



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Masteroppgave 2016 30 stp  
Instituttet for matematiske realfag og teknologi(IMT)

## **Metodeutvikling for kartlegging av elastisitetsmodulen i arktiske temperaturer på resirkulerte og kompositt polymerere**

A methodology development to map the elastic modulus on recirculated and composite polymers for subzero temperatures

Sutha Ratnavel  
Industriell Økonomi – Maskin og produktutvikling



## FORORD

Denne masteroppgaven er den avsluttende gradsoppgaven i det femårige integrerte sivilingeniørstudiet Industriell økonomi, med fordypningene *Maskin og produktutvikling*, samt *Strategi og styring* ved Norges Miljø og Biovitenskapelige Universitet. Oppgaven er skrevet for *Instituttet for matematiske realfag og teknologi(IMT)* i perioden februar 2016 til juni 2016. Gradsoppgaven tar for seg metodeutvikling for kartlegging av elastisitetsmodulen ved arktiske temperaturer på plastkompositter og resirkulert plast.

Jeg vil takke førsteamanuensis Johan Andersen, samt biveileder Aage Kollen fra Biobe AS for denne muligheten og veiledning gjennom arbeidet. Forsøkene hadde ikke vært mulig å gjennomføre uten avdelingsingeniør Øyvind Lund og de ansatte ved *Senter for klimaregulert planteforskning(SKP)*. De har vært behjelpelige med tilgang og bruk av fryselaboratoriet. Jeg vil også takke avdelingsingeniørene Jon Asper og Gunnar Torp, samt lærling Bjørn Tenge ved verkstedet for hjelp med produksjon av testplattformen og ved materialtesting. Jeg vil også rette en takk til medstudent Simen Stusvik for samarbeid og gode diskusjoner. Spesielt vil jeg takke mine medstudenter: Line Charlotte Mosbæk, Yen- Nhi Doan, Mina Rahimzaie, Tharsika Sivapalan, Turpal Atabaev, Khaled Alamoudi og Dharun Sehjal for uvurderlig motivasjon og støtte. Tusen takk til min søster og sivilingeniør Inthu Ratnavel for å ha korrekturlest oppgaven og støttet meg gjennom det hele.

Til slutt vil jeg takke mine foreldre, søsken, venner og mine medstudenter for tilliten og motivasjonen. Dere er kilden til alt mitt arbeid gjennom de siste 5 årene og uten dere hadde ikke denne oppgaven vært mulig.

Sutha Ratnavel

## SAMMENDRAG

Det er mangel på kartlegging av materialdata på polymermaterialer og komposittpolymerere i arktisk klima, samtidig som det er større fokus på resirkulerte polymerere. Denne hovedoppgaven tar for seg metodeutvikling for kartlegging av elastisitetsmodulen i arktiske temperaturer.

Metoden er hentet og tilpasset prosjektet fra BS EN ISO 9969: 2007 og NS-EN 1228:1998 som kartlegger ringstivhet på termoplastiske og komposittrør. Ringstivheten kan benyttes til å regne ut elastisitetsmodulen.

Fryselaboratoriet ved Senter for klimaregulert planteforskning setter rammebetingelser for metodeutviklingen. Det er utviklet og bygget en testplattform for datainnsamling. Data-innsamlingen foregår gjennom mekanisk testing i fryseskap som simulerer arktisk klima. Det er benyttet 3D visualisering og dimensjonering ved hjelp av det dataassisterte programmet *Solidworks* for utvikling av testplattformen.

Metodeutviklingen er testet gjennom et tilfeldig utvalg rør bestående av både resirkulert og kompositt polymermaterialer. Standarden ASTM D 2584-08 «Standard test method for ignition loss of cured reinforced resins» er brukt i materialtesting for analyse av materialsammensetningen i komposittrørene.

Forsøkene konkluderer en markant økning i elastisitetsmodulen ved synkende temperaturer.

## ABSTRACT

There is a lack of mapping of material data about polymer materials and composite polymers in arctic climates, while simultaneously a larger focus on recirculated polymers. This thesis examines the development of a methodology to map the elastic modulus for these materials affected by subzero temperatures.

The method for testing is obtained and adapted for the thesis from BS EN ISO 9969: 2007 and NS-EN 1228:1998, which maps the ring stiffness of thermoplastic and composite pipes. The ring stiffness can be used to calculate the elastic modulus.

The freezing laboratory at *The center for plant research in controlled climate* (SKP) sets the framework for the method development. The result of the method was the development of a test platform. This test platform has been built for data acquisition. The data collection took place through mechanical testing in freezers that simulate Arctic conditions. The computer aided design program "*SolidWorks*" has been used for 3D visualization and computation in the development of the test platform.

The selection of pipes consists of both pure and composite polymer materials. The standard ASTM D 2584 – 08 «Standard test method for ignition loss of cured reinforced resins» has been used for the material testing and to analyze the material composition in the composite pipes.

The experiments concludes a significant increase of the elastic modulus by descending temperatures.

# INNHALDSFORTEGNELSE

FORORD .....	I
SAMMENDRAG.....	II
ABSTRACT .....	III
INNHALDSFORTEGNELSE .....	IV
LISTE OVER FIGURER .....	VII
LISTE OVER TABELLER.....	VIII
LISTE OVER SYMBOLER.....	IX
1 INTRODUKSJON .....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Målsetning og arbeidsmetode.....	1
2 TEORI.....	3
2.1 Materialer i kulde.....	3
2.2 Mekaniske egenskaper .....	3
2.2.1 Sammenhengen mellom spenning og tøyning.....	5
2.2.2 Brudd og kulde.....	6
2.2.3 Termiske materialeegenskaper.....	6
2.3 Metaller.....	7
2.4 Polymerer .....	8
2.4.1 Resirkulerte plastmaterialer .....	9
2.5 Kompositter.....	10
3 UTVIKLING AV TESTPLATTFORM .....	13
3.1 Innledning.....	13
3.1.1 Bakgrunn og konsept.....	13
3.1.2 Mål og begrensninger .....	13

3.2	Beskrivelse.....	14
3.2.1	Bruksområder og konkurrerende produkter.....	14
3.2.2	Krav og spesifikasjoner .....	15
3.3	Design.....	16
3.3.1	Designalternativer og evalueringer av løsninger.....	16
3.3.2	3D modeller av endelig løsning .....	17
3.4	Valg av materiale.....	19
3.4.1	Materiale til forsøksapparat: Tre .....	20
3.4.2	Materiale til festemekanisme på forsøksapparat:.....	21
3.4.3	Seleksjonsmatrise .....	21
3.5	Produksjon.....	23
3.6	Produktpresentasjon av forsøksapparat .....	24
4	MATERIALE.....	25
4.1	Innledning.....	25
4.2	Testrør .....	25
4.2.1	Testrør 4: Resirkulert Polypropylen.....	26
4.3	Bestemmelse av fiberinnhold .....	26
4.4	Analyse av fiberstruktur.....	28
4.5	Krav og klargjøring av testmateriale .....	30
5	METODE .....	33
5.1	Forsøksplan og testanlegg.....	33
5.2	Kvalitetssikring .....	35
5.3	Utstyr.....	36
5.4	Fremgangsmetode .....	37
5.4.1	Forsøksoppsett 1 .....	38
5.4.2	Forsøksoppsett 2 .....	38
6	RESULTATER OG ANALYSE .....	39

6.1	Tekniske beregninger og teoretisk E-modul .....	39
6.2	Forsøk 1 .....	39
6.3	Forsøk 2 .....	42
6.4	Sammendrag av resultater .....	44
7	DISKUSJON .....	45
7.1	Metodeutvikling og testplattform.....	45
7.2	Diskusjon av forsøksoppsett og materiale.....	45
7.3	Diskusjon av forsøksresultater .....	47
8	Konklusjon.....	49
8.1	Anbefalinger og videre arbeid .....	49
9	Referanser .....	51
	Vedlegg A – Materialtesting .....	i
	Vedlegg B – Mekanisk testing .....	i
	Vedlegg C – Metodeutvikling: Detaljtegninger og sammenstillingstegning for testplattform .....	vi
	Vedlegg D – Elastisitetsmodul plott.....	xii



## LISTE OVER FIGURER

Figur 2-1: E-modul vs tetthet for testmaterialene hentet fra CES Edupack .....	5
Figur 2-2: Kategorisering av ulike typer kompositt .....	10
Figur 3-1: Konkurrerende forsøksapparat til trykktesting.....	14
Figur 3-2: Forsøksapparat for trykktesting.....	14
Figur 3-3: Designalternativer for forsøksapparat.....	16
Figur 3-4: Prototype for testing av funksjonalitet .....	16
Figur 3-5: 3D fremstilling av forsøksapparat .....	17
Figur 3-6: 3D fremstilling av forsøksapparat fra ulike perspektiv.....	18
Figur 3-7: Eksplosjonstegning av forsøksapparat .....	19
Figur 3-8: Rendrert bilde av forsøksapparat.....	24
Figur 3-9: Bilde av endelig produkt, visualisert med rør. ....	24
Figur 4-1: Milligramsvekt anvendt i brenntest.....	27
Figur 4-2: Materialprøver før og etter brenntest .....	27
Figur 4-3: Fiberstruktur for testrør 1. Lag 1 og lag 2 .....	28
Figur 4-4: Fiberstruktur for testrør 2, Lagdeling 1: kryssviklet kontinuerlig fiber, Lagdeling 2: korte fiber m tilfeldig fiberretning .....	29
Figur 4-5: Fiberstruktur for testrør 3, Lagdeling 1: kryssviklet kontinuerlig fiber, Lagdeling 2: korte fiber m tilfeldig fiberretning .....	29
Figur 4-6: Mekanisk sag for klargjøring av testmateriale .....	30
Figur 5-1: Frysenskap ved SKP Fryselaboratorium .....	33
Figur 5-2: Utstyr for mekanisk testing.....	36
Figur 5-3: Manuell måling ved forsøk .....	38
Figur 7-1: Ulykke ved avlasting forsøk 1, rør 2 grunnet frost og kondens .....	46

## LISTE OVER TABELLER

Tabell 3-1: Seleksjonsmatrise for forsøksapparat .....	22
Tabell 3-2: Seleksjonsmatrise for festemekanisme .....	22
Tabell 4-1: Materialinfo om testrør .....	25
Tabell 4-2: Antall målinger for lengdenøyaktighet for testrør .....	31
Tabell 5-1: Teoretisk E-modul .....	36
Tabell 6-1: Siging i materialet, E-modul i GPa.....	41
Tabell 6-2: Prosentvis endring i E-modul(GPa) og teoretiske verdier.....	44

**LISTE OVER SYMBOLER**

$K$	temperaturskala Kelvin	
$C$	temperaturskala Celsius	
$^{\circ}$	grader	
$d_n$	nominell diameter av rør	[ mm ]
$d_i$	innvendig diameter av rør	[ mm ]
$d_m$	rørveggs midlere diameter	[ mm ]
$e$	rørveggs tykkelse	[ mm ]
$I$	rørveggs treghetsmoment	[ mm <sup>3</sup> ]
$F$	kraft	[ N ]
$L$	lengde på teststykket	[ mm ]
$S$	ringstivhet	[ kN/m <sup>2</sup> ]
$y$	vertikal defleksjon	[ mm ]
$\sigma$	spenning	[ N / m ]
$A$	Areal	[ m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	tøyning	[ m/m ]
$l_i$	sluttlengde	[ m ]
$l_0$	opprinnelig lengde	[ m ]
$\Delta l$	lengdeendring	[ m ]
$E$	Elastisitetsmodul	[ N/ m <sup>2</sup> eller GPa ]



# 1 INTRODUKSJON

## 1.1 Bakgrunn

Teknologisk utvikling på alle områder har skutt fart de siste tiårene og denne utviklingen stiller større krav til materialegenskapene. Forskning og utvikling innen materialdesign og kartlegging av materialdata må til for å møte disse kravene. I den sammenheng er det også stort fokus på å kartlegge og optimalisere egenskapene til komposittmaterialer.

Det er større fokus på å utvide olje- og gassutvinningen til områder med arktisk klima blant mange større aktører. Det arktiske klimaet stiller høye krav til bygnings-materialets egenskaper og skaper utfordringer for mange aktører. Ifølge naturvern-forbundet er 25 % av verdens kjente olje- og gassressurser i arktiske strøk, samtidig som det er anslått at en like stor prosentandel av verdens uoppdagede olje- og gassressurser finnes på Arktis (Naturvernforbundet 2016). Dette øker etterspørselen for kartlegging av materialer som tåler betingelsene til arktiske strøk og klima.

Forbruk av fossile naturressurser har siden den industrielle revolusjonen ført til store CO<sub>2</sub> utslipp. Dette har ført til større bevissthet rundt miljøansvar og bærekraftige materialer. Resirkulerte plastmaterialer faller innunder denne kategorien og har fått et mye større fokus de siste årene. Det finnes mange ulike typer plastmaterialer, og komposittdesign som har gjort det mulig å skreddersy materialene etter behov og formål. Det er mye forskning på ulike plast-materialer og hvordan de blir påvirket av varme, men i den siste tiden har industrien i større grad forsket mer på materialer som tåler kuldetemperaturer.

## 1.2 Målsetning og arbeidsmetode

I dag finnes det svært lite materialdata for plast- og komposittmaterialer, utsatt for temperaturer vanlig i arktiske strøk. Denne masteroppgaven tar for seg denne problematikken. Hovedmålsettingen til oppgaven er:

***«Metodeutvikling for kartlegging av elastisitetsmodulen i arktiske temperaturer til resirkulerte og kompositt polymerere»***

Masteroppgaven er utført gjennom ulike arbeidsmetoder. Følgende metoder er litteraturstudier, produktutvikling, konstruksjon av prototype, testing og analyse.



## 2 TEORI

### 2.1 Materialer i kulde

Arktisk og Antarktisk er de kaldeste områdene på jordkloden og kjennetegnes dermed av lave temperaturer og kjølig klima. Ifølge en artikkel i aftenposten ble jordas kulderekord satt i innlandet på Antarktisk, denne viste  $-93^{\circ}\text{C}$  grader (Wright 2013).

I de nordlige områdene rundt Arktisk er det dessuten store variasjoner i temperaturene. Dette stiller store krav til egenskaper for materialer i konstruksjoner som benyttes i disse områdene. Siden temperatur sier noe om de indre bevegelsene på atomnivå, har det mye å si for materialeegenskapene. I bearbejdede materialer endres materialeegenskaper seg ved synkende temperatur. Generelt sett vil hardheten, elastisitetsmodulen og flytegrensen øke, det vil si at stivheten til materialet øker. Samtidig vil bruddstyrken, Poisson forholdet og det spesifikke varmekapasitet til materialet minke. Ved kalde temperaturer vil mange materialer stå i fare for sprø brudd ved lave temperaturer. Dette er en sikkerhetsrisiko ved bruk av materialer i arktisk klima. Dette forårsaker begrensninger og utfordringer på den arktiske sokkelen. Videre vil generelle materialeegenskaper og temperaturpåvirkning på metaller, polymer- og komposittmaterialer utredes kort. Oppgaven tar for seg temperaturer fra  $15\pm 5^{\circ}\text{C}$  grader til  $-80\pm 5^{\circ}\text{C}$  grader, da det er begrensninger på fryselaboratoriet som er benyttet i forsøkene.

Det finnes mye forskning på lavere temperaturer enn spekteret nevnt over, det er et eget segment som tar for seg materialer under påvirkning av kryogeniske temperaturer. Kryogeniske temperaturer tar for seg spekteret 77K og lavere temperaturer (*Polymers at Cryogenic Temperatures* 2013). Dette tilsvarer  $-196^{\circ}\text{C}$  grader og nedover. Dette er spesielt relevant for forskning av materialer til bruk i verdensrommet.

### 2.2 Mekaniske egenskaper

Teori i dette kapitlet er hentet fra generell materiallære, med mindre annet er spesifisert (Callister 1994; Rösler et al. 2007). De mekaniske egenskapene til et materiale er til hjelp når man skal angi hvor godt det fungerer som konstruksjonsmateriale. Mekaniske egenskaper er egenskapene til et materiale når det blir påvirket av ytre

krefter (*Store norske leksikon* 2015). Ytre krefter og last som virker på et materiale skaper spenninger som kan føre til deformasjoner. Deformasjonene kategoriseres enten som elastiske eller plastiske. Elastiske deformasjoner er deformasjoner i et materiale som ikke er varige, mens plastiske deformasjoner er varige deformasjoner. Mikrostrukturen til materialene har mye å si på hvordan de reagerer på spenningene, og vil bli undersøkt nærmere for de ulike materialkategoriene.

Spenning,  $\sigma$ , defineres som:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Kraften,  $F$ , påført på et areal  $A$ , er hovedsakelig strekk-, trykk- eller skjærkraft. Skjærkraften kan også i mange sammenhenger være en type torsjonskraft, altså vridningskraft. I denne oppgaven fokuseres det på elastisitetsmodulen som er i det elastiske spekteret. Når et materiale blir utsatt for krefter som fører til strekkspenninger vil det skape endringer i mikrostrukturen og avstanden mellom atomene i binding vil øke, men i ikke i den grad at det fører til brudd. Dette kalles elastisk deformasjon. Når et legeme deformeres vil det føre til tøyninger og spenninger. Ingeniør tøyning,  $\epsilon$ , er nominell tøyning som defineres slik:

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Det vil si at man ser på lengdeendring over opprinnelig lengde. Tøyning er uten enheter, men blir ofte oppgitt som  $m/m$  eller ved prosent. Elastisk deformasjon forbindes ofte med strekkrefter som virker på et materiale.

Poissons forholdet ser på forholdet mellom elastisk forlengelse og tverrkontraksjonen som oppstår i et objekt som utsatt for en strekkraft.

Hardheten i et materiale måler materialets evne til å tåle motstand mot inntrengning av et hardt legeme og påføre plastisk deformasjon. Hardheten kan testes gjennom ulike tester som Rockwell, Brinell, Knoop og Vickers.

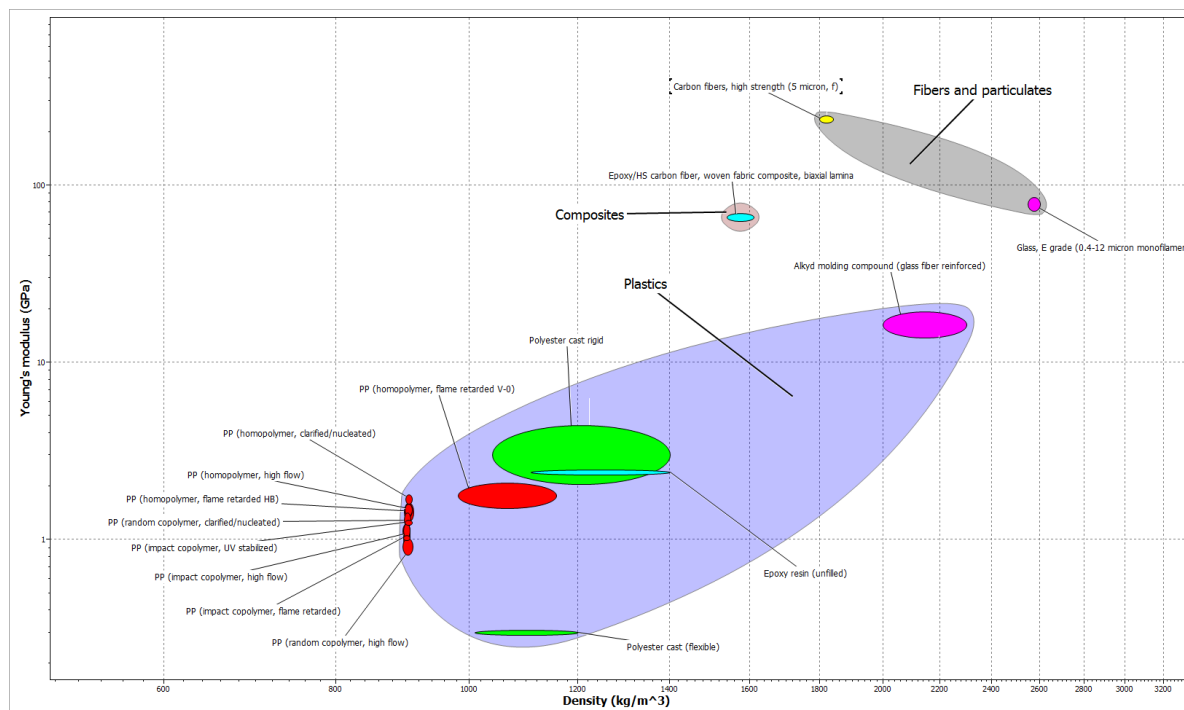


## 2.2.1 Sammenhengen mellom spenning og tøyning

Sammenhengen mellom spenning og tøyning er gitt ved lineær elastisk, ikke-lineær elastisk og plastisk tøyning. I det lineærelastiske området vil spenningen være proporsjonal med tøyningen. For lineærelastiske materialer finnes det samme forholdet i Hookes lov. Hookes lov er generalisert for isotrope materialer, det vil si materialeegenskapene ikke varierer avhengig av retning i materialet. Man kommer da frem til at proporsjonalitetskonstanten og stigningen,  $E$ , som representerer den elastiske deformasjonen i det lineærelastiske området til å være elastisitetsmodulen, med andre ord Youngs modulus. Elastisiteten er altså stivheten til et materiale og forteller noe om hvor motstandsdyktig materialet er mot elastisk deformasjon. Det tilsier at med stigende  $E$ -modul vil stivheten til materialet og dets evne til å motstå elastisk deformasjon synke. Elastisitetsmodulen ( $E$ -modulen),  $E$ , er gitt ved:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Generelt er  $E$ -modulen for keramiske materialer mye høyere for metaller og lavere for polymermaterialer. Den høyeste kraften et materiale tåler før deformasjonen går fra elastisk til plastisk er kalt flytstyrken. Bruddstyrke er den kraften som kreves for at materialet går i brudd. Dette gir at et materiale med høy stivhet og  $E$ -modul er i større fare for brudd. I figuren kan  $E$ -modulen for materialene i prosjektet ses.



Figur 2-1:  $E$ -modul vs tetthet for testmaterialene hentet fra CES Edupack

### 2.2.2 Brudd og kulde

Brudd kan skilles mellom seigt eller sprøtt brudd. Dette skillet kommer av hvor godt materialet motstår plastisk deformasjon. Alle typer brudd har to faser, sprekkdannelse og sprekkevækst. Type brudd avhenger i stor grad av sprekkdannelsen og den plastiske deformasjonen. Dersom det forekommer mye plastisk deformasjon før brudd, har man som regel et duktilt brudd. Duktile brudd med relativ sakte sprekkevækst er stabile, er sprekkevæksten relativ høy og det forekommer brudd har man sprøtt brudd. Sprøtt brudd oppstår gjerne uten forvarsel.

Sammenhengen mellom temperatur og brudd er forsket mye på, en metode for å teste dette er charpy tester. Generelt ser man at temperaturen og energiabsorpsjon er en faktor når man beveger fra seigt til sprøtt brudd. Ved høyere temperaturer ser man at det krever mye større energi og det finnes en korrelasjon med duktile brudd. Det kreves mye mindre energi for å skape brudd når temperaturen synker og det oppstår i større grad sprø brudd. Innledningsvis nevnes det i dette kapitlet at materialer blir stivere ved lavere temperaturer, derfor vil materialer med høy stivhet og E-modul stå i større fare for brudd.

Utmattingsbrudd oppstår etter gjentatte spennings variasjoner på et element. Foregår det spenningsvariasjoner ved endring av temperatur? Holder lasten statisk. Teste for spenningsvariasjoner, noe som kan gjøre utmattingsbrudd til en sikkerhetsfaktor.

Normalt sett vil temperaturendringer være en årsak til utmatting, men forskning på dette ligger oftest på varmetemperaturer. Temperaturendringene fører til utvidelse og sammentrekning av materialet som påvirker spenningskonsentrasjonene i materialet, se mer om dette under termiske materialegenskaper.

### 2.2.3 Termiske materialegenskaper

Termiske materialegenskaper tar for seg hvordan temperaturen i omgivelsene påvirker et materiale. Dette er faktorer å ta hensyn til under forsøkene.

**Varmekapasitet eller spesifikk varmekapasitet** forklarer materialets evne til å absorbere energi fra omgivelsene. Ofte blir denne illustrert ved energien som kreves for

å øke temperaturen i materialet med en grad. Varmekapasitet ser på en mol av et materiale, mens spesifikk varmekapasitet ser på ulike enheter av massen.

De fleste materialer ekspanderer når det blir varmet og trekker seg sammen ved kjøling, denne egenskapen blir kalt termisk ekspansjon. **Termisk ekspansjon** påvirker et materiale ved endring av volum. Endringen skjer ved gjennomsnittlig endring i avstanden mellom atomene, denne er forskjellig for ulike type materialer og er avhengig av atombindingen.

**Termisk konduktivitet** er egenskapen et materiale har for å overføre varme fra regioner med høy temperatur til regioner med lav temperatur. Konduktiviteten eller fluksen i faste materialer foregår gjennom vibrasjonsbølger og bevegelse av frie elektroner. For polymermaterialer foregår det ved hjelp av rotasjon av molekylljedene.

**Termisk spenning** er spenninger skapt i materialet på grunn av temperaturendringer. Spenningene som oppstår kan illustreres ved at for eksempel et materiale blir varmet av omgivelsene. Materialoverflaten vil ekspandere mer enn de indre delene av materialet og skape trykkspenninger i materialeoverflaten. Disse spenningene kan forløses ved brudd eller uønsket plastisk deformasjon, dette avhenger av duktiliteten til materialet. Ofte ved rask nedkjøling av sprø materialer det fare for brudd på grunn av strekkspenningene i materialoverflaten.

## 2.3 Metaller

80% av elementene grunnstofftabellen er metaller, her ser vi på rene metaller og legeringer. Metaller har til felles at de lett lager metallbindinger med andre metaller og dette karakteriserer mange av dens egenskaper. Denne karakteriseres av at valenselektronene lager en sky og kan flyte fritt i metallgitteret. Metaller er krystallinske, og har ulike krystallstrukturer.

Metaller kjennetegnes ved høy tetthet, smeltepunkt og er gode ledere for varme og elektrisitet. Termisk konduktivitet i metaller avtar med økende temperaturer og øker med minkende temperaturer. Når temperaturen synker vil materialeegenskaper som styrke, hardhet, sprøhet øke på grunn av at ledeevnen til elektronene blir redusert. Dette

fører til at metaller ikke egner seg godt i bruk ved lave temperaturer. Rustfritt stål er en metallegering som har egenskaper som egner seg godt for kuldetemperaturer

Metallegeringer kan deles inn i ferrittiske og ikke ferrittiske. Ferrittiske metallegeringer har jern som hovedkomponent. Stål er en kjent ferrittisk legering. Ferrittiske legeringer har et vidt bruksområde med et stort spekter av mekaniske og fysiske egenskaper. Den største ulempen med slike materialer er korrosjon. Korrosjon foregår når metallet blir nedbrutt av omgivelsene gjennom oksidasjon, prosessen skjer raskere ved våt korrosjon når luften blir blandet med vann. Rustfritt stål er en legering som er høyt motstandsdyktig mot korrosjon og et metall som egner seg i bruk i lavere temperaturer.

## 2.4 Polymerer

Polymerer er en samlebetegnelse for materialer med kjedeformede molekyler, som er bygd opp av enheter med lik struktur. Vi skiller mellom organiske og uorganiske materialer. Når molekylkjeden legger karbonatomet til grunn er materialet organisk. Uorganiske molekylkjeder har ikke karbonatomet i strukturen sin. Bindingene mellom atomene er kovalentbindinger og disse er primærbindingene. Sekundærbindingene er mellom kjedemolekylene. Primærbindingene er mye sterkere enn sekundærbindingene. Molekylstrukturen for ulike polymerere skiller hvordan materialegenskapene er for de ulike kategoriene. Det skilles mellom grenet, forgreinet, krysslinket og nettverksstruktur.

Polymermaterialer kan kategoriseres i hovedgruppene termoplast, herdeplast og elastomerere. Forskjellen mellom termoplast og herdeplast ses i molekylobindingen. Termoplast består av lineære molekylkjeder (forgreininger er inkludert) med sekundærbindinger. Når materialet varmes opp, brytes de sekundære bindingene. Når termoplasten avkjøles, gjenoppstår de sekundære bindingene igjen. Herdeplast består av en tverrbundet nettverksstruktur. Når herdeplasten varmes over en viss grad brytes primærbindingene og materialet blir ødelagt. Termoplast er smelteplast og kjennetegnes ved at de er myke, skjærbare, kan smeltes og omsmeltes. Mikrostrukturen er ikke krysskoblet. Herdeplast er harde, ikke smeltbare og danner nettverk ved høye temperaturer. Elastomerere er gummielastiske polymerere som består av oppviklede og infiltrerte kjeder.

Temperaturpåvirkning av polymerer ses på molekylnivå. Generelt vil molekylene ha en svak vibrasjon, dette er varmesvingninger, over det absolutte nullpunkt på  $-273,57^{\circ}\text{C}$ , graden av svingninger varierer med temperaturen. Når det vibrerer så mye at molekylkjedene begynner å rotere, er materialet mykt. Glasstemperaturgrensen er under denne og kjennetegnes ved at materialet er hardt og sprøtt. Dette er interessant for endringene i E-modul, da materialen her kjennetegnes ved høy E-modul og liten bruddforlengelse. Når varmesvingninger fører til at sekundærbindingene glir i forhold til hverandre har man kommet til smeltetemperaturen. Det er styrken på bindingene mellom sekundærbindingene som avgjør hvor høy smeltetemperatur som kreves.

Polymerere kan være krystallinske, ikke krystallinske eller en blanding. Det skilles mellom amorfe og krystallinske plastmaterialer. Materialene kjennetegnes ved hvor flytende de er. Amorfe plastmaterialer blir ikke ordentlig smeltet. Forskjellen på amorf og krystallinsk ses på hvordan molekylkjedene ligger ordnet på, parallelle molekylkjeder kjennetegner en krystallinsk struktur, dersom det er uorden er det en amorf struktur. Krystallinske materialer har høyere smeltetemperatur enn amorfe. Økning i krystallinitet gir også høyere E-modul.

E-modulen i plastmaterialer varierer med temperaturen. Temperaturer lavere enn glasstemperaturen kjennetegnes med høy E-modul og lav bruddforlengelse. Mellom smelte- og glasstemperaturen er E-modulen lav og har høy bruddforlengelse. Over smeltetemperaturen eksisterer det ingen E-modul.

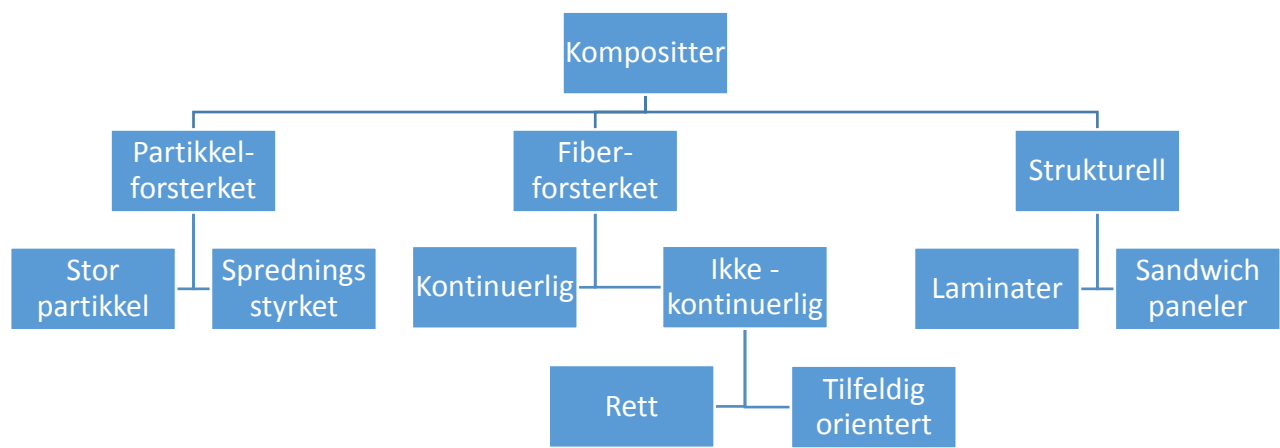
**Polypropylen(PP)** er en termoplast. Plasten har en glasstemperaturgrense på  $-18^{\circ}\text{C}$  grader, hvor materialet blir hardt og sprøtt. Smeltetemperaturen ligger på  $160^{\circ}\text{C}$  grader.

### 2.4.1 Resirkulerte plastmaterialer

Termoplaster defineres av at de er smelteplast og kan omsmeltes. Dette åpner opp for resirkulasjon og gjenbruk. Det er blitt større fokus på resirkulering, og mye husholdningsplast blir i dag resirkulert. Resirkulering er en fordel da man sparer energi på gjenvinne materialer som allerede er produsert. Typiske produkter som er av PP er isbokser, ketchupflasker og innpakkingsplast. Resirkulert PP kan gjenvinnes og brukes til å for eksempel støvsugere eller kontorstoler(Ukeblad).

## 2.5 Kompositter

Komposittmaterialer er et ortotropisk materiale. Det vil si det har forskjellige mekaniske egenskaper i forskjellige retninger. Komposittmateriale er bestående av flere *faser*, som utnytter egenskapene hver fase har. Bakgrunnen for denne kombinasjonen er å skape bedre materialegenskaper enn det en fase alene har, dette fremkommer gjennom prinsippet for kombinert aksjon (Callister 1994; Naturvernforbundet 2016). Det finnes komposittmaterialer bestående forskjellige typer matrisematerialer som metalllegeringer, keramikk og polymerer.



Figur 2-2: Kategorisering av ulike typer kompositt

Forsterkningene som brukes i komposittene kan kategoriseres som vist i Figur 2-2: Kategorisering av ulike typer kompositt. Det fokuseres på fiberforsterkede komposittmaterialer i denne oppgaven. Denne kompositten består av matrisemateriale som er kontinuerlig og omringer den forsterkende fiberen. Det er en egen vitenskap å designe komposittmaterialer for å fremme ulike mekaniske egenskaper. Mekaniske egenskaper ved komposittmaterialer avhenger av flere faktorer som type matrise, type fiber, andel fiber, fiber lengde, fiberretning, fiber distribusjon, fiber styrke og temperatur. Fiberforsterkede kompositter deles opp i kontinuerlig og ikke-kontinuerlig. Fiberlengden avgjør kategoriseringen. Hvis fiberlengden er mye lengre enn en kritisk lengde, kategoriserer man kompositten som kontinuerlig. Kontinuerlige kompositter som regel en retning på fiberen. Kritisk fiberlengde er avhengig av fiberdiameter, strekkspenning og skjærspenning til fiberen. Fiberlengden påvirker egenskapene avhengig av hvilken retning en kraft på påført kompositten.

De fleste egenskaper er anisotropiske og følger den generelle trenden med økning i E-modul og flytstyrke. Det er hovedsakelig forsterkningsmaterialet, fiberen som forårsaker de anisotropiske egenskapene til kompositten. Et kompositt materiale som er lastet langs fiberretningen tåler mye mer enn når lasten er påført normalt på. Når last er påført 90 grader på fiberretningen, slik det blir gjort i forsøkene, vil spenningen i begge komponentene av komposittmaterialet være likt. Spenningen i materialet vil begrenses av matrisematerialet, da denne er lavere enn spenningen i fiberen.

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma$$

Denne tilstanden er kalt isostress. Denne sammenhengen for spenningen i materialet, kan man bruke til å utlede hvordan man regner ut E-modulen til komposittmaterialet og er gitt av formelen:

$$E_c = \frac{E_m \times E_f}{V_m E_f + V_f E_m}$$

Ikke- kontinuerlig fiberkompositter kategoriseres etter fiberorientering; tilfeldig orientert eller orientert parallelt.

Eksempler på ulike fibre som brukes som forsterkninger er: E-glass, karbon, silikon, organiske fibre(aramid) og silisiumkarbid(SiC).

Ulike polymermatriser deles inn i herdeplaster som epoxy, polyester, vinyl ester og termoplaste som Polyeter eter keto(PEEK), polypropylene, nylon 6.6. Denne oppgaven tar kun for seg polymermatriser i herdeplast, henholdsvis epoxy og polyester.

Fiberarkitekturen kan kategoriseres forskjellig. Lange fibre kan ha ulike laminatlag i strukturen sin. Det er en rekke forskjellige type laminater med ulike viklingsgrader(fiberretning/orientering). Kompositten kan være bygd opp i flere lagdelinger med ulik fiberretning, type fiberlag og viklinger. Denne strukturen påvirker volumfraksjonen til kompositten.





## 3 UTVIKLING AV TESTPLATTFORM

### 3.1 Innledning

I dette masterprosjektet skal det kartlegges ringstivhet til ulike plastrør for å undersøke materialenes E-modul. For å gjennomføre dette er det behov for å utvikle en testplattform og tilhørende metode. Metodeutviklingen går ut på å designe testplattformen som kan brukes til mekanisk testing. Testplattformen skal benyttes i et frysekammer, og hensikten er å bevare forsøksomstendighetene til tilsvarende apparater som blir brukt for trykktesting ved romtemperatur. Den endelige løsningen av testplattformen skal produseres og benyttes til mekanisk kartlegging av testmaterialene. Utvikling av testplattformen ble gjort i samarbeid med Simen Stusvik Haug, hvor det ble foretatt en idemyldring angående design og materialvalg. Testplattformen ble visualisert og dimensjonert gjennom dataassistert konstruksjon(*DAK*) ved hjelp av *SolidWorks*.

#### 3.1.1 Bakgrunn og konsept

Bakgrunnen for metodeutviklingen er en testplattform som kan være funksjonell i omgivelser som simulerer arktisk klima. Tradisjonelle apparater som tester de aktuelle materialegenskapene er som regel egnet i romtemperatur og gjerne immobile. Ofte er det store maskiner laget av materialer som for eksempel stål. Stålets materialegenskaper blir påvirket ved veldig lave temperaturer og stål egner seg ikke. Størrelsen til apparatene, immobiliteten, variable materialegenskaper og rammebetingelsene til forsøket utelukker bruken av disse apparatene i prosjektet. Det er begrenset med materialdata om polymermaterialer ved kuldegrader. Formålet med konseptet bak testplattformen er å benytte denne til mekanisk testing ved lave temperaturer.

#### 3.1.2 Mål og begrensninger

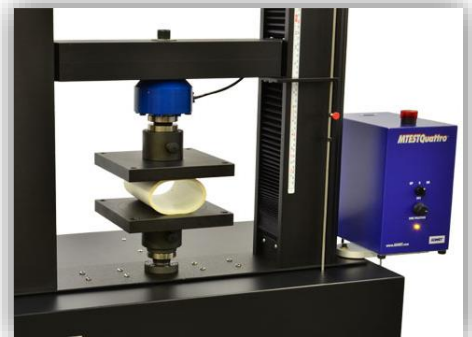
Hovedformålet med testplattformen er å utforske materialegenskaper gjennom kartlegging av ringstivhet til diverse rør laget av polymerrør, videre kalt plastrør. Begrensninger til produktutviklingen er satt av prosjektvarigheten og forsøkets rammebetingelser. Dette inkluderer tilgang til verksted, fagpersonell, testrør, optimale

verktøy for produksjon av testplattformen og tilgang på riktig byggemateriale. Komplexiteten på produktet skal være enkel og økonomisk. Informasjonen gitt i dette kapitlet, samt vedlegg skal være tilfredsstillende til re-produksjon av tilsvarende forsøksapparater. Begrensninger er gitt av instruksjoner fra standarder og informasjonen i hovedoppgaven.

## 3.2 Beskrivelse

### 3.2.1 Bruksområder og konkurrerende produkter

Bruksområdet for testplattformen er til forskning. Målgruppen er rettet mot studenter. En stor andel forskning som blir videreutviklet, starter i utdanningssammenheng. Testplattformen skal være et enkelt reproducerbart økonomisk alternativ, til en rekke mer kostnadsrike konkurrerende produkter i markedet med høyere produksjonskostnad. Budsjettene på ulike utdanningsinstitusjoner er varierende og medfører at tilgangen til tilsvarende produkter innen konkurrentkategorien er begrenset.



*Figur 3-1: Konkurrerende forsøksapparat til trykktesting*

Universale trykk og strekk prøvemaskiner er eksempler på andre produkt i samme nisje. På Figur 3-1: Konkurrerende forsøksapparat til trykktesting kan det observeres et eksempel på et konkurrerende produkt. Bildet hentet fra Admet, en produsent innen materialtestingsapparater, fremviser et apparat konfigurert for å sjekke materialegenskaper til plastrør (*Plastic pipe testing, compression machine* 2016). NMBU har også tilgang til et annet konkurrerende



*Figur 3-2: Forsøksapparat for trykktesting*

apparat som kan brukes til å teste ringstivhet. Testplattformen kan ses på Figur 3-2: Forsøksapparat for trykktesting. Denne testplattformen skulle i utgangspunktet bli brukt som et referanseapparat for å kvalitetssikre dataene i romtemperatur. På grunn av

utilstrekkelig tilgang til vektmanualer tilpasset testplattformen for å oppnå den nødvendige diametriske defleksjonen, ble dette valgt bort.

### 3.2.2 Krav og spesifikasjoner

I punkt «5 Apparat» i standarden BS EN ISO 9969: 2007, stilles det krav og noen gitte spesifikasjoner for testplattformen i forsøket. I metodeutviklingen fokuseres det at produktet oppfyller disse kravene. Standarden spesifiserer at forsøket skal utføres av to harde og rigide plater, slik at den nødvendige kraften kan påføres testrøret. Disse platene må ha flate, glatte og rene overflater for kontakt med testmaterialet. Stivheten og hardheten av platematerialet må være slik at det ikke fører til deformasjon, i den grad at det går utover resultatene. Lengdene på platene skal være minst like lange som teststykkene. Bredden av hver plate skal ikke være mindre enn bredden til kontaktflaten av teststykkene når de er påført kraft, pluss 25 mm. Det er spesifisert at testplattformen skal ha avstandsmål, det vil si måleenheter for å måle defleksjonsmål av teststykkene. Her velges manuell måling med målestokk.

Dimensjonene til testplattformen er gitt av testrørene, vektmanualene og frysekammeret som forsøkene skal utføres i. I produktutviklingen er det lagt vekt på å kunne bruke den samme testplattformen til alle forsøkene.

- Mål av frysekammer hvor testplattformen skal plasseres: 1 m × 1 m × 1 m.
- Mål av diameteren til de største vektmanualene:  $d = 360$  mm
- Mål av testrørene kan ses i Tabell 4-1: Materialinfo om testrør.

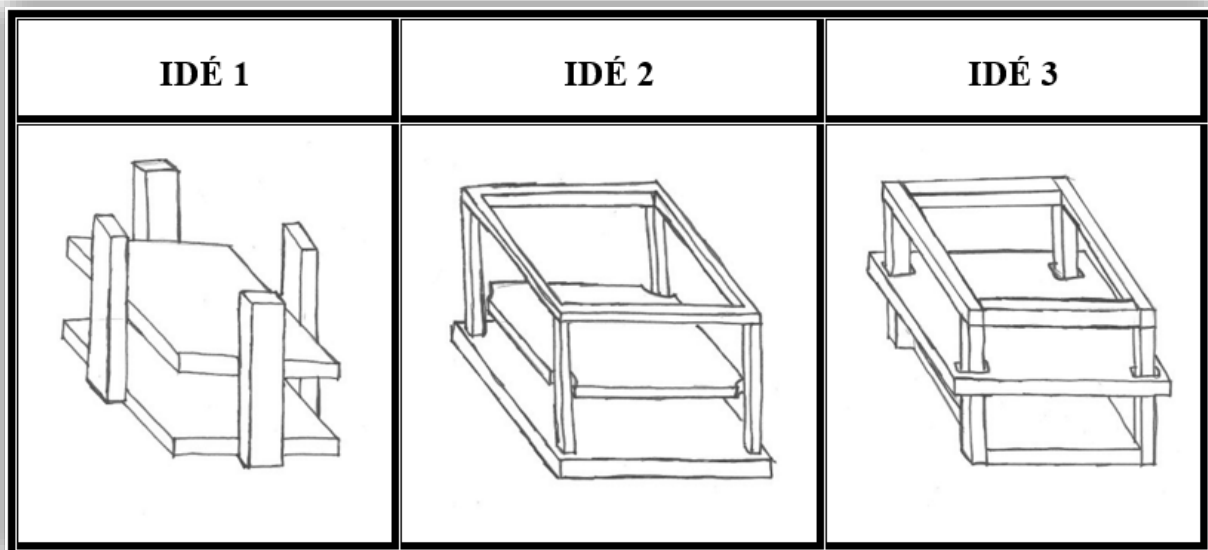
Videre i utviklingen skal det legges vekt på funksjonalitet, omgivelsene og temperaturkravene forsøket stiller til testplattformen som blir brukt.

- Temperaturintervall:  $-80\text{ °C} \leq T \leq 25\text{ °C}$
- Tåle frost og fukt
- Bevegelse i vertikal retning
- Mobilt

### 3.3 Design

Design av produktet er veldig fritt, og kan løses på flere måter. Det viktigste er at krav og spesifikasjonene gitt over blir opprettholdt. I designfasen er det hovedsakelig fokusert på at det er to parallelle plater som påfører en jevnt fordelt last på testrøret slik at defleksjon oppstår.

#### 3.3.1 Designalternativer og evalueringer av løsninger



Figur 3-3: Designalternativer for forsøksapparat

I idémyldringsfasen på designdelen så man i utgangspunktet på Idé 1 og Idé 2. Det ble bestemt å lage prototyper av disse. Her skiltes samarbeidet med medstudent Haug, i



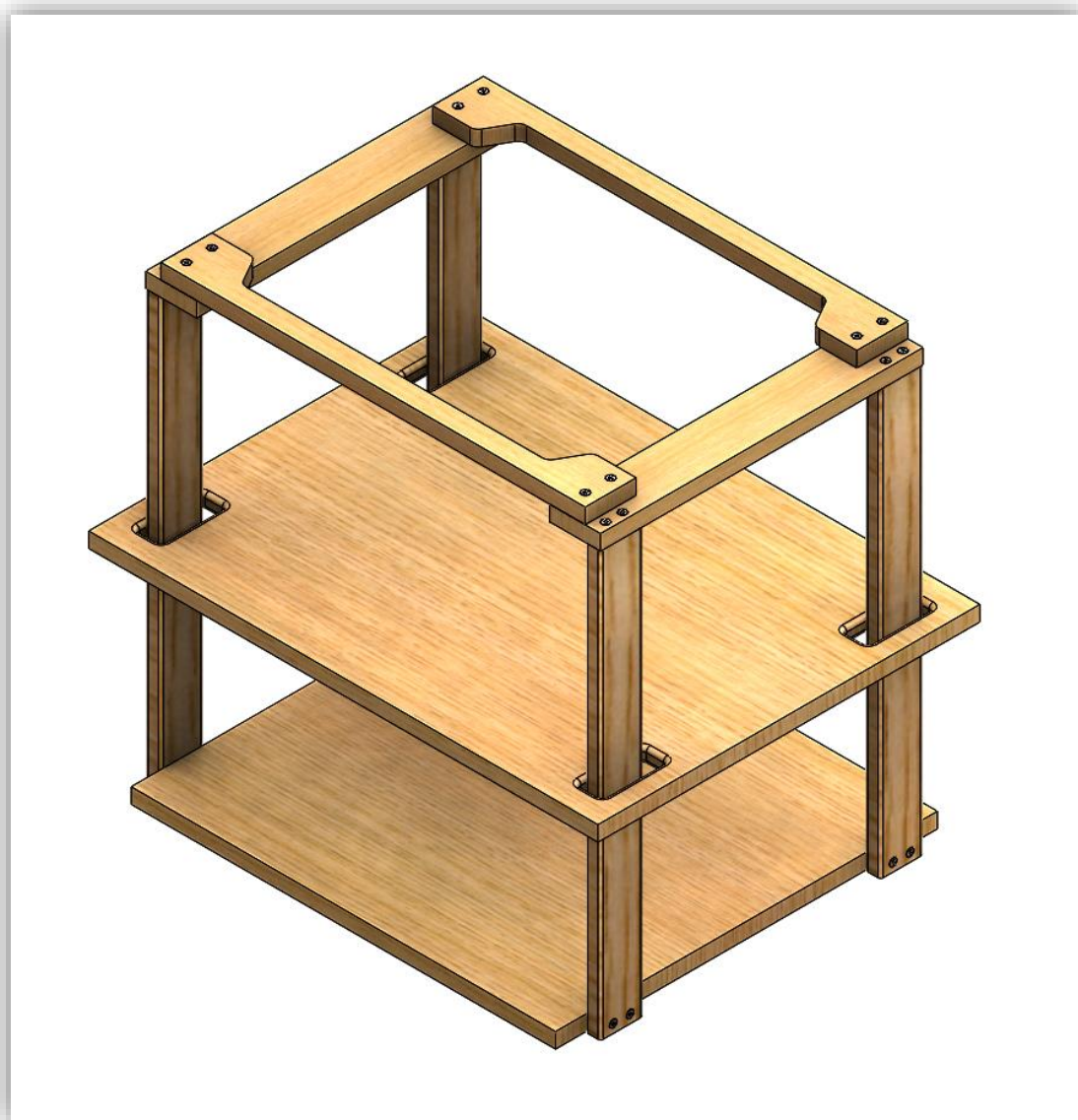
Figur 3-4: Prototype for testing av funksjonalitet

forhold til design og man gikk videre med hver sin idé. Prototypen av Idé 2 ble testet for funksjonalitet, se Figur 3-4: Prototype for testing av funksjonalitet. Ved testingen dukket det opp flere ulemper. Platen som skulle belastes, det vil si den bevegelige topplaten var høyt ustabil når det ble plassert over et rør. Det ble raskt konkludert med at dette var en sikkerhets-risiko som måtte elimineres. Testingen viste seg at topplaten trengte å forbedres med en type

festemekanisme for å sikre homogen vertikal bevegelse slik at platen ble holdt mest mulig horisontal. Idéen ble videreutviklet og man eliminerte i stor grad de ovenstående ulempene til idé 2. Det ble valgt å gå videre med Idé 3 fra Figur 3-3: Designalternativer for forsøksapparat som endelige løsning og produkt.

### 3.3.2 3D modeller av endelig løsning

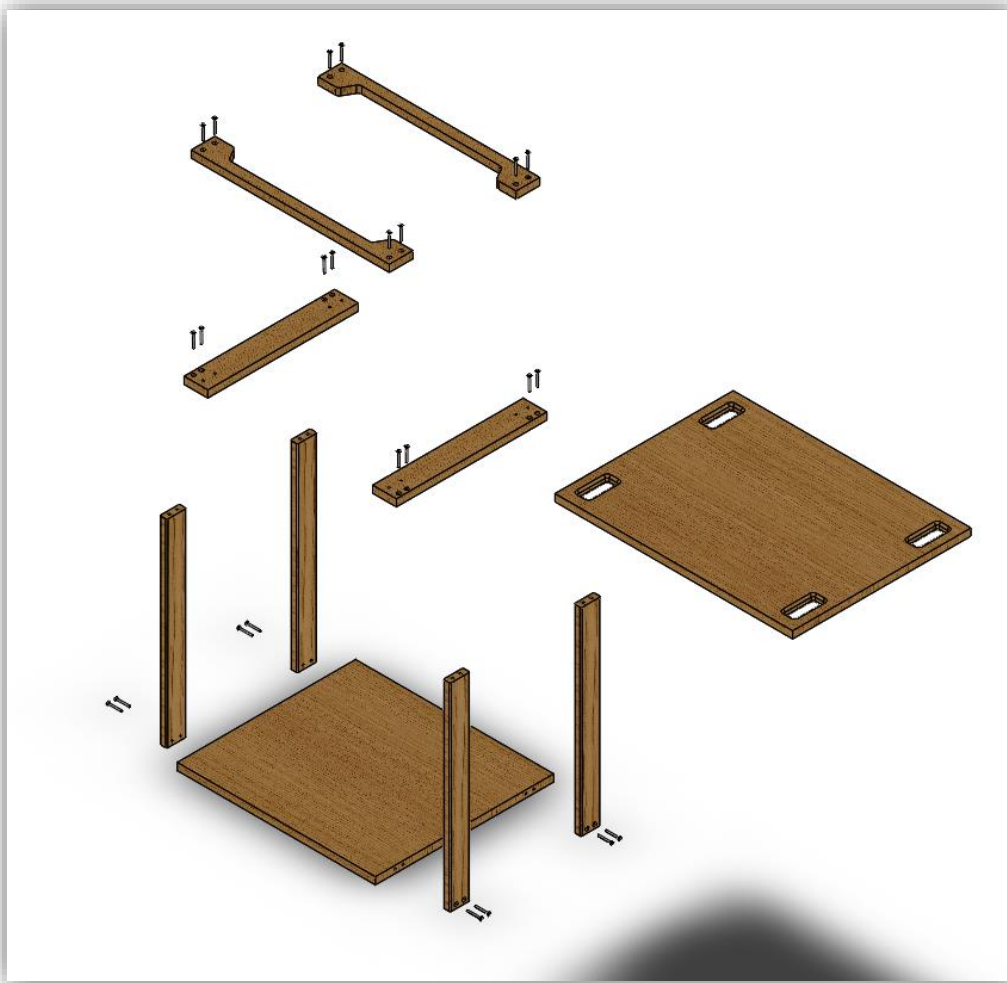
I dette kapitlet visualiseres 3D fremstillinger av den endelig løsningen. Se Vedlegg C – Metodeutvikling: Detaljtegninger og sammenstillingstegning for testplattformen.



*Figur 3-5: 3D fremstilling av forsøksapparat*



*Figur 3-6: 3D fremstilling av forsøksapparat fra ulike perspektiv*



Figur 3-7: Eksplosjonstegning av forsøksapparat

### 3.4 Valg av materiale

Materialproblemstillingen hos de konkurrerende produktene i markedet er blant hovedårsakene til metodeutviklingen. For at forsøkene skal utføres tilfredsstillende, stilles det en rekke krav til valg av materiale, se kapitlet om Krav og spesifikasjoner. Det viktigste er materialegenskapene i forhold til temperaturpåvirkning og styrke/hardhet, da disse spiller direkte inn på resultatene i forsøkene. Det er også andre faktorer å ta hensyn til som pris, tilgjengelighet og bearbeiding. I dette kapitlet ses det nærmere på hvordan de ulike faktorene påvirker materialet i forsøket. Det er mange materialer som tåler kuldetemperaturer til en viss grad. Materialet til forsøket må tåle temperaturer ned til  $-80^{\circ}\text{C}$  grader. Vi velger å se generelt på trevirke til testplattformen da disse tåler kulde

godt, samt forskjellige elementer til bruk som festemekanisme. Til slutt utføres en analyse av de relevante kriterier og attributter som det setter til materialene, for endelig valg.

### 3.4.1 Materiale til forsøksapparat: Tre

Teori om trematerialer er hentet fra «Forest products and wood science: an introduction» (Shmulsky & Jones 2011).

Diverse faktorer å ta hensyn til:

- **Fuktinnhold i tre og atmosfære:** Trematerialer består av en prosentandel vann, dette er fuktinnholdet i materialet. Tre er hygroskopisk, det vil si at materialet har evnen til å utligne fukt med atmosfæren den blir oppbevart i. Dersom trematerialet er tørt og blir oppbevart i et fuktig miljø vil den trekke til seg vanndamp til det blir likevekt. Trevirke som er oppbevart i uteklima, som deretter blir oppbevart i inneklimate kan påvirke trevirket ved at det gir fra seg vanndamp. Dette kan påvirke trevirket ved at det eventuelt deformeres i noe grad.
- **Temperaturpåvirkning:** Variabelen i forsøkene er temperatur. Hvordan reagerer tre på endringer i temperatur. Fuktinnholdet i trevirket vil bli påvirket av temperaturendringene. Ved høyere temperaturer vil vanndamp fordampe og føre til volumkrymping. Ved lavere temperaturer kan fukten i trematerialet krystallisere og bli sprøtt. Dersom atmosfæren er mer fuktig enn trevirket, kan det føre til volumutvidelse ved at trevirket tar til seg vanndamp.

Våre forsøk vil ha sykler hovedsakelig i minusgrader, forsøkene skal både utføres i en lukket atmosfære og åpen. Denne påvirkningen vil antas det vil påvirke trevirket noe mindre grad og valgt å se bort ifra.

- **Deformasjon i forsøksmateriale:** Tre er et anisotrop materiale, i den sammenheng er det valgt å fokusere på deformasjon normalt på fibre ved hjelp av Brinell hardhet, da hardheten vil være minst i denne retningen. Ulike tretyper har ulik grad av hardhet, og måten treet er bearbeidet på vil også avgjøre hardheten.



### 3.4.2 Materiale til festemekanisme på forsøksapparat:

Det er blitt tatt hensyn til at man kan benytte seg av ulike festemekanismer som lim, treplugger og skruer. Videre ses det på fordeler og ulemper ved de ulike.

- **Alternativ 1: Lim.** Det finnes limtyper som tåler kuldetemperaturer godt. Alternativene, etter undersøkelse gjennom kontakt av limleverandøren Loctite, er at lim som egner seg for lave temperaturer fører til store kostnader og må spesialbestilles fra Tyskland, da disse limtypene ikke selges kommersielt.
- **Alternativ 2: Treplugger.** Treplugger er forholdsvis rimelig og enkelt å få tak i. Ulempen ved trepluggene er funksjonalitet og at disse fungerer best sammen med lim.
- **Alternativ 3: Skruer.** Det tredje alternativet er bruk av skruer. Siden forsøkene består av sykler mellom kuldegrader og varmegrader, vil det føre til frost og dugg. Her må riktige skruer anvendes. Rustfritt stål med lavt nikkelinhold er et materiale som egner seg i det aktuelle temperatursjiktet

### 3.4.3 Seleksjonsmatrise

Dette kapitlet tar for seg analysen utført for valg av type tresort og ved valg av festemekanisme. Materialdata i matrisen er hentet fra CES Edupack 2015.

Ved seleksjon av tresort til forsøkstestplattformen er det valgt å se på kriteriene som er mest relevant for forsøket, tilgjengelighet hos trevarehandlere og pris på materialet. Se Tabell 3-1: Seleksjonsmatrise for forsøksapparat for detaljer. Attributtene er vektet etter relevans. Fra seleksjonsmatrisen ser vi at eik kommer best ut som tresort for utførelse av forsøket.

Ved seleksjon av festemekanisme er det valgt å se på funksjonalitet, tilgjengelighet og pris som kriterier. Se Tabell 3-2: Seleksjonsmatrise for festemekanisme for detaljer. Attributtene er her også vektet etter relevans. Lim ble raskt ekskludert fra seleksjonsprosessen etter undersøkelse av bestilling, leveringstid og pris. Skruene kommer best ut i matrisen.

Attributt	Vekttall	Materiale: Forsøksapparat		
		Eik	Bjørk	Furu
<b>Brinell Hardhet (MPa)</b>	0,4	37,2	27,3	24,5
Vektet delsum 1 (0-14,9)		14,9	10,9	9,8
<b>Tilgjengelighet</b>	0,3	0	1	1
Vektet delsum 2 (0-0,3)		0	0,3	0,3
<b>Pris (NOK/kg)</b>	0,3	11,9	4,0	4,0
Vektet delsum 3 (0-3,6)		3,6	1,2	1,2
*(Laveste pris: 3,6-delsum)		0,0	2,4	2,4
<b>Vektet totalsum</b>		<b>14,9</b>	<b>13,6</b>	<b>12,5</b>

Tabell 3-1: Seleksjonsmatrise for forsøksapparat

Attributt	Vekttall	Materiale: Festemekanisme		
		Lim	Treplugger	Skruer
<b>Funksjonalitet(1-3)</b>	0,4	2	1	3
Vektet delsum 1		0,8	0,4	1,2
<b>Tilgjengelighet(0-1)</b>	0,3	0	1	1
Vektet delsum 2		0	0,3	0,3
<b>Pris (1-3)</b>	0,3	3,0	1,0	2,0
Vektet delsum 3 (0-0,9)*		0,9	0,3	0,6
*(Laveste pris: 0,9 - delsum)		0,0	0,6	0,3
<b>Vektet totalsum</b>		<b>0,8</b>	<b>1,3</b>	<b>1,8</b>

Tabell 3-2: Seleksjonsmatrise for festemekanisme

- **Konklusjon av valg av materiale:** Seleksjonsmatrisen for materiale til forsøks-testplattformen viser at eik er det beste alternativet. På grunn av manglende tilgjengelighet på eik, ble bjørk valgt. Valg av festemekanisme er basert på seleksjonsmatrisen for festemekanisme og valget falt på skruer av rustfritt stål. Seleksjonsmatrisen tar kun for seg materialene som vil bli brukt i en endelig testplattform.

### 3.5 Produksjon

Testplattformen ble bygget ved NMBUs verksted. Treverk og skruer er generelt enkle byggematerialer. Ved bygging av prototype ble det ikke tatt hensyn til type materiale og forefallende materiale på verkstedet ble tatt i bruk.

Ved lagring av treverk etter innkjøp til testplattformen, ble denne stående vertikalt i et par døgn i romtemperatur. Dette førte til at platen ble bøyd og måtte rettes ut manuelt med statisk trykklast. Dette førte til noen forsinkelser i planlagt produksjonsprosess.

Treverket i bjørk var av typen hobbyplate som er relativt enkle å arbeide med. Kutting ble gjort med både elektrisk sag og håndsag. For festing av skruer ble det først boret hull før skruene ble skrudd fast. Ved produksjon ble det gjort noen dimensjonsendringer i kutting og sammensetning av de ulike delene ved festet på toppen av testplattformen. Denne delen er mest tiltenkt for å stive opp testplattformen og for å øke stabiliteten. Endringene ble gjennomført ettersom det ikke gikk utover funksjonalitet, krav og spesifikasjonene. Formålet med endringene var for maksimal utnyttelse av innkjøpt materiale. Dette kan ses i produktpresentasjonen i Figur 3-9: Bilde av endelig produkt, visualisert med rør.

Testplattformen ble ødelagt ved en ulykke, se Figur 7-1: Ulykke ved avlasting forsøk 1, rør 2 grunnet frost og kondens og måtte repareres.

### 3.6 Produktpresentasjon av forsøksapparat



*Figur 3-8: Rendert bilde av forsøksapparat.*



*Figur 3-9: Bilde av endelig produkt, visualisert med rør.*

## 4 MATERIALE

### 4.1 Innledning

I forsøkene skal et utvalg av testrør testes. Testrørene består av et tilfeldig utvalg av komposittmaterialer og resirkulert plast. I teoridelen står det mer generelt om de ulike materialene i testingen. I dette kapitlet ses det nærmere på materialsammensetning, krav og spesifikasjoner til testmaterialet. Krav og spesifikasjoner er hentet fra standarder for kartlegging av ringstivhet, her er både standarder for termoplast og herdeplast lagt til grunn.

Flertallet av testrørene er av komposittmateriale med ukjent andel fiber og matrisemateriale. Det blir utført materialtesting på disse. Kartlegging av fiber og fiberstruktur foretas gjennom brenntester. Her følges egen standard veiledende for dette. Prosedyren for dette kan ses i kapittel 4.2.1 Bestemmelse av fiberinnhold.

### 4.2 Testrør

Informasjon om testrør og deres dimensjoner kan ses i Tabell 4-1: Materialinfo om testrør. Testrør 1 av karbonfiber er anskaffet hos *Norges Miljø og Biovitenskapelige Universitet*. Testrør 2, 3 og 4, henholdsvis av glassfiber og resirkulert polypropylen er anskaffet hos plastprodusenten *Biobe AS*. Produksjonsdato er ikke kjent, det er heller ikke nominell stivhet/ trykkklasse. I utgangspunktet skal informasjon om dette foreligge ifølge standarden, her vikes det fra standarden ved gjennomføring av forsøk. Testrørene oppfyller kravet om at rørene må ha en alder på minst 24 timer fra produksjon.

Testrør	Materiale		Diameter		Lengde	Tykkelse
	Fiber	Matrise	Ytre	Indre		
1	Karbonfiber	Epoxy	76	72	300	2
2	Glassfiber	Isophthalic polyester	360	350	355	5
3	Glassfiber	Isophthalic polyester	112	100	330	6
	Materiale					
4	Resirkulert Polypropylen		75	73	300	1

Tabell 4-1: Materialinfo om testrør

### 4.2.1 Testrør 4: Resirkulert Polypropylen

Testrør 4 skiller seg fra de andre rørene på flere hold. Først og fremst består røret av rent plastmateriale av typen polypropylen. Dimensjonene som står i Tabell 4-1 er veiledende. Testrøret er sammenføyd av flere mindre deler. Det kan være en kilde til noe avvik og feil i resultatene. Det er valgt å se bort ifra hvordan dette påvirker forsøkene, og røret blir sett på som et legeme.

### 4.3 Bestemmelse av fiberinnhold

Informasjon om fiberinnhold i komposittrørene er nødvendig for å regne ut estimater av E-modul og for å kunne forklare diverse avvik i de mekaniske forsøkene. Her følges standarden ASTM D 2584-08 «Standard test method for ignition loss of cured reinforced resins» ved gjennomføring av brenntestene. Brenntestene ble gjennomført av en elektronisk muffelovn, som kan ses i figur 4-1.



Figure 4-1: Muffelovn brukt i brenntest

#### Fremgangsmetoden for prosedyren:

1. Delte opp 3 teststykker av hver type kompositt som veier ca. 5 g. Her ble det målt en nøyaktighet til nærmeste *mg*.
2. Preparerte en pose med silica gel i 24 timer ved 100°C i en herdeovn. Silica gel er et tørkemiddel som ble plassert i bunnen av en eksikkator for å tiltrekke fukt.
3. Preparerte smeltinger som prøvene skulle ligge i, ved å varme dem i muffelovnen ved 550°C og avkjøle diglene i en eksikkator.
4. Teststykkene ble lagt i de preparerte smeltingene og veid til nærmeste *mg*. De ble så lagt inn i en muffelovn og antent på 550°C til matrisematerialet smeltet bort. I testene som ble gjennomført lå de mellom 1,5 time til 2,5 time.

5. Prøvene ble avkjølt til romtemperatur i en eksikkator og veid til nærmeste *mg*.

**Nøyaktighet:** Alle prøver som ble veid ble målt til nærmeste *mg*, da dette var kravet fra standarden. Vekten som ble brukt ble kalibrert før hver måling og kan ses i Figur 4-1: Milligramsvekt anvendt i brenntest.



*Figur 4-1: Milligramsvekt anvendt i brenntest*



*Figur 4-2: Materialprøver før og etter brenntest*

Innholdet av fiber blir bestemt ved å veie testprøvene, deretter brenne bort matrise materialet og foreta nye målinger på vekten av prøvene. Fullstendige resultater med standardavvik kan ses i vedlegg B. I tabellen under er gjennomsnittet av de tre prøvene.

Testrør	Fiber/ Matrise	Prosentandel [%]
Testrør 1 (CRP)	Matrise	68,45
	Fiber	31,55
Testrør 2 (GRP1)	Matrise	64,83
	Fiber	35,17
Testrør 3 (GRP2)	Matrise	70,02
	Fiber	29,98

Table 4-1: Sammensetning fiber og matrise i komposittrør

#### 4.4 Analyse av fiberstruktur

Nærmere analyse av prøvene gir mer informasjon om fiberstrukturen. Karbonfiberen har en biaksial fiberstruktur med to lag ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Dette kan ses i Figur 4-3: Fiberstruktur for testrør 1. For videre innhenting av materialdata antar man High strength karbonfiber.



Figur 4-3: Fiberstruktur for testrør 1. Lag 1 og lag 2

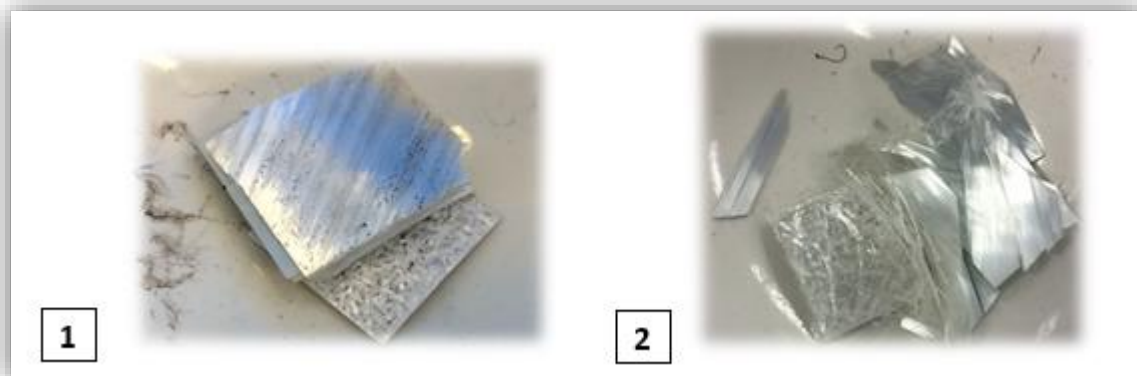
Ved undersøkelse av glassfiberen i testrør 2 og 3 ser man at de har nesten identisk fiberstruktur. Strukturen her har en dobbel quasi-isotropisk lagdeling, pluss et ekstra lag. De 4 ytre lagene er med tynne glassfibre som er kryssviklet ( $+54^\circ$ ,  $-54^\circ$ ,  $+54^\circ$ ,  $-54^\circ$ ), innerst



er det fire lag med diskontinuerlig grovere fiber med tilfeldig fiberretning (random mat). Det aller innerste laget består av tynne fiber med tilfeldig fiberretning. Se Figur 4-4: Fiberstruktur for testrør 2 og Figur 4-5: Fiberstruktur for testrør 3 for illustrasjon av lagdelingene.



*Figur 4-4: Fiberstruktur for testrør 2, Lagdeling 1: kryssviklet kontinuerlig fiber, Lagdeling 2: korte fiber m tilfeldig fiberretning*



*Figur 4-5: Fiberstruktur for testrør 3, Lagdeling 1: kryssviklet kontinuerlig fiber, Lagdeling 2: korte fiber m tilfeldig fiberretning*

## 4.5 Krav og klargjøring av testmateriale

Standarden setter en rekke krav for klargjøring av testrørene. Det ble markert en rett strek på yttersiden av røret, deretter er det i utgangspunktet krav til 3 testrør per rørmateriale (a, b og c). Denne vikes det bevisst fra, på grunn av mangel på tilgang til nok testmateriale. Rørene kuttes ved hjelp av en mekanisk sag slik at tverrsnittet av røret ligger normalt på senteraksen, se Figur 4-6:



*Figur 4-6: Mekanisk sag for klargjøring av testmateriale*

Mekanisk sag for klargjøring av testmateriale.

Lengden av rørstykkene blir bestemt av diameteren, ifølge standard BS EN ISO 9969:2007. Rør med  $d_n \geq 1500$  mm, skal gjennomsnittslengden være minst  $0,2 \cdot d_n$ . Rør med  $d_n \leq 1500$  mm, skal gjennomsnittslengden være  $(300 \pm 10)$  mm. Dette ser vi oppfylles i Tabell 4-1: Materialinfo om testrør, med unntak av for testrør 2 og 3. Testrør 2 hadde for store dimensjoner for bruk av den mekaniske sagen. Det ble valgt og unngå å bruke båndsgag manuelt for å oppnå et mest mulig jevnt tverrsnitt. NS-EN 1228:1998 spesifiserer ingen krav til lengde, så på bakgrunn av dette ble det valgt å beholde eksisterende lengde. For testrør 3, har det oppstått en menneskelig feil ved måling som ikke ble oppdaget før ved beregninger.

Nøyaktigheten til lengden av rørstykkene blir bestemt ved å ta gjennomsnittet av tre til seks lengdemålinger rundt røret, se Tabell 4-2: Antall målinger for lengdenøyaktighet for testrør. Standarden viser til en nøyaktighet på 1mm. For hvert teststykke skal ikke den minste målingen være mindre enn 90% av den lengste målingen.

<b>Nominell diameter, <math>d_n</math>, av røret (mm)</b>	<b>Antall målinger</b>
$d_n \leq 200$	3
$200 < d_n < 500$	4
$d_n \geq 500$	6

Tabell 4-2: Antall målinger for lengdenøyaktighet for testrør

Standarden stiller temperaturkrav. Teststykkene skal egentlig stå 24 timer i den temperaturen de skal testes i, dette er et punkt det vikes fra i forsøket. Det er gitt ettersom temperaturen blir en variabel i forsøkene. Romtemperatur blir referansetemperaturen, denne skal ligge på  $23 \pm 2$  °C, men i forsøkene ligger denne temperaturen på  $18 \pm 3$  °C.



## 5 METODE

Mekaniske egenskaper blir i denne oppgaven kartlagt ved å simulere arktiske betingelser så virkelighetsnært mulig for materialet gjennom kontrollerte mekaniske tester. Standardene BS EN ISO 9969:2007 som kartlegger ringstivhet for termoplastiske rør med et sirkulært tverrsnitt og NS-EN 1228:1996 som kartlegger spesifikk ringstivhet for rør av glassfiberarmert herdeplast er brukt veiledende i metodeutviklingen, samt utførelse av mekanisk testing. Standardene viste at fremgangsmåten er lik for både rør av termoplast og herdeplast.

Hypotesen for forsøkene er basert på teorien fremlagt. Hypotesen testes gjennom to forsøk. Forsøkene går ut på å sjekke hvor mye kraft som kreves for å skape defleksjonen gitt av standarden i romtemperatur. Deretter sammenlignes det om det vil kreves mer kraft for å skape den samme defleksjonen ved synkende temperaturer. Forsøk 1 ser på gradvis temperaturendring, mens forsøk 2 ser på rask nedkjøling. Dette viser om elastisitetsmodulen endres med varierende temperatur og hensikten med oppgaven er å kartlegge påvirkningen temperaturen har på elastisitetsmodulen. Hypotesen dobbeltsjekkes ved et delforsøk i forsøk 1. Delforsøket går ut på at hypotesen stemmer, og det kreves mer last ved den kaldeste temperaturen. Last ved maks kuldetemperatur holdes konstant mens temperaturen øker og vi ser om materialet vil deformeres mer.

### 5.1 Forsøksplan og testanlegg

Forsøksplanen er satt opp av to forsøk, se forsøksoppsett 1 og 2. Simulering av arktiske betingelser blir gjennomført ved å benytte testanlegget ved fryselaboratoriet på *Senteret for klimaregulert plantevitenskap (SKP)* ved NMBU. Fryselaboratoriet har fryseskap fra produsenten Weiss Technik, av typen Jumo IMAGO 500. Denne har en Eurotherm kontroller for innstilling av temperaturer og tid, slik kan man står fritt til å stille inn et forsøksoppsett med temperaturintervaller for måling. Se Figur 5-1: Fryseskap ved SKP

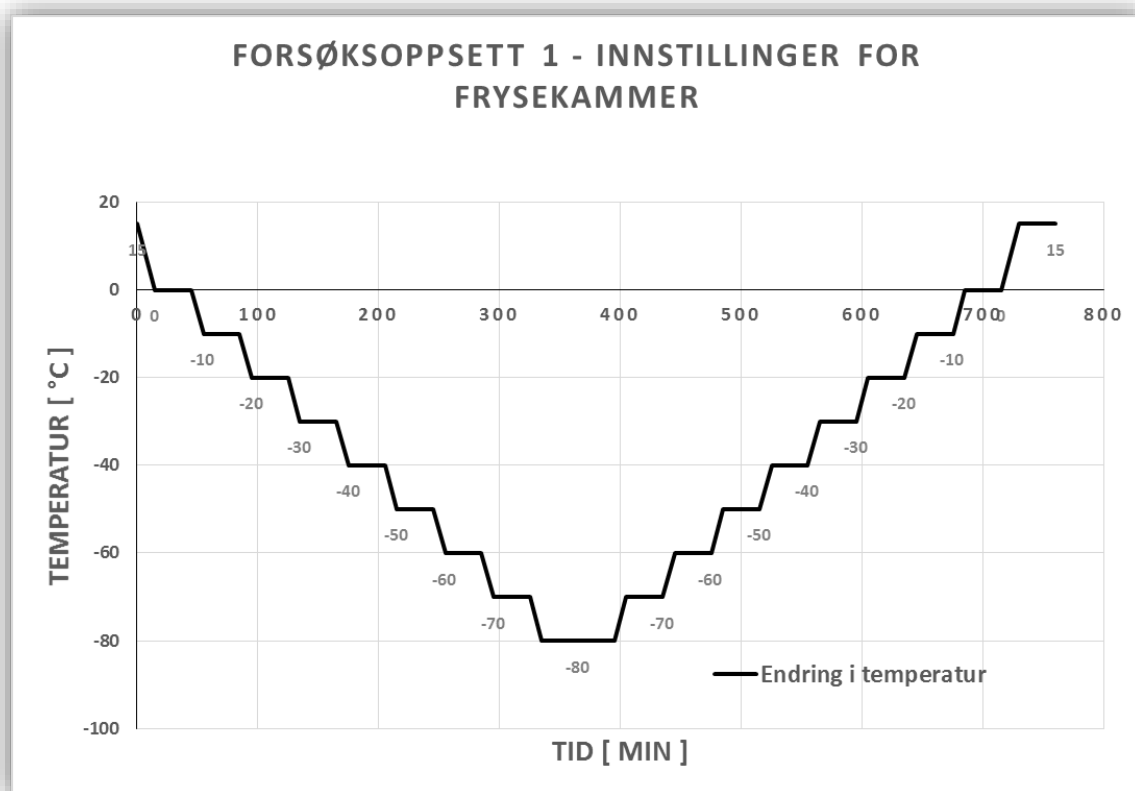


Figur 5-1: Fryseskap ved SKP  
Fryselaboratorium

Fryselaboratorium. Fryseskapet kan gå ned til  $-80^{\circ}\text{C}$ . Fryseskapet tåler en maks last på 200kg, noe som også er en rammebetingelse.

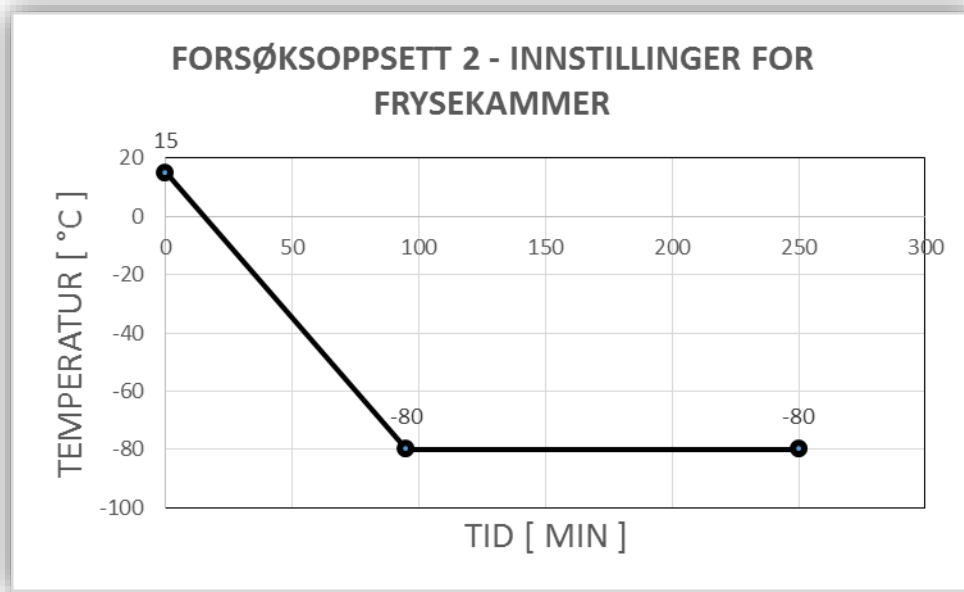
Innstillingene for forsøksoppsettene stilles inn i Eurotherm kontrolleren. Hastigheten til temperaturendring er satt til 1 grad/min ved alle forsøk. Både testmateriale og forsøksapparat har blitt fryst ned.

**Forsøksoppsett 1** består av delforsøk 1 og delforsøk 2. I forsøksoppsett 1 tar man for seg gradvis endring i temperatur. Temperaturendringene med intervaller kan ses i Graf 5-1: Fryseprogram for forsøksoppsett 1. Temperaturintervallene er hovedsakelig på hver  $10^{\circ}\text{C}$  grader, med unntak ved start og slutt da de er på  $15^{\circ}\text{C}$  grader. Temperaturen holdes konstant på hvert temperaturintervall i 30 min, utenom på max kuldetemperatur  $-80^{\circ}\text{C}$  hvor den holdes konstant i 1 time. Dette er for at man skal rekke å utføre målinger, samt at testomgivelsene skal stabiliseres etter hver måling. I forsøksoppsett 1, så går delforsøk 2 ut på å teste siging i testmaterialet når temperaturen øker og lasten holdes konstant. Total tid på forsøksoppsett 1 for hvert testrør er på 760 min.



Graf 5-1: Fryseprogram for forsøksoppsett 1

**Forsøksoppsett 2** tar for seg hurtig frysing av materialet, det vil si at det ikke er noe intervaller mellom romtemperatur og  $-80^{\circ}\text{C}$ . Man ser kun på målinger i romtemperatur og måling på  $-80^{\circ}\text{C}$ . Testmaterialene og forsøksapparat blir liggende over en tidsperiode på ca 30 min på temperturintervallet på  $-80^{\circ}\text{C}$ . Omtrentlig tid materialene ligger inne i fryseskapet på forsøksoppsett 2 er på 125-250 min. Her velges det å fryse alle rørene samtidig.



Graf 5-2: Fryseprogram for forsøksoppsett 2

## 5.2 Kvalitetssikring

Kvalitetssikring blir ført ved å regne på teoretisk elastisitetsmodul i romtemperatur. Her settes det noe begrensninger fordi man ikke har all informasjon om materialet i testrørene. Det legges til grunn tilnærmelser basert på kartlagte materialanalyser i prosjektet og materialinformasjon hentet fra CES Edupack, Level 3. Generell informasjon om den teoretiske elastisitetsmodulen til type fiber og matrisemateriale kan ses i Tabell

5-1(Hull et al. 1996). Resultatene av dette blir sammenlignet med hvor godt de samsvarer med resultatene ved bruk av formlene i kapittel 6.1 for romtemperatur.

Testrør	Materiale					Teoretisk E-modul [ GPa ]	
	Fiber	E-modul [GPa]	Matrise	E - modul [GPa]			
1	Karbonfiber	230	Epoxy	3,0	6,0	4,36	8,66
2	E-glass	76	Polyester	2,0	4,5	2,82	6,72
3	E-glass	76	Polyester	2,0	4,5	2,00	6,27
	Materiale						
4	Polypropylen			1,50		2,00	

Tabell 5-1: Teoretisk E-modul

Informasjon om E-modul for testmaterialene er også hentet fra CES Edupack. Se et mer detaljert bilde i vedlegg D.

### 5.3 Utstyr

For å gjennomføre forsøkene kreves en rekke utstyr, tillegg til fryseskapet.

- Forsøksapparat utviklet og bygget for masterforsøk
- Målestokk i tre
- Assorterte vektmanualer
- Hansker
- Testrør



Figur 5-2: Utstyr for mekanisk testing



## 5.4 Fremgangsmetode

Fremgangsmetoden for forsøkene beskrives i dette kapitlet. Målinger i romtemperatur er beskrevet i standardene, disse brukes veiledende for målinger ved hvert temperaturintervall. Først blir det anskaffet referanseverdier i romtemperatur som ligger på  $18 \pm 3$  °C grader for hvert testrør ved hjelp av måleprosedyre 1. Målingene utføres manuelt med målestokk og resultatene noteres av øyemål.

- **Måleprosedyre 1:** En måling foregår ved å bruke forsøkstestplattformen laget i metode- og produktutviklingen. Et testrør plasseres mellom bunnplate og topplate. Røret blir plassert slik at markeringen av linje på yttersiden treffer den øvre kontaktflaten som blir belastet. Dobbeltsjekker at belastningen sentreres i forhold til senteraksen til røret. Justerer platen som skal tåle belastningen frem til kontakt med rørstykke oppnås og platen er horisontal. Tar måling før last, av indre diameter i horisontal og vertikal retning. Laster deretter vektmanualer på topplaten inntil en oppnår ønsket vertikal defleksjon. Tar målinger av oppnådd defleksjon ved å måle den indre diameteren i vertikal og horisontal retning og noterer last for denne.
- **Måleprosedyre 2:** Her måles kun endring i indre diameter i vertikal og horisontal retning ved eksisterende last på forsøkstestplattformen.

For å kunne beregne ut ringstivhet er det nødvendig å regne på de teoretiske defleksjonene til testrørene og bruke denne i testingen. Formelen for å regne ut den teoretiske defleksjonen, i millimeter, er hentet fra standard.

$$\frac{y}{d_i} = 0,03$$



*Figur 5-3: Manuell måling ved forsøk*

#### **5.4.1 Forsøksoppsett 1**

Mekanisk testing, i henhold til forsøksoppsett 1, starter ved at et testrør blir testet om gangen. Forsøkstestplattformen blir plassert i fryseskapet sammen med et testrør. Setter i gang fryseprogram på fryseskapet. Når termometeren viser at de indre omgivelsene har oppnådd ønsket temperatur, åpnes fryseskapet og en gjennomfører måleprosedyre 1. Når prosedyren er gjennomført lukkes fryseskap for å stabilisere omgivelsene. Dette gjentas for hvert temperaturintervall til  $-80^{\circ}\text{C}$ . Fra og med temperaturintervall på  $-80^{\circ}\text{C}$ , starter delforsøk 2: siging. Her beholdes lasten konstant. På intervallene tilbake til romtemperatur gjennomføres måleprosedyre 2.

#### **5.4.2 Forsøksoppsett 2**

Det foretas måling ved hjelp av måleprosedyre 1 ved romtemperatur av alle testrør. Disse blir så plassert inn i fryseskapet sammen med forsøkstestplattformen. Fryseprogram for forsøksoppsett 2 settes i gang. Når ønsket temperatur på nådd, tas forsøkstestplattformen ut sammen med et testrør. Her gjennomføres måleprosedyre 1 i åpne omgivelser. Neglisjerer temperaturtap. Henter ut nytt testrør og gjentar prosessen med alle testrørene.

## 6 RESULTATER OG ANALYSE

### 6.1 Tekniske beregninger og teoretisk E-modul

Formel for hvordan man beregner ringstivhet,  $S$  er hentet fra standardene:

$$S = \left( 0,0186 + \left( 0,025 \times \frac{y}{d_i} \right) \right) \frac{F}{L \times y} \times 10^6$$

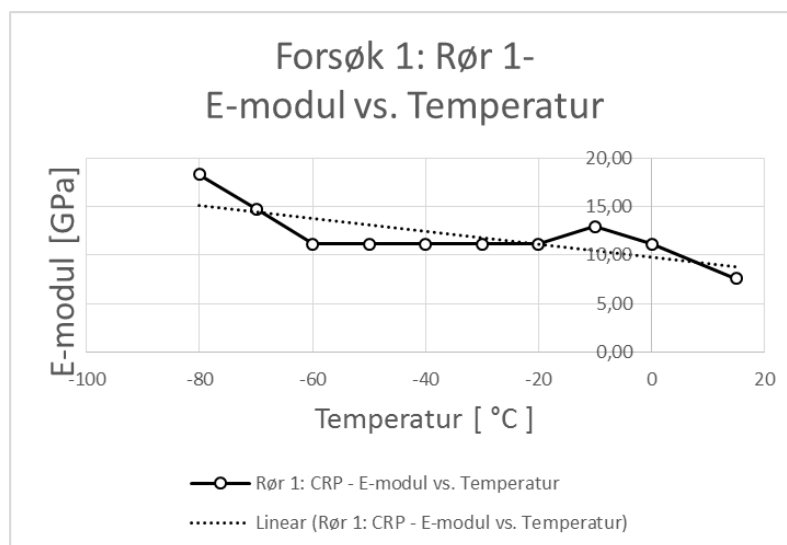
Formel for sammenheng mellom elastisitetsmodulen og ringstivhet er hentet fra produktinformasjon om ringstivheter fra SAINT-GOBAIN VANN og AVLØP (Avløp 2009), denne gjelder alle type rør ref.

$$S = \frac{E \times I}{d_m} \times 10^6 \text{ (kPa)}$$

Vi finner ved hjelp av formlene over, de praktiske korttids elastisitetsmodulen til rørene. Disse kan ses i detaljer i vedlegg, resultatene presenteres videre i kapitlet i grafer og prosentvis endring. Avslutningsvis presenteres et sammendrag av resultatene fra forsøk 1 og forsøk 2, samt den teoretisk beregnede elastisitetsmodulen.

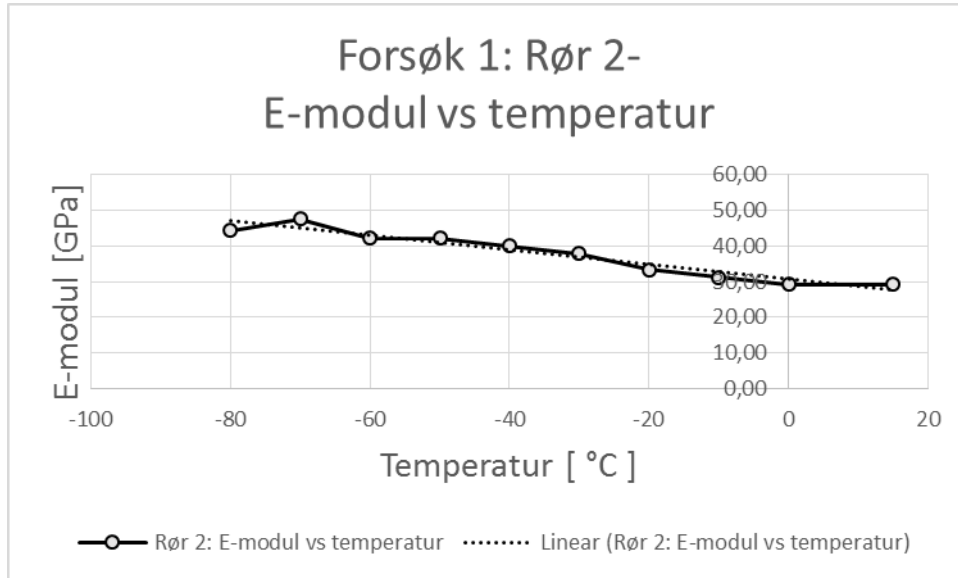
### 6.2 Forsøk 1

Rør 1 har en tydelig økning i E-modul fra start til sluttemperatur på  $-80^\circ\text{C}$ . Variasjonene med temperaturintervallene er ikke fremtredende, det holder seg stabilt i temperaturintervallet mellom  $0^\circ\text{C}$  og frem til  $-60^\circ\text{C}$ , med unntak for måling ved  $-10^\circ\text{C}$ . Fra  $-60^\circ\text{C}$  begynner elastisitetsmodulen å øke markant.



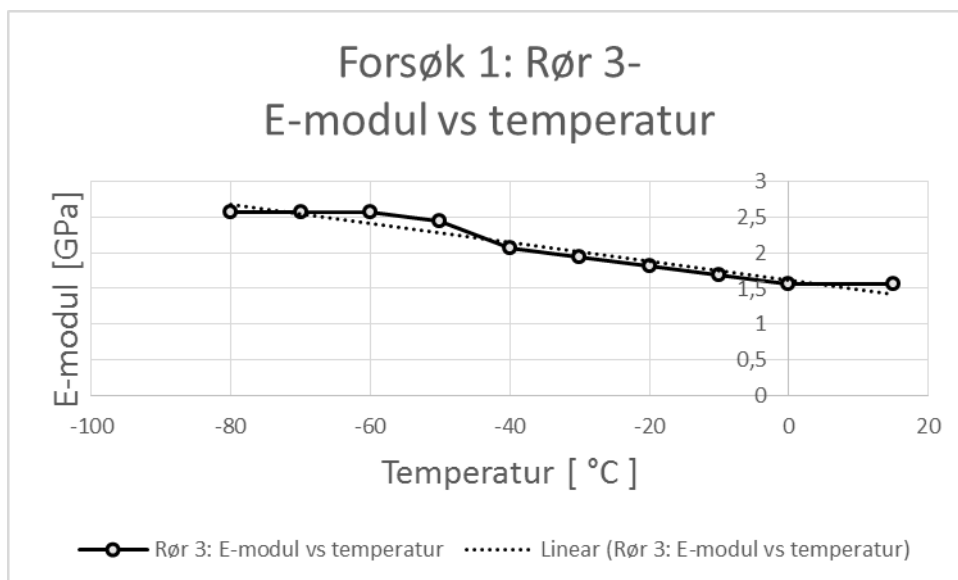
Graf 6-1: Forsøk 1- Rør 1: E-modul vs Temperatur

Rør 2, har en gradvis økning av elastisitetsmodulen med minkende temperatur. Det registreres et lite avvik på siste måling, hvor elastisitetsmodulen synker.



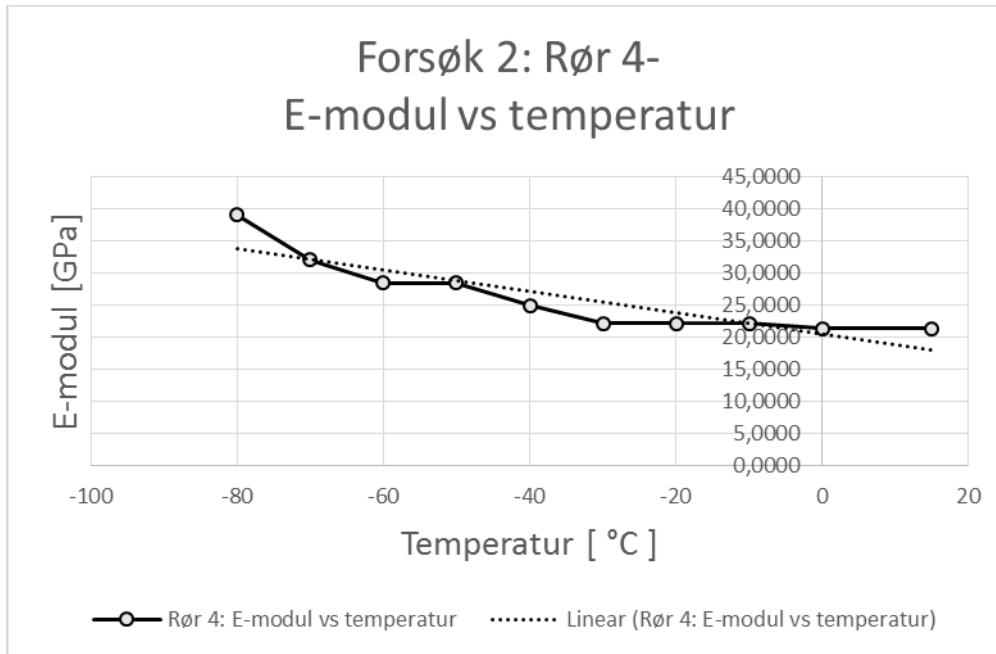
Graf 6-2: : Forsøk 1 - Rør 2: E-modul vs Temperatur

Rør 3, har også en gradvis økning i E-modul. Endringen blir mer markant ved temperaturintervall på -50°C og lavere.



Graf 6-3: Forsøk 1- Rør 3: E-modul vs temperatur

Rør 4, har ingen særlig økning i elastisitetsmodul før ved  $-40^{\circ}\text{C}$  grader, videre øker elastisitetsmodulen markant.



Graf 6-4: Forsøk 1- Rør 4: E-modul vs Temperatur

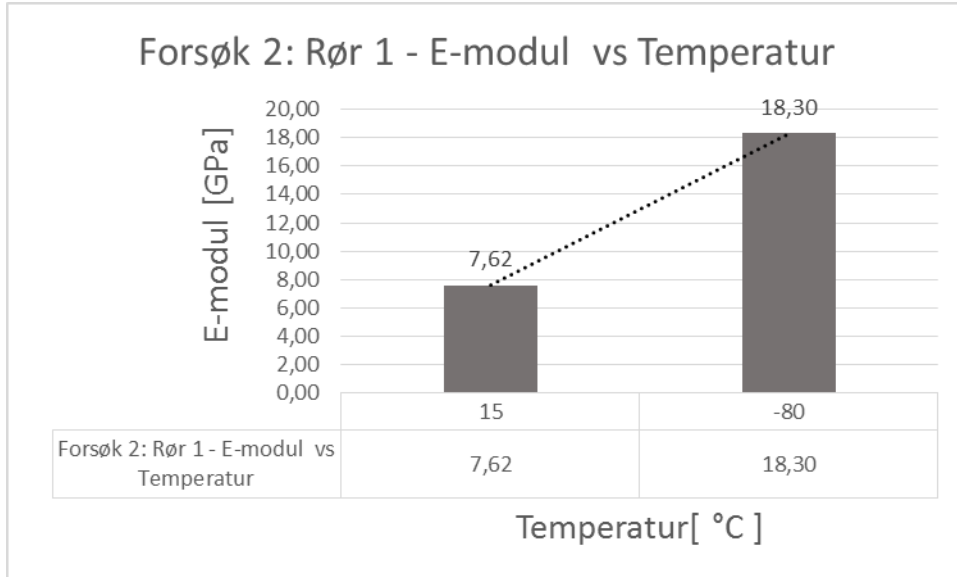
Resultatene for delforsøk 2: Siging i forsøk 1 kan ses mer detaljert i vedlegg B. Sammendrag for økningen i elastisitetsmodul er oppgitt i GPa og i prosentvis økning. Rør 1, 2 og 3 har alle hatt noe siging i materialet, men ingen markant endring. Rør 4 er røret som har hatt mest siging, spesielt etter at man passerte glasstemperaturgrensen. Elastisitetsmodulen ble her er nesten tilsvarende det i romtemperatur for materialet.

Siging	-80	RomT	endring	%
<b>Rør 1</b>	19,71	13,37	6,33	32,13 %
<b>Rør 2</b>	46,48	39,02	7,46	16,05 %
<b>Rør 3</b>	2,29	1,41	0,88	38,45 %
<b>Rør 4</b>	39,02	22,05	16,97	43,50 %

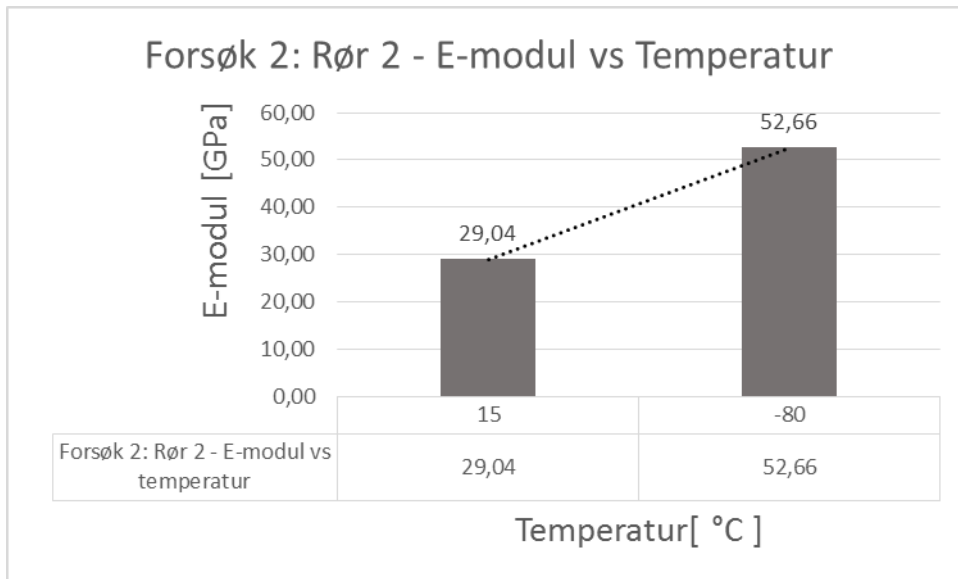
Tabell 6-1: Siging i materialet, E-modul i GPa

### 6.3 Forsøk 2

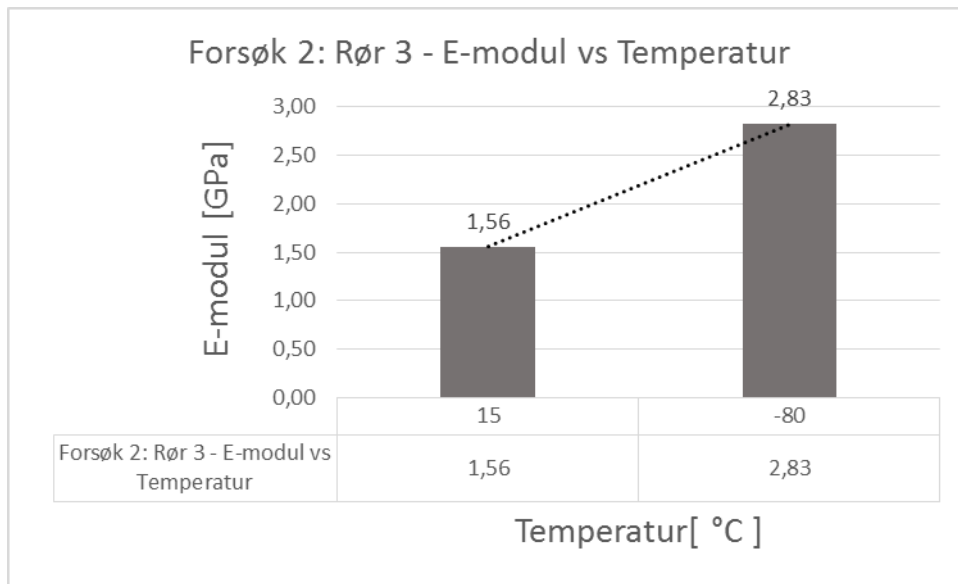
Resultatene ved rask avkjøling, viser en markant endring i elastisitetsmodul for alle rørene.



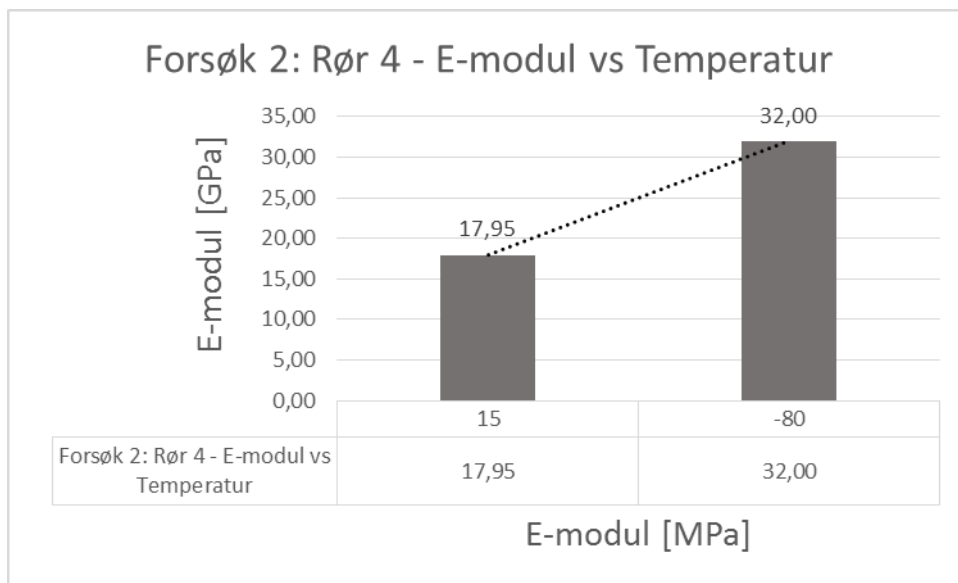
Graf 6-5: Forsøk 2 - Rør 1 E-modul vs Temperatur



Graf 6-6: Forsøk 2 - Rør 2 E-modul vs Temperatur



*Graf 6-7: Forsøk 2 - Rør 3 E-modul vs Temperatur*



*Graf 6-8: Forsøk 2 - Rør 4 E-modul vs Temperatur*

## 6.4 Sammendrag av resultater

Rør/Temp	Forsøk 1				% endring	Forsøk 2		% endring
	Teoretisk E-modul [ GPa ]		RomT	Min		RomT	Min	
1	4,36	8,66	7,62	18,30	240,27 %	7,62	18,30	240,27 %
2	2,82	6,72	29,15	47,63	163,40 %	29,04	52,66	181,34 %
3	2,00	6,27	1,56	2,57	165,16 %	1,56	2,83	181,45 %
4	2		21,39	39,02	182,43 %	17,95	32,00	178,28 %

Tabell 6-2: Prosentvis endring i E-modul(GPa) og teoretiske verdier

I Tabell 6-2: Prosentvis endring i E-modul(GPa) og teoretiske verdier, ser man at den praktisk Elastisitetsmodulen for testrør 1 ligger innenfor det teoretiske E-modul intervallet. Ingen av de andre praktiske korttids elastisitetsmodulene for romtemperatur ligger innenfor det teoretiske elastisitetsmodul intervallet. Rør to har et avvik på mer enn 25 GPa. Rør 3 ligger i nærheten av det teoretiske intervallet, men har et avvik på 0,5 GPa. Rør 4 har også et stort avvik på nærmere 20 GPa.

Resultatene fra begge forsøkene viser en markant endring i E-modul. Rør 1 har ved begge forsøkene en økning i elastisitetsmodulen på 240%. Rør 2 viser en endring på 163% ved gradvis nedkjøling, mens økningen er på 181% ved rask nedkjøling. Det er samme tendenser for Rør 3 som for Rør 2, disse er begge av samme testmateriale. Rør 4 har litt avvikende mål ved forskjellige målinger for romtemperatur. Ved måling før forsøk 1 måles elastisitetsmodulen 21 GPa. Ved måling før forsøk 2 måles elastisitetsmodulen til nærmere 18 GPa. Endringen i prosent fra romtemperatur til -80°C grader har ved begge forsøk en økning i elastisitetsmodul på ca. 180%.



## 7 DISKUSJON

### 7.1 Metodeutvikling og testplattform

Testplattformen som ble utviklet i metodeutviklingen, følger de kriterier som er satt for å kartlegge ringstivhet. Uavhengig av dette oppsto det flere utfordringer underveis.

Vektmanualene benyttet i forsøket måtte lastes og avlastes enkeltvis. Det ble hovedsakelig brukt vektmanualer på 20 kilo på komposittrørene. Disse skulle lastes på en flat topplate som ble stabilisert av røret imellom. Festemekanismen til topplaten sikret ikke kun vertikal bevegelse, det var noe horisontal bevegelse som åpnet opp mulighetene for helning av topplaten. Dette inntraff som regel når manualene ikke ble plassert og sentrert riktig. Dette er et punkt ved testplattformen som kan utvikles videre. Dette skaper også en sikkerhetsrisiko ved utførelse av forsøk. Risikoen oppstår når flere vektmanualer stables og en liten helning kan vokse med økende last inntil friksjon oppstår mot støttepene. Det var ikke utviklet noen sikringsmekanisme for plasseringen av vektmanualene, denne kunne også beveges langs topplaten med økende last. Fordelen med dette er når vektmanualen fikk en endring i plassering og man ville sentrere lasten tilbake til riktig posisjon. Ulempen med dette er at med økende last kan, vektmanualene skli og ødelegge testplattformen.

På bakgrunn av problemstillingen over dukket det opp et utfordringer med friksjon i testplattformen. Ved flere målinger kunne man observere en liten helning. Helningen oppsto hovedsakelig på grunn av minimale bevegelser i vektmanualene ved pålasting av hver vektmanual. Denne helningen førte til at friksjon med støttepene i testplattformen. Det var flere tilfeller hvor vektmanualene skled vekk fra senterposisjon og man måtte utføre måleoperasjonen på nytt. Dette var et gjentakende problem.

### 7.2 Diskusjon av forsøksoppsett og materiale

I forsøksoppsett 1, måleprosedyre 1 er det beskrevet at man skal åpne fryseskap og gjennomføre mekanisk testing, mens forsøksapparat og testmateriale ligger inni. Tiden det tar å utføre en måleoperasjon er varierende avhengig av antall vektmanualer som skal lastes og avlastes. Det er samtidig viktig med presisjon for å holde topplaten horisontal. Alle disse justeringene og operasjonene tar tid. Tiden anvendt forandrer

temperaturklimaet i fryseskapet, fordi temperaturen øker raskt når testomgivelsene ikke er lukket. Når dette skjer så tar det lengre tid å stabilisere og gradere temperaturen videre. Dette kan føre til at temperaturen i materialet og testplattform er ustabil underveis i forsøket. Målingene er basert på at omgivelsene i skapet er stabilt lenge nok til at materialet oppnår samme temperatur. Den tiltenkte graderingen av temperaturendring i testmaterialet mister derfor litt av sin betydning.

En ulempe ved metodeutviklingen er at man har neglisjert påvirkningen av frost og kondens ved utførelse av forsøkene. Dette la man merke til ved delforsøk to, når vektmanualene ble plassert inne i fryseskapet laveste temperatur. Testplattform, testrør og vektmanualer fikk raskt frost ved

kuldetemperaturene. Ulempene oppstår når temperaturen beveget seg til varmetemperaturer, frosten ble omdannet til kondens. Frosten og kondensen fungerte som et tyntflytende lim mellom vektmanualene og førte til utfordringer ved avlasting. Ved avlasting av rør 2 etter endt forsøksprosedyre, tippet hele stabelen med manualer og ødela testplattformen, se Figur 7-1:



*Figur 7-1: Ulykke ved avlasting forsøk 1, rør 2 grunnet frost og kondens*

Ulykke ved avlasting forsøk 1, rør 2 grunnet frost og kondens. Dette førte til forsinkelser planlagt forsøksoppsett. Det er gjennomgående for alle komposittrørene at delforsøk 2, gir lite gradvis siging i materialet. Dette kan komme av at temperaturintervallene som funksjon av tiden, ikke var nok for den termiske kapasiteten og konduktiviteten materialet å stabiliseres mellom hver måling.

Dessuten ser man bare generelt elastisitetsmodul endringen i et tilfeldig utvalg av testrør, denne viser til en markant endring. Her kunne det ordensmessig vært mer struktur i utvalget av materialer, slik at man hadde et bedre sammenligningsgrunnlag. I disse forsøkene har man bare to rør med samme type matrise og fiber, men med ulik diameter, tykkelse og lengde. Hadde man hatt flere rør kunne man se om det var noen av variablene blant de to rørene som hadde en påvirkning på Elastisitetsmodulen.

### 7.3 Diskusjon av forsøksresultater

Generelt fra forsøksresultatene ser man en markant økning i elastisitetsmodulen, fra romtemperatur til  $-80^{\circ}\text{C}$  grader. Man ser også en liten økning i Elastisitetsmodulen fra sluttresultatene mellom gradvis og hurtig nedkjøling. Når det gjelder kvalitetssikringen av den praktisk Elastisitetsmodulen mot den teoretiske E- modulen, så ser man for flere rør et stort avvik. Problemet med kvalitetssikringen, er at denne er gjennomført først etter forsøkene av de mekaniske testene. Årsaken til dette er på grunn av mangel på nok testmateriale, og man hadde ikke noe ekstra materiale til å utføre materialtesting.

Avviket gjelder ikke for rør 1, bakgrunnen kan være at materialanalysene og antagelser har vært mer korrekte enn for de andre rørene. Dette var også det første røret til å bli testet.

Resultatene med E-modul endringen for Rør 4, samsvarer godt med teori for glasstemperaturen for materialet. Polypropylen har en glasstemperatur ved  $-20$ , før materialet går over til bli hard og sprø. Man ser en markant økning av Elastisitetsmodulen når temperaturen beveger seg forbi denne temperaturgrensen. En av ulempene er at dette sammenlignes med teori om generelt termoplasten polypropylen, materialet i forsøket er av resirkulert plast. Her hadde det hensiktsmessig å sammenligne data mellom resirkulert og ikke-resirkulert materiale. Dette kunne bidratt til bedre sammenligningsgrunnlag for å se på eventuelle kvalitetsforskjeller.

Resultatene for rør 1 skiller seg i temperatursjiktet mellom  $-20^{\circ}\text{C}$  til  $-60^{\circ}\text{C}$ , iforhold til de andre testrørene. Elastisitetsmodulen for rør 1 holder seg stabilt i nevnte temperatursjikt. Bakgrunnen for dette kan være en endring i målemetode. For rør 2, 3 og 4 ble både testplattform og røret tatt ut av fryseskapet, deretter ble fryseskapet lukket. Målingene ble utført utenfor fryseskapet. Når målingen var gjennomført ble testplattform og testrør satt raskt tilbake inn i fryseskapet. Gradestokken på fryseskapet viste at dette var en mye mer formålstjenlig for å holde temperaturen stabilt i fryseskapet. Det optimale hadde vært om man ikke hadde noen kuldetape. Resultatene for rør 1 tyder til at når temperaturen nådde  $-60^{\circ}\text{C}$  ble, temperaturen i materialet også mer stabilt, men testomgivelsene i dette forsøket stabiliserte seg ikke ved  $-80^{\circ}\text{C}$ , men ved  $-74^{\circ}\text{C}$ .

Ved enkelte målinger underveis ble det sett bort ifra friksjon med støttestolpene, som kan bidra til noe feilkilder i resultatene. Andre feilkilder inkluderer målefeil, da målene ble tatt på øyemål målt hovedsakelig til nærmeste millimeter.

## 8 Konklusjon

Praktisk oppnåelse iforhold til målsetting er gjennomført ved at det er utviklet og bygget en testplattform som kan brukes til forsøkene i prosjektet. Testplattformen bidro til datainnsamling om praktiske korttids elastisitetsmodulen i temperaturintervallet  $15^{\circ}\text{C} \leq T \leq 80^{\circ}\text{C}$ . Denne er sett opp mot teoretisk elastisitetsmodulen, beregnet med grunnlag i materialanalyser. Det er store avvik for mellom teoretisk og praktisk elastisitetsmodulen, for flertallet av rørene i romtemperatur. Det ses at elastisitetsmodulen begrenses av matrisematerialet i komposittmaterialer, når kraften er påført normalt på fiberretningen. For rør 4 av resirkulert plast ses en markant endring i elastisitetsmodulen ved glasstemperaturgrensen. Generelt er det kartlagt en markant endring i elastisitetsmodulen i alle testmaterialene.

### 8.1 Anbefalinger og videre arbeid

Det anbefales å teste et større antall testrør. Kvalitetssikring av verdier bør sjekkes før materialtesting, ved eventuelle avvik bør det undersøkes andre metoder for kvalitetssikring. Det anbefales sterkt å sammenligne rør mer systematisk. Forslag til mer systematikk er som følger. Å teste en type komposittrør med forskjellig andel fiber og se hvilken påvirkning fiberandel har å si. Å teste forskjellige diametere med samme fibersammensetning, se hvilken faktor diameter har å si. Å sammenligne disse mot ulike typer fiber. Når det gjelder å teste resirkulert plastmateriale, foreslås det å ha et sammenligningsmateriale av samme type som ikke er resirkulert og se på kvalitetsforskjellene. Det anbefales spesielt å ha nok testmateriale til å følge standardene, noe som kan bidra til et bedre datagrunnlag. Forslag til annet metodebruk er for eksempel Ansys og utføre en FEM analyse, slik har man et annet teoretisk sammenligningsgrunnlag.

Videre arbeid vil være å videreutvikle og optimalisere testplattformen, slik at den tar hensyn til diverse feil og mangler som har kommet frem i denne rapporten. Se på en metode med muligheter for å utføre testing i lukkede omgivelser.



## 9 Referanser

- Avløp, S.-G. V. o. (2009). Produktinformasjon Ringstivheter, Teknisk beregning.
- Callister, W. D. (1994). *Materials science and engineering : an introduction*. 3rd ed. utg. New York: Wiley.
- Hull, D., Clyne, T. W. & Clyne, T. W. (1996). *An introduction to composite materials*. 2nd ed. utg. Cambridge solid state science series. Cambridge: Cambridge University Press.
- Naturvernforbundet. (2016). *Olje og gass i Arktis*. Tilgjengelig fra: [http://naturvernforbundet.no/olje-og-gass-i-arktis/category2650.html#122\\_tile-1461534881949](http://naturvernforbundet.no/olje-og-gass-i-arktis/category2650.html#122_tile-1461534881949) (lest 25.04).
- Plastic pipe testing, compression machine*. (2016). 14.06.2016. Norwood, MA, US: Admet, inc.
- Polymers at Cryogenic Temperatures*. (2013). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg.
- Rösler, J., Bäker, M. & Harders, H. (2007). *Mechanical Behaviour of Engineering Materials : Metals, Ceramics, Polymers, and Composites*. Mechanical Behaviour of Engineering Materials : Metals, Ceramics, Polymers, and Composites. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Shmulsky, R. & Jones, P. D. (2011). *Forest products and wood science : an introduction*. 6th ed. utg. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Store norske leksikon*. (2015). Mekaniske egenskaper.
- Ukeblad, T. 5 *Spørsmål om gjenvinning av plast*. Tilgjengelig fra: <http://www.tu.no/artikler/5-sporsmal-om-gjenvinning-av-plast/235403>.
- Wright, M. A. (2013). Satelitt fant det kaldeste stedet på jorden. *Aftenposten*.

- Standarder:
- BS EN ISO 9969:2007 «Thermoplastics pipes - Determination of ring stiffness»
  - NS-EN 1228:1996 «Rørledninger av plast, Rør av glassfiberarmert herdeplast(GUP), Bestemmelse av spesifikk ringstivhet»
  - ASTM D 2584-08 «Standard test method for ignition loss of cured reinforced resins»





## Vedlegg A - Materialtesting

Test nr	Materialie	Skål	Skål f/br + prøve	Prøve	Skål e/br + prøve	Prøve e/ br	Matriseandel	Fiberandel	Matrise i %	Fiber i %	Standardavvik
Ø14	Rør 2 GRP1	103,657	108,946	5,289	107,095	1,851	3,438	1,851	65,0 %	35,0 %	0,0505
Ø15	Rør 2 GRP1	97,981	103,390	5,409	101,477	1,913	3,496	1,913	64,6 %	35,4 %	
Ø16	Rør 2 GRP1	89,742	94,902	5,160	93,089	1,813	3,347	1,813	64,9 %	35,1 %	
Ø18	Rør 3 GRP2	104,788	110,319	5,531	108,757	1,562	3,969	1,562	71,8 %	28,2 %	0,1647
Ø19	Rør 3 GRP2	96,760	101,720	4,960	100,296	1,424	3,536	1,424	71,3 %	28,7 %	
Ø20	Rør 3 GRP2	99,278	104,591	5,313	102,839	1,752	3,561	1,752	67,0 %	33,0 %	
Ø22	Rør 1 CRP	83,402	88,529	5,127	86,742	1,787	3,340	1,787	65,1 %	34,9 %	0,2505
Ø23	Rør 1 CRP	111,965	117,020	5,055	115,342	1,678	3,377	1,678	66,8 %	33,2 %	
Ø24	Rør 1 CRP	92,283	97,203	4,920	95,894	1,309	3,611	1,309	73,4 %	26,6 %	

Testrør	Gj. Fiberandel	Gj. Matrisemateriale
Rør 2 - GRP1	35,17 %	64,83 %
Rør 3 - GRP2	29,98 %	70,02 %
Rør 1 - CRP	31,55 %	68,45 %

Resultater og beregningsgrunnlag  
for brenntester



## Vedlegg B - Mekanisk testing

Grader	Last [kg]	H [mm]	V [mm]	Kraft	Kraft i kN	i mm	y	di	0,025*y/di	S	Dm	e	l	E [kPa]	E [Gpa]
15	42,775	73	70	419,6228	0,4196	300	2,16	0,0186	0,00075	12,530402	74	2	0,67	7616429,2	7,62
0	62,775	73	70	615,8228	0,6158	300	2,16	0,0186	0,00075	18,389152	74	2	0,67	11177588	11,18
-10	72,775	74	69,5	713,9228	0,7139	300	2,16	0,0186	0,00075	21,318527	74	2	0,67	12958168	12,96
-20	62,775	74	70	615,8228	0,6158	300	2,16	0,0186	0,00075	18,389152	74	2	0,67	11177588	11,18
-30	62,775	74	70	615,8228	0,6158	300	2,16	0,0186	0,00075	18,389152	74	2	0,67	11177588	11,18
-40	62,775	74	70	615,8228	0,6158	300	2,16	0,0186	0,00075	18,389152	74	2	0,67	11177588	11,18
-50	62,775	74	70	615,8228	0,6158	300	2,16	0,0186	0,00075	18,389152	74	2	0,67	11177588	11,18
-60	62,775	74	70	615,8228	0,6158	300	2,16	0,0186	0,00075	18,389152	74	2	0,67	11177588	11,18
-70	82,775	74	70	812,0228	0,8120	300	2,16	0,0186	0,00075	24,247902	74	2	0,67	14738747	14,74
<b>-80</b>	<b>102,775</b>	<b>74</b>	<b>70</b>	<b>1008,2228</b>	<b>1,0082</b>	<b>300</b>	<b>2,16</b>	<b>0,0186</b>	<b>0,00075</b>	<b>30,106652</b>	<b>74</b>	<b>2</b>	<b>0,67</b>	<b>18299907</b>	<b>18,30</b>
-70	102,775	74	70	1008,2228	1,0082	300	2	0,0186	0,0006944	32,42183	74	2	0,67	19707155	19,71
-60	102,775	74	70	1008,2228	1,0082	300	2	0,0186	0,0006944	32,42183	74	2	0,67	19707155	19,71
-50	102,775	74	70	1008,2228	1,0082	300	2	0,0186	0,0006944	32,42183	74	2	0,67	19707155	19,71
-40	102,775	74	70	1008,2228	1,0082	300	2	0,0186	0,0006944	32,42183	74	2	0,67	19707155	19,71
-30	102,775	74	70	1008,2228	1,0082	300	2	0,0186	0,0006944	32,42183	74	2	0,67	19707155	19,71
-20	102,775	74	69,5	1008,2228	1,0082	300	2,5	0,0186	0,0008681	26,170849	74	2	0,67	15907584	15,91
-10	102,775	74	69	1008,2228	1,0082	300	3	0,0186	0,0010417	22,003528	74	2	0,67	13374536	13,37
0	102,775	74	69	1008,2228	1,0082	300	3	0,0186	0,0010417	22,003528	74	2	0,67	13374536	13,37
15	102,775	74	69	1008,2228	1,0082	300	3	0,0186	0,0010417	22,003528	74	2	0,67	13374536	13,37

Rør 1 –  
Forsøk 1

Grader	Last [kg]	H [mm]	V [mm]	Kraft	Kraft i kN	L i mm	y	di	0,025*y/di	S	Dm	e	I	E[kPa]	E[GPa]
15	133,28	360	340	1307,43	1,30743	355	11	0,02	0,00075	6,78705	355	5	10,42	29149916	29,15
0	133,28	360	340	1307,43	1,30743	355	11	0,02	0,00075	6,78705	355	5	10,42	29149916	29,15
-10	142,78	366	339,5	1400,62	1,40062	355	11	0,02	0,00075	7,27084	355	5	10,42	31227756,6	31,23
-20	152,78	364	340	1498,72	1,49872	355	11	0,02	0,00075	7,78009	355	5	10,42	33414957,2	33,41
-30	172,78	365	340	1694,92	1,69492	355	11	0,02	0,00075	8,79859	355	5	10,42	37789358,4	37,79
-40	182,78	362	340	1793,02	1,79302	355	11	0,02	0,00075	9,30784	355	5	10,42	39976559	39,98
-50	192,78	362	340	1891,12	1,89112	355	11	0,02	0,00075	9,8171	355	5	10,42	42163759,6	42,16
-60	192,78	369	340	1891,12	1,89112	355	11	0,02	0,00075	9,8171	355	5	10,42	42163759,6	42,16
-70	217,78	365	340	2136,37	2,13637	355	11	0,02	0,00075	11,0902	355	5	10,42	47631761,1	47,63
-80	202,78	365	340	1989,22	1,98922	355	11	0,02	0,00075	10,3263	355	5	10,42	44350960,2	44,35
-70	202,78	365	340	1989,22	1,98922	355	10	0,02	0,00071	10,8227	355	5	10,42	46482556,8	46,48
-60	202,78	365	340	1989,22	1,98922	355	10	0,02	0,00071	10,8227	355	5	10,42	46482556,8	46,48
-50	202,78	368	338	1989,22	1,98922	355	12	0,02	0,00086	9,08558	355	5	10,42	39021968,9	39,02
-40	202,78	368	338	1989,22	1,98922	355	12	0,02	0,00086	9,08558	355	5	10,42	39021968,9	39,02
-30	202,78	368	338	1989,22	1,98922	355	12	0,02	0,00086	9,08558	355	5	10,42	39021968,9	39,02
-20	202,78	368	338	1989,22	1,98922	355	12	0,02	0,00086	9,08558	355	5	10,42	39021968,9	39,02
-10	202,78	368	338	1989,22	1,98922	355	12	0,02	0,00086	9,08558	355	5	10,42	39021968,9	39,02
0	202,78	368	338	1989,22	1,98922	355	12	0,02	0,00086	9,08558	355	5	10,42	39021968,9	39,02
15	202,78	368	338	1989,22	1,98922	355	12	0,02	0,00086	9,08558	355	5	10,42	39021968,9	39,02

Rør 2 –  
Forsøk 1

Grader	Last [kg]	H [mm]	V[mm]	F i N	F i kN	L i mm	y		di	0,025*y/di	S	Dm	e	I	E [kPa]	E [GPa]
15	122,775	101	97	1204,42	1,20	330	3	0,0186	100	0,00075	23,54099	106	6	18	1557649,8	1,55765
0	122,775	101	97	1204,42	1,20	330	3	0,0186	100	0,00075	23,54099	106	6	18	1557649,8	1,55765
-10	132,775	101	97	1302,52	1,30	330	3	0,0186	100	0,00075	25,458399	106	6	18	1684520	1,68452
-20	142,775	101	97	1400,62	1,40	330	3	0,0186	100	0,00075	27,375808	106	6	18	1811390,3	1,81139
-30	152,775	101	97	1498,72	1,50	330	3	0,0186	100	0,00075	29,293217	106	6	18	1938260,6	1,93826
-40	162,775	101	97	1596,82	1,60	330	3	0,0186	100	0,00075	31,210626	106	6	18	2065130,9	2,06513
-50	192,775	101	97	1891,12	1,89	330	3	0,0186	100	0,00075	36,962854	106	6	18	2445741,7	2,44574
-60	202,775	101	97	1989,22	1,99	330	3	0,0186	100	0,00075	38,880263	106	6	18	2572612	2,57261
-70	202,775	101	97	1989,22	1,99	330	3	0,0186	100	0,00075	38,880263	106	6	18	2572612	2,57261
-80	202,775	101	97	1989,22	1,99	330	3	0,0186	100	0,00075	38,880263	106	6	18	2572612	2,57261
-80	180,775	101	97	1773,40	1,77	330	3	0,0186	100	0,00075	34,661963	106	6	18	2293497,4	2,2935
-70	180,775	101	97	1773,40	1,77	330	3	0,0186	100	0,00075	34,661963	106	6	18	2293497,4	2,2935
-60	180,775	102	96,5	1773,40	1,77	330	3,5	0,0186	100	0,000875	29,902181	106	6	18	1978554,2	1,97855
-50	180,775	102	96	1773,40	1,77	330	4	0,0186	100	0,001	26,332344	106	6	18	1742346,8	1,74235
-40	180,775	102	96	1773,40	1,77	330	4	0,0186	100	0,001	26,332344	106	6	18	1742346,8	1,74235
-30	180,775	102	96	1773,40	1,77	330	4	0,0186	100	0,001	26,332344	106	6	18	1742346,8	1,74235
-20	180,775	102	96	1773,40	1,77	330	4	0,0186	100	0,001	26,332344	106	6	18	1742346,8	1,74235
-10	180,775	102	96	1773,40	1,77	330	4	0,0186	100	0,001	26,332344	106	6	18	1742346,8	1,74235
0	180,775	102	96	1773,40	1,77	330	4	0,0186	100	0,001	26,332344	106	6	18	1742346,8	1,74235
15	180,775	102	95	1773,40	1,77	330	5	0,0186	100	0,00125	21,334572	106	6	18	1411656,5	1,41166

Rør 3 –  
Forsøk 1

Gradēf	Last [kg]	H [mm]	V[mm]	F i N	F i kN	L i mm	y		d i	0,025*y/di	s	Dm	e	l	E [kPa]	E [GPa]
15	15,225	75	71	149,36	0,15	300	2,19	0,0186	73	0,00075	4,3989	74	1	0,0833	21390371	21,3904
0	15,225	75	71	149,36	0,15	300	2,19	0,0186	73	0,00075	4,3989	74	1	0,0833	21390371	21,3904
-10	15,775	75	71	154,75	0,15	300	2,19	0,0186	73	0,00075	4,5578	74	1	0,0833	22163094	22,1631
-20	15,775	75	71	154,75	0,15	300	2,19	0,0186	73	0,00075	4,5578	74	1	0,0833	22163094	22,1631
-30	15,775	75	71	154,75	0,15	300	2,19	0,0186	73	0,00075	4,5578	74	1	0,0833	22163094	22,1631
-40	17,775	75	71	174,37	0,17	300	2,19	0,0186	73	0,00075	5,1356	74	1	0,0833	24972995	24,9730
-50	20,225	75	71	198,41	0,20	300	2,19	0,0186	73	0,00075	5,8435	74	1	0,0833	28415123	28,4151
-60	20,225	75	71	198,41	0,20	300	2,19	0,0186	73	0,00075	5,8435	74	1	0,0833	28415123	28,4151
-70	22,775	75	71	223,42	0,22	300	2,19	0,0186	73	0,00075	6,5803	74	1	0,0833	31997747	31,9977
<b>-80</b>	<b>27,775</b>	<b>75</b>	<b>71</b>	<b>272,47</b>	<b>0,27</b>	<b>300</b>	<b>2,19</b>	<b>0,0186</b>	<b>73</b>	<b>0,00075</b>	<b>8,0249</b>	<b>74</b>	<b>1</b>	<b>0,0833</b>	<b>39022499</b>	<b>39,0225</b>
-70	27,775	75,5	71	272,47	0,27	300	2	0,0186	73	0,0006849	8,7577	74	1	0,0833	42585949	42,5859
-60	27,775	75	71	272,47	0,27	300	2	0,0186	73	0,0006849	8,7577	74	1	0,0833	42585949	42,5859
-50	27,775	75	71	272,47	0,27	300	2	0,0186	73	0,0006849	8,7577	74	1	0,0833	42585949	42,5859
-40	27,775	75	71	272,47	0,27	300	2	0,0186	73	0,0006849	8,7577	74	1	0,0833	42585949	42,5859
-30	27,775	75	70	272,47	0,27	300	3	0,0186	73	0,0010274	5,9421	74	1	0,0833	28894799	28,8948
-20	27,775	76	70	272,47	0,27	300	3	0,0186	73	0,0010274	5,9421	74	1	0,0833	28894799	28,8948
-10	27,775	78	71	272,47	0,27	300	2	0,0186	73	0,0006849	8,7577	74	1	0,0833	42585949	42,5859
0	27,775	79	70	272,47	0,27	300	3	0,0186	73	0,0010274	5,9421	74	1	0,0833	28894799	28,8948
15	27,775	84	69	272,47	0,27	300	4	0,0186	73	0,0013699	4,5344	74	1	0,0833	22049225	22,0492

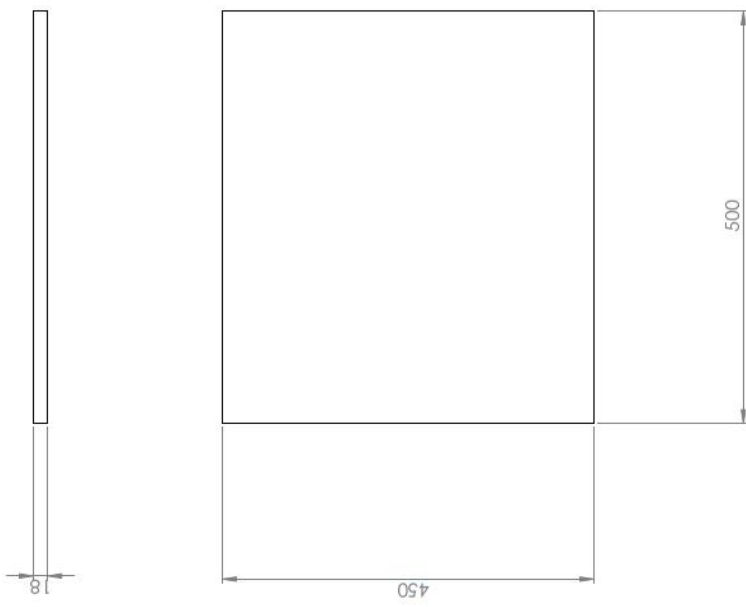
Rør 4 –  
Forsøk 1

Teststrør	T [°C]	Last [kg]	H [mm]	V [mm]	F i N	F i kN	L i mm	y i mm	di i mm	0,025*y/di	S	Dm	e	I	E [kPa]	E [GPa]
1. CRP	15	42,775	73	69	419,62	0,42	300	2,16	0,0186	0,00075	12,5304	74	2	0,67	7616429,2	7,62
	-80	102,775	75	69	1008,22	1,01	300	2,16	0,0186	0,00075	30,1067	74	2	0,67	18299906,7	18,30
2. GRP1	15	132,775	360	340	1302,52	1,30	355	10,5	0,0186	0,00075	6,7616	355	5	10,42	29040556,0	29,04
	-80	240,775	365	340	2362,00	2,36	355	10,5	0,0186	0,00075	12,2615	355	5	10,42	52662322,5	52,66
3. GRP2	15	122,775	101	97	1204,42	1,20	330	3	0,0186	0,00075	23,5410	106	6	18,00	1557649,8	1,56
	-80	222,775	101	97	2185,42	2,19	330	3	0,0186	0,00075	42,7151	106	6	18,00	2826352,5	2,83
4. Res PP	15	12,775	72	70	125,32	0,13	300	2,19	0,0186	0,00075	3,6910	74	1	0,08	17948242,2	17,95
	-80	22,775	75	72	223,42	0,22	300	2,19	0,0186	0,00075	6,5803	74	1	0,08	31997746,8	32,00

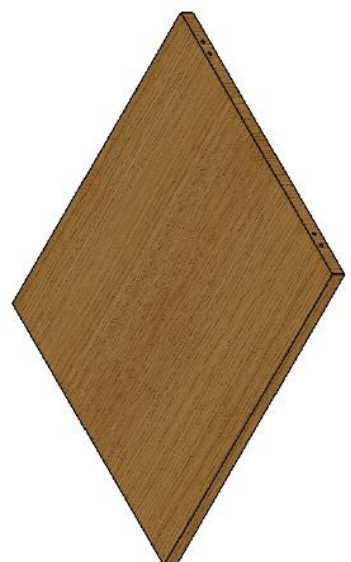
Forsøk 2

## Vedlegg C – Metodeutvikling: Detaljtegninger og sammenstillingstegning for testplattform

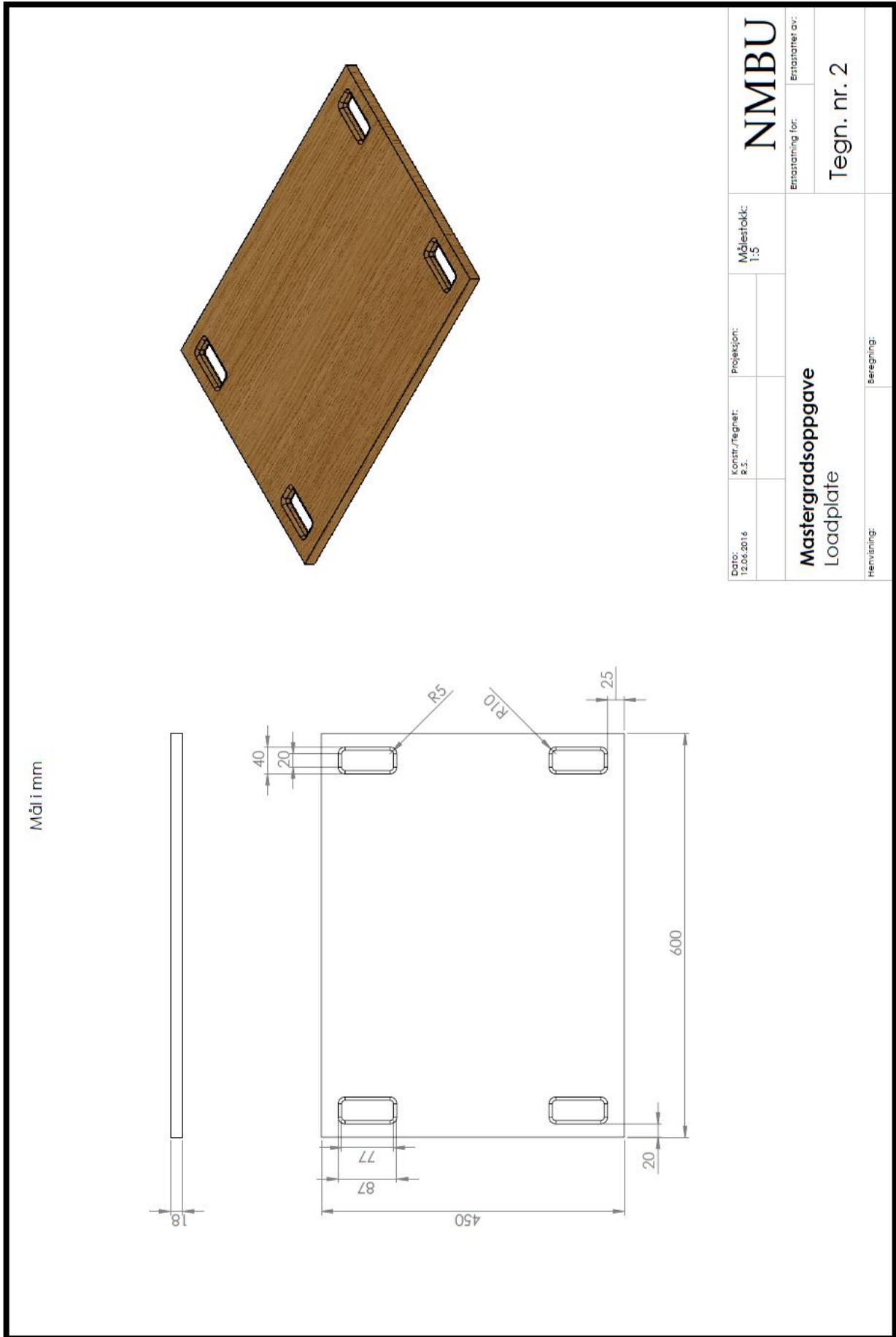
Mål i mm



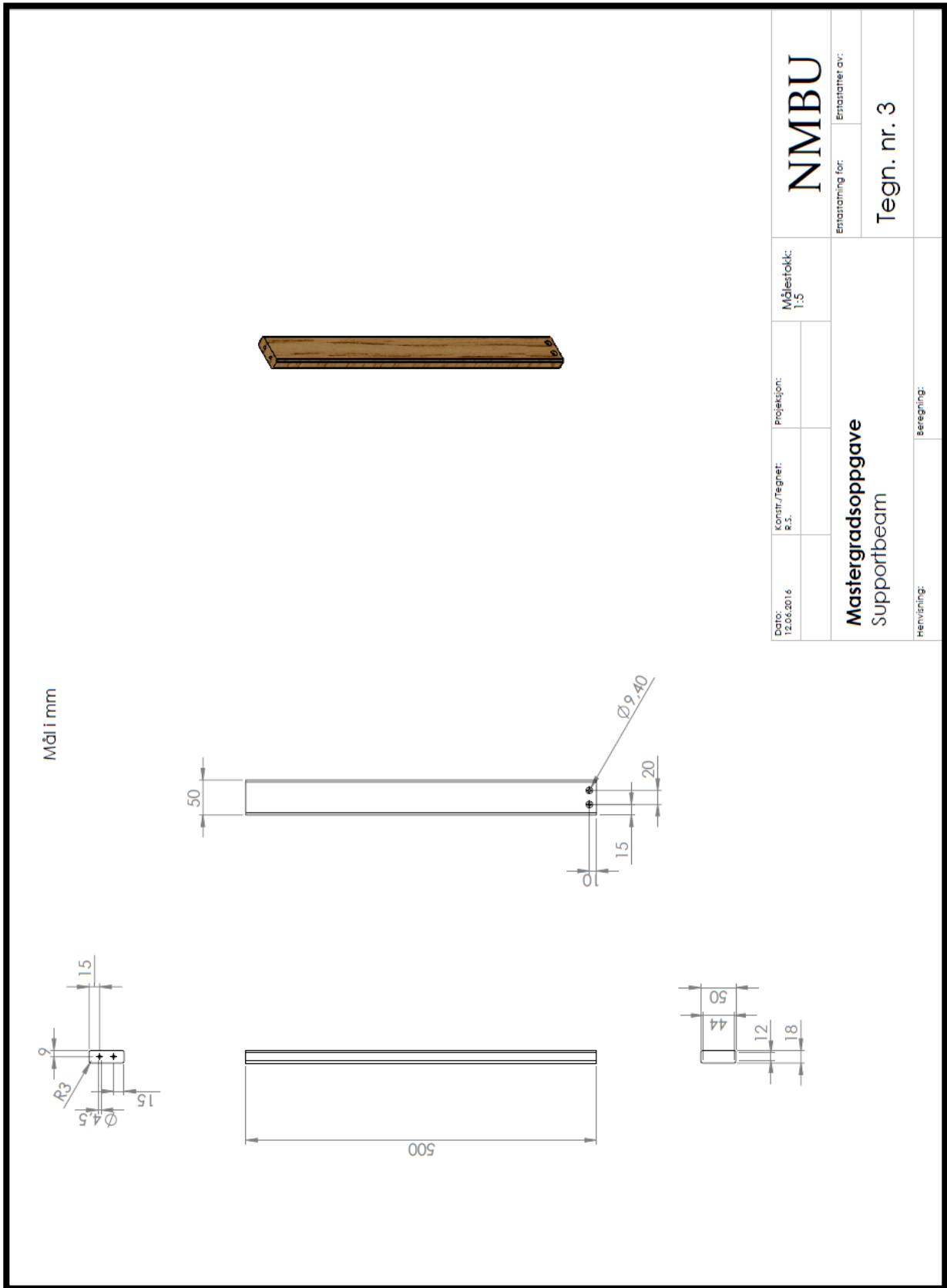
Dato:	12.06.2016	Konstr./tegn:	P.S.	Prosjekt:		Målestokk:	1:5	<b>NMBU</b>
Entasning for: <span style="float: right;">Erstatner av:</span>								
<b>Mastergradsoppgave</b>								Tegn. nr. 1
Bottomplate								
Henvising:								Beregning:



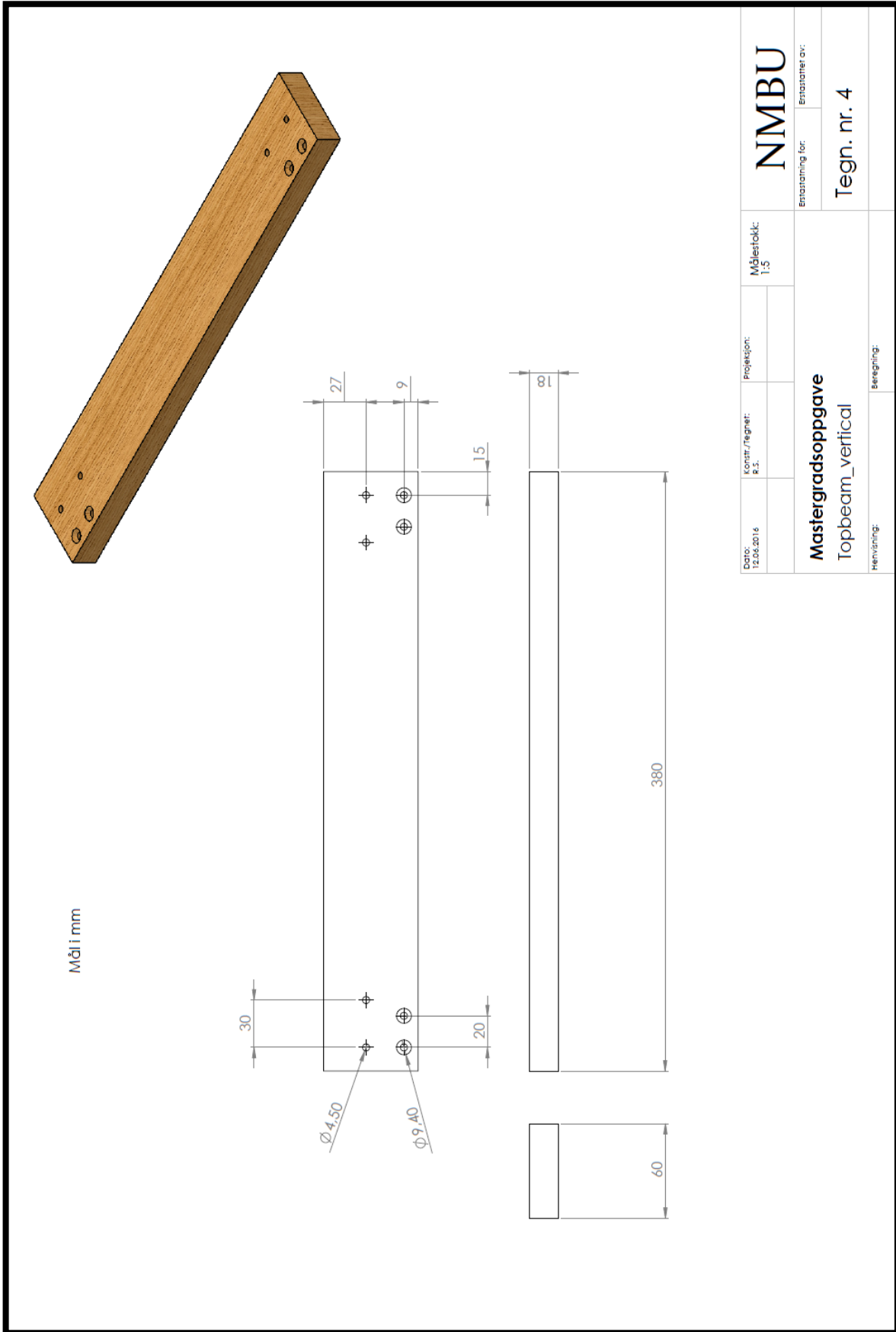


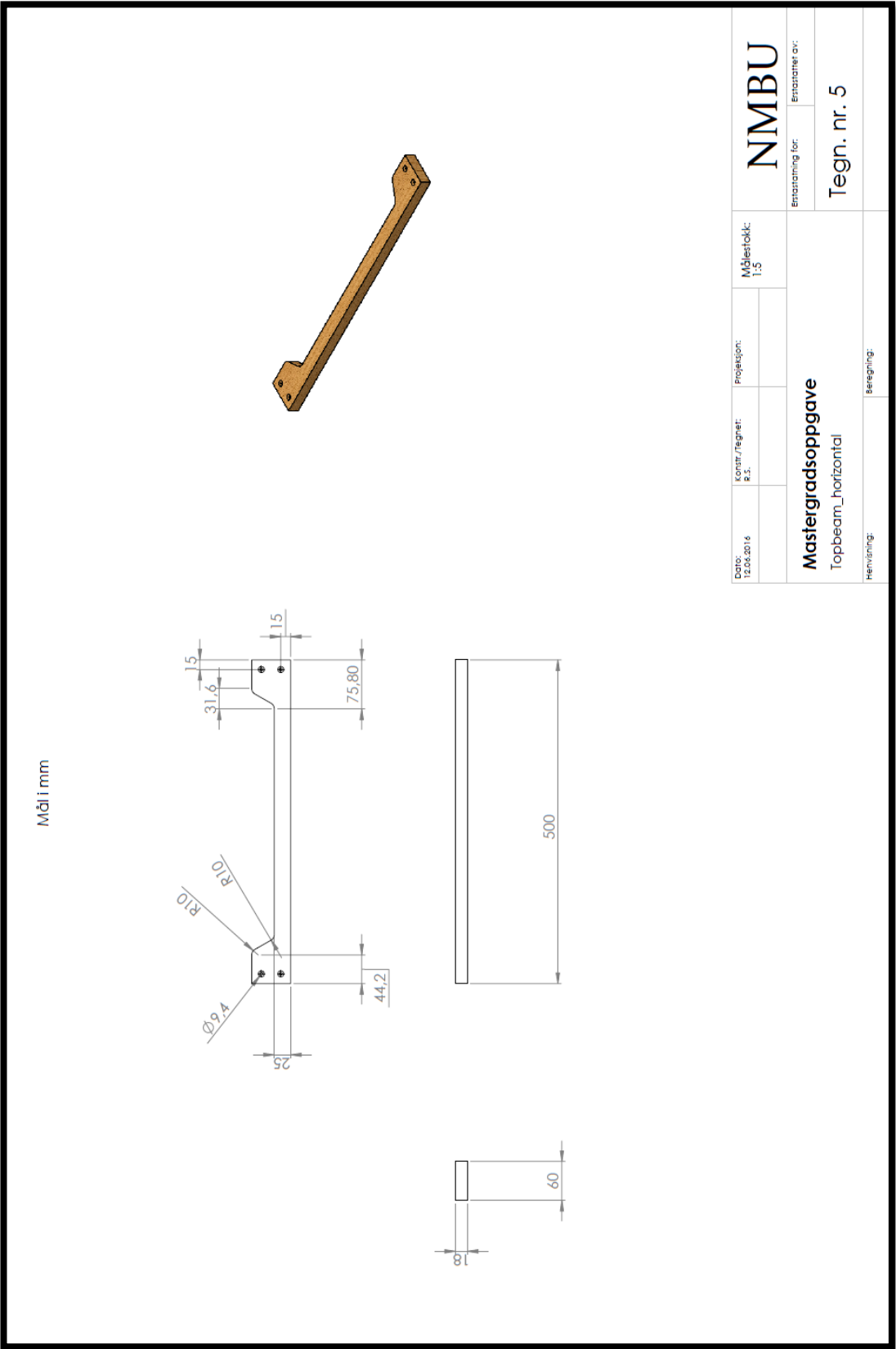


Dato: 12.06.2016	Konstr./Tegnet: R.S.	Projeksjon:	Målestokk: 1:5	<b>NMBU</b>
Mastergradsoppgave Loadplate			Erstatter av: Tegn. nr. 2	Erstatter av:
Henviðning:		Beregning:		



Dato: 12.04.2016	Konstr./Tegnet: S.S.	Projeksjon:	Målestokk: 1:5	<b>NMBU</b>
Mastergradsoppgave Supportbeam			Erstatning for:	Erstatnet av:
Henviining:	Beregning:	Tegn. nr. 3		

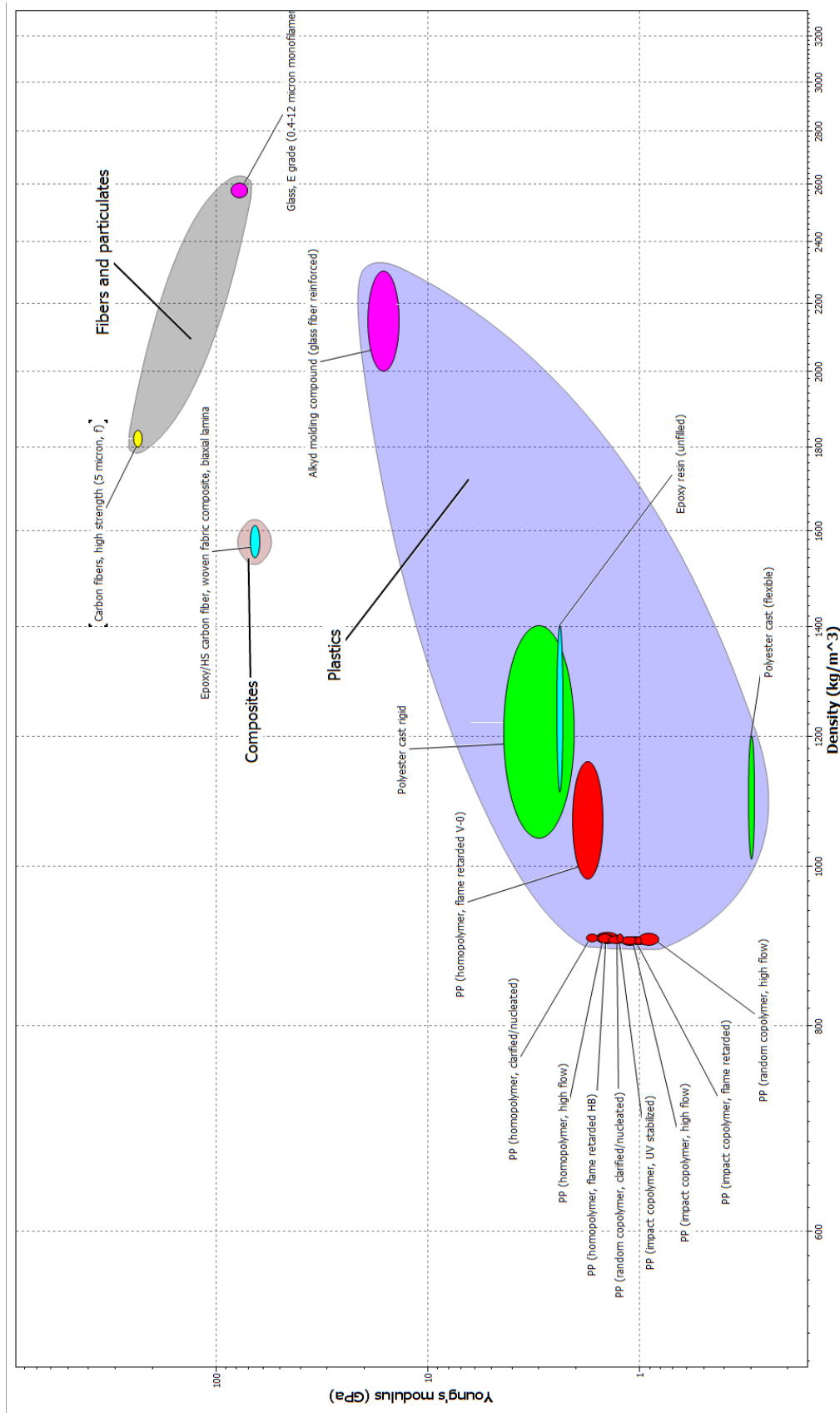




ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	P1_Bottomplate		1
2	P1_Loadplate		1
3	P3_Supportbeam		4
4	P5_Topbeam_vertical		2
5	P4_Topbeam_horizontal		2
6	Screw		24

Date: 12.06.2016	Konstr./tegnet: R.S.	Prosjeksjon:	Målestokk: 1:3	<b>NMBU</b>
<b>Mastergradsoppgave</b>			Erstatning for: Erstatner av:	
Forsøksapparat			Sammenstilling	
Henviing:		Beregning:		

# Vedlegg D – Elastisitetsmodul plott







Norges miljø- og biovitenskapelig universitet  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway