

Torbjørn Sanden

# Testing av fiberarmert kompositt som byggemateriale

Testing of Fiber-Reinforced Composite as a Construction Material

**Mai 2019**

**NTNU**

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg - og miljøteknikk

**Bacheloroppgave**

**2019**





Torbjørn Sanden

# Testing av fiberarmert kompositt som byggemateriale

Testing of Fiber-Reinforced Composite as a Construction Material

Bacheloroppgave  
Mai 2019

**NTNU**

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg - og miljøteknikk



Kunnskap for en bedre verden



## **Rapporten er ÅPEN**

### **Problemdefinering/prosjektbeskrivelse og resultatmål**

I dette prosjektet skal tidligere produserte glassfiberplater testes i strekk. Dette gjøres for å kartlegge mulighetene for å benytte glassfiber som byggemateriale. Produksjon av strekkstaver fra platene vil foregå på konstruksjonslaboratoriet på Kalvskinnet. Strekktesting gjøres ved Institutt for maskinteknikk og produksjon på Gløshaugen.

Stikkord fra prosjektet:

Kompositt, fiberarmert, glassfiber, strekktest, strekkstav, polyester, Resin Transfer Moulding (RTM), fiberlengde, fiberorientering, fiberkonsentrasjon, fiberfordeling, plastkompositt, Linudans, Greengrids, vevde glassfibermatter, NS-EN ISO 527.

## Forord

Ved å arbeide med denne oppgaven har jeg lært veldig mye om fiberarmerte kompositter og kompositter generelt gjennom mange timer med teorisøk og litt færre med laboratoriearbeid i form av produksjon og testing. Det har hele veien vært interessant og motiverende og jeg er godt fornøyd med både innsats og resultat.

Min veileder, Magnus Rannver Rafnsson, fortjener en stor takk for å ha introdusert meg til og guidet meg gjennom en spennende oppgave. Han har kommet med gode innspill og konstruktive tilbakemeldinger som har vært til god hjelp.

Thomas Uhlving har også vært til god hjelp ved laboratorier på Kalvskinnet i forbindelse med produksjon av prøver.

Jeg må også takke Øyvind Haave og spesielt Carl-Magnus Midtbø ved Institutt for maskinteknikk og produksjon for hjelpsomhet i forbindelse med testing.

Trondheim, mai 2019

---

Torbjørn Sanden



## Sammendrag

En kompositt er et materiale som er sammensatt av to ulike materialer. Glassfiber er en type kompositt der glassfibre er omsluttet av et plastmateriale. Spenningen overføres fra plastmateriale til glassfibrene, og materiale tåler mer spenning enn plastmaterialet alene, samtidig som det er blitt mer elastisk enn glassfibrene.

Denne oppgaven fokuserer på testingen av 3 ulike glassfiberplater. Ulikheten i platene ligger i tilpasninger av fibrene hva angår orientering, mengde og lengde. Dette er viktige faktorer med tanke på hvor mye spenning en glassfiberplate kan tåle.

Hensikten er å bidra til videre utvikling av fiberarmert kompositt slik at dette kan benyttes som byggemateriale.

Glassfiberplatene var produsert på forhånd og ble kuttet til strekkstaver med ulikt tverrsnitt etter en standard. Disse skulle så strekktestes for å kartlegge strekkfastheten til materialet.

Gjennom strekktesting erfarte en at større tverrsnitt må til for at kontinuerlige fibre skal utnytte sin fulle kapasitet.

Videre kunne testingens resultater indikere at høyt fiberinnhold er nøkkelen til høyere styrke og at platen med en andel kontinuerlige fibre ordnet i 45/45 kan ta opp mer spenning enn de to platene som hadde mindre andel av dette.

Selv om en plate hadde 10 prosentpoeng mer fiberinnhold enn platen med kontinuerlige fibre var det stor forskjell i strekkfasthet: Større andel kontinuerlige fibre med orientering 45/45 tåler mer spenning i strekk enn kortere tilfeldig orienterte fibre.

## Abstract

A composite is a material that consists of two or more different materials. Fiberglass is a composite where fibers of glass are covered by a plastic material. Stress are transferred from the plastic material to the fibers, and so this material can withstand more stress than the plastic alone while it is more elastic than the glass alone.

This thesis deal with 3 different plates of fiberglass. The difference between them are fiber-orientation, -amount and -length. These are important factors what tensile strength concerns.

The purpose of this thesis is to contribute to development of fiber-armed composites so that it can be used as a building material.

The plates of fiberglass was made in advance and were cut to strain samples following a standard. They were tested to understand the tensile strength of the different plates.

Through testing it was experienced that larger cross section was needed for the fibers to reach its potential.

Results from testing indicated that higher percentage of fiber meant higher tensile strength. It was also learned that the plate with continuous fibres with 45/45 orientation were stronger than the other two with less continuous fibres.

Even tough a plate had 10 percentage points more than the plate with continuous fibres, there was a difference in tensile strength: Higher amount of continuous fibres oriented 45/45 results in higher tensile strength than the plate(s) with shorter, discontinuous fibres.

## Innholdsfortegnelse

<i>Forord</i> .....	<i>ii</i>
<i>Sammendrag</i> .....	<i>iii</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>iv</i>
<b>1 Innledning</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Teori [3]</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Kompositt</b> .....	<b>2</b>
2.1.1 Partikkelforsterkede kompositter .....	3
2.1.2 Strukturkompositter.....	3
2.1.3 Nanokompositter .....	4
<b>2.2 Fiber-forsterkede kompositter</b> .....	<b>5</b>
2.2.1 Betydningen av fiberlengde.....	6
2.2.2 Betydningen av fiber-orientering, konsentrasjon og fordeling.....	7
2.2.3 Andre fibertyper .....	10
2.2.4 Matriksfasen [3] .....	11
<b>2.3 Resin Transfer Moulding (RTM) [5]</b> .....	<b>12</b>
<b>3 Metode</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1 Strekktest [3]</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2 Produksjon av strekkstaver</b> .....	<b>17</b>
3.2.1 Antall strekkstaver og design .....	19
<b>3.3 Testoversikt</b> .....	<b>21</b>
<b>4 Resultater</b> .....	<b>25</b>
<b>5 Diskusjon</b> .....	<b>28</b>
<b>6 Konklusjon</b> .....	<b>30</b>
<b>7 Kildeliste:</b> .....	<b>32</b>
<b>8 Figurliste:</b> .....	<b>33</b>
<b>9 Tabelliste</b> .....	<b>36</b>
<b>10 Vedlegg</b> .....	<b>37</b>
<b>10.1 Vitenskapelig artikkel</b> .....	<b>37</b>
<b>10.2 Bilder av Session I-III, strekkstaver A-D etter utført strekktest</b> .....	<b>39</b>
<b>10.3 A-3 Plakat</b> .....	<b>46</b>

# 1 Innledning

Denne oppgaven bidrar i et prosjekt som handler om kompositter som byggemateriale under et foretak kalt Linudans. Tidligere i prosjektet har det blitt produsert glassfiberplater som blir testet og resultatene blir presentert i denne oppgaven.

Linudans er et foretak som ble grunnlagt i 2009 og har spesialisert seg innen elektrisk infrastruktur. De ønsker å komme med miljøvennlige løsninger på nye og eksisterende problemer og utfordringer innenfor den stadig økende energitransporten.[1]

Platene ble produsert som en prosjektoppgave av studenter under UROP. UROP står for Undergraduate Research Opportunity Program og er et program som rekrutterer studenter til forskning tidlig i studiet. Her får studentene praktiske oppgaver med en forskningsmessig tilnærming.[2]

En kompositt er et materiale som er sammensatt av to eller flere materialer. Armert betong er et eksempel på et komposittmateriale. Stål er støpt inn i betongen og fungerer som armering. Dette gjør at betongen ikke er like utsatt for sprø brudd. Stålet har nemlig mye bedre egenskaper i strekk enn betong. Dette gjør at for eksempel broer vanligvis lages i armert betong, mens uarmert betong ikke ville fungert.

Fiberarmert kompositt er en slags forminskning av armert betong. Betongen er erstattet av en resin/matriks (dette er fyllmassen) som kan være polyester, vinylester, epoxy også videre. Stålet er erstattet av fibre av blandt annet karbon, glass, aramid og basalt.

Egenskapene til en fiberarmert kompositt kan tilpasses ved valg av materialer og ulike tilpasninger av fiberarmeringen: Konsentrasjon, lengde, orientering/plassering, form og tykkelse.

Denne oppgaven fokuserer på testingen av 3 ulike glassfiberplater. Ulikheten i platene ligger i tilpasninger av fibrene som nevnt i forrige avsnitt.

Hensikten er å bidra til videre utvikling av fiberarmert kompositt slik at dette kan benyttes som byggemateriale.

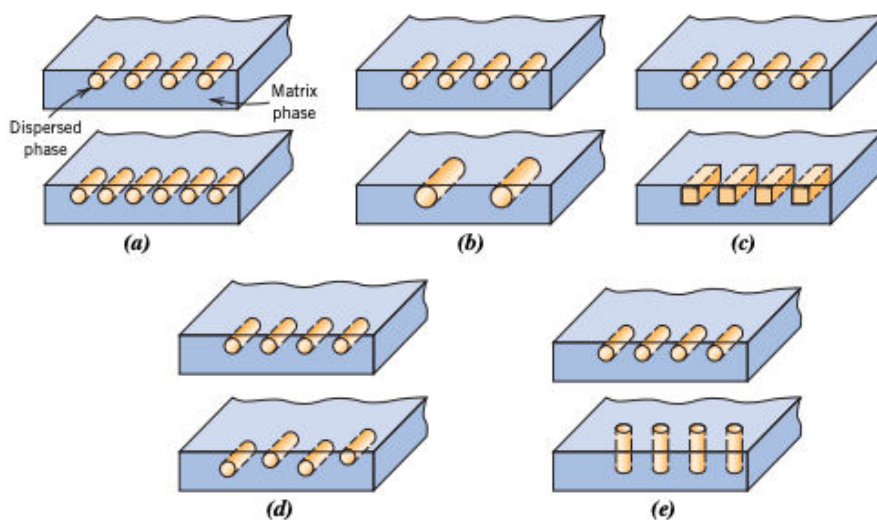
## 2 Teori [3]

### 2.1 Kompositt

Callister og Rethwisch skriver «A composite is a multiphase material that is artificially made, as opposed to one that occurs or forms naturally. In addition, the constituent phases must be chemically dissimilar and separated by a distinct interface.»

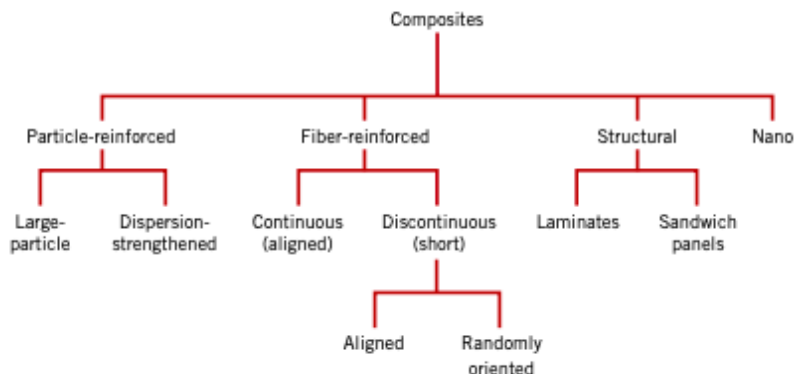
Beina i kroppen vår består for eksempel av strekkfaste, elastiske kollagen-lenker og sprøere, hardere mineraler. Dette kan altså også sees på som en kompositt, men det er ikke kunstig laget slik Callister og Rethwisch definerer en kompositt.

Utviklingen av nye og bedre kompositter har blitt og gjøres fortsatt etter søken på bedre egnede materialer til forskjellige formål. Ulike kompositter har blitt utviklet for å oppnå egenskaper som ikke fins i andre materialer. En utnytter de gode egenskapene hos to eller flere bestanddeler og eliminerer/minsker svakhetene. Slik oppnår en for eksempel sterke og lette materialer som tåler slag, slitasje og røffe miljøer. Mange kompositter består av bare to ulike materialer: armering/tilslag (fiber, partikler osv) og matriks. Matriksen omslutter fiberen og egenskapene i denne type kompositter kan påvirkes ved forskjellig konsentrasjon, størrelse, form, fordeling og orientering på fibre. Dette er vist i Figur 2-1 under.



Figur 2-1: Forskjellige måter egenskapene kan påvirkes i en to-fase kompositt. (a) Konsentrasjon, (b) størrelse, (c) form, (d) fordeling og (e) orientering.[3]

En klassifisering av kompositter kan vises som i Figur 2-2. Det gir 4 hovedkategorier: Partikkel-forsterket -, fiber-forsterket -, struktur - og nano kompositt:



Figur 2-2: En klassifisering av kompositter.[3]

### 2.1.1 Partikkelforsterkede kompositter

Storpartikkel-forsterket kompositt er de komposittene der armeringen/tilslaget er større enn atom og molekyl. I de fleste tilfeller er storpartiklene som tilføres hardere og stivere enn matriksen. Partiklene hindrer gjerne bevegelse i nærliggende matriks. Dette gjør at partiklene kan ta opp litt av spenningen kompositten utsettes for. For at dette skal skje kreves det god heft mellom partiklene og matriksen. Betong er et eksempel på en storpartikkel-forsterket kompositt. Matriksen er sement (som herder med vann) mens sand, singel og grus er tilskuddet og regnes som storpartikler.

Partikkelkompositter kan også være forsterket av partikler med atom- og molekylstørrelse. Da er diameteren mellom 10 og 100 nm. Kompositten blir forsterket på molekyl- og atom-nivå, der partiklene forhindrer glidning og dislokasjoner. Dette resulterer i et materiale med høyere motstand mot plastisk deformasjon som igjen gjør det stivere og hardere. Metaller og metallegeringer kan forsterkes på denne måten.

### 2.1.2 Strukturkompositter

En strukturkompositt er et materiale som settes sammen av flere lag med andre materialer. De har normalt lav tetthet, høy styrke og stivhet. De mekaniske egenskapene i strukturkompositter er ikke bare avhengig av materialene det består av, men også hvordan de er satt sammen. De mest kjente strukturkomposittene er laminat og sandwich paneler:

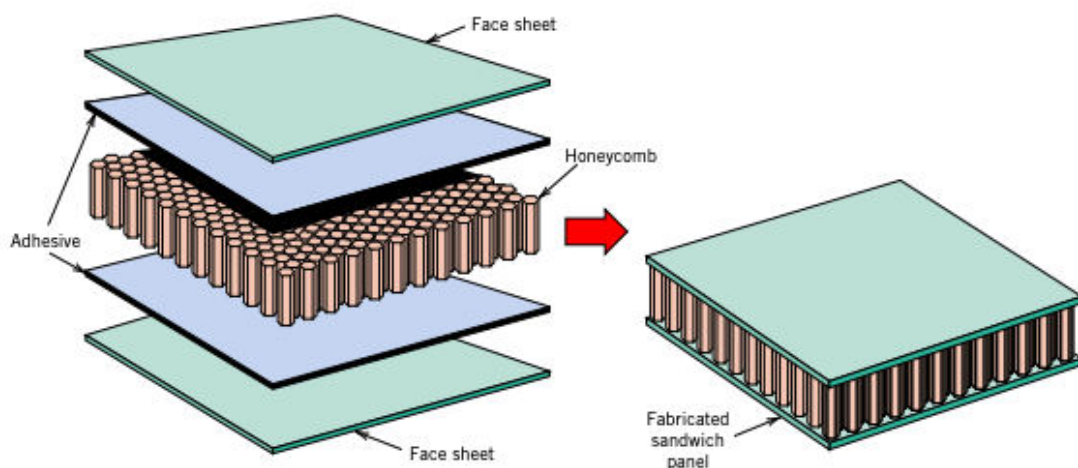
### 2.1.2.1 Laminat

Laminat er sammensatt av plater eller paneler som limes sammen til et materiale. De forskjellige lagene har ofte en foretrukken retning som tåler mer spenning enn andre retninger. Ved å lime sammen flere lag med ulike styrkeretninger kan en så påvirke hvilke retninger som kan tåle mye spenning.

### 2.1.2.2 Sandwich-panel

Sandwich paneler er designet for lav vekt og høy styrke. De består som oftest av en tykk kjerne som er limt til to tynnere ytterskall. Når et sandwich-panel blir bøyd vil det ene ytterskallet bli utsatt for trykk- samtidig som motsatt ytterskall utsettes for strekkrefter. Derfor har materialet som blir brukt i ytterskallene høy styrke og stivhet slik som for eksempel aluminium, stål, plast og kryssfiner.

Kjernen må være stiv nok til å motstå skjærspenningen på tvers av panelet, slik at det ikke bøyes i tillegg til at den skal støtte ytterskallene og holde de sammen. Trykk- og strekkreftene som virker på kjernen er mye mindre enn det som virker på ytterskallene. Som kjerne benyttes ofte polymerskum, tre eller såkalt bikube. Bikube-kjerne er sekskantede profiler som er orientert vinkelrett i forhold til ytterskallene. Dette er vist i Figur 2-3 under.



Figur 2-3: Oppbygningen av et sandwich-panel med bikube-struktur i kjernen (honeycomb.)

### 2.1.3 Nanokompositter

Nanokompositter er en type kompositt som har opplevd en enorm utvikling den siste tiden. Kompositter av denne typen består nanopartikler omsluttet av en matriks. Nanopartikler har en maksimal størrelse på 100 nm. Ved å konstruere kompositter på denne måten kan man ved forskjellige sammensetninger oppnå forbedringer/endringer i mekaniske -, elektriske -, magnetiske -, optiske -, termiske - og biologiske egenskaper. Nanokompositter kan være både metaller og keramer, men mest vanlig er polymerer. Et eksempel på en nanokompositt er karbon nanorør, et ekstremt sterkt materiale. Omgitt av en silikon-matriks egner den seg utmerket som et flammehemmende belegg. Et slikt belegg vil også ha høy slitestand og vil ikke produsere giftige gasser når det utsettes for høy temperatur. I tillegg vil et slikt belegg ha veldig god heft til glass, metall, tre, plastikk og andre komposittoverflater. Denne nanokompositten benyttes i romfart, luftfart, elektroniske og industrielle formål. Da er den gjerne et belegg på ledninger og kabler, drivstofftanker og andre kompositter. Andre bruksområder for andre nanokompositter er blant annet matindustri, sport og motorsport, transport, energilagring, odontologi, vindmøller, medisin, smøring og solcellepaneler.

## 2.2 Fiber-forsterkede kompositter

Fra klassifiseringen i Figur 2-2, side 3 skal vi til slutt se på fiber-forsterkede kompositter, da det er dette som er fokuset i denne avhandlingen.

Når noen sier ordet kompositt tenker folk gjerne på fiber-forsterkede kompositter som glassfiber og karbonfiber som benyttes i luftfart, militære, sportsutstyr, racerbiler osv. Det er denne typen kompositt som oftest er kjent som en kompositt og det er kanskje fordi den er mest synlig i det daglige. En kan høre og se reklamer for sports- eller turutsyr der det legges vekt på at det for eksempel er en karbonfiberramme på racketen eller en kajakk av glassfiber. Vi kan også se karbonfiber i bilinnredning eller skistaver og kevlar (aramidfiber) i båtseil eller skuddsikre vester på film. Det er denne typen som har hatt størst innvirkning på hva som er mulig for forskjellige bransjer, fordi forsterkningspotensialet er større ved benyttelse av fiber sammenlignet med de tidligere nevnte komposittypene fra Figur 2-2, side 3. Fiber-forsterkede kompositter kan tilby høy styrke og strekkfasthet samtidig som vekten er lav. De tåler også røffe miljøer da de som oftest ikke korroderer slik som for eksempel stål og jern.

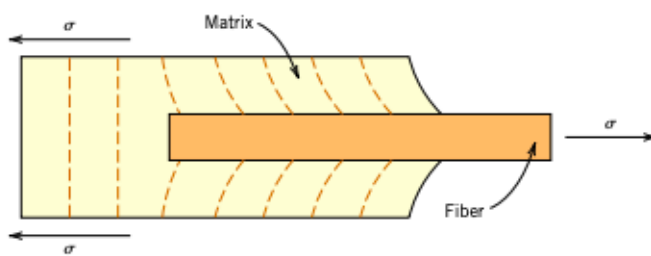


Som Figur 2-2 viser er denne typen delt inn etter fiberlengde.

I denne oppgaven skal jeg se nærmere på fiber-forsterket kompositt med lengre fibre (Fiber-reinforced, continuous, aligned i Figur 2-2 side 3.) Derfor skal vi først se litt på betydningen av fiberlengden og deretter betydningen av orientering, konsentrasjon og fordeling

### 2.2.1 Betydningen av fiberlengde

De mekaniske egenskapene avhenger ikke bare av fiberens egenskaper (og matriksen,) men også i hvor stor grad spenning overføres til fibre fra matriksen. Hvor mye spenning som kan overføres fra matriks til fiber avhenger av lengden på fibre. Det er fordi spenningsoverføringen opphører ved fiberens ende. Dette er vist i Figur 2-4. Vi ser at det ikke overføres spenning ved fiberens ytterpunkt.



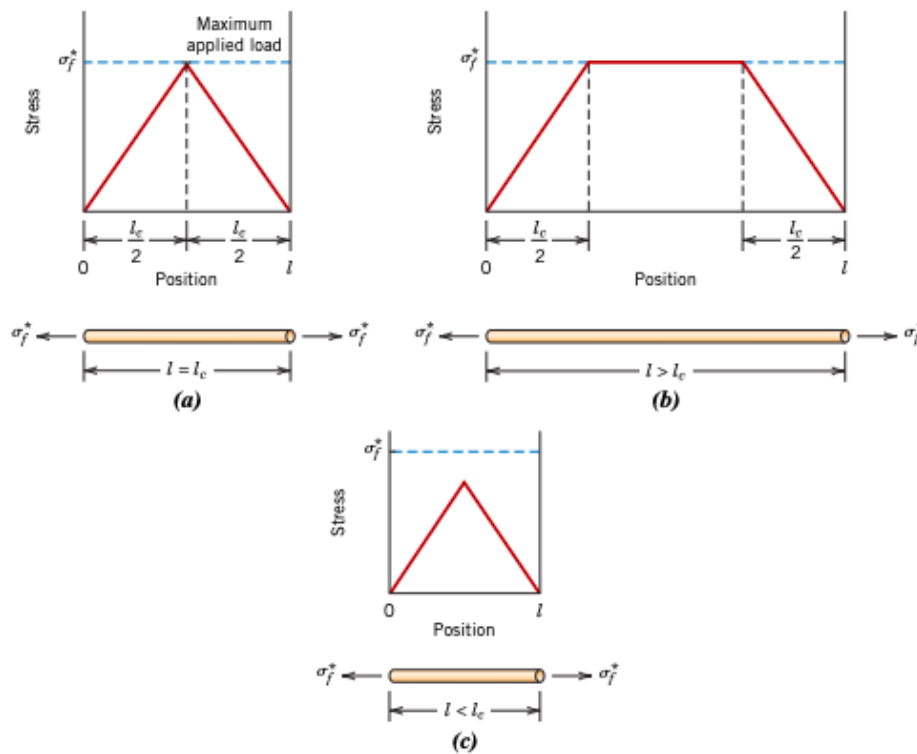
Figur 2-4: En fiberforsterket kompositt som er påsatt spenning,  $\sigma$ . De stiplede linjene i figuren viser spennings- og deformasjonsmønsteret i matriksen som omslutter fiberen.

Det opereres med en kritisk fiberlengde for å anslå lengden fibre bør ha for å forsterke effektivt. Kritisk fiberlengde  $l_c$ , er avhengig av fiberens diameter  $d$ , strekkfasthet  $\sigma_f^*$  og heften mellom fiber og matriks  $T_c$ . Den kritiske fiberlengden kan da regnes ut med formelen:

$$l_c = \frac{\sigma_f^* \cdot d}{2T_c}$$

For de fleste glass- og karbonfiber kompositter er den kritiske lengden rundt 1 mm. Dette er mellom 20 og 150 ganger fiberens diameter. Dersom kompositter med denne kritiske lengden utsettes for spenning lik  $\sigma_f^*$  vil spenning-posisjon kurven være som i Figur 2-5 (a). Fiberen vil bare kunne ta opp maksimal spenning akkurat ved fiberens halve lengde (det aksiale

midtpunktet.) Ved fibre lengre enn  $l_c$  slik vi ser i Figur 2-5 (b), blir fiberen mer effektiv og tar opp mer av spenningen. En kan si at arealet under den røde kurven er arbeidet fiberen gjør for matriksen. Som Figur 2-5 (c) viser blir dette arbeidet mindre når en beveger seg under kritisk lengde.



Figur 2-5: En fiberarmert kompositt er påført en spenning i lengderetningen lik fiberens strekkfasthet,  $\sigma_f^*$ . En spenning-posisjonskurve er illustrert med fiberlengdene: (a) like lang som kritisk lengde, (b) lengre enn kritisk lengde og (c) kortere enn kritisk lengde.

Fibre med  $l \gg l_c$  kalles kontinuerlige eller lange fibre og har normalt fiberlengder over 15 ganger kritisk lengde:  $l > 15l_c$ . Det som i Figur 2-2, side 3 omtales som “discontinuous” eller korte fibre har fiberlengder under dette:  $l < 15l_c$ .

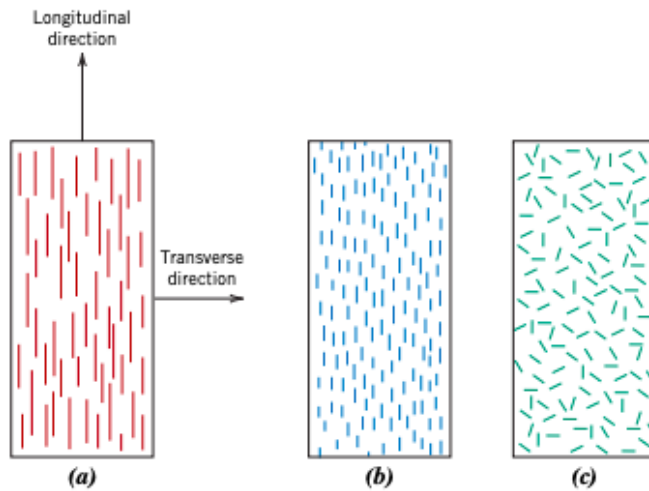
Kompositter med fiberlengder betydelig under kritisk lengde, det vil si  $l \ll l_c$ , er som partikkel-forsterkede kompositter å regne da spenningsoverføringen blir minimal.

For å få en tydelig økning i styrke må fibreene altså være kontinuerlige.

## 2.2.2 Betydningen av fiber-orientering, konsentrasjon og fordeling

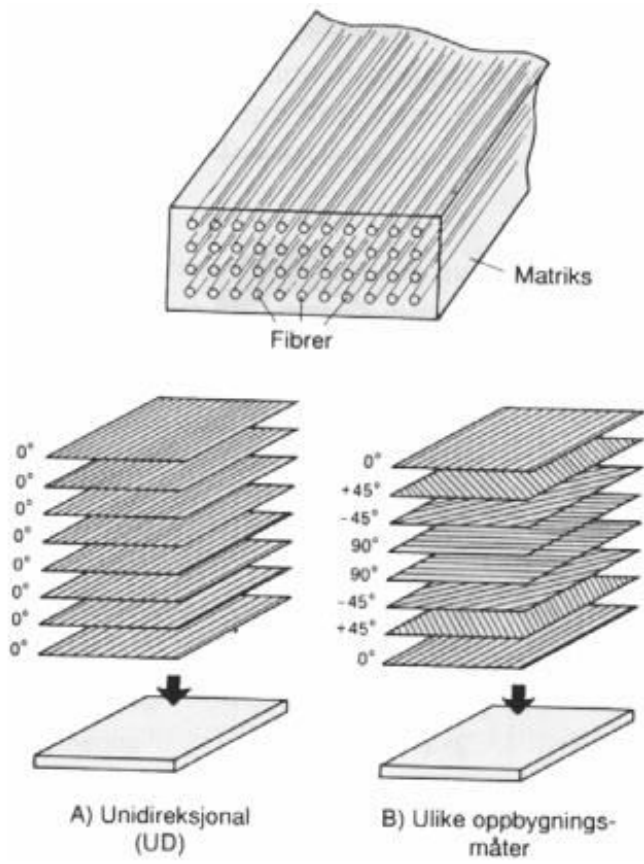
Hvordan fibreene er fordelt, mengden og retningen har også mye og si for styrken til komposittmaterialet. Figur 2-6 viser grovt sett de ulike måtene å orientere fibreene på.

Kontinuerlige fibre er vanligvis ordnet i en retning og man vil oppnå bedre mekaniske egenskaper dersom fibrene er jevnt fordelt. Det har imidlertid mye å si hva slags retning(er) spenningen er størst og kompositten designes gjerne etter kartlagte forutsetninger.



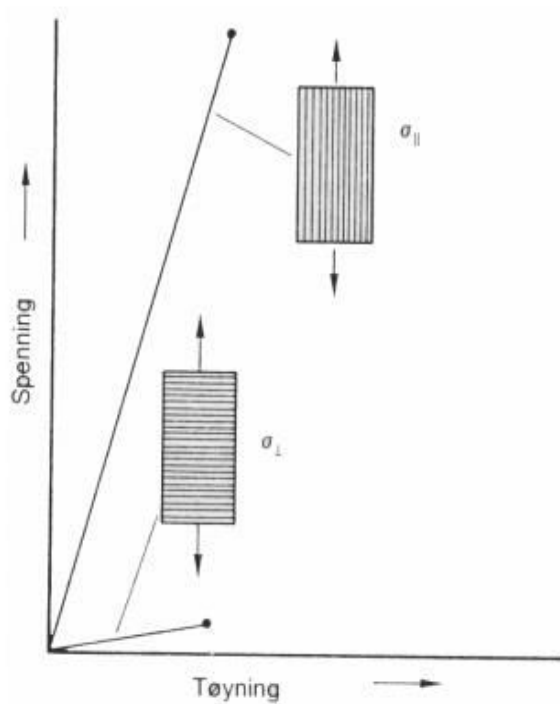
Figur 2-6: Ulik fiberorientering: (a) kontinuerlig og ordnet, (b) korte og ordnet og (c) korte og vilkårlig ordnet.

Det må også nevnes at med en orientering som Figur 2-6 (a) representerer vil de mekaniske egenskapene avhenge veldig av hvilken retning de måles i: I Figur 2-7 presenteres ulike måter å orientere fibrene på: A) representerer en såkalt unidireksjonal orientering. Ved denne metoden legges alle fibrene i en retning og styrken maksimeres følgelig i denne retningen. B) viser en variant av hvordan fibrene ellers kan orienteres. Ved å legge fibrene i ulike retninger vil også styrken fordeles deretter.



Figur 2-7: Ulik oppbygning av fiberarmerte kompositter.[4]

Figur 2-8 viser hvordan styrken i en kompositt med unidireksjonal orientering av fibrene endres avhengig av hvilken retning styrken testes i. En ser at styrken er betraktelig høyere når kompositten utsettes for spenning parallelt med ( $\sigma_{||}$ ) - sammenlignet med normalt på ( $\sigma_{\perp}$ ) fibrene.

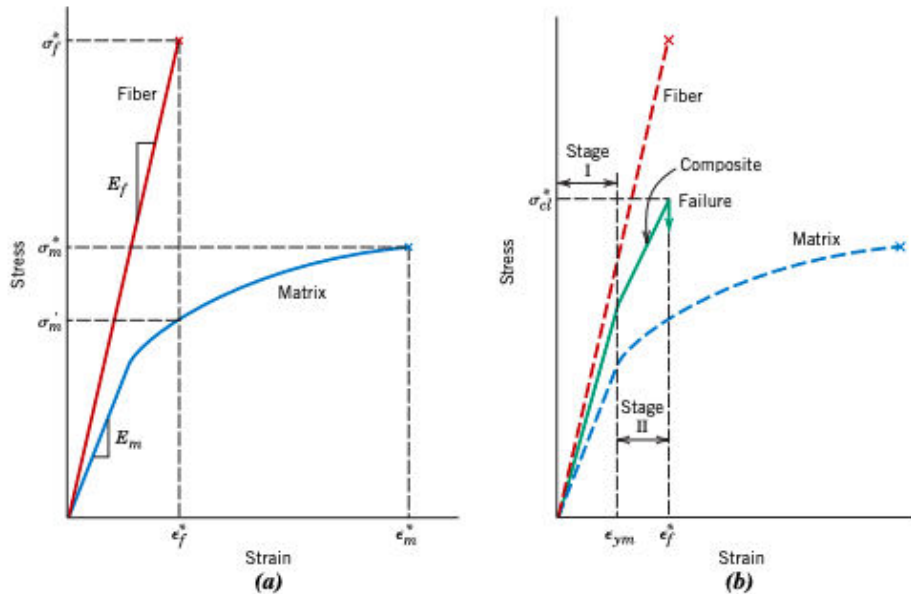


Figur 2-8: Streck-tøyningskurve for testing av unidireksjonale fiberarmerte kompositter normalt på,  $\sigma_{\perp}$ , og parallelt med,  $\sigma_{||}$ , fiberretningen.[4]

I Figur 2-9 (a) er det presentert spenning-tøyningskurver for en typisk fiber og en typisk matriks. Vi kan se at fiberen tåler mer spenning, men ikke mye tøying før den går til brudd hvilket tilsier at fiberen er sprø. Matriksen er derimot gjerne mer duktil og tåler mer tøying, men ikke like mye spenning. En har altså normalt en situasjon der matriksen tåler mer tøying enn fiberen,  $\epsilon_m^* > \epsilon_f^*$ , mens fiberen tåler mer spenning,  $\sigma_f^* > \sigma_m^*$ , før den går til brudd.

En kompositt sammensatt av disse to materialene er fremstilt i Figur 2-9 (b). Fiberen og matriksen er representert i samme diagram med stiplede linjer for sammenligning. Det er markert to steg i deformeringsprosessen til kompositten, Stage I og Stage II. Kurven i Stage I er normal sett lineær og kompositten deformerer elastisk. Ved  $\epsilon_{ym}$  (y=yield, m=matriks) gir matriksen etter og kompositten går fra Stage I til Stage II. Fibrene vil fortsatt deformerer elastisk fordi strekkfastheten er mye høyere slik Figur 2-9 (a) illustrerer. I Stage II vil kurven også være nokså lineær, men den vil flate litt ut sammenlignet med Stage I. Fibrene i kompositten vil ta en større del av spenningen i Stage II enn i Stage I og det er til slutt disse

som går til brudd. Selvs bruddet i en kompositt av denne typen er imidlertid ikke katastrofalt: Fibrene vil gå til brudd først, men til ulik tid. Dette er fordi det vil være forskjeller fra fibertråd til fibertråd. Samtidig vil matriksen fremdeles være intakt selv om den deformeres plastisk. Dette gjør at de fibrene som går til brudd fortsatt vil kunne ta litt av spenningen, selv om de nå er kortere enn opprinnelig.



Figur 2-9: Spenning-tøyningkurver eller Elastisitetsmodul ( $E$ -modul). (a) Sprø fiber og duktil matriks. Bruddpunkt er merket. (b) Kompositt sammensatt av samme fiber og matriks (nå stiplet.) Fibrene er lange og ordnet og spenningen er påført i retningen på fibrene.  $\epsilon^*$ =tøyning ved brudd,  $\sigma^*$ =bruddspenning,  $f$ =fiber,  $m$ =matriks.

### 2.2.3 Andre fibertyper

Callister[3] klassifiserer fibre i tre ulike grupperinger basert på diameter og karakter:

«*Whiskers, fibers and wires.*» (I mangel på gode norske ord vil det også omtales som *whiskers* videre.)

*Whiskers* er veldig tynne, enkrystalliske og er ekstremt lange sammenlignet med diameteren. Denne typen fibre er grunnet diverse kjemiske og fysiske faktorer nærmest feilfrie, noe som fører til en enorm styrke. Disse materialene er blandt de sterkeste materialene en kjenner til. Eksempler på whiskers er: Grafitt, silikonnitrid, aluminiumoksid og solikonkarbid.

*Fibre* er polykrystallinske eller amorfte og har liten diameter. De er gjerne enten polymerer eller keramer (og glasskeramer). Eksempler på fibre er: Aramid, karbon, E-glass, Bor, silikonkarbid, aluminiumoksid og UHMPWE (Ultra high molecular weight polyethylene).

Vaiere har relativt stor diameter og er består av metaller. Eksempler på vaiere innenfor fiberforsterkning er: Stål, molybden og wolfram (tungsten i figuren under.)

Under er alle disse fibertypene presentert med tilhørende egenskaper:

<i>Material</i>	<i>Specific Gravity</i>	<i>Tensile Strength [GPa (10<sup>6</sup> psi)]</i>	<i>Specific Strength (GPa)</i>	<i>Modulus of Elasticity [GPa (10<sup>6</sup> psi)]</i>	<i>Specific Modulus (GPa)</i>
<b>Whiskers</b>					
Graphite	2.2	20 (3)	9.1	700 (100)	318
Silicon nitride	3.2	5–7 (0.75–1.0)	1.56–2.2	350–380 (50–55)	109–118
Aluminum oxide	4.0	10–20 (1–3)	2.5–5.0	700–1500 (100–220)	175–375
Silicon carbide	3.2	20 (3)	6.25	480 (70)	150
<b>Fibers</b>					
Aluminum oxide	3.95	1.38 (0.2)	0.35	379 (55)	96
Aramid (Kevlar 49)	1.44	3.6–4.1 (0.525–0.600)	2.5–2.85	131 (19)	91
Carbon <sup>a</sup>	1.78–2.15	1.5–4.8 (0.22–0.70)	0.70–2.70	228–724 (32–100)	106–407
E-glass	2.58	3.45 (0.5)	1.34	72.5 (10.5)	28.1
Boron	2.57	3.6 (0.52)	1.40	400 (60)	156
Silicon carbide	3.0	3.9 (0.57)	1.30	400 (60)	133
UHMWPE (Spectra 900)	0.97	2.6 (0.38)	2.68	117 (17)	121
<b>Metallic Wires</b>					
High-strength steel	7.9	2.39 (0.35)	0.30	210 (30)	26.6
Molybdenum	10.2	2.2 (0.32)	0.22	324 (47)	31.8
Tungsten	19.3	2.89 (0.42)	0.15	407 (59)	21.1

<sup>a</sup>As explained in Section 13.8, because these fibers are composed of both graphitic and turbostratic forms of carbon, the term *carbon* instead of *graphite* is used to denote these fibers.

Figur 2-10: Ulike typer fiberforsterkende materiale presentert med tetthet, strekkfasthet, spesifikk styrke(strekkfasthet/tetthet), E-modul, og spesifikk modul (E-modul/tetthet.)[3]

#### 2.2.4 Matriksfasen [3]

Matriksfasen i en fiberforsterket kompositt kan være av metall, polymerer eller et keram.

Metall og polymerer er imidlertid mest brukt da matriksfasen gjerne skal være duktil.

Matriksfasens funksjoner er å binde sammen fibrene og overføre påført spenning til fibrene.

Det er fibrene som tar opp mesteparten av spenningen som påføres og vil gå til brudd først da

fibrene normalt er mindre duktile enn matriksen.

Matriksen skal også beskytte fibrene fra skader som kan oppstå fra slag, slitasje, røffe miljøer også videre i overflaten.

Fibrene holdes også adskilt på grunn av matriksen, og forplantning av sprø brudd hindres dermed grunnet matriksens mykhet og formbarhet. Dersom et brudd i en fiber kunne forplante seg til de nærliggende fibrene ville en fått langt verre brudd en det man får slik det er utformet: Nettopp på grunn av slik matriksen holder fibrene adskilt på vil en få et mer kontrollert brudd der fibrene ryker en etter en og bidrar til å oppta spenning i de delene fiberen består av etter bruddet. Slik kan en få et forvarsel og muligens kunne forutse hvor en fiberarmert kompositt går til brudd før det skjer ved at sprekker oppstår og lyder av fibre som ryker kan høres.

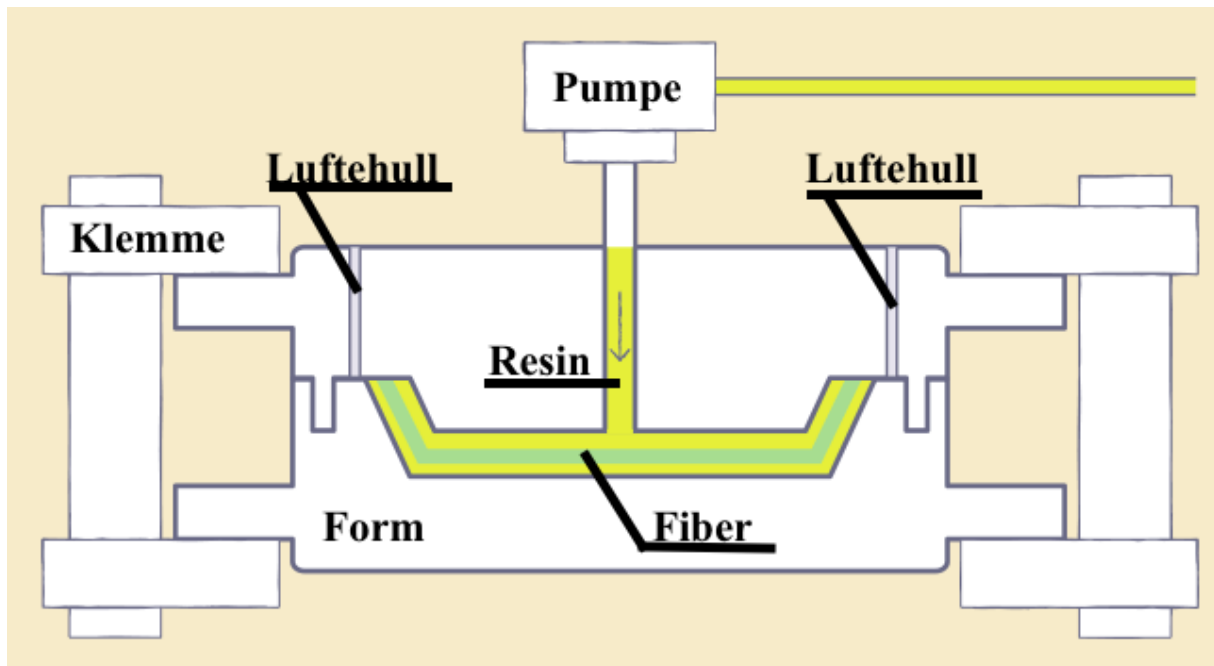
Det er viktig at matriksfasen har god heft og dekkevne til og rundt fibrene slik at spenningsoverføringen fra den svake matriksen til den sterke fiberen blir størst mulig. Derfor legges det stor vekt på disse egenskapene i valg av matriks.

### **2.3 Resin Transfer Moulding (RTM) [5]**

Resin Transfer Moulding (RTM) er en måte å produsere komponenter av fiberforsterkede kompositter. Grunnen til at det kalles Resin og ikke Matrix (matriks) er at resin er en type matriks som brukes ved denne metoden. Resin er en matriks som er laget av polymere. Ved RTM blir fibrene lagt og fordelt som ønsket i en form. Retningen på fibrene, type fiber og mengde ble skrevet om i forrige underkapittel, Betydningen av fiber-orientering, konsentrasjon og fordeling på side 7.

Resin pumpes dermed inn i sentrum av formen og luft siver dermed ut av luftehullene i utkanten av formen. Når det ikke lenger kommer luft ut av alle disse hullene, men resin, stoppes pumpen. Når resinen har stivnet kan formen tas fra hverandre og komponenten er ferdig. Dette vises ved en enkel illustrasjon i Figur 2-11 på neste side.





Figur 2-11: Enkel fremstilling av en RTM-prosess. En pumpe fører resin inn i formen der fibrene ligger som ønsket. Luftehullene slipper ut luften til det bare er resin og fiber i formen. Formen avkjøles og klemmene tas av.[6]

Ved bruk av RTM er fibrene gjerne glass, karbon, aramid, basalt eller en kombinasjon av disse. Man må derimot bruke en resin med god nok flyteevne og som har heft med de(n) ønskede fiberen(-rene). Vanlige resins er polyester, vinylester, epoxy osv. Ved tilpassing av RTM med blandt annet vakuumpumpe og/eller oppvarmede former kan flere typer resins fungere.[6]

Fibrene kan enten være helt tørre eller såkalte prepregs; dvs fibre som allerede er omsluttet av resin. Ved å benytte prepregs kan en lettere oppnå bedre heft mellom fibrene og resinene samtidig som støpingen kan gå raskere.

RTM passer til alle komponenter som krever høy styrke og lav vekt og som skal produseres mellom 200 og 10000 i året. Det siste har med pris på produktet å gjøre og hvor lønnsomt det er krever mer spesifikk utregning. Dersom det ønskes en sterkere og/eller finere overflate på komponenten kan denne typen komponenter fint dekket med et belegg av ønsket materiale.[7] Prisen på RTM sammenlignet med andre mer avanserte RTM-metoder er derimot lav fordi det kreves ikke så mye fra formen. Ved andre RTM-metoder varmes formen opp og/eller utsettes for høyt/lavt trykk (vakuumpumpe). Da kreves former i for eksempel aluminium eller stål. Ved denne typen RTM kan en derimot benytte langt billigere materialer som både er enklere og billigere å forme til ønsket form. Selve prosessen krever også mindre utstyr og energi, noe

som også er en besparelse.

Konsekvensen av denne besparelsen er at det ikke er like lett å produsere kompositter noe særlig høyere fiberinnhold enn 50 % uten at det går utover kvaliteten spesielt med tanke på dekkevne. Med mer avansert (og dyrere) utstyr og prosess kan man oppnå fiberinnhold på omtrent 70 % og fremdeles ha god heft og dekkevne. Dette resulterer i en enda sterkere kompositt, da vi vet at det er fiberen som har mest og si når det kommer til å tåle spenning.

## 3 Metode

### 3.1 Strekktest [3]

I denne avhandlingen ble det gjennomført strekktester av glassfiberplater produsert ved Resin Transfer Moulding. Dette er en test som kan fastslå mekaniske egenskaper. Materialet som skal testes formes gjerne etter standarder, i dette tilfelle NS-EN ISO 527-1:2012 og NS-EN ISO 527-4:1997. Den første av de to nevnte tar for seg de generelle prinsippene ved bestemmelse av strekkegenskaper til plast, mens den andre, som er del 4 av denne standarden tar for seg prøvingsbetingelser for isotropiske og ortotropiske fiberforsterkede plastkompositter.

Ved utførelse av en strekktest blir emnet forlenget i sin lengderetning med konstant hastighet helt til det går til brudd. Dette gjøres av en maskin som måler kraften materialet motstår denne spenningen med, det vil si kraften som påføres for å opprettholde konstant strekkhastighet. Disse maskinene må være godkjent av egne standarder hva angår grep, styrke, evnen til å holde forskjellige hastigheter, indikatorer for kraft, spenning og tøyning og fremstilling av dette.

Under og etter en strekktest presenteres en spenning-tøyningskurve av emnet som testes.

På Y-aksen ser man spenningen som er regnet ut med formelen:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Kraften som påføres  $F$ , fordelt på arealet på tverrsnittet til emnet ved start  $A_0$ , gir til sammen spenningen  $\sigma$ . Kraften måles/registreres i Newton, N, mens arealet  $A_0$ , måles i  $m^2$ . Dette gir  $N/m^2$  som igjen er det samme som megapascal, MPa:  $10^6 N/m^2 = 1 MPa$ .

På X-aksen vises tøyningen og blir regnet ut etter formelen:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{l_\Delta}{l_0}$$

Lengden på emnet måles kontinuerlig og ved et aktuelt tidspunkt er lengden  $l_i$ . Når man trekker den opprinnelige lengden (lengden før kraft er påført,)  $l_0$  får man forlengelsen,  $l_\Delta$ .

Tøyningen  $\varepsilon$ , regnes ut ved å dele forlengelsen  $l_\Delta$ , på opprinnelig lengde  $l_0$ .

Tøyningen  $\varepsilon$ , er altså et tall på hvor mye materialet kan strekkes i forhold til opprinnelig lengde. Begge faktorene som deles har samme enhet mm eller m, og tøyningen  $\varepsilon$  blir dermed et forholdstall som enten kan stå som en desimal eller regnes om til prosent.

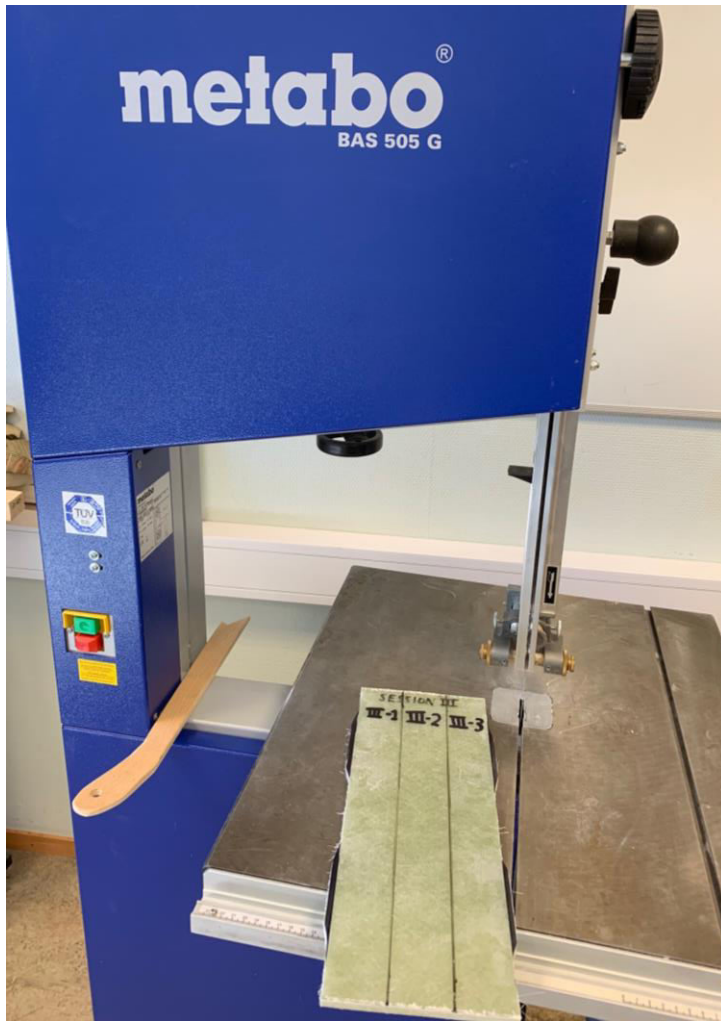
Ved Institutt for maskinteknikk og produksjon på Gløshaugen ble prøvene testet i en strekkmaskin av typen Instron Model 1342. Figur 3-1 under viser den første prøven i denne maskinen, som har en kapasitet på 100 kN.



Figur 3-1: Strekkmaskinen Instron Model 1342 gjøres klar til bruk. Denne har en kapasitet på 100 kN. Foto: TS

## 3.2 Produksjon av strekkstaver

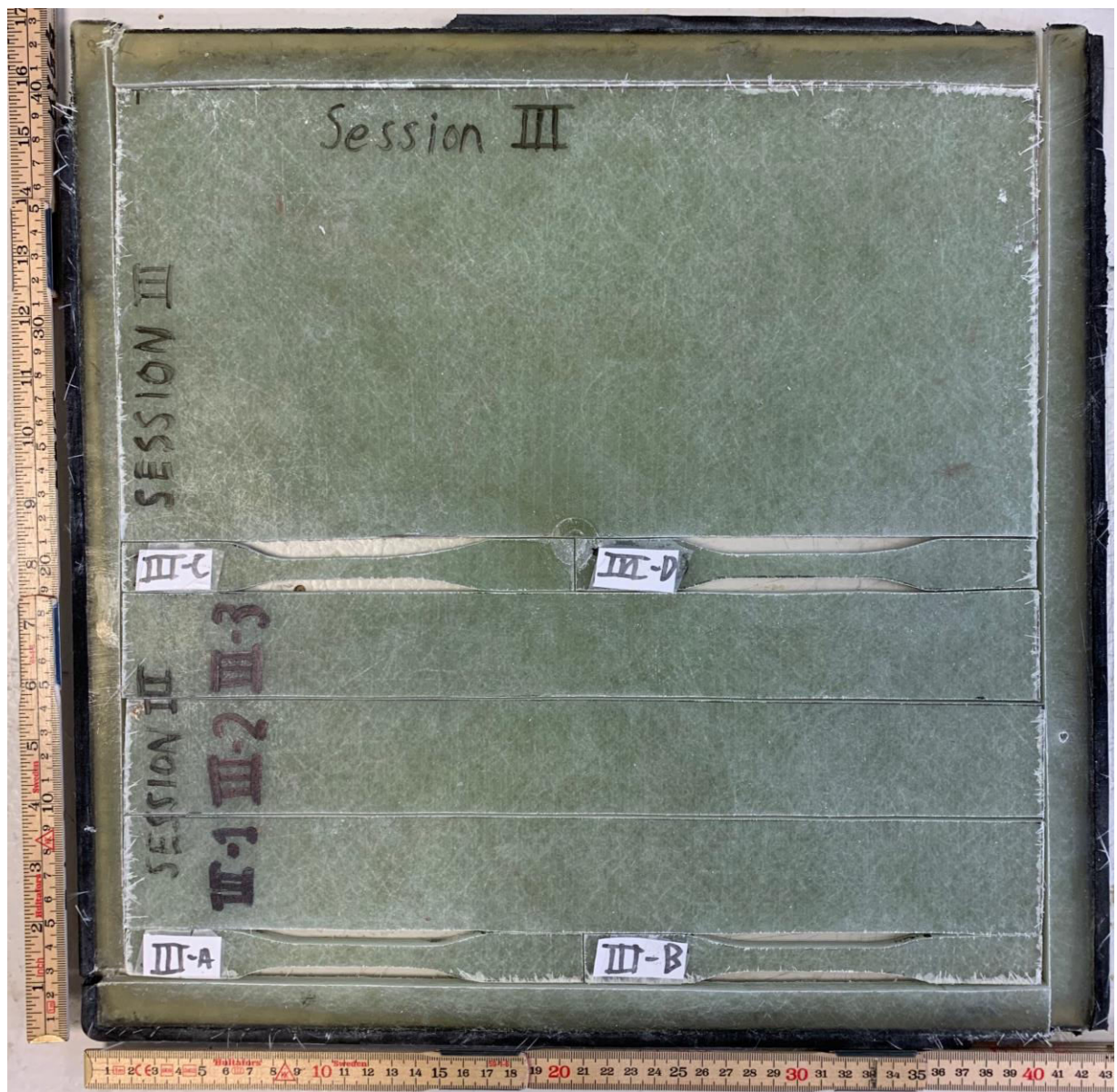
Prøver til disse strekktestene blir enten kuttet til av ferdige produkter eller ved å produsere prøver med dimensjoner som er ønskelige. Glassfiberplatene i denne avhandlingen er mellom 7 og 9 mm tykke og ble kuttet til av undertegnede ved hjelp av en båndsag (Figur 3-2).



Figur 3-2: En båndsgag av typen Metabo BAS 505 G ble brukt for å kutte til prøvene til strekktestingen. Foto: TS

Prøvene ble deretter pusset jevnere ved bruk av sandpapir (grovhet 180.) Dette ble gjort for å ha lik bredde og tykkelse i hele strekksonen, slik at strekktestene skulle gi mest mulig riktig resultat. Redusert tykkelse, ujevnheter, hakk, riss også videre i strekksonen vil være svake punkt som gir nedsatt evne til å motstå spenningen.

Nedenfor ser vi et oversiktsbilde over hvordan prøvene ble kuttet ut fra platene og vi ser dermed hvor de forskjellige prøvene er hentet fra:



Figur 3-3: Glassfiberplate (session III) ferdig kuttet. Den ytterste delen med mindre fiberarmering er kuttet bort. Alle platene var ca 430 x 430 mm før kutting. Foto: TS

Figur 3-3 viser også gummilistene helt ytterst på platen som forhindret lekkasje under produksjon. Prøvene er sortert etter session-nummer fra produksjon og merket med bokstavene A-D ved de mindre strekkstavene og med numrene 1-3 for de større. A og B er hentet fra utkanten av platen, mens C og D er hentet fra midten. Slik kan man se om det er noen forskjell på styrken i utkanten sammenlignet med midten hva angår luftbobler grunnet dårligere resin-flyt eller mindre fiberarmering, selv om det synlige skillet er kuttet bort.

For oppmåling av prøvene ble det benyttet et digitalt skyvelære og en linjal. Figur 3-4 viser dette. Målene som ble tatt er etter standarden NS-EN ISO 527-4:1997.[8] Ved bredde i strekksonen,  $b_1$ , og høyde eller tykkelse,  $h$ , ble den laveste verdien registrert. Slik ble tverrsnittet som fremgår i testoversikten på side 21 mest mulig forent med hvilken spenning prøvene tåler. Et mindre tverrsnitt vil ta opp mindre spenning, og dersom det er varierende størrelse på tverrsnittet, slik som er tilfelle for disse prøvene, vil bruddet sannsynligvis gå eller begynne i et av disse områdene.

Ved å registrere bredde og tykkelse på denne måten vil det gi utslag i utregningen av volum og tetthet.



Figur 3-4: Prøvene ble målt og registrert ved bruk av linjal og digitalt skyvelære. Foto: TS

Videre ble prøvene veid for å senere kunne regne ut tettheten. Tettheten vil kunne si noe om luftinnhold eller resin-flyt og fiberarmeringsinnhold. Samtidig vil det kunne avdekke målingsfeil dersom det er store avvik i samme session. Der det ble større avvik ble det målt på nytt og korrigert.



### 3.2.1 Antall strekkstaver og design

I standarden NS-EN ISO 527-1 står det at et minimum av 5 prøver skal gjennom tilfredsstillende testing for å oppnå representative resultat.[9] Det vil si at dersom noen prøver for eksempel glir ut av grepet, om bruddet går i grepet eller om andre uforutsette ting skulle skje skal resultatet fra en slik test utelukkes. Siden denne oppgaven er en del av et prosjekt var det ikke ønskelig å «bruke opp» alt materialet som var produsert og en ønsket derfor å minimere materialet som kreves for testing. Grunnet dette ble det besluttet å bruke maksimalt halve platen, gjerne mindre, etter at kantene uten fiber var kuttet vekk.

Samtidig er dette en oppgave som vil bli tatt videre; nye, forskjellige plater skal produseres og testes. Det er ingen som stiller krav til testmetoder og prosedyrer, det ønskes derimot resultater som kan gi en tydelig indikasjon på hva som kan og bør fokuseres på i videre arbeid. Derfor har det blitt tatt noen friheter i forhold til standarden som beskrives videre under:

Veileder og undertegnede besluttet først at designet skulle være med en strekksone (innsnevring i bredden), slik prøvene merket med A, B, C og D er produsert. Ifølge standarden skulle ikke dette designet bli brukt for «(..) *multidirectional, continous-fibre-reinforced materials.*»[8] For å spare materiale til senere bruk og for å ha kontroll på hvor bruddet ville gå ble det besluttet å produsere 4 av denne typen (1B) fra hver plate selv om dette gikk i mot standardens anbefalinger. Ved å produsere prøver med strekksone ville man også ha kontroll på hvor bruddet ville gå, og dermed forhindre at prøvene gikk til brudd der strekkmaskinen griper. Da undertegnede utførte en test med denne type prøve, 1-A, var derimot resultatet skuffende i forhold til forventningen. Derfor ble det videre produsert prøver etter det standarden anbefaler for fiberorienteringen og -lengden i dette prosjektet. Dermed ble prøvene kuttet ut av platene som tidligere vist i Figur 3-3, side 18, og disse prøvene ble testet i strekkmaskinen.

Ved testkjøring av strekkstavene uten strekksone ble det forventet at grepet ville være en ekstra belastning for materialet slik at bruddet ville gå her. Den første strekkstaven, I-1, gikk til brudd midt på staven og følgelig ble resten av disse prøvene testet med tilfredsstillende resultater.

### 3.3 Testoversikt

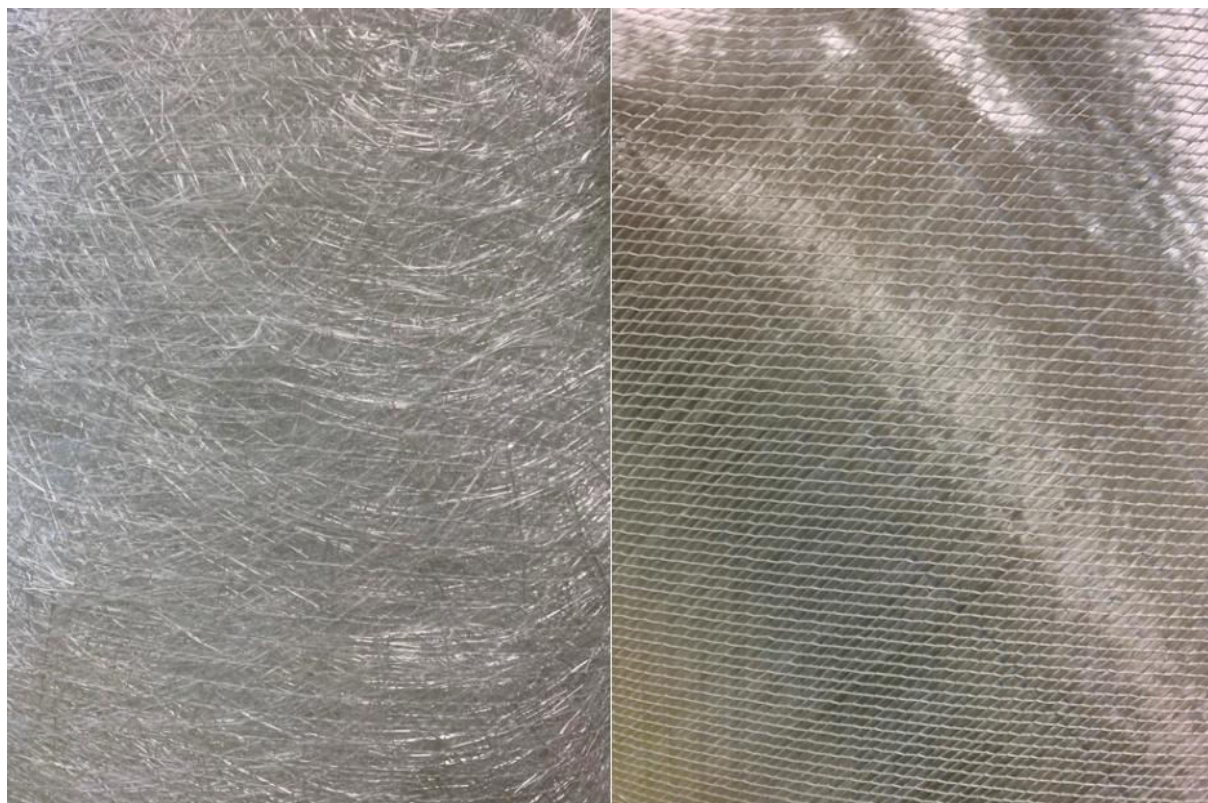
I tabellen nedenfor ser man hva de forskjellige prøvene består av. Disse ble produsert ved Resin Transfer Moulding, RTM.

Tabell 3-1: Oversikt over de forskjellige platenes materiale og forholdet mellom polyester resin og glassfiber.

Navn	Beskrivelse	Andel [%]	Strekkfasthet [MPa]	Kommentar
<b>Session I</b>				
				Antatt sterkest
Polylite 506-647 1000 kg	Polyester resin	50	50	
DB 45/45 600 gr Rols 60 kg CSM, 95 cm, 450 gr Rols 35 kg	Glassfiber	50		Både kontinuerlige fibre og ikke kontinuerlige fibre
<b>Session II</b>				
Polylite 506-647 1000 kg	Polyester resin	60	50	
CSM, 95 cm, 450 gr Rols 35 kg	Glassfiber	40		Ikke kontinuerlige fibre
<b>Session III</b>				
Polylite 506-647 1000 kg	Polyester resin	40	50	
CSM, 95 cm, 450 gr Rols 35 kg	Glassfiber	60		Ikke kontinuerlige fibre

I tabellen over ser vi at glassfiberen kalles DB 45/45 (...). 45/45 indikerer retningen fibrene er lagt i. På Figur 2-7 b), side 8 ser man en fremstilling av fiberretningene. Det er da altså vevd sammen lag av +45° og -45° på figuren, og disse mattene er lagt i formen slik at retningen også her er 45/45.

På Figur 3-5 på neste side ser man bilder av de ulike fibermattene som er brukt i produksjonen. Disse kommer på en rull og klippes til den formen som er ønsket. Ved produksjon av platene i dette prosjektet ble de klippet til mindre matter på 430 x 430 mm og lagt i flere lag i formen før resin ble tilført.



*Figur 3-5: Fibermatter som ble brukt i produksjon av platene. Til venstre er fibrene mer tilfeldig ordnet og det er kortere fibre. Denne fiberen ble brukt i Session I og II. Til venstre er det ordnet 45/45 og fibrene er kontinuerlige. Begge fibergeometriene ble brukt i Session I. Foto: TS*

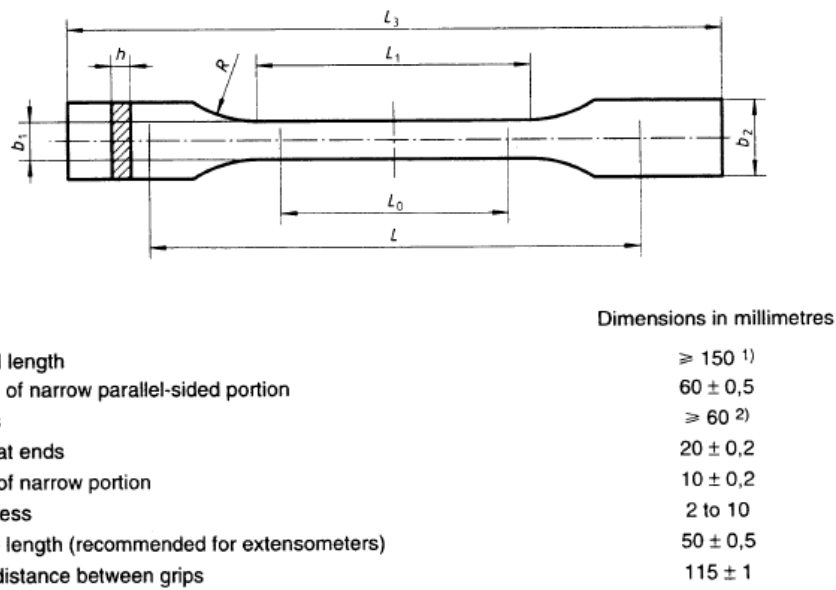
Prøvene ble som tidligere nevnt produsert og målt etter standarden NS-EN ISO 527-4:1997. Nedenfor vises en oversikt over prøvene og målene samt arealet,  $A$ , av tverrsnittet og tettheten,  $\rho$ , som er regnet ut fra de andre verdiene.  $L_r$  er en forenkling av  $R$  fra standarden.  $L_r$  representerer nå lengden fra innsnevring begynner, til den slutter, det vil si lengden fra  $b_2$  til  $b_1$ . Dette ble gjort fordi strekkstavene ikke fikk en tydelig radius i innsnevringen.  $L_r$  har videre bare blitt brukt til utregning av volum og deretter følgelig tettheten. Denne forenklingen er dermed også en usikkerhet som kan spille inn på avvik i tetthet. Benevningene som er benyttet vises og forklares i Figur 3-6 og Figur 3-7 på side 24.

Tabell 3-2: Oversikt over mål på alle prøvene. Benevningene er forklart i Figur 3-4 og Figur 3-6 fra side 19.

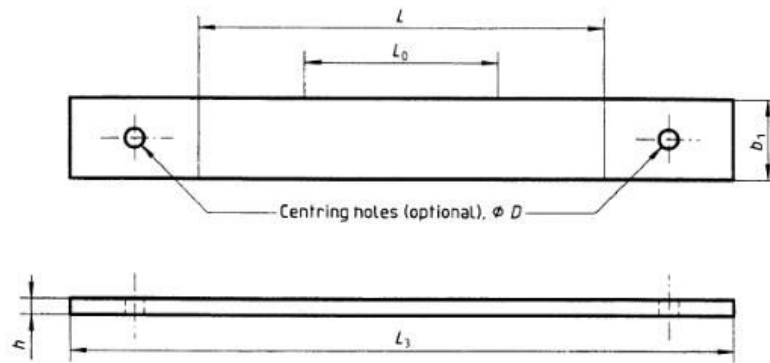
Prøve ID:	L <sub>3</sub> [mm]	L <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	h [mm]	V [g]	L <sub>r</sub> [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>I-A</b>	196,0	69,72	21,00	9,25	8,81	48	17,90	81,49	1837,15
<b>I-B</b>	192,0	64,05	20,90	8,53	8,76	46	18,40	74,72	1806,62
<b>I-C</b>	193,5	59,74	21,12	9,74	9,42	53	23,45	85,91	1912,34
<b>I-D</b>	194,2	62,00	21,10	9,06	9,66	50	19,90	87,51	1730,77
<b>I-1</b>	388,5	-	-	49,62	8,74	311	-	433,67	1845,87
<b>I-2</b>	388,5	-	-	48,30	8,80	315	-	425,04	1907,61
<b>I-3</b>	388,0	-	-	48,47	9,06	317	-	439,13	1860,48
<b>II-A</b>	197,5	63,97	21,70	9,48	7,12	31	21,50	67,49	1406,12
<b>II-B</b>	202,0	61,55	21,00	9,81	7,45	33	20,53	73,08	1405,99
<b>II-C</b>	200,5	67,37	21,85	9,98	7,28	34	19,45	72,65	1462,66
<b>II-D</b>	199,0	62,95	21,80	10,19	7,80	36	20,50	79,48	1447,02
<b>II-1</b>	400,0	-	-	49,61	7,12	204	-	353,22	1443,84
<b>II-2</b>	400,0	-	-	47,65	7,25	205	-	345,46	1483,51
<b>II-3</b>	400,0	-	-	54,11	7,40	229	-	400,41	1429,77
<b>III-A</b>	194,0	62,31	21,50	9,63	8,21	38	20,38	79,06	1523,10
<b>III-B</b>	194,0	60,67	21,10	10,86	7,61	36	21,29	82,64	1571,77
<b>III-C</b>	192,5	59,65	22,30	9,10	8,00	34	23,32	72,80	1420,01
<b>III-D</b>	195,0	64,31	22,50	10,64	7,44	36	21,36	79,16	1526,29
<b>III-1</b>	389,5	-	-	48,14	7,91	222	-	380,78	1496,79
<b>III-2</b>	390,0	-	-	48,28	8,11	223	-	391,55	1460,33
<b>III-3</b>	389,0	-	-	44,39	7,91	199	-	351,12	1456,94

En kan se at tettheten varierer mest i session I. Dette kan være fordi denne platen ble kuttet til først, og har dermed mest avvik i breddemål. Kuttingen ble bedre og jevnere etter hvert, slik at session II og III har mindre avvik i tetthet.

Figur 3-6 og Figur 3-7 viser de ulike typene strekkstaver som er produsert og testet. Figurene viser og forklarer benevningene som er benyttet i testoversikten.



Figur 3-6: Figuren er hentet fra standard NS-EN ISO 527-4:1997 og viser hvordan en type strekkstaver for fiberforsterkede plastkompositter kan se ut. Denne typen omtales som Type 1B i standarden. I testoversikten er dette de som er indikert med store bokstaver etter session ID: A-D.[8]



Dimensions in millimetres			
		Type 2	Type 3
$L_3$	Overall length	$\geq 250$	$\geq 250$
$L_2$	Distance between end tabs	—	$150 \pm 1$
$b_1$	Width	$25 \pm 0,5$ or $50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$ or $50 \pm 0,5$
$h$	Thickness	2 to 10	2 to 10
$L_0$	Gauge length (recommended for extensometers)	$50 \pm 1$	$50 \pm 1$
$L$	Initial distance between grips	$150 \pm 1$	136 (nominal)
$L_T$	Length of end tabs	—	$\geq 50$
$h_T$	Thickness of end tabs	—	1 to 3
$D$	Diameter of centring holes	$3 \pm 0,25$	$3 \pm 0,25$

Figur 3-7: En enklere strekkstav, uten innsnevret strekksone. Denne omtales som Type 2 i standarden. I testoversikten er dette de som er indikert med nummer etter session ID: 1-3.[8]

## 4 Resultater

Tabell 4-1: Gjennomsnitt av strekkfastheter. 1-3 ligger høyere enn A-D (og hele snittet). Session I er tydelig sterkest, mens Session III ligger litt høyere enn Session II.

Gjennomsnitt	A-D [MPa]	1-3 [MPa]	A-3 [MPa]
Session I	135,1	171,2	150,5
Session II	120,6	127,3	123,5
Session III	128,8	141,5	134,2



Figur 4-1: Slik så alle de større prøvene (1-3) ut etter testing. En kan se at det er forskjellige bruddmønstre: Session I har blitt deformert og en kan tydelig se at bruddet har gått langs fibreens retning, 45/45. Session II og III har gått til "renere" brudd i lengderetning og fibre er revet helt eller delvis av. Foto: TS



*Figur 4-2: Session I-1-3 etter strekktest. Bruddene har gått langs fiberretningen. Fibrene er bortimot intakte og det har skjedd en slags glidning i materialet. Foto: TS*



*Figur 4-3: Session II-1-3 etter strekktest. Bruddene har gått på tvers av lengderetningen og fibrene er revet helt eller delvis av. Foto: TS*





*Figur 4-4: Session III-1-3 etter strekktest. Samme bruddmekanisme som session II med brudd på tvers av lengderetning og fibre er revet helt eller delvis av. Foto: TS*

## 5 Diskusjon

Prøvene med strekksoner, merket med store bokstaver, A-D, tålte jevnt over mindre spenning enn prøvene med lik bredde over hele lengden. Dette viser at standarden burde vært fulgt fra starten av, slik at en kunne fått enda tydeligere og mer pålitelige resultater. Det viste seg at større tverrsnitt tålte mer spenning delt på areal. Grunnen til dette er sannsynligvis at de kontinuerlige fibre ikke lengre ble like lange/kontinuerlige da en strekksone ble kuttet til. Dette samsvarer med det vi kan se i Figur 2-5, side 7: Lengre fibre er mer effektive når det gjelder å ta opp spenning og overføre denne spenningen til matriksen.

Under testingen kunne en også høre at flere og flere fibre røk ettersom spenningen økte. Det hørtes ut som små glasskår knuste, noe som også stemmer med virkeligheten. Dette samsvarer med det som ble forklart i 2.2.2 Betydningen av fiber-orientering, konsentrasjon og fordeling, side 7-10: Fibrene vil gå til brudd før matriksen, men til ulik tid. Det er forskjeller mellom fibre, og disse vil fortsatt kunne ta opp spenning etter brudd, men da ikke like effektivt som når de var lengre (ref.: avsnitt over.) Matriksen vil deformeres plastisk, men være intakt, da den tåler mer tøyning enn fibre.

Dersom en ser på matriks/fiber-forhold sammenlignet med resultatene på prøvene uten strekksone (, det vil si de som er merket 1, 2 og 3 etter session ID,) ser vi at: Session I hadde et forhold mellom matriks/fiber på 50/50 og tålte tydelig høyest spenning. Session III hadde et forhold på 40/60 og tålte nest høyest spenning, men betydelig mindre enn session I. Session II hadde et forhold på 60/40 og tålte lavest spenning i strekk, men ikke så mye mindre enn session II. Dette er fremstilt i tabellen under:

Tabell 5-1: Tabell 4-1 gjenskapt fra Resultater, side 25 uten at prøvene med strekksone er med.

Gjennomsnitt	1-3 [MPa]	Matriks/fiber [%]
Session I	171,2	50/50
Session II	127,3	60/40
Session III	141,5	40/60

Session II og III har samme fiberinnholdet, men session III med 60 % fiber tåler mer enn session II med 40 % fiber. Dette samsvarer med teorien om at høyere fiberinnhold er viktigst for høy styrke da det er fiberen som tar opp spenningen.

Ved valg av andre typer fibre kan en oppnå høyere styrke. Som omtalt i kapittel 2.2.3 Andre fibertyper, side 10, fins det alternativer som whiskers som tilbyr mye høyere strekkfasthet. Dette er materiale som er mye dyrere, men som ikke ligger langt unna glass i vekt. Samtidig er strekkfastheten på for eksempel grafitt 20 GPa mot 3,45 GPa for E-glass. Som sagt vil prisen på et slikt alternativ øke betraktelig, men det kan derfor benyttes kun i den retningen som belastes mest. Forsterkning i en bestemt retning kan også gjøres med billigere fibermaterial som karbonfiber.

Når det kommer til matriksfasen er det viktigste at den har god heft med fibermateriale og samtidig god fyllevne. Matriksen skal ikke ta opp spenning, men overføre dette til fibre. Derfor bør det fokuseres på fiberarmeringen videre i prosjektet og velge en matriks som er kompatibel med de fibre som velges.

## 6 Konklusjon

Ved en strekktest av fiberarmerte kompositter med kontinuerlige fibre i flere retninger, (her: 45/45) bør strekkstavene konstrueres/produseres uten strekksone for best resultat. Dette er type 1B i Standard NS-EN ISO 527-4:1997. Denne er vist på Figur 3-7, side 24.

Det er fibre som har størst innvirkning på hvilken spenning en fiberarmert kompositt tåler i strekktest. Dette er fordi matriksen vil være intakt ved - og etter tøyningen fibre går til brudd ved. Se Figur 2-9, side 10.

Som en ser i Tabell 5-1, side 28 tåler den fiberarmerte kompositten høyest spenning ved et forhold på 50/50 matriks/fiber. I session II og III var det også en større andel kortere fibre, men session III tålte betraktelig mer enn session II. Det kan forklares med en matriks/fiberforholdet: Session III hadde 60% fiber mot session II som bare hadde 40%. Derfor kan en med fordel videre eksperimentere med høyere fiberinnhold, men med lik fiber-lengde og orientering for å finne det mest effektive forholdet når det kommer til å ta opp spenning i strekk. Det kan også eksperimenteres med høyere innhold av fibre enn det som er anbefalt ved bruk av RTM, men da må nok dyrere, mer avansert utstyr anskaffes.

Det er også verdt og merke seg at session I tålte mer enn session III, selv om session III har 10 prosentpoeng mer fiber enn session I. Det er slik sett nærliggende å tro at høyere andel kontinuerlige fibre har stor innvirkning på styrken.

Det var en høyere andel orienterte (, kontinuerlige) fibre i session I, som var vevd i 45/45. Videre bør en se på styrken ved fibre ordnet i 90/0 slik at man kan se forskjellen på bidrag i ulike retninger.

Etter kartlegging av de mest effektive faktorene som nevnt i avsnittene over bør det regnes mer på belastningen i konstruksjonen materialet skal brukes i og bryte dette ned til

materialkrav for enkelte komponenter. En kan så produsere forskjellige komponenter i for eksempel H-profil, og teste disse i bøy.

Det kan også fokuseres på å finne fibre som tåler mer spenning enn glassfiber. Det vil si for eksempel karbonfiber, aramidfiber (kevlar) og kanskje også ulike whiskers som grafitt, aluminiumoksid osv. Det bør også jobbes med en kombinasjon av flere typer fibre, for eksempel i forskjellige retninger. Slik kan penger og vekt spares, samtidig som materialet kan ta opp mye spenning der det trengs.

Matriksen skal ikke ta opp spenning, men overføre denne til fibre. Derfor må matriksen være kompatibel med fibre slik at god heft og dekkevne sikres. For å oppnå fiberarmerte kompositter som kan tåle høyest mulig spenning bør det derfor videre først fokuseres på fiberfasen, siden denne tar opp mesteparten av spenningen. Matriks velges deretter.

## 7 Kildeliste:

1. Linudans. *About Linudans*. 2009 [cited 2019; Available from: <https://www.facebook.com/greengrids>].
2. NTNU. *UROP*. [cited 2019; Available from: <https://www.ntnu.no/studier/mtbygg/urop>].
3. William D. Callister Jr., D.G.R., *Materials Science and Engineering*. Vol. 9. 2014: Wiley. 905.
4. Johansen, H., *Komposittmaterialer*. 2008.
5. C. D. Rudd, A.C.L., K. N. Kendall, C. Mangin, *Liquid Moulding Technologies: Resin Transfer Moulding, Structural Reaction Injection Moulding and Related Processing Techniques*. 1997, Woodhead, Cambridge: Elsevier. 304.
6. Association, A.C.M. *Resin Transfer Molding*. 2016; Available from: <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/resin-transfer-molding/>.
7. Vorse, D. *Resin Transfer Molding (RTM) Process*. About closed moulding 2019 [cited 2019; Available from: <https://www.moldedfiberglass.com/processes/processes/closed-molding-processes/resin-transfer-molding>].
8. Norge, S., *Plast - Bestemmelse av strekkegenskaper, in Del 4: Prøvingsbetingelser for isotropiske og ortotropiske fiberforsterkede plastkompositter*. 1997, Standard Norge.
9. Norge, S., *Plast - Bestemmelse av strekkegenskaper, in Del 1: Generelle prinsipper*. 1997, Standard Norge.
10. Jørgensen, J.K. *Armert plast kan gi billigere broer*. 2018; Available from: <https://www.sintef.no/siste-nytt/armert-plast-kan-gi-billigere-broer/>.

## 8 Figurliste:

Figur 2-1: Forskjellige måter egenskapene kan påvirkes i en to-fase kompositt. (a) Konsentrasjon, (b) størrelse, (c) form, (d) fordeling og (e) orientering.[3] .....	2
Figur 2-2: En klassifisering av kompositter.[3] .....	3
Figur 2-3: Oppbygningen av et sandwich-panel med bikube-struktur i kjernen (honeycomb.)	4
Figur 2-4: En fiberforsterket kompositt som er påsatt spenning, $\sigma$ . De stiplede linjene i figuren viser spennings- og deformasjonsmønsteret i matriksen som omslutter fiberen. ....	6
Figur 2-5: En fiberarmert kompositt er påført en spenning i lengderetningen lik fiberens strekkfasthet, $\sigma^*$ f. En spenning-posisjonskurve er illustrert med fiberlengdene: (a) like lang som kritisk lengde, (b) lengre enn kritisk lengde og (c) kortere enn kritisk lengde.....	7
Figur 2-6: Ulik fiberorientering: (a) kontinuerlig og ordnet, (b) korte og ordnet og (c) korte og vilkårlig ordnet. ....	8
Figur 2-7: Ulik oppbygning av fiberarmerte kompositter.[4] .....	8
Figur 2-8: Strekk-tøyningskurve for testing av unidireksjonale fiberarmerte kompositter normalt på, $\sigma_{\perp}$ , og parallelt med, $\sigma_{\parallel}$ , fiberretningen.[4] .....	9
Figur 2-9: Spenning-tøyningskurver eller Elastisitetsmodul (E-modul). (a) Sprø fiber og duktil matriks. Bruddpunkt er merket. (b) Kompositt sammensatt av samme fiber og matriks (nå stiplet.) Fibrene er lange og ordnet og spenningen er påført i retningen på fibrene. $\epsilon^*$ =tøyning ved brudd, $\sigma^*$ =bruddspenning, f=fiber, m=matriks. ....	10
Figur 2-10: Ulike typer fiberforsterkende materiale presentert med tetthet, strekkfasthet, spesifikk styrke(strekkfasthet/tetthet), E-modul, og spesifikk modul (E-modul/tetthet.)[3] ...	11
Figur 2-11: Enkel fremstilling av en RTM-prosess. En pumpe fører resin inn i formen der fiberen ligger som ønsket. Luftehullene slipper ut luften til det bare er resin og fiber i formen. Formen avkjøles og klemmene tas av.[6].....	13

Figur 3-1: Strekkmaskinen Instron Model 1342 gjøres klar til bruk. Denne har en kapasitet på 100 kN. Foto: TS.....	16
Figur 3-2: En båndsg av typen Metabo BAS 505 G ble brukt for å kutte til prøvene til strekktestingen. Foto: TS.....	17
Figur 3-3: Glassfiberplate (session III) ferdig kuttet. Den ytterste delen med mindre fiberarmering er kuttet bort. Alle platene var ca 430 x 430 mm før kutting. Foto: TS.....	18
Figur 3-4: Prøvene ble målt og registrert ved bruk av linjal og digitalt skyvelære. Foto: TS .	19
Figur 3-5: Fibermatter som ble brukt i produksjon av platene. Til venstre er fibrene mer tilfeldig ordnet og det er kortere fibre. Denne fiberen ble brukt i Session I og II. Til venstre er det ordnet 45/45 og fibrene er kontinuerlige. Begge fibergeometriene ble brukt i Session I. Foto: TS.....	22
Figur 3-6: Figuren er hentet fra standard NS-EN ISO 527-4:1997 og viser hvordan en type strekkstaver for fiberforsterkede plastkompositter kan se ut. Denne typen omtales som Type 1B i standarden. I testoversikten er dette de som er indikert med store bokstaver etter session ID: A-D.[8].....	24
Figur 3-7: En enklere strekkstav, uten innsnevret strekksone. Denne omtales som Type 2 i standarden. I testoversikten er dette de som er indikert med nummer etter session ID: 1-3.[8] .....	24
Figur 4-1: Slik så alle de større prøvene (1-3) ut etter testing. En kan se at det er forskjellige bruddmønstre: Session I har blitt deformert og en kan tydelig se at bruddet har gått langs fibrenes retning, 45/45. Session II og III har gått til "renere" brudd i lengderetning og fibrene er revet helt eller delvis av. Foto: TS .....	25
Figur 4-2: Session I-1-3 etter strekktest. Bruddene har gått langs fiberretningen. Fibrene er bortimot intakte og det har skjedd en slags glidning i materialet. Foto: TS .....	26
Figur 4-3: Session II-1-3 etter strekktest. Bruddene har gått på tvers av lengderetningen og fibrene er revet helt eller delvis av. Foto: TS .....	26
Figur 4-4: Session III-1-3 etter strekktest. Samme bruddmekanisme som session II med brudd på tvers av lengderetning og fibrene er revet helt eller delvis av. Foto: TS.....	27
Figur 10-1: En gangbro i Fredrikstad, laget i fiberarmert plast. Denne er både lett og sterk og kan være en god erstatter for betongbroer.[10] .....	37
Figur 10-2: Ruller av glassfiber. Til høyre er fibrene lengre og vevd sammen i et mønster. Til venstre er det kortere fibre tilfeldig orientert. Foto: TS .....	38
Figur 10-3: Bruddmønstre på prøvene I-III A-D. Foto: TS .....	39



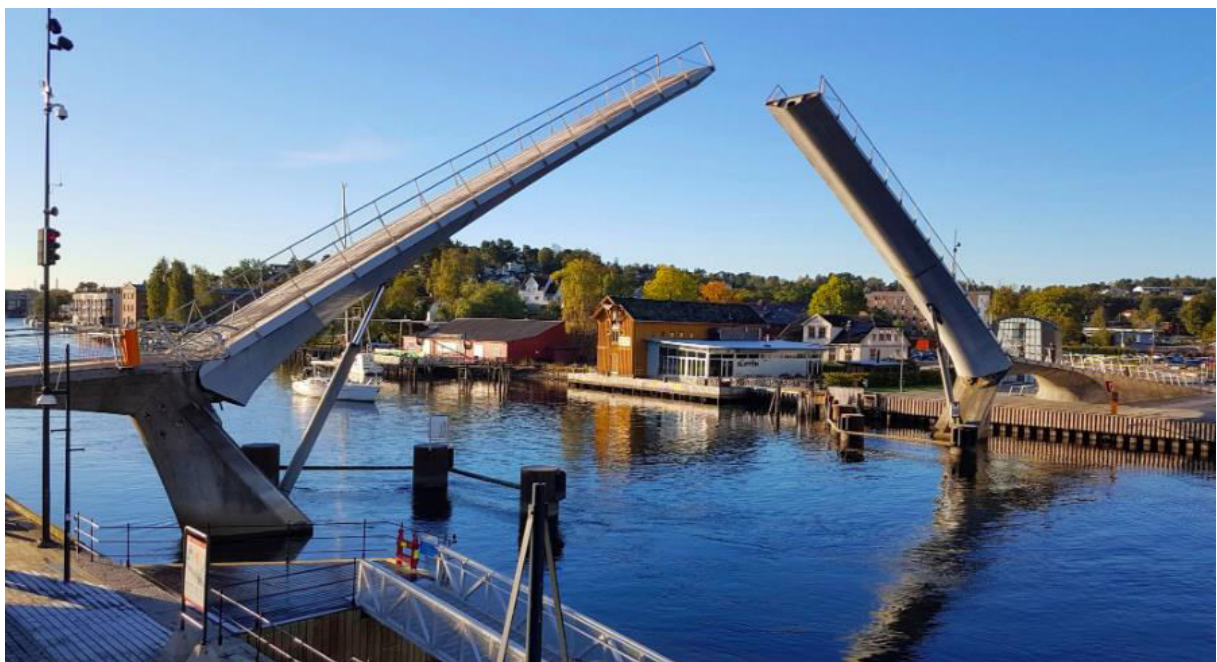
Figur 10-4: Bruddmønstre på prøvene I-A-D sett ovenfra. Foto: TS.....	39
Figur 10-5: Bruddmønstre på prøvene II-A-D sett ovenfra. Foto: TS .....	40
Figur 10-6: Bruddmønstre på prøvene III-A-D sett ovenfra. Foto: TS .....	40
Figur 10-7: Bruddmønstre på prøvene I-III A-D sett fra siden. I-A er øverst i bilde, deretter I-B, I-C, I-D, II-A osv. Man kan se den samme tendensen som i de større prøvene omtalt tidligere i oppgaven: Prøve I har noe som minner om en slags glidning mens II og III er «renere» brudd. Det er allikavel mindre forskjell i bruddene i disse prøvene enn de større. Foto: TS.....	41
Figur 10-8: Bruddmønstre på prøvene I-A-D sett fra siden. I-A er øverst i bildet, deretter II-B osv. Foto: TS .....	41
Figur 10-9: Bruddmønstre på prøvene II-A-D sett fra siden. II-A er øverst i bildet, deretter II-B osv. Foto: TS.....	42
Figur 10-10: Bruddmønstre på prøvene III-A-D sett fra siden. III-A er øverst i bildet, deretter III-B osv. Foto: TS .....	42
Figur 10-11: Nærbilde av bruddene på prøvene I-A-D sett fra siden. I-A er øverst i bildet, deretter I-B osv. Foto: TS.....	43
Figur 10-12: Nærbilde av bruddene på prøvene II-A-D sett fra siden. II-A er øverst i bildet, deretter II-B osv. Foto: TS .....	44
Figur 10-13: Nærbilde av bruddene på prøvene III-A-D sett fra siden. III-A er øverst i bildet, deretter III-B osv. Foto: TS .....	45

## 9 Tabelliste

Tabell 3-1: Oversikt over de forskjellige platenes materiale og forholdet mellom polyester resin og glassfiber.....	21
Tabell 3-2: Oversikt over mål på alle prøvene. Benevningene er forklart i Figur 3-4 og Figur 3-6 fra side 19.....	23
Tabell 4-1: Gjennomsnitt av strekkfastheter. 1-3 ligger høyere enn A-D (og hele snittet). Session I er tydelig sterkest, mens Session III ligger litt høyere enn Session II.....	25
Tabell 5-1: Tabell 4-1 gjenskapt fra Resultater, side 25 uten at prøvene med strekksone er med.....	28

## 10 Vedlegg

### 10.1 Vitenskapelig artikkel



*Figur 10-1: En gangbro i Fredrikstad, laget i fiberarmert plast. Denne er både lett og sterk og kan være en god erstatter for betongbroer.[10]*

Fiberarmerte kompositter er sjelden brukt som byggemateriale selv om de både kan være en god erstatter for stål, betong og trevirke og hverken ruster eller råtner. Broer konstrueres

normalt sett i armert betong, men ved for eksempel utvidelse av broer er fiberarmert plast et godt alternativ. Nye standarder kan kreve større bredde på eksisterende broer slik at gang- og sykkelvei får mer plass. Dette kan vanligvis være en utfordring da brokarene og pilarer ikke er dimensjonert for en bredere betongkonstruksjon. Dette har tidligere ført til kostbare utvidelser av brokar og pilarer, selv om kostnaden kunne vært spart ved bruk av fiberarmert plast.[10]

### **Lettere, mer robuste, konstruksjoner.**

Gangbroen på bildet over er en bro laget av fiberarmert plast. Denne fører gående og syklende over Glomma og kan enkelt heves. Hevingen krever mindre krefter fordi en slik bro er mye lettere enn om den for eksempel skulle konstrueres i betong.

### **Vevde matter innstøpt i plast gir høy styrke**

Komposittene produseres ved å legge matter av for eksempel glassfiber i en form og tilføre flytende plastmateriale. Kompositten kan dermed ha den formen man måtte ønske, og formen kan brukes flere ganger for masseproduksjon. Styrken avhenger mest av fibre og mange faktorer knyttet til disse: Konsentrasjon, orientering, form, lengde, materiale med mer. En kan bestille ruller med vevde fibre med orientering, form, lengde osv av det materialet som er ønskelig. Deretter kan en klippe dette til og legge det lagvis i formen. Ved å konsentrere fibre i en retning blir det ferdige produktet sterkere i denne retningen. På figuren til høyre ser en to ruller med glassfiber. Den til høyre i bildet er vevd med lengre fibre, mens den til venstre er mer tilfeldig orientert med kortere fibre.



*Figur 10-2: Ruller av glassfiber. Til høyre er fibre lengre og vevd sammen i et mønster. Til venstre er det kortere fibre tilfeldig orientert.*

### **Billigere enn alternativene**

Denne typen materiale tåler skader bedre enn alternativene og levetidskostnadene kan kuttes med opptil 30 %. Broene kan også prefabrikeres slik at kostnadene rundt betongstøp kuttes.[10]

### **Noe for fremtiden?**

Dersom byggebransjen kan se mulighetene med komposittmateriale og anvende dette i fremtidige prosjekter kan både penger og miljø spares. Det er også lettere å tilpasse materiale etter behov ved for eksempel å lage materialer som er sterkere i en retning enn en annen. Her kan flere aktører innenfor bygg og anlegg gå foran og benytte nyere materialer i sine prosjekter for at flere skal få opp øynene for kompositter som byggemateriale.

## 10.2 Bilder av Session I-III, strekkstaver A-D etter utført strekktest



Figur 10-3: Bruddmønstre på prøvene I-III A-D. Foto: TS



Figur 10-4: Bruddmønstre på prøvene I-A-D sett ovenfra. Foto: TS



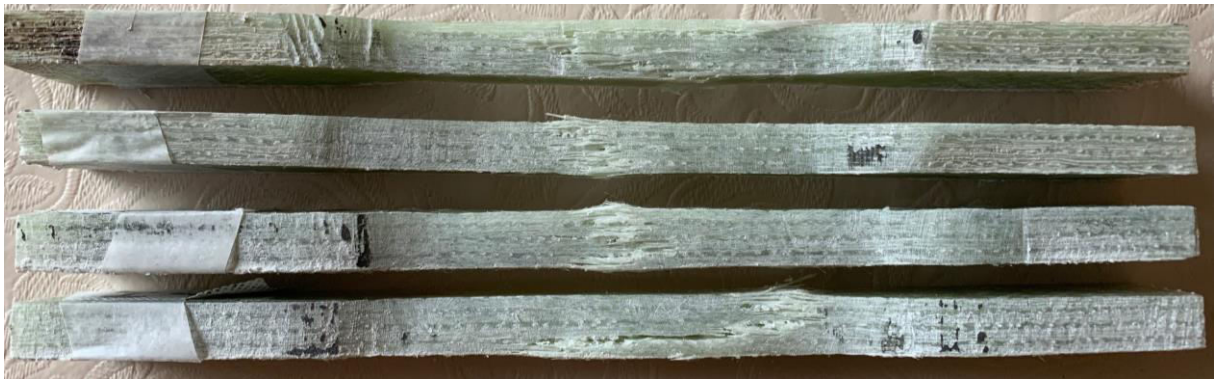
Figur 10-5: Bruddmønstre på prøvene II-A-D sett ovenfra. Foto: TS



Figur 10-6: Bruddmønstre på prøvene III-A-D sett ovenfra. Foto: TS



Figur 10-7: Bruddmønstre på prøvene I-III A-D sett fra siden. I-A er øverst i bilde, deretter I-B, I-C, I-D, II-A osv. Man kan se den samme tendensen som i de større prøvene omtalt tidligere i oppgaven: Prøve I har noe som minner om en slags glidning mens II og III er «renere» brudd. Det er allikavel mindre forskjell i bruddene i disse prøvene enn de større. Foto: TS



Figur 10-8: Bruddmønstre på prøvene I-A-D sett fra siden. I-A er øverst i bildet, deretter II-B osv. Foto: TS





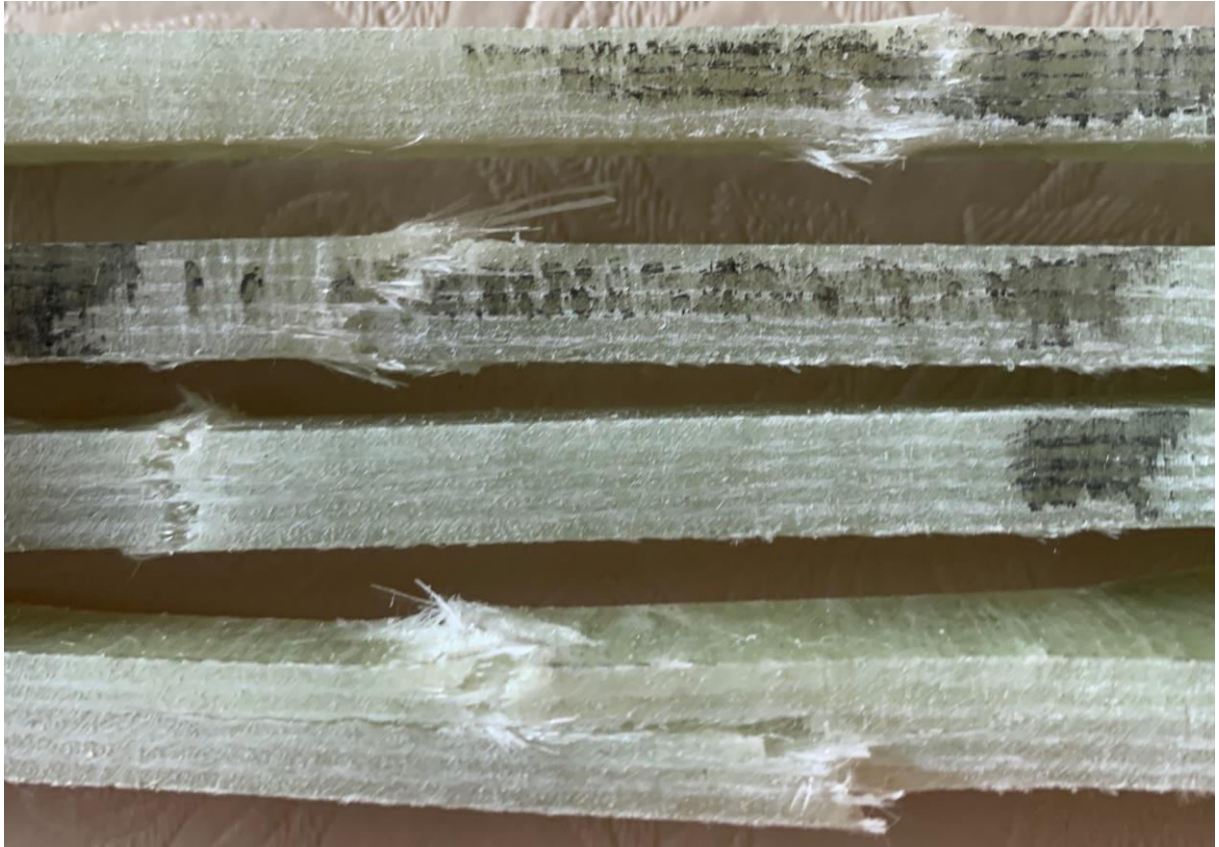
Figur 10-9: Bruddmønstre på prøvene II-A-D sett fra siden. II-A er øverst i bildet, deretter II-B osv. Foto: TS



Figur 10-10: Bruddmønstre på prøvene III-A-D sett fra siden. III-A er øverst i bildet, deretter III-B osv. Foto: TS



*Figur 10-11: Nærbilde av bruddene på prøvene I-A-D sett fra siden. I-A er øverst i bildet, deretter I-B osv. Foto: TS*



*Figur 10-12: Nærbilde av bruddene på prøvene II-A-D sett fra siden. II-A er øverst i bildet, deretter II-B osv. Foto: TS*



*Figur 10-13: Nærbilde av bruddene på prøvene III-A-D sett fra siden. III-A er øverst i bildet, deretter III-B osv. Foto: TS*

## 10.3 A-3 Plakat

### Testing av fiberarmert kompositt som byggemateriale

### Testing of Fiber-Reinforced Composite as a Building Material

Prosjektnr.: 2019-28, Torbjørn Sanden

Intern veileder: Magnus Rannver Rafnsson

Kompositter forbindes vanligvis ikke med bærende konstruksjon i et byggeprosjekt. Stål, betong og tre er så godt innarbeidet i byggebransjen at man sjelden ser bygg med annen bærende konstruksjon. Kompositter har derimot flere egenskaper som gjør de til et interessant alternativ. De er som regel lettere enn stål og betong og kan tilby høy styrke. Samtidig hverken ruster eller råtner de, noe som gjør at vedlikeholdet blir mindre krevende. Livstidskostnadene for kompositter kan i tillegg være 30 % mindre enn alternativene. Dermed kan en kanskje forvente å se mer av komposittkonstruksjoner fremover?

Under ser man et eksempel på en bro i Fredrikstad som er laget i fiberarmert plast:



Figur 1: Gangbroen i Fredrikstad laget av fiberarmert plast. Kilde: <https://www.sintef.no/stete-nytt/armert-plast-kan-gj-lisligere-broer/>

Denne gangbroen er et eksempel på at kompositter bidra til å løse byggetekniske problemer. Gangbroen kan enkelt heves da fiberarmert plast er lettere i forhold til styrken sammenlignet med stål, tre og betong. Samtidig vil en ikke støte på problemer som røte eller rust.

Bacheloroppgaven har tatt for seg testing av glassfiberplater. Plater med ulik mengde fibre, hvor fibre lå både ordnet og tilfeldig i platene, ble kuttet til strekkstaver og kjørt i en strekktestmaskin:



Figur 2: Strekkmaskin av typen Instron 1342, som har en kapasitet på 100 kN.

Dette gjorde at en kunne se tendenser på hvilken måte fibrene burde orienteres, om de bør være lange og kontinuerlige eller korte og tilfeldig plassert. Man så også at andelen fiber og andelen matris (plastbasert fyllmateriale) hadde mye og si for styrken til kompositten.

På figuren under vises en prøve etter utført strekktest:



Figur 3: Tre prøver fra en plate. Her ser man tydelig fibrenes bidrag og lengde.

Dette er fra den platen som tålte mest av de forskjellige, og grunnen til det kan man faktisk se på figuren: Lange, kontinuerlige fibre er mest effektivt med tanke på strekkfasthet. Selve bruddet er bare en glidning eller forskyvning av materialet langs fiberretningen. Under vises prøvene fra en av de andre platene hvor fibre var kortere og tilfeldig orientert til sammenligning:



Figur 4: Kortere fibre, tilfeldig orientert etter strekkretning.

Her ser en at disse prøvene gikk til renere brudd, og at fibre er kortere og ligger helt tilfeldig.