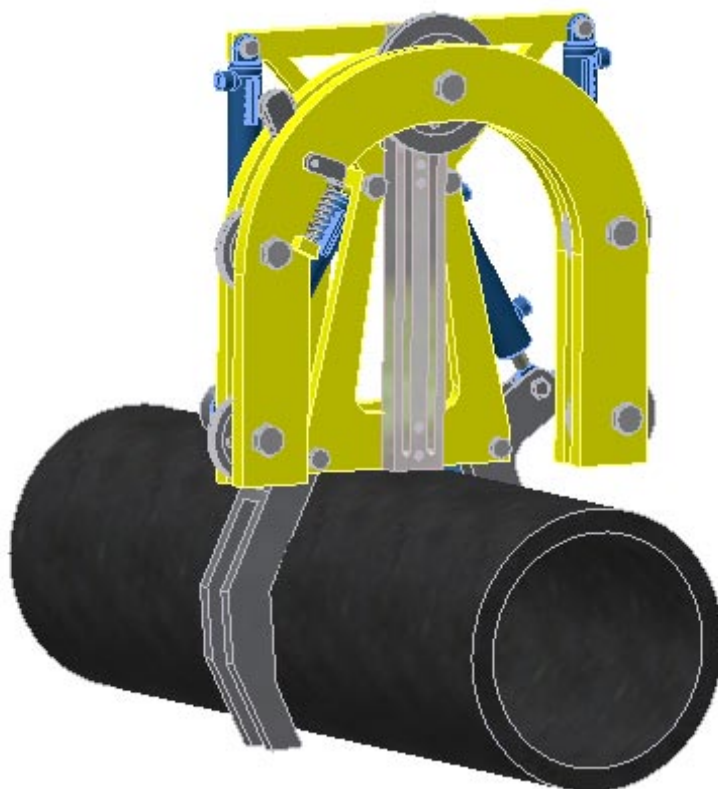




HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Design av ROV-vennlig kutteverktøy



Bacheloroppgave utført ved
Høgskolen Stord/Haugesund – Studie for ingeniørfag
Maskin, Energi og Prosessteknikk

Av: Anders Vestvik
Dag Hovland

Kand nr: 2
Kand nr: 32

Haugesund

Våren 2010

BACHELOROPPGAVE

Studentenes navn: Anders Vestvik og Dag Hovland

Linje & studieretning Energi og Prosess

Oppgavens tittel: *Design av ROV-vennlig kutteverktøy*

Oppgavetekst:

I forbindelse med fjerningsprosjekter i Nordsjøen blir det gjerne brukt kutteverktøy som ikke er særlig ROV-vennlige. På bakgrunn av dette skal et ROV-vennlig kutteverktøy designes med tanke på rask og effektiv operasjon. Ulike metoder for å utføre et kutt av rør opp til 12" med en godstykkelse på opptil 1" ned til en dybde på 300m skal undersøkes. Metoden som viser seg å være mest lovende skal benyttes til å designe kutteverktøyet. Verktøyet skal tegnes med DAK-verktøy og styrkeberegnes både for hånd og med dataverktøy.

Endelig oppgave gitt: Tirsdag 9.mars 2010

Innleveringsfrist: Fredag 7.mai 2010 kl. 12.00

Intern veileder Jens Christian Lindaas

Ekstern veileder Jostein Førland (DeepOcean)

**Godkjent av
studieansvarlig:
Dato:**

Forord

Rapporten er skrevet som del av faget Hovedprosjekt (ING 3006), som avslutning for en 3-årig maskiningeniørutdanning ved Høyskolen Stord/Haugesund. I tillegg til rapporten kommer en muntlig fremstilling den 15. juni 2010 og en A3 plakat som presenterer prosjektet.

Målet for oppgaven er at studentene skal vise at de kan bruke de kunnskapene de har tilegnet seg gjennom studiet samt at de er i stand til å arbeide selvstendig med en gitt problemstilling. Oppgaven vi valgte har i hovedsak testet oss i fagene knyttet til fysikk, statikk, materiallære og konstruksjon.

I forkant av prosjektet kontaktet vi DeepOcean og fikk tilsendt en liste over problemstillinger de kunne tenke seg å få undersøkt. Etter å ha diskutert litt innbyrdes hadde vi et kort møte med Jostein Førland og Øyvind Vikse, der vi kom frem til at oppgaven med å undersøke muligheten for bruk av nye kuttemetoder under vann og design av et kutteverktøy for ROV ville være mest interessant for oss.

Vi vil rette en stor takk til:

- Intern veileder Jens C. Lindaas
- Ekstern veileder Jostein Førland
- Karl Tønnesen, Proserv
- Jens Hansen, Akutt
- Thomas Breien, Norse Cutting & Abandonment
- Eric Stiles, IPG Photonics

Innholdsfortegnelse

Innhold

Forord	iii
Sammendrag	vii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Målsetting	2
1.3 Metodikk, hjelpemidler, verktøy og dataprogrammer	2
1.4 Avgrensninger/spesielle problemer	3
2 Sammenligning av verktøyprinsipper	4
2.1 Kutteprinsipper	4
2.2 Plasmakutting	4
2.3 Laser	8
2.4 Hydraulisk giljotinkutting	11
2.5 Båndsag	12
2.6 Diamantwire	13
2.7 Roterende bladfres	15
2.8 Vannkutting	16
Valg av verktøyprinsipper og begrunnelse for dette	18
3 Grovskisser av verktøy/idegenerering	20
3.1 Skisser/tegninger	20
3.2 Grovberegninger	27
3.2.1 Hydrostatisk trykk på 300 m:	27
3.2.2 Nødvendig volumstrøm olje for å drive diamantwire kutter:	27
3.2.3 Omtrentlig energiforbruk vannkutting med suspensjon:	27
4 Valg av endelig verktøytype og begrunnelse	28
5 Skisser av alternativer til endelige løsninger	29
6 Endelig valg av løsning og begrunnelse	31
7 Detaljkonstruksjon av endelig verktøy	32
7.1 Endelig DAK-modell	32
7.2 Beregninger for hånd	34
7.2.1 Maksimal kraft Gripeklo sylinder:	34
7.2.2 Maksimal kraft wirebøyle sylinder:	34
7.2.3 Nødvendig turtall til motor for å drive wiren:	34
7.2.4 Dreiemoment for motor:	35
7.2.5 Effekt for motor:	35
7.2.6 Spenning i snitt av klo	35
7.2.7 Snitt "C":	39
7.2.8 Snitt av kutterbøyle:	40
7.2.9 Knekking wirebøyle sylinder:	41
7.2.10 Knekking gripeklo sylinder:	43
7.2.11 Avskjæring av skruer:	44
7.2.12 Hulltrykkspenning:	47
7.2.13 Levetid wire:	49

7.2.14	Vekt i vann ferdig verktøy:.....	49
7.3	Databeregninger.....	50
7.4	Sammenligning av beregningsverdier	53
8	Avsluttende diskusjon	54
9	Konklusjon	54
	Referanser.....	I

Figurliste

Figur 1.1.1	Estimerte utgifter til decom-prosjekter for Engelsk sektor[1]	1
Figur 1.1.2	Fjerning av offshoreinstallasjon [2]	2
Figur 2.2.1	Tradisjonell plasmakutter [3]	4
Figur 2.2.2	Plasmakutter med dekk-gass [3]	6
Figur 2.2.3	MAX200 plasmakutter transformator [5]	6
Figur 2.3.1	Prinsippskisse for laser	8
Figur 2.3.2	Reaktiv laserkutting [8].....	9
Figur 2.3.3	Fiberlaser kabinett [9].....	10
Figur 2.4.1	Hydraulisk giljotinkutter.....	11
Figur 2.5.1	Kutting av 11 ¾" rør med bånd-sag [10]	12
Figur 2.6.1	Diamantwire kutting [10].....	13
Figur 2.6.2	Typisk oppbygning av wiren [11].....	13
Figur 2.7.1	Kutting av rør med roterende blad-fres [14]	15
Figur 2.8.1	Vannkutting med injeksjon i dysen [16].....	16
Figur 2.8.2	Prinsippskisse for AWJ med suspensjon av sandpartiklene	17
Figur 3.1.1	Hydraulisk klo for fastholding av rør. Prinsipp nr.1	20
Figur 3.1.2	Hydraulisk klo sett fra siden	21
Figur 3.1.3	Hydraulisk klo for fastholding av rør. Prinsipp nr.2.....	22
Figur 3.1.4	Klo prinsipp nr.2 sett ovenfra	23
Figur 3.1.5	Klo prinsipp nr.2 sett fra siden.....	24
Figur 3.1.6	Bånd-sag med klo sett fra siden	25
Figur 3.1.7	Bånd-sag med klo.....	26
Figur 3.2.1	Alternativ 1 klo for fastholding av kutteverktøy til rør. Åpen posisjon	29
Figur 3.2.2	Alternativ 1 klo for fastholding av kutteverktøy til rør. Lukket posisjon.....	29
Figur 3.2.3	Alternativ 1 utforming kutteverktøy. Åpen posisjon	30
Figur 3.2.4	Alternativ 1 utforming kutteverktøy. Lukket posisjon	30
Figur 3.2.5	Alternativ 2 klo for fastholding av kutteverktøy til rør.	31
Figur 7.1.1	Kutteverktøy åpne klør	32
Figur 7.1.2	Kutteverktøy lukkede klør	32
Figur 7.1.3	Kutteverktøy i posisjon for utført kutt	33
Figur 7.1.4	Kutteverktøy låst på rør i posisjon for utført kutt	33
Figur 7.2.1	Krefter på klo	36
Figur 7.2.2	Snitt av klo	37
Figur 7.2.3	Snitt 2 av kloen	38
Figur 7.2.4	Snitt "C"	39
Figur 7.2.5	Snitt av kuttebøyle	40

Figur 7.2.6 Snitt wirebøyle sylinder	41
Figur 7.2.7 Snitt gripeklo sylinder.....	43
Figur 7.2.8 Krefter om opplagringspunkt for klo	45
Figur 7.2.9 Krefter på drivhjulskrue.....	47
Figur 7.3.1 Spenninger i enkeltklo	50
Figur 7.3.2 Spenninger i Wirebøyle	50
Figur 7.3.3 Spenninger i dobbeltklo	51
Figur 7.3.4 Spenninger i hoveddel.....	51

Tabell 2.2.1 Sammenligning av forskjellige gasskombinasjoner [4]	5
Tabell 2.3.1 Laser hovedtyper	8
Tabell 7.3.1 Spenninger nedre løpehjul.....	52
Tabell 7.4.1 Sammenligning databeregninger og håndberegninger	53
Tabell 7.4.2 Sammenligning av hulltrykk	53

Sammendrag

Ved fjerningsprosjekter kan det være ønskelig å ha tilgjengelig et ROV-basert kutteverktøy som raskt kan kutte små rør, uten at det binder opp noen av fartøyets kraner. Oppgaven tar sikte på å finne en kuttemetode som egner seg for et slikt verktøy og videre designe det.

Første del av oppgaven består av en kartlegging av kutteprinsipper. Noen av prinsippene brukes i dag under vann, mens andre hovedsakelig brukes på land. For de førstnevnte har en sett på størrelsen på utstyret både på ROV og på dekk, samt kuttehastighet og effektbehov. For de sistnevnte har en i tillegg sett på muligheten for å bruke disse under vann, utfordringer dette vil gi, samt fordeler og ulemper sett i forhold til de metodene som brukes i dag.

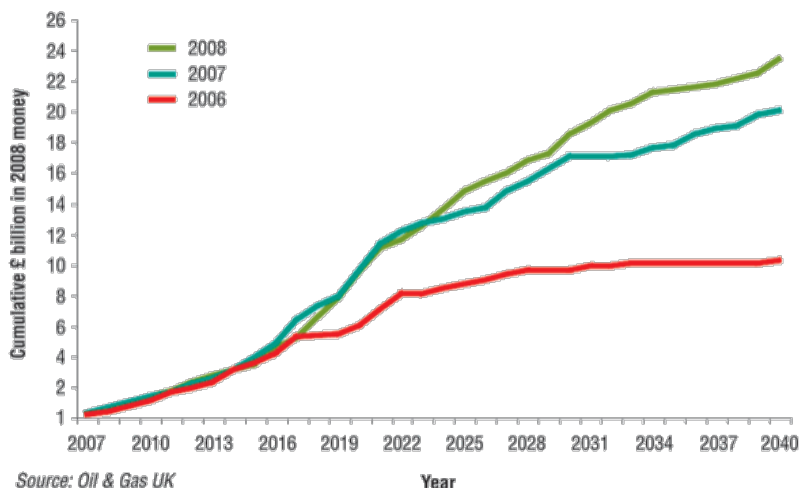
Andre del av oppgaven er en konstruksjonsoppgave. På bakgrunn av de vurderingene som er tatt i første del av oppgaven har en valgt en kuttemetode og konstruert et kutteverktøy basert på denne. Det er så gjort styrkeberegninger for å se om verktøyet tåler de påkjenningene det maksimalt kan bli utsatt for. Styrkeberegningene er utført ved bruk av styrkeberegningsmodulen i Autodesk Inventor 2010, og det er gjort beregninger for hånd for å kontrollere at resultatene herfra er rimelige.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Det er i dag om lag 50 år siden oljeeventyret startet i Nordsjøen. Plattformer har som regel blitt designet med tanke på en levetid på rundt 25 år. Dette betyr at et økende antall plattformer nå når den levetiden de ble designet for. I tillegg kommer plattformer der levetiden har blitt utvidet etter at det har vist seg at forekomstene har vært større enn først antatt eller nye teknikker har blitt tatt i bruk for å øke graden av utvinning.

De installasjonene der levetiden ikke kan eller behøver å bli utvidet må av miljøhensyn fjernes. Plattformene tas inn til land, brønnene plugges og rørnett kuttes opp og fjernes. Etterspørselen etter selskaper som kan ta seg av disse ”decommissioning”-oppdragene er stor og forventes å øke i årene som kommer. Oil & Gas UK spår at utgiftene knyttet til denne typen oppdrag for den Britiske sektoren vil utvikle seg etter følgende trend.



Figur 1.1.1 Estimerte utgifter til decom-prosjekter for Engelsk sektor[1]

En ser at ikke bare antas denne typen virksomhet å ha økende kostnader i årene som kommer, men estimatene for hva kostnadene faktisk blir har blitt oppjustert for hver gang det har vært sett på. Det er nærliggende å anta at en vil se en lignende utvikling på norsk side.

DeepOcean er et av selskapene som blant annet har spesialisert seg på dette feltet. De foretar i dag fjerning av risere, umbilicals og rør, samt små og store strukturer. Noen av disse oppgavene utføres med verktøy spesielt designet for å montere på og opereres av ROV, mens andre senkes ned fra skip med kran og styres på plass og opereres av ROV da de er for tunge til at ROVen kan fly med dem påmontert.



Figur 1.1.2 Fjerning av offshoreinstallasjon [2]

Utgangspunktet for oppgaven var at DeepOcean var interessert i å få undersøkt muligheten for og, med utgangspunkt i kuttemetoder som hittil ikke har vært brukt i særlig grad under vann, designe et verktøy som kunne monteres på ROV for å gjøre 2-3 kutt på små rør. Laserskjæring og plasmakutting var to metoder som ble nevnt tidlig i utformingen av oppgaveteksten.

1.2 Målsetting

Målsetningen for oppgaven er todelt. I første del av oppgaven skal en del ulike kuttemetoder beskrives. De viktigste punktene som skal dekkes er prinsippet bak metoden, om metoden i dag brukes under vann eller om det ser ut til at den vil kunne tilpasses bruk under vann. I tillegg bør momenter som størrelse på utstyret som trengs, kuttehastighet, effektforbruk og om det vil være mulig å designe et verktøy som er håndterlig for ROVer, tas med.

Andre del av oppgaven vil bli å designe et kutteverktøy, basert på den metoden som viser seg mest egnet etter at første del av oppgaven er gjort. Verktøyet må være i stand til å utføre kutt på umbilicals og stålrør med ytre diameter 12 ” og veggtykkelse 1” på dyp ned til 300 meter. Kutteverktøyet skal først skisseres for hånd, og deretter tegnes i et DAK-program, for eksempel Autodesk Inventor. Datamodellen skal så styrkeberegnes både for hånd og i et styrkeberegningssystem som Ansys eller styrkeberegningssystemet i Inventor.

1.3 Metodikk, hjelpemidler, verktøy og dataprogrammer

Første del av oppgaven vil gå med til å vurdere en del ulike kuttemetoder. Disse vil både være metoder som i dag brukes subsea av ROVer og metoder som hovedsakelig brukes på

land. For de sistnevnte vil det bli listet opp eventuelle problemer ved både bruk under vann og det å gjøre verktøyet kompakt nok til ROV-bruk.

Etter sammenligning og valg av kuttemetode skal et kutteverktøy designes. Etter at verktøyet er skissert for hånd, vil det bli laget en DAK-modell i Autodesk Inventor. Beregninger som er utført for hånd vil så bli kontrollert ved å teste DAK-modellen i styrkeberegningsprogrammet Ansys eller i beregningsmodulen i Inventor.

1.4 Avgrensninger/spesielle problemer

DAK-modellen var i utgangspunktet planlagt testet i Ansys Workbench. Etter å ha designet den i Inventor 2010 viste det seg at Ansys på skolen ikke kunne åpne modeller laget i versjoner nyere enn 2009, som er versjonen som blir brukt på skolen. Dette er fordi Ansys må få en godkjenning fra Inventor før det åpner .ipt- og .iam-filer, og disse er ikke bakoverkompatible. Med bakgrunn i dette ble det besluttet å bruke styrkeberegningsmodulen som er bygget inn i Inventor i stedet. Senere viste det seg at sammensetninger kan eksporteres til STEP, Parasolid eller IGES filer og deretter importeres i Ansys, da det får åpnet disse uten tillatelse fra Inventor. På dette tidspunktet hadde vi alt kommet frem til at styrkeberegningsmodulen i Inventor ville kunne dekke våre behov.

Modellen av kutteren mangler den hydrauliske motoren den skal ha. Beregninger på hvilke spesifikasjoner motoren må ha er allikevel gjort, og en kan på bakgrunn av dette ta kontakt med en leverandør og få en DAK-modell av en passende motor.

Da ingen spesifikk motor er valgt enda, har en ikke tatt hensyn til virkningsgrad for denne. På toppen av virkningsgrad for motoren ved bruk på land vil en ha skjærkrefter mellom flatene på hjulene som roterer og vannet, som fører til ytterligere økt effektbehov. Dette må sees nærmere på før en endelig motor blir valgt.

For å redusere effekttapet forårsaket av de nevnte skjærkreftene kan det sees på muligheten for å gi sidene av hjulene en ”golfball-finish”, eller å utforme dem med eiker som vanligvis sees på sykler designet til baneløp.

Databladene som er brukt for å finne flytegrensene og strekkfasthet for materialene som er brukt er ikke ment til bruk for design. Disse tallene vil måtte hentes inn fra leverandør ved produksjon av verktøyet.

2 Sammenligning av verktøyprinsipper

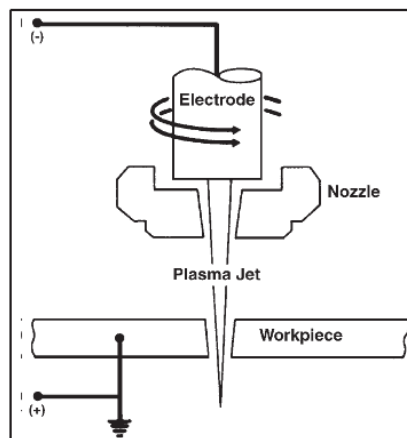
2.1 Kutteprinsipper

Følgende kutteprinsipper skal undersøkes for å finne det best egnede for undervanns kutting av rør med diameter opp til 12”:

- Plasmakutting
- Laserkutting
- Hydraulisk giljotinkutting
- Båndsag
- Diamantwire
- Roterende bladfres
- Vannkutting

2.2 Plasmakutting

Plasmakutting er en prosess for å kutte materialer av ulik tykkelse ved hjelp av en plasmabrenner. Denne metoden kan kutte plater med tykkelse opp til 6”. En tradisjonell plasmakutter fungerer ved at en inert gass under trykk blir sendt gjennom brennerens munnstykke og mot materialet som skal kuttes. Munnstykket på kutteren må berøre kuttegodset for å starte kutteren. En gnist med lav strøm og høy spenning blir sent gjennom gassen fra elektroden inne i munnstykket til kutteren, til materialet som skal kuttes. Denne gnisten danner en lysbue som går gjennom gasstrålen, som går over til plasma (se fig. 2.2.1). Så lenge det går strøm gjennom gasstrålen vil gassen holde seg i plasmafasen og plasma strålen blir opprettholdt. Denne plasmastrålen har veldig høy temperatur og kan komme opp i 30 000 °C. Strålen av varm plasma smelter og blåser bort materialet som skal kuttes slik at vi står igjen med et relativt fint kutt. Tradisjonell plasmakutting kan kutte alle materialer som leder strøm.



Figur 2.2.1 Tradisjonell plasmakutter [3]

Ofte brukes det også en dekk-gass til kuttingen(se fig. 2.2.2). Denne har som oppgave å beskytte plasmastrålen, kjøle dysen, redusere utslipp og øke overgangsmotstanden i dysen.

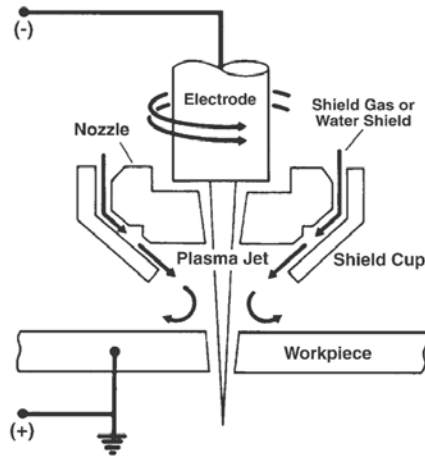
Gassen som brukes til kuttingen velges avhengig av kuttehastighet, materiale som skal kuttes, kvalitet på kuttet og økonomi. Gassene brukes ofte i forskjellige kombinasjoner og blandinger enten som dekk-gass eller kutte-gass. Dekk-gassen pleier som regel å ha lavere strømningsrate enn kutte-gassen.

De vanligste gassene som brukes er:

- Luft
- Nitrogen (O₂)
- Oksygen (N₂)
- Karbondioksid (CO₂)
- Argon (Ar)
- Hydrogen (H₂)

Plasma Gas / Shield	Mild Steel	Stainless	Aluminum
Air / Air	Good cut quality/speed. Economical	Good cut quality/speed Economical	Good cut quality/speed Economical
Oxygen (O ₂) / Air	Excellent cut quality/speed. Very little dross	Not recommended	Not recommended
Nitrogen (N ₂) / CO ₂	Fair cut quality, some dross. Excellent parts life	Good cut quality Excellent parts life	Excellent cut quality. Excellent parts life
Nitrogen (N ₂) / Air	Fair cut quality, some dross. Excellent parts life	Good cut quality Excellent parts life	Good cut quality Excellent parts life
Nitrogen (N ₂) / H ₂ O	Fair cut quality, some dross. Excellent parts life	Excellent cut quality. Excellent parts life	Excellent cut quality. Excellent parts life
Argon Hydrogen / N ₂	Not recommended	Excellent on thick >1/2"	Excellent on thick >1/2"

Tabell 2.2.1 Sammenligning av forskjellige gasskombinasjoner [4]



Figur 2.2.2 Plasmakutter med dekkgass [3]

Nyere metoder har gjort det mulig å starte plasmakutteren og opprettholde plasmastrålen uten kontakt mellom materialet og munnstykket. Med denne metoden er det også mulig å kutte materialer som ikke er elektrisk ledende.

Plasmakutting med vanninjeksjon i dysen blir også benyttet. Dette bidrar til å øke kuttehastigheten og kvaliteten på kuttet. Vannets oppgave er å beskytte og kjøle dysen.



Figur 2.2.3 MAX200 plasmakutter transformator [5]

Skal selve transformatoren plasseres på ROVen må den modifiseres for å kunne motstå det hydrostatiske trykket og saltvannet. Typisk størrelse på transformator (fig. 2.2.3) i mm: $1040 \times 710 \times 1090$. Vekt i luft vil ligge på 350 kg. Selve dysen/munnstykket som trengs trenger ikke å være større en $80 \times 80 \times 150$ mm, gjerne mindre. I tillegg trengs det gassflasker på dekk til kuttegassen og eventuelt dekkgassen.

Fordeler med plasmakutting:

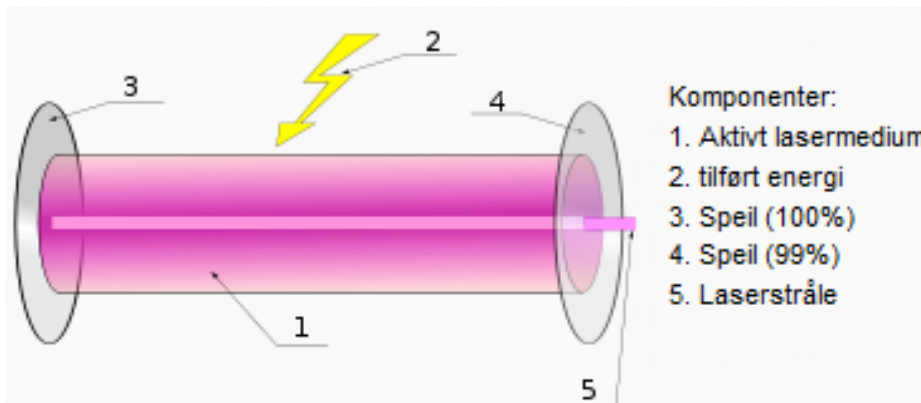
- Verktøyet kan ikke sette seg fast, da det ikke er i direkte kontakt med kutteemnet.
- Metoden er rask sammenlignet med mekaniske kuttemetoder.
- Metoden fungerer godt uavhengig av hvilket metall som kuttes.
- Kuttemetoden er vist å fungere ned til 180m på 12mm tykke stålplater.
- Metoden er billig om en bruker oksygen både som kutte- og dekkgass.

Ulemper med plasmakutting:

- Ikke testet dypere enn 180m, og da bare på halve kuttykkelsen av det som trengs.
- Økende energiforbruk ved økende dybde. [6][7]
- Synkende kuttehastighet ved økende dybde. [6]
- Raskt synkende kuttkvalitet ved økende dybde. [6]

2.3 Laser

Laserkutting er en prosess for å kutte diverse materialer av ulik tykkelse ved hjelp av en laserstråle. En laserstråle blir generert ved at en blitslampe lyser på en laserkrystall. Lyset blir reflektert internt i krystallen til det har høy nok energi til å unnslippe som en stråle av lys. Denne strålen blir ledet gjennom en krystall som fokuserer lyset til et veldig lite punkt. Dette punktet kan ha en så liten diameter som 0,005 mm, men en minimum diameter på 0,025 mm er mer vanlig. På grunn av den lille diameteren til strålen vil lysintensiteten i dette punktet bli svært høy. Når laserstrålen treffer materialet som skal kuttes vil materialet enten brenne, smelte eller fordampe alt etter type laser/metode. Skal kuttet starte et annet sted enn enden, må laseren først gjennomhulle materialet.



Figur 2.3.1 Prinsippskisse for laser

Det finnes mange forskjellige laser typer. De forskjellige lasertypene navngis etter hva som er det aktive lasermediet. Noen av de mest vanlige typene er Nd:(YAG), Nd, CO₂ og fiberlaser. Laser kan brukes med kontinuerlig eller pulserende stråle alt etter type og bruksområdet. De mest effektive laserne har en virkningsgrad på rundt 30 %.

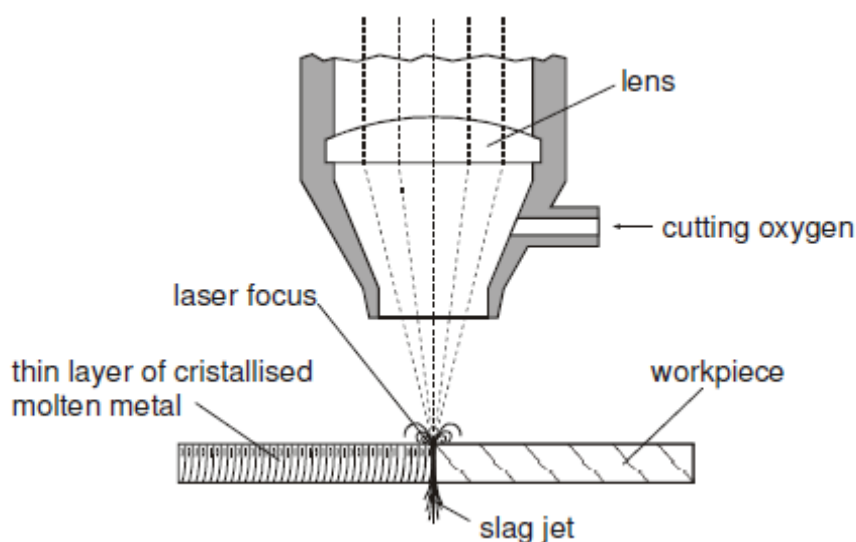
Type laser	Bruksområdet
Neodym Nd	<ul style="list-style-type: none">• Boring
Neodym-doped Yttrium aluminium garnet Nd:(YAG)	<ul style="list-style-type: none">• Skjæring• Boring• Graving• Sveising
CO ₂	<ul style="list-style-type: none">• Skjæring• Boring• Graving• Sveising
Fiberlaser	<ul style="list-style-type: none">• Skjæring

Tabell 2.3.1 Laser hovedtyper

Forskjellige laser kutteprosesser:

Reaktiv kutting:

Denne prosessen er sammenlignbar med oksygen brenning. Materialet som skal kuttes varmes til sin forbrenningstemperatur av laserstrålen (fig 2.3.2). Oksygen blir tilført og materialet brennes vekk.



Figur 2.3.2 Reaktiv laserkutting [8]

Fordampningskutting:

Med denne metoden blir overflaten til materialet som skal kuttes varmet opp av laserstrålen og det dannes et hull. Hullet øker drastisk varmeopptaket til metallet, som fort øker dybden. Etter hvert som hullet blir dypere begynner materialet å koke og dampen som genereres eroderer de smeltede hullveggene. Denne metoden blir som regel brukt for materialer som plast, tre karbon osv.

Smelting med gass:

Med denne metoden blir smeltet materiale blåst vekk av gass under høyt trykk. Dette bidrar til å redusere kraftbehovet. Laserstrålen varmer opp materialet til smeltepunktet og deretter blir det blåst bort av gasstrømmen. Denne metoden brukes hovedsakelig på metaller.

Hvis denne metoden skal benyttes til undervannskutting vil selve laserkabinettet (fig. 2.3.3) stå på dekk og laseren føres gjennom fiber ned til ROVen. Kabinettet må stå tørt og bør derfor plasseres i en egen konteiner, som krever en del dekksplass. Selve kuttetdelen trenger nødvendigvis ikke være så stor. Det eneste som trengs er en dyse og en mekanisme som fører denne rundt røret som skal kuttes slik at det blir foretatt et 360° omløp. Typisk dimensjon på dysen: 25mm - 50mm diameter og 60mm - 200 mm lang, alt etter modell. Selve laserkabinettet (fig. 2.3.3) vil ha dimensjonene: 1400mm × 856mm × 806mm.



Figur 2.3.3 Fiberlaser kabinett [9]

Fordeler:

- Verktøyet kan ikke sette seg fast, da det ikke er i direkte kontakt med kutteemnet.
- Laserstrålen er upåvirket av trykk
- Lasere med bølgelengder i området 1000-1100nm kan føres gjennom optiske fibre og vann uten særlig tap.
- Kan kutte uten gass
- Metoden kan gi svært rene kutt.

Ulemper:

- Utstyret som trengs er dyrt i innkjøp.
- Enkelte lasertyper taper effekt når strålen går gjennom vann.
- Dekkgassen er påvirket av trykket.
- Skal laseren føres gjennom fiber må en unngå bøyer på fiberen med små radiuser.

2.4 Hydraulisk giljotinkutting

Hydraulisk kutting omfatter flere kuttemetoder for kutting av forskjellige materialer ved hjelp av hydraulisk energi. De mest vanlige metodene er hydrauliske sakser og giljotinkuttere. Denne metoden egner seg best til å kutte rør, kabler, og egner seg ikke til plater. Med en giljotinkutter er det mulig å kutte stålrør opp til 40”.

Røret/kabelen som skal kuttes blir lagt i giljotinkutteren og festet slik at det sitter fast. Hydrauliske sylindrer presser et metallblad mot røret som skal kuttes. De enorme kreftene fra de hydrauliske sylindrerne presser bladet gjennom røret slik at det blir kuttet.

Hydrauliske kuttere kommer i mange størrelser og varianter, alt etter bruksområdet.

En typisk hydraulisk giljotinkutter med 270 mm kapasitet (fig 2.4.1) har dimensjoner 1200 cm X 800 cm X 40 cm og vekt i luft på 350kg. Dette verktøyet har heller ingen flyteelementer.



Figur 2.4.1 Hydraulisk giljotinkutter

Fordeler:

- Hydraulisk kraft er lett tilgjengelig fra ROVer.
- Påvirkes ikke i noen særlig grad av trykkøkning.

Ulemper:

- Røret som kuttes blir i stor grad deformert.
- Eksisterende hydrauliske giljotiner er store og uhåndterlige for ROVer.
- Høy spesifikk vekt i forhold til vann.

2.5 Båndsag

Båndsag er en kuttemetode for å kutte forskjellige materialer ved hjelp av et kontinuerlig metallbånd med tenner på. Dette blir satt i bevegelse av en motor og vil gradvis skjære vekk deler av materialet som skal kuttes til det har jobbet seg gjennom. Forskjellige typer sagblad blir benyttet alt etter typen materiale som skal kuttes for å oppnå best resultat og kuttehastighet.

Båndsager kommer i mange størrelser og varianter og kan kutte alt fra små til store rør. Sagen kan drives hydraulisk eller elektrisk. Sagbladet har lang levetid og er relativt lett å bytte. Vekt i luft for en sag med kapasitet på 18" rør ligger rundt 200 kg alt etter produsent og design. Denne kuttemetoden har ikke behov for noe utstyr på dekk i forbindelse med kuttingen, annet en selve verktøyet når det ikke er i bruk.



Figur 2.5.1 Kutting av 11 3/4" rør med båndsag [10]

Fordeler:

- Billig i innkjøp
- God kuttehastighet
- Kutter de aller fleste materialer
- Kan kutte store dimensjoner

Ulemper:

- Sagbladet kan sette seg fast i materialet som kuttes
- Stort og tungt.

2.6 Diamantwire

Diamantwire er en kuttemetode for å kutte diverse materialer ved hjelp av en kontinuerlig wire som er innsatt med diamantkrystaller/diamantstøv. Siden diamant er det hardeste kjente materialet kan denne metoden benyttes til å kutte nesten alle materialer.



Figur 2.6.1 Diamantwire kutting [10]

Når det skal kuttes blir wiren satt i bevegelse av et stort hjul slik at den begynner å rotere. Den blir så senket ned over objektet som skal kuttes. Wiren vil file/skjære vekk materialet til den er kommet gjennom og kuttet er ferdig. Denne metoden kan benyttes til å kutte både små og store dimensjoner. Sagen kan bli drevet både hydraulisk og elektrisk. En hydraulisk drevet diamantwiresag vil kunne drives av det hydrauliske systemet til ROven og vil trekke ca 20kW. Dette vil gi en kuttetid på omkring 40 min for et 14" stålrør med 1" veggtykkelse.



Figur 2.6.2 Typisk oppbygning av wiren [11]

Diamantwiren er som regel bygget opp av segmenter. De diamantbelagte segmentene har vanligvis en avstand på omkring en tomme for kutting av stål. Disse er belagt med diamant rundt hele omkretsen, da det er vanlig at wiren roterer mens den kutter.

Eksisterende diamantwire kuttere er hovedsaklig beregnet på rør med større dimensjoner. Kutting med diamantwire under vann der verktøyet er festet til objektet som skal kuttes er patentert av CUT frem til 2011. Patentet gjelder for hele Nordsjøen. CUT har et bredt sortiment av diamantwire kuttere, men ikke alle er beregnet for montering på ROV, spesielt de minste og de største. For å kutte rør med de dimensjonene som denne oppgaven ser på med et av CUTs kuttere, må en opp i et verktøy med 18" kapasitet. Dette verktøyet har en masse på 185 kg og dimensjonene $1737mm \times 1591mm \times 624mm$ når det er tilpasset for ROV operasjon.

Fordeler:

- Kan kutte svært store dimensjoner
- Kan kutte de fleste materialer
- Kan ikke sette seg fast, da den kutter i 360 grader rundt sin egen akse [12][13]
- Lavt effektforbruk, kan hentes fra ROVens hydraulikksystem.
- Kan lages kompakte
- Gir 100 % bekreftelse på at kuttet er gjennomført uten feil.
- Krever kun 1 person pr. skift for vedlikehold/tilsyn av verktøyet.
- Kan kutte uten at røret har særlig klaring fra bunn.
- Krever lite utstyr på dekk.

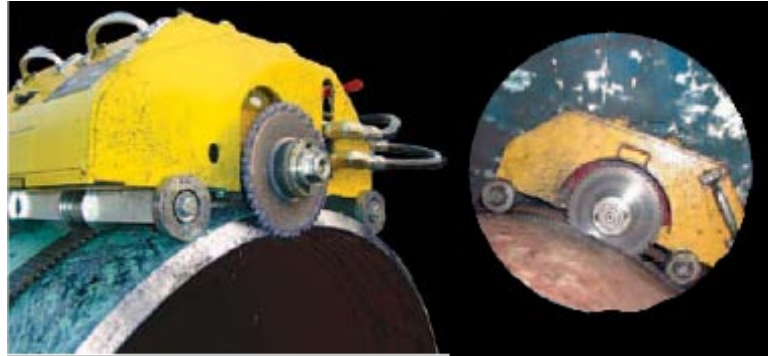
Ulemper:

- Diamant krystallene kan bli slitt av wiren etter en stund, noe som reduserer kuttehastigheten.
- Lav kuttehastighet, 30-40 min for et stålrør på 12" med 1" veggtykkelse.
- Kutting med diamantwire fastholdt til kutteobjektet under vann er patentert frem til 2011.

2.7 Roterende bladfres

Roterende bladfres er en kuttemetode for å kutte diverse materialer ved hjelp av et roterende sagblad/kuttskive/bladfres. Materialet som skal kuttes vil bli slipt vekk eller avvirket av skiven etter hvert som den jobber seg gjennom materialet og kuttet er gjennomført. Typen blad kan variere alt etter materialet som skal kuttes.

Bladfresen kan drives både hydraulisk og elektrisk. Størrelsen på bladet kan variere alt etter typen bladfres.



Figur 2.7.1 Kutting av rør med roterende bladfres [14]

En roterende bladfres for rør kuttig (fig. 2.7.1) vil veie rundt 100 kg og ha dimensjonene 61 cm × 50 cm × 25 cm. For å benytte denne kuttemetoden trengs det ikke noe særlig utstyr på dekk.

Fordeler:

- Billig i innkjøp
- Kan kjøres på ROVs hydrauliske system
- Relativt hurtig kuttehastighet (ca 12 min for 12" stålrør med standard veggtykkelse).

Ulemper:

- Bladet kan sette seg fast/kiles i røret som kuttes.
- Krever mye plass.
- Ikke så godt egnet til å kutte umbilicals.
- Ikke særlig ROV-vennlig.

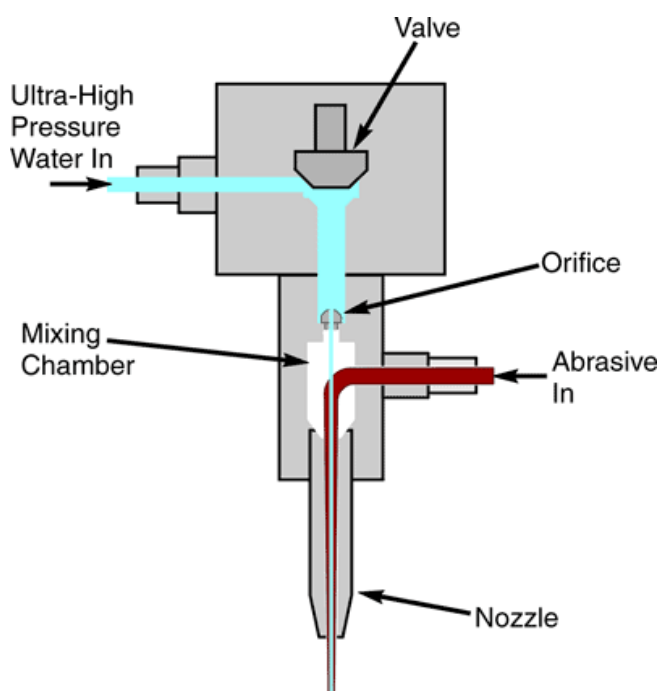
2.8 Vannkutting

Vannkutting er en kuttemetode for å kutte diverse materialer ved hjelp av vann under svært høyt trykk. Denne metoden kan brukes både med og uten abrasive partikler i vannstrålen. Det er vanligst å benytte seg av abrasive partikler når en kutter metall.

Trykket som vannet kutter med varierer etter om det er abrasive partikler eller ikke. Med partikler kan trykket komme opp i 6000 bar. Uten partikler kan trykket komme opp i 14 000 bar, men 4000 bar er mer normalt å bruke under normal drift[15].

Vannkutting kan deles inn i to hovedgrupper:

Vannjet med injeksjon av sand i dysen

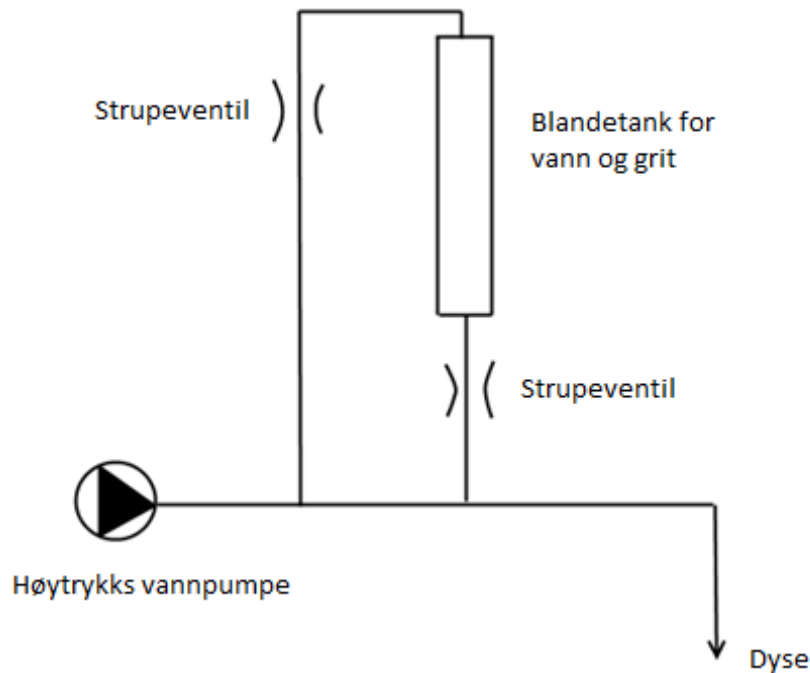


Figur 2.8.1 Vannkutting med injeksjon i dysen [16]

Dette er den mest brukte teknikken på land. Tørre sandpartikler suges inn i dysen ved hjelp av undertrykket som oppstår på grunn av trykkfallet i dysen. Denne metoden bruker liten vannmengde og trykk på 3000-4000 bar. Metoden er lite egnet under 30-40m, men har vært brukt helt ned til 200m.

Vannjet med suspensjon av sandpartiklene ”topside”.

Ved bruk under vann bruker en for det meste vannjetkutting med suspensjon av sandpartiklene i en tank. En sandfylt tank mettes først med vann. Deretter settes høytrykkspumpen i gang, og en regulerer sandmengden ved hjelp av to strupeventiler før og etter sandtanken. Disse gir god kontroll på sandmengden som injiseres i hovedstrømmen (se fig 2.8.2). Som regel legger en til 8-14% grit i forhold til den opprinnelige vannmengden. Vanlig trykkområde for denne metoden er 800-2000 bar.



Figur 2.8.2 Prinsippkisse for AWJ med suspensjon av sandpartiklene

Vanlig vann- og grit-forbruk for denne typen vannjet ligger på henholdsvis 20-25 liter/min og 2-3 liter/min.

Vekten på tanken der griten blandes med vannet er om lag 5 tonn for en tank med 100 liters kapasitet. I tillegg kommer vekten på pumpene, som er på 10-15 tonn.

Effekten for et vannjet-system ligger på 80kW eller over som gir en kuttehastighet på rundt 100mm/min for 1" stål.

Normal bemanning for et vannjet-system er på 2-4 personer per skift.

Fordeler:

- Kutteutstyret er ikke i kontakt med emnet så det kan ikke sette seg fast.
- Kutter de fleste materialer.
- Kutter tykke materialer uten problemer.
- Ingen varmpåvirket sone på materialet som kuttes
- Tilnærmet upåvirket av trykket på 300 m.
- Relativt høy kuttehastighet.

Ulemper:

- Dyrt utstyr i innkjøp
- Krever stor bemanning
- Tungt og plasskrevende utstyr
- Gir ikke 100 % bekreftelse på utført kutt
- Kan ødelegge lamineringen i komposittmaterialer.
- Krever høy tilført effekt.
- Ekstra slanger ned fra overflaten til verktøy, som kompliserer operasjonen.
- Grit kan legge seg i slangen eller dysen og tette dem.

Valg av verktøyprinsipper og begrunnelse for dette

Ut i fra informasjonen vi har samlet inn har vi bestemt oss for å se videre på diamantwire, båndsgag og vannjet, ut fra følgende begrunnelse:

Diamantwire:

Diamantwire har den fordel at den ikke kan sette seg fast i godset den kutter siden den sager 360 ° rundt sin egen akse. Dette gjør metoden svært egnet til undervanns kutteoperasjoner. Selve kutteverktøyet kan gjøres ganske kompakt og krever relativt lite tilført effekt. Dette gjør at den kan drives av ROVs eget hydrauliske system. Når wiren er kommet gjennom kuttegodset har en 100 % bekreftelse på at kuttet er vellykket gjennomført. Metoden krever dessuten liten bemanning til drift og vedlikehold. Med denne metoden kan det kuttet rør uten noe særlig klaring til bunnen uten problemer.

Båndsgag:

Båndsgager ser ut til å kunne gjøres nokså kompakte og dermed ROV-vennlige. Videre kan de drives av ROVs eget hydrauliske system. Sager kutter alle typer materialer med relativt god hastighet. Bladene vil nok også være standardiserte, lette å få tak i og lette å bytte. Bladet vil også få god kjøling fra sjøvannet og en unngår da overoppheting.

Vannjet:

Vannjet kan som laser heller ikke sette seg fast i kutteemnet. Trykket de arbeider med gjør at det ekstra trykket ved 300m vil ha lite å si. Siden dette er en kuttemetode som ikke er avhengig av oppvarming av godset vil kutte kvaliteten og kuttehastigheten være upåvirket av sjøvannstemperaturen. Kan dessuten kutte de fleste materialer på markedet.

Begrunnelse for at vi har valgt ikke å gå videre med de andre kuttemetodene:

Plasma:

Plasma kutting er testet ned til 180 meters vanddybde og det er funnet ut at metoden ikke egner seg særlig godt dypere enn dette. Etter hvert som dybden øker synker kuttehastigheten og kutte kvaliteten samtidig som energiforbruket øker drastisk. Tester ved 60 meters vanddybde indikerer at det smeltede metallet fra kuttet ikke har stor nok hastighet til å bli blåst ut av kuttet og kan stivne slik at en får et ufullstendig kutt av materialet.

Hydraulisk kutting:

Giljotinkuttere på markedet nå er store og uhåndterlige og har høy spesifikk vekt. De trenger høyt hydraulisk trykk for å skjære seg gjennom metall, som igjen gjør at de må bygges ganske solide med tykt gods. Dette gjør det vanskelig å lage dem mer kompakte og ROV-vennlige.

Roterende bladfres:

Roterende bladfres er en godt kjent teknologi der det kan være vanskelig å komme med nyvinninger. Metoden krever en del plass for å gjennomføre kuttet og er ikke i utgangspunktet særlig ROV-vennlig for kutting av rør.

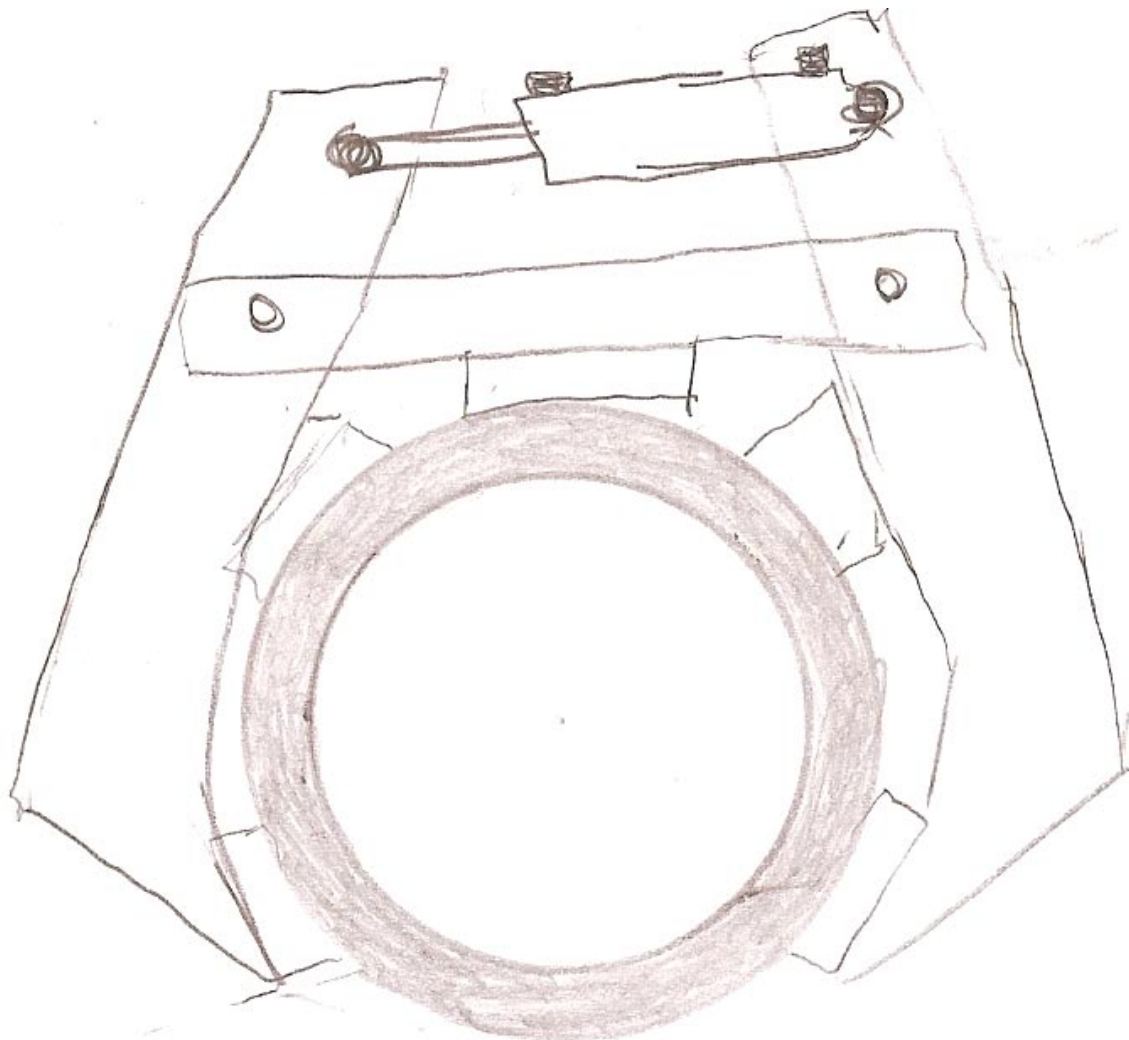
Laserskjæring:

Laserskjæring ser så langt ut til å være lite brukt under vann og vi tror det har stort potensial. Laseren kan føres gjennom en fiber på 100m uten særlig tap, og det har vært brukt over 1km lange fibre før. Bruker en laser med bølgelengde i området 1000-1100nm vil en ikke ha særlig grad av tap idet den går gjennom vann. Et laserskjæreverktøy vil heller ikke kunne kile seg fast i kutteemnet.

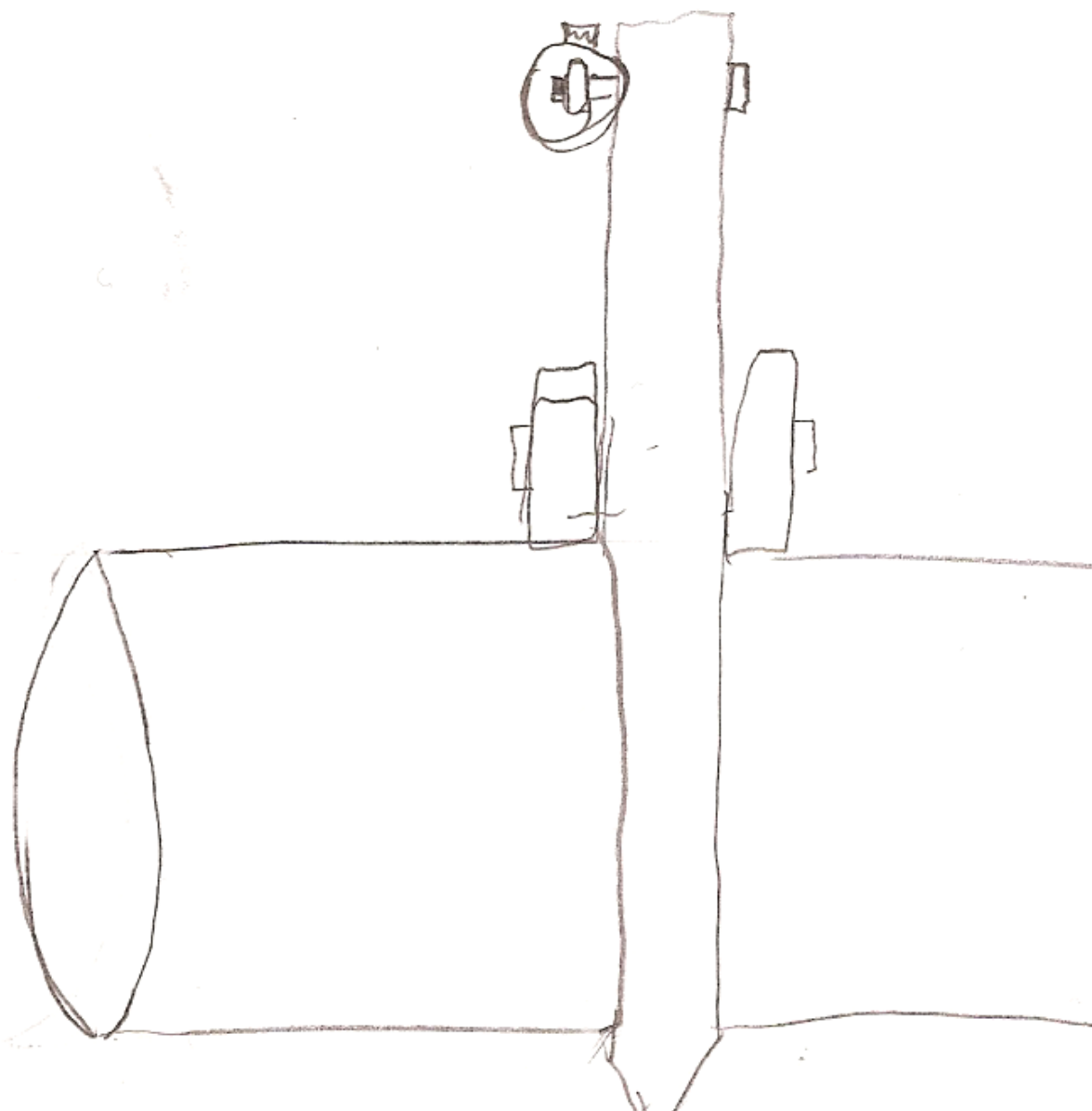
Etter samtaler med en større leverandør av laserenheter går det frem at en må sørge for å opprette en sone rundt området som skal kuttet der vannet er fortrenget om en ikke skal oppleve drastisk reduksjon av kuttehastigheten. Dette gjør at metoden blir langt mindre ROV-vennlig enn først antatt.

3 Grovskisser av verktøy/idegenerering

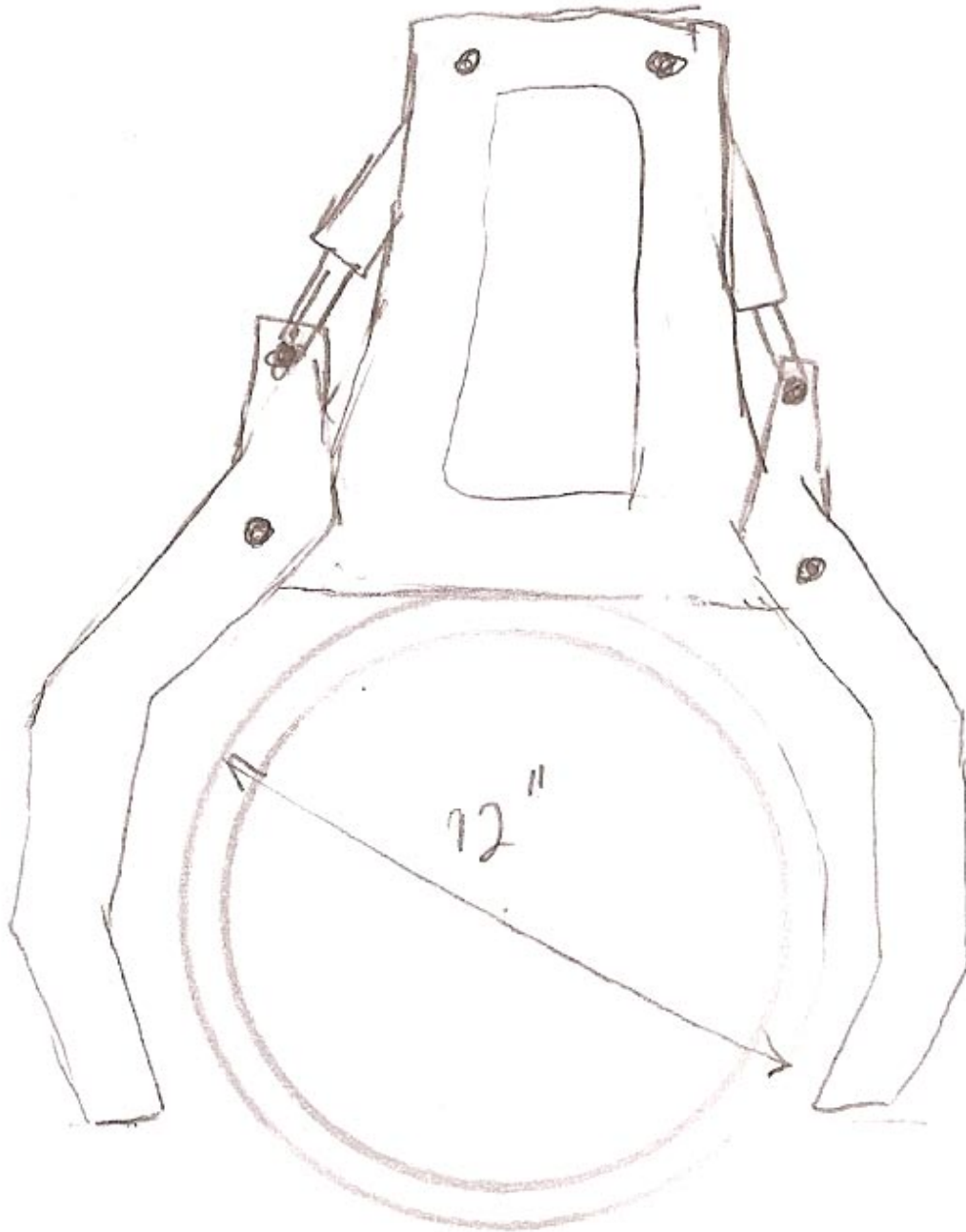
3.1 Skisser/tegninger



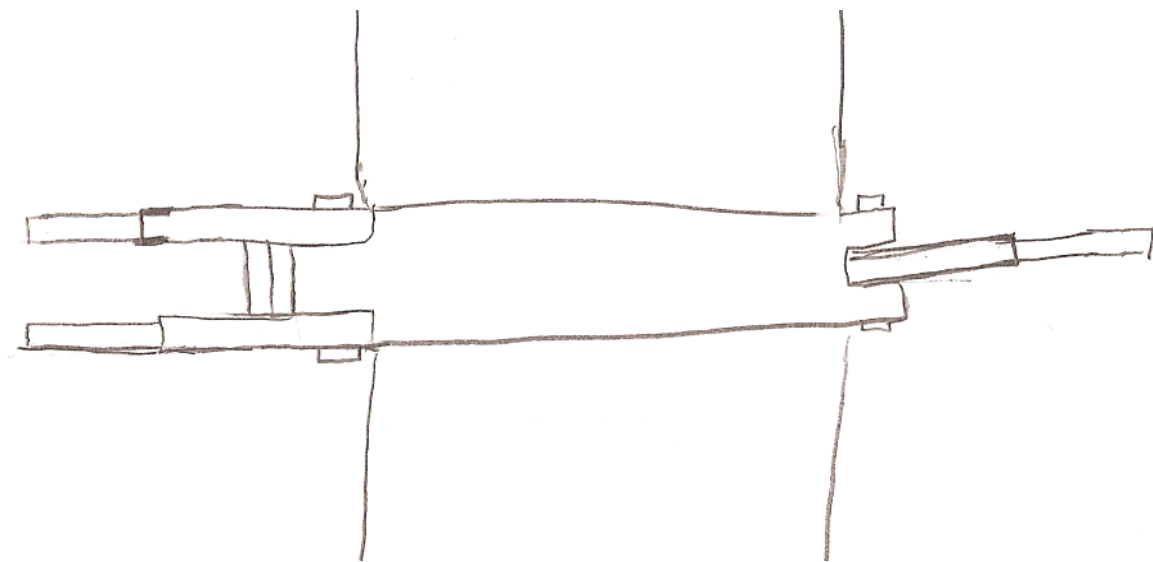
Figur 3.1.1 Hydraulisk klo for fastholding av rør. Prinsipp nr.1



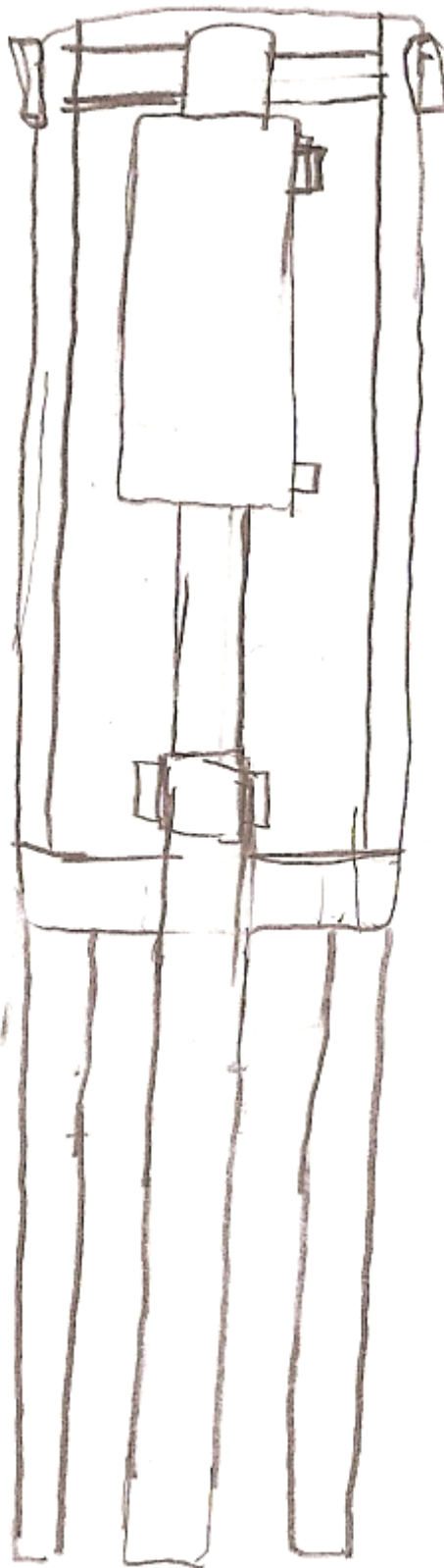
Figur 3.1.2 Hydraulisk klo sett fra siden



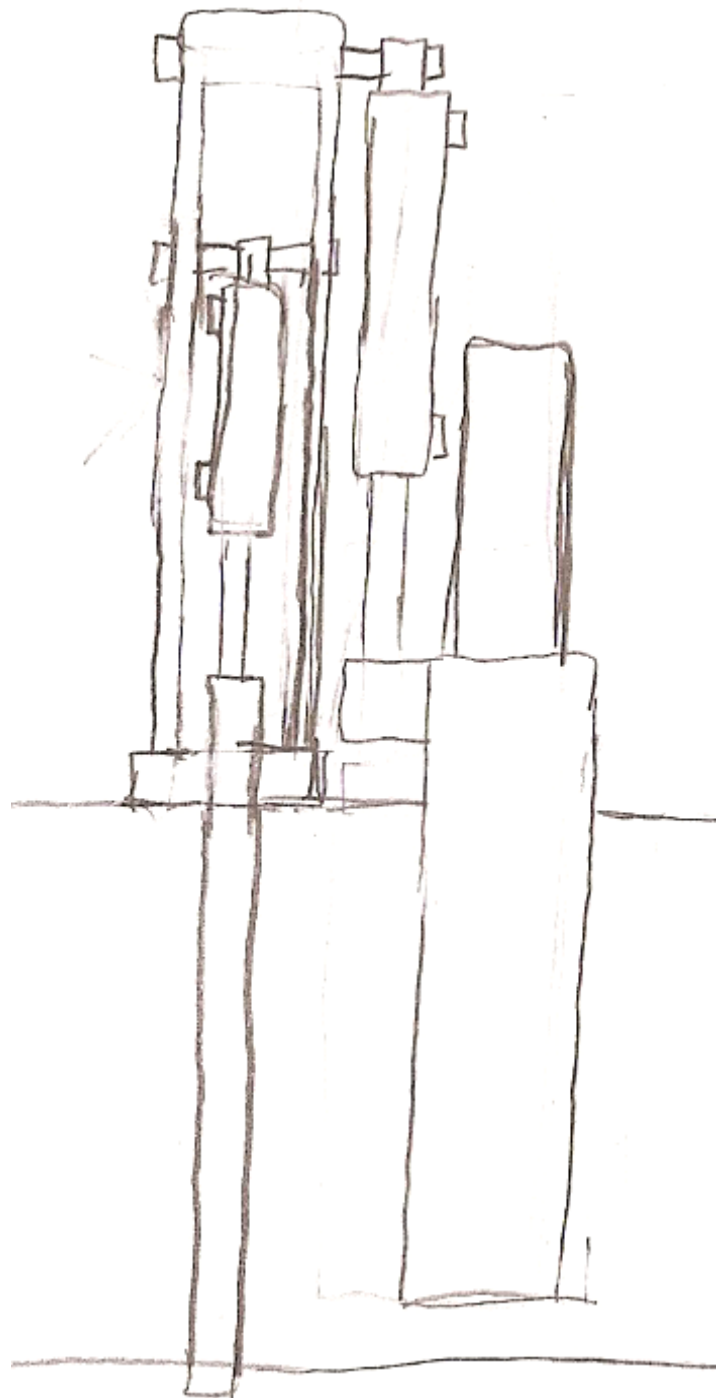
Figur 3.1.3 Hydraulisk klo for fastholding av rør. Prinsipp nr.2



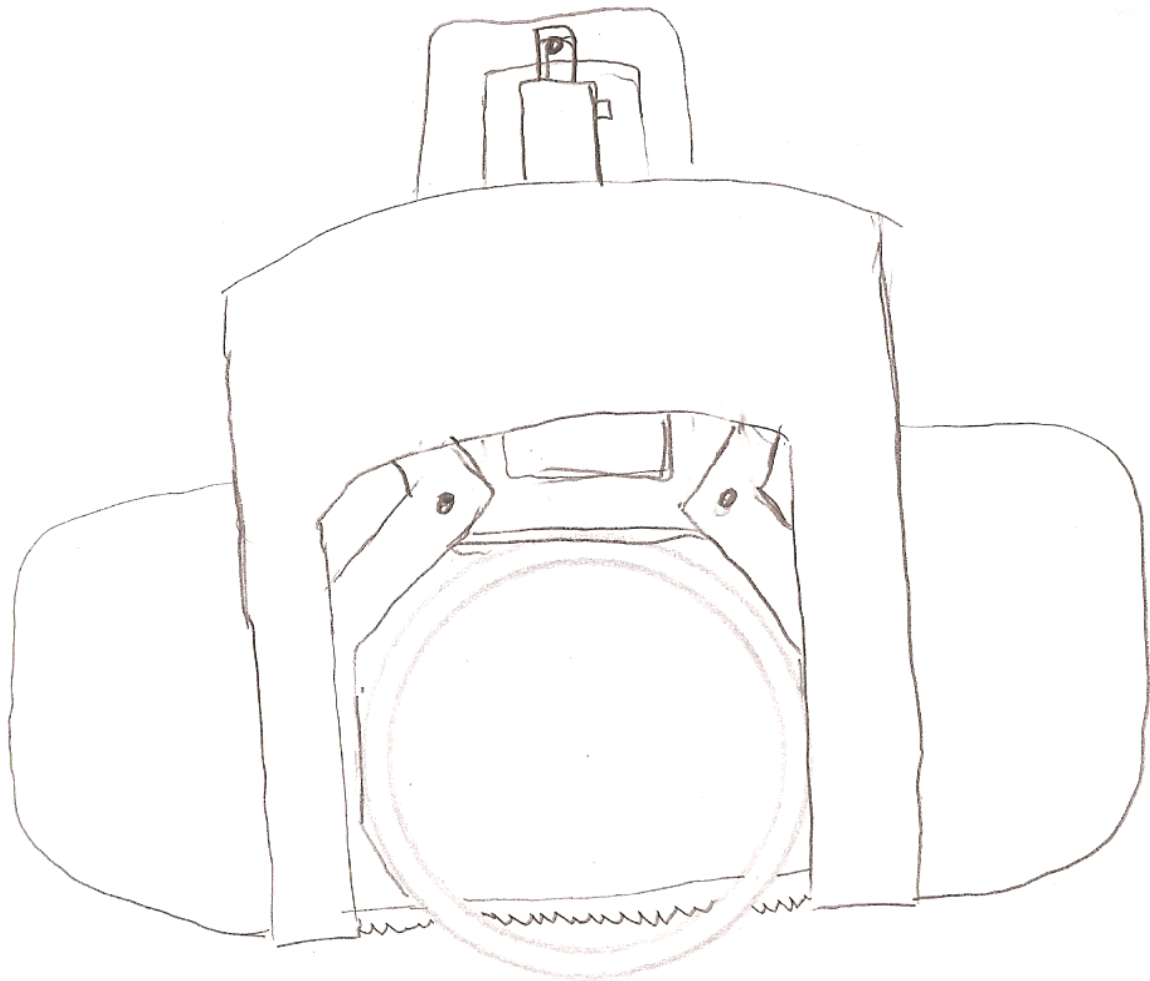
Figur 3.1.4 Klo prinsipp nr.2 sett ovenfra



Figur 3.1.5 Klo prinsipp nr.2 sett fra siden



Figur 3.1.6 Båndsag med klo sett fra siden



Figur 3.1.7 Båndsag med klo

Begrunnelse for valg av klo-prinsipp:

Ved bruk av klo-prinsipp 1 vil det være vanskelig å få klørne til å lukke jevnt og med lik fart. Med dette prinsippet vil den ene kloen lukke til den møter motstand, deretter vil den andre begynne å lukke. Med dette prinsippet vil det dessuten være vanskelig og justere røret i forhold til kutteren i horisontal retning. Dette prinsippet vil ikke klare å holde fast rør med små dimensjoner på grunn av den begrensede slaglengden til sylindren som lukker klørne. Det vil være vanskelig å koble dette designet opp mot ROV siden det er lite gods som ikke er i bevegelse, og på grunn av dette ikke kan låses fast.

Klo-prinsipp 2 vil kunne lukke mye jevnere siden det her benyttes to uavhengige sylindrer. Dette gjør det enklere å justere rørets posisjon i horisontal retning i forhold til selve kutteverktøyet for best mulig resultat. Det vil dessuten være lettere å feste selve kuttetdelen av verktøyet til en klo av denne typen. Dette prinsippet klarer å holde fast både store og små rør. Dette designet vil by på få problemer med oppkobling mot ROV siden det har en stor hoveddel som det bør gå an å festes til uten at det påvirker klørne.

Ut i fra dette er det naturlig å gå videre med klo-prinsipp 2 til detaljkonstruksjonen.

3.2 Grovberegninger

3.2.1 Hydrostatisk trykk på 300 m:

$$p = p_0 + \rho gh$$

$$p = 101\,325\text{ Pa} + 1025\text{ kg/m}^3 \cdot 9,81\text{ m/s}^2 \cdot 300\text{ m}$$

$$p = 3\,117\,900\text{ Pa}$$

$$p = 31,2\text{ bar}$$

3.2.2 Nødvendig volumstrøm olje for å drive diamantwire kutter:

Diamantwiren trenger en tilført effekt på 20 kW for å fungere optimalt. ROven har et hydraulikksystem på 200 bar.

$$P = p \cdot Q \Rightarrow Q = \frac{P}{p}$$

$$Q = \frac{20\,000\text{ W}}{200 \times 10^5\text{ Pa}}$$

$$Q = 0,001\text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 60\text{ l/min}$$

3.2.3 Omtrentlig energiforbruk vannkutting med suspensjon:

$$P = p \cdot Q\text{ [W]}$$

$$P = 2000 \cdot 10^5\text{ Pa} \cdot \frac{25 \cdot 10^{-3}\text{ m}^3}{60\text{ s}}$$

$$P = 83,3\text{ kW}$$

Her er det ikke tatt hensyn til virkningsgrad så reelt energiforbruk vil bli noe høyere.

Med en virkningsgrad på 0,9 vil energiforbruk bli:

$$P = \frac{p \cdot Q}{\eta}$$

$$P = \frac{2000 \cdot 10^5\text{ Pa} \cdot \frac{25 \cdot 10^{-3}\text{ m}^3}{60\text{ s}}}{0,9}$$

$$P = 92,6\text{ kW}$$

4 Valg av endelig verktøytype og begrunnelse

Av de tre kuttemetodene fra grovutvalget har det vist seg at diamantwire og båndsg har mange av de samme fordelene og ulempene. Både diamantwire og båndsg gir en 100 % bekreftelse på fullført kutt når bladet/wiren er kommet gjennom, og begge metodene kan kutte rør med relativt liten klaring til bunnen.

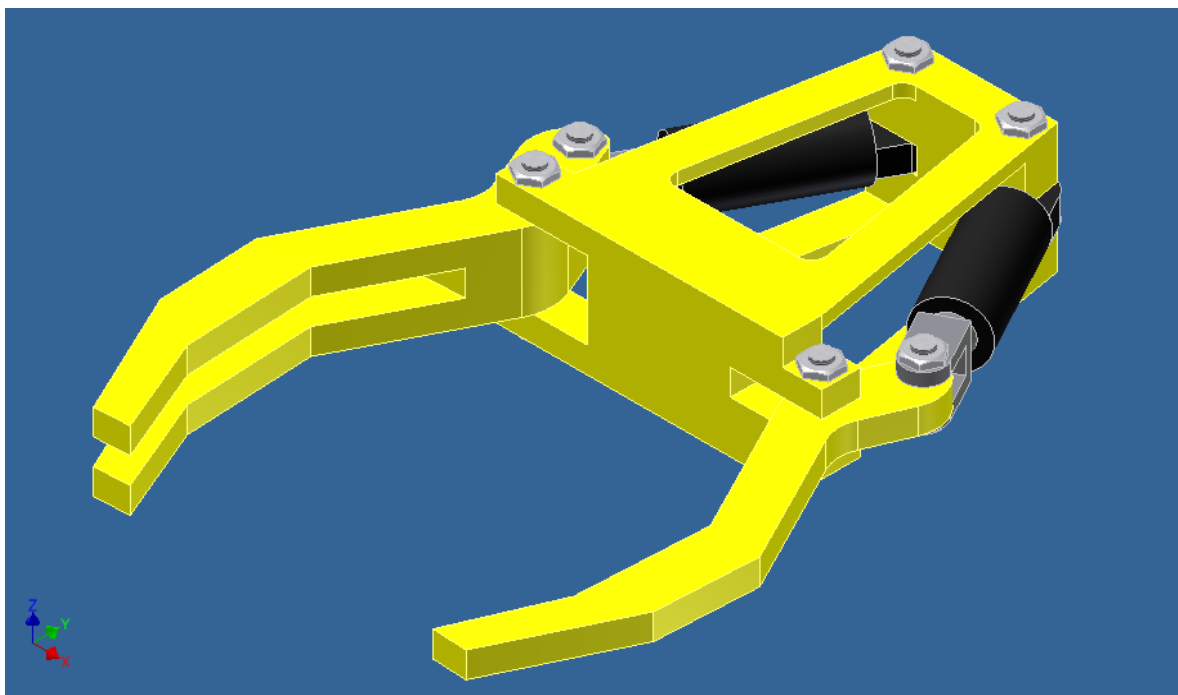
På samme måten som diamantwire vil båndsg kunne gjøres relativt kompakt og ROV-vennlig. Båndsg vil være en del større og tyngre en diamantwire, men ikke så mye at det er et problem. Den største ulempen er at bladet kan kile seg hvis det er spenninger i røret som kuttes.

Hovedforskjellen på diamantwire og båndsg er at diamantwiren kutter 360° rundt sin egen akse, og dermed ikke kan sette seg fast. Dette er en stor fordel dersom det skal kuttes rør og andre objekter med spenninger i.

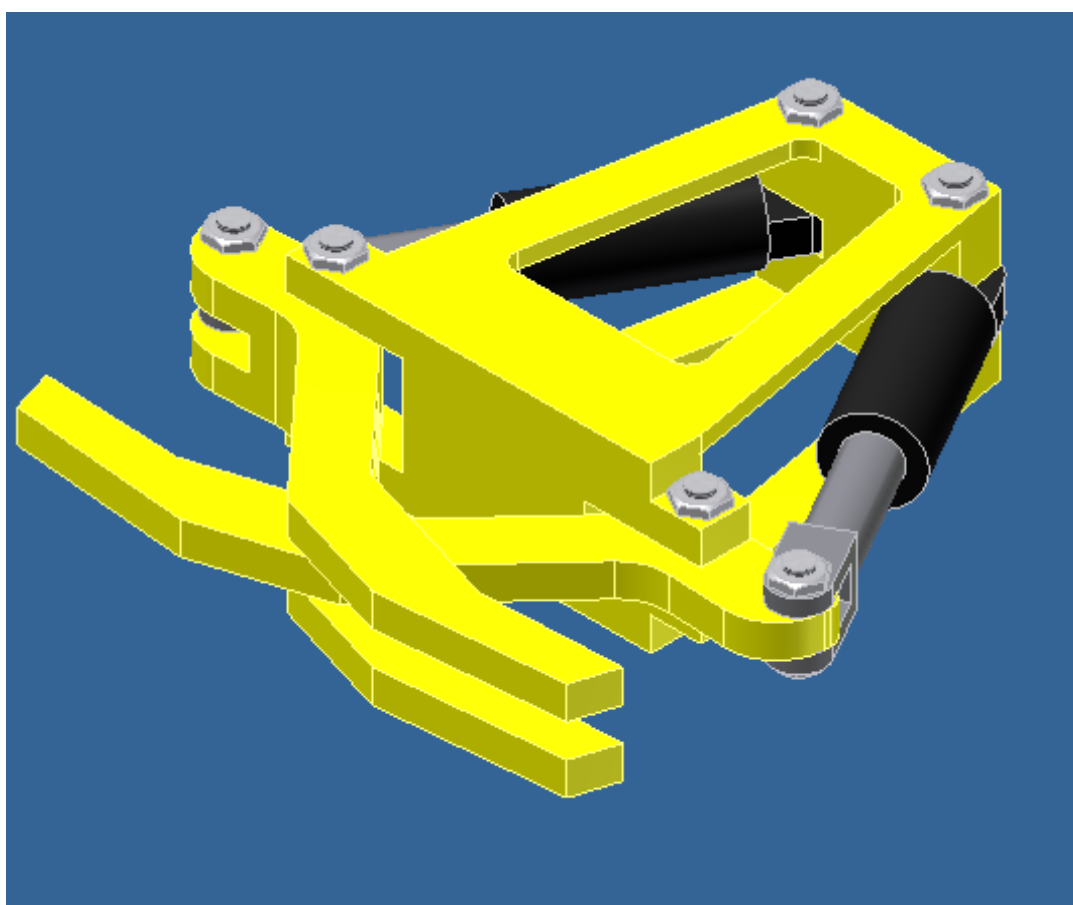
Vannjet vil trenge veldig mye tungt utstyr på dekk for effektiv operasjon, i tillegg til stor bemanning. Dette er både dyrt og upraktisk å benytte for en relativt liten og enkel kutteoperasjon. Dessuten trenger vannjeten en egen slange til å føre ned høytrykksvannet, som vil være med på å gjøre metoden lite ROV-vennlig hvis ikke høytrykksslangen festes til ROVens umbilical. Vannjet vil dessuten kunne være problematisk å bruke i nærheten av andre strukturer med tanke på at vannstrålen vil kunne skade disse.

Ut i fra dette er det naturlig å gå videre med diamantwire, siden dette er den kuttemetoden som vil egne seg best for kutting av små rør og umbilicals opp til 12" på en praktisk og effektiv måte.

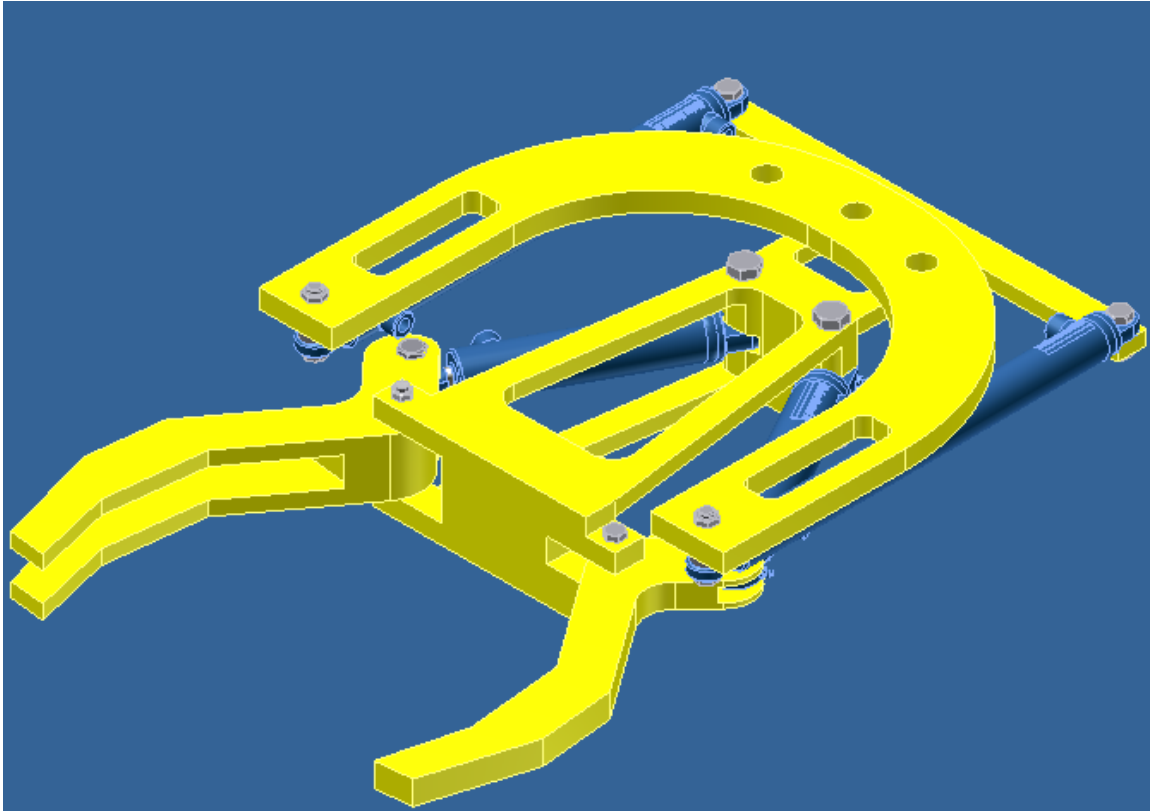
5 Skisser av alternativer til endelige løsninger



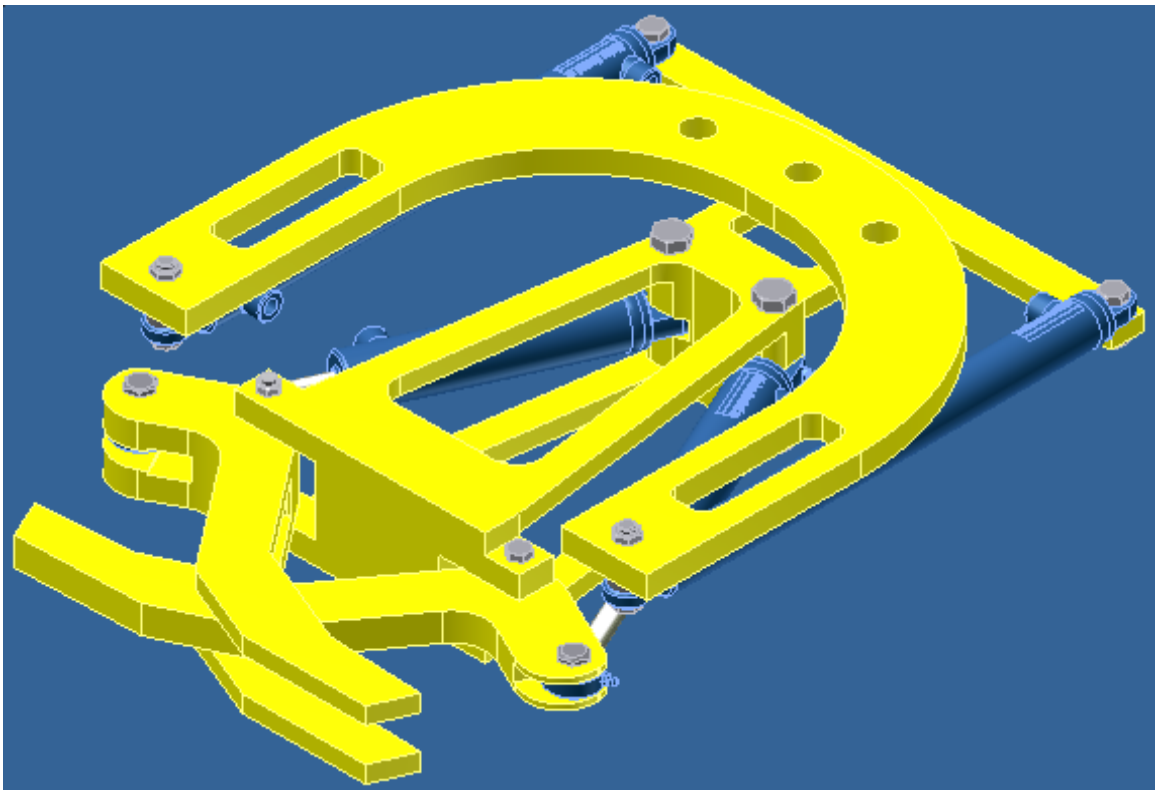
Figur 3.2.1 Alternativ 1 klo for fastholding av kutteverktøy til rør. Åpen posisjon



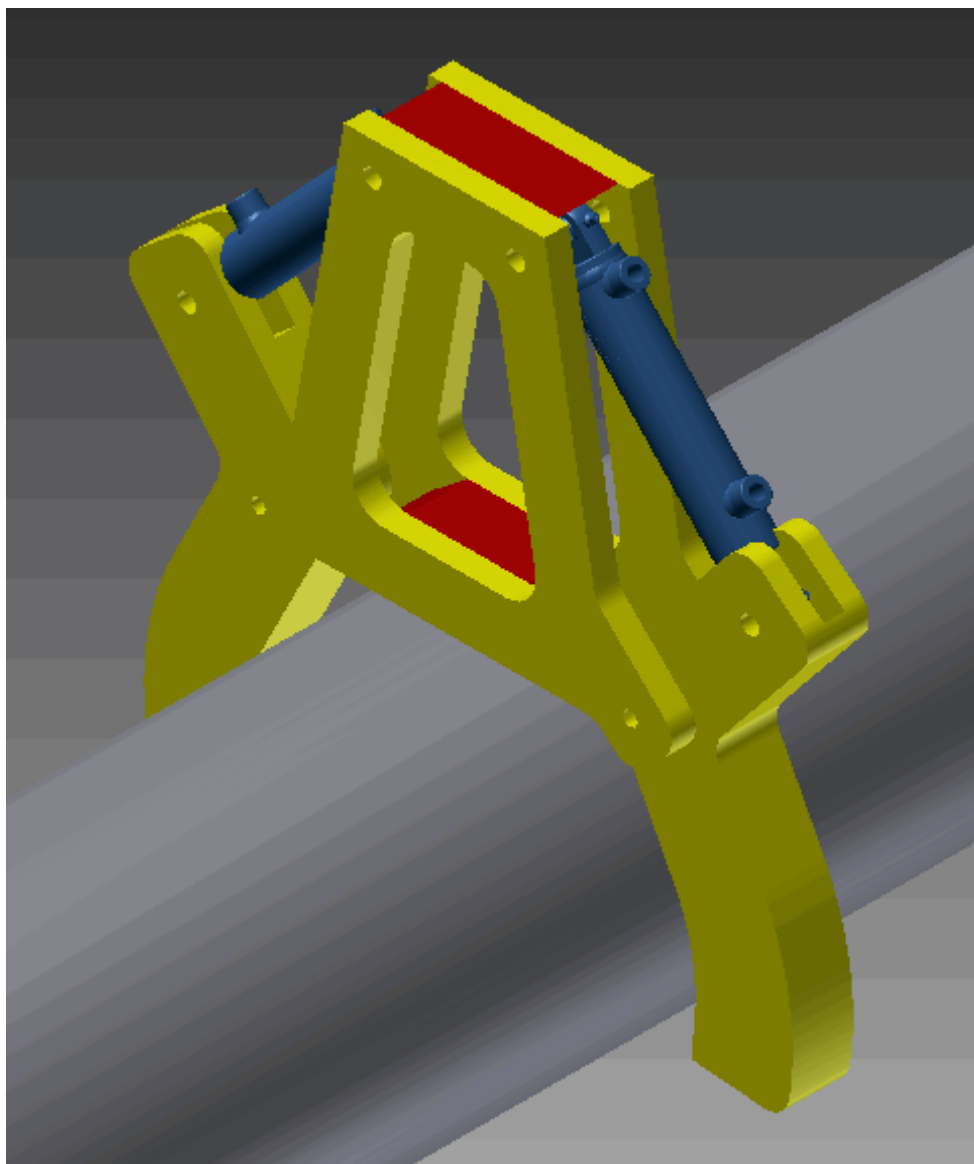
Figur 3.2.2 Alternativ 1 klo for fastholding av kutteverktøy til rør. Lukket posisjon



Figur 3.2.3 Alternativ 1 utforming kutteverktøy. Åpen posisjon



Figur 3.2.4 Alternativ 1 utforming kutteverktøy. Lukket posisjon



Figur 3.2.5 Alternativ 2 klo for fastholding av kutteverktøy til rør.

6 Endelig valg av løsning og begrunnelse

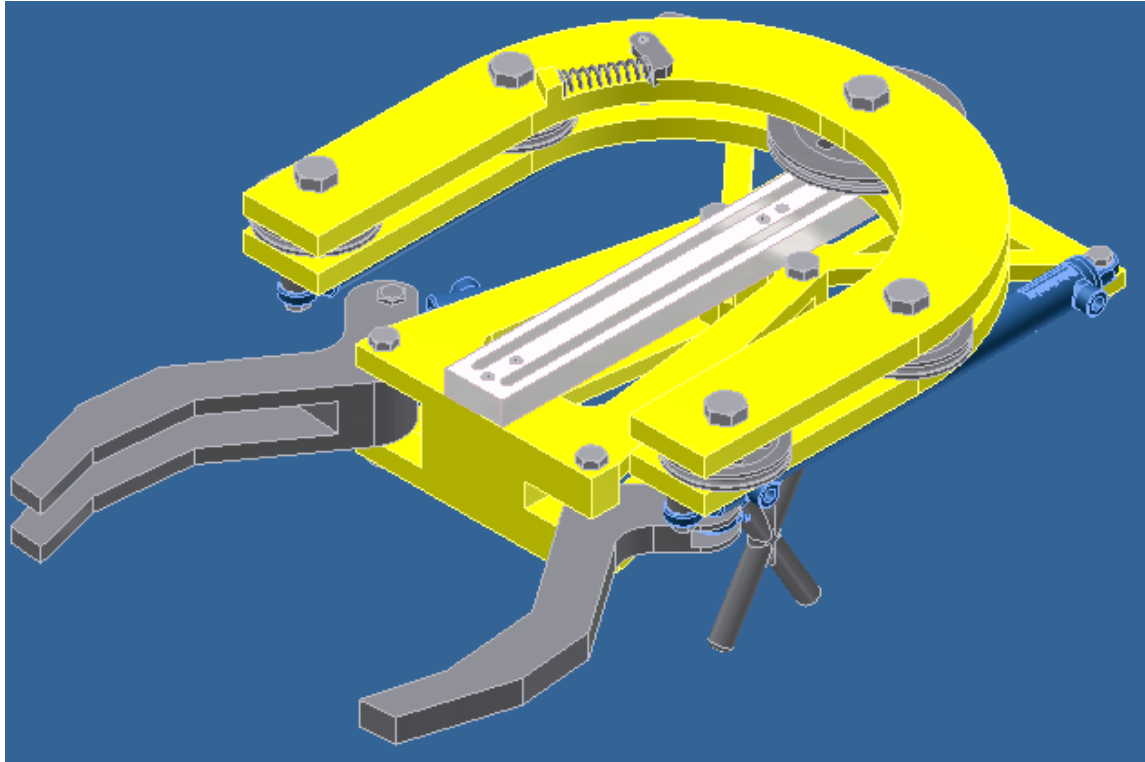
Av de to gripeklør prinsippene har det vist seg at alternativ 1 har mulighet til å gripe tak i rør med mindre dimensjoner en klo prinsipp 2. Gripeklo alternativ 1 er dessuten noe høyere enn alternativ 2, som gjør det lettere å feste selve kuttetdelen til et verktøy med denne utformingen. Klemkraften på røret fra disse to prinsippene er omtrent lik.

Videre vil rammen til selve kutteren utføres med en bøyle på hver side av driv- og løpehjul, slik at boltene ikke så lett bøyes.

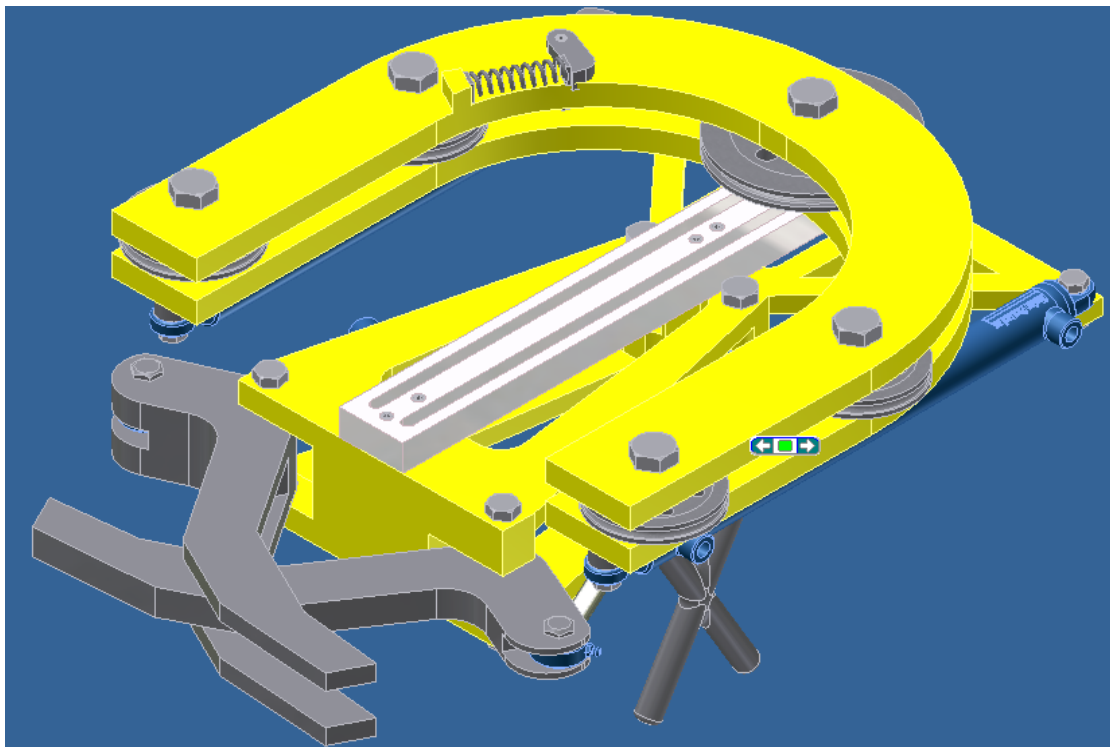
Ut ifra dette er det naturlig å gå videre med alternativ 1 for videre design.

7 Detaljkonstruksjon av endelig verktøy

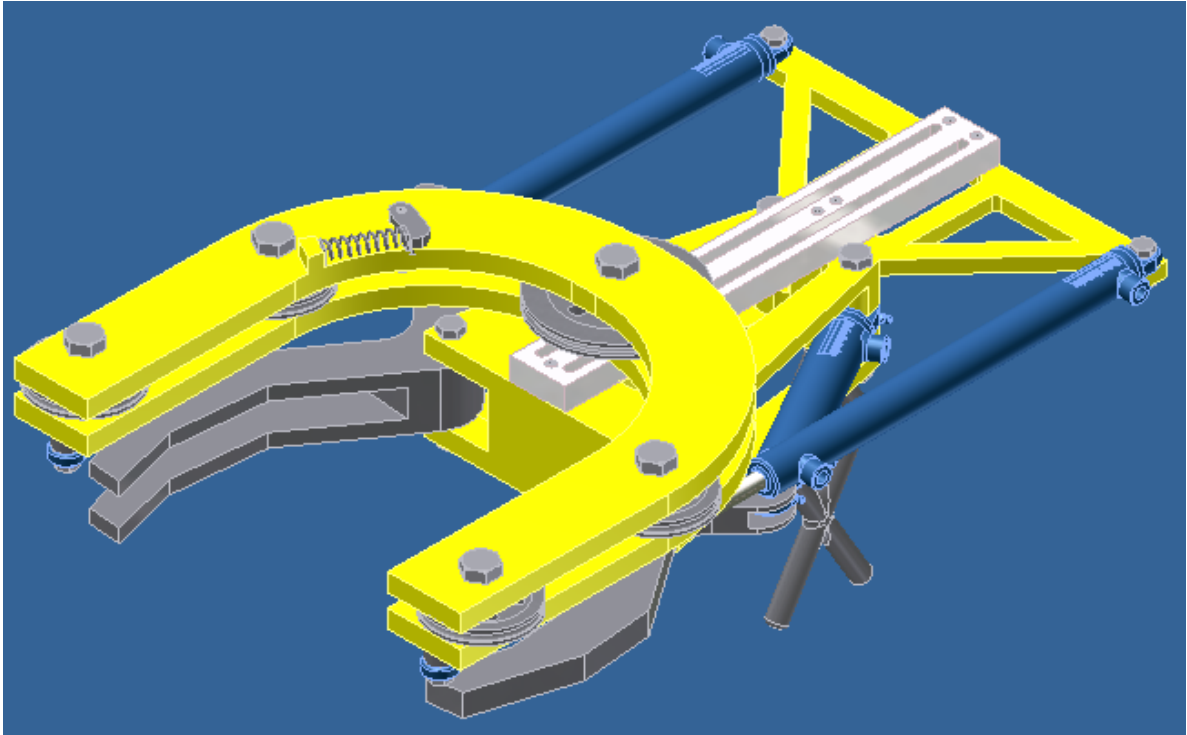
7.1 Endelig DAK-modell



Figur 7.1.1 Kutteverktøy åpne klør



Figur 7.1.2 Kutteverktøy lukkede klør



Figur 7.1.3 Kutteverktøy i posisjon for utført kutt



Figur 7.1.4 Kutteverktøy låst på rør i posisjon for utført kutt

7.2 Beregninger for hånd

7.2.1 Maksimal kraft Gripeklo sylinder:

$$F = p_{maks} \cdot A$$

$$F = 210 \cdot 10^5 Pa \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (32 \cdot 10^{-3} m)^2$$

$$F = 16\,890\, N$$

7.2.2 Maksimal kraft wirebøyle sylinder:

$$F = p_{maks} \cdot A$$

$$F = 210 \cdot 10^5 Pa \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (25 \cdot 10^{-3} m)^2$$

$$F = 10\,038\, N$$

7.2.3 Nødvendig turtall til motor for å drive wiren:

Hastighet wire: 20 m/s
Diameter drivhjul: 150 mm

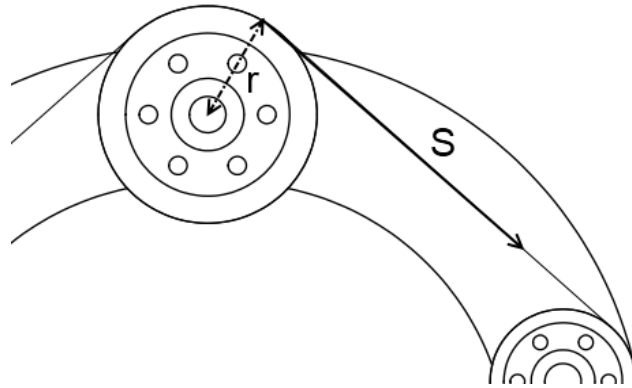
$$v = r \cdot \omega \quad \Rightarrow \quad \omega = \frac{v}{r} \qquad n = \omega \cdot \frac{60}{2\pi} \quad \Rightarrow \quad n$$
$$= \frac{60 \cdot v}{2\pi r} \text{ [rpm]}$$

$$n = \frac{60 \cdot 20 \text{ m/s}}{2 \cdot \pi \cdot 75 \cdot 10^{-3} m}$$

$$n = 2\,546 \text{ rpm}$$

7.2.4 Dreiemoment for motor:

Om en går ut fra at drivhjulet hovedsakelig blir påvirket av snorkraft på den siden der wiren returnerer fra kuttet og at den andre siden er tilnærmet slakk, får en:



Motoren må da kunne gi et dreiemoment som tilsvarer dette for å drive hjulet med konstant fart. Akutt oppgir vanlig snorkraft under kutting til å være 200kg. Dobler en dette og runder litt opp har en da en snorkraft på 4000N.

$$\sum M = 0 \Rightarrow M_{motor} = S \cdot \frac{D_{drivhjul}}{2} = 4\,000\text{N} \cdot 0,075\text{m} = 300\text{Nm}$$

7.2.5 Effekt for motor:

Om en går ut fra en nødvendig trekraft på om lag 100kg får en:

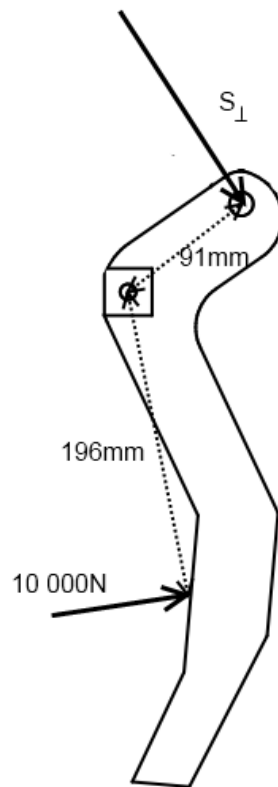
$$P = F \cdot v = 1000\text{N} \cdot 20\text{m/s} = 20\text{kW}$$

ROVens hydrauliske system kan gi 75l/min ved 210bar som gir:

$$P = p \cdot Q = 75 \cdot \frac{1}{60 \cdot 1000} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 210 \cdot 10^5 \text{Pa} = 26250\text{W}$$

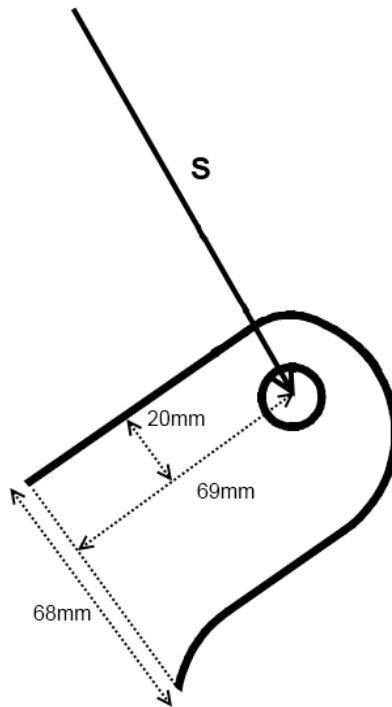
7.2.6 Spenning i snitt av klo

De tre følgende snittene finnes igjen på siste side av Vedlegg A.
Om kloen skal være i ro når den trykker må momentet fra sylindren om bolthullet til innfestingen tilsvare momentet fra røret om samme punkt. Sistnevnte kraft settes til 10 000N.



Figur 7.2.1 Krefter på klo

$$\curvearrowright \sum M_i = 0 \Rightarrow S_{\perp} = 10\,000\text{N} \cdot \frac{196}{91}$$



Figur 7.2.2 Snitt av klo

Ser man nå isolert på en del av kloen får man:

$$\curvearrowright M = S_{\perp} \cdot 69 - S_{\perp} \tan 4,65 \cdot \left(\frac{68}{2} - 20 \right) = 1461628 \text{ Nmm}$$

Om man ser på det nederste punktet på skissen vil vi ikke få noen skjærkraft. Den aksielle kraften vil bli $S_{\perp} \tan 4,65$.

Annet arealmoment for snittet blir:

$$I_x = \frac{1}{12} b \cdot h^3 = \frac{1}{12} 25\text{mm} \cdot (68\text{mm})^3 = 655066 \text{ mm}^4$$

Som gir:

$$\sigma_M = \frac{M}{I_x} \cdot y = \frac{S_{\perp} \cdot 69 - S_{\perp} \tan 4,65 \cdot \left(\frac{68}{2} - 20 \right)}{655066\text{mm}^4} \cdot \frac{68}{2} \text{mm} = 75,9\text{MPa}$$

Og

$$\sigma_{aks} = \frac{N}{A} = \frac{S_{\perp} \tan 4,65}{68\text{mm} \cdot 25\text{mm}} = 2,1\text{MPa}$$

Naviers formel gir oss da:

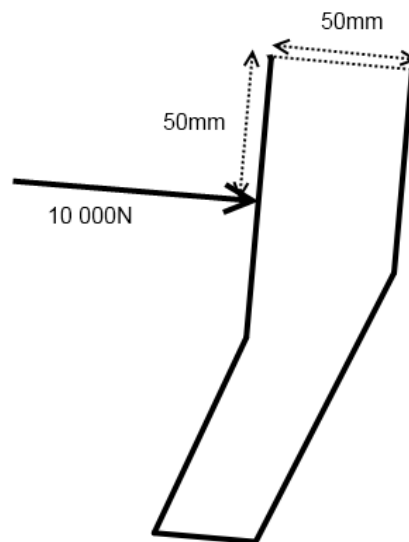
$$\sigma_{jf} = \sigma_M + \sigma_{aks} = 78 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{280 \text{ MPa}}{78 \text{ MPa}}$$

$$\underline{n = 3,6}$$

Samlet trykspenning i nederste del av snittet er altså 78MPa, som gir en sikkerhetsfaktor på 3,6.

Ser man på et snitt nede på kloen:



Figur 7.2.3 Snitt 2 av kloen

Moment om arealsenteret må her bli:

$$\curvearrowright M = 10\,000 \cdot 50 [\text{Nmm}]$$

$$I_x = \frac{1}{12} b \cdot h^3 = \frac{1}{12} 25 \text{ mm} \cdot (50 \text{ mm})^3 = 260417 \text{ mm}^4$$

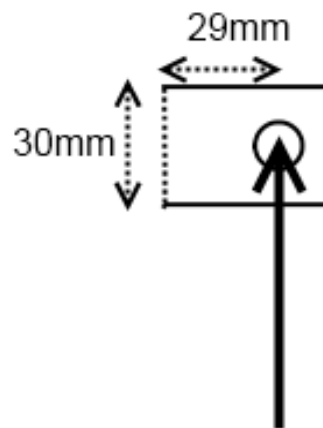
$$\sigma_M = \frac{M}{I_x} \cdot y = \frac{50\,000 \text{ Nmm}}{260417 \text{ mm}^4} \cdot \frac{50}{2} \text{ mm} = 48 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{280 \text{ MPa}}{48 \text{ MPa}}$$

$$\underline{n = 5,8}$$

7.2.7 Snitt "C":

Se vedlegg for plassering.



Figur 7.2.4 Snitt "C"

Ved samme fremgangsmåte som i snittene over får man:

$$\curvearrowright M = 10\,000 \cdot 29 = 29\,000 [\text{Nmm}]$$

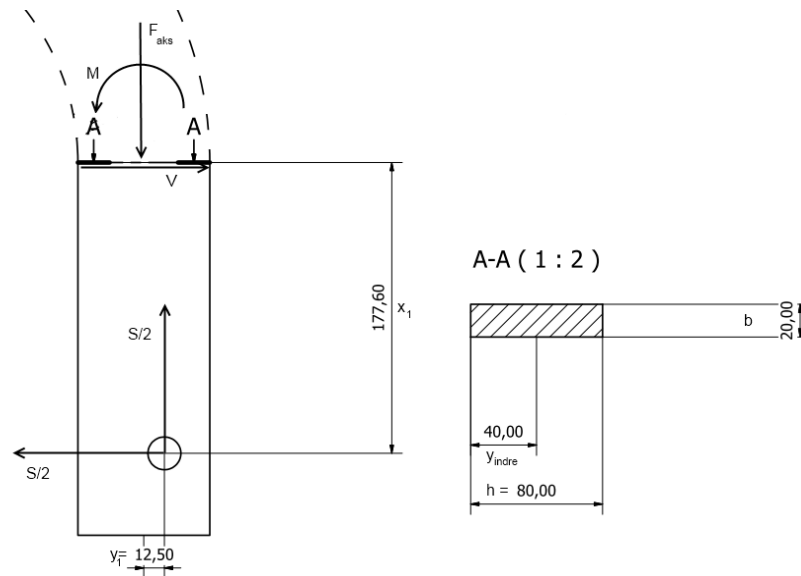
$$I_x = \frac{1}{12} b \cdot h^3 = \frac{1}{12} 15\text{mm} \cdot (30\text{mm})^3 = 33750\text{mm}^4$$

Strekk nederst i snittet må da bli:

$$\sigma_M = \frac{M}{I_x} \cdot y = \frac{29\,000\text{Nmm}}{33750\text{mm}^4} \cdot \frac{30}{2}\text{mm} = 129 \text{ MPa}$$

Dette er den høyeste spenningen i et snitt så langt, og da det første stedet en bør vurdere å forsterke om en ønsker å heve sikkerhetsfaktoren. Med en flytespenning på 280MPa vil en med disse spenningene ha en sikkerhetsfaktor på 2,17 for selve rammen.

7.2.8 Snitt av kutterbøyle:



Figur 7.2.5 Snitt av kutterbøyle

Vi velger å se på det øverste snittet av bøylene der har minst tverrsnitt da vi anslår dette til å bli det mest utsatte punktet på bøylene. Vi antar også at kreftene fordeles jevnt mellom de to bøylene som utgjør rammen til kutteren. Snordraget vi bruker tilsvarer det vi vil få for det dobbelte av strekket i wiren under normal drift.

$$I_x = \frac{1}{12} b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 20\text{mm} \cdot (80\text{mm})^3 = 853333,33\text{mm}^4$$

$$\sum M_{\text{snitt bølge}} = 0$$

$$M_{\text{snitt bølge}} = \frac{S}{2} \cdot x_1 - \frac{S}{2} \cdot y_1 = 4000\text{N} \cdot 178\text{mm} - 4000\text{N} \cdot 12,5\text{mm} = 331000\text{ Nmm}$$

$$\sigma_{\text{moment}} = \frac{M}{I_x} \cdot y_{\text{indre}} = 15,52\text{ MPa}$$

Spenningen som følge av momentet fra nedre løpehjul blir
Vi vil i tillegg få en aksiell trykkspenning.

$$\sigma_{\text{aks}} = \frac{F}{A} = \frac{S}{b \cdot h} = \frac{4000\text{ N}}{20\text{mm} \cdot 80\text{mm}} = 1,25\text{ MPa}$$

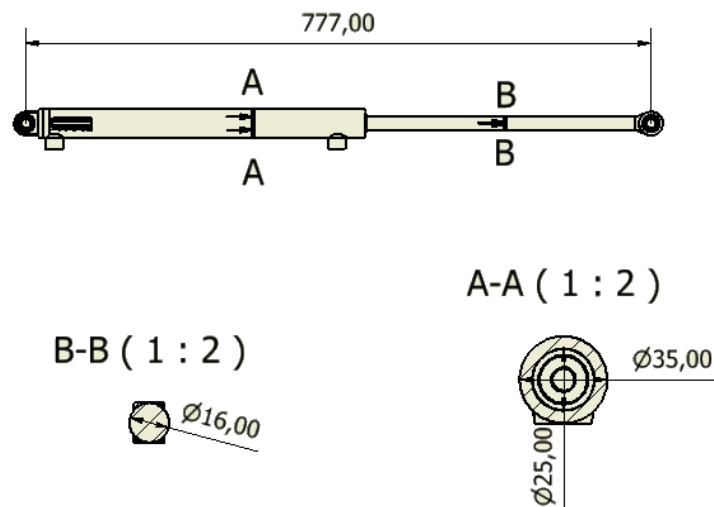
Vi bruker igjen Naviers formel og får en total trykkspenning i den innerste delen av snittet på $\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{moment}} + \sigma_{\text{aks}} = 16,8\text{ MPa}$

$$n = \frac{89,6 \text{ MPa}}{16,8 \text{ MPa}}$$

$$n = 5,3$$

Dette gir en sikkerhetsfaktor på 5,3 med en flytespenning på 89 MPa. (Al 5052-O)

7.2.9 Knekking wirebøyle sylinder:



Figur 7.2.6 Snitt wirebøyle sylinder

Tverrsnittsarealet arealet for stempelstangen:

$$A_{\text{stempelstang}} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (16 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \quad \underline{A_{\text{stempelstang}} = 0,000201 \text{ m}^2}$$

Tverrsnittsarealet for sylinderhuset:

$$A_{\text{sylinder hus}} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot ((35 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 - (25 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2) \quad \underline{A_{\text{sylinder hus}} = 0,000471 \text{ m}^2}$$

Tverrsnittsarealet for sylinderhuset:

$$\sigma_{\text{maks}} = \frac{N_{\text{maks}}}{A_{\text{min}}}$$

$$\sigma_{\text{maks}} = \frac{10\,038 \text{ N}}{0,000201 \text{ m}^2} \quad \underline{\sigma_{\text{maks}} = 49,93 \text{ MPa}}$$

Siden de største spenningene vil opptre i sylinderveggen og ikke i stempelstangen regnes denne som dimensjonerende faktor med hensyn på knekking.

Annet treghetsmoment for sylinderveggen:

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad I = \frac{\pi(0,016 \text{ m})^4}{64} \quad \underline{I = 3,217 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4}$$

Sylinderveggenes slankhet:

$$L_k = 0,7 \cdot L$$

$$\lambda = L_k \sqrt{\frac{A}{I}} \quad \lambda = 0,7 \cdot 0,777 \text{ m} \cdot \sqrt{\frac{0,000201 \text{ m}^2}{3,217 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4}} \quad \underline{\lambda = 136,0}$$

Eulerspenning:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \quad \sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot 193 \cdot 10^9 \text{ Pa}}{136,0} \quad \underline{\sigma_E = 103,2 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_k = \sigma_e = 103,2 \text{ MPa}$$

$\sigma_{maks} < \sigma_k \Rightarrow$ *Sylinderen er korrekt dimensjonert med hensyn på knekking.*

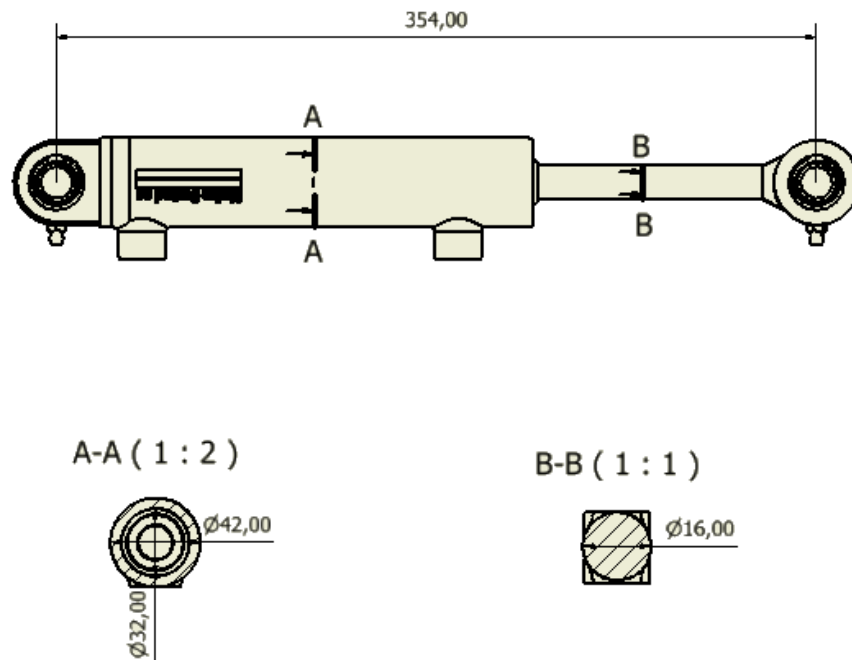
Kritisk last F_k for knekking av sylinderveggen:

$$F_k = \sigma_k \cdot A \quad F_k = 103,2 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,000201 \text{ m}^2 \quad \underline{F_k = 20,7 \text{ kN}}$$

$$n = \frac{103,2 \text{ MPa}}{49,93 \text{ MPa}} \quad \underline{n = 2,0}$$

Dette gir en sikkerhetsfaktor på 2,0.

7.2.10 Knekkning gripeblo sylinder:



Figur 7.2.7 Snitt gripeblo sylinder

Tverrsnittsarealet arealet for stempelstangen:

$$A_{stempelstang} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (16 \cdot 10^{-3} m)^2 \quad \underline{A_{stempelstang} = 0,000201 m^2}$$

Tverrsnittsarealet for sylinderhuset:

$$A_{sylinder hus} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot ((35 \cdot 10^{-3} m)^2 - (25 \cdot 10^{-3} m)^2) \quad \underline{A_{sylinder hus} = 0,0000785 m^2}$$

Tverrsnittsarealet for sylinderhuset:

$$\sigma_{maks} = \frac{N_{maks}}{A_{min}}$$

$$\sigma_{maks} = \frac{10\,038 N}{0,000201 m^2} \quad \underline{\sigma_{maks} = 49,93 MPa}$$

Siden de største spenningene vil opptre i sylinderhuset og ikke i stempelstangen regnes denne som dimensjonerende faktor med hensyn på knekking.

Annet treghetsmoment for sylinderveggen:

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad I = \frac{\pi(0,016 \text{ m})^4}{64} \quad \underline{I = 3,217 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4}$$

Sylinderveggenes slankhet:

$$L_k = 0,7 \cdot L$$

$$\lambda = L \sqrt{\frac{A}{I}} \quad \lambda = 0,7 \cdot 0,354 \text{ m} \cdot \sqrt{\frac{0,000201 \text{ m}^2}{3,217 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}} \quad \underline{\lambda = 62,0}$$

Eulerspenning:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \quad \sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot 193 \cdot 10^9 \text{ Pa}}{62,0} \quad \underline{\sigma_E = 496,3 \text{ MPa}}$$

I dette tilfellet vil utbøyning av staven kunne inntre før knekkspenningen er nådd, fordi materialet når flytegrensen under utbøyningen. I dette tilfellet vil dimensjonerende knekkspenningen være gitt med flytegrensen: $\sigma_k = f_y$

$f_y = 280 \text{ MPa}$ for 316 syrefast stål.

$\sigma_{maks} < f_y \Rightarrow$ *Sylinderen er korrekt dimensjonert med hensyn på knekking.*

Kritisk last F_k for knekking av sylinderveggen:

$$F_k = \sigma_k \cdot A \quad F_k = 280 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,000201 \text{ m}^2 \quad \underline{F_k = 56,3 \text{ kN}}$$

$$n = \frac{280 \text{ MPa}}{49,93 \text{ MPa}} \quad \underline{n = 5,6}$$

Dette gir en sikkerhetsfaktor på 5,6.

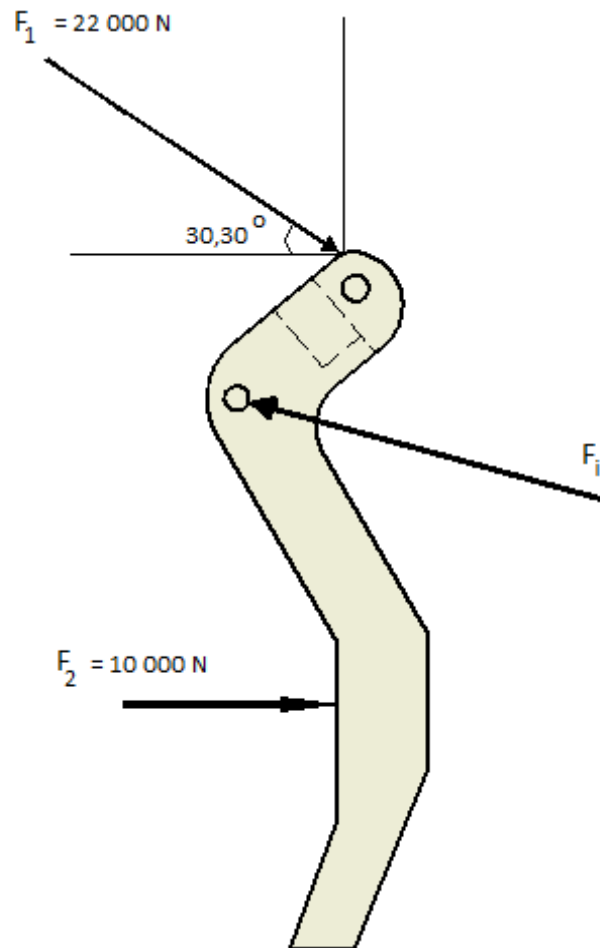
7.2.11 Avskjæring av skruer:

$$F = 2 \cdot n \cdot \tau \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{2F}{n \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$\sigma_{jf} = \sqrt{3\tau^2}$$

$$\text{Sikkerhetsfaktor} = \frac{f_y}{\sigma_{jf}}$$

Gripeklo skruer:



Figur 7.2.8 Krefter om opplyringspunkt for klo

$$\frac{F_{1x}}{22\,000\text{ N}} = \cos \theta \quad \Rightarrow \quad F_{1x} = 18\,995\text{ N}$$

$$\frac{F_{1y}}{22\,000\text{ N}} = \sin \theta \quad \Rightarrow \quad F_{1y} = 11\,100\text{ N}$$

$$\sum F_x = 0 \quad \Rightarrow \quad F_{1x} + F_2 = F_{ix} \quad \Rightarrow \quad F_{ix} = 18\,995\text{ N} + 10\,000\text{ N}$$

$$\underline{F_{ix} = 28\,995\text{ N}}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{1y} = -F_{iy} \Rightarrow \underline{F_{iy} = -11\,100\,N}$$

$$F_i = \sqrt{F_{ix}^2 + F_{iy}^2} \quad F_i = \sqrt{(28\,995\,N)^2 + (-11\,000\,N)^2}$$

$$\underline{F_i = 31\,047\,N}$$

Maks skjærspenning:

$$\tau = \frac{2 \cdot 31\,047\,N}{1 \cdot \pi \cdot (0,014\,m)^2} \quad \underline{\tau = 100,8\,MPa}$$

Jamføringsspenningen:

$$\sigma_{jf} = \sqrt{3 \cdot (100,8\,MPa)^2} \quad \underline{\sigma_{jf} = 174,7\,MPa}$$

$$Sikkerhetsfaktor = \frac{280\,MPa}{174,7\,MPa} \quad \underline{Sikkerhetsfaktor = 1,6}$$

Med skruer i syrefast stål med en flytspenning på 280 MPa vil en her ha en sikkerhetsfaktor på 1,6. Dette er de skruene som er under størst belastning og har derfor den laveste sikkerhetsfaktoren.

Skruer gripeklosylinder:

Maks skjærspenning:

$$= \frac{2 \cdot 22\,000\,N}{1 \cdot \pi \cdot (0,016\,m)^2} \quad \underline{\tau = 54,7\,MPa}$$

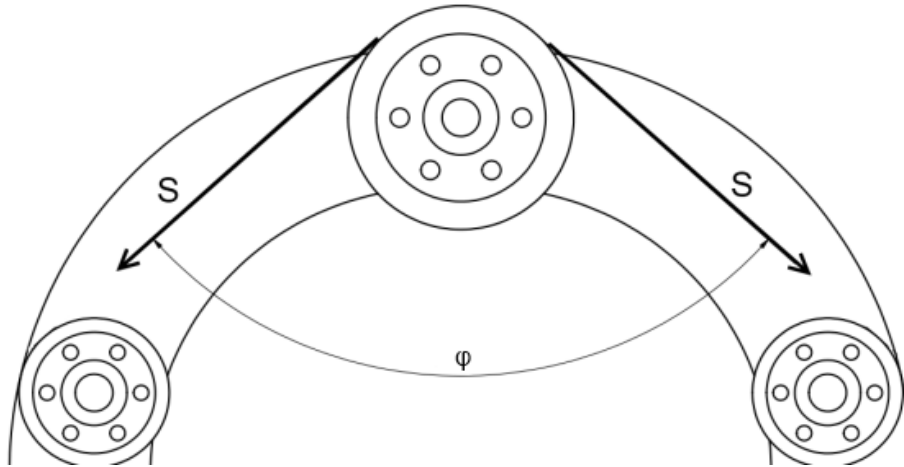
Jamføringsspenningen:

$$\sigma_{jf} = \sqrt{3 \cdot (54,7\,MPa)^2} \quad \underline{\sigma_{jf} = 94,8\,MPa}$$

$$Sikkerhetsfaktor = \frac{280\,MPa}{94,8\,MPa} \quad \underline{Sikkerhetsfaktor = 2,95}$$

Wirehjul skruer:

Maks kraft snorwiren kan utsettes for før den ryker: 22 000 N



Figur 7.2.9 Krefter på drivhjulskrue

$$\cos \frac{\varphi}{2} = \frac{\frac{1}{2} S_{res}}{22\,000\,N} \quad \Rightarrow \quad S_{res} = 2 \cdot 22\,000\,N \cdot \cos \frac{90,7^\circ}{2}$$

$$S_{res} = 30\,922\,N$$

Maks skjærspenning:

$$\frac{2 \cdot 30\,922\,N}{1 \cdot \pi \cdot (0,02\,m)^2} \quad \underline{\underline{\tau = 49,2\,MPa}}$$

Jamføringsspenningen:

$$\sigma_{jf} = \sqrt{3 \cdot (49,2\,MPa)^2} \quad \underline{\underline{\sigma_{jf} = 85,2\,MPa}}$$

$$\text{Sikkerhetsfaktor} = \frac{280\,MPa}{85,2\,MPa} \quad \underline{\underline{\text{Sikkerhetsfaktor} = 3,3}}$$

7.2.12 Hulltrykkspenning:

$$\sigma_h = \frac{F}{d \cdot t}$$

$$n = \frac{f_y}{\sigma_h}$$

Vi har her valgt å se på de hullene som er utsatt for størst krefter, hullet i kloen, hullet i nedre hjul og det nedre hullet i wirebøylen.

Gripeklo, innfesting til ramme:

$$\sigma_h = \frac{31\,047\text{ N}}{14\text{ mm} \cdot 25\text{ mm}} \qquad \underline{\sigma_h = 88,7\text{ MPa}}$$

$$n = \frac{280\text{ MPa}}{88,7\text{ MPa}} \qquad \underline{n = 3,2}$$

Gripeklo, innefesting av sylinder:

$$\sigma_h = \frac{10\,800\text{ N}}{15\text{ mm} \cdot 5\text{ mm}} \qquad \underline{\sigma_h = 144\text{ MPa}}$$

$$n = \frac{280\text{ MPa}}{88,7\text{ MPa}} \qquad \underline{n = 1,9}$$

Nedre Wirehjul:

$$F = \sqrt{S^2 + S^2} \qquad F = \sqrt{(22\,000\text{ N})^2 + (22\,000\text{ N})^2} \qquad \underline{F = 31\,112\text{ N}}$$

$$\sigma_h = \frac{31\,112\text{ N}}{20\text{ mm} \cdot 15\text{ mm}} \qquad \underline{\sigma_h = 103,7\text{ MPa}}$$

$$n = \frac{280\text{ MPa}}{103,7\text{ MPa}} \qquad \underline{n = 2,7}$$

Wirebøyle:

$$\sigma_h = \frac{31\,112\text{ N}}{20\text{ mm} \cdot 40\text{ mm}} \qquad \underline{\sigma_h = 38,9\text{ MPa}}$$

$$n = \frac{89\text{ MPa}}{38,9\text{ MPa}} \qquad \underline{n = 2,3}$$

7.2.13 Levetid wire:

Levetiden for wiren oppgis av akutt til å være omtrent $0,2m^2/m$, litt avhengig av antall inn og utganger og tykkelsen på godset.

Vi kan da sette opp:

$$D = 12\text{tommer} \cdot 25,4\text{mm/tomme} = 304,8\text{mm}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(304,8\text{mm})^2}{4} = 72966\text{mm}^2 = 0,073\text{m}^2$$

$$L_{\text{wire}} = 2\text{m}$$

$$n_{\text{wire}} = \frac{L_{\text{wire}} \cdot 0,2\text{m}^2/\text{m}}{A} = 5,48$$

En wire med lengde 2m vil ha en levetid på fem kutt og må deretter byttes ut.

7.2.14 Vekt i vann ferdig verktøy:

Masse ferdig verktøy: 53,501 kg

Volum ferdig verktøy: $9314280,151 \text{ mm}^3$

Vekt i vann:

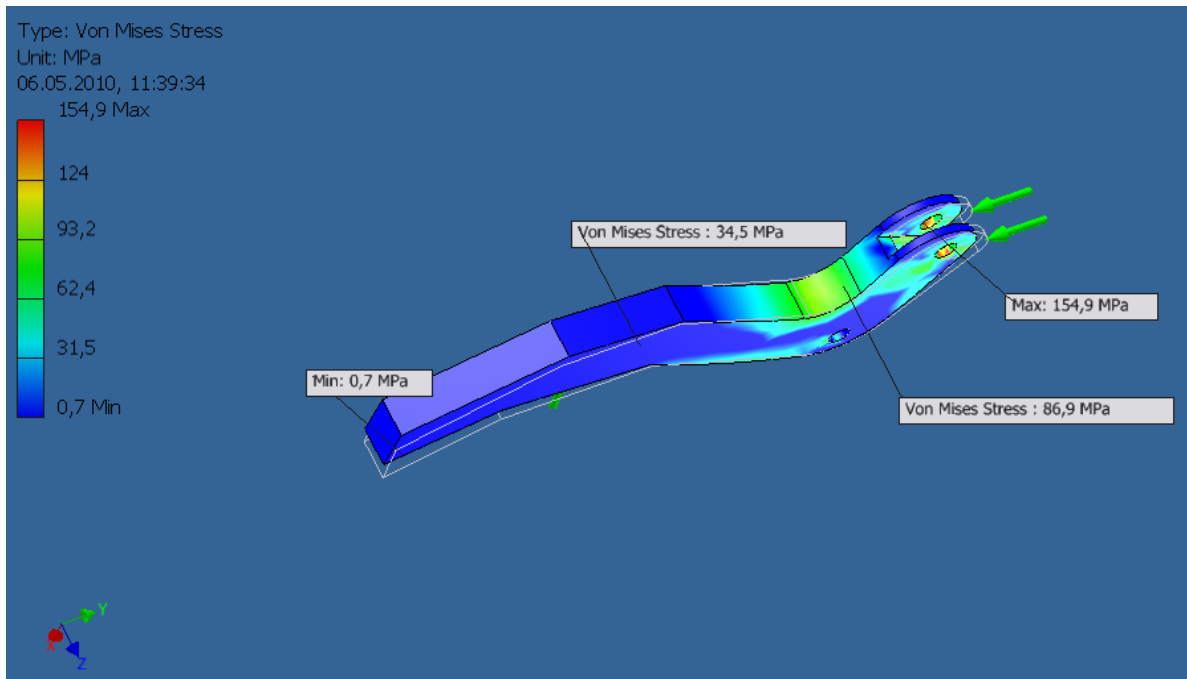
$$G = mg - Vg\rho_{\text{vann}}$$

$$G = 53,501 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 - 9314280,151 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1023 \text{ kg/m}^3$$

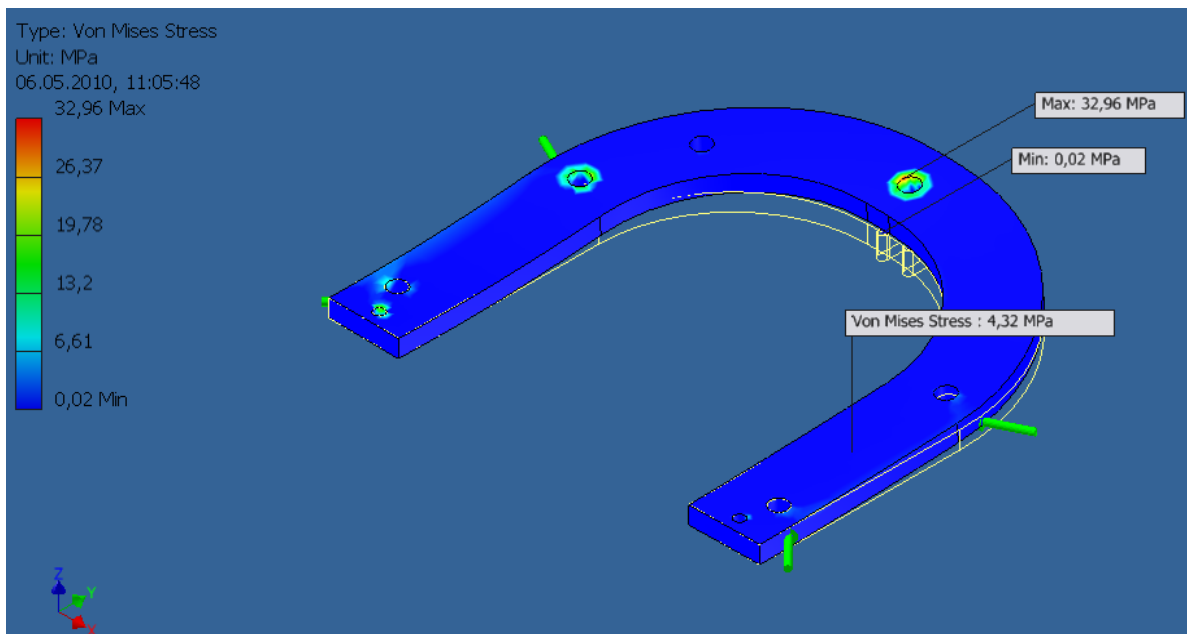
$$G = 431,4 \text{ N}$$

Det ferdige verktøyet vil ha en vekt i vann på ca 430 N. Om dette blir for mye for ROVen vil man kunne montere på relativt beskjedne flyteelementer.

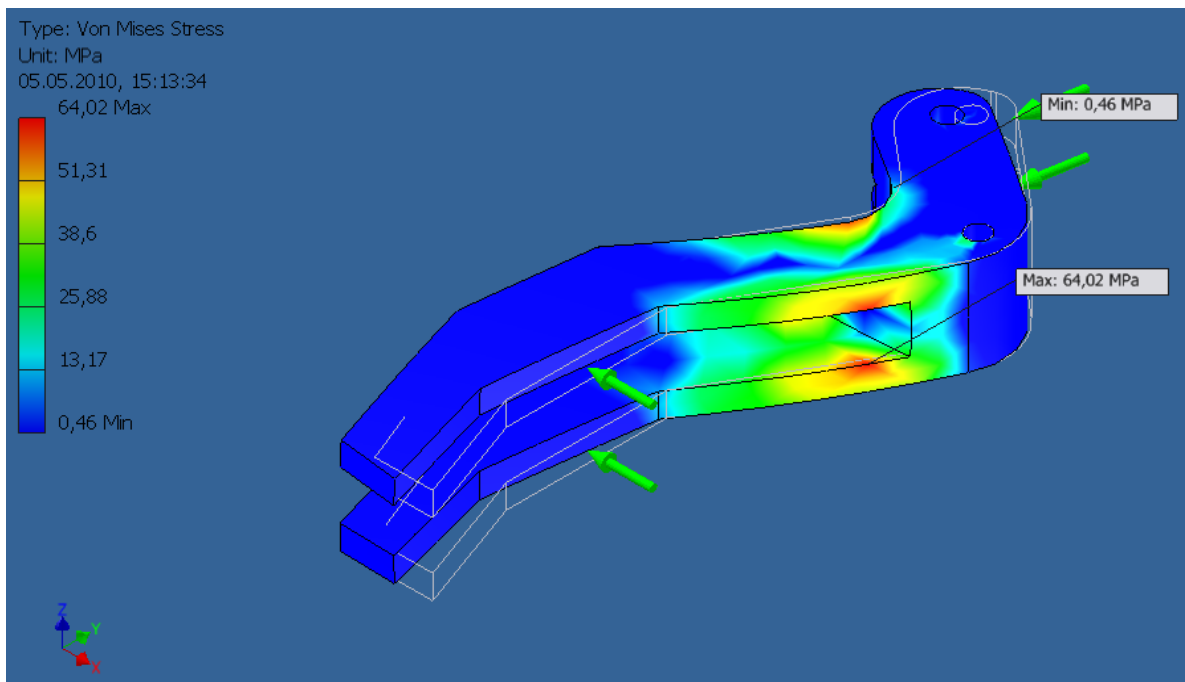
7.3 Databeregninger



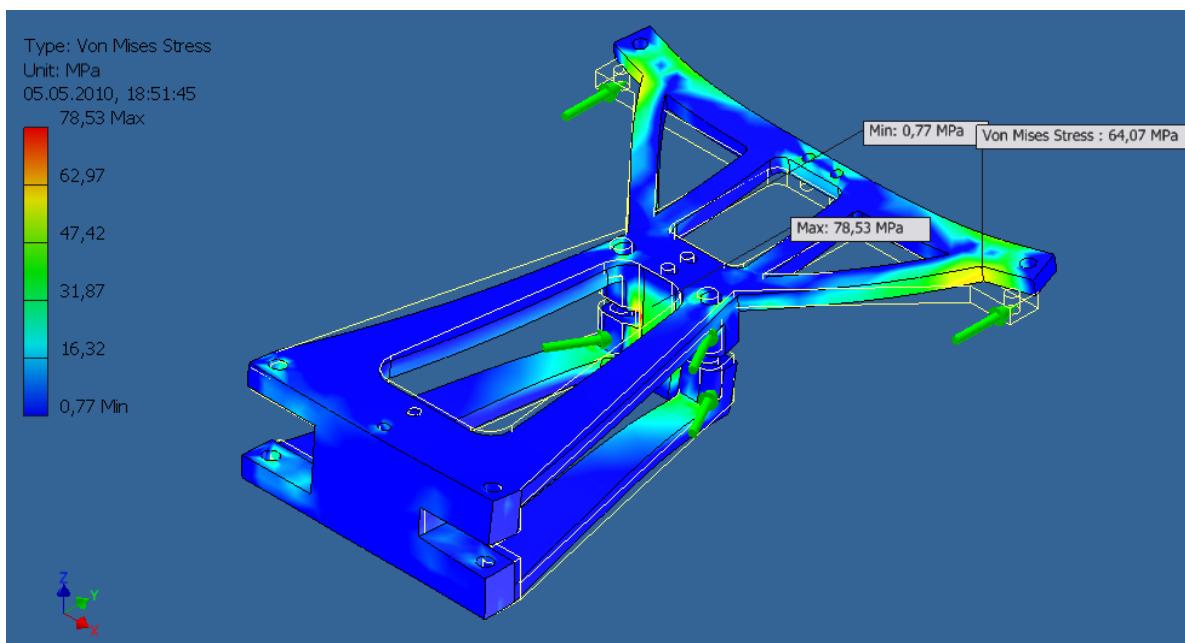
Figur 7.3.1 Spenninger i enkeltklo



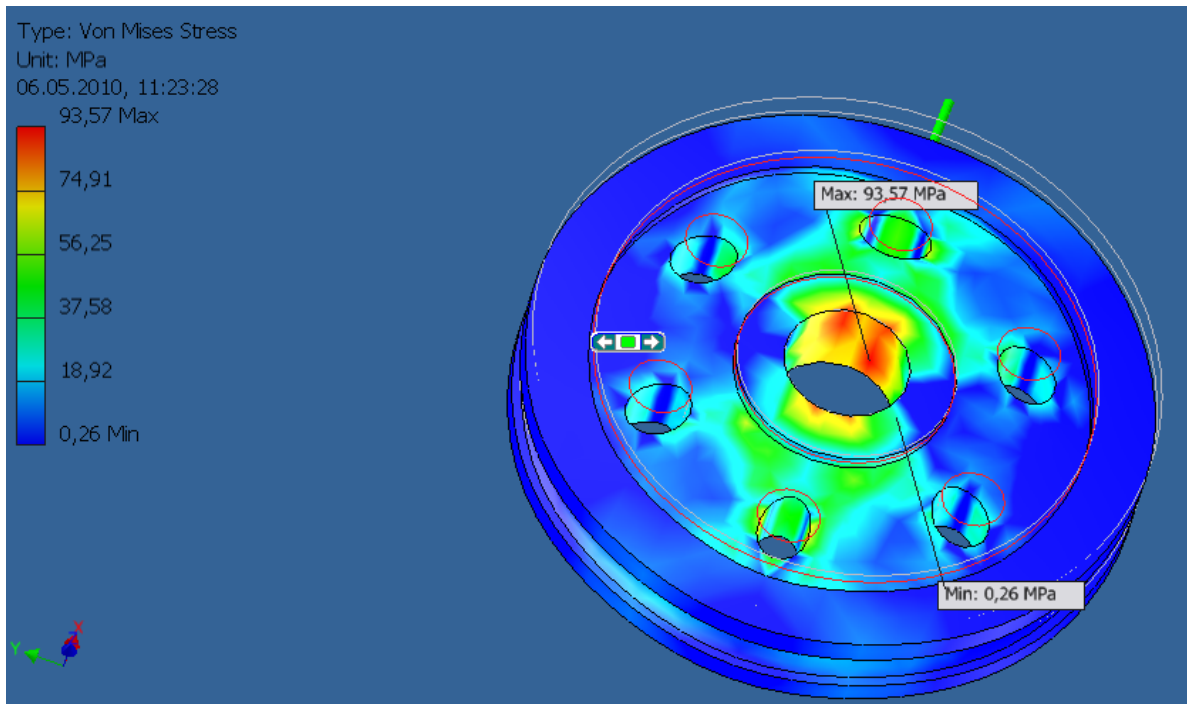
Figur 7.3.2 Spenninger i Wirebøyle



Figur 7.3.3 Spenninger i dobbeltklo



Figur 7.3.4 Spenninger i hoveddel



Tabell 7.3.1 Spenninger nedre løpehjul

7.4 Sammenligning av beregningsverdier

Snitt	Databeregning	Håndberegning
Snitt av klo	86,9 MPa	78 MPa
Snitt 2 av klo	34,5 MPa	48 MPa
Snitt C	64,07 MPa	129 MPa
Snitt av kutterbøyle	4,32 MPa	16,8 MPa

Tabell 7.4.1 Sammenligning databeregninger og håndberegninger

Fra tabellen ser vi at databeregningene og håndberegningene stemmer ganske godt overens. Håndberegningene har en tendens til å ligge litt høyere enn databeregningene. Dette kan komme av at datamaskinen bruker mindre konservative beregningsmetoder, i tillegg til å ta hensyn til avrundinger og kjervfaktorer, som ikke er så lett å beregne for hånd. I begge tilfeller ser vi at vi ligger godt under flytspenningen med en minste sikkerhetsfaktor på 2,17.

Hull	Databeregning	Håndberegning
Gripeklo, innfesting til ramme	73,84 MPa	88,7 MPa
Gripeklo, innfesting til sylinder	154,9 MPa	144 MPa
Nedre løpehjul	93,6 MPa	103,7 MPa
Nedre hull wirebøyle	27,7MPa	38,9 MPa

Tabell 7.4.2 Sammenligning av hulltrykk

Også her ligger håndberegningene stort sett over verdiene en henter ut fra Inventor. Dette skyldes nok at formelen for å regne ut hulltrykkspenninger for hånd er konservativ og at det kan være vanskelig å få til en korrekt mesh i disse områdene.

8 Avsluttende diskusjon

Ved gjennomgang av de kuttemetodene som ikke er brukt under vann i dag, eller er brukt i liten utstrekning, viste det seg at de ikke ville være praktiske ved kutting av rør.

Plasmakutting ved store vanddyp ser ut til å ha dårlige forutsetninger generelt, da effektbehovet stiger drastisk med økende dyp samtidig som kvaliteten på kuttet forringes.

Laserskjæring kan brukes i de tilfellene der en har muligheten for å lage en luftfylt lomme i området som skal skjæres, men dette er ikke praktisk ved kutting av rør. Det vil også gjøre verktøyet langt større. Et mulig bruksområde for laserskjæring under vann kan være ved større operasjoner på rørledninger, der en benytter seg av et sveisehabitat som fylles med luft.

Vannjetkutting kan være en god metode ved kutting av større rør, men størrelsen av utstyret på dekk, samt slanger ned til verktøyet er i overkant av det som kan godtas ved konstruksjon av et verktøy som skal benyttes til å kutte små rør.

Av de mer konvensjonelle kuttemetodene kom gruppen frem til at diamantwire var den mest praktiske metoden. Denne metoden er patentert av CUT frem til 2011 så lenge kutteren festes til røret.

9 Konklusjon

Kutteren og festekloen ble designet og styrkeberegnet i Inventor, og styrkeberegningene ble kontrollert for hånd. Å benytte oss av styrkeberegningssystemer har hjulpet oss å få en overordnet oversikt over spenninger i de forskjellige delene verktøyet er bygget opp av. Basert på de antatt viktigste beregningene vil verktøyet ha en minste sikkerhetsfaktor på litt over 2.

Verktøyet som vi har kommet fram til vil oppfylle alle krav som oppgaven stiller. Det vil allikevel være en del beregninger som gjenstår før en eventuelt kan sette verktøyet i produksjon. I tillegg kommer valg av hydraulisk motor, samt tilpasning av innfestingen av denne i modellen. Hvis disse beregningene og valgene gjennomføres vil løsningen i prinsippet være et effektivt ROV vennlig kutteverktøy.

Referanser

- 1 Oil & Gas UK. <http://www.offshore-mag.com>. [Internet]. 2009 [cited 2010 Mai 3]. Available from: http://www.offshore-mag.com/index/article-display/8330772287/articles/offshore/volume-69/issue-9/engineering_-_construction/uk-industry_faces.html.
- 2 Minerals Management Service. <http://www.mms.gov>. [Internet]. [cited 2010 Mai 3]. Available from: <http://www.mms.gov/tarprojectcategories/Assets/Photos/727decom.jpg>.
- 3 The Fabricator. 1997.
- 4 Centricut. <http://www.centricut.com>. [Internet]. [cited 2010 Februar]. Available from: http://www.centricut.com/New_Lessons/lessons_9.html.
- 5 Hypertherm. <http://www.hypertherm.com>. [Internet]. [cited 2010 Mars]. Available from: https://www.hypertherm.com/Xnet/library/DocumentLibrary3.jsp?file=Product_Information/SB_MAX200.pdf.
- 6 Gruchow WB&A. Plasma cutting in atmosphere and under water. Pure & Appl. Chern., Vol. 64, No. 5. 1992 665-670.
- 7 Waldie B. Effects of increasing equivalent water depth on plasma-arc cutting underwater and in gaseous atmosphere. In: ISPC-10; Aug 1991; Bochum.
- 8 Welding and Joining Institute of the RWTH Aachen. [Internet]. [cited 2010 Februar]. Available from: <http://mercury.kau.ac.kr/welding/Welding%20Technology%20I%20-%20Welding%20Processes/Chapter%2012%20-%20Thermal%20Cutting.pdf>.
- 9 IPG Photonics. IPGPhotonics.com. [Internet]. [cited 2010 Mars 1]. Available from: http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/HP_Brochure.pdf.
- 10 TETRA Technologies, Inc. <http://www.tetrathec.com>. [Internet]. [cited 2010 Februar]. Available from: http://www.tetrathec.com/getFile.asp?File_Content_ID=3391&isDownload=1.
- 11 XiaMen MetalShine Technology. <http://www.amoydiamond.com>. [Internet]. [cited 2010 Mars 30.03.2010]. Available from: <http://www.amoydiamond.com/images/DiamondWireSawSegments.jpg>.
- 12 Decom World. [Internet]. [cited 2010 April 15]. Available from: <http://social.decomworld.com/qa/proserv-offshore-maintaining-precision-under-pressure>.
- 13 CUT. <http://www.cut-group.com>. [Internet]. [cited 2010 April 15]. Available from: http://www.cut-group.com/applications_clft.asp.
- 14 E.H.Wachs. <http://www.ehwachs.com/subsea/index.htm>. [Internet]. [cited 2010 Mars]. Available from: http://wachSCO.com/new_assets/brochures/subsea_web.pdf.
- 15 Lindaas JC. Kompendium i: Tilvirkning. Haugesund: Høyskolen Stord Haugesund.
- 16 ESAB cutting systems. ESAB cutting systems. [Internet]. [cited 2010 Mars]. Available from: <http://www.esabcutting.com/cutting/en/process/waterjet-cutting-machines.cfm>.
- 17 Matweb Material Property Data. <http://www.matweb.com/>. [Internet]. [cited 2010 April 22]. Available from: <http://www.matweb.com/>.
- 18 Wikipedia. www.wikipedia.org. [Internet]. [cited 2010 Mai 5]. Available from: <http://no.wikipedia.org/wiki/Laser>.

Vedlegg

Vedlegg A - 2D-tegninger av kutteverktøyet

Vedlegg B - Styrkeberegningsrapport fra Inventor

Vedlegg C - Datablad for 316 syrefast stål [17]

Vedlegg D - Datablad for aluminium 5052-O [17]

Vedlegg E - CD-ROM med rapporten og DAK-modellen.