

# ROV elektronikkylindre av kompositt til bruk ved store havdyp

**Thor Øystein Olsen**

Produktutvikling og produksjon

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Bjørn Haugen, IPM

Medveileder: Thor Olav Sperre, Sperre AS  
Robert Sandven, Sperre AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for produktutvikling og materialer



# Prosjektbeskrivelse

NORGES TEKNISK-  
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET  
INSTITUTT FOR PRODUKTUTVIKLING  
OG MATERIALER

## MASTEROPPGAVE VÅR 2012 FOR STUD.TECHN. THOR ØYSTEIN OLSEN

### **ELEKTRONIKKSYLINDRE I KOMPOSITTMATERIALE FOR ROV-ER VED STORE HAVDYP** **Electronics housing cylinders in composite material for ROVs at large water depths**

Per i dag har Sperre AS produsert ROV-er kvalifisert ned til 3000 meters dyp. Dette innebærer 300 bars ytre trykk på komponenter uten trykkkompensering og fare for at disse kollapser om fartøyet blir brukt på større dyp.

Oppgaven innebærer å utvikle elektronikksylindere ved bruk kompositt for å kunne takle 600 bars ytre trykk; en dobling av dagens spesifikasjoner. Ved en komposittløsning, ønsker man å oppnå høyere styrke på komponenten uten at denne blir nevneverdig tyngre.

Oppgaven innebærer å gjøre en teoretisk sammenligning av sylindreløsning i stål, aluminium og kompositt. Det kan også være aktuelt å foreta fysisk testing av en komposittsylinder.

Den forutgående prosjektoppgaven for Sperre omhandlet materialvalg for rammekonstruksjonen til ROV-ene. I denne forbindelse ønsker en også å utføre strekkprøver og hulltrykkprøver for aktuelle materialvalg.

Før kandidaten går i gang med forsøkene, skal han/hun sette opp en oversiktlig forsøksplan som inneholder alle opplysninger om forsøksmetodikk og forsøksbetingelser. Planen skal foreligge til godkjenning innen tre uker etter utlevering av oppgaven.

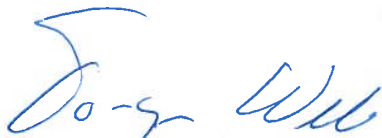
Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse, etc. Ved utarbeidelse av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig 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.

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 undervisning. Arket skal også oppdateres ved innlevering av masteroppgaven.

Besvarelsen skal leveres i papirformat i to eksemplarer. Lever også en elektronisk versjon av oppgaven på CD eller DVD i pdf-format.

Kontaktperson:

Thor Olav Sperre og Martin Ludvigsen, Sperre AS



Torgeir Welo  
Instituttleder



Bjørn Haugen  
Faglærer



NTNU  
Norges teknisk-  
naturvitenskapelige universitet

Institutt for produktutvikling  
og materialer

## Sammendrag

Sperre AS produserer i stor grad hele ROV konstruksjonen sin i aluminiumslegeringen AA6082-T6. Dette er et velegnet materiale for oppgava, men med noen mangler.

Denne oppgava fokuserer på elektronikkylindrene til ROV-en, disse er per idag produsert i den ovennevnte aluminiumslegeringa. Man vil i framtida ned på store havdyp, ned mot 6000 meter. Når man skal så dypt vil disse elektronikkylindrene påføre konstruksjonen mye vekt og volum, både direkte pga større masse aluminium og indirekte ved at man trenger mye oppdriftsmateriale.

Ved å benytte seg av kompositt og egne produksjonsmetode vil man kunne produsere samme tanken, med svært mye bedre egenskaper. I denne oppgava er det sett på metall-innerforing for spinning av kompositt på utsida og derfor oppnå ønska styrke, samt generelt design av sylindren. Det er også foreslått design uten innerforing, men da produsert ved hjelp av kompositt-duk. Hvilket materiale som er best egna til innerforing og hvilken kompositt som har de beste egenskapene er også vurdert.

Som deloppgave er det utført mekanisk testing på sveist aluminiumslegering for å verifisere DNV standarden [1], samt vurdere om man ved forenkla varmebehandling kan gjenopprette noe av styrken til metallet.

## Summary

Sperre AS is producing their ROV mainly out of the aluminum alloy AA6082-T6. This material is well suited for the application, but do have some limitations.

This thesis focuses on the cylinders, containing the electrical system onboard the ROV. Today, these cylinders are made by the AA6082-T6 alloy. In the future, Sperre wishes to press ahead regarding how deep they can dive, 6000 meters is the next milestone. This depth means that if it is produced in aluminum, the volume and weight of the ROV will be greatly affected.

If the same cylinder is produced with the use of composites, the strength will be much higher and the weight lower. The thesis contains evaluations regarding the overall design, which liner material should be used and a design without any liner at all. The design without liner, will need more adaptations to fit the ROV system as it is today. Which composite that suits this application is also evaluated.

Sperre requested some mechanical testing of welded aluminum, to evaluate the DNV standard [1] and if simplified heat treatment can give beneficial results.



# Forord

Denne masteroppgaven er skrevet for å øke kunnskapen rundt kompositter og bruken av kompositter til konstruksjonsformål hos Sperre AS. Kompositter som karbonfiber og kevlar har gode materialegenskaper i kombinasjon med lav massetetthet. Disse to egenskapene er svært verdifulle ved design og konstruksjon av ROV.

Denne rapporten er skrevet ved Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet, avdeling for produktutvikling og materialer. Rapporten er den siste delen av Masterutdanningen og teller 30 studiepoeng. Masteroppgaven har varighet fra 16. januar til 11. juni.

Prosjektet ville vært vanskelig å gjennomføre uten hjelp. Jeg vil benytte muligheten til å takke veilederne mine, Førsteamanuensis Bjørn Haugen og Professor Henry Valberg for all veiledning igjennom prosjektet. Stanislav Shchebetov, Arnfinn Willa Hansen og Hallvard Støwer har vært god hjelp ved oppsett og innsamling av data ved testing. Jeg vil også rette en takk til Sperre AS for at de var villige til å fremskaffe forprosjekt og masteroppgave. Vil også rette en spesiell takk til Thor Olav Sperre, og Robert Sandven som har vært stor hjelp som eksterne veiledere hos Sperre AS.

Trondheim 4. juni 2012

Thor Øystein Olsen





# Innhold

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn . . . . .	1
1.2	Oppgave . . . . .	1
1.3	Metode . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>3</b>
2.1	Lekkasje før brudd . . . . .	4
2.2	Kompositter . . . . .	4
2.2.1	Fiber . . . . .	4
2.2.2	Bindemiddel . . . . .	7
2.2.3	Fiberretning . . . . .	7
2.2.4	Laminat . . . . .	8
2.2.5	Styrke . . . . .	9
2.2.6	Temperaturbestandighet . . . . .	9
2.3	Spinning av komposittmateriale . . . . .	9
2.3.1	Spinnemaskin . . . . .	10
2.3.2	Innerforing/ Innerforingsklasser . . . . .	12
2.3.3	Spenningsfordeling . . . . .	13
2.3.4	Spinnevinkel . . . . .	14
2.4	Styrketeori ved ytre trykk . . . . .	15
2.5	Kompositt/ innerforing . . . . .	18
2.5.1	Materiale innerforing . . . . .	18
2.5.2	Bindemiddel . . . . .	19
2.5.3	Varmeutvidelsesforskjeller . . . . .	19
2.6	Korrosjon . . . . .	19
2.6.1	Galvanisk korrosjon . . . . .	20
2.6.2	Løsninger for å unngå korrosjon . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Dagens elektronikkylinder</b>	<b>23</b>
3.1	Design . . . . .	24
3.1.1	Sylinder . . . . .	24
3.1.2	Endelokk . . . . .	25
3.1.3	Lukket elektronikkhus . . . . .	26
3.2	6000 meters elektronikkhus . . . . .	27
3.3	Varmeutvikling . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Hull og strekkprøveforsøk</b>	<b>29</b>
4.1	Bakgrunn . . . . .	29
4.1.1	Strekkprøving . . . . .	29
4.1.2	Hulltrykksprøving . . . . .	30

4.2	Testforberedelser . . . . .	31
4.2.1	Prøvene . . . . .	31
4.2.2	Strekkprøving . . . . .	32
4.2.3	Hulltrykksprøving/Dortest . . . . .	33
4.3	Testgjennomføring . . . . .	34
4.3.1	Varmebehandling . . . . .	34
4.3.2	Strekkprøving . . . . .	35
4.3.3	Hulltrykksprøving/ Dortest . . . . .	38
4.4	Måleresultater . . . . .	40
4.4.1	Strekkprøving . . . . .	40
4.4.2	Hulltrykksprøving/Dortest . . . . .	43
4.5	Anbefalinger . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Kravspesifikasjon</b>	<b>47</b>
5.1	Ytre trykk . . . . .	47
5.2	Vekt . . . . .	47
5.3	Størrelse . . . . .	48
5.4	Testkrav . . . . .	48
5.4.1	Trykk . . . . .	48
5.4.2	Praktiske elementer ved testing . . . . .	48
5.5	Varmeoverføring . . . . .	49
5.6	Delaminering . . . . .	49
5.7	Produksjon . . . . .	49
5.7.1	Utforming av ende . . . . .	49
5.7.2	Oppspenning . . . . .	50
5.7.3	Effektivitet . . . . .	50
5.8	Kompatibilitet/Marked . . . . .	51
5.9	Visuelt . . . . .	51
5.10	Transport/Kostnadseffektivitet . . . . .	51
5.11	Miljøvennlig . . . . .	52
5.12	Sammendrag . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Konsepter</b>	<b>53</b>
6.1	Morfologi . . . . .	53
6.1.1	Innerforingsgeometri . . . . .	53
6.1.2	Endedesign . . . . .	55
6.1.3	Korrosjonsmotstand . . . . .	57
6.1.4	Materiale innerforing . . . . .	58
6.1.5	Materiale lastbærende . . . . .	58
6.1.6	Kontaktareal mellom innerforing og kompositt . . . . .	58
6.1.7	Estetikk . . . . .	59
6.1.8	Morfologisk tabell . . . . .	59
6.2	Konseptfase . . . . .	59
6.2.1	Konsept 1 . . . . .	60
6.2.2	Konsept 2 . . . . .	60
6.2.3	Konsept 3 . . . . .	61
6.2.4	Konsept 4 . . . . .	62
6.2.5	Konsept 5 . . . . .	62
6.2.6	Konsept 6 . . . . .	64
6.2.7	Konsept 7 . . . . .	64

6.3	Konseptvalg . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Valgt konsept</b>	<b>67</b>
7.1	Materialvalg . . . . .	68
7.1.1	Innerføring . . . . .	68
7.1.2	Lokk . . . . .	68
7.1.3	Kompositt . . . . .	69
7.2	Design . . . . .	70
7.2.1	Testing . . . . .	71
7.3	Delt karbonfiberhus . . . . .	71
7.3.1	Testing . . . . .	73
<b>8</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>75</b>
8.1	Aluminiumstesting . . . . .	75
8.2	Kompositt trykktank . . . . .	75
<b>9</b>	<b>Videre arbeid</b>	<b>77</b>
	Bibliografi . . . . .	79
<b>A</b>	<b>Maskintegninger og styrkeberegning av dagens elektronikkhus</b>	<b>81</b>
<b>B</b>	<b>Spesifikasjoner industrielle karbonfibre</b>	<b>87</b>
<b>C</b>	<b>Spesifikasjoner tørr og prepreg karbonfiberduk</b>	<b>88</b>



# Figurer

1.1	Bukla kamerahus i aluminium	1
2.1	Materialsystemer	5
2.2	Oppbygging av laminat	8
2.3	Eksempel på oppbygging av laminat	8
2.4	Spinnemaskin ved IPM	10
2.5	Spinnemaskin ved IPM, Mateøye	11
2.6	Spinnemaskin ved IPM, Kar for bindemiddelet	11
2.7	Tørrspunnet tank med litt under 90 graders vinkel	14
2.8	Tørrspunnet tank med ca $\pm 45$ graders vinkel	15
2.9	Prinsippskisse bukling	16
2.10	Kollapsa kamerahus	16
2.11	Kritiske knekkledd	17
2.12	Endring av potensialforskjell ved påtrykt spenning og sinkanode	21
2.13	Heldige/ uheldige konstruksjonsmetoder korrosjonsmessig	22
3.1	Plassering av elektronikksylindre	23
3.2	Sylinderkroppen til dagens elektronikkhus	24
3.3	Bakre endelokk til dagens elektronikkhus	25
3.4	Deformasjon o-ring ved ytre trykk	26
3.5	Lukket elektronikkhus	26
3.6	300 vs 600 bars aluminiumssylindre	27
4.1	Eksempel på spenning/tøyningskurve	29
4.2	Hundebeinsforma strekkprøve	30
4.3	Plassering av hulltrykksprøver i forhold til sveis	31
4.4	Sveist 5 mm aluminiumsplate i legeringen AA6082-T6	32
4.5	Dimensjoner strekkprøvene	33
4.6	Vannskjærte hulltrykksprøver og dimensjoner på hulltrykksprøver	34
4.7	Nabertherm varmeovn	35
4.8	Prøver utsatt for kunstig elding	35
4.9	Strekkmaskin av typen Instron	36
4.10	Oppspent strekkprøve	37
4.11	Prøve med sveisefeil (venstre) VS uten sveisefeil	37
4.12	Dortest- jigg	38
4.13	Dortest- oppsett	39
4.14	Utsprengt prøve	39
4.15	Dortest, før/etter	40
4.16	Strekkprøver med brudd i bløt sone	40
4.17	Last/forflytningskurve ved strekkprøving, prøve 6T;1	41
4.18	Testresultat	42

4.19	Kraft-vei forløp ved dortest for to ulike prøver . . . . .	43
4.20	Duktilitet VS avstand ifra sveis, dortest . . . . .	44
4.21	Bruddlast VS avstand ifra sveis, dortest . . . . .	44
4.22	Hardhet med ekvivalent spenning VS avstand fra sveis [18] . . . . .	44
5.1	Kuleforma ende med god frihet hva angår fiberbane . . . . .	50
5.2	Bakdokke for ekstra støtte, NTNU spinnemaskin . . . . .	51
6.1	Lastbærende metallforing . . . . .	53
6.2	Ingen innerforing, kun kompositt . . . . .	54
6.3	Sylindrisk innerforing med kompositt . . . . .	54
6.4	Sylindrisk, nedtrappa innerforing med kompositt . . . . .	54
6.5	Bulka innerforing med kompositt . . . . .	55
6.6	Ugjevn innerforing med kompositt . . . . .	55
6.7	Flatt endedesign . . . . .	55
6.8	kuleforma endedesign . . . . .	55
6.9	kuleforma, men avkutta endedesign . . . . .	56
6.10	Spisst endedesign . . . . .	56
6.11	Konkavt endedesign . . . . .	56
6.12	Avrunda ende med pinner . . . . .	57
6.13	Dagens 3000 meters endelokk . . . . .	57
6.14	Morfologisk tabell . . . . .	59
6.15	Konsept 1 . . . . .	60
6.16	Konsept 3 . . . . .	61
6.17	Karbonfiberbelagt rør spunnet ved IPM . . . . .	61
6.18	Konsept 4 . . . . .	62
6.19	Valsing av rør t.v. og dyptrekking av komponent t.h. . . . .	63
6.20	Konsept 5 . . . . .	63
6.21	Konsept 6 . . . . .	64
6.22	Konsept 7 . . . . .	65
6.23	Konseptevaluering . . . . .	65
7.1	Valgt konsept; konsept 4 . . . . .	67
7.2	Mål og dimensjoner innerforing . . . . .	70
7.3	Delt plenum i karbonfiber . . . . .	71
7.4	Form for støping av karbonfiber . . . . .	72
7.5	Testtrigg delt kompositthus . . . . .	73
A.1	Belastning elektronikkylindere . . . . .	81
A.2	Maskintegning av sylinderkroppen til dagens elektronikkhus . . . . .	82
A.3	Styrkeberegning av sylinderskallet . . . . .	83
A.4	Styrkeberegning av sylinderskallet med spenningsverdier for vilkårlige punkter . . . . .	83
A.5	Maskintegning av baklokket til dagens elektronikkhus . . . . .	84
A.6	Styrkeberegning av lokk, indre flate . . . . .	85
A.7	Styrkeberegning av lokk, ytre flate . . . . .	85
A.8	Spenning ved 600 bars belastning på doblett veggtjukkelse . . . . .	86
A.9	Spenning ved 600 bars belastning på lokk kun tilpassa endra diameter . . . . .	86

# Kapittel 1

## Introduksjon

### 1.1 Bakgrunn

Sperre AS ble stiftet av Thor Olav Sperre i 1993 [2]. Firmaet har opparbeidet seg stor kunnskap på marine operasjoner og ROV. En ROV (Remotely Operated Vehicle) er en liten fjernstyrt undervannsbåt, som i større og større grad erstatter dykkere ved marine operasjoner. Sperre AS har blitt en stor aktør på det skandinaviske markedet hva angår ROV, ROV systemer og dykke-systemer. Firmaet har hatt stor vekst de siste årene, etter 18 år i bransjen har de over 20 ansatte og en omsetning på over 60 millioner. Sperre AS produserer i stor grad elektriske observasjons ROV'er, med stor fleksibilitet når det gjelder utstyr til forskjellige jobber. De leverer alt fra rene observasjonsfartøy, til spesialproduserte ROV'er med manipulatorarmer, stor løftekraft, kamerautstyr og kontrollsystemer til daglig drift. Et ROV system består ikke bare av et fartøy, men vinsjer, kraner, løfteutstyr og kontrollsystemer. Sperre AS designer disse systemene etter kundens ønske, alt fra et komplette systemer, til kun selve fartøyet. Kundegruppa til Sperre AS er i stor grad dykkerfirmaer, oljeselskaper, oljekontraktører og fiskeindustri. Som i de fleste andre teknologidrevne bransjene strebes det etter konkurransefordeler, og i ROV industrien er det da snakk om større havdyp, bedre kamerautstyr og et mer smidig fartøy. Denne oppgava vil ta for seg mulighetene for å komme seg ned på større havdyp.

### 1.2 Oppgave



Figur 1.1: Bukla kamerahus i aluminium

Per i dag har Sperre produsert ROV-er kvalifisert ned til 3000 meters dyp. Dette innebærer 300 bars ytre trykk på komponenter uten trykkompensering og fare for at disse kollapser (bukler), om fartøyet blir benyttet på større dyp ( $P > 300$  bar).

I dag er aluminiumslegeringa AA6082-T6 den som benyttes til de fleste konstruksjonskomponentene hos Sperre AS. Dette er ei legering med gode kvaliteter til sjøvannsformål og høy styrke sammenlignet med andre aluminiumslegeringer. Når denne legeringa ikke strekker til med tanke på belastningssituasjonen benyttes rustfritt stål av typen AISI 316SS.

Oppgava blir å ta for seg bruken av kompositt for å kunne håndtere 600 bars ytre trykk, altså dobling av dagens trykk. Ved å benytte seg av kompositt, vil man kunne oppnå høy styrke på komponenten uten at man bruker store

mengder materiale. Dette vil være gunstig på flere måter, siden man har en komponent med høyere styrke enn den gamle uten av vekta har blitt nevneverdig større. Det trenger heller ikke bli mye dyrere om man raffinerer designet.

Konkret blir denne oppgava å fokusere på elektronikksylindrene til ROV-en. Disse sylindrene inneholder nødvendig elektronikk for å kontrollere fartøyet. Grunnen til at det er valgt å fokusere på elektronikksylindrene er at de er større sammenligna med kamerahusene og derfor mer ømfintlige mot trykkbelastninga. Ved produksjon av trykktanker i kompositt kan det benyttes en metode kalt "filament winding", denne metoden er tenkt benyttet i denne oppgava også. Det er mange tekniske aspekter rundt dette som må avklares og designes før man kan produsere et produkt.

Som ei tilleggsoppgave skal det gjøres strekk og hulltrykksprøving på sveist aluminium av legeringen AA6082-T6 for å kartlegge hvor stor reduksjon man får i styrke ved å smeltesveise denne legeringa.

## 1.3 Metode

Oppgava løses med et litteraturstudie til å begynne med, der forfatteren har satt seg inn i regelverk og dimensjoneringskriterier for ROV produksjon og drift samt innhenta kunnskap om karbonfiber og bruken av karbonfiber.

Det Norske Veritas (Det Norske Veritas [DNV]) setter standarder for dimensjonering av ROV ved at det klassifiseres som portable enheter til offshorebruk. Trykktanker for bruk klassifiseres i DNV standard 2,7-3 [3]. For design av trykktanker i kompositt brukes ISO standard 13086-1 [4].

Litteraturstudiet har bestått av å innhente relevant informasjon, samt bestemme hvilke kilder som er troverdige og ikke. Mye av informasjonen er funnet igjennom internett ved hjelp av google, google scholar, Bibsys(biblioteksøkemotoren på NTNU) og standard.no. Annen input kommer fra relevant faglitteratur om de forskjellige temaene og tidligere opparbeidet kunnskap fra ingeniørfag.

Informasjon om hvordan komponenter designes og produseres, samt hva som er tenkt, innhentes fra Sperre for å få innsikt i hva som skal til for at innholdet vil fungere selv på 6000 meters dyp. Fagkompetanse på et spesielt område innhentes om nødvendig hos fagpersoner på NTNU.

Programmet CES EduPack 2011 er benytta for å bestemme materialeegenskaper, da det er et lettfattat og godt program som dekker store deler av basisegenskapene til en stor mengde forskjellige materialer. Til CAD tegning og FEM analyse er Solid Works og NX benytta.

Basert på innhenta kunnskap må en kravspesifikasjon defineres. Denne settes opp for å konkretisere de krav som stilles til elektronikksylindren, samt for å kunne avgjøre hvilket konsept som skal velges.

Morfologi og konsepter skal fremmes for å få fram ideer, på hvordan dette konkrete problemet med høyere ytre trykk skal løses. Disse konseptene skal til en viss grad være begrensa av kravspesifikasjonen slik at håpløse forslag ikke tas med i vurderinga. Av konseptene skal ett, eller en kombinasjon av disse foreslås for prototypeproduksjon.

Gjennomføringa av AA6082-T6 forsøket beskrives i eget kapittel, men skal i stor grad gjennomføres som et laboratorieforsøk.



# Kapittel 2

## Teori

Trykktanker har tradisjonelt vært produsert i stål, med strenge krav til materialeegenskaper, design og produksjon. Disse tankene er designa for å kunne holde på et medie(væske/gass) samt indre overtrykk. Per dags dato tas det kommersielt i bruk trykktanker med trykklasser opp til 300 bar, disse er til bruk for gasser som inertgass, oksygen, hydrogen og så videre. Slike trykktanker har mye strengere krav til sikkerhetsmarginer sammenligna med en tank som kun skal fortrenge sjøvann. En slik tank vil derfor tåle store belastninger om man setter ytre overtrykk på de, nettopp på grunn av at de er designa så konservativt.

En parameter som bestemmer effektiviteten til ei gassflaske er denne [5]:

$$Eff = (P * V) / W$$

der

P: Trykket tanken tåler

V: Tankens indre volum

W: Tankens totale vekt

Jo høyere denne effektivitetsverdien er, jo mer gunstig er tanken. Disse tre parametrene er sterkt avhengige av hverandre samt at kostnader vil spille inn. Dette gjør den ultimate tanken, med tanke på effektivitetsverdien, svært kostbar og vanskelig å produsere. Ved å inngå kompromiss vil man kunne optimalisere denne effektivitetsfaktoren. En måte å øke faktoren er å gå over fra metall som konstruksjonsmateriale, til kompositt.

Kollektivtransportindustrien samt lastebilprodusenter har per dags dato starta å benytte seg av CNG (Compressed Natural Gas) som drivstoff i sine biler på grunn av økt miljøfokus og drisofføkonimi. Dette fokuset gjør at behovet for trykktanker har økt i disse industriene, og da særlig bruken av komposittanker, hovedsakelig produsert i glassfiber. Slike trykktanker til kollektivtransport er begrensa til 350 bar på grunn av sikkerhetsårsaker [5]. Disse tankene er ganske direkte sammenlignbare med ROV elektronikkysylindre for 6000 meter, siden sikkerhetsfaktoren betyr at de tåler vesentlig mer og at Sperre opererer med lavere sikkerhetsfaktor på sine tanker.

Når et nytt materiale tas i bruk vil det innebære endringer på kravspesifikasjonen (hvilke krav komponenten eller produktet må oppfylle), og da også designet. Ved å gå over fra aluminium til kompositt som lastbærende materiale vil det innebære noen nye og ukjente problemer. Dette kapittelet tar for seg basisteori for å gi leseren bedre forståelse av en kompositt som materiale, samt problemer rundt bruken av en kompositt til trykktankproduksjon.

## 2.1 Lekkasje før brudd

Et svært viktig aspekt ved tradisjonell design og produksjon av trykktanker, siden mediet inne i tanken trykker så hardt mot tankens vegger, så skal man å få lekkasje i stedet for at tanken sprenger. Ved lekkasje vil gassen sive ut, og muligens skape en ugunstig atmosfære der tanken står, men det vil utgjøre en mye lavere risiko enn om tanken sprekker og all gassen frigis over svært kort tid. Dette betyr at man må tenke på bruddmekanikk når tanken konstrueres. Når en sprekk oppstår må materialet være duktilt nok til at kritisk sprekkstørrelse er større enn sprekkstørrelsen som kreves for at gassen kan lekke igjennom.

$$a_{brudd} < a_{kritisk}$$

der  $a_{kritisk}$  er sprekkstørrelsen som medfører at bruddet går over hele tjukkelsen momentant.

For kompositter kan dette være en utfordring da de ofte er svært stive og da også sprø, men til gjengjeld har de høy styrke. For produksjon av trykktank til ROV-ens elektronikk vil ikke dette være så kritisk, siden det ikke er snakk om at mennesker kan ta skade eller lignende om den kollapser. Både ved lekkasje og brudd på tanken vil man få inn sjøvann, noe som mest sannsynlig vil skade ROV-ens systemer som igjen kan gjøre det problematisk å få den kontrollert opp til overflata.

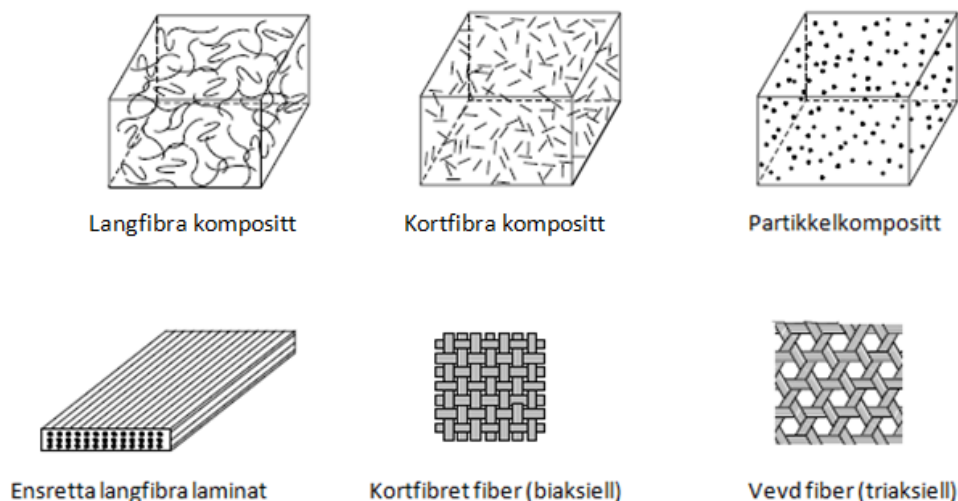
## 2.2 Kompositter

Bruken av kompositter til trykktanker starta rett etter andre verdenskrig, som deler til raketter, missiler og andre våpen. Disse komponentene ble brukt til rakettlysene på raketter drevet med fast rakettbrensel. Trykktankene ble da produsert i glassfiber siden karbon og kevlar ikke var mulige materialer. Disse var ikke mulige å benytte seg av, dette på grunn av at de ikke var oppdaga på den tida. Benevnelsen kompositter omhandler i stor grad en fiber i kombinasjon med et bindemiddel. Utforminga på disse fibre(lange/korte), hvilket materiale de er lagd av, hvordan de er orientert i forhold til hverandre og hvilket bindemiddel som er benyttet bestemmer hvilke egenskaper denne kompositten har [6]. Bruken av slike kompositter kan gi store fordeler sammenlignet med et vanlig konstruksjonsmateriale(stål/aluminium), men det er i større grad upløydt mark og feil bruk kan innebære svakere komponenter til høy pris sammenligna med aluminium eller stål.

### 2.2.1 Fiber

Lengda på en fiber er i stor grad viktig med tanke på de mekaniske egenskapene. Lange fibre vil gi kompositten høy styrke og stivhet. Valg av fiberlengde er da en avveining mellom produksjonsvennlighet, pris og krav til styrke. Hvordan man binder sammen fibre vil også gi utslag på de mekaniske egenskapene. Noen forskjellige materialsystem er vist i figur 2.1

Som man kan se på figuren, kan man la fiberen ligge fritt i bindemiddelet, eller så kan fiberen veves sammen for å oppnå høyere styrke. Denne høye styrken vil innebære et større forbruk av den kostbare fiberen. Valg av materialsystem avhenger derfor i stor grad av hvilke egenskaper man ønsker. Det finnes svært mange forskjellige fibre på markedet per idag, følgende hovedkategorier er det mulig å velge imellom:



Figur 2.1: Materialsystemer

- Glassfiber

Denne kompositten er bygd opp av en plastpolymer forsterket med tynne fibre av glass for økt styrke. Disse fibre er produsert ved at smeltet glass trekkes igjennom ei matrise, kjøles ned og spinnes opp på en rull [7]. Når glassfiberen blir så tynn som den blir etter denne prosessen, fjerner man muligheten for at glasset kan ha indre feil og styrken blir derfor svært god. Glassfiber har også god duktilitet og korrosjonsmotstand. Fiberen har også ganske lav egenvekt, men man må designe for fiber hvis man vil utnytte styrken maksimalt. Slike fibre har svært forskjellig styrke på langs og på tvers av fiberretning, derfor må type vev velges med omhu i forhold til kreftene som virker på komponenten. Ved praktisk bruk av glassfiber legger man ut glassfibernettene i ei støpeform som gir komponenten ønsket form. Man legger så ut glassfiberen slik at fiberretningene overlapper hverandre for uniform styrke, for så å tilsette et resin som får dette til å stivne. Et svært viktig fokus ved kompositter er forarbeidet. Om dette ikke er gjort med nøyaktighet vil det gi utslag på det ferdige produktet. Det blir ikke bare utseendemessig dårlig, men også med tanke på mekanisk styrke [8].

- Grafitt/ Karbonfiber

Karbonfiber og glassfiber har i stor grad samme bruksområde og produksjonsmetoder. For karbonfiber er det som navnet tilsier tynne karbonfibre som gir styrkebidrag, og ikke glass. Karbon er et svært sterkt grunnmateriale, og når fibre er så tynne består de så å si bare av karbon. Karbonfibre kan fås med strekkfasthet opp til 7000MPa, og E-modul opp til 1000 GPa [9]. Om styrken på karbonfiberen er høy har den også høy anisotropi, som betyr at fiberen fordeler spenninger over tverrsnittet dårlig. Slike karbon- og grafittfibre er produsert ved hjelp av pyrolyse [7], der et organisk stoff blir karbonisert som følge av høy temperatur. Dette er grunnen til at karbonfiber og grafitten har den svarte, brente fargen. Forskjellen på karbonfiber og grafitt kommer som følge av temperaturen som karboniseringen foregår under, ved karbonisering av karbonfiber benyttes temperatur opp mot 1500 °C. Til sammenligning er temperaturen opp mot 3000 °C ved produksjonen av grafitt. Dette gir større andel av grunnstoffet karbon i fiberene, ca 99% sammenligna med 80-95% for karbonfiber. Det vanligste organiske stoffet som benyttes ved framstilling av karbonfiber er polyakryl-nitril(PAN) på grunn av lav pris [7]. Karbonfiber blir mer og mer brukt i flyindustri, bilindustri, offshore og romfart som følge av den svært høye styrken og

den lave vekta. Karbonfiber er kostbart å framstille, og prisen reflekterer dette. Bruken av karbonfiber er i stor vekst om dagen, noe som gjør at prisene er på vei nedover. For karbonfiber gjelder også det faktumet at forarbeid er viktig, siden tapet prosentmessig gjerne blir mye større med karbonfiber, og konsekvensene enda større. Karbonfiber har under en tredjedel av tettheten til stål, noe som gjør produktet svært lett [8].

- Grafitt med ledningsevne

For å kunne bruke denne typen materialer og produksjonsmetoder for å lage ting som kan transportere elektrisitet og temperatur mer effektivt, måtte man belegge grafitt med et tynt lag med metall. Det metallet som er mest brukt er nikkell, siden det leder strøm godt samt at det er edelt med tanke på påvirkning fra omgivelsene [7].

- Polymerer

Disse fibre er laget av nylon, rayon, akryl og aramid, med aramid som den vanligste. Disse aramidfibre (Kevlar) har svært god duktilitet og høy styrke. Sammenligna med karbon og glassfiber kan aramidfibre tåle noe plastisk deformasjon. En svakhet ved disse fibre er at de kan ta opp vann, som forringer kvalitetene de innehar i svært stor grad. Ved bruk av disse fibre i miljø der de kan bli utsatt for fuktighet, er det viktig at de blir beskytta. For å forhindre dette kan man for eksempel belegge overflata med et godt lag med gelcoat. Sammenligna med karbon og grafittfibre har disse fibre noe lavere egenvekt generelt sett. Det finnes også fibre på markedet med svært lave egenvekter, spectra og kevlar [7] er eksempler på dette. Spektra har tetthet på kun  $970 \text{ kg/m}^3$ . På grunn av disse egenskapene blir disse materialene benyttet til skuddsikre vester. I likhet med de andre fibre kan denne produseres ved at grunnmaterialet smeltes og strekkes til en lang tråd, men disse fibre kan også produseres tørt ved hjelp av kjemiske midler. Dette skjer ved at de delvis løses opp før de skal trekkes igjennom matrisa, der de strekkes til tråder for så å vaskes i etterkant for å fjerne de kjemiske løsemidlene.

- Borfiber

Denne typen fibre består av bor avsatt ved hjelp av kjemi avsetning på wolfram, og i noen sjeldnere tilfeller på karbon. Disse fibre får svært høy styrke og stivhet, men er lite brukt på grunn av deres høye kostnad og vekt.

- Andre fibre

Det finnes også en stor mengde andre fibre til bruk i kompositter, men disse er i større grad brukt til mer særegne formål. Eksempler på disse er følgende; safir, stål, molybden, aluminiumsoksid og bor- nitrid. Man kan også tenke seg at etter hvert vil man kunne bruke karbon-nanorør i komposittproduksjonen og derfor få enorm styrke, men dette er fortsatt litt fram i tid.

Tabellen under viser egenskaper til et utvalg av forskjellige fibre:

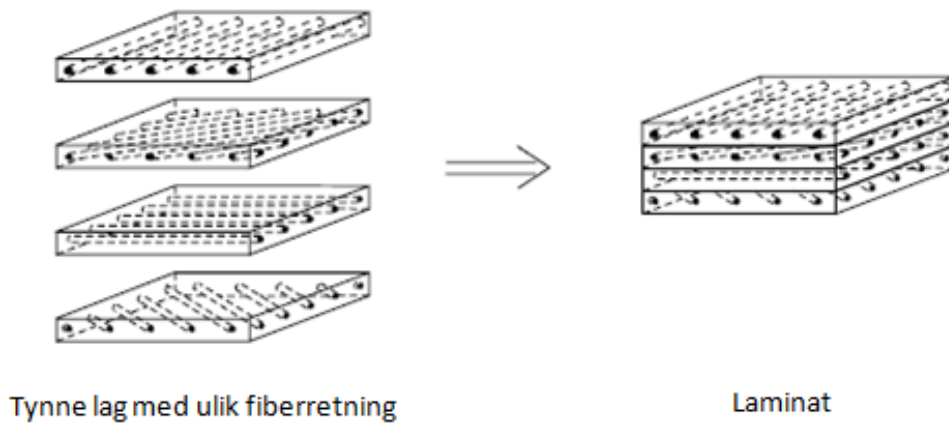
<b>Fiber</b>	Strekfasthet(MPa)	E-modul(GPa)	Tetthet( $kg/m^3$ )	Relativ kostnad
Bor	3500	380	2600	Høyest
Høy styrke karbon	3000	275	1900	Lav
Høy duktilitet karbon	2000	415	1900	Lav
E-type glassfiber	3500	72	2480	Lavest
S-type glassfiber	4600	85	2540	Lavest
Kevlar 29	2800	62	1440	Høy
Kevlar 49	2800	117	1440	Høy
Kevlar 129	3200	85	1440	Høy
Nextel 312	1630	135	2700	Høy
Nextel 610	2770	328	3960	Høy
Spectra 900	2270	64	970	Høy
Spectra 1000	2670	90	970	Høy
Spectra 2000	3240	115	970	Høy
Aluminiumsoksid	1900	380	3900	Høy
Silikon karbid	3500	400	3200	Høy

### 2.2.2 Bindemiddel

Fibren i seg selv vil være ubrukelig uten et bindemiddel som holder de sammen. Dette bindemiddelet har som oppgave å distribuere belastningene til fibre siden de innehar styrken. Bindemiddelet sørger også for at fibre ikke blir berørt av omgivelsene (fuktighet, støv, støt og så videre). I kompositter som ikke skal ha enorme mekaniske egenskaper, typisk designmessige komponenter, står bindemiddelet også for å ta opp påførte krefter. Disse komposittene er ofte av typen med korte oppkuttete fibre og benyttes til formål der det ikke er så store krav til styrke og der pris er svært viktig. Ved produksjon av kompositter ønsker man et bindemiddel som har høy styrke, høy E-modul og god forlengelse. Å få alle disse egenskapene er ikke mulig, man må inngå kompromisser der man kan fremheve egenskaper som er viktigere enn andre. Hvilke kvaliteter som er mest gunstige avhenger fra produkt til produkt. De vanligste bindemidlene er sammensatt av epoxy, polyester, fenol, fluorkarboner, polyetersylfon eller silikon [7]. Av disse er epoxy eller polyester mest brukt. Ved spinning (figur 2.4) av kompositter er det også svært viktig med rett viskositet. Man ønsker viskositet på mellom 350-1500 [5], den må være lav nok til at det ikke dannes luftbobler men ikke så lav at den bare renner av. Sistnevnte er svært viktig ved spinning av karbonfiber.

### 2.2.3 Fiberretning

Hvordan fibren i kompositten er orientert vil bety mye med tanke på hvor sterk den er. En fiber er sterk i lengeretningen, noe som betyr at den har høy strekkfasthet i denne retningen. Dette kan sammenlignes med et papir som har forskjellige egenskaper i lengderetningen og tverretningen, men for en kompositt varierer egenskapene mer. Hvordan disse fibre legges avhenger av hvor belastningene er, man ønsker da å orientere fibre slik at man utnytter dens strekkfasthet så godt som mulig. I praksis kan man ikke bare orientere fibre i denne retningen, man er avhengig av en viss strukturell styrke. For å oppnå dette legger man fibre som laminat der fiberretningen varierer lagvis. Figur 2.2 viser dette.



Figur 2.2: Oppbygging av laminat

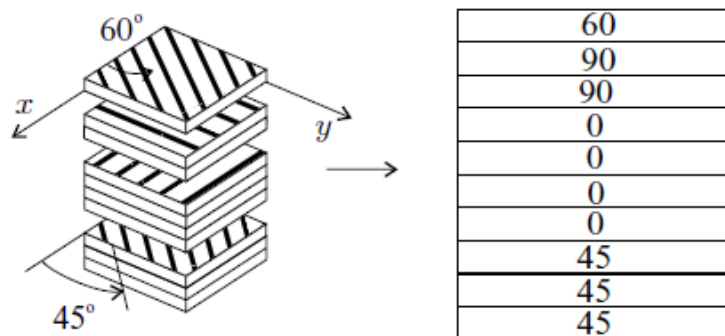
Det er ofte vanlig å legge de tynne lagene med vinkelen  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  og  $135^\circ$  i forhold til det første lagets retning, men dette er noe som kan og bør justeres om det er dominerende krefter som skal tas hensyn til. Ved spinning av trykktank ved hjelp av "filament winding" justerer man denne vinkelen ved hjelp av rotasjonshastigheten på kjerna samt hvilken matehastighet man bruker.

### 2.2.4 Laminat

Når man definerer et laminat definerer man vinkelen på fiberen i forhold til en referansevinkel. Man benytter seg da av polarkoordinater  $(r, \theta)$  med vinkelen  $\theta$  som definerer vinkelen. Når man definerer antall lag og hvilken vinkel de skal være orientert etter definerer man laminatet som følgende (eksempelvis) [6]:

$$[45_3/0_4/90_2/60], \quad (2.1)$$

der vinkelen er definert med  $45^\circ, 0^\circ, 90^\circ$  og  $60^\circ$  og de senkede tallene bestemmer hvor mange lag som skal ha akkurat denne fiberretningen. Figur 2.3 viser hvordan akkurat dette laminatet vil se ut.



Figur 2.3: Eksempel på oppbygging av laminat

[6]

## 2.2.5 Styrke

En kompositt er som nevnt komponert av 2 eller flere materialer, med forskjellige egenskaper. Dette betyr at materialet er heterogent, men man kan for enkelthets skyld anta at det er tilnærmet homogent hvis fibrene har ganske lik lengde, tjukkelse og at bindemiddelet har tilnærmet samme egenskaper i hele delen. Om delen er kompleks, og det er benytta spesialtilpasset laminat må man ta hensyn til anisotropien for å ikke få misvisende resultater. Man må også ta hensyn til problemer som at bindemiddelet kan sprekke opp ved belastning når man bestemmer orienteringa til fibrene. Som følge av belastning, temperaturvariasjoner, utmatting eller lignende, vil dette fenomenet inntreffe. Dette vil ikke være noe problem om sprekken slutter å vokse, som følge av at den møter en fiber med større motstand mot sprekkvekst. Om sprekken får vokse til brudd langs bindemiddelet vil det bety problemer. Når man skal beregne styrken til en del vil man benytte seg av materialeegenskapen man får når man kombinerer de ulike bestanddelene. Det er også vanlig å operere med en sikkerhetsfaktor når deler designes slik at man tillater små produksjonsfeil og lignende. For kompositter kan det være gunstig å ha litt høyere sikkerhetsfaktor da det er flere ting som kan gå galt, i hvert fall fram til at man har opparbeidet seg erfaring om materialet og delen man designer.

I nyere tid har man fått bedre kunnskap om hvordan man bør designe deler, for å kunne utnytte de sterke egenskapene som kompositten har. Man har også fått kompositter med svært mye bedre egenskaper enn før, nå kan komposittene i stor grad skreddersys for gitte egenskaper. På grunn av disse to faktorene vil man kunne redusere sikkerhetsfaktoren noe. Et eksempel på at man kan skreddersy materialet er når det legges inn litt glassfiber i karbonfiberen for å få bedre seighet. Karbon i seg selv er svært sprøtt.

## 2.2.6 Temperaturbestandighet

Som med mange andre materialer kan kompositter få svært forskjellige egenskaper med tanke på temperaturbestandighet. Siden kompositter er et begrep som omfatter enormt mange potensielle "materialer" vil man få representert kombinasjoner på begge ender av skalaen. Den bestanddelen som tradisjonelt har vært mest ømfintlig mot temperatur er bindemiddelet. Bindemiddelet kan gå i oppløsning om det blir utsatt for store termiske belastninger. På andre enden av skalaen finnes det materialer som tåler svært høye temperaturer, og det med svært liten termisk utvidelse [10]. At den termiske utvidelsen er så liten betyr at det skal mye til før kompositten mister formen sin. Om man spinner en slik kompositt på ei innerforing vil den ikke delaminere seg fra denne foringen, selv om den blir utsatt for temperaturer. Disse høytemperaturkomposittene tåler typisk maks 900-1000°C og er av glass eller keramiske kompositter, man kan også benytte seg av karboniserte karbon-grafitt kompositter for å oppnå denne typen termisk styrke [11]. De vanlige termoplastene som bruker epoxy eller fenol som bindemiddel tåler typisk maks 200-300°C.

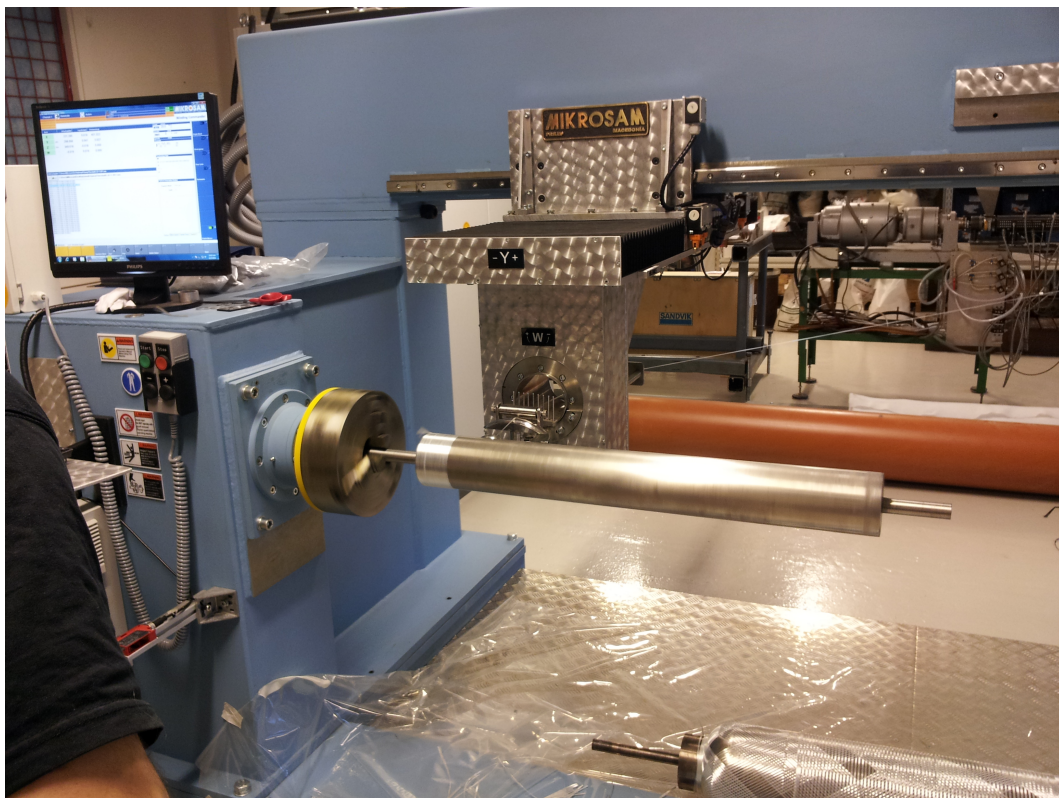
## 2.3 Spinning av komposittmateriale

For produksjon av trykktanker og andre sylindriske enheter i kompositt er det vanlig å benytte seg av spinnemaskin i stedet for å laminere med duk. Bruk av duk til denne typen produksjon vil være mer tidkrevende og gir lavere nøyaktighet. Når trykktanker produseres stilles det store krav til sikkerhetsmarginer. Høy nøyaktighet vil også bety store innsparinger hva angår kostnader. Ved å bruke spinnemaskin kan man tilpasse vinkelen til kompositten ved å styre

maskinparametre, dette betyr at man kan styre hvilke egenskaper tanken skal få i stor grad. En spinnemaskin kan sammenlignes med en dreibenk, bare med lavere spindelhastighet og et mateverk for kompositt-tråden. Institutt for produktutvikling og materialer (IPM) har en spinnemaskin fra Mikrosam, denne spinnemaskinen er godt egna for prototypeproduksjon med gode muligheter hva angår størrelse og trykklasser.

### 2.3.1 Spinnemaskin

Spinnemaskinen på NTNU ser som nevnt ut som en stor dreibenk med et kabinett for å mate fiberen. Dreibenk-delen av maskinen er vist på bilde 2.4



Figur 2.4: Spinnemaskin ved IPM

Denne spinnemaskinen er fire-aksa, noe som betyr at den i tillegg til å rotere har tre frihetsgrader. Av disse frihetsgradene er to av de forflytning på mateverket, parallelt med dreieaksen og avstanden fra den. Den siste frihetsgraden er rotasjon på mateøyet, som plasserer fiberen, vist i bilde 2.5.

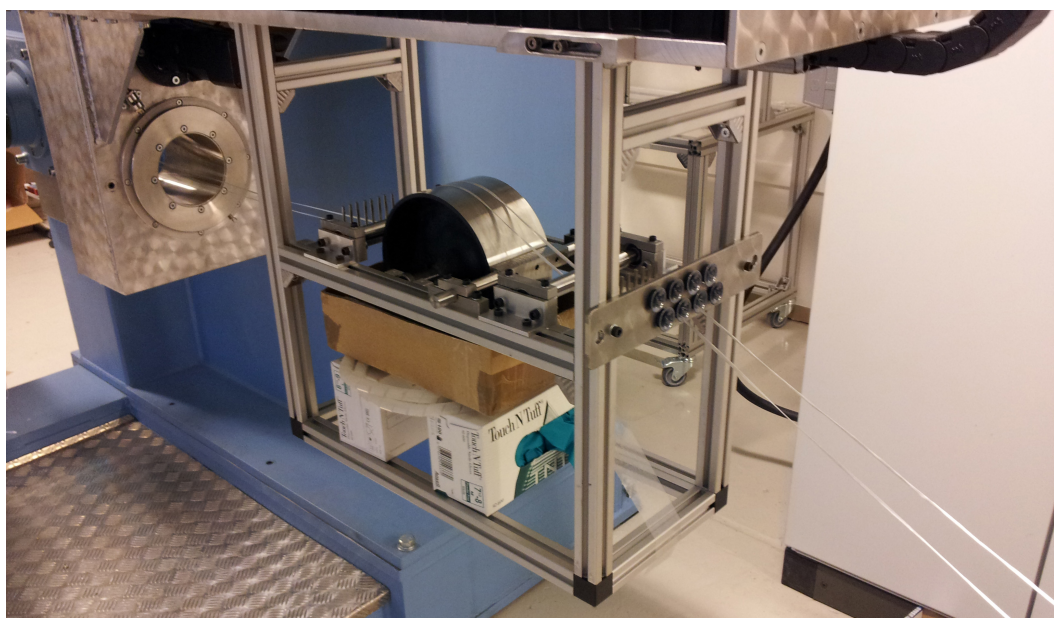
Samspillet mellom disse frihetsgradene gjør at man i stor grad kan legge fiberen som man måtte ønske, med ønska hastighet og vinkel. Disse parametrene styres av en styreenhet, som kommuniserer med et dataprogram. I dette programmet kan man definere vinkler, avstand mellom fibre, og så videre. Programmet har også en hastighetsfunksjon, denne funksjonen gjør at hele prosessen går fortere, både spindelhastighet og hastigheten på materen. Siden disse er samkjørte vil man da fortsatt få samme vinkler og avstander, men det kan bli noe mer søl, siden fiberen er metta med bindemiddel. Ved prototype-produksjon vil det være lurt å kjøre med lav hastighet på hele gjennomkjøringa, for å forsikre seg om at alt går som det skal. Når man vet at prosessen går som den skal vil man kunne sette opp hastigheten, for å produsere flere enheter på kortere tid.





Figur 2.5: Spinnemaskin ved IPM, Mateøy

Fibren blir metta med bindemiddel på turen fra kabinettet og bort til mateøyet, dette gjøres ved at fiberen ligger på ei rulle som kontinuerlig henter opp bindemiddel fra et kar. Dette karet og rulla er vist på bilde 2.6.



Figur 2.6: Spinnemaskin ved IPM, Kar for bindemiddelet

Mengde og type bindemiddel vil kunne ha stor innvirkning på hvordan man kan legge fiberen, ved store vinkler, altså stor bevegelse parallelt med akselen og liten rotasjonshastighet, vil man trenge større friksjon mellom fiberen og det underliggende laget. Friksjon vil også kunne være et tema som følger av designet på endene, hvis programmeringen er litt feil vil det fortære kunne

gi utslag på kvaliteten. Kvalitetsproblematikken kan da komme som følge av feil forspenning, at fiberen har glidd eller at fiberen er lagt feil og man får svake punkter på tanken. Om fiberen legges på annet vis enn den korteste veien langs kurva vil den gli om ikke friksjonen er tilstrekkelig. Et annet aspekt ved spinning og friksjonsproblematikk er at fiberen har forskjellig friksjonskoeffisient tørr kontra våt.

Friksjonskoeffisienter [5]:

- Tørr: 0,24-0,25
- Våt: 0,29-0,37

Ved prøvelegging med tørr fiber vil man da trenge større forspenning for ikke at fiberen skal gli på de utsatte stedene, og dette må man legge inn i beregninga når man skal legge fiberen våt på den reelle tanken.

### 2.3.2 Innerforing/ Innerforingsklasser

Når komposittfiberen skal spinnes til en tank ved hjelp av en spinnemaskin, er det nødvendig å ha noe å spinne fiberen rundt. Denne innerforingen kan være av metall, plast eller et materiale man kan ta vekk etter at produksjonen er gjennomført. Innerforingen kan enten ha lastbærende egenskaper eller at den kun er det for at man skal kunne spinne rundt den. Hvilken type innerforing man velger er avhengig av hvilken funksjon tanken skal ha, gammelt design og kostnad er også ting som vil spille inn. Innerforingene kan deles inn i følgende klasser:

- Tynn, ikke lastbærende

Disse innerforingene er produsert så tynne som mulig, for å minimere vekt og produksjonskostnad. De er kun tilstede for å ha noe å spinne fiberen på, samt at den skal være en gasstett konteiner for indre overtrykk. Man benytter ofte tynn gasstett plast som innerforing, og kompositt utenpå med lastbærende funksjon. Denne metoden er både billig og vektbesparende. Negative aspekt ved bruken av denne typen innerforing er dårlige egenskaper mot utmatting [5]. Dette er som en følge av liten tykkelse og at det ofte er brukt plastmaterialer og andre svake materialer. Disse er alle sprø, med lav plastisk forlengelse.

- Lastbærende

Sammenligna med tynne, ikke lastbærende innerforinger, skal disse foringene stå for en del av belastningen i tillegg til at de skal være gasstette. Hvilken tykkelse foringen skal ha avhenger i stor grad av det som skal være inne i tanken, samt hvor tykt man skal legge med kompositten. Ved bruk av tynn innerforing får man uniform spenning igjennom veggtykkelsen, men skal man ha tykk vegg vil spenninga variere. Om innerforingene i denne klassa også blir for tynne vil de kunne være utsatte for utmatting, men da i større grad som følge av delaminering mellom foringen og kompositten. Dette skjer på grunn av forskjellige stivheter på materialene. Løsninger på dette problemet er bruk av rett forspenning til applikasjonen, samt at man bruker rette bindemiddelet. En annen mer avansert måte å unngå dette problemet, er å elastisk deformere innerforingen før man legger på kompositten. Ved å gjøre dette slipper man problematikken med delaminering, da innerforingen og kompositten vil bli godt bundet til hverandre. Det negative aspektet ved denne metoden er at tanken vil bli tung som følge av mer materiale til innerforingen, sammenligna med foregående klasse [5].

- Uten innerforing

Man har også et tredje alternativ, og det er å benytte innerforing man kan fjerne etter spinning. Disse trykktankene vil da oppnå best styrke sammenligna med vekt, men vil også være noe vanskeligere å produsere på mål samt at de ikke nødvendigvis er like stabile med tanke på at de må være gasstette. Det praktiske ved bruken av slike fjernbare innerforinger er at det innebærer mer jobb. Siden de skal være mulige å fjerne ved hjelp av kjemi eller andre metoder i etterkant, vil de nødvendigvis også være mindre stødige å spinne fiberen på. Vanlige metoder å bruke per dags dato er [12]:

- Fjernbar metallforing:

Man kan benytte seg av metallforinger med spesielt design som gjør at det kan krympes/kollapses til den grad at man kan få den ut igjen etter at tanken er ferdig herda. Disse er vanligvis delt i segmenter og krever ganske stor endeåpning når de skal fjernes. Et fortrinn som disse metallforingene har, er at de er stødige og gode å spinne fiberen på.

- Gips:

Man kan lage innerforingen av gips, men dette vil innebære mye jobb i etterkant da den må meisles ut. Det faktum at den må meisles ut betyr at også her må endeåpningen være så stor at man kommer til med verktøyet. Man kan også risikere å skade kompositten på grunn av den mekaniske belastninga.

- Sand med bindemiddel:

Som ved sandstøping kan man produsere malen man skal spinne fiberen på med denne metoden. Dette materialet holder forma si fram til vann eller gitt løsemiddel tilsettes tanken. Det negative aspektet ved denne metoden er det at denne sanda her lav styrke, og man kan risikere å tilføre for mye forspenn under spinninga slik at fiberen graver seg inn i sanda. Man må også være forsiktig ved oppspenning av slike fjernbare sandformer. En fordel her er at man ikke trenger så stor endeåpning, for å fjerne sanda, som de to foregående alternativene.

- Oppblåsbar innerforing:

Som navnet tilsier er dette en belg man kan blåse opp til ønsket fasong, spinne fiberen på belgen og så slippe ut trykket og fjerne belgen i etterkant. Denne metoden er blitt mye brukt på grunn av sin fleksibilitet. Den har fordeler under produksjonen der trykket kan økes om forspennet på fiberen blir høyt, slik at tanken får rette dimensjoner. Man kan også velge om man vil la belgen være i, slik at man har et gasstett sjikt inne i. Ved herding av fiberen kan man sette på ønsket indre trykk for å unngå sprekking ved den første trykksyklusen tanken kommer til å bli utsatt for.

### 2.3.3 Spenningsfordeling

Når man designer og spinner en trykktank i kompositt ønsker man en så effektiv spenningsfordeling som mulig. Det mest gunstige ville være at spenningene er den samme over hele delen, både på flatene og på enden. Det å få til så gunstig spenningsfordeling vil i praksis være nesten umulig. Materialet man spinner tanken med har også stor innvirkning på spenningsfordelinga, jo høyere styrke og stivhet materialet har jo vanskeligere er det å oppnå. Grunnen til dette er at det laget som ligger nærest belastninga (i dette tilfellet: det ytre sjiktet) vil yte størst motstand mot trykket og spenninga blir høy der. Om materialtykkelsen blir stor vil dette fenomenet bli

enda mer framtreddende, de indre lagene med kompositt vil da nesten ikke bidra til styrke i det hele tatt. Denne problemstillinga adresseres ved hjelp av design, hvilken vinkel man legger kompositten med i de forskjellige lagene, samt at man kan bruke kompositter med ulike materialegenskaper i de forskjellige lagene. Ved å benytte seg av duktile materialer nært belastninga, og sterkere materialer innover i veggtykkelsen vil man jevne ut disse spenningsforskjellene til en viss grad.

### 2.3.4 Spinnevinkel

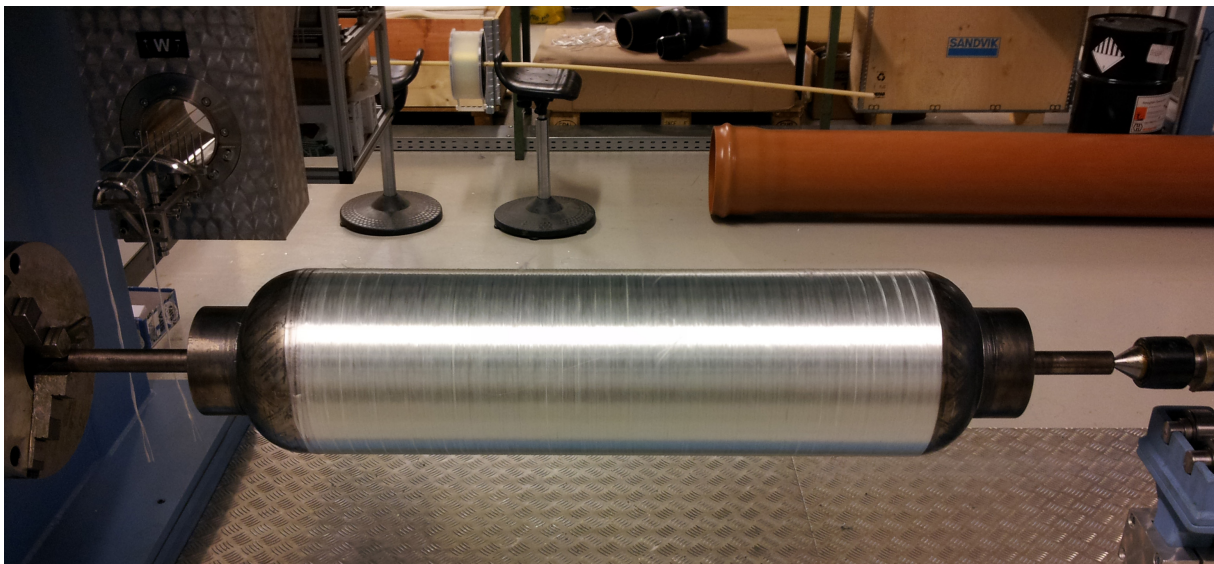
Som tidligere nevnt vil vinkelen som kompositten legges ut med i forhold til overflata være av stor betydning for hvilken belastning tanken vil tåle. Siden komposittfibren har størst styrke mot strekk, må denne egenskapen benyttes mot belastningen. Følgende vinkler vil gi styrke mot forskjellige belastninger [13]:

- 0 grader (langs lengderetningen på tanken)

Ved å flytte mateøyet fort langs tanken, med svært lav rotasjonshastighet kan man oppnå lave vinkler. For spinning, vil en vinkel på 0 være svært vanskelig (umulig) samt svært upraktisk. Fordelen med å ha så lav vinkel, er stor styrke mot bøyebelastning siden fibrene da ligger langs lengda på tanken.

- 90 grader (på tvers av tankens lengde)

Ved å gjøre det motsatte som ovennevnte vil man kunne oppnå nærmere 90 graders vinkel. Man vil kunne klare å få til 90 grader, men da ville man spunnet på en plass og fått opphopning av fiber kun der. Denne vinkelen gir styrke mot indre/ytre trykk. Denne vinkelen er også mye brukt som samlende lag når man skal legge tjukt med fiber rundt foringen.

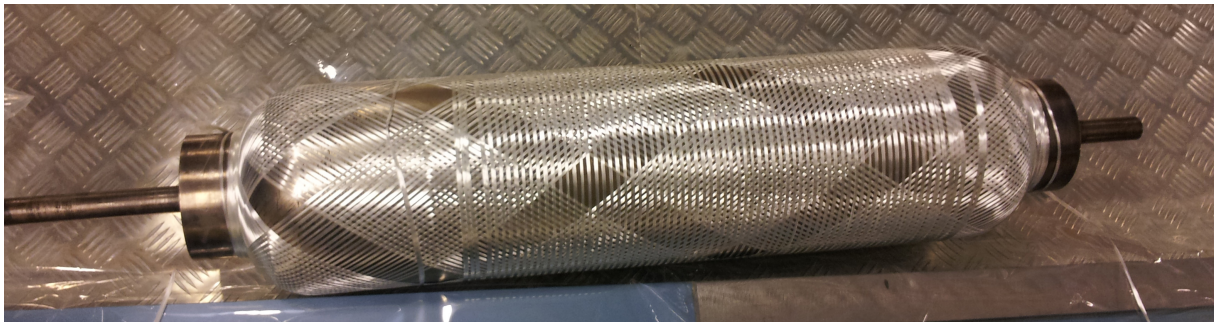


Figur 2.7: Tørrspunnet tank med litt under 90 graders vinkel

- $\pm 45$  grader

Ved å møtes på halvveien mellom 0 og 90 grader vil man få optimal styrke mot torsjon. Denne vinkelen benyttes ved produksjon av komposittaksler.

- Kombinerte belastninger



Figur 2.8: Tørrspunnet tank med ca  $\pm 45$  graders vinkel

Siden man så å si aldri har kun en belastning på tanken, vil det være nødvendig å finne ideell vinkel ved å vektlegge de egenskapene man trenger. For indre trykk vil man ha dobbelt så høy spenning i radiell retning som i aksiell, da er  $\pm 55$  grader et godt utgangspunkt. Ved ytre trykk, som er tilfelle i denne oppgava, vil  $\pm 65$  grader være bra. Grunnen til at vinkelen her er høyere enn indre trykk, er på grunn av faren for at tanken skal kollapse(bukle).

## 2.4 Styrketeori ved ytre trykk

Ved all dimensjonering tar man hensyn til hvilke belastninger man utsetter konstruksjonen for og vurderer de opp mot styrken til konstruksjonen. Belastningene vil gi kritiske områder med høye spenninger, i disse områdene vil man da være avhengig av at tjukkelsen på konstruksjonen er tilstrekkelig og at et sterkt nok materiale er valgt. Man kan da si at spenningene som belastningene gir i konstruksjonen, ikke skal overskride en maksverdi som er oppgitt for valgt materiale. Denne maksverdien er vanligvis definert ved hjelp av flytegrensa [8] til materialet og en sikkerhetsfaktor:

$$\sigma_{\text{belastning}} < \sigma_{\text{maks}}$$

$$\sigma_{\text{maks}} = \sigma_{\text{flyt}} / \gamma_n$$

Der  $\gamma_n = \text{sikkerhetsfaktor}$

Ved ytre trykk vil man få de samme langsgående og radielle spenningene i tankens vegger som om trykket skulle kommet innenifra. Ved indre trykk ville tanken gått til brudd som følge av de radielle spenningene ( $\sigma_{\text{radiell}}$ ), da de er dobbelt så store som de langsgående spenningene ( $\sigma_{\text{langs}}$ ):

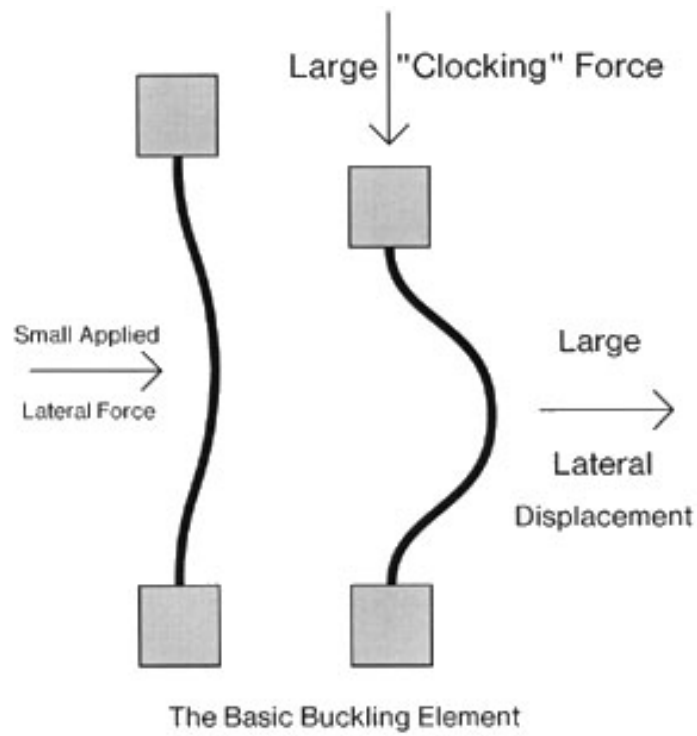
Spenningsbilde for sylindriske trykktanker kun utsatt for rent indre trykk:

$$\sigma_{\text{radiell}} = Pr/t$$

$$\sigma_{\text{langs}} = Pr/2t$$

Dette er ikke tilfellet for en sylindrisk trykktank med ytre trykk, da vil den kollapse(bukle) på grunn av den rette sylindriske flata. Den sylindriske flata vil da bli utsatt for trykket som vist i figur 2.9 og man får da en utbøyning som medfører at tanken går til brudd før  $\sigma_{\text{radiell}} = \sigma_{\text{maks}}$ .

Denne lasta som trykker ned er avhengig av geometrien på trykktanken med tanke på hvordan den angriper. Stivheten til veggen vil i stor grad styre hvorvidt og om bukling inntreffer. Resultanten når man legger sammen spenningene radielt og buklinga vil sørge for at tanken vil kollapse inn og med et langsgående initiasjonspunkt. Bilde 2.10 viser hvordan den har kollapse langsmid sylindringen og revet av aluminiumen på tvers.



Figur 2.9: Prinsippskisse bukling

[14]



Figur 2.10: Kollapsa kamerahus

Belastninga fra knekkinga er stor, og defineres som følgende [15]:

Spenning:

$$\sigma = F/A,$$

og dette betyr at knekkfastheten er som følgende:

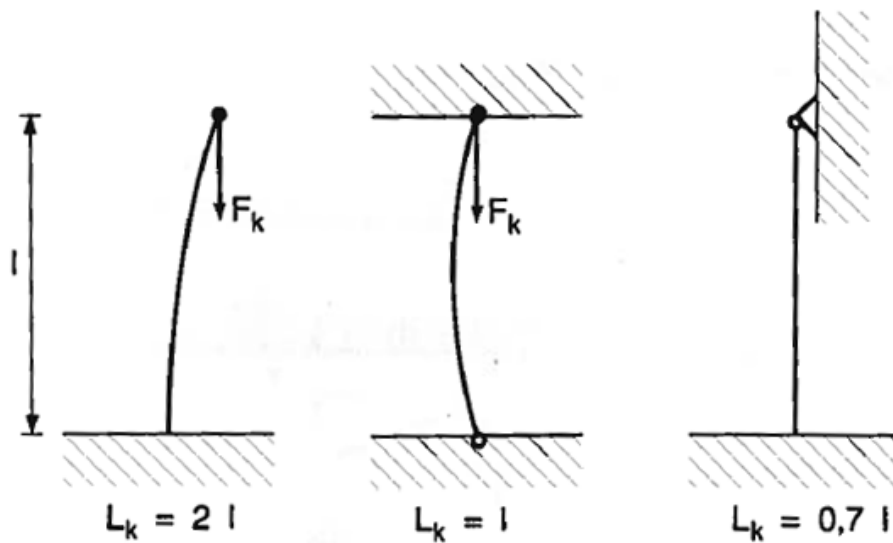
$$\sigma_k = F_k/A.$$

Knekklasta  $F_k$  er da definert med hensyn på elastisitesmodulen( $E$ ), arealmomentet( $I$ ) og kritisk knekk lengde( $L_k$ ):

$$F_k = \pi EI/L_k^2$$

Den kritiske knekk lengda( $L_k$ ) er avhengig av grensebetingelser, som bilde 2.11 viser:

### Fri knekk lengde: $L$



Figur 2.11: Kritiske knekk lengder

[15]

Når man ser på spenninger igjennom tjukkelsen på veggen vil man ved et isotropt materiale som aluminium eller stål få en viss spenningsgradient. Man vil få høye spenninger i det ytre sjiktet på tanken, og lavere inni om man har ytre trykk. Ved bruk av kompositt vil dette problemet kunne forsterkes på grunn av den høye stivheten. Man vil da i verste fall ikke ha fordelene av stor vegg tjukkelse, siden spenningene blir alt for store i yttersjiktet. For å unngå dette vil man være avhengig av å ha materiale med høy styrke og gjerne litt god duktilitet ytterst slik at noe av spenningene blir transportert innover i tverrsnittet.

Spennings situasjonen for trykktank utsatt for kompresjonskrefter blir følgende:

$$\sigma_{radiell} = Pr/t$$

$$\sigma_{langs} = Pr/2t$$

Knekkspenning:

$$\sigma_k = \pi EI/L_k^2/A = \pi EI/L_k^2 A.$$

Med den sistnevnte som i stor grad bestemmende med tanke på styrke.

## 2.5 Kompositt/ innerforing

Siden det vil være svært vanskelig å produsere et elektronikkhus i dette tilfellet uten å bruke innerforing av annen type enn kompositten, vil det bli spørsmål om hvordan man unngår at væske trenger inn på innsiden av kompositten og bukler innerforingen pga dens svært beskjedne vegttykkelse. Dette temaet er det svært mye forskning på for øyeblikket, både her ved NTNU og på andre institusjoner rundt om i verden. I denne sammenheng vil man her kun gå løst inn på temaet og kvantifisere grovt hva som er problemene og hvordan man løser det i dag.

### 2.5.1 Materiale innerforing

Det finnes en rekke konvensjonelle konstruksjonsmaterialer man kan benytte til denne innerforingen, men de har alle fordeler og ulemper. Materialeegenskaper som vil ha stor betydning ved valg av innerforing er styrke, varmetvidelse, maskinerbarhet, pris, utmattingsfasthet, tilgjengelighet og vekt [8]. Materialer som kan benyttes:

- Aluminium

Bedriften bruker per i dag aluminiumslegeringa AA6082-T6 i stor utstrekning, denne legeringa er velegnet, og det vil det være svært gunstig å videreføre bruken av denne. Et aspekt ved valget av denne legeringa som konstruksjonsmateriale på ROVene er at den har god sjøvannsbestandighet [8], noe som ikke er nødvendig her siden innerforinga ikke kommer i kontakt med sjøvann og korrosivt medie inne i tanken. Man ønsker heller at noe av denne sjøvannsbestandigheten erstattes med utmattingsfasthet, da man får en god del av og på-lastninger av høyt trykk. Derfor kan man vurdere å bruke mer høyfast aluminium som 2 og 7xxx serien, da disse er sterkere men mangler den sjøvannsbestandigheten som AA6082-T6 har. Ved produksjon av disse innerforingene vil det være viktig at man unngår sveising, da dette gir feil i materialet og potensielt svake punkt. En gunstig måte å produsere innerforinger slik at man ikke får denne typen problemer er ved dyptrekking og/ eller sponfraskillende bearbeiding.

- Titan

Titan er et edelt metall som er mye brukt til akkurat denne applikasjonen. Grunnlaget for dette er at materialet har høy styrke, maskinerbart, lav vekt sammenligna med de fleste andre metallene unntatt aluminium, og at det ikke reagerer nevneverdig med andre materialer. Den sistnevnte egenskapen er svært viktig når man har et medie inne i tanken, som gjerne kan være korrosivt, men det er som nevnt ikke like nødvendig når man kun har luft ved en atmosfære inne i tanken. Et negativt aspekt ved dette materialet er at det ikke må sveises ved bruk til trykktank, på grunn av sterk svekking i materialeegenskaper, samt at det er et sjeldent og derfor kostbart materiale.

- Stål

Det finnes svært mange forskjellige stål-legeringer å velge i, og derfor vil det også være mulig å finne et materiale som passer denne bruken godt. Akilleshælen til de forskjellige stålene er den relativt høye vekta [8] sammenligna med titan og aluminiumslegeringer. Et stort pluss ved stål er den gode prisen, så lenge man velger et tradisjonelt og vanlig stål.



## 2.5.2 Bindemiddel

Et svært stort problem er at innerforinga og kompositten som er lagt på utsida kan bli separert (delaminering). Hvis dette inntreffer vil man kunne få trykkoppbygging på innsida av kompositten, og kreftene som skal tas opp av kompositten må tas opp av den svært tynne innerforinga. Som tidligere nevnt er dette et stort forskningsområde, ved NTNU forskes det svært mye på hvilke bindemiddel man kan benytte seg av for lapping av skipsskrog ved hjelp av komposittlapper. Et stort problem ved denne forskningen er hvordan man faktisk får komposittlappen til å henge fast på stålet. Det finnes limtyper som kan gjøre denne jobben, men da kun opp til produsentens oppgitte maks spenninger. Disse bindemidlene er kostbare, på grunn av de mekaniske egenskapene samt at det er stor konkurranse blant forbrukerne. Man er derfor nødt til å designe smart, og forhindre delaminerings-problemet. Hvis man komprimerer innerforingen før man spinner på kompositten, eventuelt legger på kompositten med høyt forspenn vil man få konstant strekk i kompositten selv når den ikke er utsatt for ytre krefter. Dette vil da innbære at man kan la være å bruke bindemiddel i det hele tatt. En metode som er mye brukt både for å forsegle sprekker i kompositten samt motvirker korrosjon mot sjøvann er å legge på et lag med gelcoat. Dette laget fjerner da eventuelle svake punkt, men bare til en viss grad. Blir spenningene store nok vil delaminering fortsatt kunne inntreffe.

## 2.5.3 Varmeutvidelsesforskjeller

En stor del av grunnen for at man får delaminering er at de forskjellige materialene reagerer forskjellig på varme, noen utvider seg mye, andre gjør ikke det. En kompositt vil i stor grad være ganske død i forhold til varmpåvirkningen, dette gjelder vanligvis ikke for metalliske materialer. Det er derfor viktig at det materialet man velger til innerforing har tilnærma samme varmeutvidelse som kompositten, eller så nært som mulig. Man kan se for seg at om man har innerforing som utvider seg mer enn kompositten vil man få bedre kontakt med kompositten ved eleverte temperaturer, noe som stemmer. Dette er vel og bra, men man får også utmatingsproblematikk på grunn av spenningsvariasjonene som oppstår, noe som er mindre ønskelig sammenligna med fordelene av høyere strekk i kompositten.

## 2.6 Korrosjon

Korrosjonsproblematikk er et svært vanlig fenomen når man skal bruke en komponent i sjøvann eller lignende omgivelser. Korrosjon medfører at metallet vil forvitte som følge elektrokjemiske reaksjoner, det vil da oksidere. Oksidsjiktet framstår som rust på vanlig konstruksjonsstål, som igjen over tid fører til at man mister materiale. På aluminium har det hovedsakelig motsatt effekt, oksidsjiktet vil her virke som ei svært robust barriere mot videre forvitring og andre påvirkninger. Men dette avhenger i stor grad av om hvilket miljø komponenten skal operere i, og hvilken legering man har valgt. Skal korrosjon inntreffe trenger man et materiale som er kan utsettes for korrosjon, man trenger luft og væske [16]. Hvis man kan ekskludere en av disse bestanddelene vil ikke korrosjon være noe problem. Det finnes mange typer korrosjon, alt fra vanlig korrosjon og galvanisk korrosjon til spaltkorrosjon og erosjonskorrosjon [16]. Ved kompositt-trykketank som denne oppgava dreier seg om er det fire grensesjikt der korrosjon kan bli et tema, og de må håndteres på ulike måter:

- Kompositt mot ytre medie:

Det ytre sjiktet, der kompositten vil være i kontakt med sjøvann vil man kunne få korrosjonsproblematikk, dette vil neppe i stor grad være noe problem da man vanligvis belegger overflata med gelcoat. Men det vil være viktig å velge den rette kompositten med tanke på dette. Skulle noe skje med det ytre laget av gelcoaten, bør kompositten også være motstandsdyktig mot det å ta opp vann.

- Kompositt mot innerforing:

I det sjiktet der kompositten kommer i kontakt med innerforingen vil man få kontakt mellom to forskjellige materialer. Når to ulike materialer kommer i kontakt med hverandre vil det kunne oppstå galvanisk korrosjon. Galvanisk korrosjon forklares nærmere i neste delkapittel. Dette gjensesjiktet vil være det viktigste å ta hensyn til siden man på ingen måte ønsker korrosjon her. Korrosjon her vil kunne gi opphav til delaminering og eventuelt hull i innerforingen, om korrosjonen pågår over lengre tid.

- Innerforing mot indre medie:

Som tidligere nevnt vil det i dette tilfellet kun være luft inne i trykktanken, og så lenge denne luften ikke er fuktig eller forurenset vil det ikke være behov for kostbar overflatebehandling eller annen beskyttelse mot korrosjon. Ved konvensjonell trykktank-produksjon vil dette være et viktigere tema, da innholdet kan bidra til svært korrosivt miljø. Et godt eksempel er offshore-risere som transporterer råolje opp fra brønn til plattformen.

- Lokk mot ytre medie:

Siden denne tanken skal inneholde elektronikk, og det skal være mulig å komme til denne for vedlikehold eller utskiftninger må det være lokk som tetter tanken. Disse lokkene vil det være naturlig å lage i samme materialet som innerforingen, for å unngå galvanisk korrosjon samt annen varmeutvidelse. Disse lokkene vil da også måtte motstå det ytre mediet hva angår korrosjon. Det vil derfor være naturlig å velge et materiale som har en viss korrosjonsmotstand, men siden denne komponenten er såpass letthåndterlig og tilgjengelig vil man kunne bytte denne ved visse service-intervaller om nødvendig.

## 2.6.1 Galvanisk korrosjon

Når to metaller med forskjellig elektrokjemisk potensial [15] står i kontakt med hverandre vil man få galvanisk korrosjon. Elektronene vil da vandre fra det metallet med lavest potensial til det metallet med høyest [16] og sørge for at det metallet med lavest mister masse. Metallet med lavest elektrokjemisk potensial mister masse på grunn av at når det avgir elektroner så vil man stå igjen med metallioner, og disse går over i elektrolytten rundt metallene. Jo større forskjellen i elektrokjemisk potensial er, jo mer aggressivt vil korrosjonen påvirke sammenkoblingen. En elektrolytt trengs for at reaksjonen skal inntreffe og er eksempelvis vann. Jo bedre denne væsken leder strøm/elektroner, jo forttere vil den galvaniske reaksjonen inntreffe. Destillert vann har ikke salter og urenheter som leder elektrisitet, og derfor vil ikke korrosjon inntreffe. Hvis man derimot har kontakt med sjøvann som har svært god ledningsevne, blir korrosjon et viktig tema igjen. Hvis man også har oksygen til stede vil dette også virke som en katalysator for korrosjonen, og bidra til økt korrosjonshastighet.

## 2.6.2 Løsninger for å unngå korrosjon

Det finnes mange måter å bedre et metalls korrosjonsegenskaper, noen enkle men ikke nødvendigvis så effektive og andre mer kostbare. Som med alt annet må valg av korrosjonsbeskyttelse tas i sammenheng med resten av systemet, man må vurdere hvor viktig det er samt hvor farlig korrosjonen faktisk ville være på komponenten. Det finnes fem hovedgrupper hva angår måter å forhindre korrosjon på:

- Endring av metallet:

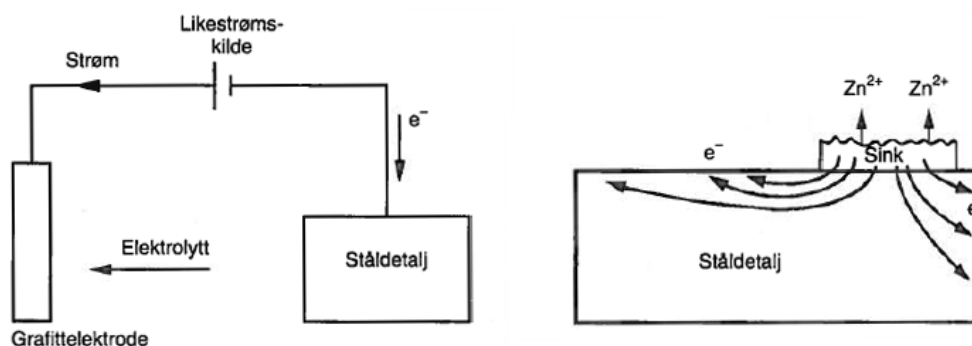
Dette vil si, å enten bytte materiale man bruker til et annet mer edelt (titan istedenfor aluminium eller stål), eller å endre egenskaper ved det metallet man har. Måter å endre dette på kan være ved hjelp av varmebehandling [16] eller avspenningsgløding.

- Endre det korrosive mediet:

Ved å gjøre elektrolytten mindre kapabel til å lede elektroner vil man redusere korrosjonshastigheter drastisk. Hvis man kan ta vekk oksygenet i elektrolytten, eller fjerne andre urenheter vil hastigheten gå sterkt ned. Dette er en metode mye brukt i kjølevannet til bilmotorer [16] for å unngå at det gror til og at det ikke skal korrodere.

- Endring av potensialet metallene seg imellom:

Ved å benytte seg av noe som kalles katodisk beskyttelse kan man redusere potensialet imellom metallene, man kan faktisk få reaksjonen til å gå motsatt vei. Dette gjøres tradisjonelt ved hjelp av likestrøm eller offeranode. Ei offeranode er lagd av et metall som er mindre edelt, og dette metallet lar man da bli spist opp som følge av reaksjonen. Et godt eksempel på bruk av offeranoder er ved offshore-installasjoner, her brukes sinkanoder som er mindre edelt enn stålet konstruksjonen er bygget av. Dette er illustrert på figur 2.12 sammen med det å påtrykke spenning. Ved bruk av likestrøm tilfører man enkelt og greit like høy spenning som det galvaniske potensialet til koblingen for å stoppe reaksjonen [16].



Figur 2.12: Endring av potensialforskjell ved påtrykt spenning og sinkanode [16]

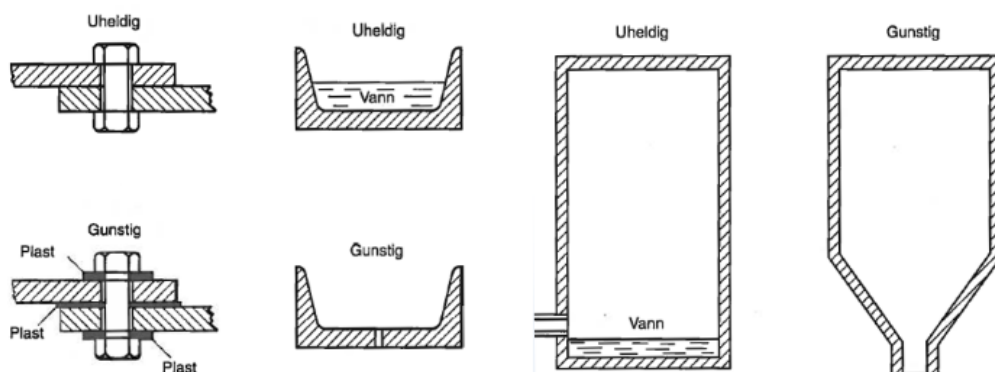
- Endring av metallens overflate:

Ved å belegge overflata, eller sørge for at overflata til metallet får andre egenskaper kan man også bremse korrosjonen drastisk. Man kan eksempelvis "clad" sveise et annet mer edelt metall oppå det opprinnelige, og på denne måten minske potensialforskjellen. Et godt eksempel på dette ved spinning av karbonfiber utenpå metall-innerforing er å legge

glassfiber på de første rundene for å sørge for at karbonfiberen ikke ligger i kontakt med metallet.

- Utforming av konstruksjonen:

Ved å designe smart kan man unngå mange problemer med tanke på korrosjon. Man kan veldig enkelt prøve å unngå at metallene står i kontakt med hverandre, som nevnt i forrige avsnitt. Man bør også forhindre oppsamling av væske som kan fungere som elektrolytt på utsatte steder. Eksempler på uheldige og heldige konstruksjoner vises på figur 2.13.



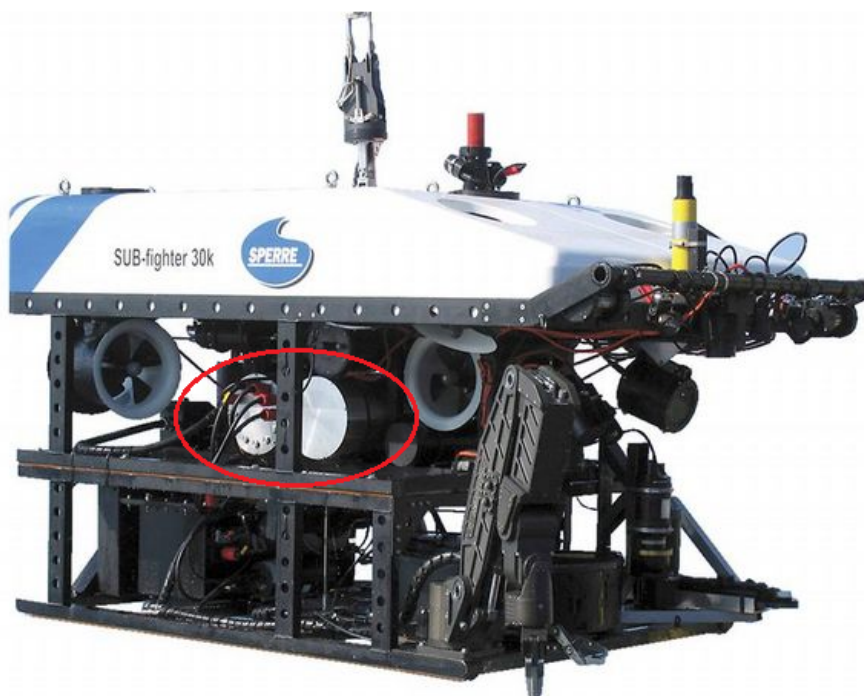
Figur 2.13: Heldige/ uheldige konstruksjonsmetoder korrosjonsmessig

[16]

# Kapittel 3

## Dagens elektronikkylindere

En ROV trenger store mengder elektronikk for å kunne utføre oppgavene den er satt til å gjøre. ROV-en har flere framdriftsmotorer for å kunne posisjonere seg i vannet, samt for å kunne stabilisere fartøyet. I tillegg kan de ha en/ flere forskjellige manipulatorarmer, spesialprodusert utstyr og/ eller belter som en operatør styrer fra kontrollrommet oppe ved overflata. For at disse tingene skal kunne opereres effektivt og smidig trenger man flere kretskort samt annen skjør elektronikk. Selv om elektronikk har blitt svært godt utvikla de siste årene så liker de fortsatt vanligvis ikke vann veldig godt, og må derfor skjermes fra omgivelsene. På Sperre sine ROV-er blir dette gjort ved at man skrur all elektronikken på ei ramme som igjen legges inn i en sylinder. Denne ramma fungerer også som det ene endelokket til den skjermende sylindere. Ved hjelp av vanntette overføringer i det samme endelokket går kablinga videre til den representative strømkilda og motorene. På figur 3.1 ser man hvor disse elektronikkylindrene vanligvis er plassert i ROV-en samt at man kan se noe av kablingen både til den, og ut av den.



Figur 3.1: Plassering av elektronikkylindere

Siden denne elektronikken er innkapsla, betyr det at man vil få trykkforskjell mellom inn og utside av tanken når man dykker med fartøyet. Dette betyr at tanken blir utsatt for krefter,

og at designet på tanken må være tilstrekkelig sterkt. I dette kapitlet defineres egenskapene til dagens sterkeste elektronikkhus. Dette er et hus beregna for 3000 meter, altså 300 bars ytre trykk. Det tas utgangspunkt i dette huset siden det er i utstrakt bruk på de fleste fartøyene, samt at det gir best sammenligningsgrunnlag med en ny 600 bars elektronikkylinder.

## 3.1 Design

Designet til Sperre er komponert av en aluminiumssylinder med lokk i hver ende. Disse komponentene er produsert i dreibenk for å få rette mål og dimensjoner. Alle de strukturelle komponentene til elektronikkhusa er produsert i aluminiumslegeringa AA6082-T6, som med sine mekaniske egenskaper sørger for at elektronikkhuset er motstandsdyktig mot bøyespenninga og bukklingsfaren som inntreffer ved 3000 meters havdyp.

### 3.1.1 Sylinder

Sylinderen som Sperre bruker, vises som en CAD-tegning i figur 3.2.



Figur 3.2: Sylinderkroppen til dagens elektronikkhus

Sylinderen har følgende fysiske mål:

Lengde= 554mm

Ytre diameter=190mm

Indre diameter=160mm

Diameter tetteflate=162,9mm

Veggtykkelse=15mm

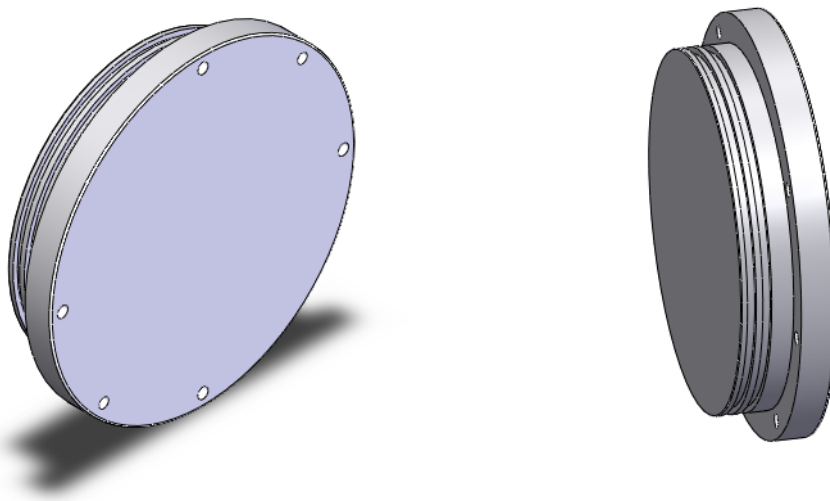
Avstand inn til styringsdiameter for elektronikk(162,9mm til 160mm)=25mm

Maskintegning av sylindren finnes i Tillegg A, på figur A.2 med alle måla oppgitt. Tegningen viser også punktet der diameteren reduseres fra 162,9 til 160 mm. Ved dette punktet trappes den indre diameteren ned med 2,9mm, o-ringene i lokka vil her ligge an mot sylindrerflata med hensikt å tette for ytre trykk. Ved å plassere to o-ringer sånn får man god tetting mot sylindrerflata.

Ved belastning på 300 bar på kun sylindrerflata får man belastninger som vist på figur A.3-A.4, også i Tillegg A. Man kan der se at de maksimale spenningene på den indre flata er i området 190-210 MPa, som gir en sikkerhetsmargin på ca 1,4-1,5 i forhold til AA6082-T6 sin flytgrense på 290Mpa. Dette er en akseptabel sikkerhetsmargin da det ikke vil gå ut over noe annet enn fartøyet om operatøren velger å strekke grensene eller at den gitte elektronikkysylindren har en liten materialfeil. Alle materialdata oppgis med en viss standard-normalfordeling som innebærer at materialet skal ha egenskaper innenfor visse grenser, men kan variere innenfor dem. De høye spenningene som man kan bevitne på styrkeberegninger kommer som følge av grensebetingelsene, noe som gir de høye spenningene der kjerneeffekten er stor.

### 3.1.2 Endelokk

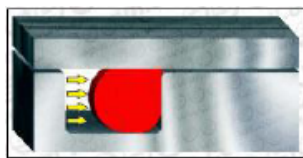
Endelokka til disse elektronikkysylindrene er litt forskjellige. På den ene sida fungerer det som ei ramme til all elektronikken, og puttes inn i sylindren med fine toleranser mot sylinderveggen. På den andre sida er lokket der kun for å tette mot lekkasje. Kabelgjennomføringene står vanligvis på det lokket som har all elektronikken festa til seg, av praktiske årsaker. CAD-tegning av det enkle endelokket vises i figur 3.3.



Figur 3.3: Bakre endelokk til dagens elektronikkhus

Maskintegninger av denne komponenten finnes også i Tillegg A. Dette lokket har en total tjukkelse på 40mm, noe som er nødvendig på grunn av to o-ringer. Man benytter seg av to o-ringer som en dobbel sikkerhet. Figur 3.4 viser hvordan trykket vil påvirke o-ringen i positiv forstand når den har de gitte grensebetingelser.

Siden endelokkene har et mindre areal sammenlignet med den sylindriske delen vil det ytre trykket være et mindre problem med tanke på spenninger i aluminiumen. Rask styrkeberegning ligger i Tillegg A, figur A.6-A.7. Man kan se at maksimal spenning kun blir i området 110-130MPa, og derfor godt innenfor flytgrensa til materialet.



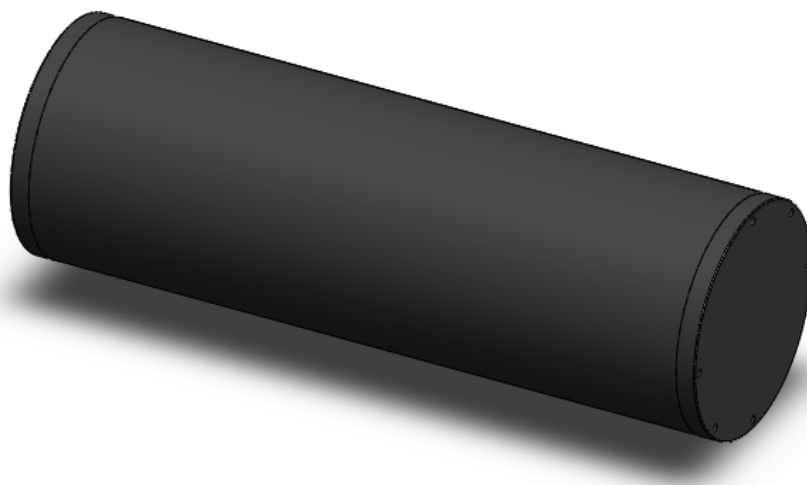
Figur 3.4: Deformasjon o-ring ved ytre trykk

[17]

Tidligere produserte Sperre disse elektronikkylindrene ved å sveise på lokk på ene enden. Denne sveisinga resulterer i sterkt redusert styrke på aluminiumen, noe som førte til at de gikk over til dagen løsning med to demonterbare lokk. Dette temaet tas opp i kapittel 4, der mulighetene for varmebehandling, og resulterende økt styrke vurderes ved laboratorieførsøk.

### 3.1.3 Lukket elektronikkhus

CAD tegning av elektronikkhuset med endelokkene på er vist på figur 3.5. For denne oppgava, der det skal fokuseres på trykktanken og trykktankens oppbygning er kabelgjennomføringene i lokket sett bort ifra. Disse gjennomføringene er klassifisert til gitte trykk i seg selv, og kan kjøpes til formålet.



Figur 3.5: Lukket elektronikkhus

Siden elektronikkylindren fortrenger vann likt volumet inne i den vil man få oppdrift. Tyngden til denne tanken under vann er lik massen til det vannet den fortrenger minus massen til sylindren.

Masse sylinder= Volum aluminium \* massetetthet aluminium:

$$V_{alu} = 2V_{lokk} + V_{sylinder} = 2 * 939781.43mm^3 + 4528768.99mm^3 = 6408331,85mm^3$$

$$\text{Tetthet aluminiumslegering AA6082-T6} = D_{alu} = 2670kg/m^3 \text{ [9]}$$

$$M_{sylinder} = (6408331,85mm^3 / * 10^{-9}) * 2670kg/m^3 = 17,11kg$$

$$\text{Volum fortrengning} = \pi(D/2)^2L = \pi(190mm/2)^2 * 586mm = 16614784mm^3$$

$$\text{Tetthet vann}(20^\circ\text{C}) = D_{vann} = 998kg/m^3 \text{ [15]}$$



Oppdrift = Volum fortregning \* tetthet vann =  $(16614784 \text{ mm}^3 / 10^{-9}) * 998 \text{ kg/m}^3 = 16,58 \text{ kg}$

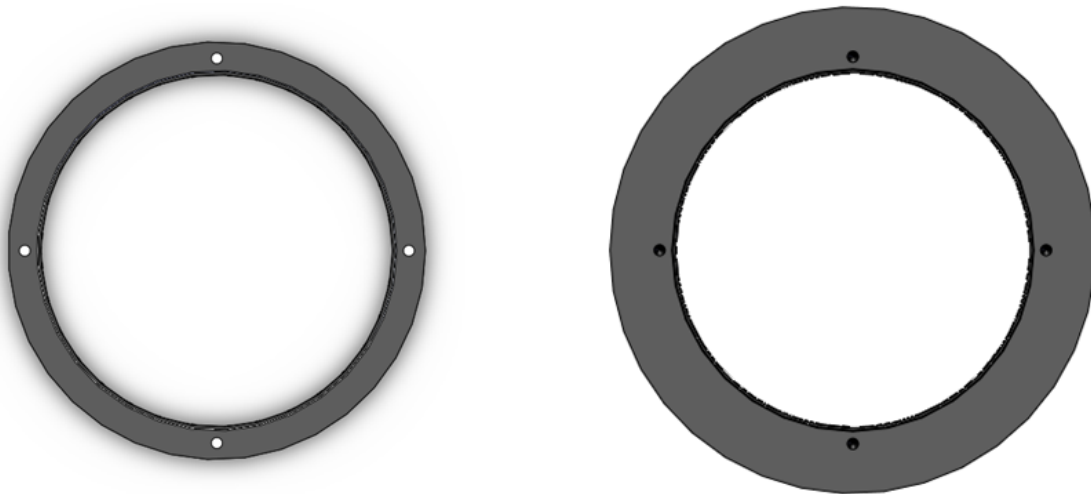
Vekt =  $M_{\text{sylinder}} - \text{oppdrift} = 17,11 \text{ kg} - 16,58 \text{ kg} = 0,53 \text{ kg}$

Dette betyr at man må ha et tillegg i oppdrift fra oppdriftsblokka på ca en halv kilo for hver tomme elektroniksylinder man plasserer på fartøyet [8]. Hvis man kan redusere vekta ved å benytte et annet materiale betyr det at man kan redusere volumet til oppdriftsblokka, noe som vil gjøre fartøyet mindre og mer fleksibelt samt billigere å produsere.

## 3.2 6000 meters elektronikkhus

Om man skulle produsert elektronikkhus med samme materialet og designet som tidligere, ville man fått et tyngre hus samt et større behov for oppdrift skapt av oppdriftsblokk. Ved 6000 meter vil elektronikkhuset bli utsatt for 600 bars ytre trykk, noe som er det dobbelte av dagens design. Et annet tilleggsaspekt er at ved større havdyp kan man ikke benytte seg av de oppdriftsmaterialene med best oppdrift, de tåler ikke trykkene. Det at man må bruke mer kompakt oppdriftsmateriale betyr at man må ha mer av det. Dette temaet gjør det svært viktig å tenke på nye løsninger som har lavere vekt, og som gjerne kan gi et tillegg i oppdrift til fartøyet.

Ved dagens design ville elektronikkhuset sett ut som vist i figur 3.6 med ytre diameter på 220 mm og veggtykkelse på hele 30 mm. Dette er en dobling av veggtykkelse sammenligna med det gamle designtrykket på 300 bar. Om man sammenligner massene vil man få ny masse som er større enn en dobling av den 300 bars sylindren (26kg i forhold til 12kg).



Figur 3.6: 300 vs 600 bars aluminiumssylindre

For at lokket skal kunne passe må man endre diameteren på festeflata. Lokket har så god tykkelse og styrke at det i seg selv tåler doblingen av trykket (Figur A.9), og får derfor minimal vektøkning.

Den totale vekta på 6000 meters aluminiumshuset blir hele 32 kg, men oppdrifta øker ikke med mer enn 5,6 kg opp til 22 kg. Dette betyr at man må netto legge til materiale som gir 10 kg oppdrift ved bruk av 6000 meters huset. Sammenligner man dette med dagens hus der man kun må sørge for oppdrift lik 0,5 kg vil dette kreve stor plass samt at det er kostbart.

Dette er i stor grad motivasjonen for denne oppgava, om man kan bruke et annet lett materiale slipper man tenke på denne problemstillinga. Det kan ved raffinering av designet brukes til fordel for fartøyet, ved at man skaper oppdrift. Et annet aspekt ved å benytte seg av lettere materialer er at både vekta under og over vann blir påvirka. Bruker man mindre og lettere materiale kan man også spare inn noe på vinsjer og andre løfteanordninger når man designer hele ROV systemet.

### 3.3 Varmeutvikling

I dag benyttes som kjent aluminium som konstruksjonsmateriale. I tillegg til lav vekt har også aluminium svært god ledningsevne, både elektrisk og termisk [8]. Denne termiske ledningsevnen kommer godt med siden elektronikken avgir varme og den må ha en viss kjøling for at komponentene skal fungere som de skal. Aluminiumen kjøles da ned mot det ytre mediet, som vanligvis er vann, siden elektronikken ligger med god kontakt mot aluminiumen. Hvilke temperaturer denne elektronikken utvikler er ikke Sperre AS helt sikre på, men innholdet er i stor grad kretskort og noe kabling. Dette betyr at noe varme må påberegnes, men ikke nødvendigvis svært høye temperaturer. En måte å kunne måle dette på er å benytte seg av temperaturstrips som skifter farge etter hvilken maksimal temperatur den har vært utsatt for.

Varmeledning er en uviss faktor når man skal benytte seg av kompositt til denne komponenten, siden kompositter i stor grad har dårligere termisk ledningsevne sammenligna med aluminium. Som med det meste andre med kompositter så er dette et problem man kan minimere ved design, men det er også svært avhengig av at produksjonsprosessen er gjennomført i henhold til prosedyre.

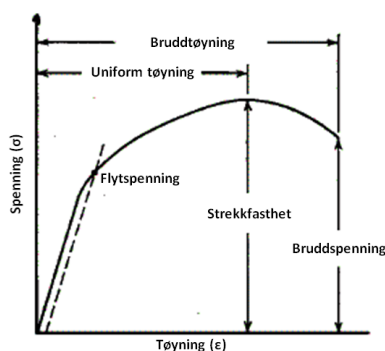
# Kapittel 4

## Hull og strekkprøveforsøk

### 4.1 Bakgrunn

En del av oppgava er å se på hvordan aluminium reagerer mot smeltesveising. Grunnlaget for dette er at dagens trykktanker og store deler av ROV-ene er konstruert i aluminum, og ofte sammenføyd med TIG sveis [18]. Hvordan aluminium reagerer på smeltesveising er beskrevet i forfatterens rapport i faget TMM-9; Sammenføyningsteknikk [18] og i sveiselitteratur [19]. I litteraturen er det i stor grad sett på hele herdeprosessen med anløping, kjølehastighet og elding. Sperre AS ønsker av økonomiske og praktiske grunner å vurdere verdien av å kun elde aluminiumen for å få en styrkeøkning. Elding gjøres normalt etter varmebehandling, og den bidrar til å redusere spenningene i materialet ved at kornene, inne i materialet, prøver å gå tilbake til en struktur med lavest mulig energi. Elding kan gjøres enten naturlig eller kunstig. Naturlig elding skjer ved romtemperatur, mens kunstig elding skjer ved forhøyet temperatur [18]. I dette forsøket testes bruddstyrken til materialet på prøver kun utsatt for sveisingen, samt på prøver som har blitt elda etter sveisinga. Teorien tilsier at man vil oppnå en gunstigst styrke og duktilitet ved å elde delene i 6-7 timer ved 160°C -170°C [19]. Under dette forsøket sammenlignes denne anbefalte eldingen med en kortere og noe varmere elding, med tanke på det økonomiske og tidsaspektet ved eldingsprosessen.

#### 4.1.1 Strekkprøving

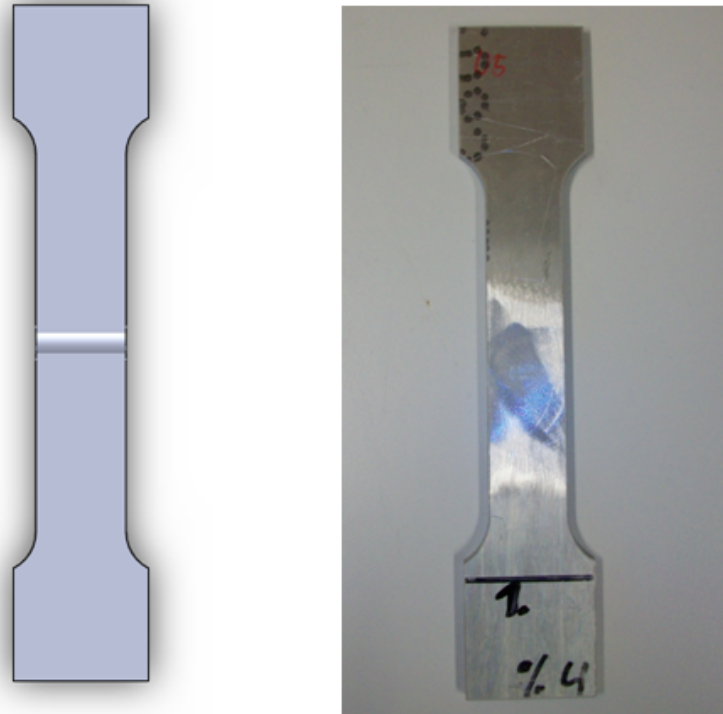


Figur 4.1: Eksempel på spenning/tøyningskurve

Strekkprøving er den konvensjonelle måten å teste et materials styrkeegenskaper. Ved denne type prøving strekker man prøver til brudd, der man har kontroll over forlengelsen til prøva samt hvor mye kraft som blir tilført. En stor fordel ved bruk av strekkprøving er at den er godt kontrollert med enaksa strekk. uten at mange parametre må klaffe hver gang for at det skal være representativt og sammenlignbart. Ved å plote graf basert på forlengelse og spenning i materiale (kraft per areal) får man den vanlige spenning/tøyningskurva. Figur 4.1 viser et eksempel på slik spenning/tøyningskurve.

Denne kurven kan brukes for å vurdere parametre som flytgrense, flyttøyning, strekkfasthet, uniform tøyningverdi, bruddstyrke og bruddforlengelse. Ved dette forsøket brukes

strekkprøvemålingene i stor grad for å definere styrken til materialet, mens hulltrykksprøvingene skal definere seigheten/duktiliteten til materialet. Ved strekkprøving av plater, som blir benyttet i dette forsøket er det vanlig å lage prøver med hundebeinsform, vist i figur 4.2.



Figur 4.2: Hundebensforma strekkprøve

Denne typen fasong benyttes for å forsikre seg at man har nok flate til å spenne opp prøva i maskinen samt at bruddet skal gå der man har et redusert tverrsnitt, uten at det induseres av andre årsaker. Ved selve prøvinga dras denne staven til brudd, der man måler kraften som benyttes opp mot hvilken bevegelse det er på bakkene som drar i prøva.

#### 4.1.2 Hulltrykksprøving

Den vanlige strekkprøvemethoden har over lengre tid vært den mest brukte måten å måle styrken på et materiale, men for å måle et materiales duktilitet kan denne metoden være mangelfull. Man har også over lengre tid benyttet seg av hardhetsmålinger for å approksimere duktiliteten til et materiale. Denne hardhetsmålingen er en approksimasjon og kan lett gi feilaktige resultater ved feil bruk av måleutstyr, eller at overflaten til materialet har en annen struktur sammenligna med kjerna. Til måling av duktilitet er hulltrykksprøving en enkel og mer nøyaktig metode enn begge de øvrige metodene. Ved hulltrykksprøving får man kurver på samme måte som strekkprøvingen, men prøvemethoden gjør at resultatene representerer duktiliteten bedre. Ved hulltrykksprøvingen ses det på styrken til aluminiumen ved forskjellige avstander fra sveisen, i forhold til strekkprøvinga der den dras til brudd ved det svakeste punktet. Figur 4.3 viser hvordan hulltrykksprøvene er tatt ut av ei sveist aluminiumsplate. Sveisen er representert ved den stipla linja på bildet.





Figur 4.4: Sveist 5 mm aluminiumsplate i legeringen AA6082-T6

## 4.2.2 Strekkprøving

Av de sju platene som ble oppsveist for testing er fire brukt til strekkprøver, som resulterte i 16 prøver. De 16 prøvene er oppdelt slik at fem prøver skal være ubehandla, fem skal være elda i to timer og de resterende seks skal gjennomgå den lengste eldinga.

### Dimensjoner strekkprøve

Strekkprøveutforming er definert av ISO-standarden ISO 6892-1 [20], med krav til radiuser og prøvelengder for å sørge for at bruddet går uavhengig av oppspenninga eller kjerver. Det stilles også krav til strekkprøvene som følge av maskinen de skal strekkes i, det må være nok oppspenningsflate og lengda på prøva bør være passelig. Prøvene har målene vist på figur4.5.

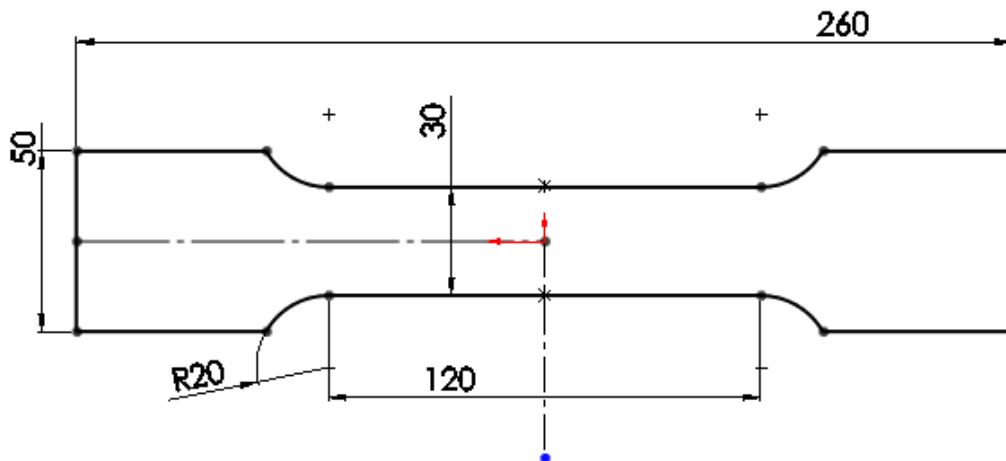
### Kraftbehov

En strekkprøvemaskin har begrensa kraft som følge av konstruksjonen og hydraulisk tilførsel av kraft. NTNU har et utvalg av strekkprøvemaskiner, og man må da velge den maskinen som har passelig med kraft. En maskin med for lite kraft vil ikke klare å dra prøva til brudd, mens en for stor maskin vil være tungvint å bruke samt at det er sløsing av ressurser. For å velge den best egnede maskinen beregnes det hvor mye kraft som skal til for å slite prøvene, da materialet har sin oppgitte styrke(MPa) og tverrsnittsareal(mm<sup>2</sup>):

$$A = b * h = 5mm * 30mm = 150mm^2 \text{ (tverrsnittsareal)}$$

$$F = \sigma * A = 310MPa * 150mm^2 = 46500N \text{ (Kraftbehovet, beregna ut ifra 310MPa strekkfasthet)}$$

$$m = F/a = 46500N/9,81m/s^2 = 4740,06kg \text{ (Omregna kraftbehovet til masse da det er slik krafta til strekkprøvemaskinene er kvantifisert)}$$



Figur 4.5: Dimensjoner strekkprøvene

Dette betyr at strekkprøvemaskin med kapasitet på over 4,7 tonn er nødvendig for å strekke basematerialet til brudd.

### Måleinstrumenter

For å kunne plote spenning - tøyingskurve trenger man å vite mengde tilført kraft omregna til spenning, samt at man må vite hvor langt prøva strekkes til enhver tid. Kraftsensoren ligger innbakt i strekkprøvemaskina sammen med en enkel avstandssensor. For å få bedre målinger på forlengelsen kan man benytte lokale klypemålere eller strekkklapper der bruddet skal gå. Til denne type enkel testing er dette ikke nødvendig.

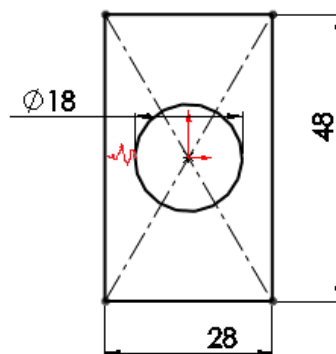
### 4.2.3 Hulltrykksprøving/Dortest

Hulltrykksprøvene er vannskjært ut av de resterende tre sveiste aluminiumsplatene på den måten som er vist på figur 4.3. På samme måte som ved strekkprøvinga så skal de forskjellige eldemetodene testes. Til forskjell fra strekkprøvinga er fokuset på hvor materialet er svakt i forhold til sveisen, hvor eldinga gir en effekt og hvor stor den effekten er. Bilde 4.6 viser hvordan plata med prøvestykkene ser ut etter vannskjæring samt dimensjonene på prøvene.

Hulltrykksprøvene har dimensjoner valgt for å passe til den doren som sprenger ut prøva. Det er nettopp dette som gjør denne testmetoden så gunstig, man kan få testa veldig lokale punkter i materialet, ved å plassere den delen av prøva med lite gods på disse punktene. Prøva har mye mindre motstand mot å sprekke opp i dette punktet selv om materialet er svakere litt ovenfor/nedenfor. De forskjellige testene har ulike avstander fra sveisesenteret, og tabell 4.2.3 viser avstandene som de ulike nummererte prøvene 4.6 har.

Prøvenummer:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Avstand (mm):	60	42	18	24	6	12	30	48	2	123	123

Testjiggen som sprenger prøvene består av en skrue som trykker en dor igjennom prøva for å



Figur 4.6: Vannskjærte hulltrykksprøver og dimensjoner på hulltrykksprøver

sprengte den ut til brudd i det smale området. Bilde 4.12 viser maskinen. For å kunne hente ut data må pc kobles til og testene logges. Ved hulltrykksmåling får man ut kurve på samme måte som strekkprøvene, men det er ikke vanlig å bruke informasjonen på samme måte. Man velger vanligvis å innhente referanseverdi ved å sprengte ut prøver som ikke har blitt påvirket av varme(sveisinga). Det er derfor skjært ut seks prøver som blir fungerende som referanser, prøvene elleve og tolv på de tre platene. Gjennomsnittsduktiliteten av disse prøvene får verdien 100%, og de andre prøvene blir sammenlignet mot denne.

## 4.3 Testgjennomføring

### 4.3.1 Varmerbehandling

Eldinga på henholdsvis to timer ved 175°C og seks timer ved 160°C er gjennomført hos Sintef, i industriovn av typen Nabertherm C290, vist i bilde 4.7

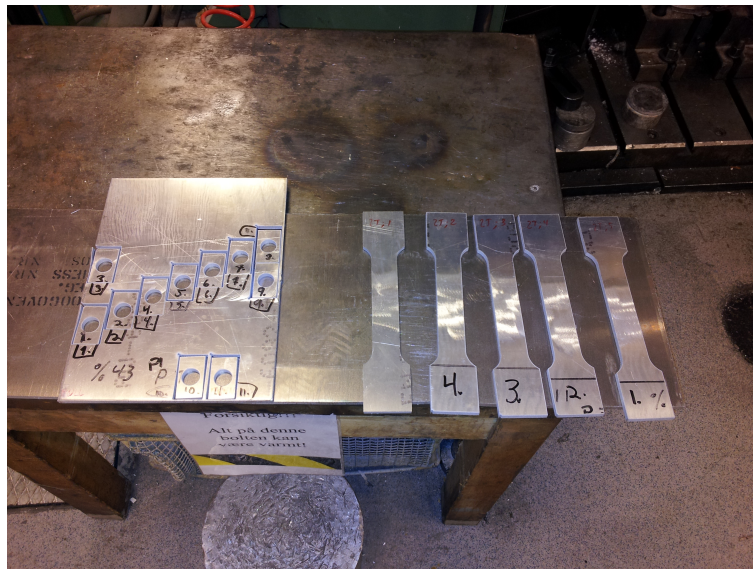
Varmerbehandlinga er gjort i denne type ovn på grunn av at de er mye mer stabile med tanke på temperatur og temperatursvingninger sammenlignet med en konvensjonell ovn. Grunnen til at disse er mer stabile ligger i hvor godt isolerte de er, nabertherm-ovnen har keramisk isolasjon på ca 8cm. Da varmen er lav og eksponeringa for denne temperaturen er såpass kortvarig får det ingen innvirkning på prøvegeometrien. Bilde 4.8 viser prøvene utsatt for to timer kunstig elding.

Etter varmerbehandlinga ble strekkprøvemaskinen satt opp og strekkforsøket gjennomført. For å kunne skille prøvene i etterkant blei de merket med navn av denne typa:





Figur 4.7: Nabertherm varmeovn



Figur 4.8: Prøver utsatt for kunstig elding

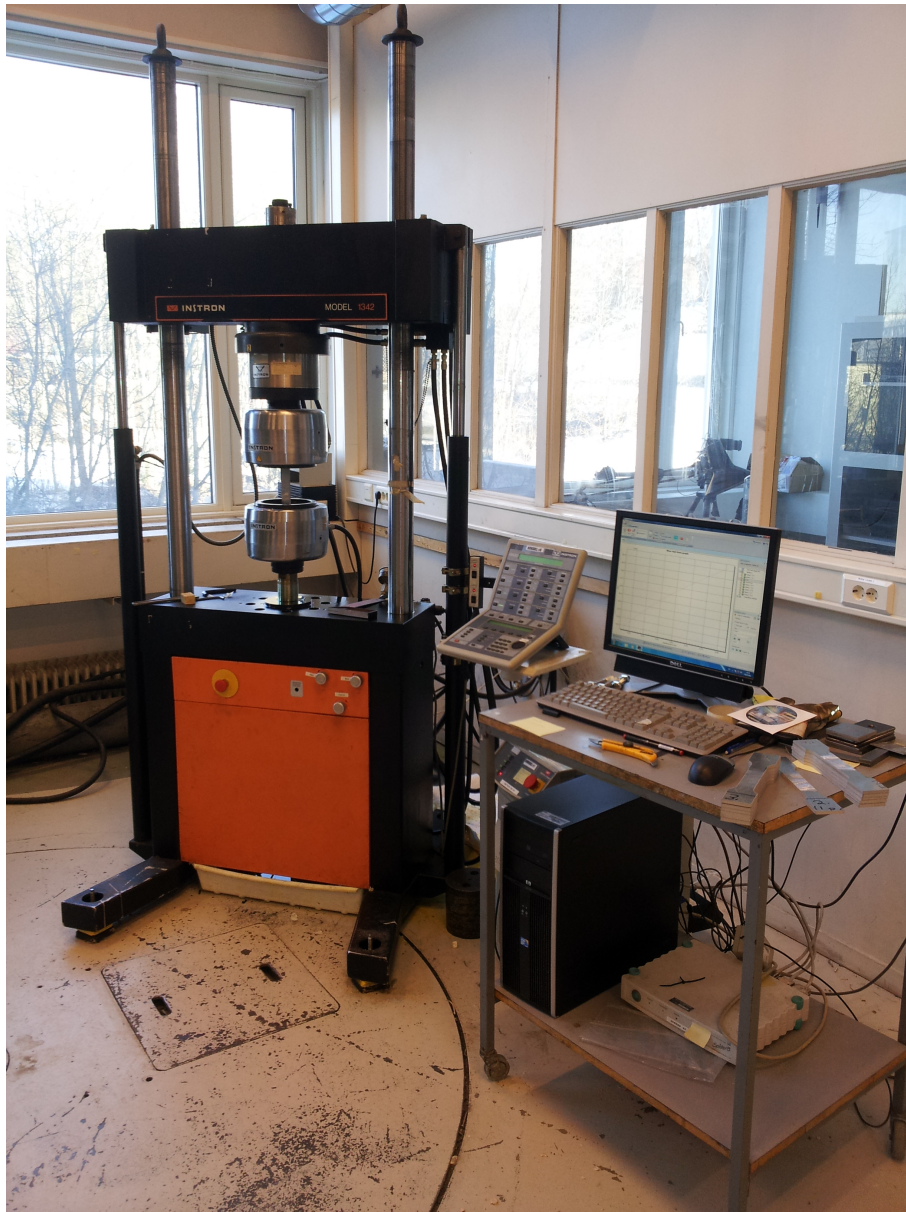
6T; 5

det 6T står for lengden de er utsatt for elding, mens tallet 5 er nummeret på akkurat denne prøva for å skille den i fra de andre med samme varmebehandling. De som ikke er utsatt for varmebehandling heter U1,U2 og så videre.

### 4.3.2 Strekkprøving

Strekkprøvemaskinen forsøket ble gjennomført i, har en kapasitet på 25 tonn. Denne maskinen er av typen Instron Model 1342 vist på bilde 4.9, og ble valgt på grunn av tilgjengelighet. Maskina har tilhold på utmattingslaben til Institutt for produktutvikling og materialer (IPM).

Prøvene blir da klemt fast i bakkene på maskinen ved hjelp av hydraulikk. Den øverste bakka er manuelt justerbar for å tilpasse prøvestørrelsen, mens den nedre står for selve strekkinga. Den nedre bakka defineres med et nullpunkt og forflytningen måles i forhold til dette punktet.



Figur 4.9: Strekkmaskin av typen Instron

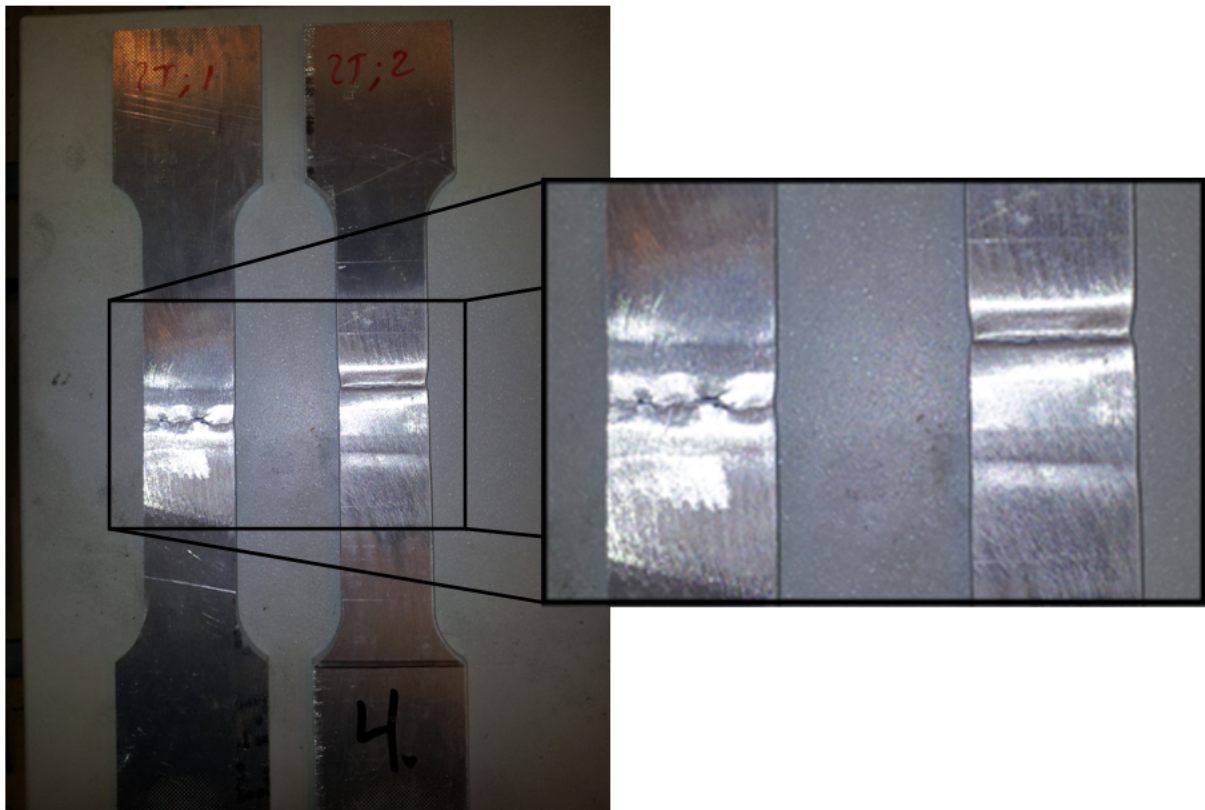
Bilde 4.10 viser ei aluminiumsprøve innspent i maskinen før strekking.

Alle de 16 prøvene ble deretter dratt til brudd med strekkhastighet på to mm per minutt. Alle prøvene er logga med dataprogrammet CatmanEasy, som gir grafer over kraftbehovet i forhold til avstanden prøva strekkes. Av alle prøvene som ble strekt, så var det kun ei prøve som gikk av i sveisen. Resten gikk av som forventa ca sju mm unna sveisen, i den bløte sona. Bilde 4.11 viser sammenligning av bruddet som følge av sveisefeil og prøve som gikk til brudd der den skulle.

Selv om den ene prøva inneholdt sveisefeil, så hadde den på grunn av to timers varmebehandling, egenskaper på lik linje med de prøvene uten varmebehandling. Sveisefeilene kan komme som følge av mangelfull dekk-gass, forurensning, start/stopp, at sveiseren var uheldig eller lignende. DNV har satt 110 MPa som designspenning for denne legeringa når den er sveisa, da har de tatt hensyn til at slike ting kan forekomme og at det fortsatt skal være sikkert.



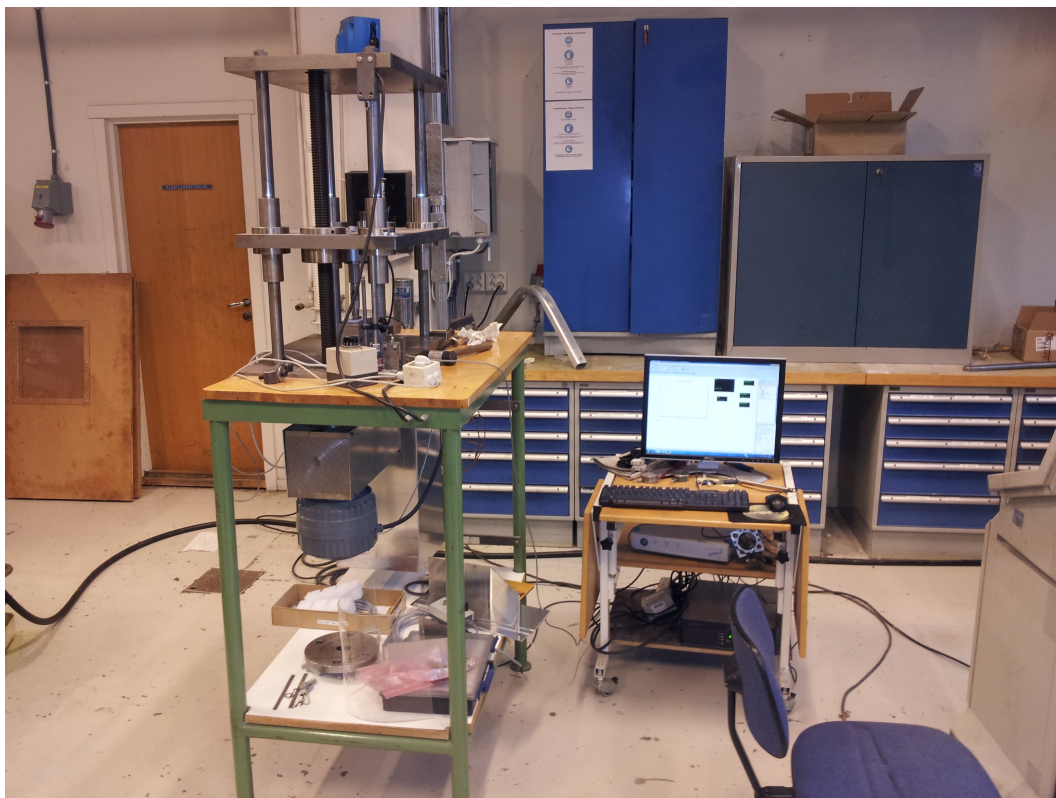
Figur 4.10: Oppspent strekkprøve



Figur 4.11: Prøve med sveisefeil (venstre) VS uten sveisefeil

### 4.3.3 Hulltrykksprøving/ Dortest

Videre ble hulltrykksprøvinga gjennomført, og her fokuseres det på hvor styrka er høyest samt om/hvor varmebehandlinga har mest betydning. Ved å teste med hulltrykkstesten kan man bestemme hvor styrkeøkninga kommer ved varmebehandlinga. Er økninga like stor over hele plata, eller øker styrken mest ved et gitt punkt i forhold til sveiselinja. Jiggen som forsøket ble gjennomført i, holder også til i utmattingslabben til IPM. Bilde 4.12 viser hvordan denne ser ut.

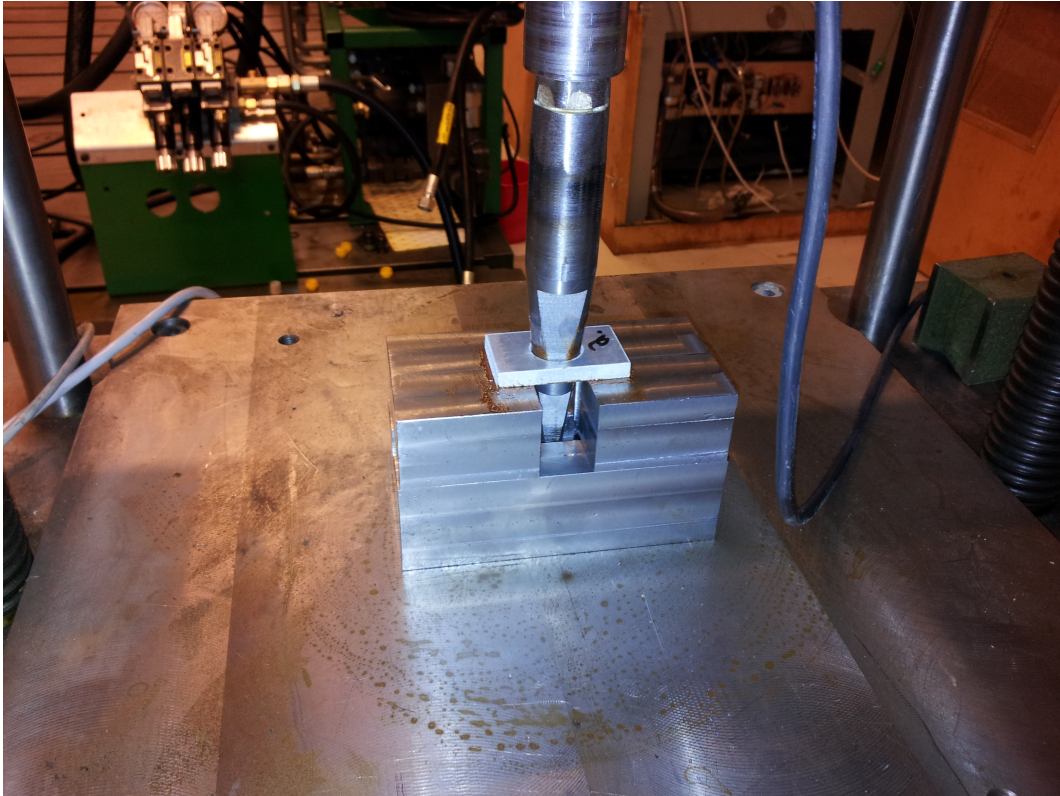


Figur 4.12: Dortest- jig

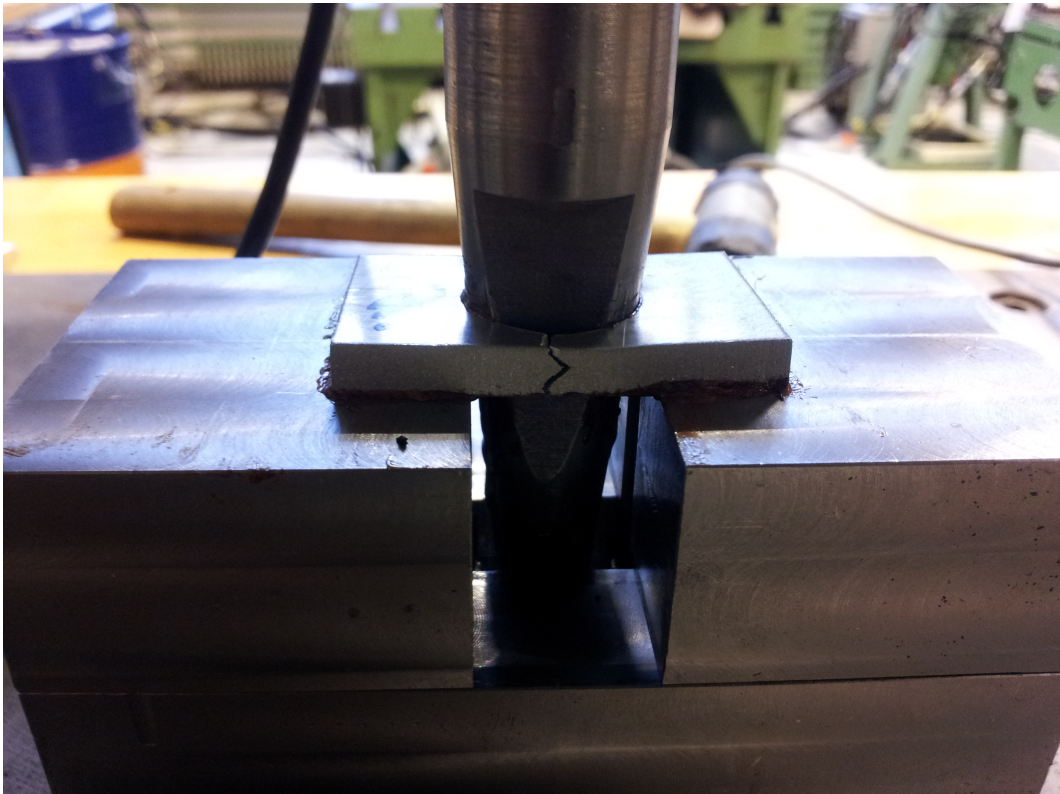
Som ved strekkprøvinga er denne også kobla opp mot PC med CatmanEasy programvare. Lastcella og posisjonssensoren må kobles til og settes opp til å gi ut krafta i kilo-newton og forflytninga i millimeter. For at man skal få sammenlignbare måleresultater må man smøre kontaktflata mellom prøva og anleggsflata, siden friksjonen vil variere om man ikke gjør det. Som smøremiddel brukes kopperfett på grunn av lav friksjon og stor robusthet med tanke på trykket som trykker prøvene ned i anlegget. Prøvene settes så inn i maskinen, som bilde 4.13 viser.

Doren kjøres ned slik at den nesten begynner å sprengte ut prøva, deretter startes datalogginga. Dette blir gjort for å få ut relevante data og ikke bare masse forflytning før det faktisk skjer noe. Prøvene sprenges så ut til de enten gir et sprøtt tydelig brudd(bilde 4.14), eller at man får høy forlengelse og innsnevring før lasta synker. Når lasta synker har materialet gitt etter for belastningen. Bilde 4.15 viser ei prøve før testing ved siden av prøve tatt ut fra bløt sone i sveisen, denne sona har lav styrke men seig karakteristikk.

Denne testen er gjennomført på alle de totalt 33 prøvene. Prøvemethoden er god men isolerer ikke variablene i like stor grad som strekkprøving, derfor blir spredningen noe større. Men siden denne prøvemethoden kan avgrense stedet man belaster, betyr det at man kan få et mer helhetlig bilde på hvor styrken er lav, og hvor den er høy i forhold til sveisen. Også denne prøvemethoden



Figur 4.13: Dortest- oppsett



Figur 4.14: Utsprengt prøve

er utsatt for sveisefeil. Man kan få bruddet der sveisen har imperfeksjoner, i stedet for der tverrsnittet er lavest.



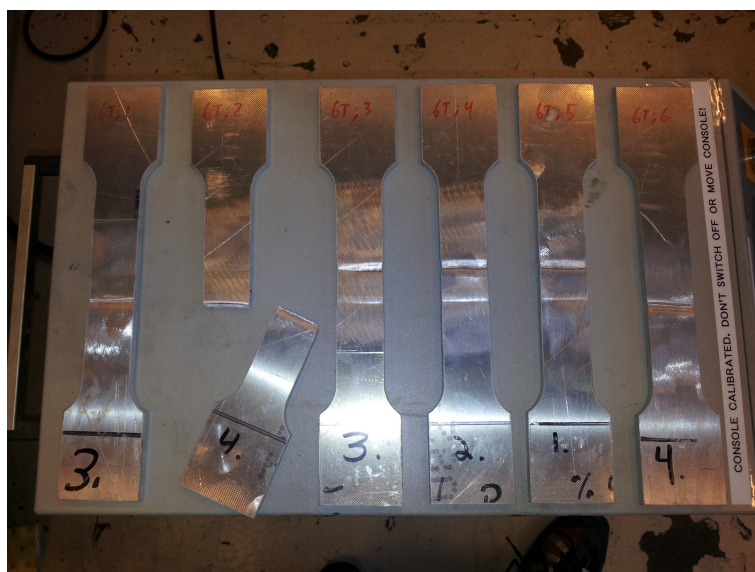
Figur 4.15: Dortest, før/etter

## 4.4 Måleresultater

Både strekkprøvinga og dortesten gav interessante resultater, både med tanke på hvilken styrkeøkning man får av eldinga og hvor styrkeøkninga inntreffer i størst grad.

### 4.4.1 Strekkprøving

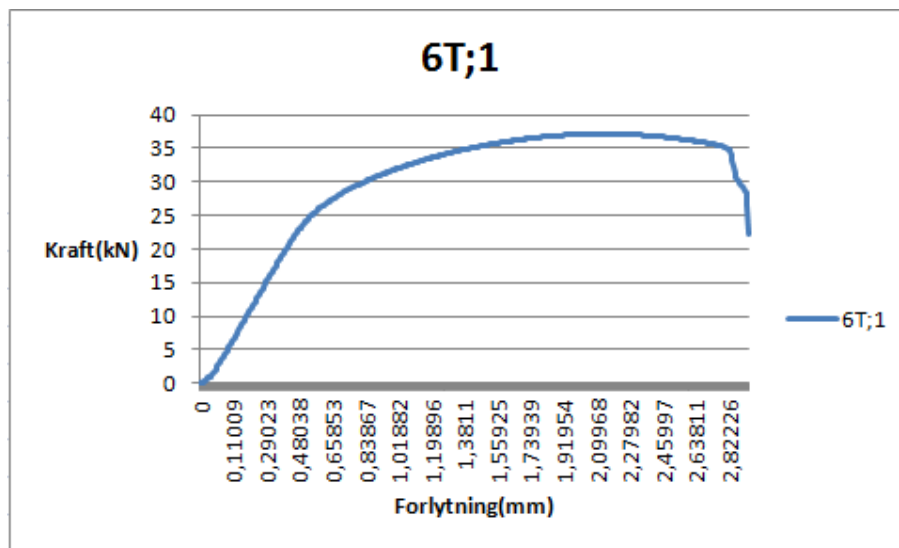
Ved strekkprøvinga ble det avdekket sveisefeil i den ene prøva, noe som gir et avvik med tanke på kvaliteten og virkninga av eldinga. Ser man vekk ifra denne feilen gav testinga veldig gode og tilfredsstillende svar. Bilde 4.16 viser hvor prøvene gav etter for belastningen, og som forventet så gikk de av ca mellom seks og åtte mm unna sveisens midtpunkt. Dette samsvarer godt med aluminiumssveiseteori [18].



Figur 4.16: Strekkprøver med brudd i bløt sone

Alle strekkprøvene gav ut last/forflytningsgrafer(eksempel på graf i bilde 4.17) som duktil

aluminium bør gi. Den kan klassifiseres som duktil da alle grafene har karakteristikk som viser at de flyter langt plastisk før bruddet inntreffer.



Figur 4.17: Last/forflytningskurve ved strekkprøving, prøve 6T;1

## Duktilitet

Som forventet fikk prøvene lavere duktilitet etter varmebehandlingen, med seks timers elding som gav mest redusert duktilitet. Seks timers elding gir en reduksjon i duktilitet på 23,5% i forhold til de prøvene som ikke er elda. Dette er forventet på grunn av at når man herder for høyere styrke, så går vanligvis duktiliteten ned. Skal man få både økt styrke og duktilitet i materialet må man framprovosere kornforfining i materialet.

## Styrke

Hva angår styrkeøkningen som eldinga gav til materialet så var det en økning, men relativt liten. Den metoden som økte styrken i størst grad var den lengste eldinga, men den er også mest tidkrevende og kostbar. Bilde 4.18 viser egenskaper til de forskjellige prøvene i tabellform.

- Uten elding:

Av tabellen kan man se at gjennomsnittstyrken til den ubehandla prøva (kun naturlig elding) ligger på ca 120 MPa. Dette er 10 MPa høyere sammenlignet med hva DNV bestemmer i sin standard. Grunnen til at disse resultatene ligger litt over kommer av at DNV har vært litt konservative når denne standarden ble til. Prøvene fikk en gjennomsnittsstrekkfasthet på 190 MPa, noe som er relativt lavt sammenlignet med standard strekkfasthet på 310 MPa [1], det er til og med godt under opprinnelig flytgrense på 260 MPa. Disse resultatene viser svært godt hvordan materialet oppfører seg når det er utsatt for smeltesveising. Det er viktig å være klar over denne reduksjonen når man designer komponenten sin, ellers kan det by på store problemer i etterkant.

- To timer elding:

Ved to timer elding kan en økning i styrke ses, økningen i flytgrense er på ca 13% sammenlignet med den ubehandla prøva, og 24% over hva DNV standarden sier at man skal

Prøve	Økning av flytspenning i forhold til DNV standard (110 Mpa)										Diverse
	Kraft ved 2% tøynings (kN)		Maks last (kN)		Tverrsnittsareal (mm <sup>2</sup> )		Flytspenning (Mpa)		Strekfasthet (Mpa)		
	Tykkelse (mm)	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Bredde (mm)	
U1	22	2,24	34	3,47	6	30	180	122,22	188,89	11 %	
U2	21,5	2,19	34	3,47	6	30	180	119,44	188,89	9 %	
U3	22	2,24	34	3,47	6	30	180	122,22	188,89	11 %	
U4	22,5	2,29	34,5	3,52	6	30	180	125,00	191,67	14 %	
U5	20,5	2,09	34	3,47	6	30	180	113,89	188,89	4 %	
Gj snitt U	21,7	2,21	34,1	3,48	6	30	180	120,56	189,44	10 %	
2T;1	22	2,24	31	3,16	6	30	180	122,22	172,22	11 %	Sveisefeil, brudd i sveisen
2T;2	25,6	2,61	37	3,77	6	30	180	142,22	205,56	29 %	
2T;3	25	2,55	36	3,67	6	30	180	138,89	200,00	26 %	
2T;4	25,4	2,59	36,5	3,72	6	30	180	141,11	202,78	28 %	
2T;5	24,3	2,48	35	3,57	6	30	180	135,00	194,44	23 %	
Gj snitt 2T	24,46	2,49	35,1	3,58	6	30	180	135,89	195,00	24 %	
6T;1	27	2,75	37,5	3,82	6	30	180	150,00	208,33	36 %	
6T;2	27,5	2,80	38,5	3,92	6	30	180	152,78	213,89	39 %	
6T;3	27	2,75	37	3,77	6	30	180	150,00	205,56	36 %	
6T;4	26	2,65	36	3,67	6	30	180	144,44	200,00	31 %	
6T;5	25	2,55	34	3,47	6	30	180	138,89	188,89	26 %	
6T;6	27,7	2,82	38	3,87	6	30	180	153,89	211,11	40 %	
Gj snitt 6T	26,7	2,72	36,8	3,75	6	30	180	148,33	204,63	35 %	

Figur 4.18: Testresultat

designer etter. Strekkfastheten har ikke gått opp i nevneverdig grad, kun med 5 MPa. Dette betyr at det elastiske området er blitt noe bedret, men det plastiske området er i stor grad det samme. En økning på kun 24% i forhold til DNV standarden er lite med tanke på om man skal kunne gjøre designendringer. Ved en liten sveisefeil eller annen defekt vil man da kanskje ha lavere flytspenning enn 110 MPa. Sammenligna med de ubehandlede prøvene har disse en redusert bruddforlengelse på 20,5%. Den første av disse sveiseprøvene gikk til brudd som følge av sveisefeil. Om man sammenligner grafen til denne prøva med de andre kan man se en noe lavere flytspenning og strekkfasthet, men ikke alvorlig. Hvis man ser på bruddforlengelsen er det noe annet, denne prøva tålte kun 56% sammenligna med de andre.

- Seks timer elding:

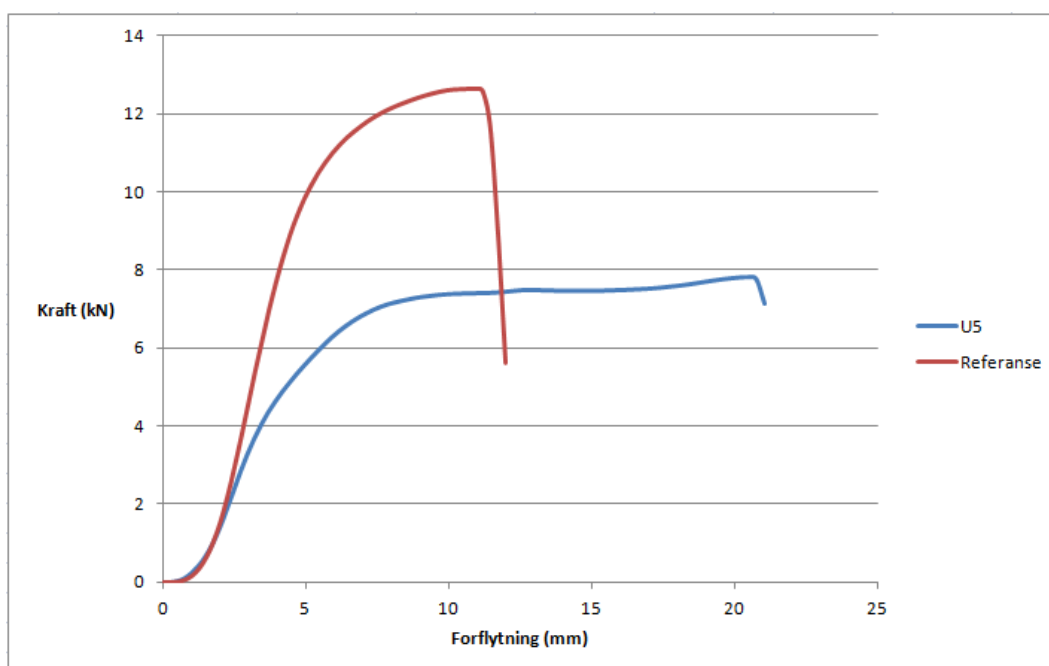
Seks timers elding ved 160°C oppnår de beste egenskapene i dette forsøket. Man får en økning på 35% sammenligna med DNV standarden, og 23% i forhold til de ubehandlede



prøvene. Som for to timer elding får man ingen stor økning i strekkfastheten og man får en viss reduksjon i bruddforlengelse.

#### 4.4.2 Hulltrykksprøving/Dortest

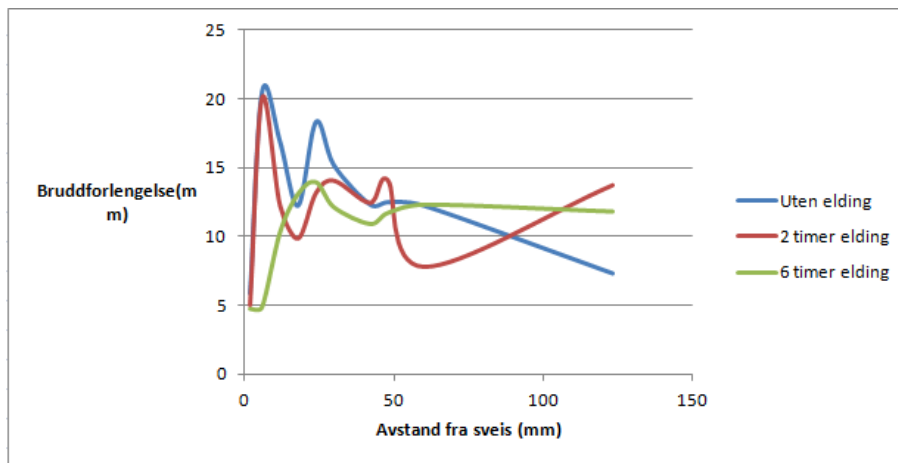
Hulltrykksprøvinga gir ut store mengder informasjon siden det er mange prøver. I tillegg må man analysere både kraftbehovet og forlengelsen for å kunne sammenligne prøvene i forhold til styrke og duktilitet. Ved strekkprøvinga har man et gitt tverrsnitt som prøva ryker i, ved dortesten er dette tverrsnittet avhengig av hvor i sirkelen prøva ryker. Dette gjør at det ikke er like lett å beregne spenninga i materialet. Dortesten gir ut kurver på samme måte som strekkprøvinga, bilde 4.19 viser hvordan to prøver reagerer forskjellig på belastninga. Den ene av prøvene er tatt ut av basematerialet som en kontrollverdi, mens den andre(U5) er prøve tatt ut av den bløte sona som kommer ved sveising av aluminium.



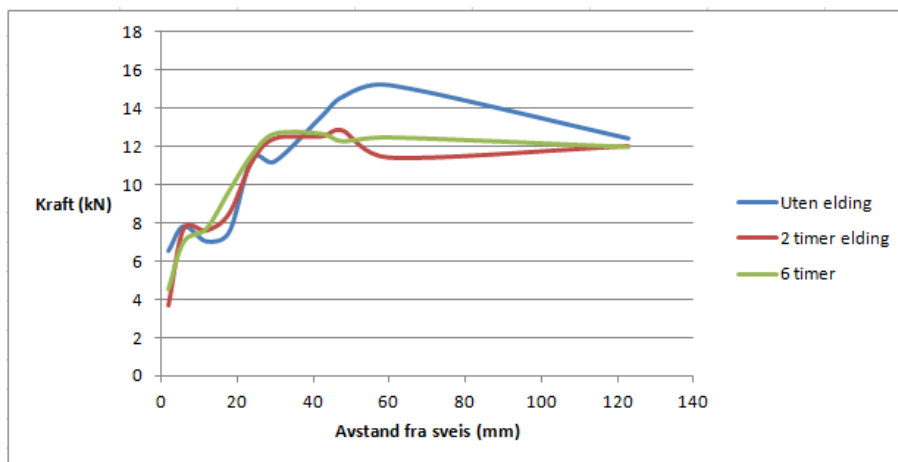
Figur 4.19: Kraft-vei forløp ved dortest for to ulike prøver

Når man sammenligner disse prøvene ser man at referanseprøva tåler 72% mer sammenligna med U5. Til gjengjeld har U5 mye høyere duktilitet. Grunlaget for dette er varmebehandlingen av sveisen, og at i akkurat denne avstanden fra sveisen får materialet disse metallurgiske egenskapene. Hvis man sammenligner med strekkprøvene går det tydelig fram at det er i akkurat dette punktet de går til brudd, men etter vesentlig tøyning. Hvis man plotter disse prøveresultatene mot hvor langt unna senteret til sveisen de er, kan det visualisere hvordan materialeegenskapene er påvirket av sveisen. Bilde 4.21 viser hvordan bruddlasta til de forskjellige prøvene var, mens Bilde 4.20 viser hvor stor forlengelse de forskjellige prøvene takler før de går til brudd.

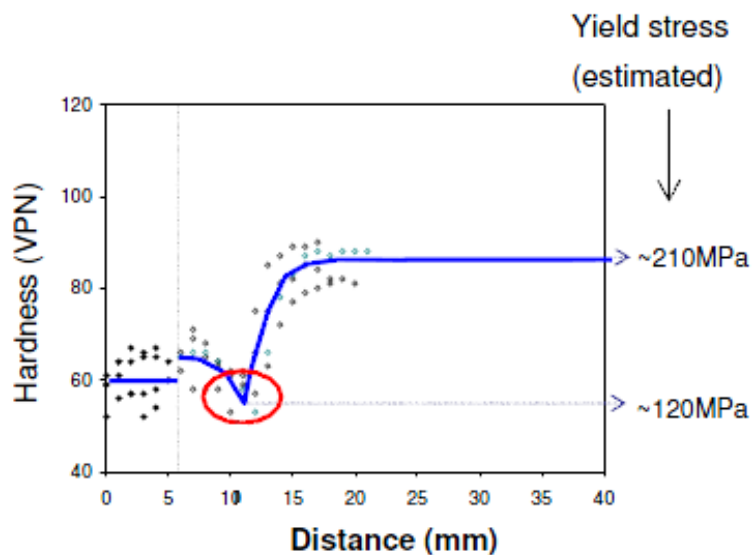
Hvis man sammenligner med hardhetsplott med målinger i forskjellige avstander får man ut variasjoner som ligner grafen på bilde 4.21. Bilde 4.22 [18] viser graf med beregna styrke ut ifra hardheten. Når man sammenligner disse to grafene kan man her se at nært sveisens tverrsnitt er det forskjeller. Disse forskjellene kommer av at dortesten vil finne sveisefeil og defekter i større grad enn hardhetsmålinger på overflata. Disse defektene vil da sørge for at prøva går prematurt sammenligna med hva hardhetsmålinga forutser.



Figur 4.20: Duktilitet VS avstand ifra sveis, dortest



Figur 4.21: Bruddlast VS avstand ifra sveis, dortest



Figur 4.22: Hardhet med ekvivalent spenning VS avstand fra sveis [18]

For å få et godt bilde av hva som vil skje i virkeligheten, om man ikke har for stor mengde sveisefeil, er det enklest å benytte hardhetsmåling på overflata som antar materialet som isotropt og uten defekter. Hvis man vil være mer konservativ og få ut mer nøyaktige målinger, vil

dortesten kunne avdekke feil som ei vanlig hardhetsmåling ikke kan.

Ved å se på duktilitetsgrafene kan man se at forlengelse og styrke avhenger av hverandre som antatt, de prøvene med høy styrke har lavere forlengelse. Duktilitetsmålingene er også avhengige av sveisefeilene, da man kan se at prøvene nærmest sveisesenteret gikk prematurt pga feil, og får da ikke den forventede forlengelsen. Duktilitetsgrafene burde ha utseende som viser høyere duktilitet jo nærmere senterlinja man befinner seg, men den ville ha flata ut nærmere enn 4-5mm unna. Det samme burde ha skjedd med lastgrafene, lasta burde flata ut, og gjerne økt litt da sveisen vanligvis er sterkere enn varmepåvirka sone etter sveisinga.

Prøve 9 er den prøva som ligger nærmest sveisens senter, og den gikk av som følge av sveisefeil i alle tilfellene. Grunnen til dette mistenkes å være på grunn av at den ble liggende for nært kanten på plata, slik at sveiseren ikke hadde fått full kontroll på gjennombrenninga ettersom han starta å sveise i den enden. Det ble heller ikke sveist med bakgass, noe som kan resultere i urenheter i sveisen på den ene sida av plata. Dette er faktorer som gjør at man ikke får ideelle forhold, men det gjenspeiler forholda ved sveising av ROV-komponenter.

## 4.5 Anbefalinger

Forenkla varmebehandling av aluminium har en hensikt, men styrkeøkningen er ikke i samme størrelse som komplett varmebehandling. Dette forsøket gav ut en maks spenningsøkning etter strekkprøveforsøket på 23% ved å elde prøvene i seks timer. Dette er en viss økning men ikke nødvendigvis nok til at det er et poeng å bruke seks timer på hver sveis for å oppnå. Her må bedrifta vurdere nødvendigheten, og avgjøre om det lønner seg. En annen mulighet er å kun gjøre dette på de kritiske komponentene. Aluminiumslegeringa AA 6082-T6 er mottagelig for elding, uten at det går på bekostning av duktiliteten i alt for stor grad. Dortesten viser karakteristikkk på samme måte som hardhetsmålinger med tanke på styrke/ bruddforlengelse i forhold til avstand fra sveis. Fordelen med dortesten er at den er bedre til å oppdage sveisefeil og lignende. En ulempe med denne testen er at den er destruktiv, noe hardhetsmålinga ikke er.



# Kapittel 5

## Kravspesifikasjon

Når man skal utvikle et nytt produkt er det viktig å sette opp en kravspesifikasjon som kan kvantifisere hvilke kvaliteter og egenskaper det nye produktet skal ha. Dette produktet er en videreføring fra dagens produkt, bare med strengere og større krav, noe som gjør denne kvantifiseringa lettere sammenligna med ett helt nytt produkt. I tillegg til de åpenbare krava om vekt og styrke har denne trykktanken også andre krav som må vurderes, den skal også produseres og testes. Denne kravspesifikasjonen vil ligge til grunn for konseptfasen. I konseptfasen forsøker man å komme opp med ideer og konsepter som innfrir kravspesifikasjonen så effektivt som mulig.

### 5.1 Ytre trykk

Denne nye trykktanken skal designes for å tåle 600 bar ytre trykk uten å gå til brudd. Siden tanken inneholder elektronikk som får fartøyet til å gjøre jobben sin, er det ønskelig med en viss sikkerhetsmargin i forhold til 600 bar. Sperre opererer med testkrav på 1,1 ganger operasjonstrykket og en sikkerhetsfaktor på 1,2 ved lignende produkter. Dette innebærer at tanken må dimensjoneres for å tåle:

$$P_{ytre} = 600\text{bar} * 1,2 = 720\text{bar} = 72\text{MPa}$$

### 5.2 Vekt

Siden vekt i stor grad styrer behovet for oppdrift og støtteutstyret for ROV-er bør vekta på trykktankene holdes så lav som mulig. Et kriterie for den nye 600 bars trykktanken må være at den ikke skal tilføre noe behov for oppdrift. Dette vil også være avhengig av volumet til tanken, men om vekta på tanken kommer under 15 kg er man sikra at den ikke gir noen ekstra kostnader til oppdriftsmateriale.

$$M_{maks} = 15\text{kg}$$

## 5.3 Størrelse

Størrelsen på trykktanken er avhengig av komponentene som skal implementeres i tanken, og disse komponentene kommer til å ha samme størrelse om man skal dykke ned til 6000 meter eller 3000.

- Diameter:

Den indre diameteren på innerforinga må ha samme diameter som på dagens elektronikk-sylinder. Dette for å kunne bruke dagens ramme/innfesting for elektronikken. Diameteren må da være 160mm inne i sylinderen. Den ytre diameteren er det ingen fare med, den bør være så liten som mulig.

$$D_{indre} = 160mm$$

$$D_{ytre} = \text{Minimeres}$$

- Lengde:

Dagens elektronikkhus har 584 mm lengde, der selve sylinderen er 554 mm. Ved produksjon av nytt elektronikkhus bør denne lengda beholdes, på grunn av ROVens innfestinger og ramme.

$$L_{total} = 584mm \pm 20mm$$

## 5.4 Testkrav

Ved testing skal man verifisere at tanken, med det designet den har, er kapabel til å takle de belastningene den kan komme til å bli utsatt for. Man vil da også gjerne gå litt forbi spesifikasjonene for å være på den sikre sida. Situasjonen når man tester trykktanken kan komme til å variere noe ifra når den brukes i realiteten. Derfor må man gjøre noen tilnærminger og tilpasninger for å få det så nært det reelle tilfellet som mulig.

### 5.4.1 Trykk

Som nevnt må tanken tåle 1,1 ganger operasjonstrykket ved testing i pit. Dette vil da tilsvare et testtrykk på:

$$P_{test} = 600bar * 1,1 = 660bar = 66MPa$$

### 5.4.2 Praktiske elementer ved testing

- Tanken:

Siden man skal sjekke hvordan tanken takler ytre belastning i form av trykk må det være mulig å få belastet tanken på denne måten. Det er to mulige metoder for å teste ytre trykkbelastning mot tanken, enten kan man lage overtrykk utenfor tanken (som ved store havdyp) eller så kan man suge ut lufta inne i tanken. Ved å suge ut lufta inne i tanken skaper man undertrykk som tilsvare det gitte testtrykket. Ved ytre væsketrykk må tanken kun være tett, som den også må under havflata. Hvis man skal skape undertrykk inne i

tanken må man produsere et endelokk der vakuumpumpa må tilkobles. Dette er da kun for testingas skyld, og det må kunne holde tett med god margin.

- Fasiliteter og utstyr:

Når det gjelder fasiliteter så vil dette også sette begrensninger, om ikke i størrelse men heller hva angår hvilke trykk de er kapable til å teste på. Trykktanker for ytre trykk er mer uvanlig sammenligna med indre, av åpenbare årsaker. Dette betyr at tida det tar med tanke på å få bestilt tid i piten vil bli lengre samt at prisen vil bli høyere. Ved utvikling av prototyp vil denne utgifta, sammen med kvalifisering opp mot standarder og regelverk være de store. Kunnskap om bukling samt måleutstyr for dette er også mindre vanlig, og må skaffes til veie i større grad sammenligna med vanlig testing av indre trykk. Jigger og utstyr til å plassere trykktanken i piten vil også være nødvendig slik at man får uniformt trykk over hele flatene.

## 5.5 Varmeoverføring

Siden elektronikken trenger kjøling for å ikke gå i stykker vil man trenge materialer med brukbar varmeoverføring. Aluminiumslegeringa AA6082-T6 har termisk konduktivitet på  $169 - 175 W/mK$ , noe som er høyt. Det vil være vanskelig å komme opp i samme varmeoverføring da eksempelvis reint karbonfiber har under  $10 W/mK$  [9], med glassfiber like dårlig. Dette kriteriet defineres med at varmeoverføringen ut mot det ytre mediet må være så stor som det praktisk lar seg gjøre, med tanke på å holde elektronikken stabil temperaturmessig.

## 5.6 Delaminering

Som diskutert i kapittel 2, så er delaminering et svært viktig og problematisk fenomen når man knytter kompositter opp mot et annet materiale. Det at delaminering skjer, kan føre til at komponenten går i stykker, men det kan også være tilfeller der denne delamineringen stopper opp av seg selv. Disse aspektene er som nevnt et av de som gjør kompositter noe avanserte å jobbe med. Kriteriet for delaminering i denne komponenten er at ingen delaminering skal inntreffe ved vanlig bruk. Vanlig bruk defineres her som ned til 6000 meter og ved utmattingslaster og antall sykluser innen rimelighetens grenser.

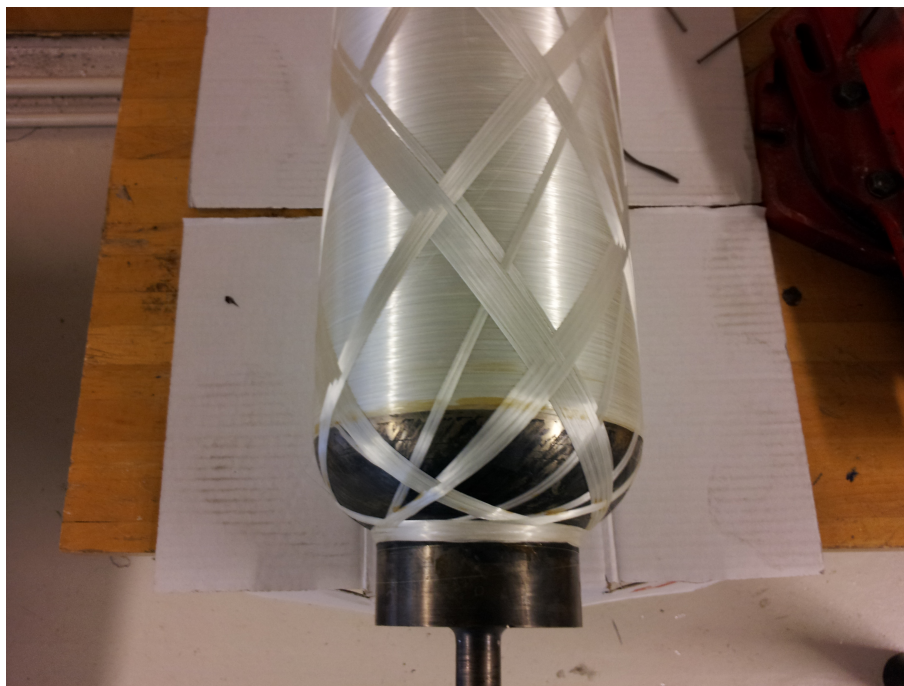
## 5.7 Produksjon

Ved spinning av trykktank i kompositt må man ta hensyn til en del praktiske aspekter. Disse aspektene kommer som følge av utstyret man har til rådighet, samt kunnskapen som eksisterer rundt maskinen. Dette kan kompenseres for om man er villig til å strekke budsjettet noe, men kun til en viss grad.

### 5.7.1 Utforming av ende

Enden på trykktanken bør helst i teorien ha ei kuleform, denne formen gir høyest styrke mot trykk. Dette vil i en spinnemaskin være vanskelig, men mulig å få til i en ende om tanken ikke er svært lang. Den andre enden, der man fester innerforingen i maskinen vil det være fysisk

umulig å spinne en dom. Programvaren vil også sette begrensninger om man forsøker å spinne en dom på den ene sida, uten å gjøre det på andre, siden den ønsker å lage symmetri. Dette innebærer at man må programmere banen til maskinen manuelt, noe som krever kunnskap og tid. Valg av endeløsning bør da begrenses til tilstrekkelig styrke uten å bruke for mye materiale, samtidig som det er et enkelt og greit design med tanke på om den skal spinnest av kompositt. Bilde 5.1 viser eksempel på måte der man kan komme nært kuleform med kompositt på begge ender.



Figur 5.1: Kuleforma ende med god frihet hva angår fiberbane

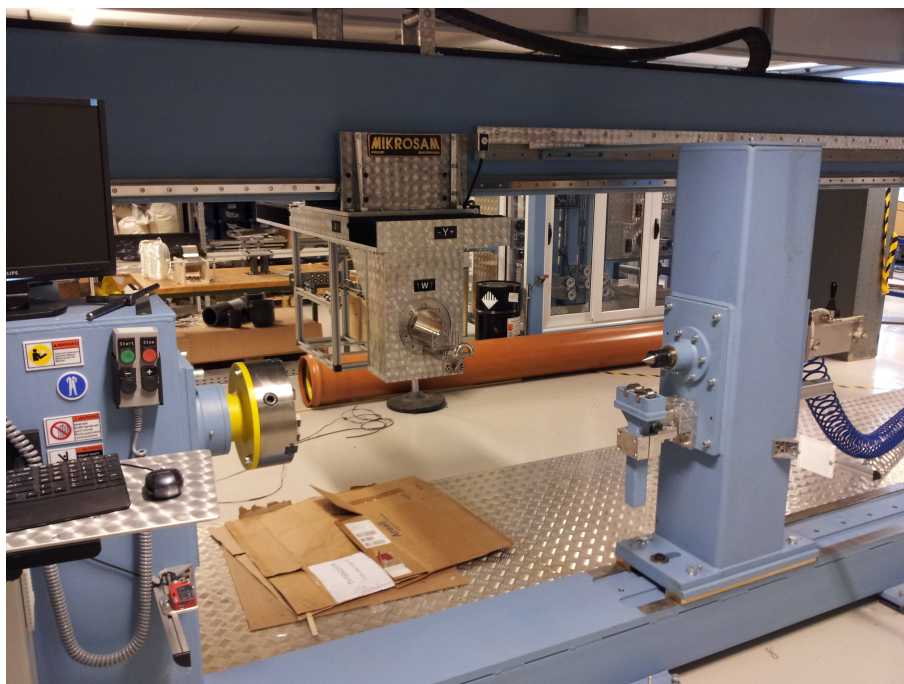
### 5.7.2 Oppspenning

Som nevnt over, vil oppspenning av delen ha stor innvirkning på designet. Oppspenning har mer å si på kvaliteten til selve produktet. Er ikke oppspenninga stødig og god klarer man kanskje ikke å oppnå de ønskede kvalitetene, med tanke på høyt forspenn på fiberen og langt utstikk på sjølve tanken. Hvis tanken er lang må man bruke bakdokke, noe som vil gjøre komponenten stødigere men da begrenser man også noen muligheter. Bilde 5.2 viser bakdokka brukt for å støtte opp innerforing ved spinning av lengre komponent. Ved spinning av produktet må derfor komponenten være stødig nok i maskinen slik at man kan legge rett forspenn og rett bane for fiberen.

### 5.7.3 Effektivitet

Trykketanken må være rask å produsere. Hvis man må bruke store mengder utstyr for å klokke opp tanken samt kjøre spinninga ved lav hastighet på grunn av friksjon, vil dette være tegn på dårlig planlagt og gjennomført produksjon. Slike aspekter i produksjonen må minimeres slik at man kan produsere så mange komponenter som mulig på så kort tid som mulig uten at kvaliteten forringes.





Figur 5.2: Bakdokke for ekstra støtte, NTNU spinnemaskin

## 5.8 Kompatibilitet/Marked

Ved produksjon av en slik trykktank for ytre trykk bør det ligge et marked til grunn for å i det hele kunne sette i gang en produksjon. For denne trykktanken vil det ligge til grunne et behov hos Sperre AS selv, men det burde gjøres en analyse på om det går an å selge komponenten til tredjedje part også. Hva angår kompatibilitet så bør komponenter lages slik at de kan benyttes på flere forskjellige konfigurasjoner. Et eksempel på dette er å bruke samme tjukkelsen på innerforingen, men bruke forskjellige mengder fiber for å få ønska styrke mot forskjellige trykk. Dette er en god måte å spare penger på, mye brukt innen bilindustrien.

## 5.9 Visuellt

Utseende er alltid viktig ved produksjon av en komponent, en komponent som ikke tiltaler kunden vil skjeldent selge godt. Det er derfor viktig at tanken kan overflatebehandles ved hjelp av gelcoat samt at den kan gis ønska farge med tanke på design.

## 5.10 Transport/Kostnadseffektivitet

En komponent blir svært ofte produsert en annen plass enn der hele produktet blir satt sammen. Dette er et tema som blir viktig når man skal produsere komponenter av kompositt med spinnemaskin, slike spinnemaskiner er ikke allemannseie i samme forstand som en dreibenk. Man vil da ofte bli nødt til å bruke spedisjonsfirmaer som frakter varene til og fra lokasjoner før den kommer til plassen den skal monteres. Fysisk størrelse og vekt bestemmer her i stor grad kostnaden, men om man frakter flere komponenter enn den ene på samme pallen kan man spare en god del kostnader. Komponentene som skal fraktes må også være så robuste at det tåler den påkjenningen det vil innebære å ligge på en pall samt bli stabla inn i en lastebil.

## 5.11 Miljøvennlig

Miljø blir et større og større fokus, og dette må selvsagt tas hensyn til når man utvikler et produkt. Produksjon av aluminium forbruker store mengder energi, men aluminium er til gjengjeld svært enkelt å resirkulere. Det bør derfor gjøres ei livsløpsanalyse på det nye produktet, der man ser på alt fra produksjon av grunnmaterialene, lastebiltransport og helt til trykktanken skal vrakes eller gjenvinnes. Det nye produktet bør da ikke innebære større påvirkning på miljøet enn det gamle elektronikkhuset.

## 5.12 Sammendrag

<b>Krav</b>	<b>Grenseverdier</b>
Maksimalt havdyp	6000meter
Sikkerhetsfaktor	1,2
Designtrykk	720 bar
Vekt	<15 kg
Indre diameter	160 mm
Ytre diameter	Minimeres
Lengde	584 mm $\pm$ 20 mm
Testtrykk	660 bar
Trykktesting	Tankdesign må være kompatibelt med utstyr tilgjengelig ved testing
Varmeoverføring	Tilstrekkelig kjøling slik at elektronikken fungerer tilfredsstillende
Delaminering	Ingen delaminering skal inntreffe
Endeavslutning	Designmessig og praktisk gjennomførbart konsept må benyttes
Oppspenning	Oppspenning i spinnemaskin skal ikke være komplisert eller gi dårlig resultat
Effektivitet	Skal være mulig å produsere komponenten uten stor tidsbruk
Kompatibilitet	Bør kunne bruke komponenter til flere konfigurasjoner
Visuelt	Må kunne gis ønsket farge
Transport	Fraktkostnader må minimeres
Miljø	Ikke større miljøpåvirkning enn dagens 3000 meter elektronikkhus

# Kapittel 6

## Konsepter

Når kravspesifikasjonen er definert, gjelder det å finne konkrete løsninger på problemet. Dette gjøres ved hjelp av en morfologi, morfologisk tabell og en konseptfase. Man starter med en morfologi og en morfologisk tabell, der man deler opp hele problemstillinga i mindre oppgaver. Til disse oppgavene foreslås det løsninger, og konsepter foreslås på grunnlag av disse forskjellige løsningene til de forskjellige problemene.

### 6.1 Morfologi

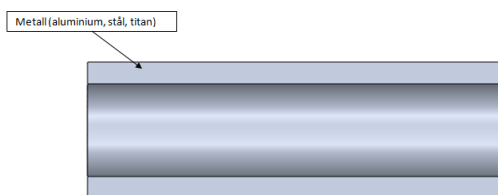
I dette underkapittelet er problemstillinga delt i mindre oppgaver, og løsninger foreslås ganske overfladisk men med visse begrensninger. Det er ingen grunn til å gå vekk ifra et sylindrisk design på elektronikkhuset. Dette er den grunnutforminga som gir det beste kompromisset mellom plassutnyttelse og styrke. Fysisk størrelse bør også holdes nært det de er i dag, siden ROV-ens ramme har gitte mål. Til sist i underkapittelet vises den morfologiske tabellen, som samler alle de mindre oppgavene og de løsningene som er foreslått.

#### 6.1.1 Innerforingsgeometri

Innerforingsopp-gave er å gi et underlag man kan legge kompositt på, samt at den skal gi støtte til de elektriske komponentene som elektronikkylindere inneholder. Den må også samsvare med valgt endeavslutning eller bruk av lokk. Følgende utforminger på innerforingen kan være:

- Lastbærende foring:

Her er det ikke brukt kompositt, innerforingen av metall må i seg selv stå imot trykket utenifra.



Figur 6.1: Lastbærende metallforing

- Ingen innerforing:

Her må det brukes en fjernbar innerforing, som beskrevet i 2.3.2 for å gi et ferdig produkt der man kun har kompositt til stede.



Figur 6.2: Ingen innerforing, kun kompositt

- Sylindrisk innerforing:

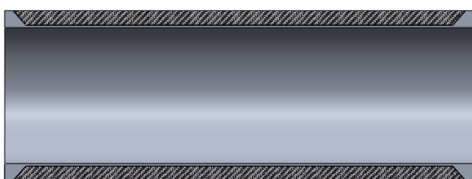
Man kan legge kompositt rett på et rør med ønska indre diameter og veggtykkelse.



Figur 6.3: Sylindrisk innerforing med kompositt

- Innerforing med nedtrapping:

Man kan maskinere eller valse innerforingen med ei nedtrapping, dette for å få noe kompositten kan ligge mot samt at man får større tetteflate.



Figur 6.4: Sylindrisk, nedtrappa innerforing med kompositt

- Innerforing med bulk:

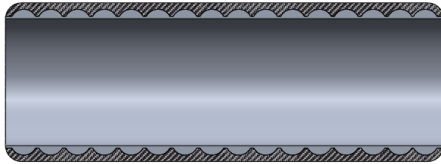
Med tanke på friksjon mellom fiberen og innerforingen på endeavslutningen, vil det kunne være gunstig å maskinere en utbuling på foringen slik at man får noe å spinne rundt.

- Bølgete ytre flate:

Man kan ved maskinering eller valsing skape ei ujevn flate som kompositten kan legges på. Dette gir en stor økning i kontaktareal sammenligna med de foregående konseptene.



Figur 6.5: Bulka innerforing med kompositt



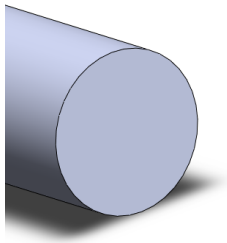
Figur 6.6: Ugjevn innerforing med kompositt

### 6.1.2 Endedesign

Endedesignet må ved denne problemstillinga være tatt på grunnlag av enkelhet og motstand mot trykk. Designet bør også være tiltalende for en eventuell kunde samt at det ikke må være kostbart å produsere.

- Flat ende

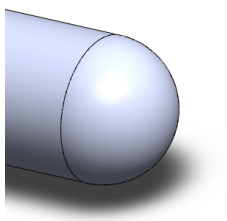
Den enkleste måten man kan avslutte sylindere med er en helt flat ende.



Figur 6.7: Flatt endedesign

- Dom

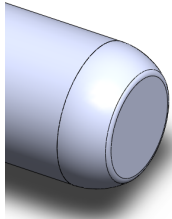
Ved å fabrikere kuleform på enden av sylindere både innvendig og utvendig vil man få svært god motstand mot trykk.



Figur 6.8: kuleforma endedesign

- Delvis dom

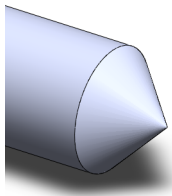
På grunn av oppspenning vil det være lettere å kun lage delvis dom på endene.



Figur 6.9: kuleforma, men avkutta endedesign

- Spiss ende

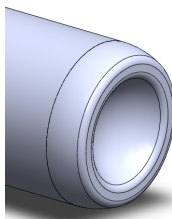
Enden kan produseres spiss, som en kon.



Figur 6.10: Spisst endedesign

- Konkav ende

På mange gassflasker som produseres kommersielt har man konkav ende siden flaskene skal være i stand til å stå på bakken uten å velte. Denne utforminga gir bedre styrke enn flat ende. Man har her i prinsippet kuleform, samt at man har jevne overganger med liten kjerveffekt.



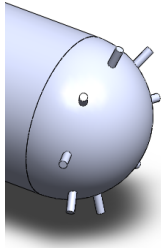
Figur 6.11: Konkavt endedesign

- Pinner

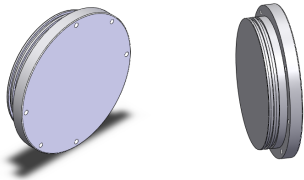
Om man får problemer med å få kompositten til å ligge der den skal, om friksjonen ikke bidrar i stor nok grad, er det mulig å benytte seg av ”mothaker” i form av pinner som man legger kompositten rundt.

- Løst lokk

Per i dag bruker Sperre AS løse lokk på endene, denne metoden kan også videreføres på dette produktet.



Figur 6.12: Avrunda ende med pinner



Figur 6.13: Dagens 3000 meters endeløkk

### 6.1.3 Korrosjonsmotstand

Som korrosjonsbeskyttelse kan man benytte seg av flere metoder. Metodene har forskjellige kostnader samt noe ulikt bruksområde. Det kan ofte være nyttig å benytte seg av mulighetene for å kombinere flere metoder.

- Ingen

Man kan åpenbart la vær å ha korrosjonsbeskyttelse, men dette avhenger av at man har tette serviceintervaller eller at man benytter seg av materialer med høy korrosjonsmotstand.

- Katodisk beskyttelse

Som nevnt i kapittel 2.6.2 kan man benytte seg av offeranoder eller påtrykt spenning for å jevne ut galvaniske potensialforskjeller i konstruksjonen.

- Galvanisk skille

Dette er i praksis en designmessig måte å unngå at korrosjon oppstår, man legger et materiale i mellom de to komponentene som vil få problemer med galvanisk korrosjon. Et eksempel er å legge glassfiber mellom metall og karbonfiber.

- Maling

Denne velkjente metoden er svært mye brukt, da den er enkel og anvendelig. Malingstype må velges på grunnlag av materiale og hvilken omgivelse den skal operere i. Her må noe vedlikehold påberegnes.

- Anodisering

Denne metoden er mye brukt på aluminium, men kan også brukes på stål og kobber. Ved anodisering blir delen dyppet ned i et bad med påtrykt spenning, da blir delen belagt med et oksidsjikt og får høy korrosjonsmotstand [21]. Metoden er også mye brukt for å gi deler farge.

- Galvanisering

Galvanisering foregår også i bad med påtrykt spenning, men her er metallet katoden som blir dekket av et annet materiale(anoden) [7]. Den vanligste prosessen er ved å galvanisere stål, der stålet blir dekket av sink.

- Fornikle/ forkromme

Som ved galvanisering belegger man arbeidsstykket med et annet materiale. Til forskjell fra galvanisering så er krom og nikkel edlere materialer enn for eksempel stål, og da blir stålet anoden i denne prosessen. Disse overflatebehandlingene gir en svært hard og robust overflate.

#### **6.1.4 Materiale innerforing**

- Ingen innerforing
- Aluminium
- Titan
- Svartstål
- Rustfritt stål
- Nikkellegering
- Plast

#### **6.1.5 Materiale lastbærende**

- Glassfiber
- Polymer
- Borfiber
- Karbonfiber

#### **6.1.6 Kontaktareal mellom innerforing og kompositt**

- Høyt forspenn
- Lim
- Krympe innerforing
- Benytte seg av bindemiddelet til kompositten
- Klemme
- Boltforbindelse







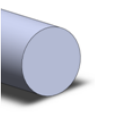
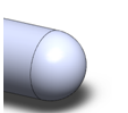
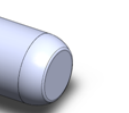
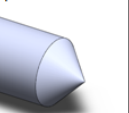
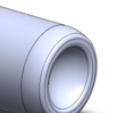
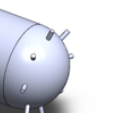



## 6.1.7 Estetikk

For å få et appellerende utseende bør man gjøre noe med overflata til delen, følgende metoder er mulige.

- Maling/lakk
- Anodisering
- Fornikling/forkromming
- Sand/glassblåse
- Polere
- Ingen
- Gelcoat

## 6.1.8 Morfologisk tabell

<b>Innerforingsgeometri</b>	Lastbærende foring 	Ingen 	Sylindrisk innerforing 	Innerforing med nedtrapping 	Innerforing med bulk 	Bølgete ytre flate 	
<b>Endedesign</b>	Flat ende 	Dom 	Delvis dom 	Spiss ende 	Konkav ende 	Pinner 	Løst lokk 
<b>Korrosjonsbelegg</b>	Ingen	Katodisk beskyttelse	Galvanisk skille	Maling	Anodisering	Galvanisering	Fornikle/forkromme
<b>Materiale innerforing</b>	Ingen	Aluminium	Titan	Svartstål	Rustfritt stål	Nikkellegering	Plast
<b>Materiale lastbærende</b>	Glassfiber	Polymerfiber	Borfiber	Karbonfiber			
<b>Kontaktareal innerforing mot kompositt</b>	Høyt forspenn	Lim	Krympe innerforing	Benytte seg av bindemiddelet til kompositten	Klemme	Boltforbindelse	
<b>Estetikk</b>	Maling/lakk	Anodisering	Fornikling/forkromming	Sand/glassblåse	Polere	Ingen	Gelcoat

Figur 6.14: Morfologisk tabell

## 6.2 Konseptfase

Ved å kombinere de forskjellige mulige løsningene på de forskjellige delproblemene i den morfologiske tabellen vil man kunne få et svært stort mangfold av mulige konsepter. Ved grov utvelgelse der man tar hensyn til bedriftens krav og sunn fornuft kan man komme opp med et knippe konsepter som kan bety gode egenskaper. Disse konseptene er lista opp under, og videre raffinert ved en utvelgelsesprosess til slutt.

### 6.2.1 Konsept 1

Kun kompositt, ingen innerforing og et avrunda endedesign for å få svært gode egenskaper mot trykk; figur 6.15.



Figur 6.15: Konsept 1

Dette konseptet vil gi den høyeste styrken i forhold til vekt, siden man kun bruker kompositt. For å kunne produsere dette konseptet vil man måtte programmere maskinen manuelt, samt at man måtte hatt et hull i ene enden til den fjernbare innerforingen. Spesiell programmering må gjøres på grunn av fiberplasseringa når man skal dekke hele den ene domen, men ikke den andre. Man må flytte fiberbanen på den siden man skal ha oppspenninga for å unngå å legge fiber på spindelen. Når man gjør dette er man avhengig av rett forspenn, slik at fiberen ikke skal bli slakk og skli av på radiusen.

Hvilken fjernbar foring man velger til produksjonen av en slik del er ganske likegyldig, men det vil være en fordel om den kan tas ut av et lite endehull. Hvis man hadde benytta seg av oppblåsbar innerforing, forklart i kapittel 2.3.2, vil man kunne kompensere for at fibreene kan gli av på endene ved justering av trykket. Et annet problem som må løses ved dette konseptet er hvordan man skal få tilgang til elektronikken.

Man bør helst unngå å kutte i karbonfiber da den mister mye styrke. Denne reduksjonen er en følge av å kutte den komponenten som står for styrkebidraget i strekk. En mulig løsning på dette problemet kan være å benytte seg av vanntett klemme som spennes rundt lokk og kroppen til elektronikkysylindren.

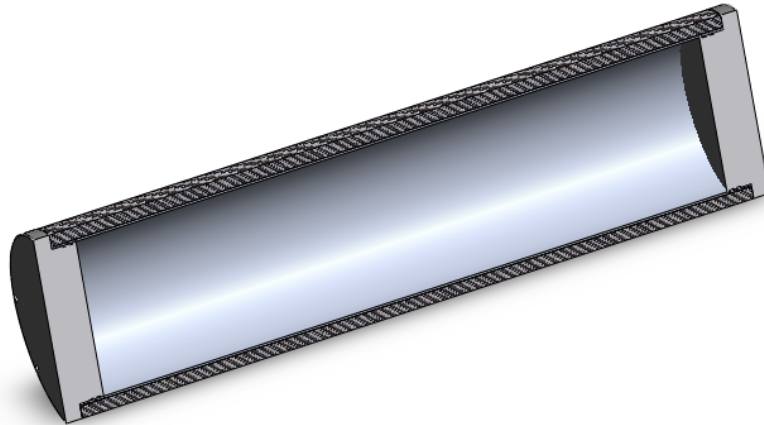
### 6.2.2 Konsept 2

**Aluminiumshus med løse lokk, som per dags dato.**

Som vist i kapittel 3.2 er det mulig å benytte seg av aluminium som konstruksjonsmateriale. Dette materialet er kjent hos Sperre, det er lett å få maskinert samt at kostnaden for materialet er lavt. En annen fordel er av man kan benytte samme jiggen som brukes nå til elektronikken, man må kun maskinere nye lokk og en ny sylinder. Det store minuset med dette konseptet er at det går imot det Sperre ønsker å oppnå ved større bruk av kompositt, som er lavere vekt.

### 6.2.3 Konsept 3

Sylindrisk innerforing av rustfritt stål, med løse lokk og epoxy som bindemiddel mellom foring og kompositt; figur 6.16.



Figur 6.16: Konsept 3

Ved å benytte seg av rustfritt stål kan man minimere veggtykkelsen på innerforingen og dermed få vekta relativt lav. Ved dette konseptet kan man benytte seg av dagens endelokk, eventuelt lage nye i rustfritt stål. Rustfri stål kan man få med svært forskjellige egenskaper [8], og man kan derfor få stor styrke i innerforingen som vil gi kompositten et godt underlag. Et negativt aspekt ved rustfrie stål kan være høy varmeutvidelse, man bør velge materiale med som minimerer dette. Ved stål mot karbonfiber, om man velger å benytte seg av denne kompositten, bør man legge imellom glassfiber for å unngå galvanisk korrosjon.

Bruken av endelokk forenkler designet på dette konseptet, men et problemområde vil være hvordan man skal få skrudd fast lokka i sylindren. Løsninger på dette kan være bruken av klemme, å mekanisk klemme de fast i hverandre. Man kan velge å lime på plass det ene lokket som ikke har konnektorer igjennom seg, eller man kan bore ut i kompositten og lime inn gjengeinnsatser.

Dette konseptet vil være kostnadseffektivt, man kan bruke ferdige rør i ønska størrelse og legge fiber på dem. Dette kan man se eksempel på i figur 6.17, her har man et to toms rør med ca 20 mm karbonfiber på utsida.

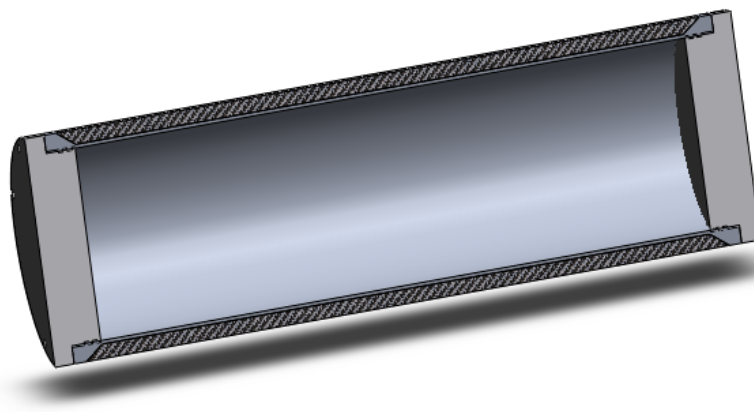


Figur 6.17: Karbonfiberbelagt rør spunnet ved IPM

Dette konseptet vil som sagt være gunstig prismessig, man vil ha middels god materialutnyttelse og sikkerhet i forhold til de andre konseptene.

#### 6.2.4 Konsept 4

Sylindrisk nedtrappa innerforing av aluminium, med løse lokk og krympa innerforing ved spinning; figur 6.16.



Figur 6.18: Konsept 4

Som ved den sylindriske foringen, vil man her kunne benytte seg av dagens endelokk og man har ca samme utnyttelse av materialer. Fordelen ved å ha denne nedtrappinga er at man har større kontaktflate mellom kompositt og innerforingen i det kritiske området, der delaminering initieres. Et annet positivt aspekt ved dette konseptet er at man kan lage gjenger i aluminiumen istedenfor å lime inn gjengeinnsatser.

For å produsere innerforingen må man enten dreie eller valse ned aluminiumsbolt. Ved dreining, som er sponfraskillende bearbeiding vil man ikke utnytte materialet særlig godt. Ved valsing vil man gi aluminiumen høyere styrke på grunn av mekanisk bearbeiding, noe som vil være en gunstig bi-effekt. Figur 6.19 viser hvordan man kan valse ut et rør til ønska form.

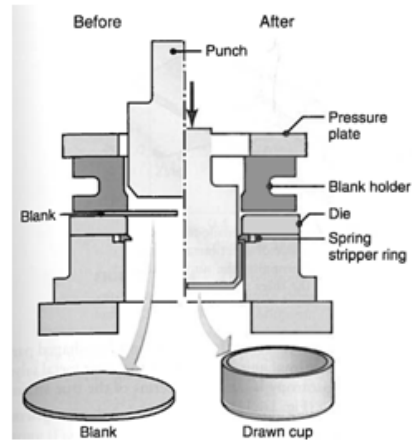
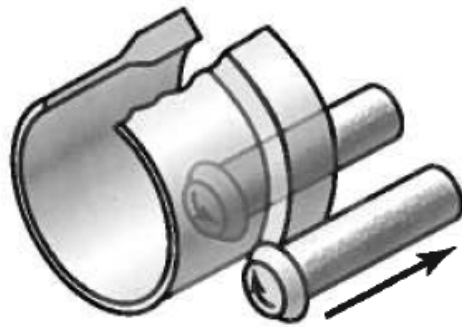
Man kan også velge å dyptrekke innerforingen til ønska form, denne metoden vil også gi en fordelaktig herding på delen. Dyptrekking er illustrert til høyre på figur 6.19.

Ved å krympe innerforingen med lav temperatur før kompositten legges på, vil man få et konstant forspenn mellom kompositten og innerforingen i etterkant. Dette forspennet vil minske sannsynligheten for at delaminering inntreffer.

#### 6.2.5 Konsept 5

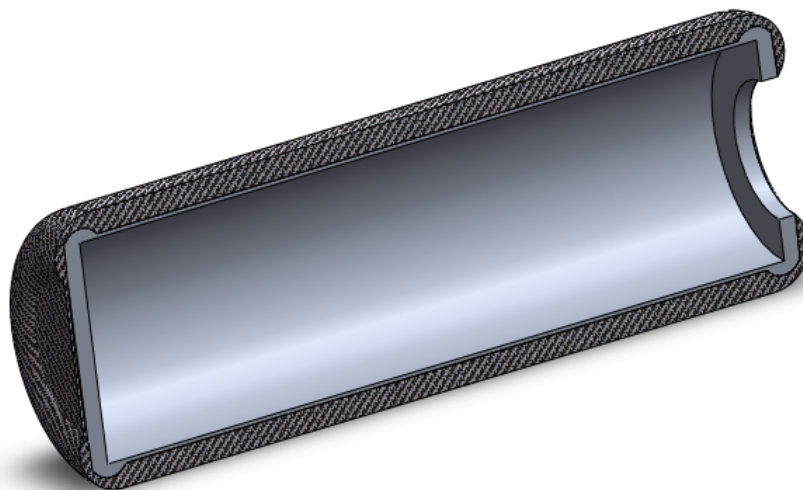
**Bulka innerforing av titan, med avrunda og avkappa endedesign; figur 6.20.**

Hvordan man skal utnytte denne bulken i foringen avhenger i stor grad av hvor tjukt man trenger å legge kompositt. Hvis man klarer seg med lite kompositt mot den ytre belastninga, kan ikke bulken være særlig stor. En slik løsning der man legger kompositt rundt kanten på begge sidene innebærer at man må gjøre endringer på hvordan man skal få elektronikken ut og



Figur 6.19: Valsing av rør t.v. og dyptrekking av komponent t.h.

[7]



Figur 6.20: Konsept 5

inn. Denne utforminga muliggjør bruk av bakdokke sammenligna med konsept 1, og man kan derfor bruke mer forspenn på fiberen.

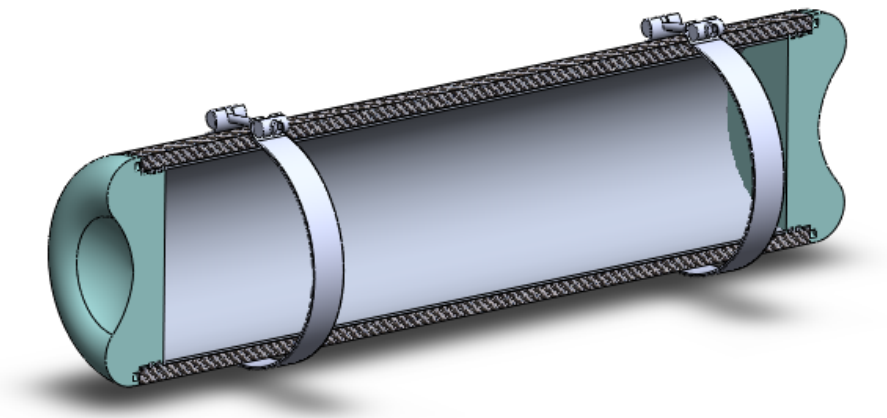
Ei ulempe med dette konseptet er hvor vanskelig det vil være å produsere innerforinga, maskinering av denne komponenten vil kreve mange operasjoner og er derfor tidkrevende.

For å kunne benytte seg av komposittens styrke, kan man legge fiber for å forsterke på den sida man ikke trenger å åpne. Ved å dekke denne flata også med fiber betyr at man får kun en plass der delaminering kan komme til å inntreffe. Fordelen med å spinne fiberen bak en sånn bulk er at man får høyt forspenn på fiberen der, som igjen betyr stor motstand mot delaminering.

Materialet som er skissert i dette konseptet er titan. Titan er et materiale med lav egenvekt i forhold til styrke, samt med mange andre gunstige egenskaper [8]. Dette materialet er ganske mye brukt sammen med kompositt til applikasjoner der man vil unngå korrosjon og sikre god holdbarhet. En stor svakhet ved dette materialet, er dets kostnad sammenligna med andre metalliske materialer.

## 6.2.6 Konsept 6

Sylindrisk innerforing med klemmer for å holde kompositten på plass. Endeavslutning med løse, konkave lokk; figur 6.21.



Figur 6.21: Konsept 6

Dette konseptet vil være enklere å produsere med tanke på sjølve sylindren, siden man kan ta mindre hensyn til forspenn og hvordan fiberen skal ligge. Man vil her kunne kompensere for manglende egenskaper med de mekaniske klemmene. Når det gjelder lokkene så vil disse være mer avanserte å produsere sammenligna med dagens. Fordelen med disse lokka, gitt at de raffineres, er at de vil tåle høyere trykk sammenligna med dagens i forhold til mengde materiale. Som ved konsept 3 vil man også her måtte sette inn innsatser rett i kompositten, dette vil være en potensiell feilkilde.

Hva angår egenskaper mot trykk så vil den være på lik linje med konsept 3, men man vil trenge innerforing av et sterkere materiale. Til dette konseptet kan et mer høyfast stål være et godt alternativ.

## 6.2.7 Konsept 7

**Helkompositt, todelt støp med bolteforbindelse; figur 6.22.**

Om man går vekk ifra spinnemaskin og innerforing, vil det fortsatt være mulig å lage elektronikksylindre. Konsept 7 er en måte å gjøre dette på, denne måten vil innebære en god del arbeid med å plassere elektronikken i forhold til dagens løsning. Fordelene med dette konseptet er at man lett kan støpe kompositten over en form, for så å utsette den for vakuum og herde den. Når man har produsert to deler, kan man bolte de sammen og man har en trykktank med stor styrke og lav vekt.

Fordelene med å ha boltflata på denne måten er at man vil få høyere trykk på boltflatene jo lengre ned mot havbunn man kommer. Sammenligna med dagens elektronikkhus må gjennomføringene komme i den sylindriske flata. Hvis endeflata i dette konseptet hadde vært flat, ville boltene bli påført mye større skjærkrefter sammenligna med når den har denne runde forma.



Figur 6.22: Konsept 7

## 6.3 Konseptvalg

Etter konseptfasen sitter man med et visst antall forskjellige konsepter, og man skal velge ut ett eller to som man vil jobbe videre med. Ved utvelgelse av hvilke konsepter som er lovende, vekter man de ulike konseptene opp mot hvor godt de tilfredsstillter kravspesifikasjonen. Hvordan man vekter konseptene opp mot kravene er mange. Man kan bruke tallverdier, + og – eller andre kreative måter. Om konseptene er mange kan det også være gunstig å grovsile først med ei vektning og ta for seg de resterende konseptene i ei finere evaluering etterpå.

I denne oppgava er konseptene såpass få, samt at de er fullt mulig å skille imellom. Av denne grunnen vil det kun bli gjort en evaluering med vekta tall som evalueringsmetode. Når konseptet innfrir kravet maksimalt vil det få verdien 10. Denne evalueringen er vist i figur 6.23. Man kan se i tabellen at trykkkravene er sett bort ifra, siden det er ufravikelige krav som alle konseptene må kunne oppnå.

	Konsepter						
	Konsept 1	Konsept 2	Konsept 3	Konsept 4	Konsept 5	Konsept 6	Konsept 7
Vekt	10	1	8	7	6	5	10
Dimensjoner og toleranser	6	10	9	9	5	8	7
Trykktesting	5	10	10	10	5	7	6
Varmeoverføring	4	10	8	9	4	6	4
Delaminering	10	10	4	6	8	7	10
Endeavslutning	5	10	10	10	4	5	10
Oppspenning	3	10	6	8	3	8	8
Effektivitet	4	6	9	8	3	2	8
Kompatibilitet	3	6	9	9	2	5	7
Visuellt	10	5	8	8	7	8	10
Transport	5	8	7	7	7	5	9
Miljø	7	2	6	6	6	5	7
<b>Sum</b>	<b>72</b>	<b>88</b>	<b>94</b>	<b>97</b>	<b>60</b>	<b>71</b>	<b>96</b>
<b>Rangering</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>2</b>

Figur 6.23: Konseptevaluering

Etter konseptevalueringa kan man se at konsept 2,3,4 og 7 kommer ut ganske likt mens 1 og 5 ikke ser ut til å innfri særlig godt. Basert på dette er det valgt å gå videre med konsept 4 og 7,

der hovedfokuset blir på 4 siden det konseptet passer best mot hva Sperre har av komponenter per i dag.

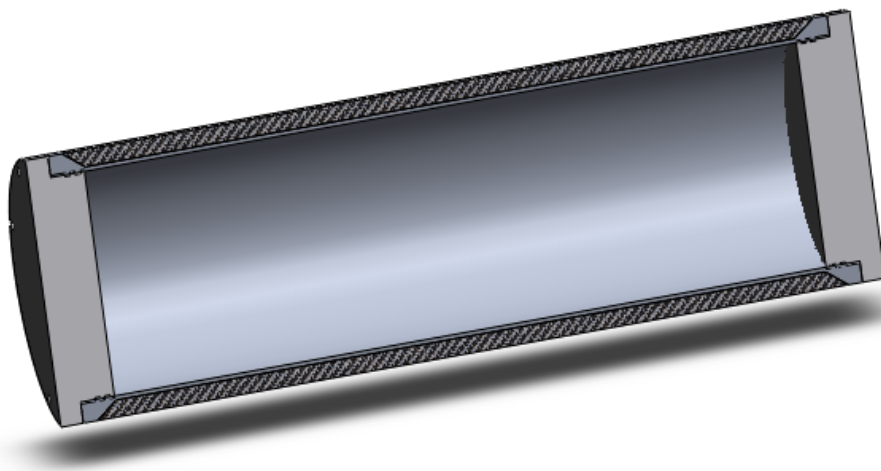
Konsept 7 er et konsept som bedriften ville hatt stor glede av å se mer på da det er enkelt å produsere, vil bli svært lett og egner seg godt mot ytre trykk.



# Kapittel 7

## Valgt konsept

Konsept 4, vist på figur 7.1, kom ut av konseptevalueringen som det beste grunnprinsippet. Styrkene til dette konseptet er mange, det er svært likt dagens måte å løse oppgava på samt at man kan minimere eventuelle problemområder relativt lett.



Figur 7.1: Valgt konsept; konsept 4

Ved å ha denne nedtrappinga får man stor kontaktflate mellom kompositten og innerforingen i det området der man kan risikere å få delaminering. Når man har denne store flata vil kreftene som ønsker å skille de to materialene bli godt fordelt og tatt opp.

Når man skal bruke lokk, som gjør vedlikehold og montering av elektronikken svært enkel må man ha muligheten til å feste disse godt. Ved å gjenge i aluminiumen vil man oppnå dette, sammenligna med konsept 3 og 6 der man må lime inn innsatser. Ved å benytte seg av limte innsatser vil man åpne for flere feilmodi, man vil kunne få sprekker i kompositten som vannet kan trenge inn i. Man kan også risikere at innsatsene løsner fra kompositten og lokket kan da dette av. Disse innsatsene vil såklart ikke dette ut når man benytter seg av fartøyet, og har trykk på utsida. Disse innsatsene ville kunne kommet til å løsne som følge av utmatting.

Den store fordelen med dette konseptet er at man kan bruke samme endelokk som før. Disse endelokkene vil også motstå trykket ved 6000 meter, vist i Vedlegg A på figur A.9. Det eneste som må vurderes på disse lokkene vil være den ytre diameteren og plasseringa til boltene.

Når det gjelder sylinderkroppen må materialer vurderes. Diametre og veggtykkelser må evalueres både på innerforinga og kompositten. Dette er oppgaver man må benytte seg av CAD/CAE programmer for å løse.

## 7.1 Materialvalg

Når disse konseptene er evaluert er det lagt lite vekt på hvilke materiale man skal benytte, dette må vurderes nærmere for det valgte konseptet slik at materialene harmonerer så godt som mulig med hverandre og omgivelsene. Man trenger materialer som har tilnærma samme varmeutvidelse, som ikke vil skape korrosjonsproblematikk samt at de må ha tilstrekkelig styrke.

### 7.1.1 Innerforing

Innerforingen skal være den stødige komponenten å spinne fiberen på, den må tåle varme samt ha nogenlunde lik varmeutvidelse som kompositten. Vanlige kompositter som karbonfiber, aramidfiber og glassfibre har varmeutvidelse nær null. Det vil derfor være ønskelig å holde varmeutvidelsen så lav som mulig. Det materialet som fremstår som best til innerforinga er titan med  $8-10\mu\text{strain}/^\circ\text{C}$ . Titan er svært kostbart, tidkrevende og vanskelig å bearbeide. Det må derfor vurderes om det fortrinnet som dette materialet gir, er verdt investeringa sammenligna med andre alternativer. Innerforingen kan også produseres av aluminium. Innerforingen bør da være tjukkere. Dette er ikke nødvendigvis på grunn av styrke, men også hvor mjukt materialet er. Ved bruk av aluminium vil man måtte sørge for at ingen delaminering inntreffer på grunn av en utvidelse på ca  $20\mu\text{strain}/^\circ\text{C}$  [9].

Valg av aluminiumslegering er som tidligere nevnt avhengig av hva man trenger av egenskaper. Siden Sperre AS bruker AA6082-T6 i stor grad per dags dato vil det være naturlig å fortsette med det. Dette vil ikke være et dårlig valg, men styrkemessig vil det lønne seg å se på 7000-legeringer. Aktuelle legeringer kan være AA7075 eller AA7068 [22]. Disse legeringene har styrke som overgår flere stål samt at de har god bruddseighet. Et aspekt ved bruk av denne legeringa er dårlig sveisbarhet. Dette kan få konsekvenser i mange tilfeller, men ikke for denne type produkt. Den dårlige sveisbarheten vil ikke ha noen nevneverdig innvirkning siden man ønsker å unngå sveising av aluminium, der man trenger styrke, i det store og hele. Den negative effekten ved sveising av aluminium er evaluert i kapittel 4.

Korrosjon kan som tidligere nevnt bli et problem i sjøvann. Titan vil ekskludere dette problemet fullt og helt, noe som er et sterkt argument for bruken. Ved bruk av 7000-aluminiumslegering vil man måtte ta visse hensyn. Ved bruk av karbonfiber mot aluminium får man galvanisk korrosjon, karbonet er svært edelt sammenligna med aluminiumen [15]. Dette løses ved å legge glassfiber som isolasjon mellom de ulike materialene. Dette vil være tilstrekkelig, men om vann trenger inn i fiberen vil man få en elektrolytt tilstede og korrosjon vil starte til tross for at glasset isolerer. Det er derfor viktig å bruke en god overflatebeskyttelse i form av gelcoat eller lignende slik av vann ikke trenger inn.

### 7.1.2 Lokk

For lokket vil materialvalg være en god del enklere da det kun ligger med kontakt mot innerforingen i dette konseptet. Det naturlige valget vil være å bruke samme materiale som man

produserer innerforinga i, dette på grunn av at da kan man ekskludere de fleste problemstillingene med unntak av styrke mot trykk og korrosjon induisert av omgivelsene. Ved bruk av titan innerforing vil det innebære en del kostnader ved å bruke titan til lokkene. For å begrense kostnadene i innkjøp og produksjon kan det gå an å produsere disse som i dag, ved bruk av AA6082-T6. Mellom disse materialene vil ikke det galvaniske potensialet være av de største, og man vil klare seg med å legge imellom en pakning. Ved bruk av AA7062 vil man også med fordel kunne ha brukt AA6082 på grunn av høyere korrosjonsmotstand, samt at styrken til lokket er god nok for 6000 meter som det er i dag, vist i Vedlegg A.

### 7.1.3 Kompositt

Når man skal produsere noe i kompositt, der man ønsker å maksimere styrke men vil holde vekta til et minimum er det karbonfiber som er det beste valget [8]. Man har også polymerfibre som har like lav, om ikke lavere egenvekt, men disse har til gjengjeld for lav smeltetemperatur. Eksempler på slike fibre er spectra 900, 1000 og 2000. Disse har smeltetemperatur på 150-160°C, noe som vil gi for liten sikkerhet mot smelting i dette tilfellet.

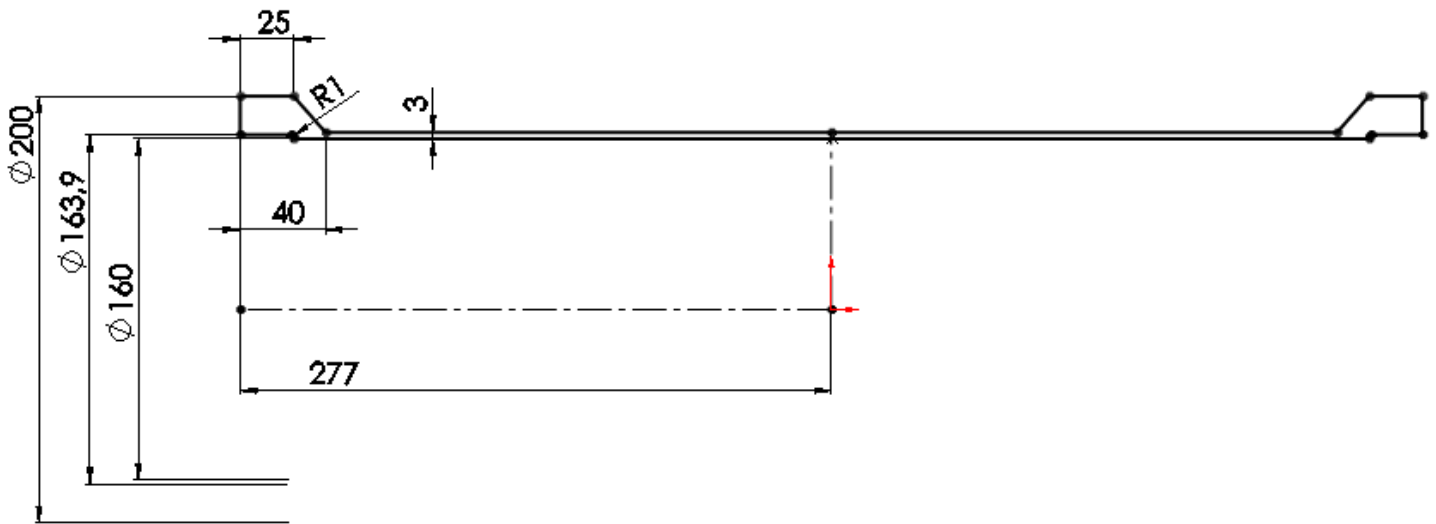
Valgt kompositt må samsvare med innerforingen. Ved riktig tiltak mot korrosjon vil man kunne velge karbonfiberen ganske åpent, med tanke på tilgjengelighet og pris. Vanlige produsenter av karbonfiber som leverer til industrielle formål er firma som Toray, Hexcel og Zoltek. Disse produsentene har alle et vidt spekter med fibre til dette formålet og alle fibrene er lett tilgjengelige. I Vedlegg B er en god del fibre lista opp med spesifikasjoner. Disse fibrene er ikke vevd sammen på noe vis, de er lange tråder designa for å eksempelvis spinne trykktanker.

Her ved IPM blir det benytta mye av fibrene T300, T700, AS4 og AS7. Disse fibrene vil også være svært velegna for denne applikasjonen det er snakk om i oppgava. For maksimering av styrke og minimering av vekt vil det være gunstigst å gå for Toray sin T1000B eller Hexcel sin IM10, men før disse velges bør en kostnadsvurdering gjøres. Fibre med så gode egenskaper vil som regel ha en vesentlig høyere kostnad på grunn av lavere produksjon og høyere utviklingskostnader.

Ved spinning av trykktanker vil det som nevnt i kapittel 2.3.4 være gunstigst med  $\pm 65$  grader på fiberen. Dette kan oppnås ved å kun spinne i disse vinklene eller ved å kombinere vinkler slik at resultanten ender på  $\pm 65$  grader. Det vil være ønskelig å legge fiberen med nært 0 grader i noen av sjikta, dette for å låse fast fibrene bedre til hverandre og mot innerforingen. Om man eksempelvis benytter seg av fiberen til Toray, av typen T700 vil man ha en strekkfasthet på 4900MPa til rådighet, noe som er over en tidobling av vanlige konstruksjonsstål. Ved kompresjon og lastsituasjon som ikke gir rein strekk, vil ikke denne verdien kun være veiledende men den gir en pekepinn. Grunlaget for at dette ikke er analogt er pga at de fleste metaller er isotrope, noe kompositter ikke er.

## 7.2 Design

Innerforingen må være robust nok til å tåle å spennes opp i spinnemaskinen samt at det må være nok materiale å gjenge i, dette for å feste endelokka. Ved veggtykkelse på 3mm aluminium vil man være i minste laget hva angår tilstrekkelig styrke og stødighet for spinninga sin del. Man vil kunne gå ned under 2mm veggtykkelse ved bruk av titan. Figur 7.2 viser tverrsnittet til hvordan innerforingen kan utformes slik at man har tilstrekkelig styrke ved bruk av aluminium.



Figur 7.2: Mål og dimensjoner innerforing

Kompositten har følgende kontaktareal mot innerforingen:

$$\text{Totalt (mm}^3\text{)} = 273261\text{mm}^3$$

$$\text{Overgang (mm}^3\text{)} = 26068\text{mm}^3$$

Og vekta til innerforingen er som følgende(gitt bruk av aluminium):

$$V_{\text{innerforing}} = 1235488\text{mm}^3$$

$$M_{\text{innerforing}} = D_{\text{alu}} * V_{\text{innerforing}}$$

$$M_{\text{innerforing}} = (1235488\text{mm}^3 / * 10^{-9}) * 2670\text{kg/m}^3 = 3,29\text{kg}$$

Kontaktarealet i overgangen er det arealet som er viktig. Med denne vinkelen på overgangen vil arealet være brukbart stort uten at det går på bekostning av at man må bruke for mye innerforingsmateriale. At man har 25 mm med gods på begge endene betyr at man kan bruke 30-35mm lange bolter i tilstrekkelig kvalitet, og det vil være lite fare for at man ikke får nok forspenn på lokka.

Den ytre diameteren på innerforingen er avhengig av hvor mye kompositt som trengs for å motstå det ytre trykket på 600 bar. Lokket må da også dreies ned/ maskineres til samme diameter som sylindere, dette for å unngå kjerneffekt og uønskede spenningsopphopninger. Det er også fordelaktig at man har samme lokka og samme indre diameteren på foringen, på denne måten kan man legge inn spor til de doble o-ringene på samme måte som dagens tank.

For å kunne kvantifisere akkurat hvor mye kompositt man trenger, må man gjennomføre analyse på kompositt der man tar hensyn til spinnevinkler og antall lag man bruker. Dette gjøres

på samme måte som andre komposittberegninger, man antar at man legger laminater med forskjellig orientering i forhold til hverandre. Denne analysa blir ikke gjennomført i denne oppgava på grunn av at det er en tidkrevende prosess.

For å unngå at vann trenger igjennom og inn i kompositten må man bruke gelcoat beregna for å tåle sjøvann, og de andre mulige omgivelsene ROVen skal operere under. Gelcoaten kan også fås i ulike farger for dekorative formål [23].

Ved å krympe foringen før spinning vil det gi et høyere forspenn på fiberen. Dette betyr at man optimaliserer bruken av kompositten, siden den har høy styrke mot strekk. I praksis kan dette gjøres ved å legge innerforingen i fryser eller lignende for å senke temperaturen ned til ønska nivå. Bindemiddelet vil også stå for en stor del av lamineringskreftene mellom fibre og foringen.

### 7.2.1 Testing

Ved testing av denne nye trykktanken kan man bruke samme testutstyr som før, man trenger bare større kapasitet hva angår trykk. Ved testing av kompositt må man vurdere litt flere parametre sammenligna med dagens aluminiumssylindre. Man må se på om fiberen tar opp vann, på grunn av manglende tett ytre sjikt eller at komponenten delamineres. Denne delamineringa vil være vanskelig å oppdage fra utsida på tanken. Man bør inn med måleutstyr inne i tanken for å kunne logge om innerforingen bukler uten at kompositten blir berørt.

Det vil også være viktigere enn tidligere å ha med en varmekilde inne i trykktanken for å simulere den reelle situasjonen, samt se hvordan innerforingen og kompositten reagerer på varmen. Det ytre trykket vil i stor grad ha positiv innvirkning på komposittmaterialet, da mulige sprekker vil tettes når fartøyet dykker ned til større dyp.

## 7.3 Delt karbonfiberhus

Som nummer to i konseptevalueringa kom det delte karbonfiberhuset. Dette konseptet er svært godt på det meste, med unntak av at det må gjøres relativt store endringer i forhold til dagens oppsett for å implementere denne løsninga. Figur 7.3 viser en annen applikasjon der denne metoden brukes for indre trykk.

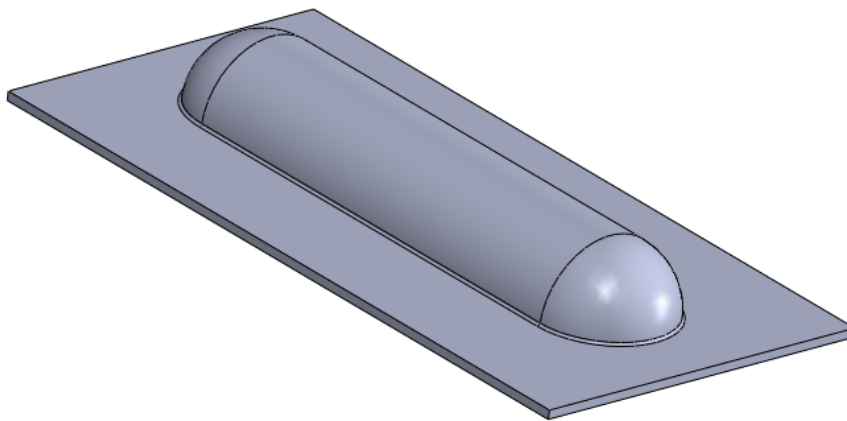


Figur 7.3: Delt plenum i karbonfiber

Med tanke på vekt vil man kunne oppnå nært den lavest mulige vekta på denne måten. Det er kun boltene som sammenfører de to delene og flensene som vil legge til vekt i forhold til en ideell sylindrisk tank med avrunda ender.

Materialer og materialvalg når man konstruerer tanken slik blir i stor grad likt som ved konsept 4. Man vil her bruke karbonfiber på grunn av vekt. Når det gjelder vinkel på fibrene bør også de ha  $\pm 65$  grader som ved spinning, ved hjelp av laminater. Laminater er som nevnt i kapittel 2.2.4 fibre som er vevd med et spesielt mønster slik at man får en duk. Disse dukene finnes som enten tørre eller prepreg, prepreg vil si at de er metta med bindemiddel på forhånd. Når man legger opp kompositten med duk må man her manuelt få resultatene på duken til å gi krefter i ønska retning, som her er  $\pm 65$  grader. Vedlegg C viser et utvalg av fibre levert av Toray som kan benyttes ved produksjon av dette produktet. Alle de andre karbonfiberprodusentene produserer også tilsvarende duk for støping av karbonfiber. Til produksjon av dette konseptet kan man benytte seg av de fleste laminatene, men man bør gå for en duk med høy kvalitet på fiberen. Når man skal ha litt kvalitet på fiberen er det stort sett prepreg som framstår som det beste valget. Prepreg er også lettere å jobbe med under produksjonen samt at egenskapene er relativt uniforme pga prosessen der de mettes med bindemiddel er godt kontrollert. Duker som vil fungere godt til denne applikasjonen er P8055S eller P2053F, da de baserer seg på henholdsvis M30SC og T800HB fibre med høy styrke.

Ved produksjon av dette konseptet må man ha ei form som man legger fiberen over, denne forma er vist i figur 7.4 og må ha de rette indre målene. Man kunne også hatt ei form der man legger karbonfiberen ned i forma [25], men man ønsker i dette tilfellet mer nøyaktige dimensjoner på den indre flata. Produksjonsprosessen må tilpasses til applikasjonen, og det finnes mange kreative måter å gjøre dette på, for å få god nøyaktighet.



Figur 7.4: Form for støping av karbonfiber

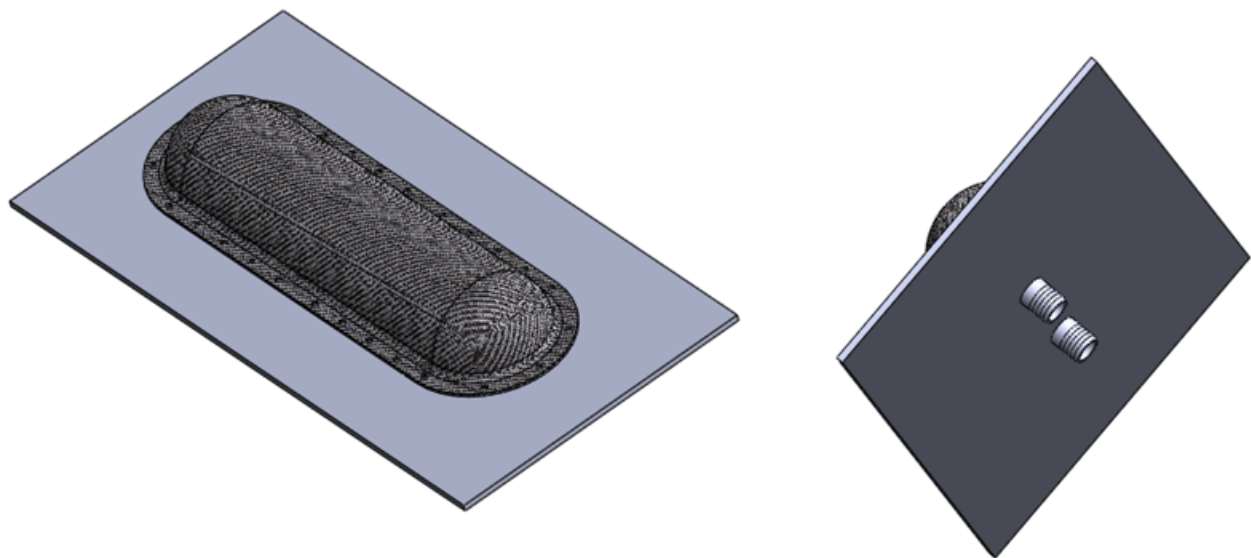
Når laminatene er lagt opp, og lagt inntil forma må man pakke det inn i vakuum og benytte seg av vakuum-infusjon for å få vekk bobler og inperfeksjoner. Når dette er gjort, og lufta er sugd ut er det vanlig å bake fiberen ved forhøya temperatur. Hvilken temperatur man skal bake ved er avhengig av hvilket bindemiddel man har samt mengde kompositt, men det er vanlig med mellom  $130-200^{\circ}\text{C}$  [26].

Disse to halvdelene som skrur sammen og må i samme grad som ved konsept 4, belegges med et vanntett sjikt slik at vann ikke trenger inn i fiberen og skaper lekkasje. En annen fordel med

denne tanken er det designmessige, den vil få et innbydende utseende samt at den lett kan festes til ROVen i samme boltforbindelsen som tanken deles.

### 7.3.1 Testing

Ved trykktesting av dette konseptet må man bygge om testriggeren en god del. Vakuomet må her tilføres på den sylindriske flata for å få reelle forhold. En måte å gjøre dette på er å teste hver halvdel hver for seg ved å bolte de fast på ei flat plate med høy styrke. Denne plata må da ha en nippel for å suge ut lufta samt at den må gi god forsegling mot komponenten. Figur 7.5 viser hvordan dette kan gjøres.



Figur 7.5: Testrigg delt kompositthus

Ved bruk av trykktank der man trykker opp med reelt ytre trykk vil man kun trenge at halvdelen er bolta fast til et flatt underlag med tett forsegling. Det vil være nødvendig å trykke mer enn testtrykket på denne testen, siden man kun tester den ene halvdelen mens den er skrudd fast til et urealistisk fast underlag sammenligna med realiteten.





# Kapittel 8

## Konklusjon

### 8.1 Aluminiumstesting

- Aluminium er svakest i bløt sone, ca 5-10 mm unna sveisens senterlinje.
- Kunstig elding gir styrkeøkning, men ikke tilstrekkelig til at det vil være kostnadseffektivt.
- 6-7 timers elding ved 160 °C gir best effekt med tanke på styrkeøkning. Dette samsvarer med sveiseteorien.
- Dortest samsvarer i stor grad med hardhet når man vurderer duktilitet.

### 8.2 Kompositt trykktank

- Konsept 4 vil være et godt konsept å videreutvikle, siden det går godt overens med dagens måte å gjøre ting på.
- Konseptet vil minimere antall feilkilder, og få lav vekt.
- Det best egna materialet til innerforing er titan, men det bør vurderes opp mot 7000-legering aluminium med tanke på kostnad.
- Den kompositten som vil passe best til formålet er karbon, på grunn av lavest vekt og fortsatt god varmebestandighet.
- Ved spinning av trykktank bør man velge fiber med høye mekaniske egenskaper for å minimere vekt.
- Resultanter av fiberen bør være  $\pm 65$  grader for å få best mekaniske egenskaper mot ytre trykk og bukling.
- Om man gjør en god del endringer i forhold til dagens praksis, vil konsept 7 være et godt konsept med sin lave vekt og enkelthet.



# Kapittel 9

## Videre arbeid

- Markedsanalyse på salg av trykktanker.
- Kostnads kalkyle prototypproduksjon.
- Måle temperatur inne i dagens elektronikkylindere under bruk.
- Styrkeberegning og produksjon av prototype.
- Evaluering/testing av prototype.
- Storskala produksjon av elektronikkylindere i kompositt.
- Videreutvikling av konsept, bruk av kompositttanker for oppdriftsenheter og se på bruken av konsept 7 som løsning.



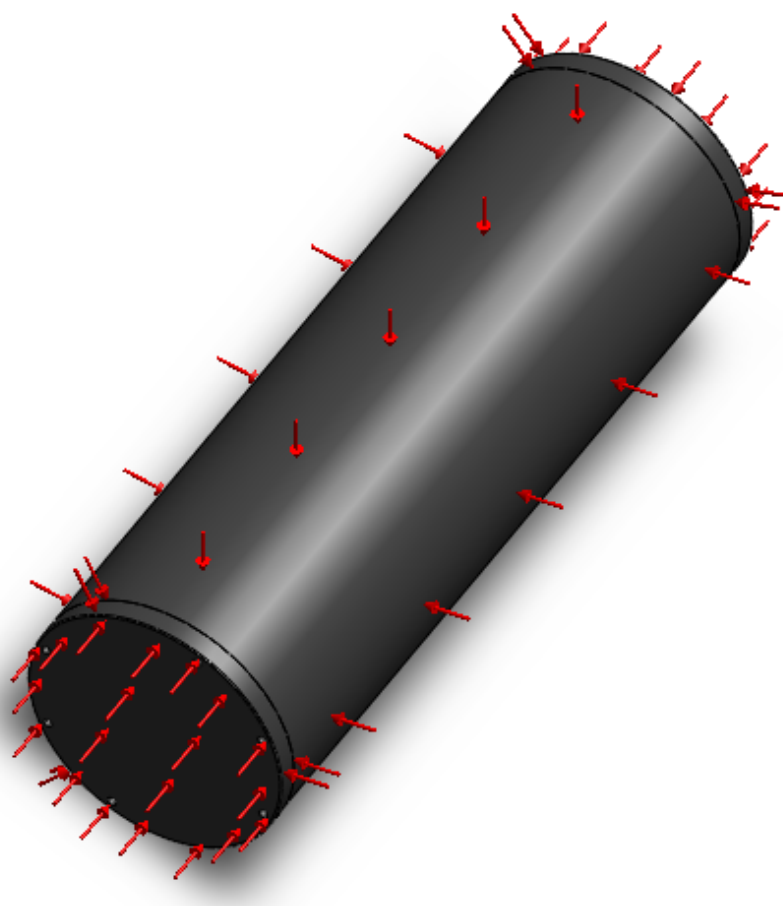
# Bibliografi

- [1] DNV, "Standard for certification no 2.7-1," tech. rep., Det Norske Veritas, 2006.
- [2] SperreAS, "Sperre rov technology," in *PROBLEM-SOLVER TO THE SUBSEA SECTOR*, 2011.
- [3] DNV, "Standard for certification no 2.7-3," tech. rep., Det Norske Veritas, 2006.
- [4] ISO, "Iso/tr 13086-1," tech. rep., ISO, 2011.
- [5] G. Rohrauer, "Ultra-high pressure composite vessels with efficient stress distribution," tech. rep., Concordia University, Canada, 1999.
- [6] L. P. K. . G. S. Springer, *Mechanics of composite structures*. New York; USA: Cambridge university press, 2003.
- [7] S. K. og Steven R Schmid, *Manufacturing engineering and technology*. Upper Saddle River; USA: Pearson Education Inc, 2006.
- [8] T. Øystein Olsen, "Materialvalg og produksjon av rammekonstruksjon for offshore rov." Ikke publisert, 2011.
- [9] G. design limited, "Ces edupack." Material database program.
- [10] "Composite-resources, temperaturutvidelse." <http://www.composite-resources.com/composites/advantages/>.
- [11] "United composites, temperatur og temperaturutvidelse." <http://www.unitedcomposites.net/usapages/hightemperaturecomposites2.htm>.
- [12] S. M. Lee, *Handbook of composite reinforcement*. Palo Alto; California: Wiley-Vch, 1993.
- [13] "Performance composites, spinnevinkler." <http://www.performance-composites.com/carbonfibre/fibreangles.asp>.
- [14] "Prinsippskisse bukling." <http://www.zyvex.com/nanotech/mechano.html>.
- [15] J. Haugan, *Formler og tabeller*. Bekkestua; Norge: NKI Forlaget, 2006.
- [16] A. Bjarbo, *Konstruksjons-materialer*. Bekkestua; Norge: NKI Forlaget, 1995.
- [17] T. J. FMC Technologies, "Production platforms including floating production units," in *Material selection*, 2011.
- [18] T. Øystein Olsen, "Strength and ductility of welded aluminum." Ikke publisert, 2011.
- [19] D.-I. C. Kammer, *Aluminum Handbook; Fundamentals and Materials*. Dusseldorf; Germany: Aluminum Verlag, 1999.
- [20] ISO, "Iso/tr 6892-1," tech. rep., ISO, 2009.

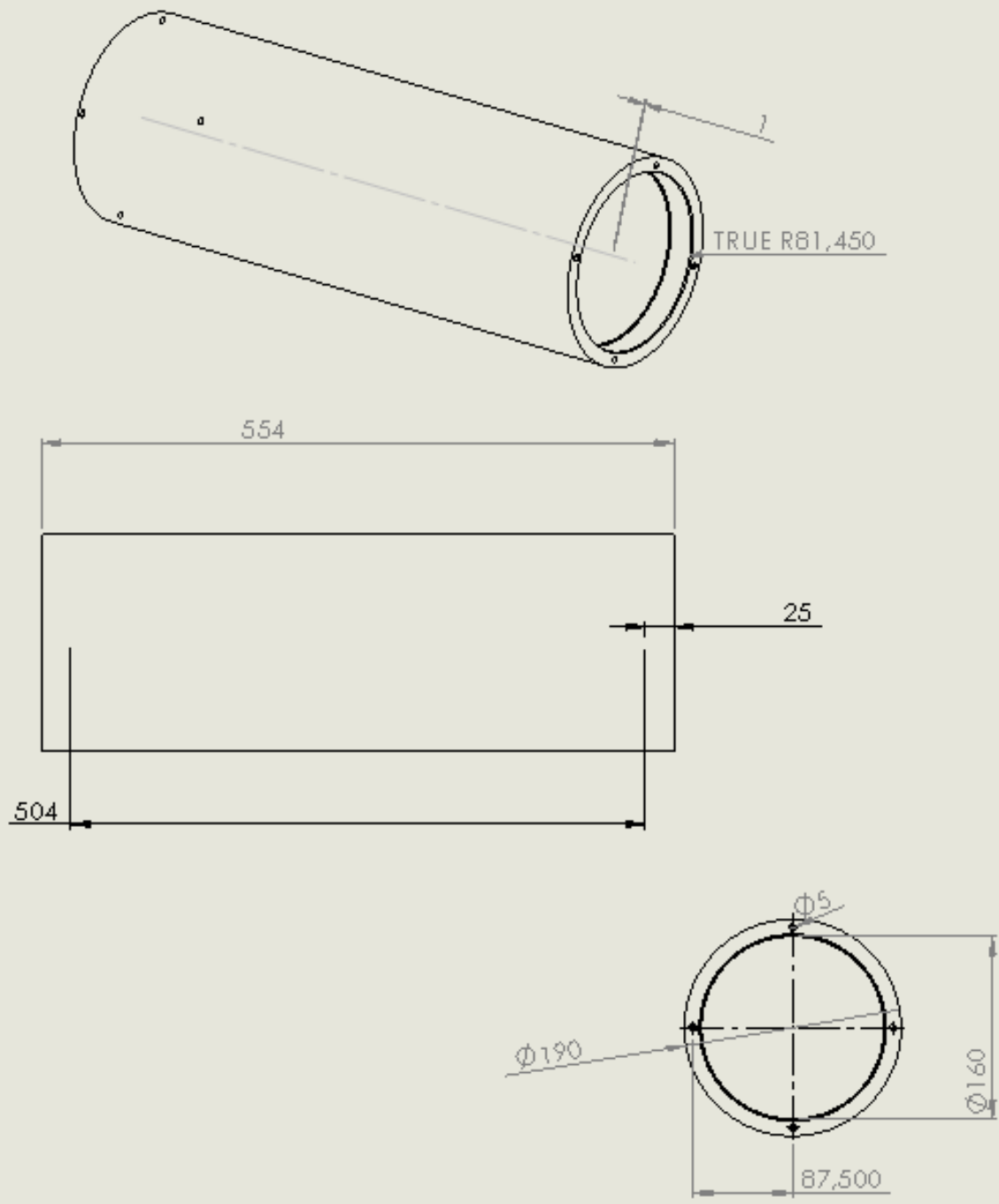
- [21] O. y. K. NTNU, "Conversion coatings," 2011.
- [22] "Egenskaper aluminiumslegeringa 7068." <http://www.smithshp.com/latest/7068.htm>.
- [23] "Leverandør gelcoat og annet til komposittproduksjon." <http://www.fibreglast.com/category/Resins>.
- [24] "Delt karbonfiberplenum." <http://passionford.com/forum/general-car-related-discussion/380638-carbon-fiber-yb-inlet-manifold.html>.
- [25] "Støping av karbonfiberrør." <http://www.vaglinks.com/Docs/Misc/CarbonFiberHowTo2.pdf>.
- [26] "Spesifikasjoner hexcel karbonfiber." <http://www.hexcel.com/resources/datasheets>.
- [27] "Spesifikasjoner toray karbonfiber." <http://www.torayca.com/en/index.html>.
- [28] "Spesifikasjoner panex 35 karbonfiber." <http://www.zoltek.com/products/panex-35/>.

## Tillegg A

# Maskintegninger og styrkeberegning av dagens elektronikkhus



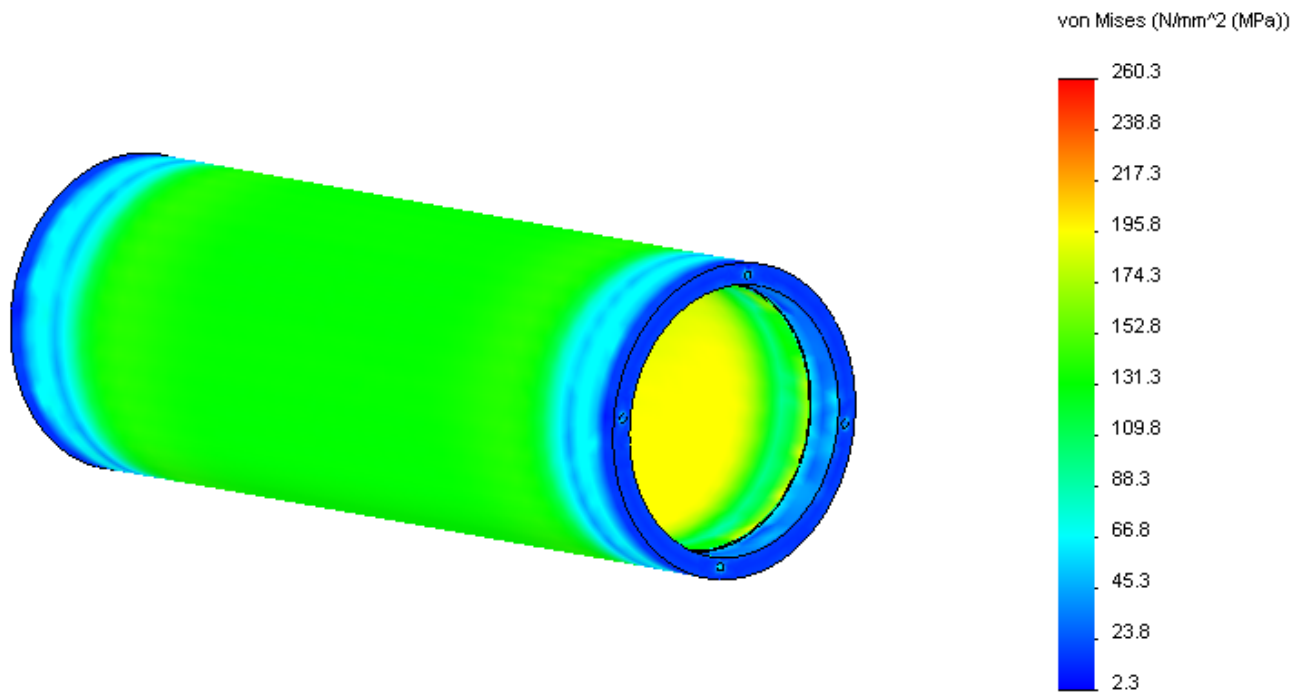
Figur A.1: Belastning elektronikkylindre



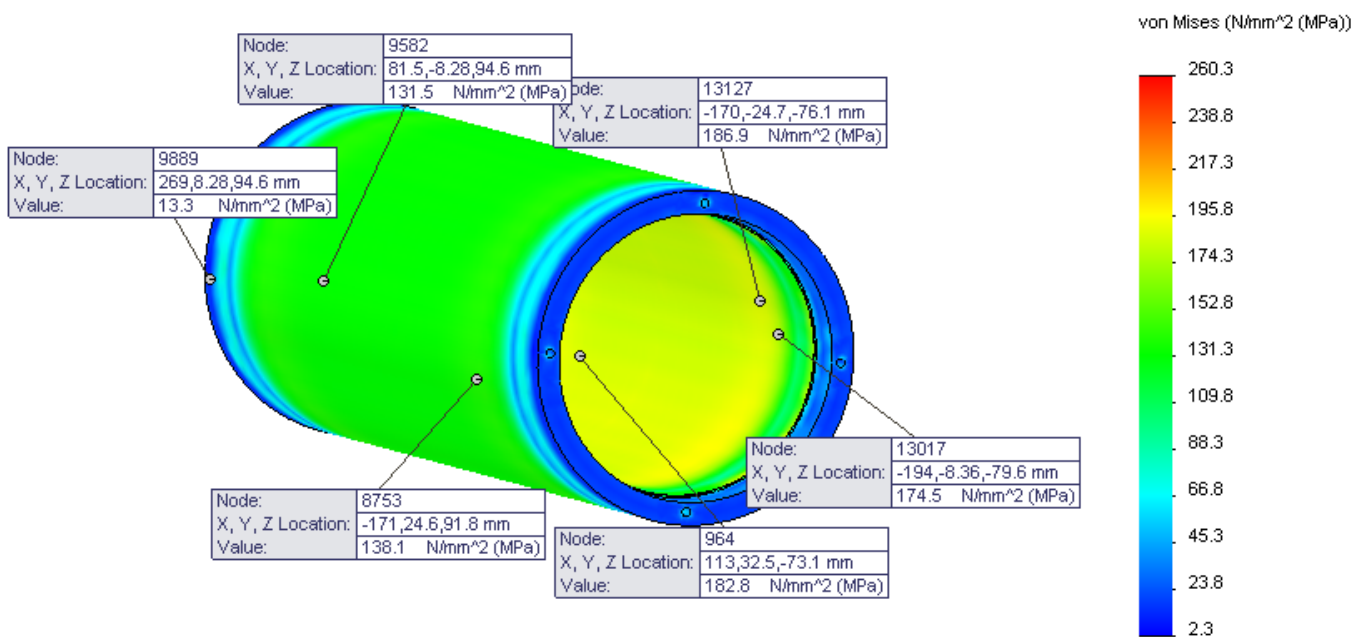
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: FOR FINISHES IMPACT ANGLE 45°		PROF		GROUP AND DATE SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
PART		SIGNATURE		DATE		PROF			
DRAWN									
CHECKED									
APPROVED									
MFG									
QA									
MATERIAL				DRAWING		SCALE		SHEET	
0082T6				E-cylinder 1 3000m no_weld		1:10		1 OF 1	
WPCMT-1221 Ed				SCALE: 1:10		SHEET 1 OF 1			

Figur A.2: Maskintegning av sylinderkroppen til dagens elektronikkhus

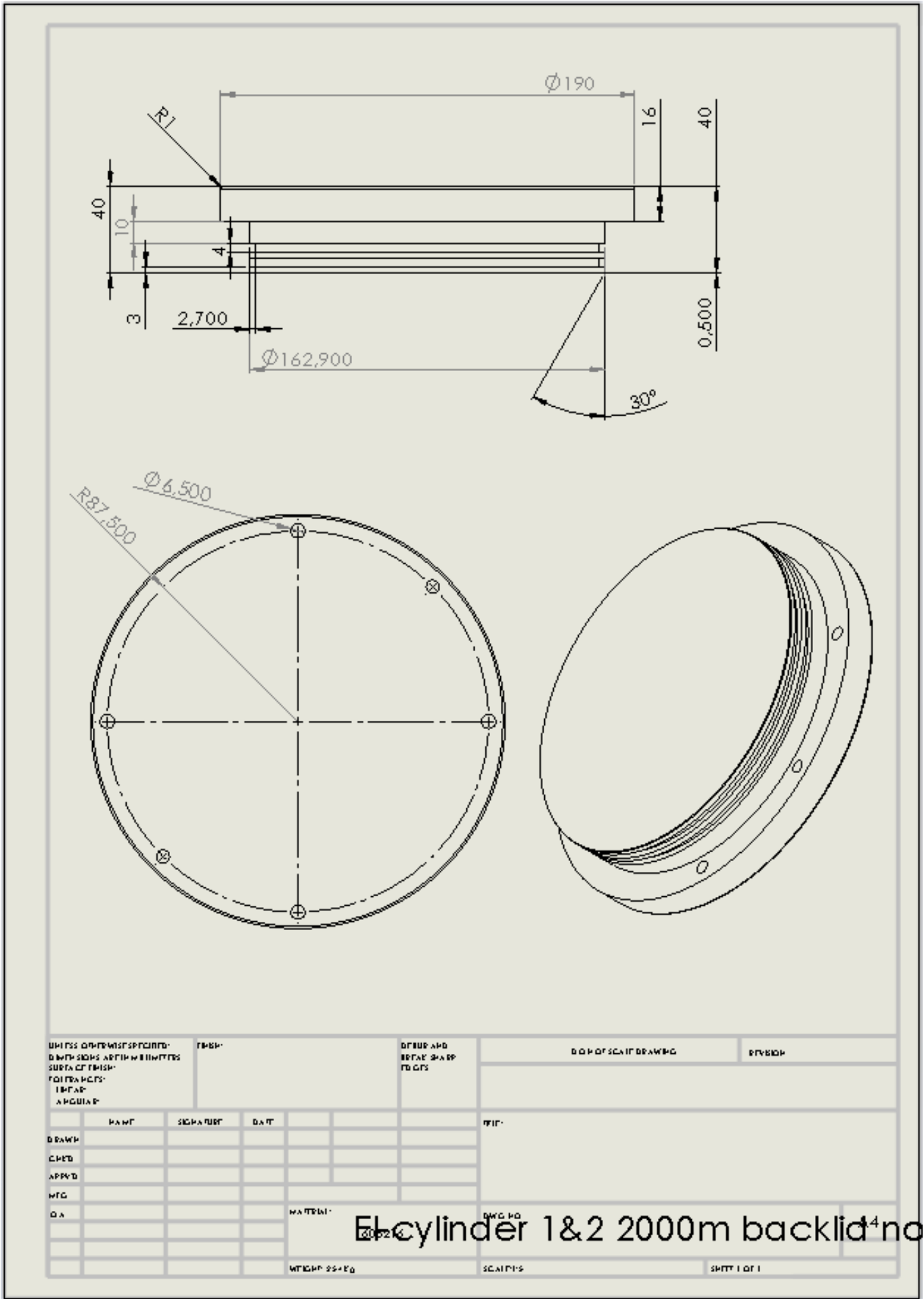




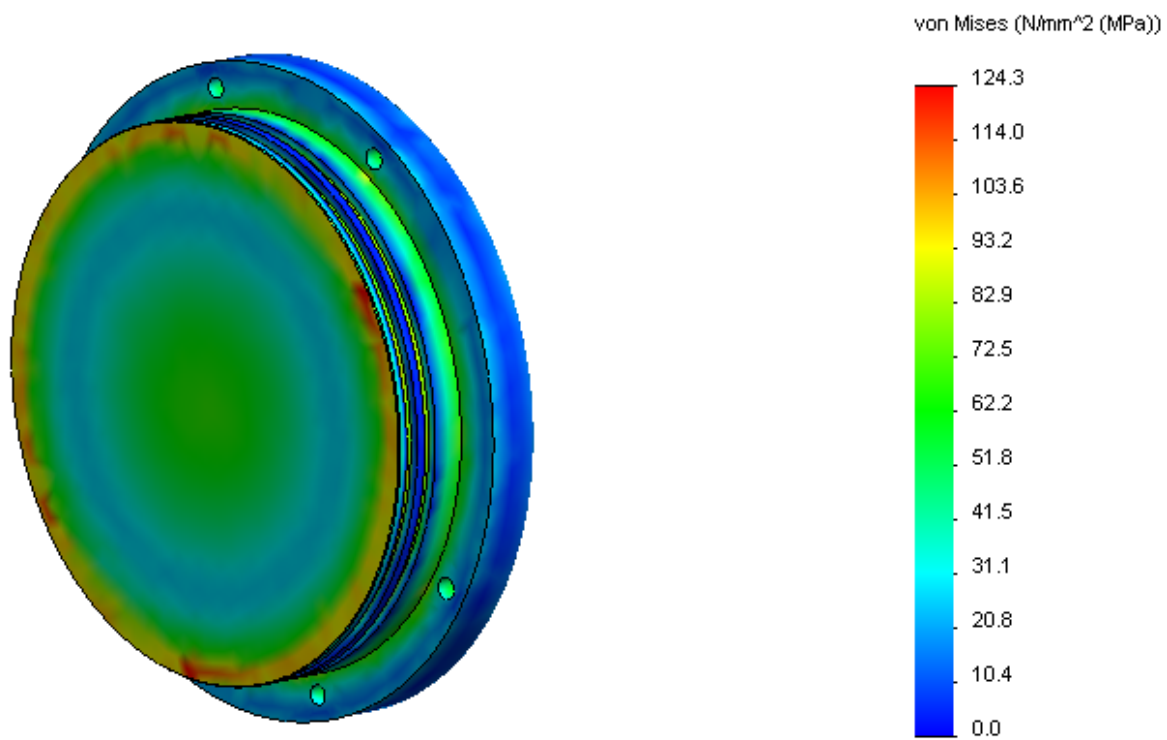
Figur A.3: Styrkeberegning av sylinderskallet



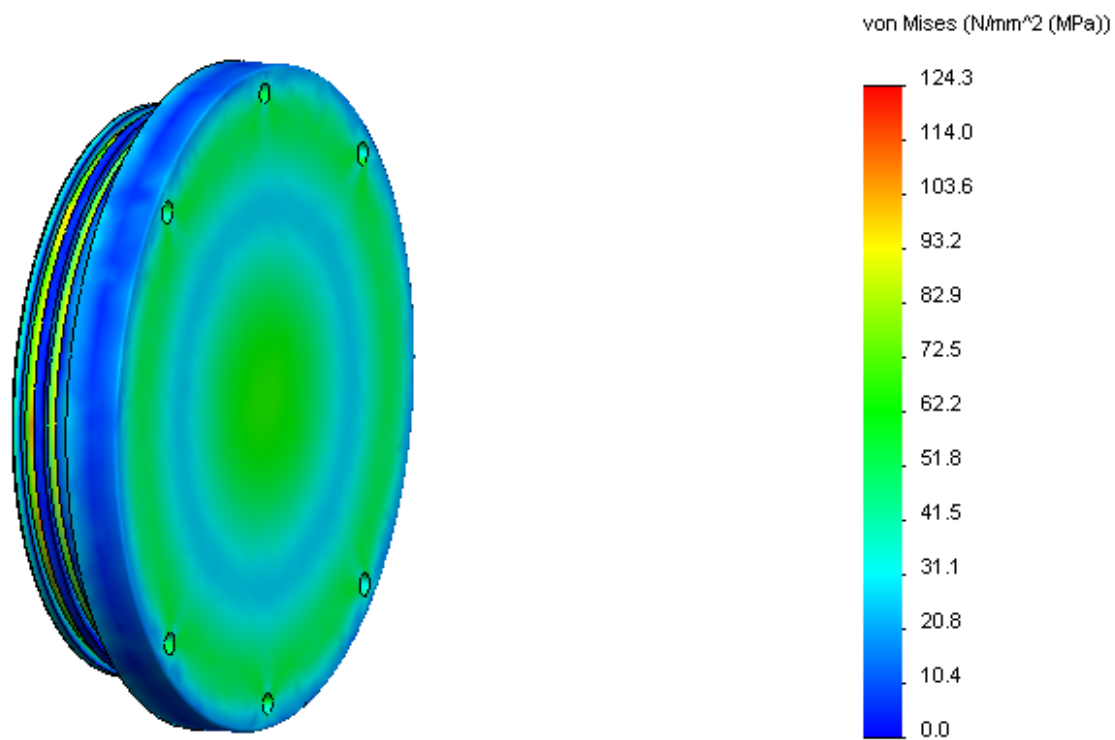
Figur A.4: Styrkeberegning av sylinderskallet med spenningsverdier for vilkårlige punkter



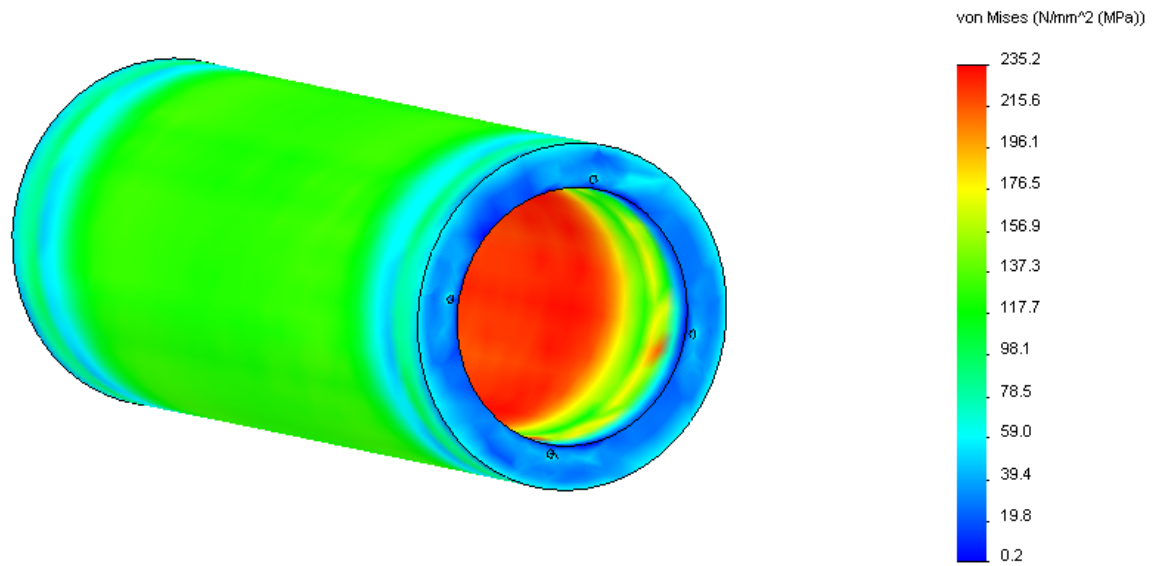
Figur A.5: Maskintegning av baklokket til dagens elektronikkhus



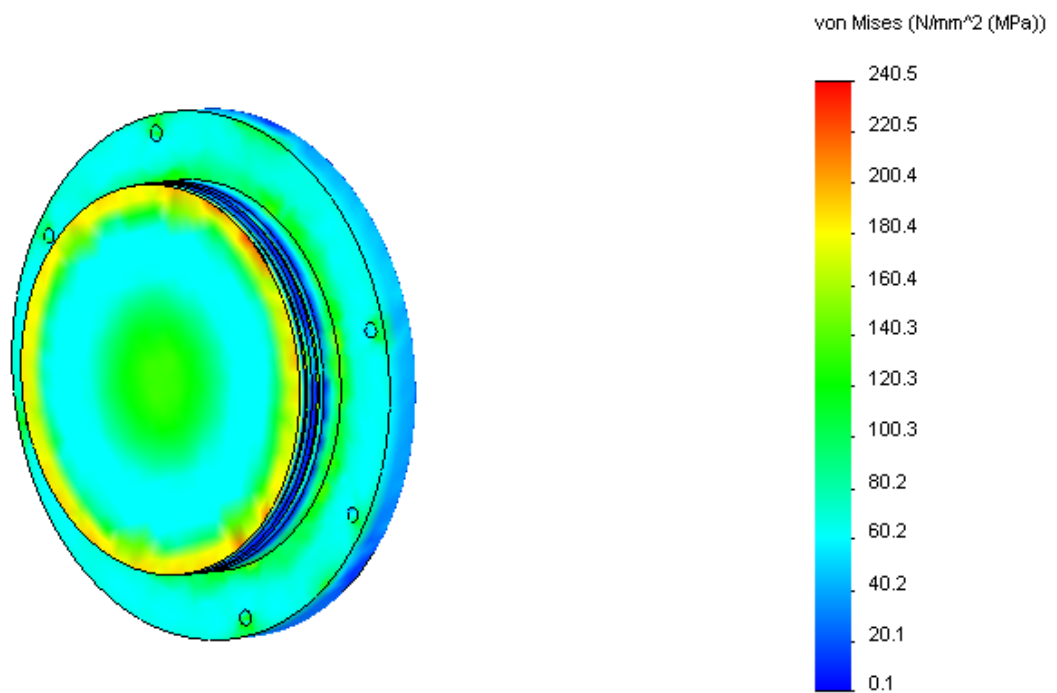
Figur A.6: Styrkeberegning av lokk, indre flate



Figur A.7: Styrkeberegning av lokk, ytre flate



Figur A.8: Spenning ved 600 bars belastning på doblett veggtykkelse



Figur A.9: Spenning ved 600 bars belastning på lokk kun tilpassa endra diameter

# Tillegg B

## Spesifikasjoner industrielle karbonfibre

Fiber	Strekfasthet(MPa)	E-modul(GPa)	Tetthet(kg/m <sup>3</sup> )	Forlengelse(%)
Toray [27]				
T300	3530	230	1760	1,5
T300B	3530	230	1760	1,5
T400HB	4410	250	1800	1,8
T700SC	4900	230	1800	2,1
T800HB	5490	294	1810	1,9
T1000B	6370	294	1800	2,2
M35JB	4510	343	1750	1,3
M40JB	4400	377	1750	1,2
M46JB	4200	436	1840	1
M50JB	4120	475	1880	0,9
M55J	4020	540	1910	0,8
M55JB	4020	540	1910	0,8
M60JB	3820	588	1930	0,7
M30SC	5490	294	1730	1,9
Hexcel [26]				
AS2C	4440	221	1800	1,9
AS4	4500	231	1790	1,8
AS4C	4460	231	1790	1,8
AS4D	4750	245	1780	1,8
AS7	4830	241	1790	1,8
IM2A	5100	276	1790	1,7
IM2C	5720	296	1780	1,9
IM6	5740	279	1780	1,9
IM7	5310	276	1760	1,8
IM8	6102	303	1780	1,8
IM9	6140	304	1800	1,9
IM10	6964	303	1790	2,1
Zoltek [28]				
Panex35	4137	242	1810	1,5

# Tillegg C

## Spesifikasjoner tørr og prepreg karbonfiberduk

Tørr duk(Toray) [27]:

Navn	Fiber	Vev	Tetthet(g/m <sup>2</sup> )
CO6141	T300	8H Satin	211
CO6142	T300	Plain	119
CO6151B	T300	Plain	92
CO6341	T300	8H Satin	396
CO6343	T300	Plain	198
CO6343B	T300	Plain	198
CO6347B	T300	2x2 Twill	198
CO6644B	T300	Plain	317
CO6645B	T300	5H Satin	349
CO6261L	T300	Plain	484
CO1302	T300 + Glass	UD	397
CO1303	T300 + Glass	UD	389
CO1601	T300 + Glass	UD	306
CO5642	T300 + Glass	Plain	342
CO7354	T300 + Kevlar	Plain	178
CO7359B	T300 + Kevlar	2x2 Twill	178
CO6244CW	T700	Plain	213
CO6252CL	T700	Plain	315

Prepreg:

Navn	Fiber	Tetthet(g/m <sup>2</sup> )	Mengde fiber (%)
P3051S-5	T700SC	55	63
P3051S-7	T700SC	75	63
P3052S-10	T700SC	100	67
P3052S-12	T700SC	125	67
P3052S-15	T700SC	150	67
P3052S-17	T700SC	175	67
P3052S-20	T700SC	200	67
P3052S-25	T700SC	250	67
P2053F-10	T800HB	100	70
P2053F-12	T800HB	125	70
P2053F-15	T800HB	150	70
P2053F-17	T800HB	175	70
P8053S-3	M30SC	30	70
P8053S-5	M30SC	55	70
P8053S-7	M30SC	75	70
P8055S-10	M30SC	100	76
P8055S-12	M30SC	125	76
P8055S-15	M30SC	150	76
P8055S-17	M30SC	175	76
P8055S-20	M30SC	200	76
P8055S-25	M30SC	250	76
P8052G-10	M30GC	100	67
P8052G-12	M30GC	125	67
P8052G-15	M30GC	150	67
P8052G-17	M30GC	175	67
P8052G-20	M30GC	200	67
P8052G-25	M30GC	250	67
P10055F-10	M35JB	100	76
P10055F-12	M35JB	125	76
P10055F-15	M35JB	150	76
P10055F-17	M35JB	175	76
P10055F-20	M35JB	200	76
P10055F-25	M35JB	250	76

Navn	Fiber	Tetthet(g/m <sup>2</sup> )	Mengde fiber (%)
P9052F-7	M40JB	125	67
P9052F-10	M40JB	150	67
P9052F-12	M40JB	175	67
P9052F-15	M40JB	200	67
P9052F-17	M40JB	250	67
P9055F-11	M40JB	100	76
P9055F-16	M40JB	125	76
P9055F-16	M40JB	150	76
P6052F-10	M46JB	92	67
P6052F-12	M46JB	116	67
P6052F-15	M46JB	139	67
P6055F-11	M46JB	100	76
P6055F-13	M46JB	125	76
P6055F-16	M46JB	150	76
P11055F-11	M50JB	100	76
P11055F-13	M50JB	125	76
P11055F-16	M50JB	150	76
P12055F-13	M55JB	125	76
P12055F-16	M55JB	150	76
P13055F-13	M60JB	125	76
P13055F-16	M60JB	150	76
F6142-05K	T300-Cross	119	60
F6343B-05P	T300-Cross	198	56
F6151B-05M	T300-Cross	92	58