
Afstudeerproject;
Project DAPP

Scriptie

Bob Verdoes - 10102914

14 augustus, 2015

Het bepalen van het vermoeiingsgedrag op drie spanningsverhoudingen van glasvezel verstevigd APA6

14 augustus, 2015



Auteur:	Bob Verdoes
Student nr.:	10102914
Opleiding:	Werktuigbouwkunde
Project:	Het bepalen van het vermoeiingsgedrag op drie spanningsverhoudingen van glasvezel verstevigd APA6
Bedrijf:	Suzlon Blade Technology
Opdrachtgever:	Harald Bersee
Afstudeercoach:	Rudy van der Meulen
Plaats:	Delft
Datum:	14 augustus, 2015

Voorwoord

Dit rapport is tot stand gekomen als afsluitend werk op mijn afstudeerperiode. Gedurende het vierde jaar van de studie werktuigbouwkunde wordt iedere student geacht 17 weken extern aan een afstudeeropdracht te werken om zijn kennis en vaardigheden, opgedaan tijdens de studie, in het bedrijfsleven te bewijzen. Voor mijn afstudeerstage is een onderzoeksoopdracht uitgevoerd voor SE Blades Technology en project DAPP, Delft Aardwarmte Project Pilot, voor DASML, Delft Aerospace Structures and Materials Laboratory.

Gedurende de afstudeerstage heb ik onderzoek gedaan naar het vermoeiingsgedrag van een glasvezel – anionisch polyamide-6 composiet. SE Blades Technology en DASML zijn beide geïnteresseerd in de toepassingen van dit nieuwe composiet materiaal, maar op dit moment is er slechts weinig over bekend. Het onderzoek heeft zich van oriëntatie in de vermoeiingstesten en composieten, langs de productie van de coupons tot en met de daadwerkelijke testen en analyse van de resultaten gestrekt. De resultaten zijn uiteindelijk in de vorm van S-N curves en een Multislope Continuous Life Diagram weergegeven.

Dank gaat uit naar Harald Bersee voor de opdracht en Berjan den Hartog en Rudy van der Meulen voor de ondersteuning tijdens het afstuderen, evenals de technici van DASML voor ondersteuning bij gebruik van de faciliteiten.

Delft, 14 augustus 2015

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
Verklarende woordenlijst.....	4
Symbolenlijst	5
1. Inleiding	6
2. Literatuur studie	7
2.1 Vermoeiing	7
2.2 Analyse vermoeiingstesten	8
2.3 Glasvezel – APA6	10
2.4 Hypotheses.....	11
3. Proefstukken	12
3.1 Geometrie en naamgeving.....	12
3.2 Afmetingen proefstukken.....	12
3.3 Tabs	13
3.4 Productie van de proefstukken	13
4. Vermoeiingstesten	15
4.1 Machine en procedure	15
4.2 Testresultaten	16
4.3 Geanalyseerde data.....	18
4.4 Continuous Life Diagram	22
4.5 Conclusies	23
4.6 Aanbevelingen.....	24
Literatuur en links.....	26
Bijlage	28
I. Complete lijst met afmetingen specimen	29
II. C-Scan laminaat	30
III. Betrouwbaarheidsinterval.....	31
IV. Reflectierapport HHS.....	34
V. Bedrijfsbeoordeling	41
VI. Evaluatieformulieren HHS	43

Samenvatting

Gedurende de afstudeerstage zijn er door de student vermoeiingstesten gedaan op glasvezel-APA6 composiet. Allereerst zal er op hoofdlijnen de achterliggende theorie besproken worden welke gedurende de literatuurstudie geraadpleegd zijn. Vervolgens zijn de proefstukken beschreven van geometrie tot productie. Na de proefstukken zijn de vermoeiingstesten beschreven en zijn de enkele resultaten van deze testen opgesomd. Tot slot worden de conclusies en aanbevelingen van de onderzoeksopdracht vermeld.

In totaal zijn 21 testen uitgevoerd op 3 verschillende spanningsverhoudingen, namelijk trek-druk, trek-tek en druk-druk piekbelastingen. Per spanningsverhouding is de levensduur afhankelijk van de maximale spanning uitgezet in een zgn. SN-kromme. Tot slot zijn de SN-kromme van de drie spanningsverhoudingen samengevoegd, geëxtrapoleerd en als Continuous Life Diagram weergegeven.

Uit de resultaten blijkt het composiet vergelijkbare karakteristieken te vertonen met veel voorkomende composieten, zoals glasvezel-epoxy. Het glasvezel-APA6 composiet lijkt echter beter bestand tegen vermoeiing in het compressieregime, wat te verklaren is door de betere samenhang tussen de polyamide ketens. Daarnaast vertoont het composiet een hoge mate van vermindering in sterkte wanneer het aan trekbelasting wordt blootgesteld. Dit is te verklaren doordat het APA6 gevoelig is voor kerfwerking. Dit blijkt tevens de dominante vorm van falen te zijn wanneer proefstukken aan zowel trek- als drukbelastingen worden blootgesteld.

Verklarende woordenlijst

95/95-lijn	Zie <i>Betrouwbaarheidsinterval</i>
Adhesief	Lijm
APA6	Anionisch PolyAmide 6
ASTM	American Society for Testing and Materials
Basquin's Slope	Helling van de relatie tussen $\log(N)$ en $\log(S)$
Betrouwbaarheidsinterval	Interval waarin met 95% zekerheid gesteld kan worden, dat 95% van de resultaten valt
CLD	Continuous Life Diagram
Coupon	Tabloos proefstuk van APA6-glasvezel
DASML	Delft Aerospace Structures and Material Laboratory
Determinatiecoëfficiënt	R^2 waarde, verband tussen de verwachte- en gevonden resultaten
Ductiliteit	De mate waarin materiaal plastische vervormt
Gradiënt	Hellingshoek van de grafiek
Grips	Klemmen van de testmachine
G(F)RE	Glass (Fibre) Reinforced Epoxy
Hygroscoop	Water uit de lucht aantrekken
ISO	Internationale Organisatie voor Standaardisatie
Laminaat	Uit laagjes opgebouwd composiet
Nucleatie	Het ontstaan van defecten t.g.v. aangebrachte belasting
Polymeer	Keten bestaande uit herhaalde eenheden/monomeren
Rekstrookje	Meet 1 dimensionale rek op
R-ratio	De verhouding tussen de maximale en minimale spanning

Scatter	Variatie in meetresultaten
Sizing	Bescherm laag om (glas)vezels
S-N kromme	Grafiek van spanning (S) uitgezet tegen cycli tot bezwijken (N)
Spanningsamplitude	Verschil van de gemiddelde spanning tot de piekspanning
Spanningsverhouding	Zie <i>R-ratio</i>
Tabs	Interface tussen het uiteinde van een proefstuk en de grips van de testmachine
UCS	Ultimate Compression Strength, maximale drukspanning
UTS	Ultimate Tensile Strength, maximale trekspanning
Vermoeidheidsgrens	Maximale spanning waarbij een materiaal nooit bezwijkt

Symbolenlijst

Symbool:	Betekenis:	Eenheid:
wt%	Massaprocent	% _{m/m}
μm	Micrometer	10 ⁻⁶ m
N	Levensduur	Cycli
S	Spanning	MPa
b	Helling van Basquin	-
F	Kracht	N
σ	Spanning	MPa

1. Inleiding

Met het oog op duurzaamheid is de industrie op zoek naar sterker, lichter, goedkoper en milieuvriendelijker in ieder denkbaar opzicht. Zo ook in de gebruikte materialen, waar sinds de jaren '70 het gebruik composieten gestaag toeneemt. De opdrachtgever van de afstudeeropdracht is dan ook geïnteresseerd in de mogelijke toepasbaarheid van een glasvezel-APA6 composiet in windturbine bladen. Op dit moment is er nog maar weinig data bekend van dit composiet, en zeker betreft het vermoeiingsgedrag is hier nog geen onderzoek naar gedaan. Daar windturbinebladen een levensduur van ong. 20 tot 25 jaar staat te wachten, zal de levensduur waarbij de krachten elkaar afwisselen rond de 10^9 tot zelfs 10^{10} cycli uitkomen. Duidelijk mag zijn dat het vermoeiingsgedrag een zeer belangrijke parameter is bij het ontwerpen van windturbinebladen.

Omdat één test van vermoeiing bij 10^9 cycli bij de maximale frequentie van 10Hz ruim drie jaar kost, moet er een alternatief gevonden worden. Dankzij Basquin weten we dat er een log-log lineair verband zit tussen levensduur en aangebrachte spanning. Door de vermoeiingsdata op kortere levensduur te testen kunnen deze resultaten geëxtrapoleerd worden tot de hoogste levensduur. Om deze reden zijn de vermoeiingstesten voor dit afstudeeronderzoek uitgevoerd tussen de 64MPa en 290MPa, wat gelijk staat tot een levensduur van 2.000.000 resp. 3.157 cycli. Door zo veel mogelijk proefstukken te testen en de testen te spreiden over deze spanningsrange kunnen eventuele corrupte resultaten gevonden en verwijderd worden en kan de log-log lineaire regressielijn nauwkeurig worden bepaald. Met deze geëxtrapoleerde data kan vervolgens een Continuous Life Diagram worden opgesteld waaruit de levensduur als resultaat van zowel de gemiddelde spanning als de spannings amplitude af te lezen is.

Om deze testen uit te kunnen voeren en de resultaten te kunnen krijgen zijn proefstukken nodig waarop getest kan worden. Aan het begin van de afstudeerstage is een glasvezel-APA6 laminaat aangeleverd met een effectief formaat van 280x480mm. Hiervan zijn 24 coupons met glasvezel-epoxy tabs geproduceerd. Uiteindelijk heeft dit tot 21 vermoeiingstesten verspreid over de drie spanningsverhoudingen geleid. De testen zijn allemaal uitgevoerd op de 60kN Home Made fatigue bank van L&R faculteit aan de TU Delft.

2. Literatuur studie

2.1 Vermoeiing

Wanneer een constructeur een ontwerp berekend zal hij voornamelijk kijken naar de maximaal aanvaardbare krachten die de materialen aankunnen. Als ontwerpparameter kan het vermoeiingsgedrag van dit materiaal echter veel belangrijker zijn, en significant lager uitvallen. Hier kwam de August Wöhler halverwege de 19^{de} eeuw achter. De van oorsprong Duitse ingenieur onderzocht als eerste het fenomeen vermoeiing nadat verscheidene ongelukken op korte termijn de Duitse Spoorwegen plaagde. Hij concludeerde dat door wisselende belasting, defecten op lagere spanningen ontstaan vergeleken bij statische belasting. Om dit vermoeiingsgedrag vast te kunnen leggen, zette hij voor uiteenlopende staalsoorten de levensduur uit tegen de spanning in het materiaal. Deze grafieken staan tegenwoordig bekend als Wöhlerkrommen of SN-curve, waarbij SN voor Spanning, S, en voor de Levensduur, N, staan.

Vermoeiing staat bij veel mensen bekend als metaalmoeheid maar in de praktijk lijden bijna alle materialen onder vermoeiing. Hoewel enkele materialen (zoals hoge kwaliteit staal en titanium) een vermoeidheidsgrens kennen, zullen in theorie alle materialen bezwijken zolang er maar genoeg cycli doorlopen worden. Men spreekt dan over 5×10^8 tot 10^{10} cycli. Een aantal factoren welke zwaar meewegen aan de levensduur zijn:

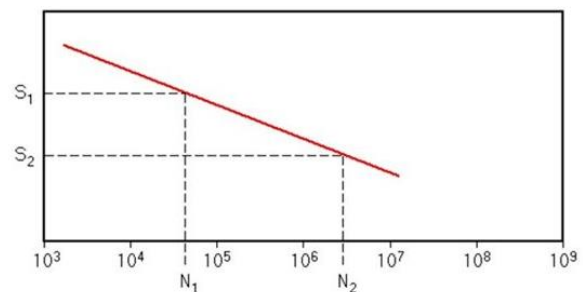
- | | |
|---------------------------|---|
| • Temperatuur | De omgevingstemperatuur beïnvloed de ductiliteit van materiaal. |
| • Gemiddelde spanning | Een hogere gemiddelde spanning zal tot een kortere levensduur leiden door versnelde kerfgroei |
| • Spanningsamplitude | Bij een hogere amplitude zal materiaal iedere cyclus meer vervormen waardoor defecten sneller groeien |
| • Omgevingsfactoren | Een zuur of bijtend milieu zal een negatieve invloed hebben op de levensduur door scheurgroei aan het oppervlakte te versnellen |
| • Oppervlakte behandeling | Kerven aan de oppervlakte werken als breukinitiator. Door het polijsten van de oppervlakte zal scheurgroei langer duren |
| • Spanningsconcentraties | Door slecht ingeleide krachten of kerven zal lokale spanning hoger uitkomen dan de gemiddelde spanning en voor plaatselijke plastische vervorming en/of scheuren zorgen |

Als een materiaal aan vermoeiing wordt blootgesteld, dan geldt dat schade lokaal, progressief en permanent is. Het begint met de *nucleatie* (formatie) van een plaatselijk defect. Dit kan bijvoorbeeld voortkomen uit een oppervlaktebeschadiging aan een vezel, het oppervlakte van het onderdeel, of imperfecties in de matrix. Dit defect zal vervolgens door middel van kerfwerking uitgroeien tot een scheur. De scheur zal in formaat blijven toenemen ten gevolge van de lokale spanningsconcentraties totdat het materiaal dusver verzwakt is en de lokale spanning groter zal zijn dan de maximale trek- of drukspanning, en zal het materiaal breken. Het is belangrijk aan te halen dat schade door vermoeiing permanent is; het laten rusten, of terugvormen in geval van vervorming, heeft geen positieve invloed op de levensduur.

2.2 Analyse vermoeiingstesten

SN-kromme

Om het vermoeiingsgedrag continue voor iedere levensduur dan wel spanning weer te geven, worden er per spanningsverhouding SN-kromme opgesteld. Hierin is de afhankelijke levensduur logaritmisch op de x-as aangegeven, en de onafhankelijke piekspanning logaritmisch op de y-as. Er wordt gekeken vanaf 10^3 cycli aangezien de data bij minder cycli verstoord wordt door significante plastische vervormingen [1].

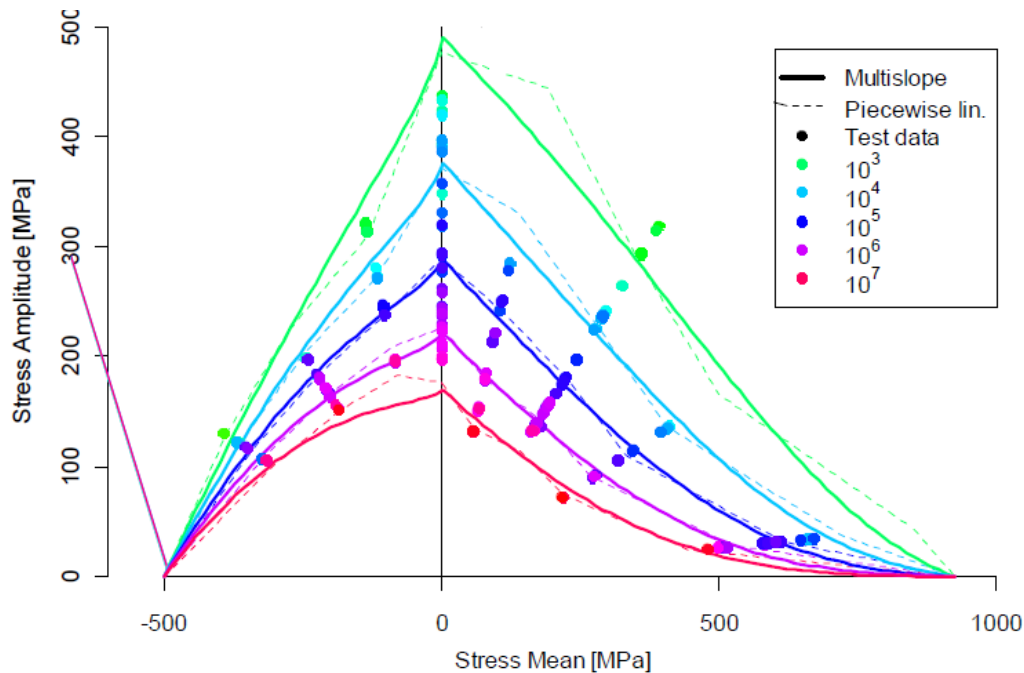


Figuur 1; Typische vorm van een SN-kromme (Bright Hub Engineering, 2011)

Per R-ratio (spanningsverhouding) is de relatie tussen levensduur en spanning is log-log lineair, wat inhoudt dat er een lineair verband bestaat tussen de $\log(N)$ en de $\log(S)$. De gradiënt van deze lijn staat bekend als 'Basquin's Slope', en heeft de formule $b = -((\log S_1 - \log S_2) / (\log N_2 - \log N_1))$, waarbij Basquin's Slope as b is uitgedrukt. [2]. De overige variabelen zijn spanning en levensduur, zoals grafisch weergegeven in Figuur 1. Door de gradiënt op méér dan twee testresultaten danwel datapunten te baseren zal deze nauwkeuriger bij de werkelijkheid komen te liggen. D.m.v. extrapolatie met Basquin's Slope is het mogelijk de levensduur buiten het meetgebied te achterhalen waardoor een levensduur van 10^9 te bepalen is. Het is mogelijk om voor iedere spanningsverhouding een SN-kromme op te stellen. Voor verdere verwerking worden deze samengevoegd in een Continuous Life Diagram (CLD).

Continuous Life-Diagram

Aangezien de toepassingsgebieden waarin composieten en andere materialen gebruikt worden vaak uit samengestelde belastingen bestaan, is het niet voldoende om slechts naar één spanningsverhouding te kijken. Door meerdere SN-krommen te combineren, wordt een CLD opgesteld. Bij het combineren wordt onderscheid gemaakt in de drie hoofdrichtingen van vermoeiingstesten; trek-trek, trek-druk en druk-druk testen. Deze worden aangegeven met R-ratio waarden, waarbij het aantal bepaald wordt door de volgende formule: $R = \frac{F_{max}}{F_{min}}$ of $R = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$.



Figuur II; Voorbeeld CLD-diagram (European Wind Energy Association, 2011)

De R0,1 staat voor trek-trek testen waarbij de maximale treksterkte tienvoudig is t.o.v. de minimale treksterkte. Bij R-1 zijn de trek en druksterkte aan elkaar gelijk zijn en ontstaat er een gemiddelde spanning van 0MPa. Tot slot de R10 waarbij de maximale drukkracht tienmaal de minimale drukkracht is. Naast de drie hoofdrichtingen zijn er meerdere secundaire verhoudingen welke voor uitgebreid onderzoek getest kunnen worden om een gedetailleerder inzicht in het vermoeiingsgedrag te creëren.

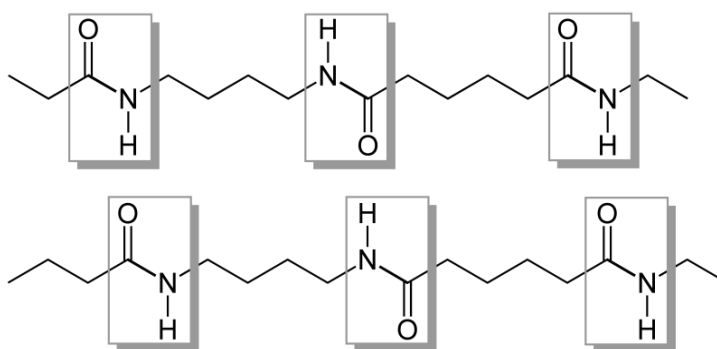
Voor alle drie de hoofdrichtingen worden aparte SN-kromme gemaakt, zoals in Figuur I weergegeven is. Vervolgens worden deze krommen samengevoegd in één grafiek; een Continuous Life Diagram. In figuur II is een voorbeeld van een dergelijk CLD gegeven, op basis van acht R-ratio's. Door de Basquin Slope van de SN- kromme te bepalen, zijn de spanningen bij bepaalde levensduur te berekenen. Deze worden in een CLD tegen elkaar uitgezet. R-1 wordt als verticale as gebruikt, aangezien de gemiddelde spanning per definitie op 0MPa uitkomt. R10 staat als linker diagonaal bij de drukspanning, en tot slot staat R0,1 als rechter diagonaal richting de trekspanning. Over het algemeen worden de spanningen berekend bij een levensduur van 10^3 , 10^4 ... 10^8 . De lijnen per levensduur beginnen standaard bij de statische druksterkte en eindigen bij de statische treksterkte.

2.3 Glasvezel – APA6

Dit afstudeerwerk is gericht op het vermoeiingsgedrag van een glasvezel-polyamide 6 composiet. Hoewel glasvezels sinds 1935 gepatenteerd zijn wordt het pas sinds kort samen met polyamide 6 als composiet gebruikt.

APA-6 staat voor anionisch polyamide 6. Polyamides krijgen hun naam door de aanwezigheid van meerdere amide

groepen per keten, schematisch weergegeven in Figuur III. Anionisch slaat op de manier waarop de polyamide uit caprolactam monomeren wordt opgebouwd. Door een anionisch monomeer toe te voegen zullen de ringvormige moleculen van caprolactam openen en zo ketens opbouwen.



Figuur III; Polyamide ketens met de amide-groepen uitgelicht (Jü, 2012)

Amide groepen vormen onderling waterstofbruggen waardoor de polyamide ketens sterk aan elkaar binden. Daarnaast vormt het polyamide naast de gebruikelijke mechanische binding tussen de polymeren en de glasvezels, ook een chemische binding met de sizing om de glasvezels. [3] Door deze chemische binding zal APA-6 als matrix beter tegen falen bestand zijn; het kan piekspanning veroorzaakt door kerfwerking beter overbrengen op de vezel en wanneer de vezel faalt zal de APA6 de scheurvorming trager laten groeien dan veelgebruikte matrixmaterialen zoals bijvoorbeeld epoxy.

Los van de mechanische eigenschappen is APA6 chemisch inert wat voor betere bescherming van de vezels zorgt. Ook zijn de kosten van APA6 gunstig t.o.v. vergelijkbare polymeren.

Aangezien het laminaat is geproduceerd d.m.v. vacuüminfusie, zullen er voids in voorkomen. Voids zijn minuscule gasbelletjes welke als leegte/defecten in de matrix werken. Bij goede ontgassing van het vloeibare APA6 voor het infuseren kunnen deze voids geminimaliseerd worden in het laminaat, maar complete uitsluiting is dusver nog niet gelukt. Voids werken als defecten welke door de cyclische belasting gemakkelijk kunnen uitgroeien tot scheuren. Tijdens het vacuüminfuseren moet hier aandachtig op worden gelet om de levensduur van het product niet significant te verlagen.

2.4 Hypotheses

Aan de hand van het gedane literatuuronderzoek kan er met enige zekerheid gesteld worden dat het vermoeiingsgedrag van glasvezel-APA6 composiet vermoeiingsgedrag zal vertonen wat vergelijkbaar is met standaard glasvezel-epoxy composiet. Er kunnen echter een aantal verschillen voorspeld worden:

- Er wordt gewerkt met geconditioneerd laminaat. K. van Rijswijk heeft aangetoond dat de statische eigenschappen van het composiet zullen afnemen en beduidend lager uitkomen dan GFRE. [4]
- Door chemische binding tussen het polymeer en de glasvezel, kan worden verwacht dat spanningsconcentraties door scheurgroei in het APA6 beter worden doorgegeven aan de vezel. Door deze vertraagde kerfwerking zal er een kleinere afname in spanning zijn bij langere levensduur t.o.v. standaard (niet chemisch bindende) hars zoals epoxy. Dit is in statische testen reeds aangetoond door K. van Rijswijk [5] en zal hetzelfde gedrag vertonen tijdens mechanische belasting.
- Afgeleid uit dezelfde redenering kan worden aangenomen dat wanneer een defect zich in de glasvezel voordoet, de omliggende vezels minder last hiervan ondervinden t.o.v. een standaard (niet chemisch bindende) hars zoals epoxy, doordat de APA6 de spanningsconcentraties beter kan weggeleiden.
- Bij trekbelasting zal er constant aan de defecten en/of voids getrokken blijven worden, deze zullen hierdoor blijven groeien, ook bij relatief lage spanningsniveaus. De verschillen tussen epoxy en het APA6 zijn echter lastig te voorspellen. [6]
- Bij drukbelasting is het de taak van de hars om de (glas)vezels bijeen te houden zodat deze de krachten kunnen weerstaan. Door de betere binding tussen het polymeer en de vezels zal het glasvezel-APA6 composiet mindere afname aan maximale spanning vertonen dan bijv. GFRE. [6]
- Door conditioneren zullen er watermoleculen tussen de amide groepen van het APA6 polymeer komen, waardoor het APA6 taaier wordt [7]. Dit zal tot gevolg hebben dat het APA6 een grotere plastische vervorming kan ondergaan voordat het zal breken. Dit zal uiteindelijk tot effect hebben dat kerfwerking in de hars pas op later moment tot een breuk zal leiden.

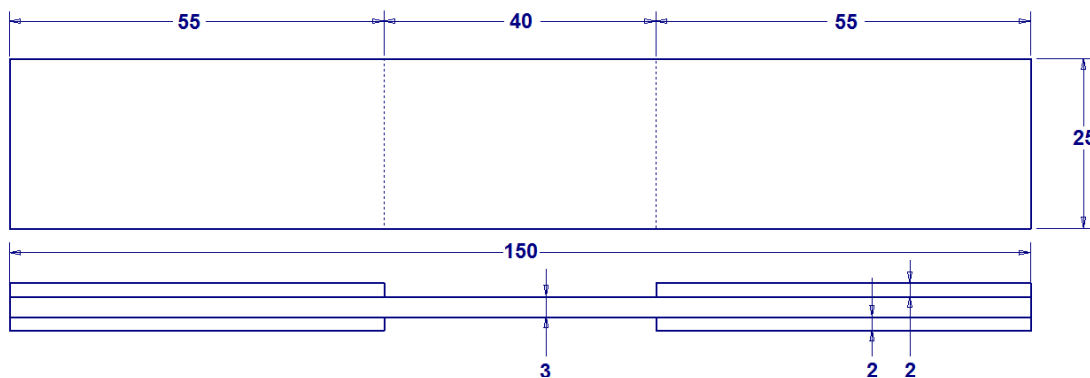
3. Proefstukken

Om vermoeingstesten uit te voeren zijn proefstukken nodig. Deze zijn geproduceerd uit één laminaat. Los van het materiaal is de geometrie van de proefstukken een belangrijke parameter voor de testen. In dit hoofdstuk zal de productiewijze en geometrie van de proefstukken beschreven worden. In bijlage II is een scan van het laminaat bijgevoegd. Hierin is allereerst het verschil in dikte over het laminaat zichtbaar, en indien er overwachte resultaten zich voordoen is het mogelijk om te kijken of er defecten op locatie zichtbaar zijn. Tot slot moet er aandacht besteed worden aan het conditioneren van de proefstukken. Deze procedure is beschreven in ASTM D5229 §4.4.

3.1 Geometrie en naamgeving

Om de resultaten van de drie verschillende testen inhoudelijk met elkaar te kunnen vergelijken is er gekozen om alle proefstukken dezelfde afmetingen te geven. Er is gekeken naar het OPTIMAT BLADES programma, welke vanaf 2002 vermoeingstesten op composieten uitvoert, om een geschikte geometrie te vinden. Uiteindelijk is gekozen voor de OPTIMAT R04, aangezien een grip lengte van 55mm afdoende is om de klemkrachten volledig over te brengen, zoals aangetoond door H.T. Knudsen et al [8]. De OPTIMAT R04 geometrie is in Figuur IV weergegeven. De volledige benaming voor de proefstukken luidt als volgt: GAV100-R0400-T01. Dit is opgebouwd uit de volgende onderdelen:

GAV	Materiaal en methode	Glasvezel, APA6, Vacuüminjectie
100	Type laminaat	0-90 plain weave
R04	Geometrie	Rechthoekig, zie onderstaand Figuur IV voor afmetingen
00	Snijhoek	0°
T01	Proefstuk ID	Teststuk 01 t/m 39



Figuur IV; OPTIMAT R04 geometrie

3.2 Afmetingen proefstukken

Alle proefstukken zijn uit één laminaat afkomstig en zijn d.m.v. waterstralen los gesneden. Er is voor waterstralen gekozen zodat er geen warmte wordt toegevoegd zoals bij zagen en er een hoge nauwkeurigheid op de breedte van alle proefstukken zit. Desalniettemin zit er een kleine variatie op de breedte van alle proefstukken. Hiervoor is in bijlage I een complete lijst met de afmetingen opgenomen. Uiteraard is geprobeerd zo dicht mogelijk bij de OPTIMAT R04 geometrie te blijven.

3.3 Tabs

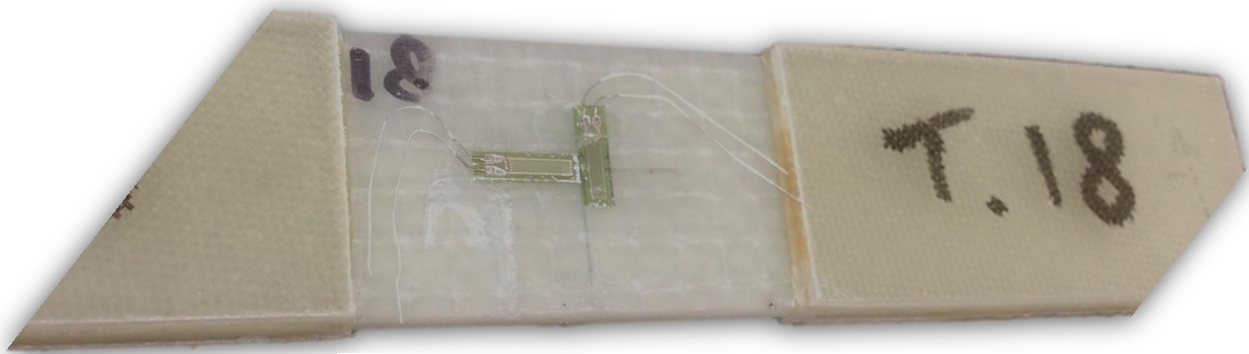
Om tijdens de testen geen last van slip tussen de bank en de proefstukken te krijgen, worden de proefstukken met grips ingeklemd. Om te voorkomen dat deze grips schade aan de proefstukken veroorzaken, worden tabs gebruikt als soft interface. Deze voorkomen oppervlakteschade aan de proefstukken en zorgen ervoor dat de klemkracht evenredig wordt verdeeld over de ingeklemde oppervlakte. Er is geen vastgestelde norm m.b.t. deze tabs; volgens de ASTM staat het vrij tabs te selecteren op basis van wat het beste lijkt te werken, zoals beschreven in ASTM D3479 §6.3. Ook de ISO normering geeft hierin geen uitsluitel. Vanwege vergelijkbare testen uitgevoerd bij DASML is er in eerste instantie voor gekozen deze tabs van 45/-45 GRE te vervaardigen, aangezien deze reeds waren aangetoond te werken bij eerdere statische testen.

De afmeting per tab zijn 55x25x2 mm.

3.4 Productie van de proefstukken

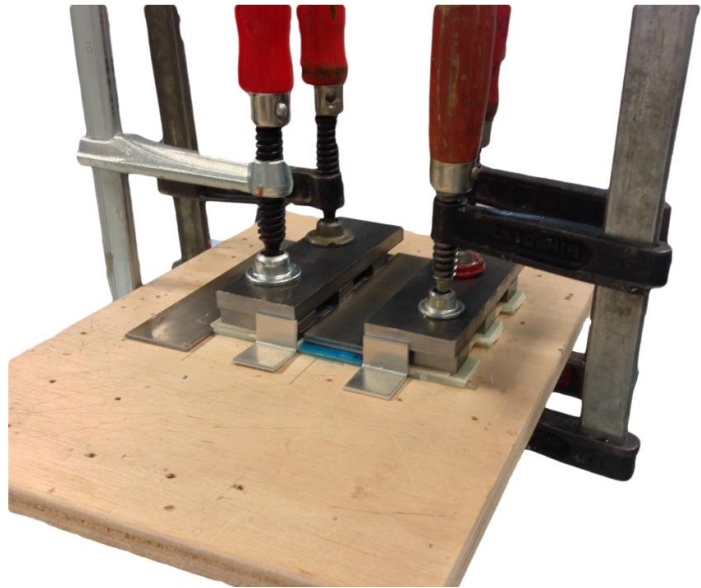
Bij het vervaardigen van de proefstukken is nauwkeurigheid van het hoogste belang. Zowel de breedte als de dikte is op drie plaatsen per coupon gemeten. Daarnaast is ook de verlijming van de tabs van groot belang; als de lijmlaag niet gelijk is worden de proefstukken bij het inklemmen vervormt en zullen de spanningsconcentraties die hieruit voortkomen de proefstukken buiten het meetgebied doen falen. Om voor een gelijke lijmlaag te zorgen zijn er aan het adhesief 2,5wt% glasparsels toegevoegd met een afmeting van 250µm. Door tijdens de uitharding van het adhesief druk uit te blijven oefenen zal de lijmlaag deze dikte behouden.

Een risico bij vermoeiingstesten is het slippen van de proefstukken in de machine. Als de lijmlaag niet correct is aangebracht is slip ook mogelijk tussen de tab en de coupon. Om dit te voorkomen zijn alle oppervlaktes gereinigd met ethanol alvorens te lijmen. Om de tabs aan de proefstukken te kunnen bevestigen, is er Plexus MA310 lijm gebruikt. Dit adhesief is uitermate geschikt voor het verlijmen van thermoplasten en is één van de weinige lijmen welke zich voldoende aan APA6 wil binden. Nylon polymeren, zoals APA6, staan onder meer bekend om hun slechte verlijmingsmogelijkheden. Dit komt doordat ze chemisch inert zijn en zeer lage oppervlakte energie hebben. Hiervoor hebben alle proefstukken een plasma oppervlaktebehandeling gekregen om de oppervlaktespanning te verhogen zodat het adhesief voor betere hechting kan zorgen tussen de tab en het proefstuk. Tijdens het aanbrengen van de lijm is het van belang te zorgen dat er geen luchtballen opgesloten raken bij het plaatsen van de tabs.



Figuur V; Proefstuk T18 voor aanvang van de test

Naast een gelijke lijmlaag is het van belang om de tabs goed uit te lijnen met de coupons zodat de oppervlaktes elkaar compleet overlappen. Ook zorgt dit ervoor dat de tabs precies 45° t.o.v. de coupons liggen zodat de krachten niet scheef worden ingeleid tijdens de vermoeiingstesten. Om deze reden is er een mal gemaakt waarin de tabs verlijmd zijn. De mal is weergegeven in Figuur VI. D.m.v. lijmklemmen wordt er een constante kracht op de tabs uitgeoefend tijdens het uitharden.



Figuur VI; De verlijm mal

Na het verlijmen van de tabs moeten de rekstrookjes geplaatst worden op het meetgebied van de tabs. Tijdens de test worden deze gesoldeerd aan een Peekel meetversterker. Deze rekstrookjes meten d.m.v. verschil in weerstand de rek in het meetgebied. Ze bestrijken een lengte van 5 mm en zijn ingesteld dat 1 Volt gelijk staat aan 1% rek. Per proefstuk worden er vier rekstrookjes gebruikt. Aan beide zijde twee: één op 0°, de ander op 90°. Door beide zijde te meten kan de rek tijdens de testen afgeleid worden, en door zowel 0° als 90° op te meten kan de poisson-factor worden vastgesteld. Tijdens de testen kwamen de rekstrookjes geregeld los door scheurgroei onder de lijmlaag en wegens deze reden zijn de meetresultaten van de rekstrookjes niet opgenomen.

Tot slot is het van belang om tijdens deze lijmpcedure geen beschadigingen aan de proefstukken aan te brengen. APA6 staat bekend als een zeer kerfgevoelig materiaal wat extra druk op een gaaf oppervlakte legt. Hiervoor moet iedere stap zeer nauwkeurig worden uitgevoerd en het gebruik van grove machines worden vermeden.

In totaal moet per proefstuk moet een productietijd van 120 minuten gerekend worden.

4. Vermoeiingstesten

4.1 Machine en procedure

Om scatter (variatie) in de resultaten te minimaliseren zijn alle testen uitgevoerd op dezelfde machine, de 60kN Home Made (LF7M01) vermoeiingsbank aan de TU Delft. De bank is recentelijk gekalibreerd en alle testen zijn uitgevoerd tussen de 22°C en 23°C, en 50 tot 55 RH%.

Om de proefstukken in te klemmen zijn hydraulische klemmen gebruikt met een klemkracht van 15MPa om slip te voorkomen. De procedure zoals beschreven in ASTM D3039 gevolgd voor de vermoeiingstesten. Daarnaast zijn de aanmerkingen van A. P. Vassilopoulos et al. [9] voor klemkracht in acht genomen.

Op één uitzondering na zijn alle proefstukken tussen de 2Hz en 10Hz getest. Hier is voor gekozen om de interne warmteopbouw te beperken tot een maximaal acceptabele 10°C stijging, zoals O. Krause, T. P. Philippidis reeds hebben aangetoond [10]. De uitzondering kwam noodgedwongen door de beperkte beschikbaarheid van de testfaciliteiten.



Figuur VII; De 60kN Home Made fatigue bank



4.2 Testresultaten

R=-1; Trek-Druk

Specimen ID	width (mm)	Depth (mm)	A (mm ²)	P _{max} (kN)	P _{min} (kN)	σ _{max} (MPa)	f (Hz)	N _f	Notes
T27	24,95	3,11	77,59	5	-5	64,438	10	2.000.000	Runout
T13	25,00	3,28	82,00	10	-10	121,951	10	29.595	
T23	24,96	3,13	78,12	7,5	-7,5	96,000	10	287.000	
T33	24,96	2,95	73,63	6,5	-6,5	88,277	10	435.363	Failure near tab
T19	25,00	3,19	79,75	6	-6	75,235	10	1.357.830	
T37	24,96	2,89	72,13	13	-13	180,219	2	2.783	
T25	24,96	3,08	76,88	15	-15	195,117	2	18.000	
T35	24,98	2,92	72,94	8	-8	109,677	6	69.251	
T16	25,00	3,28	82,00	8	-8	97,561	6	269.030	

R=0.1; Trek-Trek

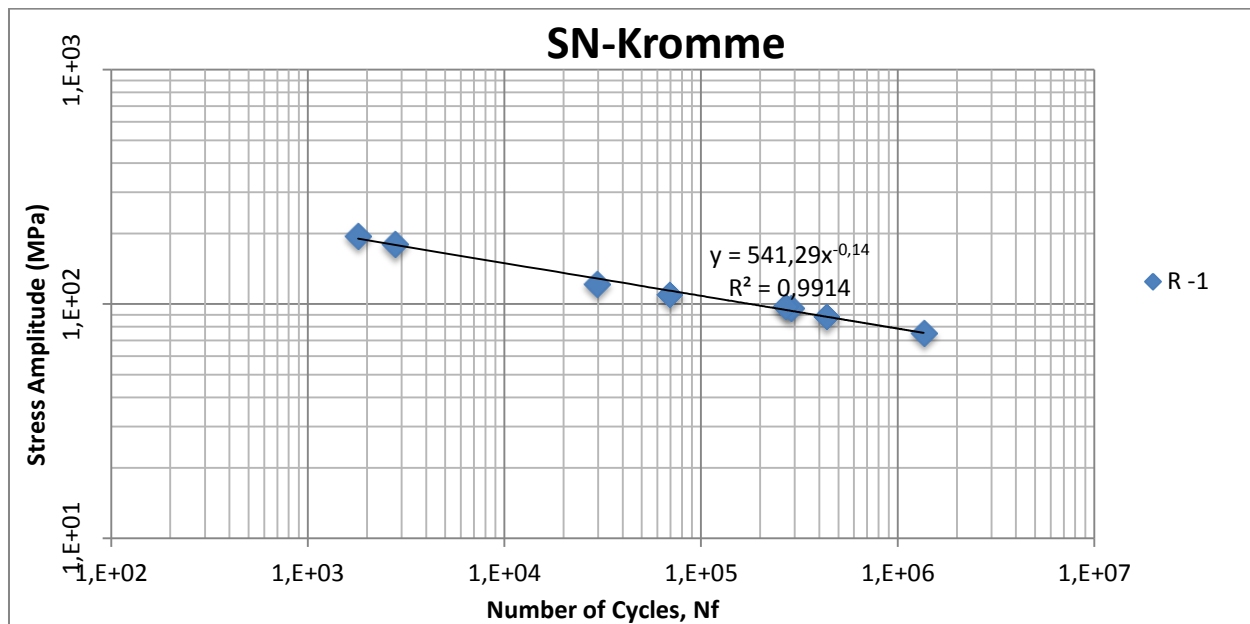
Specimen ID	width (mm)	Depth (mm)	A (mm ²)	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	σ_{max} (MPa)	f (Hz)	N_f	Notes
T31	24,95	2,94	73,35	15	1,5	204,491	6	21.147	Tabfailure
T26	24,96	3,04	75,88	18	1,8	237,222	2	9.935	Failure near tab
T36	24,96	2,90	72,38	21	2,1	290,119	2	3.157	Failure near tab
T14	24,99	3,27	81,72	12	1,2	146,848	10	182.960	
T24	24,98	3,12	77,94	14,5	1,45	186,046	6	56.904	Failure near tab
T34	24,97	2,94	73,41	9	0,9	122,596	14	243.717	Higher frequency caused internal heating

R=10; Druk-Druk

Specimen ID	width (mm)	Depth (mm)	A (mm ²)	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	σ_{max} (MPa)	f (Hz)	N_f	Notes
T11	25,01	3,27	81,78	-16	-1,6	-195,640	6	600.000	Runout
T12	24,97	3,26	81,40	-17,5	-1,75	-214,982	6	6.955	
T22	24,96	3,13	78,12	-19	-1,9	-243,201	2	855	
T32	24,96	2,94	73,38	-13,5	-1,35	-183,968	10	1.924.491	
T17	24,96	3,28	81,87	-17	-1,7	-207,649	6	4.672	Failure due to bending in gauge area
T18	24,97	3,24	80,90	-16,5	-1,65	-203,948	2	26.598	

4.3 Geanalyseerde data

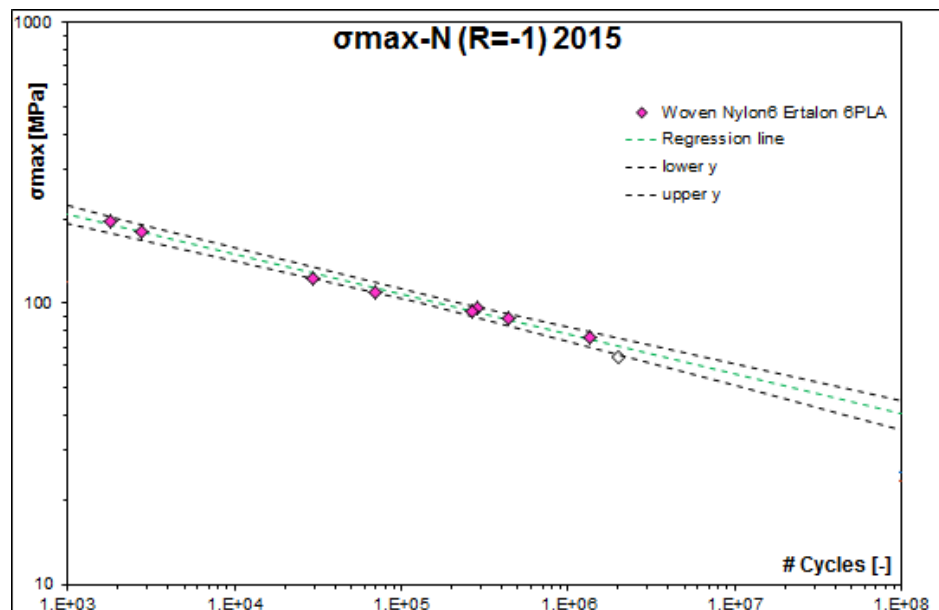
Als de data voor uit paragraaf 4.2 netjes wordt uitgezet komen de volgende krommen eruit:



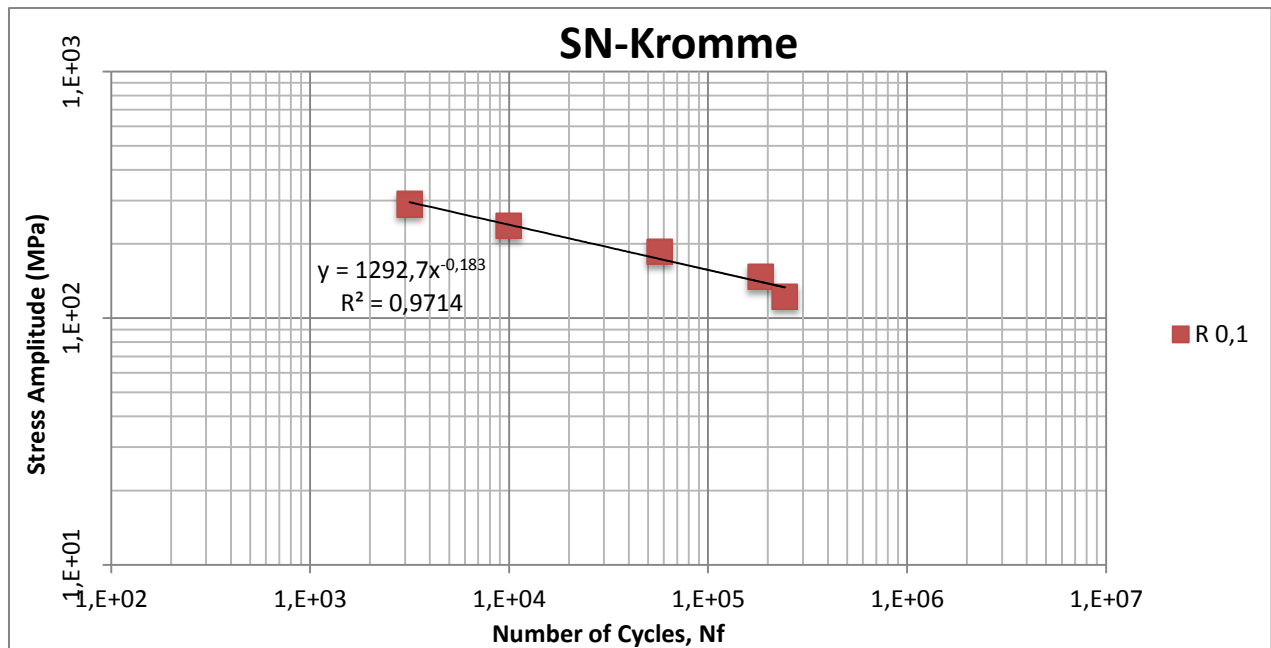
Figuur IX; SN-kromme R-1

Uit de R-1 waarden kan bovenstaande grafiek opgesteld worden. De blauwe punten zijn hierin de gevonden testdata voor de R-1 waarden. Zoals Basquin beschreef is er een Log-Log lineair verband te zien in deze resultaten. De trendlijn van dit verband met de kleinste fout is beschreven onder de grafiek en heeft een determinatiecoëfficiënt (R^2) van 99,14%, wat de nauwkeurigheid van de gevonden resultaten t.o.v. de verwachte resultaten inhoud. Om enige speling in de meetwaarden in te bouwen, wordt er meestal gekeken naar de betrouwbaarheidsinterval, beter bekend als de 95/95-lijn. Deze lijn wordt gedefinieerd door een 95% kans dat 95% van de proefstukken aan de berekende spanning kan voldoen. De betrouwbaarheidsinterval is in onderstaande grafiek, **Error! Reference source not found.**, weergegeven.

Doordat de resultaten een lineair verband nauwkeurig benaderen en hierdoor de determinatiecoëfficiënt hoog uitvalt, valt op dat de 95/95-lijn zeer dicht bij de gevonden waardes uitkomt. Dit betekent dat de gevonden meetresultaten betrouwbaar zijn. De berekeningen voor de 95/95-lijn zijn in bijlage III bijgevoegd.

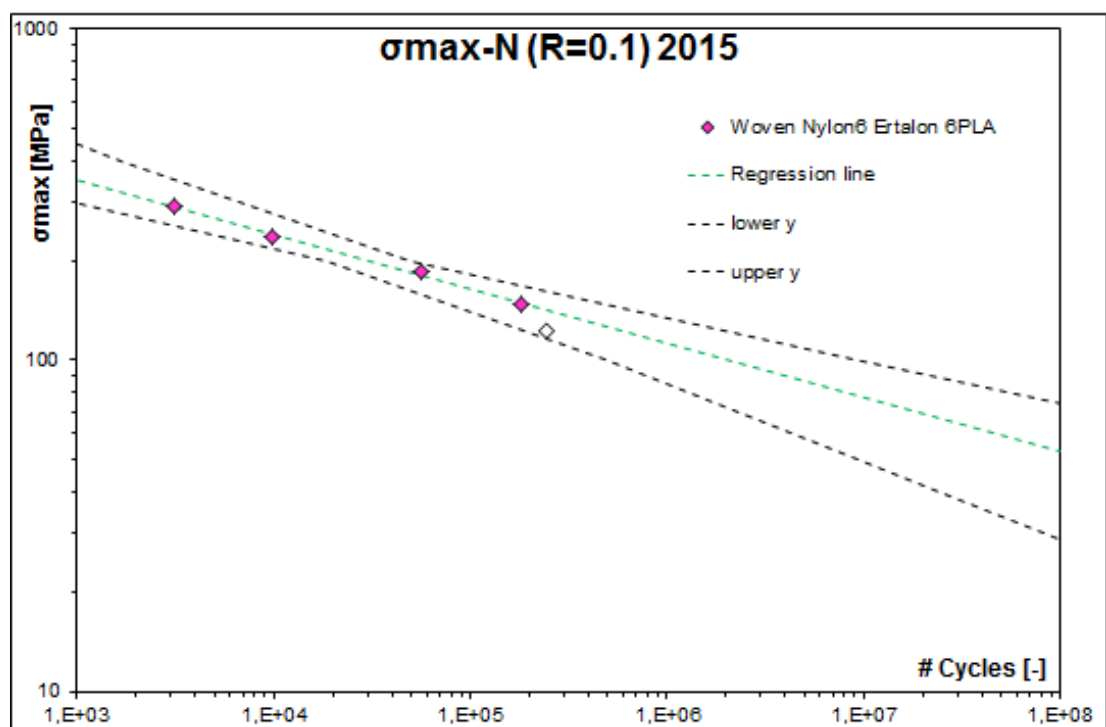


Figuur X; SN-kromme R-1 met 95/95-lijn

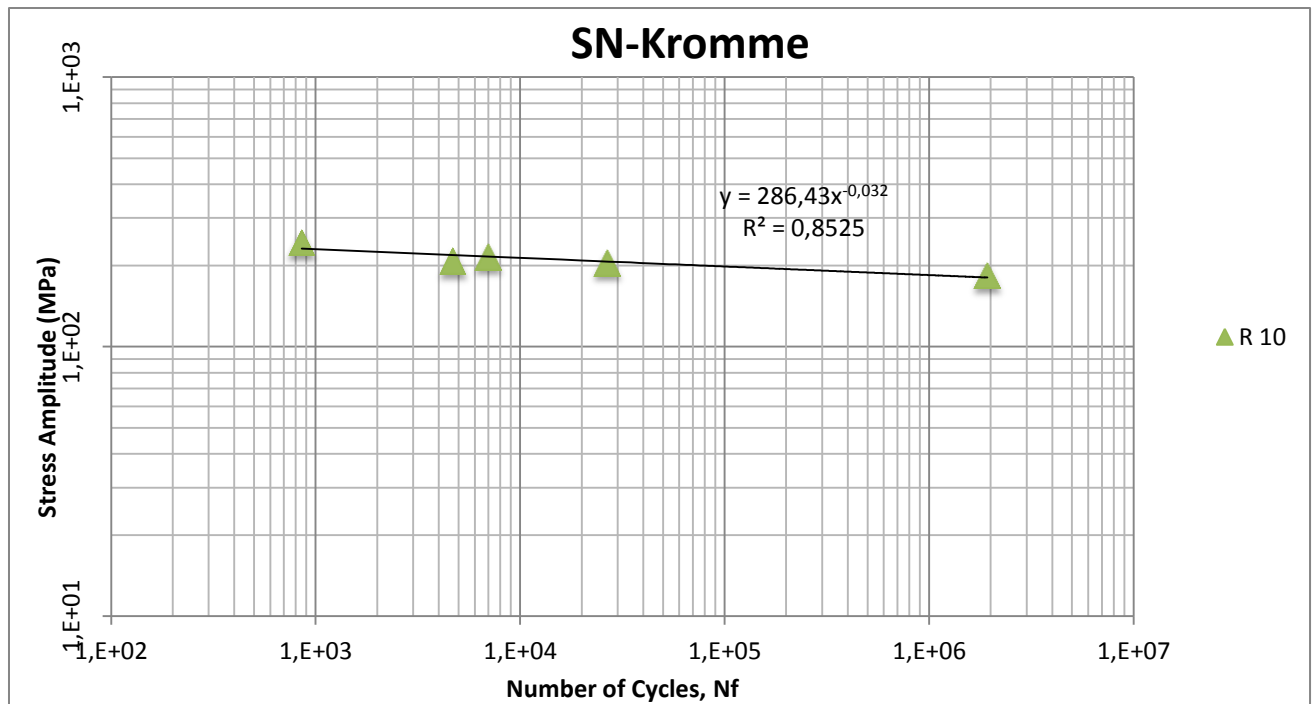


Figuur XI; SN-kromme R0,1

De rode punten zijn de gevonden data voor de R0,1 waarden. De trendlijn met de kleinste fout is beschreven onder de grafiek en heeft een determinatiecoëfficiënt van 97,14%. Opvallend is de het laatste meetpunt, welke ver onder de verwachting scoort. Als dit meetresultaat genegeerd wordt komt de determinatiecoëfficiënt op een bovengemiddelde 99,50% uit. Ook voor deze grafiek is er een betrouwbaarheidsinterval bepaald, weergegeven in Figuur XII. Opvallend is de uitlopende mouw na de 10^5 cycli. Dit is grotendeels veroorzaakt door het laatste meetpunt, maar kan op grond van compleetheit niet worden weggelaten. De berekeningen voor de 95/95-lijn zijn in bijlage III bijgevoegd.



Figuur XII; SN-kromme R0,1 met 95/95-lijn

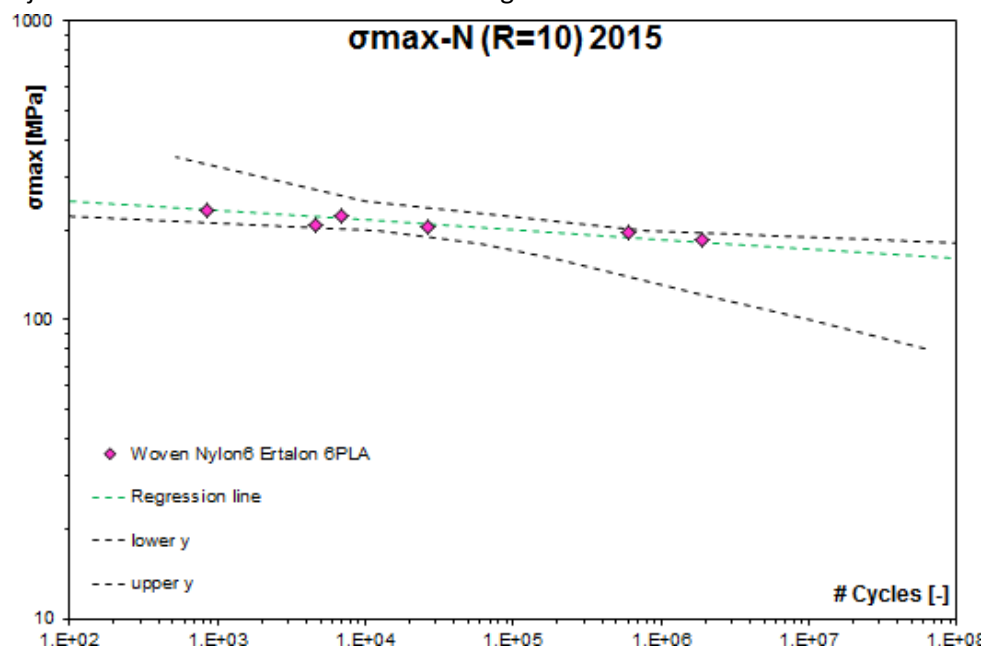


Figuur XIII; SN-kromme voor R10

Tot slot zijn voor de R10 testen zijn bovenstaande resultaten gevonden. Opvallend is de waarde van de Basquin's Slope, welke beduidend lager is dan bij de vorige twee grafieken. Deze lage waarde betekent een lage maximale compressiespanning. De regressiecoëfficiënt is echter een stuk lager dan bij de vorige twee krommen. Dit houdt in dat het materiaal slagvaster is en minder schade oploopt door de wisselende druk-druk belasting.

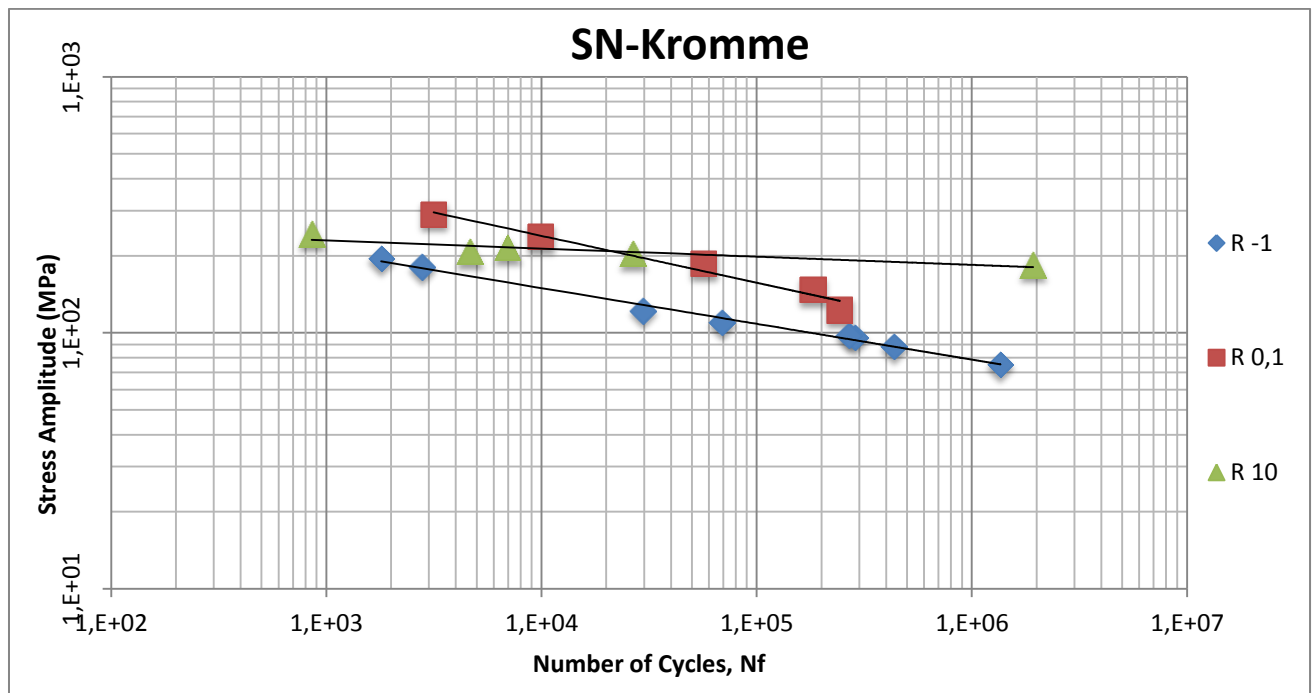
Ook opvallend is de lage determinatiecoëfficiënt. Dit is goed terug te zien in de grafiek zelf; de resultaten liggen meer verspreid langs de trendlijn. Deze spreiding is voornamelijk afkomstig door de effecten van buiging tijdens de druk-druk test. Door de lage determinatiecoëfficiënt valt het betrouwbaarheidsinterval laag uit, zoals te zien is in figuur XIV.

De berekeningen voor de 95/95-lijn zijn in bijlage III bijgevoegd.



Figuur XIV; SN-kromme R10 met 95/95-lijn

Als we de bovenstaande drie SN-kromme combineren, geeft onderstaand resultaat, Figuur XV.



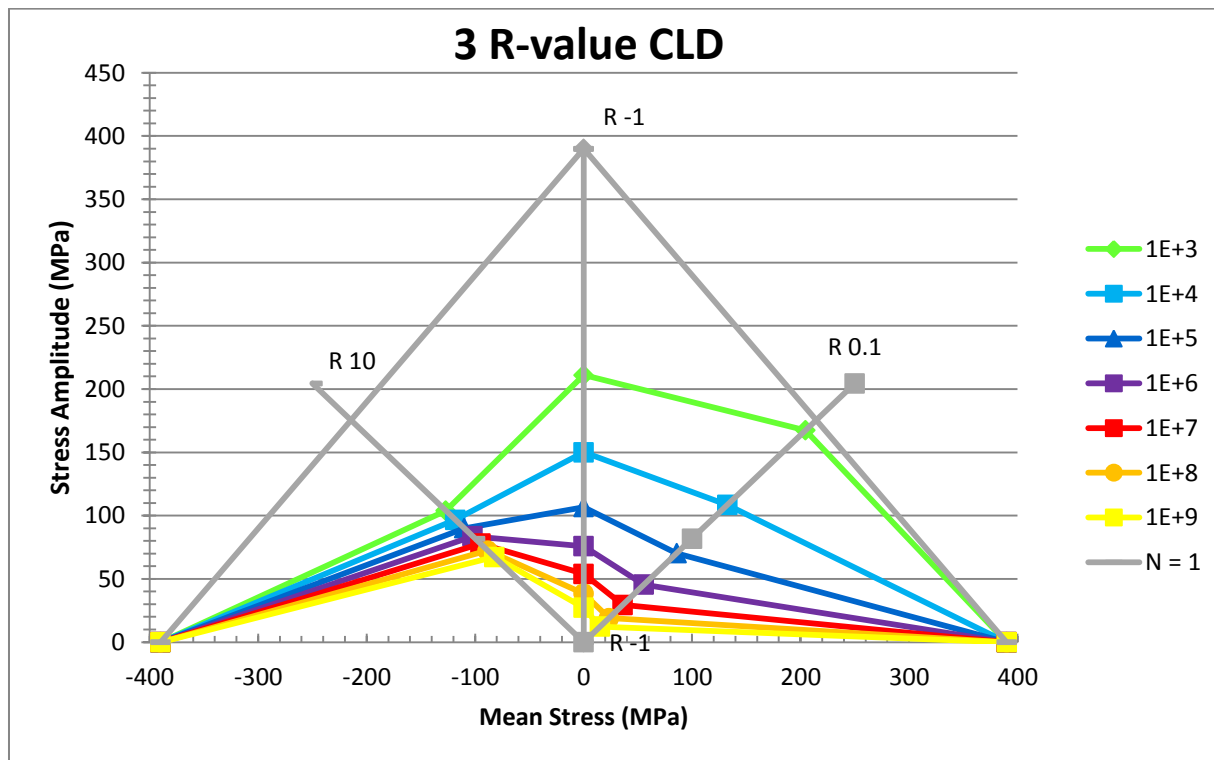
Figuur XV; SN-kromme gecombineerd

Uit deze grafiek kan worden geconcludeerd dat het composiet initieel meer weerstand biedt tegen trekkrachten dan drukkrachten maar dat dit rond 20,000 cycli overslaat naar een betere weerstand tegen drukkrachten.

Zoals eerder is aangegeven, is vermoeiing het creëren van nucleaties/defecten, welke vervolgens door kerfwerking uitgroeien tot grote macroscheuren welke uiteindelijk het materiaal zullen laten falen. Doordat er in het compressieregime niet aan de defecten getrokken wordt, hebben deze minder tot geen last van kerfwerking aan de defecten. Dit is duidelijk zichtbaar aan de lage regressiecoëfficiënt van de R10 (druk) testen, wanneer we deze vergelijken met de regressiecoëfficiënten van de twee andere belastingsverhoudingen.

Om dezelfde reden hebben de R-1 (trek-druk) en R0,1 (trek) een vergelijkbare regressiecoëfficiënt. Namelijk, in beide gevallen wordt er gedurende de trekbelasting aan de defecten getrokken, welke op deze momenten door piekbelasting zullen uitgroeien tot scheuren. Doordat de trek-trek testen continue aan een trekbelasting zijn blootgesteld en de trek-druk testen slechts de helft van de tijd, zal dit effect sneller plaatsvinden op de trek-trek belaste coupons. Deze redenatie strookt met de gevonden resultaten.

4.4 Continuous Life Diagram



Bovenstaand CLD is het resultaat van voorgaande SN-kromme. Doordat de trendlijnen in de SN-kromme zijn opgesteld is het mogelijk voor elk van de drie situaties (R-ratio's) de spanningsniveaus te benaderen op 10^3 , 10^4 , ... 10^9 cycli.

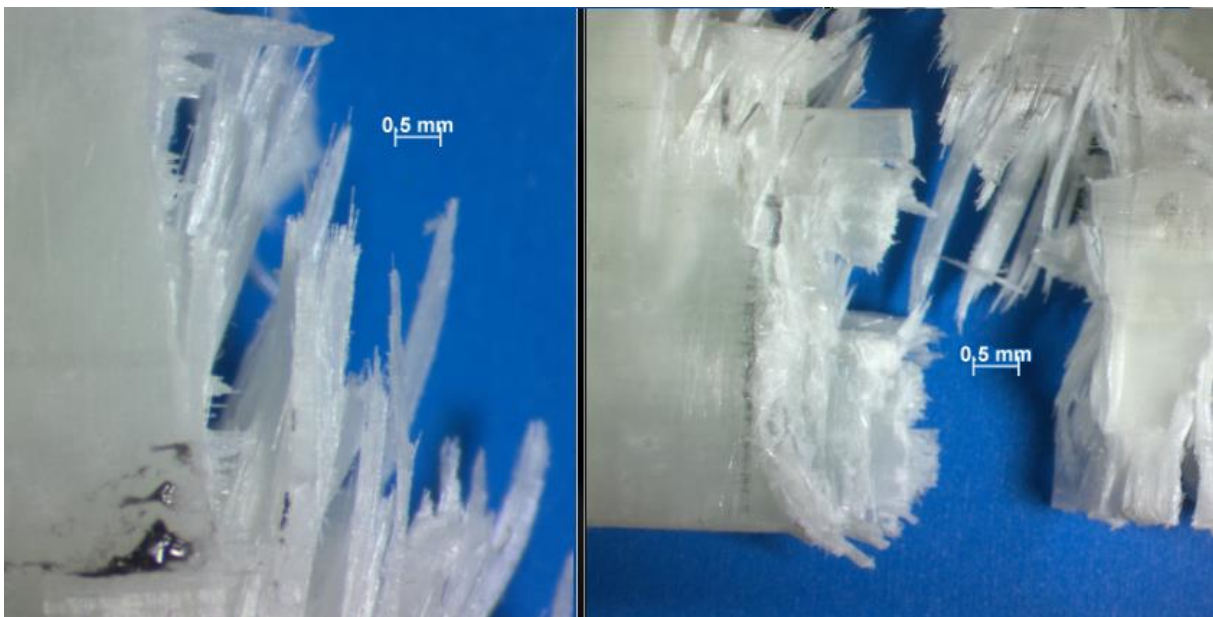
Op de horizontale as staat de gemiddelde spanning aangegeven. Bij R-1 waar de trek en drukkrachten aan elkaar gelijk zijn, is deze per definitie 0, en vormt dan ook een lijn loodrecht op de x-as. R10 en R0,1 zijn elkaars inverse en staan daarom symmetrisch tegenover elkaar. Opvallend hierin is dat de R0,1 as een veel grotere range aan spanning heeft gedurende de levensduur dan de andere twee assen. Echter blijkt uit voorgaande SN-kromme van R0,1 dat deze ook de grootste Basquin Slope heeft, en de kracht dus het snelst zal afnemen. De begin en eindpunten van de lijn zijn op de UTS en UCS (maximale trek en drukspanning) berust.

Er is gekozen voor een 3 R-value Multislope CLD te kiezen, aangezien de alternatieven een mindere goodness-of-fit vertoonden of niet alle data konden gebruiken. Alternatieven bestonden uit bijvoorbeeld: Weibull analyse, Linear Goodman CLD, Modified Goodman en de Piecewise CLD.

4.5 Conclusies

De twee conclusies welke direct naar voren komen bij het zien van het CLD zijn de lage variatie in de R10 as, en tegelijkertijd de hoge graad van variatie op de R0,1 as. Beide zijn te verklaren en kwamen bij de hypothesen ook reeds naar voren. De lage variatie komt voort uit de weerstand wat het materiaal biedt wanneer het wordt blootgesteld aan een overwegend drukkende belasting, terwijl de hoge variatie bij R0,1 te verklaren is door de constante spanning op de defecten welke zich hierdoor sneller zal vergroten richting scheuren, zoals in §4.3 in groter detail beschreven staat.

Uit analyse van de kapotte proefstukken is gebleken dat de proefstukken welke aan zowel een trek- als drukbelasting zijn blootgesteld zijn bezweken tijdens het trekspannings-segment van de cyclus. Dit blijkt uit analyse van de breuklijnen, welke bij trek-trek en trek-druk dezelfde karakteristieken vertoont, zoals weergegeven in Figuur XVII. Op de afbeelding zijn gescheurde strengen glasweefsel te zien, omringd door APA6, waar de coupons uit elkaar zijn getrokken.



Figuur XVII; Links: breuklijn van trek-druk. Rechts: breuklijn trek-trek

Als we dit vergelijken met de breuklijn bij een druk-druk test valt op dat de coupons op een andere wijze bezweken zijn. De breuklijn in Figuur XVI is duidelijk gefaald op delaminatie van het laminaat, welke geïnitieerd is door buiging van de coupon.

Als glasvezel-APA6 toegepast gaat worden, zal er vooral gelet moeten worden op de belastingstype waaraan het composiet blootgesteld gaat worden. In een overheersend compressieregime zal in de constructie rekening gehouden moeten worden met het voorkomen van buiging. In het geval van trekbelastingen zal voornamelijk de levensduur een groot belang gaan spelen. Door onderzoek naar de belastingen te doen en gebruik te maken van het Continuous Life Diagram en is hier prima aan te rekenen.



Figuur XVI; Breuklijn van druk-druk

4.6 Aanbevelingen

Aangezien deze afstudeeropdracht slechts een eerste onderzoek naar de vermoeiingseigenschappen van glasvezel-APA6 is, zijn er aan de hand van de opgedane kennis een aantal aanbevelingen te doen richting het vervolg onderzoek. Hieronder zijn deze aanbevelingen summier genoemd:

Test in meer dan 1 testrichting, o.a. 45° op de vezel:

Bij trek-druk bleek er al een groot verschil te bestaan tussen de resultaten, wat deels door de interactie tussen matrix en vezels komt. Dit effect zal onder andere hoeken versterkte worden, zoals een polair stijfheidsdiagram voor statische resultaten beschrijft.

Test ook Dry As Molded composiet:

Alle resultaten welke tijdens deze afstudeerperiode zijn bevonden zijn afkomstig van een geconditioneerd laminaat. Het is bekend dat APA6 hygroscopisch is, wat inhoudt dat het vocht uit de lucht aantrekt. Echter is het ook bekend dat door de dikte van een windturbineblad, de kans groot is dat het vocht de binnenkant van het blad niet zal bereiken. De composiet zal dan lokaal ongeconditioneerd verdrag gaan vertonen.

Test op hogere cycli om de $N_f = 10^9$ te onderzoeken:

Hoewel de wet van Basquin beschrijft dat de relatie tussen $\log(S)$ en $\log(N)$ lineair verloopt, is het van toegevoegde waarde om dit op enkele proefstukken te testen. Door de langere termijn van de testen en de interne opwarming wat karakteristiek is voor een vermoeiingstest op composiet, zal er richting akoestische trilling op kleine proefstukken gekeken moeten worden.

Onderzoek ook andere R-ratio's, zoals -2, -0.5, 0.5 en 0.2 voor een nauwkeuriger CLD:

Door met meer spanningsverhoudingen aan de slag te gaan, zal het CLD meerdere referentiepunten krijgen per levensduur. Hierdoor kan er met meer nauwkeurigheid een uitspraak worden gedaan over het gedrag bij variabele belasting.

Voor uitgebreider onderzoek, meer testen doen:

ASTM D3479 beschrijft de hoeveelheid proefstukken en herhaling van dezelfde spanningsniveaus die nodig zijn voor verschillende doeleinden. Voor onderzoekende doeleinden en eerste testen, zoals tijdens de afstudeerstage gedaan zijn, worden 3 tot 6 testen per spanningsverhouding verplicht gesteld. Om deze reden zullen de beschreven resultaten aangevuld moeten worden met vergelijkbare testen wanneer de volgende stap met de glasvezel-APA6 composieten genomen gaat worden.

Extention meter gebruiken om totale rek van coupons te meten:

Tijdens de vermoeiingstesten blijken de rekstrookjes regelmatig los te komen van de proefstukken. Dit komt vooral door de trilling die zij meekrijgen van de test. Door een extention meter tussen de grips aan de testbank te koppelen kan de totale rek van de coupon (exclusief de tabs) gemeten worden.

Testen op temperatuur – effect van brosheid/visceus zijn van de matrix:

Zoals eerder aangegeven heeft temperatuur een grote invloed op vermoeiingsgedrag. Door op verschillende temperaturen te testen, kan het effect hiervan in kaart worden gebracht. Variatie zal vooral door brosheid/ductiliteit van de matrix komen

Tijdens de testen, vóór het falen van de coupon, op oppervlaktebeschadigingen testen:

Scheuren ontstaan door kleine defecten, zoals voids in de hars, of (productie)beschadigingen aan het oppervlak van de glasvezels of het laminaat zelf. Door gedurende de testen hierop te controleren, kan er beter worden afgeleid wanneer en met welke snelheid de defecten uitgroeien.

Literatuur en links

1. *Fatigue Tests & S-N Approach* (n.d.) Opgehaald op 2 mei 2015, van: https://www.efatigue.com/training/Chapter_4.pdf
2. *Fatigue and Fracture—Understanding the Basics* (2012). Opgehaald op 14 mei, 2015, van: http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05224G_Chapter14.pdf
3. Van Rijswijk, K. (2007): Vacuum Infusion Technology for Anionic Polyamide-6 Composites. Delft, Delft University of Technology (p. 132)
4. Van Rijswijk, K. (2007): Vacuum Infusion Technology for Anionic Polyamide-6 Composites. Delft, Delft University of Technology (p. 171)
5. Van Rijswijk, K. (2007): Vacuum Infusion Technology for Anionic Polyamide-6 Composites. Delft, Delft University of Technology (p. 132)
6. Alderliesten, R. (2014): College's *Fatigue of Structures & Materials*. Opgeroepen op april, 2015, van TU Delft Collegerama.
7. Howe, B. (2010): Dry vs. Conditioned Polyamide Nylon Explained. Opgehaald op 26 maart 2015, van: <http://knowledge.ulprospector.com/1489/dry-vs-conditioned-polyamide-nylon/>
8. <https://www.ecn.nl/optimat/cgi-optimat/docbase-upload.cgi?cq=1&num=10091&rev=0>, opgehaald op 29 maart 2015.
9. T. P. Philippidis, A. P. Vassilopoulos, T. T. Assimakopoulou, V. Passipoularidis, . (2012) *Static and Fatigue tests of OPTIMAT UD coupons; Benchmark Tests, OPTIMAT BLADES*. Opgehaald op 15 april 2015, van http://www.wmc.eu/public_docs/10120_000.pdf
10. Krause, O. Philippidis T.P. (2005) *General Test Specification, OPTIMAT BLADES*. Opgehaald op 14 april 2015, van http://www.wmc.eu/public_docs/10157_005.pdf

Niet gerefereerde bronnen

Gedurende de literatuurstudie is gebruik gemaakt van onderstaande bronnen om inzicht te verkrijgen in de materie. Aangezien deze voornamelijk zijn gebruikt als algemene kennis welke in meerdere aspecten van het afstudeerwerk zijn toegepast, zijn deze niet aan bepaalde passages te hangen.

Joncas, S., (2010): *Thermoplastic Composite Wind Turbine Blades, An integrated design Approach*.
Delft, Delft University of Technology

Teuwen, J.E., (2011): *Thermoplastic Composite Wind Turbine Blades, kinetics and processability*.
Delft, Delft University of Technology

Chortis, D., (2013): *Structural analysis of composite wind turbine blades*. New York, Springer
international publishing Switzerland

Vassilopoulos, A.P., (2010): *Introduction to the fatigue life prediction of composite materials and structures: past, present and future prospects*. Switzerland, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Liu, B. And Lessard, L., (1993): *Fatigue and damage-tolerance analysis composite laminates: stiffness loss, damage modelling, and life prediction*. Montreal, Department of Mechanical Engineering Pb.

CORDIS - project reference: [ENK6-CT-2001-00552](#); Recommendations on testing and characterization of materials

ASTM D5229 §4.4

ASTM D3039 §8.2.2.5

ASTM D3479 §8.2.1

PLEXUS MA310 datasheet

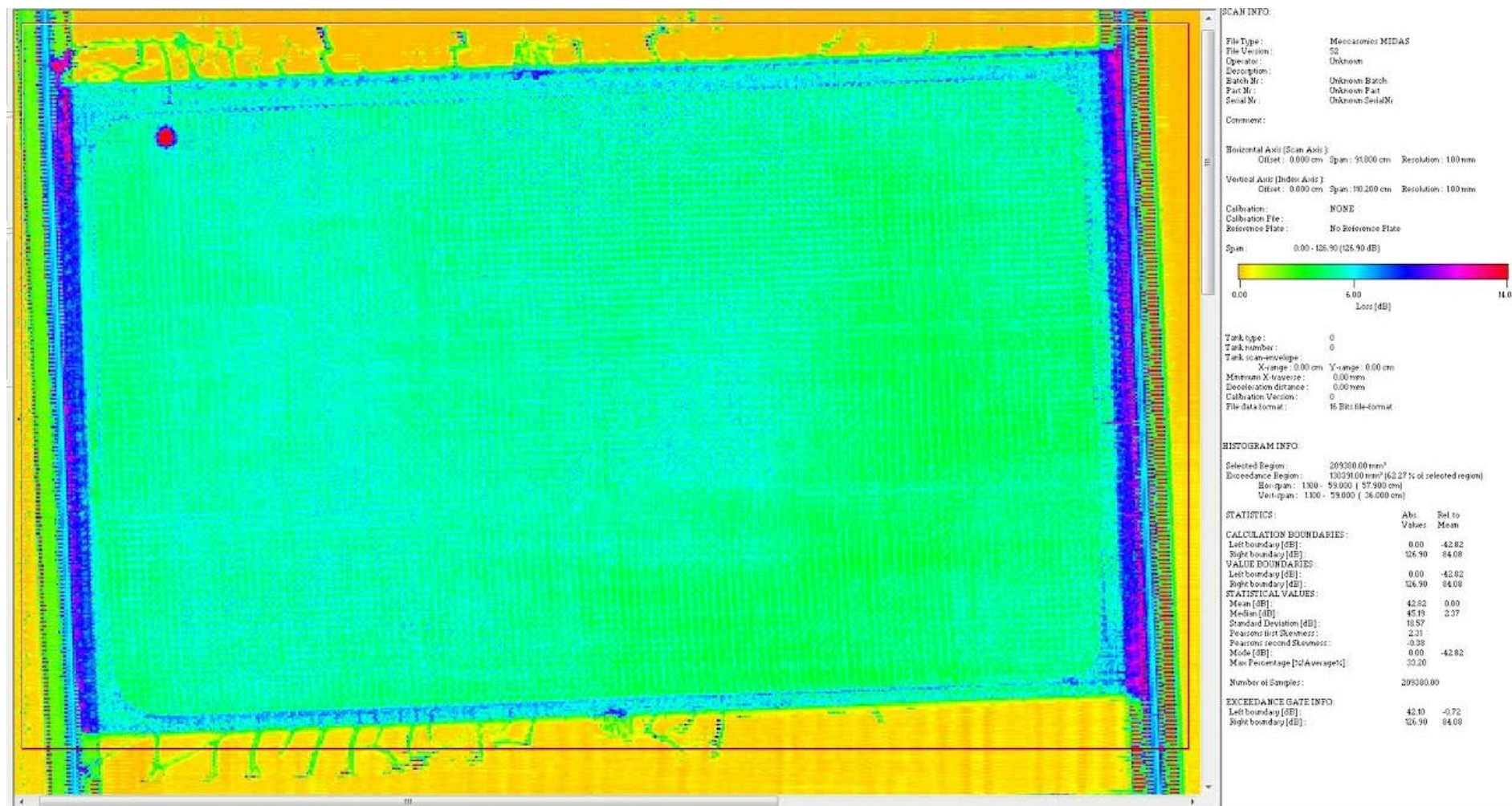
Bijlage

- I. Complete lijst van specimen geometrie
- II. C-Scan laminaat
- III. Betrouwbaarheidsintervals
- IV. Reflectierapport HHS
- V. Bedrijfsbeoordeling
- VI. Enquêteformulier HHS

I. Complete lijst met afmetingen specimen

Coupon ID.	Breedte 1	Breedte 2	Breedte 3	Gemiddelde breedte	Dikte 1	Dikte 2	Dikte 3	Gemiddelde dikte
11	25,00	25,02	25,03	25,02	3,27	3,27	3,25	3,26
12	24,94	24,97	25,00	24,97	3,27	3,26	3,25	3,26
13	24,98	25,01	25,00	25,00	3,28	3,28	3,27	3,28
14	24,96	25,00	25,01	24,99	3,27	3,27	3,26	3,27
15	25,01	25,00	25,00	25,00	3,28	3,27	3,26	3,27
16	25,02	25,00	24,99	25,00	3,29	3,27	3,27	3,28
17	24,95	24,94	24,99	24,96	3,29	3,28	3,28	3,28
18	24,97	24,97	24,96	24,97	3,25	3,24	3,24	3,24
19	24,96	25,00	25,04	25,00	3,21	3,19	3,18	3,19
21	24,95	24,95	24,95	24,95	3,13	3,12	3,1	3,12
22	24,96	24,96	24,97	24,96	3,15	3,13	3,11	3,13
23	24,97	24,95	24,96	24,96	3,14	3,13	3,13	3,13
24	24,99	24,99	24,97	24,98	3,12	3,12	3,14	3,13
25	24,94	24,97	24,96	24,96	3,09	3,09	3,08	3,09
26	24,98	24,95	24,96	24,96	3,05	3,04	3,03	3,04
27	24,97	24,93	24,94	24,95	3,01	3,00	2,97	2,99
31	24,96	24,93	24,96	24,95	2,94	2,94	2,92	2,93
32	24,97	24,96	24,95	24,96	2,95	2,94	2,92	2,94
33	24,96	24,96	24,97	24,96	2,97	2,96	2,93	2,95
34	24,96	24,98	24,97	24,97	2,96	2,94	2,91	2,94
35	24,96	24,98	24,99	24,98	2,93	2,92	2,92	2,92
36	24,95	24,97	24,96	24,96	2,91	2,89	2,88	2,89
37	24,95	24,96	24,96	24,96	2,90	2,88	2,87	2,88

II. C-Scan laminaat



Figuur XVIII; C-Scan van het Glasvezel-APA6 laminaat

R0,1:

[illegible]

Regression coefficient

# =	4	
B =	-6,1	
A =	18,5	
b =	-0,164	Fatigue strength exponent
S' _f =	1089	Fatigue strength coefficient [Mpa]
s =	0,07	Sample standard error of N estimated on
COV =	1,7%	Coefficient of variation of S' _f

A & B

95% Lower =	-6,2	15,5
95% Upper =	-6,0	21,5

Regression line

				x-axis	y-axis
Log(N) =	18,5	-6,1	Log($\sigma_{\max}$)	1E+00	1089
$\sigma_{\max}$ =	1089	(N)	$\cdot 0,164$	1E+04	240
				1E+06	113
				1E+08	53

Betrouwbaarheidsinterval

x-axis	A+Blog(x)	$\sqrt{2F_p \cdot s}$		low er y	upper y
10	12,4	0,4	5,96	9E+09	8E+14
20	10,6		4,61	5E+08	3E+12
30	9,5		3,82	8E+07	1E+11
40	8,7		3,26	2E+07	1E+10
50	8,2		2,83	9E+06	2E+09
100	6,3		1,52	5E+05	9E+06
200	4,5		0,51	2E+04	5E+04
400	2,7		1,37	1E+02	2E+03
500	2,1		1,78	2E+01	6E+02

R10:

[illegible]

Regression coefficient

# =	6	
B =	-31,8	
A =	78,2	
b =	-0,031	Fatigue strength exponent
S' _f =	287	Fatigue strength coefficient [Mpa]
s =	0,54	Sample standard error of N estimated on
COV =	2,6%	Coefficient of variation of S' _f

A & B

95% Lower =	-31,9	37,1
95% Upper =	-31,7	119,2

Regression line

Log(N) =	78,2	-31,8	Log($\sigma_{\max}$)	x-axis	y-axis
$\sigma_{\max}$ =	287	(N)	$^{-0,031}$	1E+00	287
				1E+04	215
				1E+06	186
				1E+08	161

Betrouwbaarheidsinterval

x-axis	A+Blog(x)	$\sqrt{2F_{p.s}}$		lower y	upper y
80	17,6	2,0	4,91	6E+07	3E+27
100	14,6		3,77	1E+07	1E+22
120	12,0		2,84	2E+06	6E+17
140	9,9		2,06	6E+05	1E+14
160	8,1		1,39	2E+05	8E+10
180	6,4		0,84	6E+04	1E+08
200	5,0		0,45	1E+04	8E+05
250	1,9		1,04	7E-01	1E+04
350	-2,7		2,72	6E-09	5E+02

IV. Reflectierapport HHS

Competentieset uit PVA

taakrollen

		onderzoeker	ontwerper	adviseur	beheerder	projectleider	ondernemer
Competentieset werktuigbouw & hbo algemeen							
nr.	Competenties werktuigbouwkunde						
1	projectmanagement uitvoeren (organiseren, plannen, uitvoeren, verslag opstellen)	3	3				
2	een onderzoekopdracht uitvoeren	3					
3	het kunnen opstellen van productdefinitie, pva en pve voor een duurzaam product of proces	3	3				
4	het realiseren van een functioneel duurzaam product of voortbrengingsproces		3				
5	het realiseren van een detailontwerp voor een duurzaam product of voortbrengingsproces						
6	het realiseren van een prototype/model van een duurzaam product of voortbrengingsproces						
7	het voorbereiden van een voortbrengingsproces	3					
8	het produceren van een duurzaam product						
9	het beheren of onderhouden van een product of proces						
nr.	Algemene hbo competenties						
10	kritisch handelen (analytisch en probleemoplossend vermogen en het onderbouwen van keuzen, oordeelsvorming)	3	3				
11	systematisch een probleem aanpakken (creatieve, plan- en projectmatige werkhouding)	3	3				
12	samenwerken (sociaal communicatieve vaardigheden)	3	3				
13	persoonlijke en professionele ontwikkeling	3	3				
14	zelfverantwoordelijk werken	3	3				
15	kunnen functioneren in een internationale en/of multiculturele context	3	3				

Tabel 1; Competentieset en taakrollen opleiding Werktuigbouwkunde

Taakrollen

De voornaamste taakrol welke de student zal bezig houden is de rol als onderzoeker. Aangezien de afstudeeropdracht draait om het uitvoeren van een onderzoekopdracht zal het zwaartepunt van de competenties hieraan hangen. De secundaire taakrol betreft de rol als ontwerper. Tijdens het afstudeeronderzoek zullen er proefstukken moeten geproduceerd. Het is aan de student om deze te ontwerpen naar gelang de eisen welke aan de resultaten gesteld zijn, en voor de productie van de proefstukken ervan een mal te ontwerpen om variatie in de meetresultaten tot een minimum te beperken.

Er zijn een aantal competenties welke verbonden kunnen worden aan de reeds genoemde taakrollen. Om deze één voor één af te lopen:

Competenties werktuigbouwkunde

1. Projectmanagement uitvoeren (organiseren, plannen, uitvoeren, verslag opstellen)

Verwachting:

Deze competentie komt terug in beide taakrollen. De student zal ruimschoots op tijd zijn testen moeten organiseren en plannen. Daarnaast moet hij zijn bevindingen net en verzorgd verslaan/presenteren. Deze competentie zal niveau 3 nodig hebben om het afstuderen tot een goed resultaat te brengen.

Feedback:

Gedurende de afstudeerperiode zijn er veel verstoringen op de planning geweest, zoals ziekte en machines welke voor lange periodes door derde partijen zijn gereserveerd. Daarnaast heeft de opdracht nog meerdere kleine aanpassing gehad. Dit heeft tot een flexibele aanpak m.b.t. de planning geleid om alle testen uit te kunnen voeren in de beperkte tijd. Door afhankelijkheden van derden was het tevens niet mogelijk om iedere deadline te halen. Zonder continue aandacht voor de planning zou het niet mogelijk zijn geweest de uiteindelijke deadline te halen. Betreffende het opstellen van het verslag zijn er nog enige moeilijkheden geweest, aangezien door eerder verschoven deadline de testen pas in de laatste paar weken van de afstudeerperiode plaats konden vinden. Gezien het niveau van de opdracht en de complexe samenhang qua organisatie tussen SE Blades in Hengelo en de TU Delft is zeker niveau 3 aangetoond.

2. Een onderzoeksopdracht uitvoeren

Verwachting:

Deze competentie zal onder de noemer van de taakrol 'onderzoeker' hangen. De opdracht is van complexe aard en wordt zelfstandig uitgevoerd. Daarnaast is er geen kennis of verwachtingen over de resultaten van de test, wat extra druk legt op betrouwbare resultaten. Deze kunnen uiteraard alleen voortkomen uit correct voorbereide en uitgevoerde test(opstelling)en. Tevens wordt er met materiaal gewerkt welke een relatief lange productie & levertijd heeft, dit legt druk op het gebruik van het materiaal daar een fout destructief voor de testresultaten is. Door de complexe aard van de opdracht en zelfstandigheid van de student is het competentieniveau op een 3+ geschat.

Feedback:

Het uitvoeren van de onderzoeksopdracht is op te delen in vier fase. Allereerst moet er (literatuur)onderzoek gedaan worden naar de materie. Vervolgens moeten de testen voorbereid worden door o.a. het produceren van de proefstukken en het reserveren van machines. De derde fase betreft het uitvoeren van het onderzoek zelf, welke deels parallel loopt met de tweede fase. De laatste fase beslaat het analyseren van de verworven data en het presenteren van de conclusies hiervan. Gedurende de eerste fase heb ik ondervonden dat het doen van literatuur onderzoek naar brede onderwerpen als vermoeiing en polyamides een taak zonder einde is als er niet specifiek binnen een bepaalde context gezocht wordt. Na dit ondervonden te hebben is geleerd om eerst een duidelijk kader om de opdracht te creëren om dit te voorkomen. Ook is duidelijk geworden dat aan

de betrouwbaarheid van data zeer veel waarde hangt. Door alle stappen in het onderzoek goed te documenteren is het aantal onbekende parameters minimaal en is stelt het anderen in staat het onderzoek nauwkeurig na te bootsten. Zoals verwacht was het materiaalgebruik een belangrijk punt gedurende het afstuderen; dankzij goede voorbereidingen is al het beschikbare materiaal is gebruikt om voldoende datapunten te kunnen genereren. Met een lastige onderzoeksopdracht en minimale begeleiding is zeker niveau 3 aangetoond.

3. Het kunnen opstellen van een productdefinitie, pva en pve voor een duurzaam product of proces.

Verwachting:

Voor beide taakrollen geldt dat er een goed pva en pve moet liggen. Het pva is de basis waarop de afstudeerstage gebaseerd wordt en het pve zorgt dat de opdrachtgever instemt met de uit te voeren testen. Doordat beide van belang zijn de afstudeerperiode vruchtvol af te kunnen sluiten is tenminste een competentieniveau 3 vereist.

Feedback:

Het opstellen van het PVA is van belang geweest zoals was verwacht. Het gaf een houvast gedurende de afstudeerperiode en kon op terug worden gevallen bij vragen. Daarnaast gaf het een eenduidige beschrijving wat de opdrachtgever verwacht van de afstudeerder. In een lastige opdracht dit zelfstandig uitvoeren geeft blijk van competentieniveau 3.

4. Het realiseren van een functioneel duurzaam product of voortbrengingsproces

Verwachting:

Om meerdere testen op verschillende parameters te kunnen testen moet er een model gemaakt worden waarin de resultaten met elkaar vergeleken worden. Ook kunnen de resultaten/het model later gebruikt worden bij vergelijkbare testen. Gezien het niveau van de opdracht en de mate van zelfstandigheid valt dit onder competentieniveau 3.

Feedback:

Aangezien er nog weinig bekend was van het te testen composiet, was het opstellen van een model om de resultaten mee te verwerken een proces waarbij nieuwe data vaak tot (kleine) aanpassingen in het model heeft geleid. Uiteindelijk is het gelukt een werkend en kloppend model te maken waarin de testresultaten op de gewenste manier weergegeven kunnen worden, en welke ook hergebruikt kan worden bij vergelijkbare testen. Het maken van het model is zelfstandig uitgevoerd. Aangezien het een lastige opdracht is, komt dit neer op competentieniveau 3.

7. Het voorbereiden van een voortbrengingsproces

Verwachting:

Het proces of data te genereren vraagt om de juiste kennis en producten. De eerste kan verworven worden door een goede literatuur studie en gecheckt worden door overleg met de opdrachtgever. De producten zullen met behulp van de kennis geproduceerd moeten worden om de juiste data te kunnen genereren.

Feedback:

Door het brede scala aan parameters welke niet allen te beïnvloeden zijn is het voorbereiden van het proces (voortbrengen van data) een zeer gedetailleerde taak. Zoals reeds eerder vermeld is een slechte voorbereiding funest voor de resultaten en uiteindelijk het testplan. Deze lastige taak (en een hoge eis aan nauwkeurigheid) is zelfstandig uitgevoerd wat een competentieniveau 3 inhoudt.

Algemene hbo competenties

10. Kritisch handelen (analytisch en probleemoplossend vermogen en het onderbouwen van keuzen, oordeelsvorming)

Verwachting:

Zoals bij competentie 2 reeds is vermeld, is de betrouwbaarheid van de verkregen data van groot belang aangezien er geen referentiemateriaal beschikbaar is. Dit stelt zware eisen aan de testen, de testopstellingen en de voorbereidingen. Deze eisen kunnen alleen gehaald worden als de student kritisch handelt gedurende het volledige traject.

Feedback:

Kritisch handelen is één van de belangrijkste competenties geweest tijdens de afstudeerstage. In eerste plaats zijn de testen uitgevoerd aan de hand van de kennis opgedaan tijdens de literatuurstudie. Doordat er geen vergelijkbare data beschikbaar is wordt er extra druk op oordeelsvorming gelegd. In het geval dat keuzes niet onderbouwd zijn, zou dit beslist tot gefaalde testen en onbruikbare data hebben geleid. Met de beperkte hoeveelheid aan testmateriaal zou dit uiteindelijk onvoltooide testen tot gevolg hebben gehad. Ook het probleemoplossend vermogen is van belang geweest. Tijdens de productie van de proefstukken zijn problemen slechts miniem geweest en konden met weinig moeite verholpen of omzeild worden. Echter, in de geplande testperiode zijn de testfaciliteiten 60% van de tijd door derde partijen gereserveerd waardoor het testplan continue moet worden bijgesteld. Dit heeft ook ingehouden dat de machines ingesteld en gebruikt zijn zonder hulp van de aanwezige technici. Gebrek aan een kritische houding leidt dan tot schade aan proefstukken en machines. Door ieder testresultaat in detail te analyseren wordt er tevens voor gezorgd dat elke test met meer nauwkeurigheid uitgevoerd kan worden dan de vorige. Met een lastige taak en het zelfstandig uitvoeren van deze taak is kritisch handelen op met niveau 3 afgesloten.

11. Systematisch een probleem aanpakken (creatieve, plan- en projectmatige werkhouding)

Verwachting;

Doordat plannen een belangrijk onderdeel van de onderzoeksopdracht is, zal deze competentie ten eerste getoetst worden gedurende het afstudeerproject. Gezien het aantal testen dat moet worden uitgevoerd en de weinig (en zeer populaire) testmaterialen is het tijdig voorbereiden, plannen en reserveren van uitermate belang om de onderzoeksopdracht binnen de gestelde periode uit te kunnen voeren. Vanwege deze druk op de planning en projectmatige werkhouding is deze competentie op niveau 3 geschat.

Feedback:

Aangezien het afstudeerproject meerdere fasen heeft doorgelopen waarbij voorbereidingen voor latere fase vooraf gemaakt moesten worden, is een systematische aanpak een vereiste geweest. Wegens onbekende factoren is tijdens de productie van de proefstukken een creatieve werkhouding aan bod gekomen, terwijl bij het opstellen van het testplan juist een plan- en projectmatige werkhouding nodig is geweest. Bij alle drie de gevallen is dit op niveau 3 vereist en uitgevoerd.

12. Samenwerken (sociaal communicatieve vaardigheden)

Verwacht:

Om deze onderzoeksopdracht effectief uit te kunnen voeren, is er veel kennis nodig m.b.t. de diverse tests en proefopstellingen. Ook moet er in de werkplaats veelal worden samenwerkt met instructeurs om gebruik te mogen maken van bepaalde machines. Daarnaast zijn er een aantal specialisten van SE Blades beschikbaar welke kennis van het materiaal hebben. Door goed samen te werken met alle partijen kan de opdracht optimaal worden aangepakt en eventuele fouten vooraf worden uitgesloten.

Feedback:

Zoals verwacht was samenwerken een belangrijk onderdeel van de afstudeeropdracht. Bij het produceren van de proefstukken en het gebruiken van de faciliteiten van de TU Delft is regelmatig contact geweest met de technici om fouten te voorkomen. Moeilijkheden in de planning doordat de testbank door derde partijen gereserveerd is kon deels worden opgelost door te overleggen met deze partijen en tussendoor en 's nachts te kunnen testen. Ook is er regelmatig contact gezocht met de medewerkers van SE Blades, wat met de geografische afstand (Hengelo) en drukke planningen een lastige taak is gebleken. Uiteindelijk is dit laatste punt door gebrek aan medewerking niet vlekkeloos verlopen, maar is wel inzet en uitvoering van competentieniveau 3 getoond.

13. Persoonlijke en professionele ontwikkeling

Verwacht:

De mate van zelfstandigheid aan de onderzoeksopdracht is vele malen hoger dan gedurende de studie zelf. Ook is er vanwege de strakke planning een grotere tijdsdruk en verplichting om de planning te volgen. Dit heeft tot gevolg dat de student zich professioneel in moet zetten om aan deze verplichtingen te voldoen. Daarnaast is de werkplek multicultureel met als voertaal Engels. Dit zal de persoonlijke ontwikkeling van de student bevorderen.

Feedback:

Zoals hierboven beschreven was de noodzaak te groeien in persoonlijke en professionele ontwikkeling t.o.v. het niveau gedurende de rest van de studie groot. Bij het zelfstandig uitvoeren van de opdracht moest het initiatief in elke situatie zelf genomen worden. Bij minimale medewerking van bepaalde personen vergt het een professionele houding om tot een voldoende resultaat te kunnen komen. Ook aan de nauwkeurigheid waarmee de testen voorbereid en uitgevoerd zijn, zijn hogere eisen gesteld dan tijdens de rest van de studie. Gezien de complexe omstandigheden en de zelfstandigheid die hierbij nodig is geweest is zeker niveau 3 aangetoond.

14. Zelfverantwoordelijk werken

Verwacht:

De student wordt geacht de onderzoeksopdracht zelfstandig uit te voeren. Gezien de complexe aard van de opdracht met meerdere belanghebbenden en het belang van betrouwbare en correcte resultaten, is deze competentie op competentieniveau 3 beoordeeld.

Feedback:

Gedurende de afstudeeropdracht is in week 7 éénmalig door de bedrijfsbegeleider gevraagd hoe het met de voortgang stond. Daarnaast was het aan de student zelf om naar de planning te werken en deze te beheren. Verantwoordelijkheid om tijdig een voldoende resultaat te kunnen leveren heeft dus volledig bij de student gelegen. Met een lastige opdracht in een complexe omgeving heeft dit een competentieniveau 3.

15. Kunnen functioneren in een internationale en/of multiculturele context

Verwacht:

SE Blades technology is een wereldwijd bedrijf met vestigingen op meerdere continenten. Tegelijkertijd wordt het opdracht uitgevoerd in het DASM laboratorium waar voornamelijk internationale studenten en onderzoekers werken. Bij beide bedrijven is de voertaal Engels, en komen de collega's uit alle hoeken van de wereld. Hoewel de onderzoeksopdracht zelfstandig uitgevoerd moet worden is de context internationaal en de werkomgeving multicultureel. Gezien de immersie hiervan is het niveau op 4 beoordeeld.

Feedback:

Zoals verwacht was de complete omgeving waarin de afstudeeropdracht is uitgevoerd internationaal. De bedrijfsbegeleider was een Engels sprekende Indiër, en de literatuur uitsluitend Engels. De resultaten richting bedrijf zijn om deze reden ook allemaal in het Engels gepresenteerd. De voertaal binnen zowel het bedrijf als de werkplaats is Engels en de collega's op de werkplek komen uit alle uithoeken van de wereld. Een competentieniveau van tenminste 3 is nodig geweest om succesvol en effectief te communiceren met alle partijen.

V. Bedrijfsbeoordeling

Bedrijfsbeoordeling uitvoering afstudeeropdracht

De Haagse Hogeschool, Academie voor Technology, Innovation & Society Delft

Naam student	Bob Verdoes
Studentnummer	10102914
Opleiding student	Werktuigbouwkunde
Afstudeer periode	9 februari 2015 - 5 juni 2015
Naam bedrijf	SE Blades Technology bv
Naam bedrijfsmentor	Harald Bersee

Wat is uw oordeel over de prestatie van de student tijdens de afstudeerperiode, onderscheiden naar de volgende punten:

O = onvoldoende; T = twijfelachtig; V = voldoende; G = goed; U = uitstekend

	O	T	V	G	U
Initiatief			X		
Systematische aanpak			X		
Kwaliteit gegevensverzameling			X		
Kwaliteit (tussen)rapportage			X		
Theoretische kennis			X		
Praktische inzicht			X		
Nauwkeurigheid/zorgvuldigheid				X	
Houding en optreden			X		
Zelfstandigheid			X		
Werktempo				X	
Totale beoordeling			X		

Paraaf bedrijfsmentor



Paraaf student



Z.O.Z.

Verdere op- en aanmerkingen over de student en/of de afstudeeropdracht.

Datum: 4/6/15

Datum: 4/6/15

Voor akkoord bedrijfsmentor:

Voor gezien student:



Bovenstaande beoordeling is een ingescande kopie. Aan de inhoud zijn geen aanpassingen verricht na ondertekenen. Het originele document is bijgevoegd voor dhr. van der Meulen, stagecoach.

VI. Evaluatieformulieren HHS

- Los bijgevoegd voor de afstudeercoach.