

Sammenhengen mellom statisk og dynamisk utmatting i ensrettede fiberkompositter

Tester og analyse av endring for dynamisk regresjonskurve av ensrettede kompositter utsatt for ulike statiske utmattingslaster

Ketil Bingslien

Veileder

Reidar Anderssen

Masteroppgaven er gjennomført som ledd i utdanningen ved Universitetet i Agder og er godkjent som del av denne utdanningen. Denne godkjenningen innebærer ikke at universitetet inntår for de metoder som er anvendt og de konklusjoner som er trukket.

Forord

Denne rapporten er utarbeidet som en besvarelse av masteroppgaven i emnet BYG500. Masteroppgaven er den avsluttende oppgaven av det toårige masterstudiet for bygg ved Universitetet i Agder og er skrevet i fjerde og avsluttende semester. Masteroppgaven vil ta for seg statisk og dynamisk utmatting og sammenhengen mellom disse i fiberkompositter.

Jeg ønsker å takke min veileder Reidar Anderssen fra OPS Composite Solutions AS, som har bidratt med god hjelp og veiledning gjennom hele masteroppgaven i tillegg til forprosjektet som ble skrevet som en innledende oppgave til masteroppgaven. Det må også rettes en stor takk til Gunnar Semb og Tor Grube fra NORSAFE AS, som har bistått med platene som er brukt i oppgaven samt ga meg muligheten til å være med i produksjonen av platene hos NORSAFE AS.

Johan Olav Brakestad fortjener også en stor takk for hjelp med bruk av muffelovnen på "Brænderiet" til bestemmelse av fiberinnhold. Jeg vil også takke Kari Vesa, servicetekniker for Zwick for å ha bidratt til forståelse av den statiske strekkprøvemaskinen og svart på spørsmål på e-post når det har vært problemer, noe det har vært mye av. Jeg ønsker også å takke Cecilie Ødegård for å ha lært meg å bruke den dynamiske strekkprøvemaskinen. I tillegg vil jeg takke Jan Andreas Holm som har bistått med hjelp til HPU-en til strekkprøvemaskinen da den i starten gikk varm og i slutten av oppgaven når den sluttet å virke.

Sist men ikke minst må det rettes en stor takk til min samboer, mine studiekamerater, venner og familie for støtte under arbeidet med oppgaven.

Sammendrag

I Det Norske Veritas (DNV) sin standard DNV-OS-C501 foreligger det retningslinjer for design, dimensjonering og verifisering av komposittstrukturer rettet spesielt mot offshore. Standarden gir internasjonalt aksepterte retningslinjer for sikker design ved å definere minstekrav for design, materialer, fabrikking og installasjon av lastbærende fiberkompositter.

I temaene statisk og dynamisk utmatting i standarden sies det at statisk styrke er uforandret under dynamisk utmatting for de fleste ensrettede glass- og karbonfibre. Problemområdet oppgaven tar for seg er sammenhengen mellom statisk utmatting og stigningstallet til regresjonskurven til dynamisk utmatting. Forskerspørsmålene er: "Endres den dynamiske regresjonskurven for ensrettede kompositter utsatt for ulike statiske utmattingslaster?" og "Hvis regresjonskurven endres, hva vil dette si for praktisk design i kommersielt bruk?"

I rapporten er det benyttet litteratursøk for å gi teoretisk grunnlag og det er utført laboratorieforsøk for å gi svar på forskerspørsmålene. Glassfiberplatene som prøvene er tatt ut fra er produsert hos NORSAFE AS i Arendal og er laget av kommersielt tilgjengelige materialer med en industrialisert produksjonsmetode.

Det er utarbeidet data og kurver for statisk og dynamisk utmatting, og forskerspørsmålene er undersøkt ved at det er utført tester der prøvene først har vært statisk belastet over en gitt tid for deretter å utsette de for dynamisk utmatting. Deretter er regresjonskurvene for henholdsvis prøver som er testet for kun dynamisk utmatting, og prøver som er utsatt for statisk belastning og dynamisk utmatting sammenlignet. Fiberinnholdet til hver av prøvene er bestemt for å begrunne avvik. Det har vært en utfordring å få gode nok prøver til å bestemme fiberinnholdet.

Testene viser at det er tydelig at kapasiteten er svekket etter at materialet er utsatt for statisk belastning før dynamisk utmatting, da regresjonskurven ligger godt under regresjonskurven for prøvene som kun er utsatt for dynamisk utmatting. Stigningstallet til regresjonskurven har også en tendens til å bli brattere. For praktisk design bør det forsøkes å redusere spredning for å minske sikkerhetsfaktoren. Sikkerhetsfaktoren påvirker vekten av materialet og for å være konkurransedyktig i forhold til konvensjonelle materialer i markedet er dette en viktig faktor.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Innhold	iii
Figurliste	vi
Tabelliste	vii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven	1
1.2 Problemområde og forskerspørsmål	1
1.3 Avgrensing av masteroppgaven	2
1.4 Masteroppgavens oppbygning	2
2 Metode	3
2.1 Litteraturstudie	3
2.2 Laboratorieforsøk	3
2.3 Validitet og reliabilitet	4
3 Teori	5
3.1 Regler og forskrifter	5
3.2 Utmatting i fiberkompositter	5
3.2.1 S-N kurven	6
3.3 Miner - Palmgrens delskadehypotese	8

3.3.1	Utmatting i et lamina med last parallelt med fibre	9
3.3.2	Reduksjon av statisk styrke grunnet permanent statisk belastning	11
3.3.3	Reduksjon av statisk styrke grunnet dynamisk belastning, S-N kurven	12
3.4	Analyse av sammenhenger	13
3.4.1	Lineær regresjon	13
3.4.2	Hvor god er modellen?	14
4	Plateproduksjon på NORSAFE	15
4.1	Resininjesering	15
5	Prøvelegemer	17
6	Testmaskiner	19
6.1	Dynamisk strekkprøvemaskin	19
6.2	Statisk strekkprøvemaskin	20
7	Bestemmelse av fiberinnhold og lagoppbygging	21
7.1	Fiberinnhold prosedyre	21
7.2	Lagoppbygging	24
7.2.1	Teoretisk tykkelse	24
8	Resultat og analyse	27
8.1	Strekkfasthet	27
8.2	Stress rupture	29
8.2.1	Stress rupture basert på målt tøyning	30
8.2.2	Stress rupture basert på estimert tøyning	31
8.2.3	Lineær regresjon av stress rupture	33

8.3	Utvikling av S-N kurve	36
8.3.1	Lineær regresjon av dynamisk utmatting	38
8.4	Endring av dynamisk regresjonskurve ved statisk utmatting	39
9	Konklusjon	45
9.1	Forslag til videre arbeid	46
	Litteraturliste	47
	Appendix	49

Figurliste

3.1	Last påført dynamisk med konstant amplitude [3]	6
3.2	S-N kurven fremstilt logaritmisk [3]	7
3.3	S-N diagram for forskjellige R-verdier [3]	8
3.4	Miner-Palmgrens hypotese for diskret og kontinuerlig spenningspektrum [13]	9
3.5	Fiberbrudd i ensrettede kompositter ved pålasting parallelt med fiber [3]	10
3.6	Utmattingslevetid for ensrettede kompositter under last parallelt med fiber [3]	11
3.7	Stress ruptur kurve fra egne tester	12
3.8	S-N kurve fra egne tester	13
4.1	Plateproduksjon	15
4.2	Platen under vakuum og resininjering	16
5.1	Skisse av prøvelegemer [8]	17
5.2	Prøvelegemer	18
5.3	Dogbone-prøver	18
6.1	Si-Plan strekkprøvemaskin	19
6.2	Zwick testmaskin	20
7.1	Muffelovn og prøver	21
7.2	Lagoppbygging	24
7.3	Bilde av tverrsnitt i lysmikroskop	26
8.1	Spennings-tøyningsdiagram, strekkprøver	28
8.2	Spennings-tøyningsdiagram, strekkprøver justert	29
8.3	Stress ruptur kurve målt	31
8.4	Stress ruptur kurve estimert	32
8.5	Lineær regresjon av målte data, stress ruptur	34
8.6	Lineær regresjon av estimerte data, stress ruptur	35
8.7	Prøver testet dynamisk	36
8.8	S-N Kurve	37
8.9	Lineær regresjon, S-N Kurve	39
8.10	Sammenligning av data, dynamisk mot statisk og dynamisk	41
8.11	Sammenligning av data, dynamisk mot statisk og dynamisk, punkt SD4 utelatt	42
8.12	Sammenligning av data, dynamisk mot statisk og dynamisk, estimert kurvens start	43

Tabelliste

7.1	Gjennomsnitt fiberinnhold prøver	23
7.2	Vektandel og densitet	24
7.3	Vekt per areal	25
7.4	Teoretiske tykkelser regnet ut	25
7.5	Lagoppbygging	25
8.1	Strekfasthet	27
8.2	Stress rupture data, målt tøyning	30
8.3	Stress rupture data, estimert tøyning	32
8.4	Lineær regresjon av målte verdier, stress rupture	33
8.5	Lineær regresjon av estimerte verdier, stress rupture	35
8.6	Data, dynamisk utmatting	37
8.7	Lineær regresjon , dynamisk utmatting	38
8.8	Statisk belastning før dynamisk testing	40
8.9	Dynamisk testing etter statisk belastning	40
8.10	Data sammenligning regresjonskurver	44
A.1	Fiberinnhold prøve S1-S11	50
A.2	Fiberinnhold prøve S12-S15	51
A.3	Fiberinnhold prøve D6-D14	51
A.4	Fiberinnhold prøve D15-D26	52
A.5	Fiberinnhold prøve SD1-SD8	53
B.1	Prøvegeometri, stress rupture	54
C.1	Prøvegeometri, dynamisk utmatting	55
D.1	Prøvegeometri, prøver utsatt for statisk belastning før dynamisk utmatting	56

Kapittel 1

Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Det Norske Veritas (DNV) har utgitt en standard (DNV-OS-C501) med retningslinjer for design, dimensjonering og verifisering av komposittstrukturer spesielt rettet mot offshore. Retningslinjene kan også anvendes generelt for konstruksjoner i kompositter [1].

Hovedmålet med standarden er å gi internasjonalt aksepterte retningslinjer for sikker design ved å definere minstekrav for design, materialer, fabrikking og installasjon av lastbærende fiberkompositter. Den virker også som teknisk referanse til kontrakter mellom kunde og leverandør [2].

Et av temaene standarden DNV-OS-C501 tar for seg er statisk og dynamisk utmatting. En påstand i standarden er at statisk styrke er uforandret under dynamisk utmatting for de fleste ensrettede (continuous) glass- og karbonfibre. Dette gjelder også for aramid-fiber under strekklast.

1.2 Problemområde og forskerspørsmål

Ensrettede laminater vil under utmatting i strekk kunne bli utsatt for forskjellige typer skademekanismer, ut fra hvor mye last det utsettes for. Skademekanismene er "fibre breakage interfacial debonding", oppsprekking av matrise og "interfacial shear failure". [3][4]. Ut i fra dette virker det naturlig at den statiske styrken vil være svekket.

Problemområdet masteroppgaven tar for seg er sammenhengen mellom statisk utmatting og stigningstallet til regresjonskurven til dynamisk utmatting. DNV sier at

statisk styrke er uforandret under dynamisk utmatting, men sier ikke noe om det motsatte, altså hvilken sammenheng det er dersom materialet er utsatt for statisk belastning, for deretter bli utsatt for dynamisk utmatting. Dette er sett på gjennom praktisk bruk av kommersielt tilgjengelige fiberkompositter basert på vanlig produksjonsmetode i komposittindustrien.

Ut fra problemområdet blir forskerspørsmålene følgende:

- Endres den dynamiske regresjonskurven for ensrettede kompositter utsatt for ulike statiske utmattingslaster?
- Hvis regresjonskurven endres, hva vil dette si for praktisk design i kommersielt bruk?

1.3 Avgrensing av masteroppgaven

Masteroppgaven er avgrenset til å gjelde for glassfiberplater produsert av kommersielt tilgjengelige materialer basert på produksjonsmetode brukt i komposittindustrien.

1.4 Masteroppgavens oppbygning

I oppgaven er det 9 hovedkapitler med underkapitler og avsnitt. Det første kapitlet er innledningen og tar for seg bakgrunnen for oppgaven, problemområde, forskerspørsmål og avgrensing av masteroppgaven. Kapittel to inneholder metoden for hvordan oppgaven er løst samt diskusjon rundt validitet og reliabilitet. Kapittel tre inneholder det teoretiske grunnlaget. I kapittel fire er det forklart om produksjonen av platene som er brukt i oppgaven. Kapittel fem er en forklaring av hvordan prøvelegemene er utformet i henhold til standard. I kapittel 6 er testmaskinene beskrevet og i kapittel 7 er prosedyre og resultater av bestemmelse av fiberinnhold. Kapittel 8 er resultat og analyse og innehar resultater som er viktige for oppgaven og diskusjon og analyse rundt disse. Kapittel 9 inneholder konklusjon og forslag til videre arbeid.

Kapittel 2

Metode

Metoden for hvordan masteroppgaven er løst er presentert i dette kapittelet. Det er utført litteraturstudie for å sette seg inn i teori og standarder som er brukt i oppgaven og det er utført laboratorieforsøk for å få grunnlag til å løse oppgaven.

2.1 Litteraturstudie

I litteraturstudiet er det søkt etter og undersøkt gjeldende standarder for kompositter. Søkemotorer som er benyttet er Google, Google Scholar samt databaser som ScienceDirect. De standarder som ikke var tilgjengelig via internett ble fremskaffet av biblioteket ved Universitetet i Agder. Universitetsbiblioteket er også brukt for bøker om kompositt-teori og statistikk for å analysere resultatene.

Mye av teorien er fra en bok som ikke er utgitt, men som brukes som kompendie ved den Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) i Stockholm, Sverige. Denne boken ble tilsendt etter forespørsel til en av forfatterene, Dan Zenkert [3]. Statistikkteorien er fra boken “Statistikk for Universiteter og Høgskoler” skrevet av Gunnar G. Løvås [5].

2.2 Laboratorieforsøk

For å svare på oppgaven er det utført tester i forskjellige laboratorier ved Universitetet i Agder. Prøvelegemene er kuttet, bearbeidet og limt på bygglaboratoriet. Den statiske testingen er utført ved en statisk strekkprøvemaskin på bygglaboratoriet mens den dynamiske testingen er utført med en dynamisk strekkprøvemaskin på mekatronikklaboratoriet. Testdata er presentert vha. grafer fra Excel og lineær regresjon er utført ved hjelp av RStudio som er et brukergrensesnitt for R, et programmeringsspråk for statistikk og grafikk.

2.3 Validitet og reliabilitet

Det er viktig å være kritisk til egne målinger og undersøkelser i en oppgave. For at metodene skal gi troverdig kunnskap må kravene til validitet og reliabilitet være oppfylt. Validitet vil si gyldighet, og med dette menes hvor godt en klarer å måle eller undersøke det som skal måles eller undersøkes. Reliabilitet betyr pålitelighet og har med målesikkerhet å gjøre, dvs. hvor sikre tallene fra målingen eller undersøkelsen er [6].

Det er også viktig å være oppmerksom på mulige feilkilder i arbeidet. I en oppgave som dette, som inneholder data basert på labtester er det mange mulige feilkilder. Prøvene er tatt ut og preparert for hånd på bygningslaboratoriet. Det er viktig å kutte prøvene vinkelrett på fiberens lengderetning og å få sidene parallelle. Kompositter er et ikke-homogent materiale og fiberinnholdet kan variere i materialet, hvilket kan bidra til stor spredning.

Kapittel 3

Teori

3.1 Regler og forskrifter

Det finnes flere regelverk med retningslinjer for design, dimensjonering og verifisering av komposittstrukturer. Det er i denne oppgaven brukt DNV-OS-C501 samt flere ISO-Standarder som tar for seg testing av komposittmaterialer. Standardene som er brukt i denne masteroppgaven er følgende:

- DNV-OS-C501 Offshore Standard, Composite Components [2].
- NS-EN ISO 527-1:2012 Plast - Bestemmelse av strekkeegenskaper - Del 1: Generelle prinsipper (ISO 527-1:2012) [7].
- NS-EN ISO 527-5:2009 Plast - Bestemmelse av strekkeegenskaper - Del 5: Prøvingsbetingelser for ensrettede fiberforsterkede plastkompositter (ISO 527-5:2009) [8].
- NS-EN ISO 1172:1998 Glassfiberforsterket plast - Forhåndsimpregnater, støpemasser og laminaer - Bestemmelse av glassfiber- og mineralstoffinnhold - Kalsineringsmetoder (ISO 1172:1996) [9].
- ISO 2559:2011 Textile glass - Mats (made from chopped or continuous strands) – Designation and basis for specifications [10].

3.2 Utmatting i fiberkompositter

Utmatningslevetid er vanskelig å forutse, selv for konvensjonelle materialer vi har lang erfaring med. For fiberkompositter er det ikke mindre komplisert. Mye av kunnskapen vi innehar fra konvensjonelle materialer har oppstått på grunn av ulykker. [11]. Noen av grunnene til at det er vanskelig å forutse utmatningslevetid i kompositter er at det er flere forskjellige skademekanismer. Skademekanismene vil reagere forskjellig avhengig av lasten. Spenningsdistribusjonen i et lamina kan variere selv om tøyningen er den

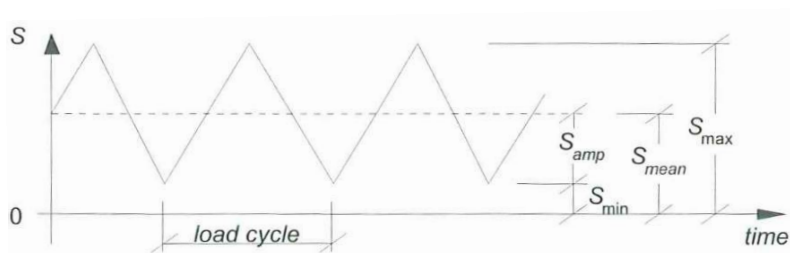
samme, og dette skyldes anisotropi. [3].

3.2.1 S-N kurven

Wöhler introduserte i 1860-årene en tilnærming til å estimere utmattingslevetid. Det ble utarbeidet et konsept, som ved lave spenningsamplituder gir uendelig utmattingslevetid. Wöhlers empiriske metode er velkjent og mye brukt selv om den ikke tar høyde for plastisk deformasjon. Basisen for Wöhlerkurven, eller S-N kurven, er testing av konstant amplitude mellom en maks- og en minimum-spenning (eller tøyning), S_{\max} og S_{\min} helt til materialet går i brudd. I formlene nedenfor, 3.1 og 3.2, fremgår det hvordan amplitude og middelvei (mean) er definert. Testingen av konstant amplitude med maksimum og minimum spenning vises i Figur 3.1. [3].

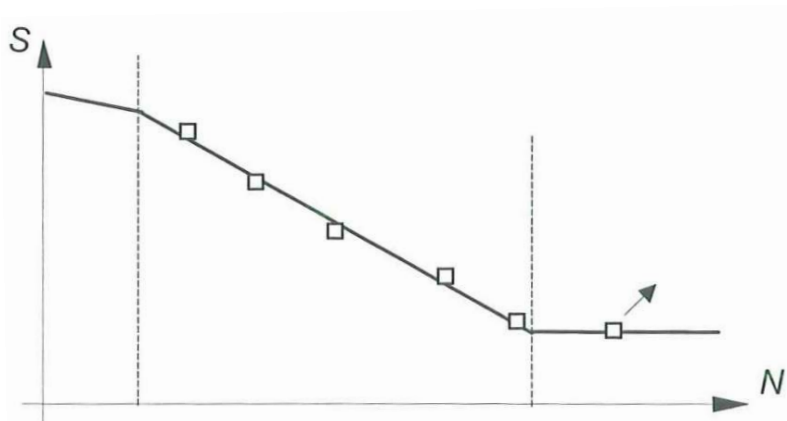
$$S_{\text{amp}} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} \quad (3.1)$$

$$S_{\text{mean}} = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \quad (3.2)$$



Figur 3.1: Last påført dynamisk med konstant amplitude [3]

I S-N kurven er S spenning og N antall lastsvingninger, og kurven blir ofte plottet logaritmisk som vist på Figur 3.2. I kurven er hele levetiden til materialet plottet og levetiden til et materiale er avhengig av antall lastsykler som skal til for å fremstille sprekk pluss antallet sykler som skal til for at denne sprekk skal utvikles nok til at materialet går i brudd. Spenningen S, vist i formlene 3.1 og 3.2 kan byttes ut med enten tøyning eller spenningskonsentrasjonsfaktor. [3].



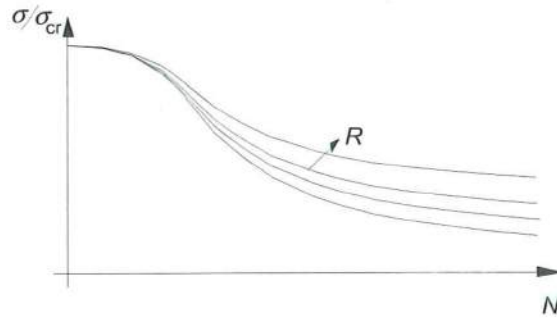
Figur 3.2: S-N kurven fremstilt logaritmisk [3]

S-N kurven deles ofte i tre deler, der den første delen til venstre i kurven har høye spenninger og få sykler til brudd. Maksimumspenningen er ofte nær eller over plastisk flytespenning for materialet. Den andre delen er midtpartiet på kurven i Figur 3.2. I dette området ligger plottet $\log(\text{spenning}) - \log(\text{tøyning})$ ofte på en lineær linje slik figuren viser. Dette området er ofte gyldig til 10^6 eller 10^7 sykler. Det siste området er etter at materialet har nådd utmattingsgrensen og materialet vil kunne motstå et uendelig antall svingninger uten å få sprekk eller at tidligere sprekker utvikles. [3].

Utmattingslevetiden for et materiale avhenger av hvordan lasten påføres. Vi har et forhold R som sier noe om forholdet mellom maksimumslast og minimumslast, se ligning 3.3. Der $R < 0$ er det en lastsyklus som er både i kompresjon og i strekk. I intervallet $0 < R < 1$ er det kun strekk mens ved $R > 1$ er det kun kompresjonslast. Utmattingslevetiden til et materiale vil synke med en økning av middel spenningsnivå og maksimum spenningsnivå som er en økning av R -verdien. En økning av R -verdien er vist på Figur 3.3.

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} \quad (3.3)$$

Tiden det tar før feiling er delt i to faser. Den første fasen er sprekkinitieringen og består av antall sykler for å skape sprekk. Neste fase er sprekkvekst, altså der hvor sprekk vokser fra sprekkinitieringen.



Figur 3.3: S-N diagram for forskjellige R-verdier [3]

3.3 Miner - Palmgrens delskadehypotese

Utmattingslevetiden kan bli beregnet ved bruk av S-N kurven med antagelse om at skaden i materialet er en lineær kumulativ skade [12]. Praktisk dimensjonering av utmatting i dag er dominert av Miner-Palmgrens delskadehypotese, ofte kalt Miners sum. Hypotesen antar at en syklus med spenningsvidde $\Delta\sigma_i$ gir et bidrag $1/N_i$ til den totale skaden der N_i er antall sykler til brudd ved en harmonisk spenningsvidde $\Delta\sigma_i$. Skadebidraget fra n_i sykler blir med dette n_i/N_i . Summen av I spenningsblokker gir skaden D i ligning 3.4 [13].

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_I}{N_I} = \sum_{i=1}^I \frac{n_i}{N_i} \quad (3.4)$$

Hvis spenningspekteret gis ved en kontinuerlig funksjon kan skaden finnes ved integrasjon.

$$D = \int_0^{n_0} \frac{dn(\Delta\sigma)}{N(\Delta\sigma)} \quad (3.5)$$

der n_0 er totalt antall sykler. D betegnes som skadeindeksen.

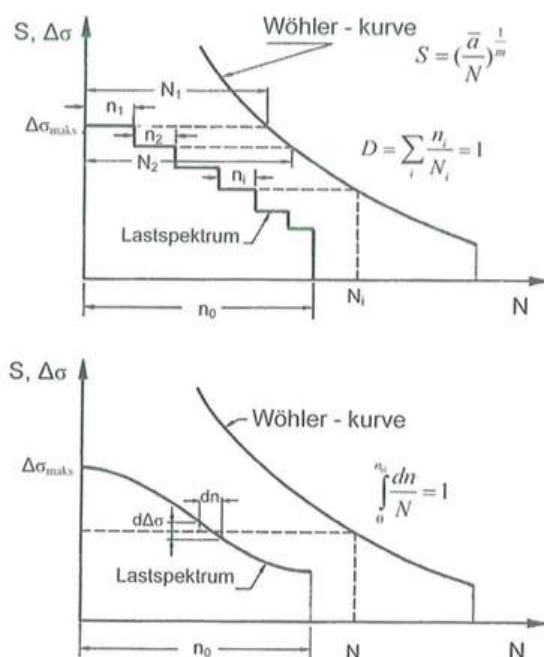
I Figur 3.4 er beregningsprosedyren presentert grafisk for henholdsvis diskret og kontinuerlig spenningspektrum. Brudd oppstår når $D \geq \eta$, der η er en utnyttelsesfaktor. Forsøk har vist at med stokastiske spenningspektra er det stor spredning, med $0,3 < \eta < 3,0$.

Utmattingskaden D beregnet med Miner-Palmgrens delskadehypotese, senere kalt Miners sum er [12] [13]:

$$D = \sum_{i=1}^I \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^I n_i \cdot (\Delta\sigma_i)^m \leq \eta \quad (3.6)$$

der:

- D er akkumulert utmattingsskade
- \bar{a} er S-N kurvens skjæring med N-aksen
- m er negativ invers helning av S-N kurven
- k er antall spenningsblokker
- n_i er antall spenningscykler i spenningsblokk i
- N_i er antall sykler til brudd med konstant spenningsvidde $\Delta\sigma_i$
- η er utnyttelsesfaktoren



Figur 3.4: Miner-Palmgrens hypotese for diskret og kontinuerlig spenningspektrum [13]

3.3.1 Utmatting i et lamina med last parallelt med fibrene

I fiberkompositter blir S-N kurven ofte plottet annerledes enn for andre materialer. Det synes å være logisk å bruke tøyninger istedenfor spenning mot antall svingninger, årsakene til dette er flere. Fiberinnholdet i et lamina av samme materiale kan variere. Prøver med høyt fiberinnhold vil ha en høyere styrke, mens tøyningene ofte er like. Utmattingstiden vil da være lik med like tøyninger, men ikke med like spenninger.

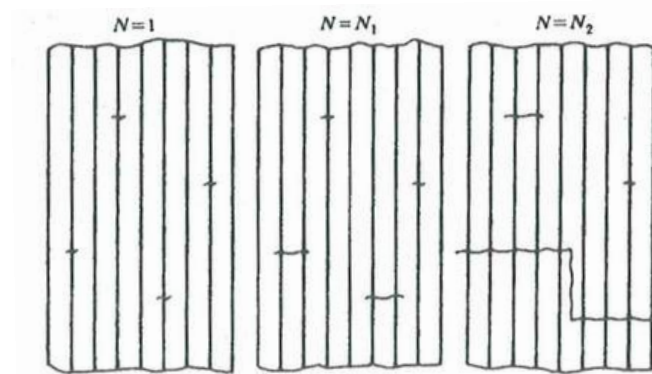
Lages det et laminat med lag som ikke ligger i 0 grader, vil styrken sammenlignet med kun ensrettede lag synke mens tøyning til brudd være like i laminatene, siden feiling

skyldes fiberbrudd. [3].

Materialbrudd er statistisk til en viss grad. Hvilken spenning eller tøyning materialer har ved brudd ved skjær varierer fra prøve til prøve. Hver fiber har forskjellig styrke, og styrken langs fiberens lengde kan også variere.

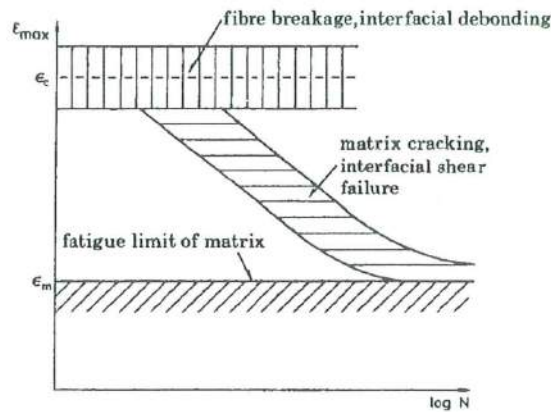
Ved høye laster nær den statiske styrken til et laminat vil noen uavhengige fiber ryke ved første svingning, da spenningen er høyere enn den svakeste fiberen i laminatet. I neste svingning vil spenningsbildet være noe annerledes da noen fiber allerede er gått i brudd. Flere fiber går i brudd, og slik fortsetter det gjennom svingningene. Figur 3.5 viser dette.

En kan argumentere for at prosessen er uavhengig av andre feilmekanismer, som oppsprekking av matrise og at utmattingslevetid kun er avhengig av uavhengig fiberbrudd.



Figur 3.5: Fiberbrudd i ensrettede kompositter ved pålasting parallelt med fiber [3]

Dersom en utsetter kompositten for svært lave laster kan det i første svingning være at ingen fiber går i brudd. Dersom dette gjentas ved flere svingninger vil ikke kompositten være utsatt for utmatting. Vi har da nådd utmattingsgrensen. Denne lasten er ofte den samme som utmattingsgrensen til matrisen (fatigue limit of matrix), ϵ_m , og vil i utmattingslevetid-diagrammet være en horisontal linje, se Figur 3.6. [3].



Figur 3.6: Utmattingslevetid for ensrettede kompositter under last parallelt med fiber [3]

3.3.2 Reduksjon av statisk styrke grunnet permanent statisk belastning

Dersom et laminat er utsatt for en permanent belastning over tiden t , blir den statiske styrken påvirket av dette. Dette kalles “stress rupture” og den gjenværende styrke beregnes etter følgende formel ihht. DNV-OS-C501. [2].

$$\log(\sigma) = \log(\sigma_{0 \text{ stress rupture}}) - \beta \log(t) \quad (3.7)$$

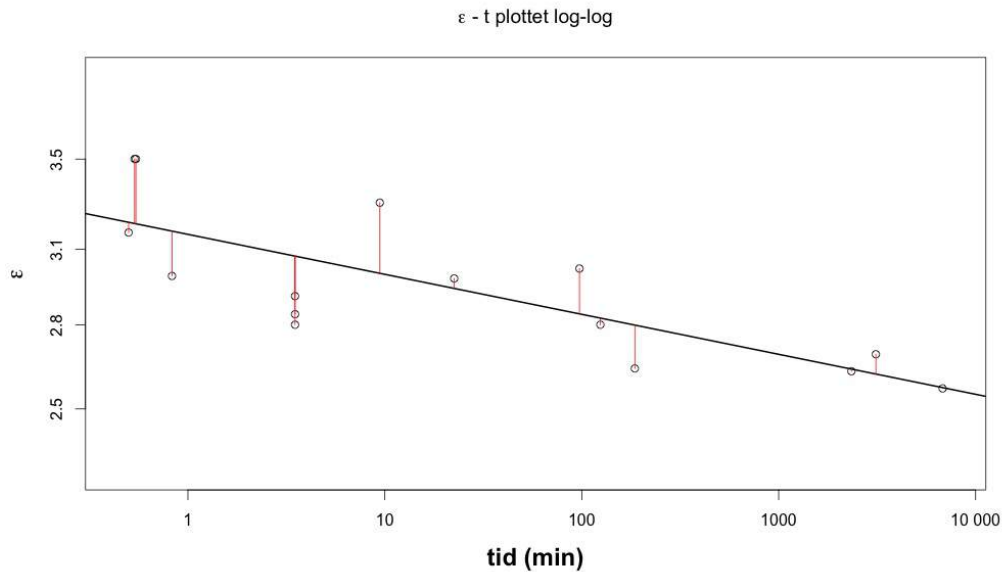
$$\sigma = \sigma_{0 \text{ stress rupture}} - \beta \log(t) \quad (3.8)$$

der:

- σ er gjenværende statisk styrke
- $\sigma_{0 \text{ stress rupture}}$ er statisk belastning ved tiden $t=0$
- t er tiden i minutter.

Stress rupture blir plottet logaritmisk, som vist på Figur 3.7. Tiden til brudd er på x-aksen og på y-aksen er tøyning eventuelt spenning. Ved å bruke lineær regresjon for å finne best passende kurve kan grafen ekstrapoleres for å finne punkter utenfor det testede området.

Den karakteristiske styrken skal bestemmes ihht. Sec. 4 [3.11] i DNV-OS-C503 [2]. Variasjonskoeffisienten av styrken etter en gitt tid skal være den samme som for korttidsdata hvis ikke variasjonskoeffisienten av gjenværende styrke måles direkte. Andre formater av formelen er godkjent brukt av DNV hvis det kan bevises at den stemmer ut fra eksperimentelle bevis.



Figur 3.7: Stress ruptur kurve fra egne tester

3.3.3 Reduksjon av statisk styrke grunnet dynamisk belastning, S-N kurven

I følge DNV-OS-C501 er statisk styrke i fiberdominerte kompositter uforandret under dynamisk utmatting for de fleste ensrettede glass- og karbonfibre. Dette gjelder også for aramidfibre under strekklast. Derimot kan langtids statisk styrke, som beskrevet i underkapittel 3.3.2 brukes. I Figur 3.8 er et eksempel på S-N kurve vist.

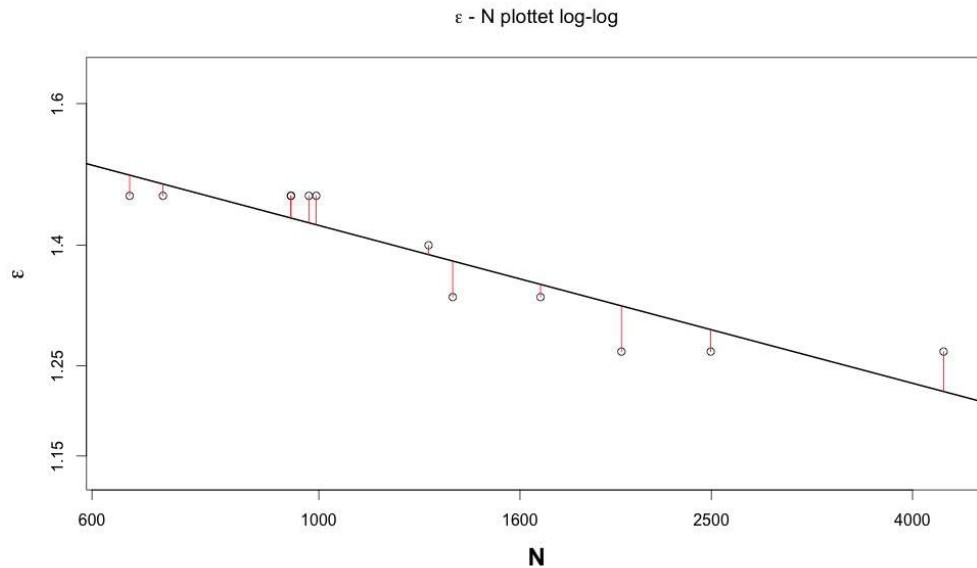
For alle andre tilfeller, der et laminat er utsatt for dynamisk belastning beregnes gjenværende styrke eller tøyning til brudd ved følgende S-N kurve [2]:

$$\log(\sigma) = \log(\sigma_{0 \text{ fatigue}}) - \alpha \log(N) \quad (3.9)$$

$$\log(\epsilon) = \log(\epsilon_{0 \text{ fatigue}}) - \alpha \log(N) \quad (3.10)$$

der:

- σ er gjenværende statisk styrke
- $\sigma_{0 \text{ fatigue}}$ er statisk belastning ved $N=0$
- ϵ er tøyning ved brudd
- $\epsilon_{0 \text{ fatigue}}$ er tøyning ved $N=0$
- N er antall sykler til brudd
- α er stigningstallet til utmatningskurven



Figur 3.8: S-N kurve fra egne tester

3.4 Analyse av sammenhenger

For å analysere en mulig sammenheng basert på innsamlet data benyttes statistikk. Først undersøkes det om det finnes sammenheng, deretter analyseres sammenhengen. I dette underkapittelet ser vi på lineær regresjon og hvor sannsynlige dataene er. Lineær regresjon forteller hvilken lineær sammenheng det er mellom variablene i datasettet. [5].

3.4.1 Lineær regresjon

I en regresjonsanalyse finner en ut hvilken sammenheng det er mellom variablene. Vi vet at en lineær linje kan skrives som $Y = \alpha + \beta x$. Ved lineær regresjon antar en at den stokastiske variabelen Y_i er relatert til variabelen x_i . Lineær regresjon er derfor definert med følgende formel [5]:

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + e_i \quad (3.11)$$

Vi ønsker med regresjonsanalysen å finne et best mulig estimat på den lineære sammenhengen mellom dataene. Den metoden som vanligvis benyttes er minste kvadraters metode. Metoden baserer seg på å ta avstanden fra hvert punkt til en vilkårlig linje, kvadrere avstanden (avvikskvadrat) og, deretter finner summen K som

er summen av avvikskvadratene. Minste kvadraters metode er når vi velger den linjen med minst kvadratsum K . [5].

Når dataene $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ foreligger kan vi med minste kvadraters rette linje tilpasse linjen $\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x$ som passer best til dataparene. Med minste kvadraters metode får vi koeffisientene $\hat{\alpha}$ og $\hat{\beta}$. S_x og S_y er standardavviket og r er korrelasjonen til dataene. [5].

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} = r \cdot \frac{S_y}{S_x}, \quad \hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x} \quad (3.12)$$

3.4.2 Hvor god er modellen?

Etter å ha utført en lineær regresjon og funnet den lineære sammenhengen som passer best til dataene må det undersøkes hvor god modellen er. Et eksempel på spørsmål det kan være lurt å stille seg er om regresjonslinjen passer godt til dataene. [5].

Variansen til Y-dataene er definert slik:

$$S_Y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (3.13)$$

Istedet for å se på variansen ser vi på summen av ligningen 3.13. Dette er summen av kvadratene mellom Y-dataene og gjennomsnittsverdien, SS_T (total sum of squares). SS_R (sum of squared residuals) er summen av kvadratene mellom regresjonslinjen og gjennomsnittet av Y-dataene. SS_E (error sum of squares) er den minste verdien til kvadratsummen K beskrevet tidligere. Settes disse i sammenheng får vi følgende ligning [5]:

$$\underbrace{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}_{SS_T} = \underbrace{\sum_{i=1}^n (\hat{\alpha} + \hat{\beta}x_i - \bar{Y})^2}_{SS_R} + \underbrace{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta}x_i)^2}_{SS_E} \quad (3.14)$$

SS_T er den totale variansen av Y-dataene og kan deles opp i én del som forklares av vår modell (SS_R) og én del som skyldes tilfeldige avvik. Andelen av variansen i Y-dataene er R^2 . Variansen R^2 er gyldig mellom 0 og 1. Desto nærmere 1 R^2 er lik, jo mer sannsynlig er dataene våre. [5].

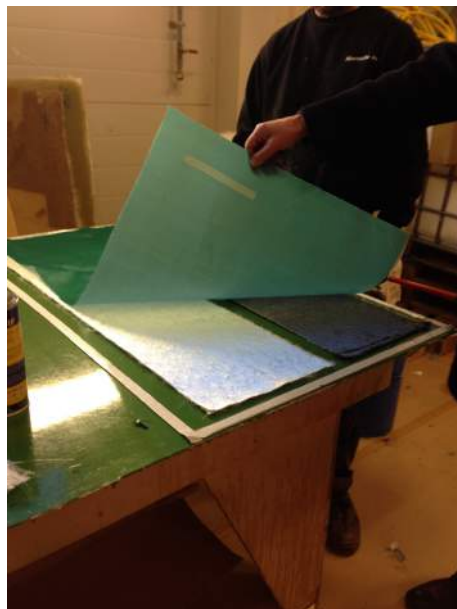
$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} \quad (3.15)$$

Kapittel 4

Plateproduksjon på NORSAFE

4.1 Resininjesering

Platene som prøvene i oppgaven er tatt ut fra er produsert av kommersielt tilgjengelige produkter. Platene er vakuumbstøpte hos NORSAFE AS hvor jeg fikk være med på støpingen for å få en bedre forståelse av produksjonsmetoden, se figur 4.1. Vakuumbstøping med resininjесering av kompositter foregår slik at fibermattene legges i en form dekket av for eksempel gelcoat og blir pakket inn med en vakuumpose rundt. En vakuumpumpe trekker ut luften og trekker resinen inn igjennom fibre. Det forbrukes lite resin, og fiberandelen er typisk i området 0,25-0,55. [11]. På Figur 4.1 og 4.2 vises plateproduksjonen på NORSAFE.



(a) Slippbelegg og fibermatter



(b) Resininjeseringsmaske og tårn

Figur 4.1: Plateproduksjon

Produksjonen av formen som brukes ved resininjering er tidkrevende og kostbar, men produktet får en lav porøsitet og en bra overflate. Med lav variasjon i kvaliteten og lav porøsitet får en sterke produkter som kan brukes der kvalitetskravet er høyt.

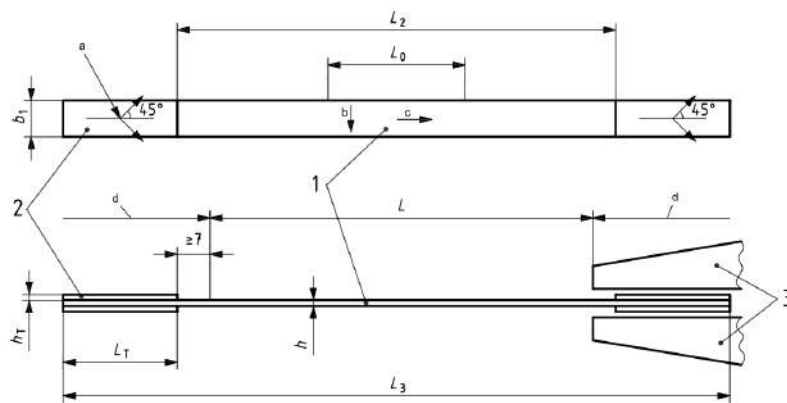


Figur 4.2: Platen under vakuum og resininjering

Kapittel 5

Prøvelegemer

Prøvelegemene som er brukt til all testing i oppgaven er tatt ut i henhold til gjeldende standard, NS-EN ISO 527-5:2009 [8], og har følgende form og dimensjoner, se figur 5.1:



Figur 5.1: Skisse av prøvelegemer [8]

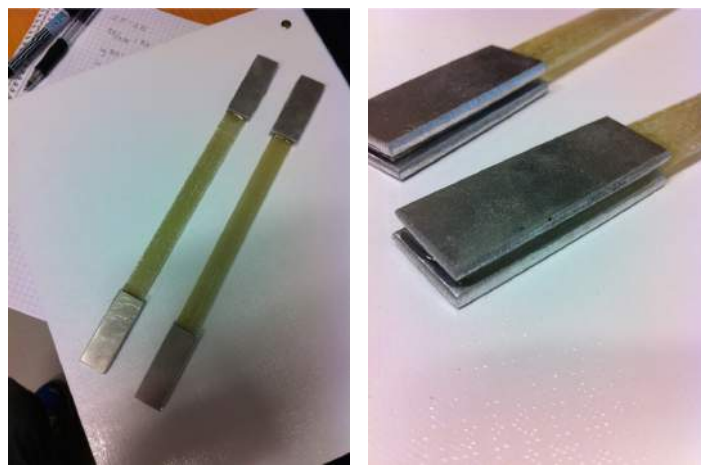
der:

- 1 Prøvelegeme
- 2 Tab
- 3 Grep

		Dimensjoner i mm
L_3	Total lengde	250
L_2	Lengde mellom tabs	150 ± 1
b_1	Bredde	$15 \pm 0,5$
h	Tykkelse	$1 \pm 0,2$
L_0	Gauge length(for extensometer)	50 ± 1
L	Avstand mellom grep ved start	136
L_T	Lengde på tabs	> 50
h_T	Tykkelse tabs	0,5 til 2

Prøvelegemene er tatt ut med en vannkjølt kutter. Et krav i standarden er at sidene skal være parallelle, med en feil på maksimalt 0,2mm. Dette er tilstrebet så langt som mulig. Etter kutting er sidene pusset, så alle løse deler av glass unngås. Prøvelegemene vises i Figur 5.2.

Materialet standarden anbefaler til bruk som tabs er glassfiber med fibre orientert i $\pm 45^\circ$. Standarden åpner for bruk av andre materialer. I samtale med veileder ble det bestemt å bruke aluminiumstabs med tykkelse på 3mm. Disse er kuttet ut for hånd, sidene er slipt og overflaten mot prøvestykket er pusset godt med sandpapir for å få god nok heft. Tabsene er deretter limt med epoxy, se figur 5.2b.



(a) Prøvelegemer med tabs

(b) Pålimte tabs

Figur 5.2: Prøvelegemer

Under dynamisk testing ble det opplevd stor variasjon i hvor brudd oppstod. Det er ønskelig å ha likt bruddbilde for å ha et godt sammenligningsgrunnlag. Problemet med stor variasjon i hvor brudd oppstod har medført en del arbeid og testing. Det ble testet om det var mulig å bruke dogbone-prøver, selv om ikke standardverket åpner for dette. Dette ble testet for å prøve og tvinge bruddet til å gå utenfor endene. For å lage dogbone-prøver ble det lagd en jigg i stål til å feste prøvene i, hvor prøvene ble slipt ned til ønsket form. Dette viste seg å ikke være noe gi bedre bruddbilde, så det ble gått tilbake til rette prøver.



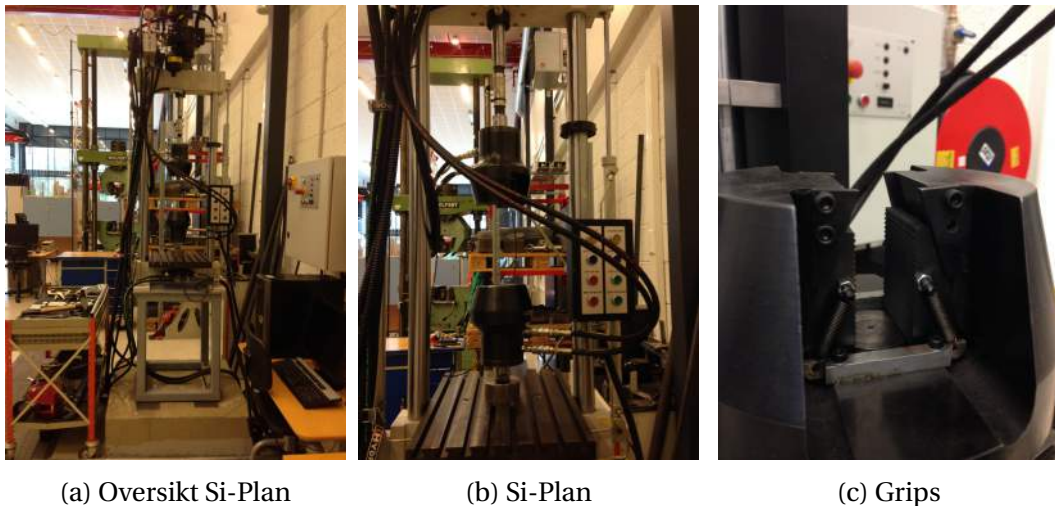
Figur 5.3: Dogbone-prøver

Kapittel 6

Testmaskiner

6.1 Dynamisk strekkprøvemaskin

For dynamisk testing er det brukt en dynamisk strekkprøvemaskin fra Si-Plan, se Figur 6.1.



Figur 6.1: Si-Plan strekkprøvemaskin

Denne har følgende spesifikasjoner [14]:

- Lastcelle: 25 kN
- Slaglengde LVDT: 100 mm
- Kalibrering: 0,50 %
- Horisontalt testrom: 405 mm
- Maks testfrekvens: 100 Hz

Ved dynamisk testing er det brukt posisjonskontroll. Prøvene er satt inn og påført forlengelse manuelt, til ønsket start- og sluttposisjon er funnet. Deretter er prøvene satt til forlengelse mellom gitte punkter med en frekvens på 3 Hz til de har gått i

brudd. Antall sykler er notert og S-N (ϵ -N) kurve er utarbeidet.

6.2 Statisk strekkprøvemaskin

For statisk testing er det brukt en table-top testmaskin fra Zwick, se Figur 6.2.



(a) Oversikt

(b) Bakker

Figur 6.2: Zwick testmaskin

Testmaskinen har følgende spesifikasjoner [15]:

- Lastcelle: 50 kN
- Test area høyde: 1325 mm
- Test area bredde: 440 mm
- Hastighet: 0,0005 til 600 mm/min

Prøvene er satt inn mellom grepene og er belastet med en gitt belastning som holdes statisk til den går i brudd. Tid og forlengelse er logget og det er utarbeidet en sigekurve ut fra dette.

I følge DNV [2] skal det tas minst tre prøver for hver egenskap som skal bestemmes. I oppgaven er det tatt tre tester av de prøvene som ligger øverst på sigekurven, altså de som tar kortest tid, og færre av de andre. Grunnen til at dette er gjort er at testing av kompositter er tidkrevende og at det har oppstått utfordringer og problemer med strekkprøvemaskinen i løpet av semesteret.

Kapittel 7

Bestemmelse av fiberinnhold og lagoppbygging

7.1 Fiberinnhold prosedyre

Fiberinnholdet er bestemt ved å brenne vekk matrisen og veie prøvene før og etter avbrenning i henhold til ISO1172 [9],[16]. Vi er interessert i å se på fiberinnholdet for å kunne gjøre estimerer på strekkfasthet og E-modul, samt forklare avvik på resultatene.



(a) Muffelovn

(b) Prøver i muffelovn

(c) Prøver i dessicator

Figur 7.1: Muffelovn og prøver

Det ble kuttet prøver på ca. 40x15 mm. Disse har blitt preparert, slik at de er fri for alle løse partikler av plast og glassfiber. Etter dette er de kondisjonert i en luftventilert ovn i 105°C i et døgn. Deretter er prøvene varmet opp i en muffelovn i 625°C til alt kullstoff er forsvunnet, plassert i en dessicator for avkjøling og deretter veid. Dette ble i starten gjort i flere omganger helt til vektforskjellen mellom to etterfølgende veiinger var mindre enn 0,1 mg, men det utgjorde veldig lite, så dette ble sløffet. Prøvene ble veid før og etter forbrenning, og fiberinnholdets masseprosent bestemmes.

Fiberens masseprosent [9]:

$$m_f = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \quad (7.1)$$

der:

m_f er masseprosent av fiberinnholdet.

m_1 er vekt av prøveskålen.

m_2 er vekt av skål + prøvestykke.

m_3 er sluttvekt av skål + rest etter forbrenning.

Volumprosent fiberinnhold [10],[17]:

$$\phi_f = \frac{\frac{m_f}{\rho_f}}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m}} \quad (7.2)$$

der:

ϕ_f er volumprosent av fiberinnholdet.

m_f er masseprosent av fiberinnholdet.

m_m er masseprosent at matrisen.

ρ_f er fiberens densitet.

ρ_m er matrisens densitet.

Ligningene 7.1 og 7.2 ovenfor forklarer hvordan fiberinnhold regnes ut. I Tabell 7.1 er fiberinnholdet til hver av prøvene listet opp skjematisk. Fullstendig resultatliste fra undersøkelsen av fiberinnhold finnes i Appendix A. Fiberinnholdet blir undersøkt for å forsøke å begrunne eventuelle avvik i resultatene.

Fiberinnholdet varierer fra 0,51 til 0,59 og prøvene D6-D26, altså prøvene som er testet kun dynamisk har jevnt over et høyere fibervolum enn de resterende prøvene. En del av de dynamiske prøvene gikk i brudd i tabs, hvilket medførte at prøver til bestemmelse av fiberinnhold ikke kunne tas fra det området, men ble tatt i området utenfor tabs.

De resterende prøvene er tatt fra området med tabs. For å teste prøver i dette området, ble tabs fjernet og limrester ble synliggjort. Limrestene ble fjernet etter beste evne, men det kan sies med stor sannsynlighet at det fortsatt var lim igjen på prøvene. Dette vil bidra til et mindre fiberinnhold. Det at ikke alle prøvene som er tatt ut til å bestemme fiberinnhold er like er en feilkilde, og det kan bidra til at resultatene ikke er like gode til å begrunne avvik som tenkt. De vil allikevel gi et bilde på fiberinnholdet og kan brukes til å se på prøver som varierer mye.

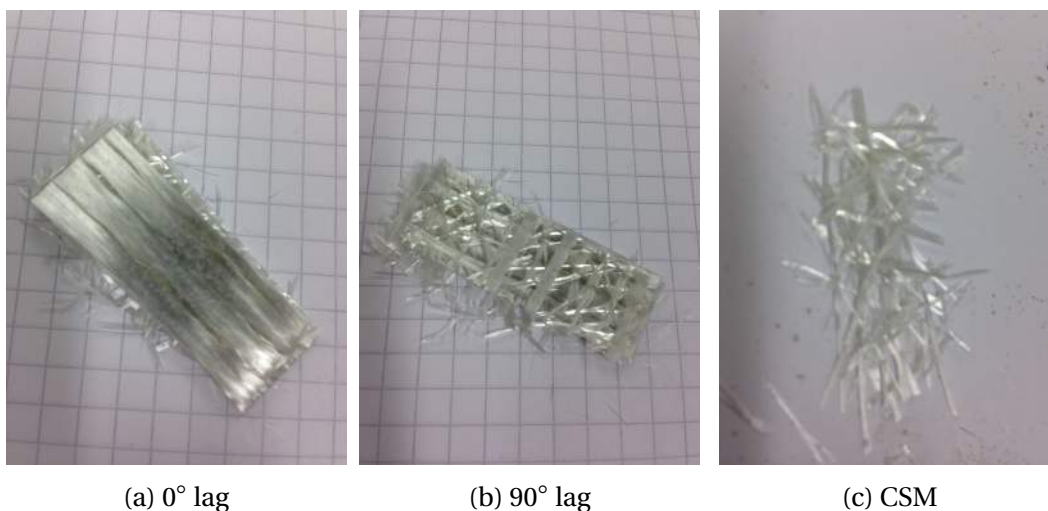
Tabell 7.1: Gjennomsnitt fiberinnhold prøver

Prøve	ϕ_f	Prøve	ϕ_f	Prøve	ϕ_f	Prøve	ϕ_f
1	0.5530	S1	0.5822	D6	0.5564	SD1	0.5297
2	0.5394	S2	0.5677	D7	0.5778	SD2	0.4956
3	0.5288	S3	0.5307	D8	0.5460	SD3	0.5289
4	0.5064	S4	0.5140	D9	0.5770	SD4	0.5426
		S5	0.5192	D10	0.5436	SD5	0.5173
		S6	0.5631	D12	0.5636	SD6	0.5223
		S7	0.5259	D13	0.5806	SD7	0.5330
		S8	0.5088	D14	0.5151	SD8	0.4981
		S9	0.4948	D15	0.5749		
		S10	0.4946	D16	0.5195		
		S11	0.5704	D17	0.5531		
		S12	0.5301	D18	0.5680		
		S13	0.5300	D19	0.5974		
		S14	0.5133	D20	0.5900		
		S15	0.5525	D21	0.5268		
				D22	0.5999		
				D23	0.5860		
				D24	0.5930		
				D25	0.5919		
				D26	0.5615		

Komplette resultatlister finnes i Appendix A

7.2 Lagoppbygging

Etter at avbrenningen er fullført i henhold til ISO1172 ble fiberoppbyggingen studert, for å sammenligne faktisk fiberoppbygging og teoretisk fiberoppbygging gitt i fibermattens datablad, se Figur 7.2. Det var tydelig at lagene hadde følgende lagoppbygging: [0,90,CSM,0,90,CSM].



Figur 7.2: Lagoppbygging

Fibrenes vektfraksjoner ble sammenlignet med vektfraksjonen databladet til materialet angir. Databladet angir i masse, hvor mye det er i hver retning.

7.2.1 Teoretisk tykkelse

Når fiberinnholdet i prøven er bestemt er vektandelen til henholdsvis fiber og matrise kjent. Gjennomsnittlig vektandel etter strekkprøving blir brukt som utgangspunkt, se Tabell 7.2. Densitet er kjent fra datablad, se Appendix E og F. For vektandel og densitet, se Tabell 7.2.

Tabell 7.2: Vektandel og densitet

Fiber/Matrise	Vektandel [%]	Densitet $\frac{kg}{m^3}$
Fiber	77.1	2590
Matrise	22.9	1066

Vi kjenner også følgende fra datablad:

Tabell 7.3: Vekt per areal

Vekt per areal	$\frac{g}{m^2}$
0° lag	1200
0° lag	50
CSM	100

Lagtykkelsene er listet opp i Tabell 7.4.

Tabell 7.4: Teoretiske tykkelser regnet ut

Tykkelser	0° lag	90° lag	CSM
Total $\frac{g}{m^2}$	1556.420	64.851	129.702
Matrise $\frac{g}{m^2}$	356.420	14.851	29.702
t_f	0.463	0.019	0.039
t_m	0.334	0.014	0.028
t_t	0.798	0.033	0.066

Lagoppbyggingen vises i Tabell 7.5.

Tabell 7.5: Lagoppbygging

Lag	Teoretisk tykkelse
0°	0.798
90°	0.033
CSM	0.066
0°	0.798
90°	0.033
CSM	0.066
Total tykkelse	1.795



Figur 7.3: Bilde av tverrsnitt i lysmikroskop

Den teoretiske tykkelsen er brukt til å regne spenninger for prøvene som er testet. Grunnen til at det er brukt teoretisk og ikke målt tykkelse er at tykkelsen på platene varierer over tverrsnittet. Slippbelegget som er brukt under støpingen er ujevnt og har gitt struktur i platene, og prøvene er tykkest rundt fiberbuntene. Faktisk målt tykkelse har variert fra 1,87 mm til 2,25 mm. Strukturen vises tydelig i bilde av tverrsnittet fra lysmikroskopet, se Figur 7.3. Det vises også tydelig at materialet ikke er homogent.

Kapittel 8

Resultat og analyse

8.1 Strekkfasthet

De første prøvene som ble testet på bygglaboratoriet var strekkprøver for å fastsette strekkfastheten og E-modulen for materialet. Strekkprøvene er gjennomført i henhold til NS-EN ISO 527-5:2009, Plast, Bestemmelse av strekkegenskaper for ensrettede fiberforsterkede plastkompositter [8] og NS-EN ISO 527-1:2012, Plast, Bestemmelse av strekkegenskaper, Del 1: Generelle prinsipper [7].

Prøvelegemene ble lagd etter standarden som beskrevet i kapittel 5 om prøvelegemer. Strekkprøvene fikk en gjennomsnittlig strekkfasthet på 1010 MPa og gjennomsnittlig E-modul på 33,5 GPa med bruk av tverrsnitt med teoretisk tykkelse på 1,795 mm. Resultatene fra strekkprøvingen listes opp i Tabell 8.1.

Tabell 8.1: Strekkfasthet

Prøve	$t_{\text{teoretisk}}$	$t_{\text{målt}}$	b	l	σ [MPa]	E [GPa]	ϕ_f
1	1,795	2,12	15,05	150	1126,7	34	0.5530
2	1,795	1,92	15,14	150	866,4	29,6	0.5394
3	1,795	2,12	14,98	150	1055,9	34,7	0.5288
4	1,795	2,25	14,76	150	991,1	35,7	0.5064
Gj. snitt					1010	33,5	

Parametrene $t_{\text{teoretisk}}$, $t_{\text{målt}}$, b , og l er i mm

Det kan diskuteres om prøve 2 er en gyldig prøve eller ikke. Prøven er vist i Figur 8.1 og har en tendens til å ha glidd ved $\sigma = 750$ MPa og $\sigma = 850$ MPa. Dersom dette ikke hadde skjedd ville sannsynligvis spenning ved brudd vært noe høyere. Med å se på alle fire prøvene i sammenheng er det denne prøven som har minst spenning ved brudd. Dette tilsier at prøven kan ha en noe høyere strekkfasthet enn målt, dersom

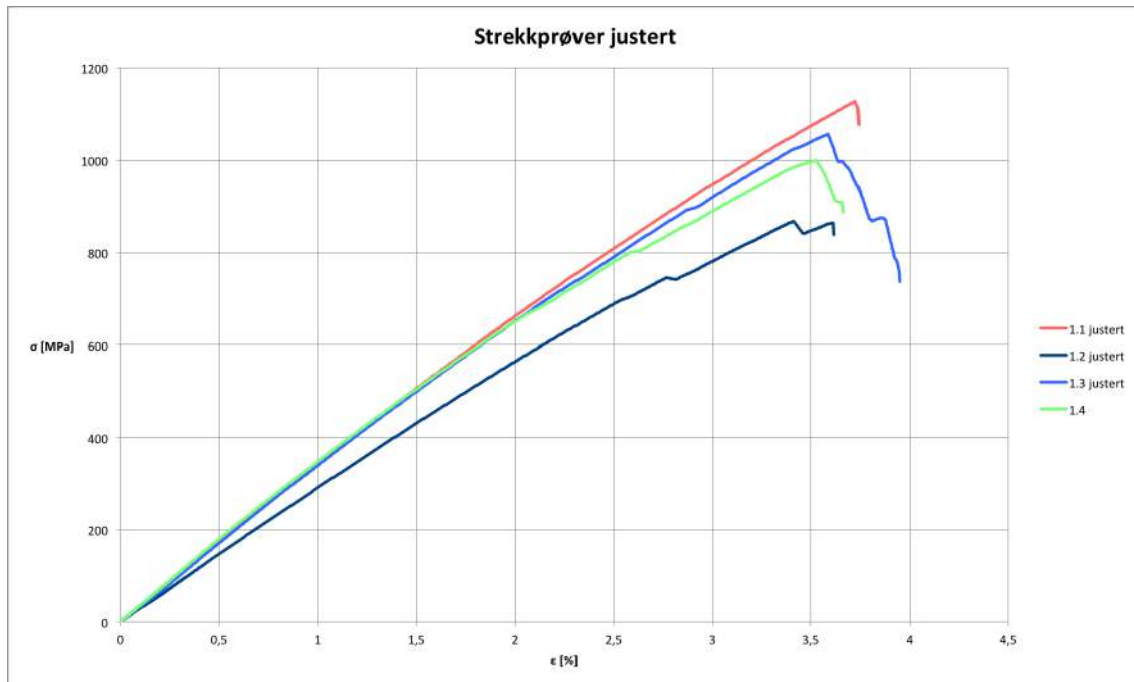
den ikke hadde sklidd. Prøven ligger ca. 25 % lavere i strekkfasthet enn de resterende prøvene og har en E-modul som er 20 % lavere. Hvis denne prøven ikke tas med er det en gjennomsnittlig strekkfasthet på $\sigma = 1057,9$ MPa og en gjennomsnittlig E-modul på 34,8 GPa.



Figur 8.1: Spennings-tøyningsdiagram, strekkprøver

Som det fremgår av Figur 8.1 foregår det en ikke-lineær tøying helt i starten av prøvene 1, 2 og 3. Dette medførte at beregninger av E-modul ihht. til standarden ISO527-5, ikke er riktig. Standarden sier at E-modul skal beregnes fra $\epsilon = 0,05$ % til 0,25 %. Det er isteden beregnet på E-modul fra $\epsilon = 0,25$ % til 0,5 %, da prøvene i dette området er lineære, og resultatene antas å være relativt pålitelige. I ettertid ble det funnet ut hvorfor prøvene har oppført seg slik de har gjort. Grunnen var at kontramutteren på den nederste bakken i strekkprøvemaskinen hadde løsnet. Dette ble fikset, og resten av prøvene i oppgaven har ikke denne usikkerheten.

Prøve 4 i Figur 8.1 er den siste strekkprøven som ble foretatt og den første prøven som ble gjennomført etter problemet med løs kontramutter ble fikset. I Figur 8.2 er prøvene 1, 2 og 3 justert for den ekstra forskyvningen forårsaket av den løse kontramutteren.



Figur 8.2: Spennings-tøyningsdiagram, strekkprøver justert

Det går tydelig frem at prøve 1, 3 og 4 oppfører seg relativt likt i forhold til prøve 2. Dette forsterker at denne kan utelates. Det er bestemt fiberinnhold på prøvene og resultatet av dette vises i Tabell 8.3. Prøven med minst fiberinnhold er prøve 4 og prøven med størst fiberinnhold er prøve 1. I Figur 8.2 vises det at prøve 1 den som har høyest styrke, mens prøve 4 er den av de tre nevnte tidligere i avsnittet som har lavest styrke. Dersom prøvene hadde hatt likt fiberinnhold ville de sannsynligvis vært mer like.

8.2 Stress rupture

Oppgaven går ut på å sammenligne statisk og dynamisk utmatting. Det er derfor utarbeidet data på statisk utmatting, her kalt stress rupture. DNVs ligning for å beregne gjenværende statisk styrke etter belastning over tid er vist i kapittel 3.3.2 og gjentas her i ligning 3.7. I stedet for å bruke spenninger er det i oppgaven brukt tøying og ligningen som er brukt for stress rupture er vist i ligning 8.1.

$$\log(\sigma) = \log(\sigma_{0 \text{ stress rupture}}) - \beta \log(t) \quad (3.7)$$

$$\log(\epsilon) = \log(\epsilon_{0 \text{ fatigue}}) - \beta \log(t) \quad (8.1)$$

8.2.1 Stress rupture basert på målt tøyning

I Tabell 8.2 er dataene med målte tøyninger fra stress rupture testene presentert skjematisk.

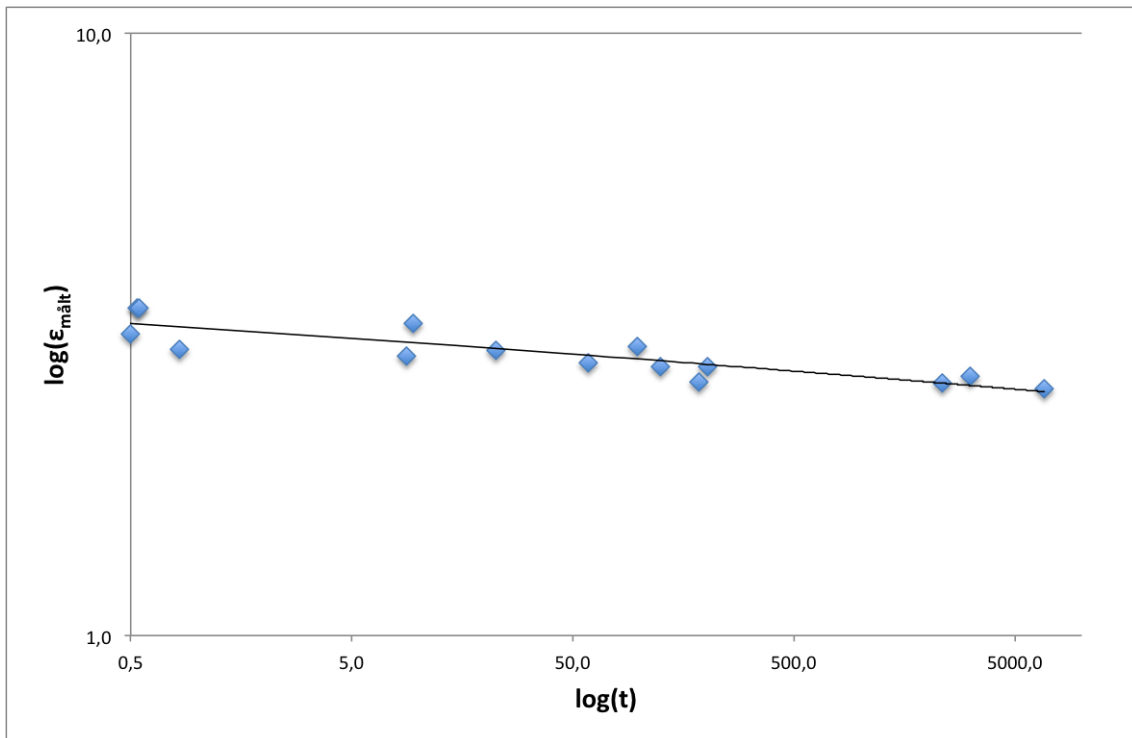
Tabell 8.2: Stress rupture data, målt tøyning

Nr.	N	t [min]	$\epsilon_{\text{målt}}$	σ [MPa]	$\log(\sigma)$	$\log(t)$	$\log(\epsilon_{\text{målt}})$
1	27189	0.5	3.5	1009.8	3.00	-0.27	0.54
2	21484	0.5	3.5	797.9	2.90	-0.26	0.54
3	22000	9.4	3.3	817.1	2.91	0.97	0.52
4	22000	0.5	3.2	817.1	2.91	-0.30	0.50
5	21000	0.8	3.0	779.9	2.89	-0.08	0.48
6	20000	22.5	3.0	742.8	2.87	1.35	0.47
7	20000	3116.0	2.7	742.8	2.87	3.49	0.43
8	19000	124.3	2.8	705.7	2.85	2.09	0.45
9	18500	2340.5	2.6	687.1	2.84	3.37	0.42
10	18500	6798.0	2.6	687.1	2.84	3.83	0.41
11	18001	97.3	3.0	668.6	2.83	1.99	0.48
12	18500	186.0	2.6	687.1	2.84	2.27	0.42
13	20000	8.8	2.9	742.8	2.87	0.94	0.46
14	19000	58,9	2.8	705,7	2.85	1.77	0.45
15	19000	204	2.8	705,7	2.85	2.31	0.45

Prøvegeometri finnes i Appendix B

I Figur 8.3 er dataene presentert logaritmisk med en regresjonslinje som viser helningen. Som det fremgår av resultatene fra de målte verdiene passer regresjonslinjen relativt bra med dataene. Stigningstallet til dataene er utregnet og det er tatt utgangspunkt i stigningstall mellom to punkter i grafen som ser ut til å stemme bra med regresjonslinjen. Det er valgt følgende fra Tabell 8.2: Prøve nr. 4 og 9. Stigningstallet mellom $\log(\epsilon)$ og $\log(t)$ er regnet ut som vist i ligning 8.2. Dette blir et visuelt estimat og en mer nøyaktig metode er lineær regresjon. Lineær regresjon for stress rupture er utført i underkapittel 8.2.3.

$$\beta = \frac{\Delta \log(\epsilon_{\text{målt}})}{\Delta \log(t)} = \frac{0,42 - 0,50}{3,37 - (-0,30)} = -0,022 \quad (8.2)$$



Figur 8.3: Stress ruptur kurve målt

8.2.2 Stress ruptur basert på estimert tøyning

Dataene i Tabell 8.3, vist nedenfor, inneholder det samme som Tabell 8.2, men her er tøyningen basert på estimert E-modul. Estimert E-modul er regnet ut bakgrunn av undersøkt fiberinnhold i prøvene, mengde fiber i 0° og antagelse om strekkfasthet i fiberen på 72GPa. I de etterfølgende ligninger vises beregning av henholdsvis estimert E-modul og tøyning.

$$E = E_f \cdot \phi_f \cdot \phi_{f,0^\circ} \quad (8.3)$$

der:

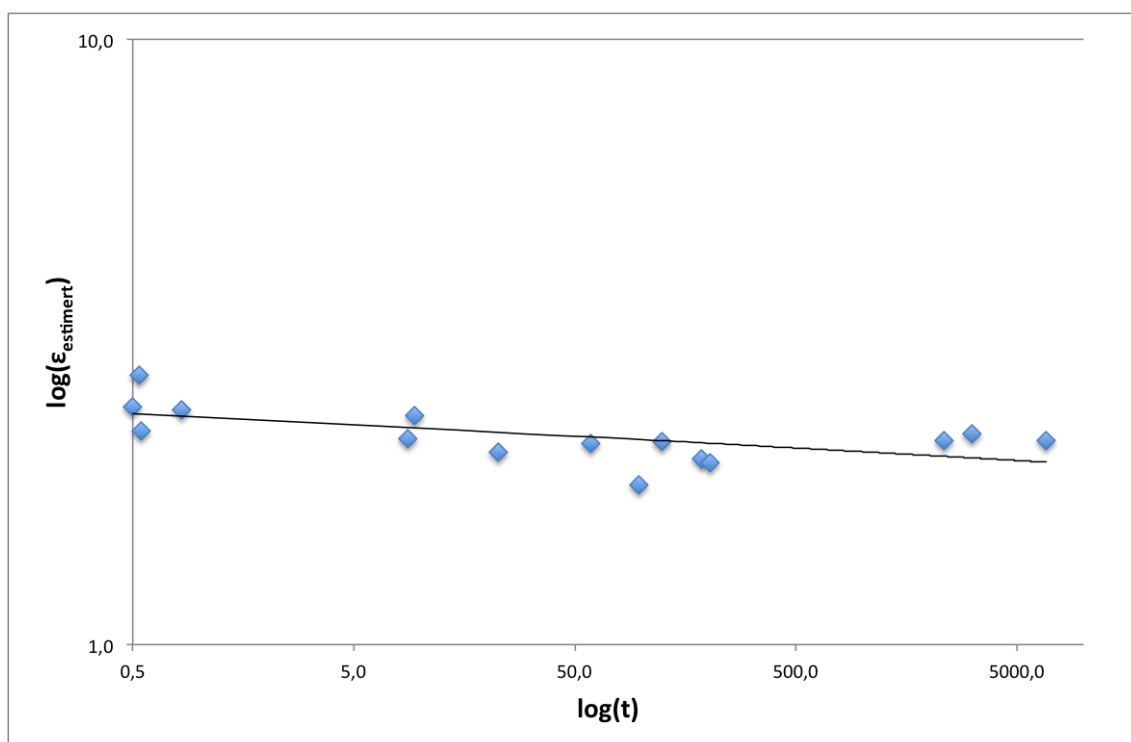
- E er estimert E-modul.
- E_f er fiberens strekkfasthet ihht. datablad = 72GPa
- ϕ_f er volumprosent fiber
- $\phi_{f,0^\circ}$ er volumprosent fiber i 0° lag = 0,889

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (8.4)$$

Tabell 8.3: Stress rupture data, estimert tøyning

Nr.	N	t [min]	ϕ_f	E [Gpa]	$\epsilon_{est.}$	$\log(t)$	$\log(\epsilon_{est.})$
1	27189	0.5	0.5822	37.3	2.7	-0.27	0.43
2	21484	0.5	0.5677	36.3	2.2	-0.26	0.34
3	22000	9.4	0.5307	34,0	2.4	0.97	0.38
4	22000	0.5	0.5140	32.9	2.5	-0.30	0.40
5	21000	0.8	0.5192	33.2	2.3	-0.08	0.37
6	20000	22.5	0.5631	36.0	2.1	1.35	0.31
7	20000	3116.0	0.5259	33.7	2.2	3.49	0.34
8	19000	124.3	0.5088	32.6	2.2	2.09	0.34
9	18500	2340.5	0.4948	31.7	2.2	3.37	0.34
10	18500	6798.0	0.4946	31.7	2.2	3.83	0.34
11	18001	97.3	0.5704	36,5	1.8	1.99	0.26
12	18500	186.0	0.5301	33,93	2.0	2.27	0.31
13	20000	8.8	0.5300	33,92	2.2	0.94	0.34
14	19000	58,9	0.5133	32,86	2.1	1.77	0.33
15	19000	204	0.5525	35,36	2.0	2.31	0.30

Prøvegeometri finnes i Appendix B



Figur 8.4: Stress rupture kurve estimert

Dataene er fremstilt med estimert tøyning for å se om avvik kunne begrunnes ved å korrelere tøyningen med prøvenes fiberinnhold. Ut fra grafen i Figur 8.4 ser det ut til at det er større avvik med bruk av estimerte tøyninger enn de målte. Når en estimerer tøyningene basert på fibervolum, korreleres resultatene for en feilkilde, og det er naturlig å tenke at avvikene skulle blitt redusert. Prøveresultatene fra testingen i fiberinnhold varierer mye, noe som kan bidra til at tallene ikke gir så gode estimater som tenkt. I tillegg er det kun én feilkilde som neglisjeres, og det kan være andre faktorer som bidrar til spredning. Dersom en kunne korrelere for alle feilkilder, ville det muligens blitt et bedre estimat.

Platene er produsert i produksjonshallen hos NORSAFE og dette er gjort manuelt. Prøvestykkene er kuttet, slipt og pålimt tabs på laboratoriet på UiA. Her inngår det flere feilkilder som kan føre til avvik. Fiberens retning og krumning spiller stor rolle på styrken og om ikke alle fiberene ligger helt rett vil dette bidra til variasjon.

Stigningstallet β for de estimerte dataene er regnet ut i ligning 8.5. Dataene som er valgt for å regne ut stigningstallet er fra prøvene som ser ut til å passe best til regresjonslinjen, prøve nr. 5 og 8. Stigningstallet er følgende:

$$\beta = \frac{\Delta \log(\epsilon_{\text{est}})}{\Delta \log(t)} = \frac{0,34 - 0,39}{2,09 - (-0,08)} = -0,023 \quad (8.5)$$

8.2.3 Lineær regresjon av stress rupture

Ved å utføre en lineær regresjon på dataene får en et bedre estimat på stigningstallet til regresjonskurven. Det er utført lineær regresjon for begge datasettene, både med målte og estimerte tøyninger.

Tabell 8.4: Lineær regresjon av målte verdier, stress rupture

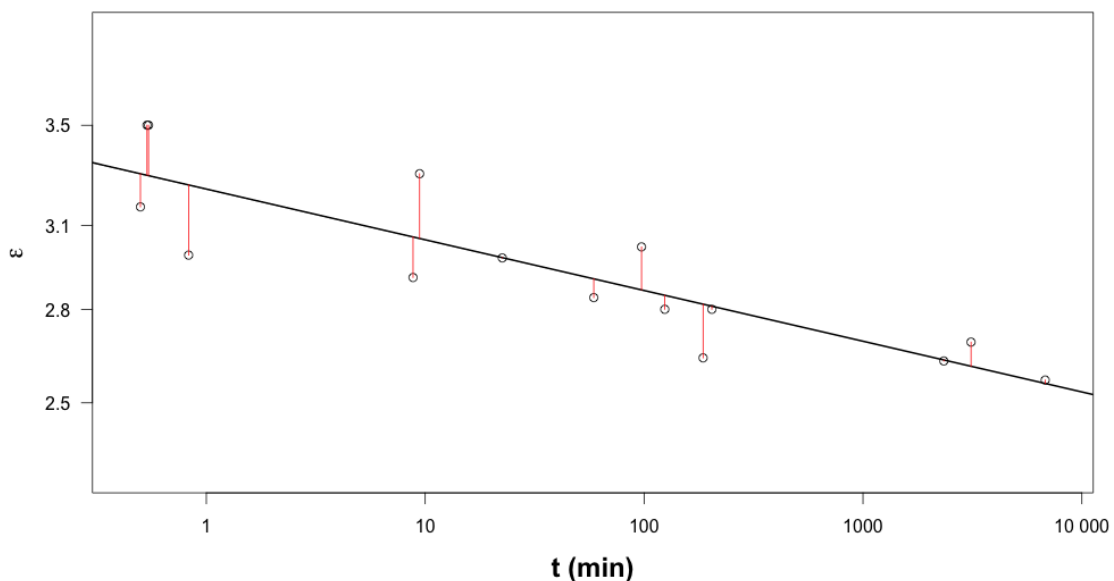
Parameter	Estimat	Standardavvik
$\hat{\alpha}$	0.510518	0.008714
$\hat{\beta}$	-0.026712	0.004215
R^2	0.7555	

I Tabell 8.4 er resultatet fra lineær regresjonen til datasettet med målte tøyninger presentert og i Figur 8.5 er regresjonen presentert grafisk. $\hat{\beta}$ representerer estimatet på helningen på regresjonskurven og $\hat{\alpha}$ representerer estimatet til “skjæring med y-aksen”, altså $\log(\epsilon)$. Omregnet til ϵ er starten på kurven $10^{0,510518} = 3,24\%$.

Ved bruk av lineær regresjon uten å ta hensyn til standardavvik, vil stress rupture kurven være, som vist i ligning 8.6, basert på ligning 8.1 nevnt tidligere i kapittelet. Standardavviket til tøyningen er 0,008714 og standardavviket til helningen er 0,004215. Desto nærmere 1 verdien R^2 er, desto mer sannsynlig er regresjonen. Verdien R^2 er 0,7555, og sier at regresjonslinjen passer godt til datasettet.

$$\log(\epsilon) = \log(\epsilon_{0 \text{ fatigue}}) - \beta \log(t) \quad (8.1)$$

$$\log(\epsilon) = \log(3,24) - 0,0267 \log(t) \quad (8.6)$$



Figur 8.5: Lineær regresjon av målte data, stress rupture

Kurve for stress rupture brukt videre i oppgaven er vist i ligning 8.7. Her brukes stigningstallet fra lineær regresjonen og $\epsilon_{0 \text{ fatigue}} = 3,5$ som er tøyningen fra strekkprøvingen, altså ved $t = 0$. Det er valgt å bruke tøyningen fra den siste strekkprøven, da de tre første ble utført med løs kontramutter i den nederste bakken, og det ikke er helt kontroll på faktisk tøyning.

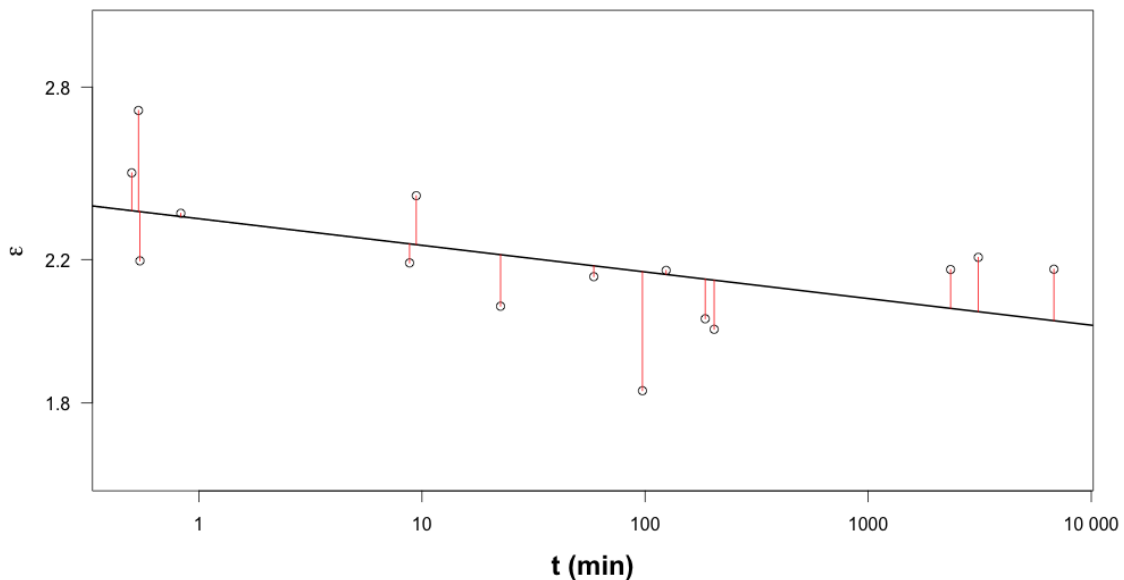
$$\log(\epsilon) = \log(3,5) - 0,0267 \log(t) \quad (8.7)$$

I Tabell 8.5 er lineær regresjonen fra de estimerte tøyningene presentert skjematisk og i Figur 8.6 er regresjonen presentert grafisk. Regresjonskurven basert på lineær regresjon av de estimerte tøyningene er presentert i ligning 8.8. Regresjonskurvens start er $10^{0,367293} = 2,34$. Standardavviket til tøyningen er 0,014110 og standardavviket til helningen er 0,006825. Verdien R^2 er 0,302. Dette sier at regresjonen ikke er like bra som for målte verdier. I Figur 8.6 vises avvikene, og det er tydelig at regresjonslinjen ikke passer like godt som for målte tøyninger i Figur 8.5.

$$\log(\epsilon) = \log(2,34) - 0,01362 \log(t) \quad (8.8)$$

Tabell 8.5: Lineær regresjon av estimerte verdier, stress ruptur

Parameter	Estimat	Standardavvik
$\hat{\alpha}$	0.367293	0.014110
$\hat{\beta}$	-0.016186	0.006825
R^2	0.302	

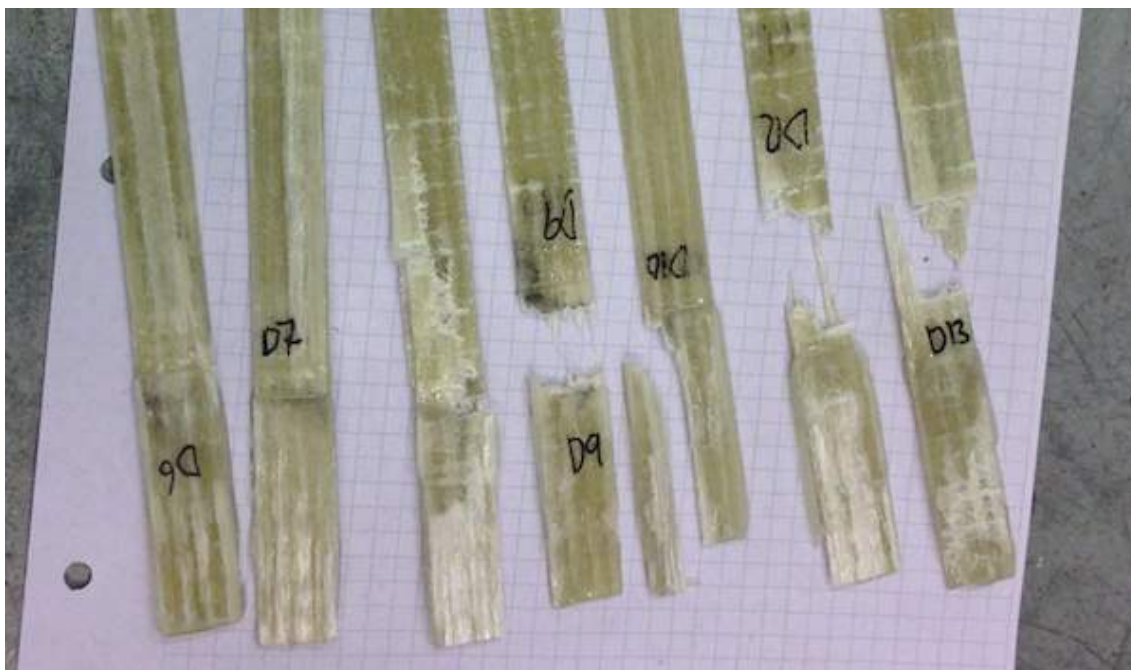


Figur 8.6: Lineær regresjon av estimerte data, stress ruptur

8.3 Utvikling av S-N kurve

For å se på sammenhengen mellom dynamisk og statisk utmatting er det utviklet en S-N kurve for materialet. Som nevnt i teorikapittelet blir S-N kurven for kompositter plottet med tøyninger istedenfor spenninger.

Bestemmelse av hvilke prøver som var gjeldende etter testing har vært en utfordring. Det opplevdes ofte at bruddet oppstod i området der tabsen er pålimt. De prøvene der dette skjedde, er utelatt fra resultatene, for eksempel de fire prøvene til høyre (prøve D9, D10, D12 og D13) på Figur 8.7. Dette er gjort for å ha prøver med mest mulig likt bruddbilde/forløp for å redusere feilkilder.



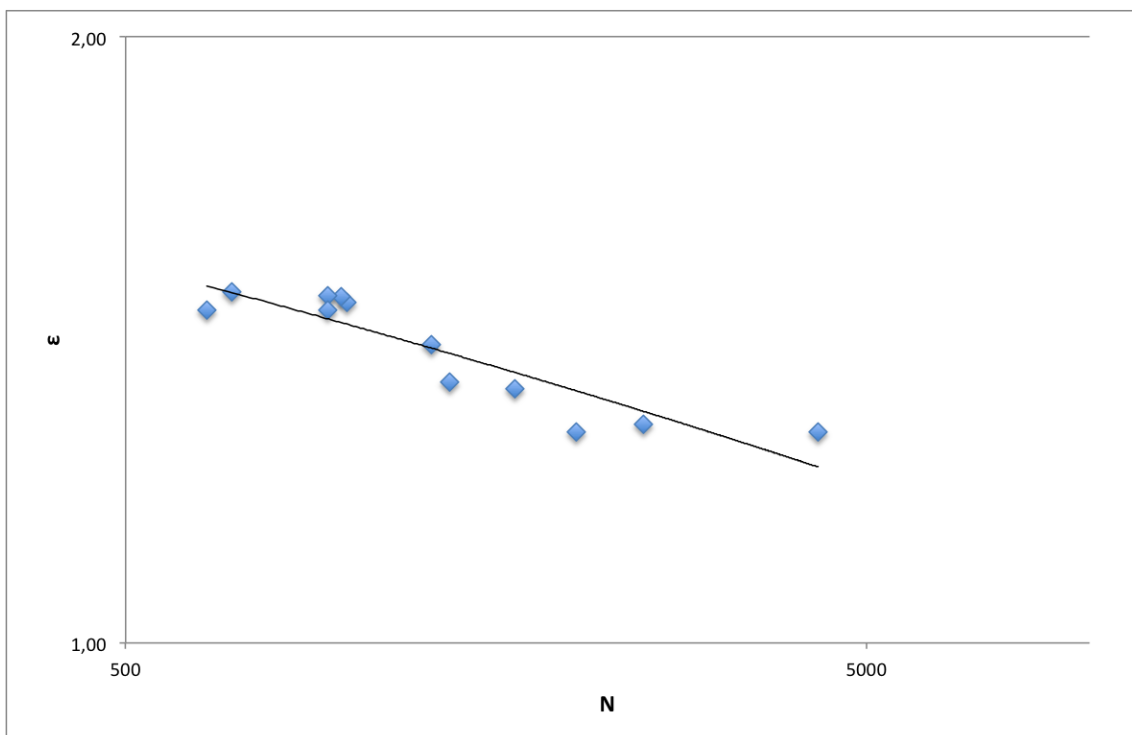
Figur 8.7: Prøver testet dynamisk

I Tabell 8.6 er dataene fra den dynamiske prøvingen presentert. I utgangspunktet skulle det brukes R -verdi = 0,1, som er R -verdien DNV bruker, men under prøvingen viste det seg at med så lav R -verdi, gikk prøven relativt fort i kompresjon grunnet forlengelse av prøvene. I de første syklene ble prøvene utvidet nok i lengderetning til at de gikk i kompresjon. Derfor ble det valgt å legge seg litt over $R=0,1$. Ut fra erfaring fra de fem første prøvene er det valgt en minste tøyning på 0,4 mm som gir en tøyning på 0,27 %. R -verdien ligger i området på 0,2 til 0,25. Prøveresultatene som er presentert er de med likt bruddforløp og er de data som er brukt for å regne ut S-N kurven.

Tabell 8.6: Data, dynamisk utmatting

Prøve	kN _{min}	kN _{max}	mm _{min}	mm _{max}	Ant. N	ϵ	log(N)	log(ϵ)
D6	2.88	11.50	0.4	1.9	4300	1.27	3.63	0.1047
D7	2.45	11.80	0.4	2	1678	1.33	3.22	0.1264
D8	2.94	11.40	0.5	2	1367	1.33	3.14	0.1296
D14	2.52	12.85	0.4	2.2	643	1.47	2.81	0.1652
D15	2.61	13.00	0.4	2.1	1292	1.40	3.11	0.1483
D16	2.35	12.60	0.4	2.2	994	1.47	3.00	0.1692
D18	2.80	12.90	0.4	2.2	977	1.47	2.99	0.1722
D19	2.80	13.30	0.4	2.2	695	1.47	2.84	0.1742
D20	2.89	13.80	0.4	2.2	937	1.47	2.97	0.1725
D21	2.45	12.30	0.4	2.2	937	1.47	2.97	0.1655
D25	2.74	11.20	0.4	1.9	2497	1.27	3.40	0.1088
D26	2.77	11.20	0.4	1.9	2027	1.27	3.31	0.1047

Prøvegeometri finnes i Appendix C



Figur 8.8: S-N Kurve

I Figur 8.8 er dataene fra den dynamiske testingen presentert logaritmisk. Regresjonslinjen viser at det er stor spredning på prøvene. Punktene som passer best på regresjonslinjen er fra prøve D15 og D19. Stigningstallet disse gir er regnet ut i ligning 8.9.

$$\alpha = \frac{\Delta \log(\epsilon)}{\Delta \log(N)} = \frac{0,1483 - 0,1742}{3,11 - 2,84} = -0,1 \quad (8.9)$$

8.3.1 Lineær regresjon av dynamisk utmatting

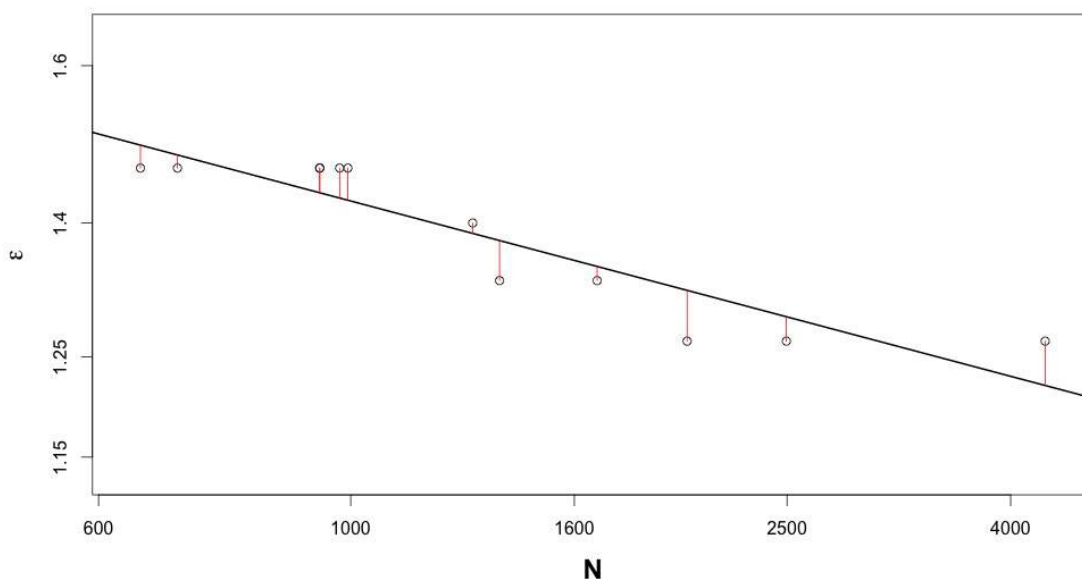
I Tabell 8.7 er resultatet fra lineær regresjonen fra datasettet med dynamisk utmatting presentert. $\hat{\beta}$ representerer estimatet på helningen på regresjonskurven og $\hat{\alpha}$ representerer estimatet til “skjæring med y-aksen”, altså $\log(\epsilon)$. Omregnet til ϵ er starten på kurven $10^{0,4758} = 2,99\%$. Ved bruk av lineær regresjon vil regresjonskurven for dynamisk utmatting være som presentert i ligning 8.11 basert på ligning 8.10 fra DNV [2]. Standardavviket til tøyningen er 0,048 og standardavviket på helningen er 0,015. Verdien R^2 er 0,8322, noe som sier at regresjonslinjen passer godt til datasettet.

$$\log(\epsilon) = \log(\epsilon_{0 \text{ fatigue}}) - \alpha \log(N) \quad (8.10)$$

$$\log(\epsilon) = \log(2,99) - 0,107 \log(N) \quad (8.11)$$

Tabell 8.7: Lineær regresjon , dynamisk utmatting

Parameter	Estimat	Standardavvik
$\hat{\alpha}$	0.47578	0.04755
$\hat{\beta}$	-0.10718	0.01522
R^2	0.8322	



Figur 8.9: Lineær regresjon, S-N Kurve

8.4 Endring av dynamisk regresjonskurve ved statisk utmatting

For å undersøke sammenhengen mellom statisk og dynamisk utmatting er det utført prøver som først er belastet statisk over en gitt tid, for deretter å teste de samme prøvene under dynamisk utmatting. Det ble bestemt at det skulle forsøkes å belaste prøvene under statisk belastning med Miners sum = 0,75.

Det har vist seg å være vanskelig å spesifisere nøyaktig Miners sum på bakgrunn av dataene. Det ble først prøvd å legge seg på et nivå utregnet med stress rupture kurven. Med en høy last gikk flere prøver i brudd relativt tidlig grunnet stor spredning.

Måten dette ble løst på var å se på dataene fra stress rupture og legge seg på et punkt som er nær brudd. Fra Tabell 8.2 er det en prøve som er belastet med 19kN med $t = 124,3$ minutter og tre prøver som er belastet med 18,5kN som har stått i henholdsvis 186, 2340 og 6798 minutter. Det er på bakgrunn av disse dataene valgt å legge seg på en last på 18,75kN i 100 minutter, for å være sikker på at prøvene ikke går i brudd og allikevel ligger nær bruddgrensen. De prøvene som gikk i brudd før 100 minutter var gått, er overført til stress rupture dataene.

Det har vært utfordrende å definere nøyaktig tøyingsnivå, og ut fra kurvene kunne prøver med valgt belastning gå i brudd fra i underkant av 100 til 6000 minutter.

I Tabell 8.8 og Tabell 8.9 er prøvedataene fra testingen presentert, med henholdsvis statisk belastning og dynamisk testing.

Tabell 8.8: Statisk belastning før dynamisk testing

Prøve	kN	t	ϵ	$\log(t)$	$\log(\epsilon)$	ϕ_f
SD1	18.75	100	2.40	2.000	0.380	0.53
SD2	18.75	100	2.36	2.000	0.373	0.51
SD3	18.75	100	2.44	2.000	0.387	0.54
SD4	18.75	100	2.46	2.000	0.391	0.53
SD5	18.75	100	2.68	2.000	0.427	0.53
SD6	18.75	100	2.62	2.000	0.418	0.50
SD7	18.75	100	2.50	2.000	0.397	0.53
SD8	18.75	100	2.57	2.000	0.410	0.54

Prøvegeometri finnes i Appendix D

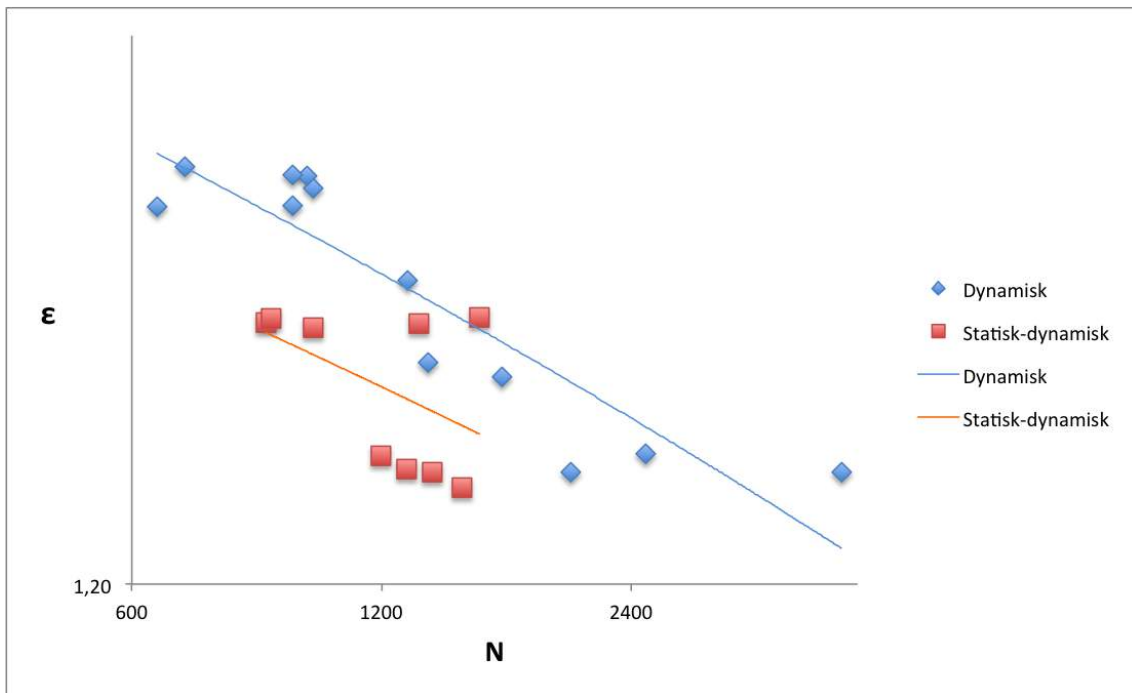
Tabell 8.9: Dynamisk testing etter statisk belastning

Prøve	kN _{min}	kN _{max}	mm _{min}	mm _{max}	ϵ	Ant. N	$\log(\epsilon)$	$\log(N)$
SD1	2.85	12.9	0.4	2.05	1.38	883	0.1397	2.9460
SD2	2.91	13.1	0.4	2.05	1.37	992	0.1377	2.9965
SD3	2.73	12.6	0.4	2.05	1.38	1330	0.1386	3.1239
SD4	2.77	12.3	0.4	2.05	1.38	1574	0.1400	3.1970
SD5	2.44	10.62	0.4	1.9	1.27	1286	0.1053	3.1092
SD6	2.62	10.96	0.4	1.9	1.28	1199	0.1085	3.0788
SD7	2.99	11.43	0.4	1.9	1.26	1500	0.1012	3.1761
SD8	2.56	10.85	0.4	1.9	1.27	1380	0.1047	3.1399

Prøvegeometri finnes i Appendix D

I Figur 8.10 er dataene fra dynamisk belastning og de prøvene som er belastet statisk først og deretter dynamisk presentert. Som det fremgår av figuren er det enda større spredning i resultatene fra der hvor prøvene er utsatt for statisk belastning først og deretter dynamisk belastning enn for kun dynamisk belastning. For å minske spredningen burde det vært utført et større antall tester.

Det var meningen å teste flere prøver, men ved slutten av testingen ble det noe feil med HPU'en (Hydraulic power unit) til den statiske strekkprøvemaskinen, noe som medførte at testingen måtte avsluttes.



Figur 8.10: Sammenligning av data, dynamisk mot statisk og dynamisk

Det er tydelig at prøvene som er utsatt for statisk belastning får en svekket kapasitet med tanke på dynamisk utmatting. Samtlige prøver bortsett fra én ligger under regresjonslinjen til prøvene som kun er belastet dynamisk. Det er også en punktsky som samler seg under nevnte kurve.

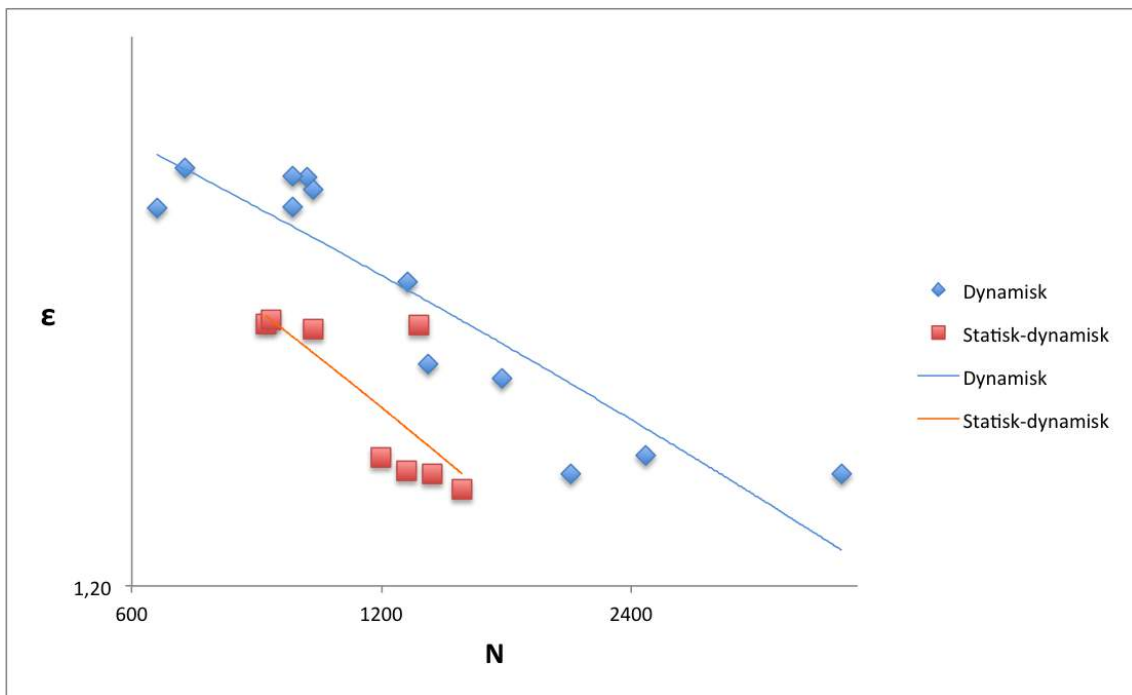
Glassfiber er et viskoelastisk materiale og med en permanent last over tid kan E-modulen bli redusert. Dette bidrar til at over tid vil materialet miste sin styrke og vil gå i brudd.

Det hadde vært interessant og testet prøvene som er belastet statisk for kun en syklus, altså en ren strekkprøve for å fastslå starten på kurven. Da ville det muligens blitt en brattere helning på den røde kurven enn den er nå. Slik kurven er nå, har den en mindre stigning enn prøvene som kun er belastet dynamisk. Da det kom til det punktet at disse prøvene skulle testes, var det ikke mulig å bruke strekkprøvemaskinen lenger.

Prøve SD4 med 1574 sykler har blitt utsatt for samme tøyning i utmatting som prøve SD1-SD3, allikevel har SD4 fått en mindre $\Delta\sigma$, noe som kan ses i Tabell 8.9. Fibervolumet er nesten det samme som de andre prøvene, men den har hatt en noe

mindre statisk belastning før den ble utsatt for dynamisk belastning. Med dette i betraktning har den antakeligvis vært utsatt for en mindre Miner sum, noe som kan forklare at den tålte så mange sykler under utmatting.

På Figur 8.11 er punktet med prøve SD4 utelatt fra grafen til prøvene som er belastet statisk først og deretter dynamisk. Dette gir tydelig en mye brattere helning enn kurven var i utgangspunktet, og en brattere helning enn kurven fra testene som kun er belastet dynamisk. Ut fra dette kan det tyde på at kompositter som er belastet statisk får en svekket kapasitet og en brattere helning på S-N kurven.



Figur 8.11: Sammenligning av data, dynamisk mot statisk og dynamisk, punkt SD4 utelatt

For å finne et estimat på starten av kurven er det estimert en tøyning av gjenværende kapasitet etter en statisk belastning i 100 minutter. Den estimerte tøyningen er regnet ut basert på stress rupture kurven som er bestemt tidligere. Ligningen for kurven gjentas i formel 8.7 og tøyningen er utregnet i ligning 8.12

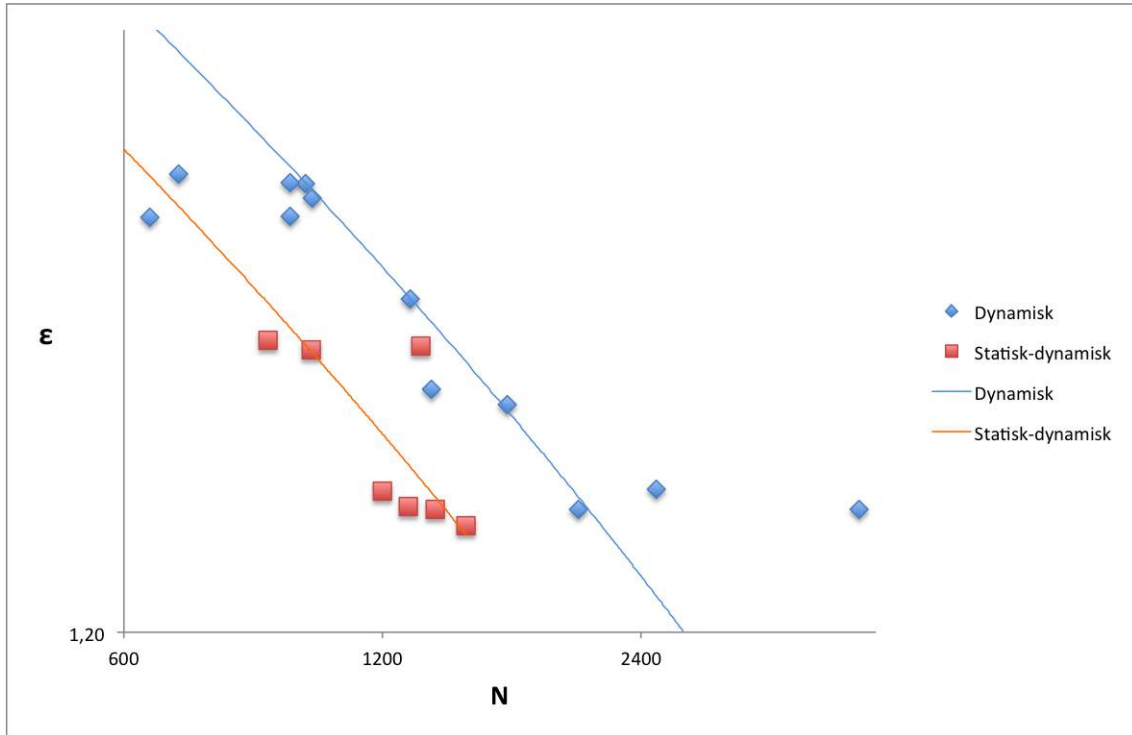
$$\log(\epsilon) = \log(3,5) - 0,0267\log(t) \quad (8.7)$$

$$\log(\epsilon) = \log(3,5) - 0,0267\log(100) \quad (8.12)$$

$$\epsilon = 3,095\%$$

I Figur 8.12 er dataene plottet logaritmisk med estimert kurvestart med $\epsilon = 3,095$ ved $N = 2$ og i Tabell 8.10 er dataene presentert skjematisk. Punktet SD4 er utelatt og det er

lagt inn $\epsilon = 3,5$ ved $N = 1$ for kurven fra datasettet med kun dynamisk belastning. Det kan se ut til at stigningstallet endres noe, men da er det kun et punkt i starten som er estimert og ingen punkter før $N = 600$. Dette gir ikke et godt estimat på hvordan kurven egentlig er, men det gir allikevel en tendens til at stigningstallet får en endring.



Figur 8.12: Sammenligning av data, dynamisk mot statisk og dynamisk, estimert kurvens start

Tabell 8.10: Data sammenligning regresjonskurver

Dynamisk				Statisk og dynamisk			
Ant. N	ϵ	log(N)	log(ϵ)	Ant. N	ϵ	log(N)	log(ϵ)
1	3.50	0	0.5441	2	3.10	0.3010	0.4907
4300	1.27	3.63	0.1047	883	1.38	2.9460	0.1397
1678	1.34	3.22	0.1264	992	1.37	2.9965	0.1377
1367	1.35	3.14	0.1296	1330	1.38	3.1239	0.1386
643	1.46	2.81	0.1652	1286	1.27	3.1092	0.1053
1292	1.41	3.11	0.1483	1199	1.28	3.0788	0.1085
994	1.48	3.00	0.1692	1500	1.26	3.1761	0.1012
977	1.49	2.99	0.1722	1380	1.27	3.1399	0.1047
695	1.49	2.84	0.1742				
937	1.49	2.97	0.1725				
937	1.46	2.97	0.1655				
2497	1.28	3.40	0.1088				
2027	1.27	3.31	0.1047				

Prøvegeometri finnes i Appendix C og D

Kapittel 9

Konklusjon

Det er i rapporten utarbeidet data og kurver for statisk og dynamisk utmatting. Oppgaven tar for seg sammenhengen mellom statisk og dynamisk utmatting rettet mot endring av regresjonskurven for dynamisk utmatting etter at komposittmaterialet er utsatt for ulike statiske utmattingslaster.

Fiberinnholdet til hver av prøvene er bestemt for å forsøke å begrunne avvik, men resultatene fra disse prøvene har hatt en stor variasjon. Dette har bidratt til at det å begrunne avvik har vært en utfordring.

Det første forskerspørsmålet er: “Endres den dynamiske regresjonskurven for ensrettede kompositter utsatt for ulike statiske utmattingslaster?”. Ut fra testresultatene er det tydelig at kapasiteten til prøvene er svekket etter statisk utmatting. Det er også en tendens til at regresjonskurven til prøvene som er utsatt for statisk belastning før dynamisk utmatting har fått en brattere helning, altså et større negativt stigningstall enn for prøvene som ikke er utsatt for statisk belastning. For å konkludere med at kurven faktisk blir brattere burde det vært testet et større antall prøver. Testing av kompositter er tidkrevende og det er ikke alle data som kan brukes da det er ønskelig med et likt bruddforløp for å sammenligne prøvene.

Det andre forskerspørsmålet er: “Hvis regresjonskurven endres, hva vil dette si for praktisk design i kommersielt bruk?”. Testresultatene er basert på et reelt materiale produsert med en industrialisert produksjonsmetode. Spredningen i resultatene er store og for praktisk design vil dette påvirke sikkerhetsfaktoren. Det bør tenkes på hvordan en kan designe og produsere materialet for å redusere spredning, hvilket vil påvirke sikkerhetsfaktoren. I praktisk bruk med høy påkjenning vil standardverk gi høy sikkerhetsfaktor grunnet store standardavvik. Sikkerhetsfaktoren påvirker vekten av materialet og for å være konkurransedyktig i forhold til konvensjonelle materialer i markedet er dette en viktig faktor. Vekten til kompositter er 1/4 til 1/5 av stålvekten og hvis sikkerhetsfaktoren blir høy er vektfordelen med kompositter borte.

9.1 Forslag til videre arbeid

Som forslag til videre arbeid anbefales det å teste et større antall prøver og se om avvikene kan reduseres. Det kan vurderes å bruke andre typer materialer/matter, noe som kan bidra til mindre avvik, eller bruke en annen produksjonsmetode. For å få et bedre grunnlag bør det også utføres flere tester per punkt. Det kan vurderes å bruke andre prøvemethoder, for eksempel teste trykktanker.

DNV skriver i DNV-OS-C501 at dynamisk styrke er uforandret etter statisk utmatting og at dette også gjelder for karbonfiber og aramidfiber. Derfor kan det være aktuelt å se på problemet for disse typer fiber. Det kan også testes i forskjellige miljø, for eksempel neddykket i fersk- eller saltvann.

Litteraturliste

- [1] Komposittforbundet. (2008). *Offshore standard - DNV-OS-501*. Tilgjengelig: <http://www.komposittforbundet.no/?CatID=1189>.
- [2] *Offshore Standard - Composite Components*, DNV-OS-C501, 2013.
- [3] D. Zenkert og M. Battley, *Foundations of fibre composites*. Stockholm: Kungliga Tekniska högskolan, 1996.
- [4] R. Talreja, *Fatigue of composite materials*. Lancaster: Technomic, 1987.
- [5] G. G. Løvås, *Statistikk for universiteter og høyskoler*, 3. utg. Oslo: Universitetsforlaget, 2013.
- [6] O. Dalland, *Metode og oppgaveskriving*, 5. utg. Oslo: Gyldendal Norsk Forlag AS, 2012.
- [7] *Plast - Bestemmelse av strekkeegenskaper - Del 1: Generelle prinsipper*, NS-EN ISO 527-1:2012, 2012.
- [8] *Plast - Bestemmelse av strekkeegenskaper - Del 5: Prøvingsbetingelser for ensrettede fiberforsterkede plastkompositter*, NS-EN ISO 527-5:2009, 2009.
- [9] *Glassfiberforsterket plast - Forhåndsimpregnater, støpemasser og laminater - Bestemmelse av glassfiber- og mineralfyllstoffinnhold - Kalsineringsmetoder*, NS-EN ISO 1172:1998, 1998.
- [10] *Textile glass – Mats (made from chopped or continuous strands) – Designation and basis for specifications*, ISO 2559:2011, 2011.
- [11] A. R. Bunsell og J. Renard, *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. Bristol, 2005.
- [12] *Fatigue design of offshore steel structures*, DNV-RP-C203, 2010.
- [13] P. K. Larsen, *Dimensjonering av stålkonstruksjoner*, 2. utg. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag, 2010.
- [14] Universitet i Agder. (2015). *Strekprøvelaboratoriet*. Tilgjengelig: <http://www.uia.no/om-uia/fakultet/fakultet-for-teknologi-og-realfag/laboratorier/strekproevelaboratoriet>.

- [15] Zwick. (2015). *Zwick Roell Product Information*. Tilgjengelig: [http://www.zwick.com/no_cache/en/products/static-materials-testing-machines/testing-machines-from-5-kn-to-250-kn/proline-testing-machine.html?tx_z7treedependingdownloads_pi1\[file\]=583](http://www.zwick.com/no_cache/en/products/static-materials-testing-machines/testing-machines-from-5-kn-to-250-kn/proline-testing-machine.html?tx_z7treedependingdownloads_pi1[file]=583).
- [16] V. Alvarez, et al., «Dynamic mechanical properties and interphase fiber/matrix evaluation of unidirectional glass fiber/epoxy composites», *Polymer Testing*, Vol. 22, s. 611–615, 2003.
- [17] P. Valentino, et. al., «Mechanical characterization of basalt fibre reinforced plastic with different fabric reinforcements–Tensile tests and FE-calculations with representative volume elements (RVEs)», presentert på Convegno IGF XXII, Roma, 2013.

Appendix

Appendix A	Resultat fiberinnhold	50
Appendix B	Stress Rupture, prøvegeometri	54
Appendix C	Dynamisk utmatting, prøvegeometri	55
Appendix D	Statisk og deretter dynamisk utmatting, prøvegeometri	56
Appendix E	Datablad 1, Vinylester AME6000INF	57
Appendix F	Datablad 2, Fibermatte Selcom UNIE1200M100	59

Appendix A

Resultat fiberinnhold

Tabell A.1: Fiberinnhold prøve S1-S11

Prøve	m_1	m_2	m_3	m_f	ϕ_f	Prøve	$\phi_{f,avg.}$
S1.1	59.7750	62.2619	61.6995	0.7739	0.5848	S1	0.5822
S1.2	67.0413	69.4082	68.8642	0.7702	0.5797		
S2.1	56.1932	58.1152	57.6555	0.7608	0.5670	S2	0.5677
S2.2	61.0066	63.0523	62.5654	0.7620	0.5685		
S3.1	60.2907	62.7344	62.0762	0.7307	0.5275	S3	0.5307
S3.2	65.9741	68.3389	67.7138	0.7357	0.5339		
S4.1	65.2903	67.3112	66.7399	0.7173	0.5108	S4	0.5140
S4.2	60.3765	62.7102	62.0622	0.7223	0.5171		
S5.1	59.6229	61.4969	61.0083	0.7393	0.5385	S5	0.5192
S5.2	59.3597	61.3483	60.7683	0.7083	0.4999		
S6.1	65.4959	67.6464	67.1110	0.7510	0.5539	S6	0.5631
S6.2	67.4704	69.5790	69.0830	0.7648	0.5723		
S7.1	65.5173	67.6770	67.0954	0.7307	0.5276	S7	0.5259
S7.2	68.1986	70.3086	69.7349	0.7281	0.5243		
S8.1	58.2236	60.0655	59.5408	0.7151	0.5082	S8	0.5088
S8.2	58.4236	60.2450	59.7280	0.7162	0.5094		
S9.1	60.7201	62.5452	61.9998	0.7012	0.4913	S9	0.4948
S9.2	62.6056	64.6407	64.0446	0.7071	0.4984		
S10.1	58.7404	60.5765	60.0290	0.7018	0.4921	S10	0.4946
S10.2	60.4496	62.6043	61.9708	0.7060	0.4971		
S11.1	66.2155	68.2220	67.7734	0.7764	0.5884	S11	0.5704
S11.2	59.5984	61.9047	61.3279	0.7499	0.5524		

Tabell A.2: Fiberinnhold prøve S12-S15

Prøve	m_1	m_2	m_3	m_f	ϕ_f	Prøve	$\phi_{f,avg.}$
S12.1	58.4251	60.4453	59.9190	0.7395	0.5388	S12	0.5301
S12.2	67.4719	69.4824	68.9312	0.7258	0.5215		
S13.1	65.4995	67.3183	66.8284	0.7306	0.5275	S13	0.5300
S13.2	66.2160	68.1087	67.6064	0.7346	0.5326		
S14.1	58.2231	60.1304	59.5834	0.7132	0.5058	S14	0.5133
S14.2	59.6995	61.6667	61.1262	0.7252	0.5207		
S15.1	58.9478	61.3102	60.7227	0.7513	0.5543	S15	0.5525
S15.2	61.0495	63.3944	62.8050	0.7486	0.5507		

Tabell A.3: Fiberinnhold prøve D6-D14

Prøve	m_1	m_2	m_3	m_f	ϕ_f	Prøve	$\phi_{f,avg.}$
D6.1	60.9696	63.0787	62.5648	0.7563	0.5609	D6	0.5564
D6.2	66.2166	68.3441	67.8113	0.7496	0.5519		
D7.1	58.7402	60.6674	60.2055	0.7603	0.5663	D7	0.5778
D7.2	65.4981	67.4494	67.0146	0.7772	0.5894		
D8.1	62.6055	64.4055	63.9465	0.7450	0.5460	D8	0.5460
D9.1	59.7804	61.7816	61.3210	0.7698	0.5792		
D9.2	60.4502	62.4285	61.9668	0.7666	0.5748	D9	0.5770
D10.1	60.5783	62.9180	62.3172	0.7432	0.5436		
D12.1	58.2244	60.2462	59.7640	0.7615	0.5679	D12	0.5636
D12.2	65.5176	67.5734	67.0701	0.7552	0.5594		
D13.1	68.1996	70.3162	69.8263	0.7685	0.5775	D13	0.5806
D13.2	58.9509	60.8076	60.3864	0.7731	0.5838		
D14.1	60.7211	62.4311	61.9808	0.7367	0.5352	D14	0.5151
D14.2	58.4249	60.3556	59.7846	0.7043	0.4950		

For prøvene D8 og D10 var det ikke mulig å ta ut mer enn en prøve

Tabell A.4: Fiberinnhold prøve D15-D26

Prøve	m_1	m_2	m_3	m_f	ϕ_f	Prøve	$\phi_{f,avg.}$
D15.1	59.7013	61.8460	61.3447	0.7663	0.5743	D15	0.5749
D15.2	65.2909	67.2947	66.8279	0.7670	0.5754		
D16.1	59.3598	61.1834	60.6723	0.7197	0.5138	D16	0.5195
D16.2	67.4726	69.5305	68.9724	0.7288	0.5252		
D17.1	68.1999	70.1578	69.6853	0.7587	0.5641	D17	0.5531
D17.2	60.5771	62.6252	62.0970	0.7421	0.5422		
D18.1	58.9485	60.6605	60.2900	0.7836	0.5984	D18	0.5680
D18.2	66.2172	68.2403	67.7114	0.7386	0.5376		
D19.1	62.6054	64.7288	64.2610	0.7797	0.5929	D19	0.5974
D19.2	59.7070	61.4975	61.1144	0.7860	0.6019		
D20.1	58.2244	60.3873	59.9096	0.7791	0.5922	D20	0.5900
D20.2	59.3590	61.5292	61.0432	0.7761	0.5879		
D21.1	60.4495	62.4676	61.8549	0.6964	0.4856	D21	0.5268
D21.2	59.7802	61.5640	61.1387	0.7616	0.5680		
D22.1	65.4980	67.5754	67.1250	0.7832	0.5979	D22	0.5999
D22.2	60.7204	62.7933	62.3499	0.7861	0.6020		
D23.1	65.2907	67.3362	66.8762	0.7751	0.5865	D23	0.5860
D23.2	59.6124	61.6504	61.1906	0.7744	0.5855		
D24.1	65.5176	67.4705	67.0352	0.7771	0.5893	D24	0.5930
D24.2	58.4241	60.3523	59.9326	0.7823	0.5967		
D25.1	58.7408	60.6263	60.2068	0.7775	0.5899	D25	0.5919
D25.2	67.4718	69.4629	69.0255	0.7803	0.5938		
D26.1	61.1133	63.0059	60.2068	0.7462	0.5476	D25	0.5615
D26.2	62.9912	64.6866	69.0255	0.7671	0.5755		

Tabell A.5: Fiberinnhold prøve SD1-SD8

Prøve	m_1	m_2	m_3	m_f	ϕ_f	Prøve	$\phi_{f,avg.}$
SD1.1	59.6099	61.4656	60.9697	0.7328	0.5302	SD1	0.5297
SD1.2	58.7393	60.4830	60.0156	0.7319	0.5292		
SD2.1	60.4486	62.4395	61.8156	0.6866	0.4742	SD2	0.4956
SD2.2	65.2895	67.2674	66.7181	0.7223	0.5170		
SD3.1	59.7784	61.9022	61.3323	0.7317	0.5288	SD3	0.5289
SD3.2	59.3585	61.2775	60.7628	0.7318	0.5290		
SD4.1	58.9479	60.9971	60.4343	0.7254	0.5208	SD4	0.5426
SD4.2	65.5169	67.5725	67.0769	0.7589	0.5644		
SD5.1	60.5777	62.3925	61.8719	0.7131	0.5057	SD5	0.5173
SD5.2	59.7013	61.5948	61.0868	0.7317	0.5289		
SD6.1	66.4870	68.4190	67.8851	0.7237	0.5187	SD6	0.5223
SD6.2	55.1637	56.8807	56.4159	0.7293	0.5258		
SD7.1	68.1995	70.1102	69.6103	0.7384	0.5374	SD7	0.5330
SD7.2	66.2171	68.1896	67.6599	0.7315	0.5285		
SD8.1	65.9783	67.8753	67.3049	0.6993	0.4891	SD8	0.4981
SD8.2	67.4720	69.3098	68.7846	0.7142	0.5071		

Appendix B

Stress Rupture, prøvegeometri

Tabell B.1: Prøvegeometri, stress rupture

Prøve	$t_{\text{målt}}$	b	l
1	1.97	14.60	149.0
2	2.05	14.60	149.0
3	2.03	15.10	149.0
4	1.93	14.47	148.0
5	2.11	14.41	148.8
6	2.08	14.85	149.0
7	2.04	14.72	148.2
8	1.99	15.02	149.2
9	2.11	15.02	149.2
10	2.06	14.66	148.2
11	2.02	14.97	148.5
12	2.07	14.89	148.8
13	2.11	14.49	148.0
14	1.93	14.85	148.5
15	1.99	14.98	148.6

Parametrene $t_{\text{målt}}$, b , og l er i mm

Appendix C

Dynamisk utmatting, prøvegeometri

Tabell C.1: Prøvegeometri, dynamisk utmatting

Prøve	$t_{\text{målt}}$	b	l
D1	1.87	15.05	148.7
D2	2.01	14.85	148.75
D3	2.11	15.12	149.2
D4	2.08	15.05	149.0
D5	2.03	14.46	148.6
D6	2.03	15.12	149.3
D7	1.94	15.12	149.5
D8	2.06	12.81	148.4
D9	1.93	15.08	149.5
D10	2.04	14.99	150.1
D11	2.04	15.14	149.1
D12	1.91	15.04	149.1
D13	2.05	14.98	148.5
D14	1.96	15.06	150.4
D15	2.06	15.11	149.3
D16	1.99	15.21	149.0
D17	2.06	14.75	150.0
D18	1.90	14.98	148.0
D19	2.03	15.03	147.3
D20	2.10	14.95	147.9
D21	1.86	14.94	150.3
D22	2.23	14.60	147.5
D23	1.97	15.04	148.9
D24	1.94	15.00	149.3
D25	1.89	14.78	147.9
D26	1.95	14.77	149.3

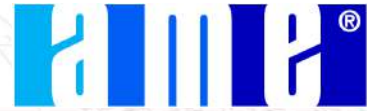
Appendix D

Statisk og deretter dynamisk utmatting, prøvegeometri

Tabell D.1: Prøvegeometri, prøver utsatt for statisk belastning før dynamisk utmatting

Prøve	$t_{\text{målt}}$	b	l
SD1	2.06	15.04	148.6
SD2	2.11	15.05	149.3
SD3	2.11	15.03	149.0
SD4	2.07	14.65	148.5
SD5	2.03	14.87	149.1
SD6	1.94	15.10	148.0
SD7	1.97	15.23	150.5
SD8	2.00	14.90	149.3

Parametrene $t_{\text{målt}}$, b , og l er i mm



AME® 6000 INF Premium Marine Resin / Infusion

AME 6000 INF premium marine resin is a preaccelerated, non-thixotropic epoxy vinyl ester based infusion resin. AME 6000 INF resin is used in construction of high performance marine composites offering;

- Superior laminate strength
- High heat resistance
- Good surface quality
- Excellent hydrolysis resistance

Typical liquid resin properties

Property at 23 C	Value	Unit	Method
Viscosity , Brookfield (5 rpm)	250	mPas	ISO 2555
Viscosity, Cone & Plate	250	mPas	ISO 2884
Styrene content	35	%	SFS 4864
Geltime (1,5%Norox MCP-75)	35	min	D006
Geltime (0,3%NLC-10+1,5%Norox MCP-75)	120	min	D006
(See Additional information)			

Typical cured resin properties

Property	Value	Unit	Method
Postcured for 2h at 60 C			
Tensile Strength	81	MPa	ASTM D-638
Tensile Modulus	3,5	GPa	ASTM D-638
Tensile Elongation	4,2	%	ASTM D-638
Flexural Strength	131	MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	3,7	GPa	ASTM D-790
Heat Deflection Temperature	79	C	ASTM D-648
Postcured for 2 hours at 138 C			
Tensile Strength	89	MPa	ASTM D-638
Tensile Modulus	3,7	GPa	ASTM D-638
Tensile Elongation	3,5	%	ASTM D-638
Flexural Strength	137	MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	3,8	GPa	ASTM D-790
Heat Deflection Temperature	124	C	ASTM D-648

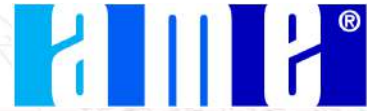
Application and use

AME 6000 INF resin is especially recommended for marine applications using the infusion process. AME 6000 INF is designed as a premium resin for high performance off-shore motor and sailing yachts, that remain in the water for an extended period of time.



Ashland is committed to continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.

© Registered trademark and ™ trademark of Ashland Inc.
* Registered service mark of the American Chemistry Council
© Ashland Inc. All rights reserved.



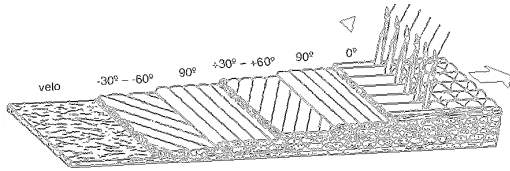
AME® 6000 INF Premium Marine Resin / Infusion

Certificates and approvals	AME 6000 INF premium marine resin complies with Lloyd's Register of Shipping rules for construction of small crafts.
Additional information	For more information on curing characteristics of AME 6000 INF infusion resin and adjustment of inhibitor (NLC-10) and peroxide (MCP-75) levels for optimal curing, please contact your Ashland representative.
Handling and storage	It is highly recommended that all material is stored at stable temperature under 20 C preferably indoors, and away from sunlight. Prolonged storage outside of recommended conditions can influence liquid resin properties like viscosity and gel time. It is also strongly recommended to mix resin thoroughly before use. Shelf life of AME 6000 INF is three (3) months.
Notice	<p>All information presented herein is believed to be accurate and reliable, and is offered solely for your consideration, investigation and verification. The information is not to be taken as an express or implied warranty or representation for which Ashland assumes legal responsibility. Any warranties, including warranties of merchantability or non-infringement of intellectual property rights of third parties, are herewith expressly excluded.</p> <p>Since the users product formulations, specific use applications and conditions of use are beyond the control of Ashland, Ashland makes no warranty or representation regarding the results which may be obtained by the user. It shall be the responsibility of the user to determine the suitability of any of the products mentioned for the users specific application.</p> <p>Ashland requests that the customer reads, understands and complies with the information contained herein and the current Material Safety Data Sheet.</p>
More information	<p>EUROPEAN HEADQUARTERS C/Numancia 185 8º 1a 08034 Barcelona SPAIN</p> <p>Phone: +34 93 206 51 20 Fax: +34 93 204 13 02</p>



Ashland is committed to continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.

© Registered trademark and ™ trademark of Ashland Inc.
* Registered service mark of the American Chemistry Council
© Ashland Inc. All rights reserved.



SELCOM

Multiaxial Technology

SELCOM SRL
 via della Torre n. 17
31010 FREGONA (TV) ITALY
 phone +39 0438 585166
 modem fax +39 0438 585172
 manual fax +39 0438 916049

cap. soc. EURO 101490,00
 cod. fisc. e p.i. IT 02369430265
 trib. Treviso n. 33642 reg. soc.
 c.c.i.a.a. Treviso n. 206094
 M. estero TV 028944
 E-mail: info@selcom-srl.com

MULTIAXIAL TECHNOLOGY (NCF)
*unidirectional & stitched multiaxial
 fabrics in glass, carbon, aramid... and
 hybrids for the composite industry*

internet: www.selcom-srl.com

Technical Data Sheet

PRODUCT NAME UNIE1200M100	Codice 01111001200
Unidirectional fabric 0° in "E" glass	

layers	angle	fiber	plan	tex	areal weight	areal weight		
	tolerance				gr/m ²	tolerance		
0°	-	Polyester yarn	L4	8,3	8	± 3 %		
0°	± 1°	E glass : PPG Roving 2002	L4	4800 - 2400	1200	± 3 %		
90°	± 1°	E glass : PPG Roving 2002	L4	300	50	± 3 %		
random	-	E glass : PPG Roving 7864	L4	2600	100	± 3 %		
TOTAL gr/m ²					-	-	1358	± 3 %

Characteristics for fabric

lunghezza rotolo - standard roll length:	mtl 50 ± 1 mtl
larghezza rotolo - standard roll width:	mm 1270 ± 10 mm
peso netto rotolo - net roll weight:	Kg. 86,5 ± 3 %
tolleranza sulla grammatura - areal weight tolerance:	± 3 % (± 41 gr/m ²)
grammatura teorica - theoretical areal weight:	gr/m ² 1358
identificazione rotolo - ident roll:	UNIE1200M100
tipo di legatura - knitting type:	tricot
filo di legatura - stitch yarn:	polyester, texturated, 8,3 tex

Characteristics for filament yarn

tipo fibra - type:	PPG Roving 2002
binder content :	0.55 - 0.65 % (nominal)
produttore - manufacturer:	PPG Industries
densità volumetrica - volumetric density:	gr/cm ³ 2.59 - 2.62
diamentro filamento - filament diameter:	µm 12 - µm 14 - µm 17 - µm 25
resistenza a trazione - tensile strength:	Mpa 1900 - 2400 (ASTM D-2343) *
modulo a trazione - tensile modulus:	Gpa 69 - 76 (ASTM D-2343) *
allungamento a rottura - elongation at break:	3.5 - 4 %

*Determined from resin impregnated rovings according to ASTM D-2343. These informations can be used for material selection purposes only.

Fregona li 18/01/13

Quality Assurance
 Ing. Giovanni Fardin

NB : THIS DOCUMENT IS COMPUTER GENERATED AND IT'S VALID WITHOUT SIGNATURE



TYPE APPROVED PRODUCT - CERTIFICATE NO. K-4015

Confidentiality Statement

The information, data, and charts embodied in this Technical Data Sheet (TDS) are strictly confidential and are supplied on the understanding that they will be held confidentially and not disclosed to third parties without the prior written consent of Selcom srl with registered office in 31010 Fregona (TV) ITALY - Via Della Torre no. 17 - For further info, please contact Selcom srl at info@selcom-srl.com or fax to no. +39 0438 58 51 72 / 91 60 49 SELCOM Srl is a weaver of technical textiles from continuous filaments (rovings). All information supplied by or on behalf of SELCOM Srl in relation to its products, whether in the nature of data, recommendations or otherwise, has been given in good faith and in compliance with technical and commercial information supplied by raw materials (fibre) manufacturers. All information aforementioned are supported by its own experience and believed reliable but SELCOM Srl declines all responsibility in respect of the application, processing or use of the aforementioned information or any consequence thereof. The buyer undertakes all liability in respect of the application, processing or use of the aforementioned information or product, whose quality and other properties he shall verify or any consequence thereof. SELCOM Srl believes that it is the user that shall determine the suitability of a product for its end-use and the user that assures all liability in connection therewith. M10-1-02.DOC Ed.01-Rev.00-12.05.10

