

Productiefouten in Koolstofvezellaminaten

Wijnand Harmsen (1176528), Rob Hoebe (1175254), Michiel Verburg (1178911)

Samenvatting

Onderzocht is, hoeveel de treksterkte van een koolstofvezellaminaat met een niet-optimale oriëntatie af zal wijken van de treksterkte van een koolstofvezellaminaat waarbij de vezellagen wel ideaal zijn georiënteerd. Voor vijf verschillend georiënteerde vezellaminaten zijn de testresultaten vergeleken met de theoretische waarden, berekend volgens de klassieke laminaat theorie. Hieruit blijkt dat de treksterkte bij een fouthoek van de vezelmatten van 10°, een afwijking tot 35% van de theoretische waarde veroorzaakt. Hiermee is aangetoond dat de KLT geen goede basis is voor degelijke berekeningen.

1. Inleiding

Het Formula Student team (FS) past koolstofvezelmatten toe in de monocoque van haar auto, deze zijn geweven als een doek waarin de vezels haaks op elkaar liggen (de vezels liggen in de lengte en dwarsrichting van het doek; [0°/90° oriëntatie]).

Een koolstofvezellaminaat gaat zich meer isotroop gedragen als de op elkaar liggende matten onderling 45° zijn gedraaid; [0°/90° +45°/-45°]. Dit gedrag is van belang voor FS, omdat zij verder geen rekening houden met de richting van de spanningen.

De monocoque wordt met de hand vervaardigd door koolstofvezelmatten in een mal te leggen en vervolgens met hars te impregneren. Mede door lastige bochten in de mal komt de vezelrichting van de matten niet altijd onder de gewenste hoek te liggen. De afwijkingen lopen bij FS op tot 10°. Hierdoor neemt de kracht die het materiaal op kan nemen, vermoedelijk, af. FS weet echter niet hoe groot deze afname is en zou hier graag meer inzicht in willen hebben.

FS rekent aan haar monocoque a.d.h.v. een model dat uitgaat van statische belastingen. Het onderzoek is erop gericht een voorspelling te geven over de afwijking van de maximale treksterkte, geïntroduceerd door verkeerd gelegde vezelmatten.

Een theoretisch antwoord op deze vraag kan gegeven worden m.b.v. de klassieke laminaat theorie (KLT). In deze theorie wordt voor iedere vezellaag de stijfheid in de belastingsrichting uitgerekend. Het gemiddelde van deze stijfheden vormt de stijfheid van het laminaat, waarbij de hechting tussen de verschillende lagen perfect wordt verondersteld. Uit deze stijfheid kan met het principe van de wet van Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$), de treksterkte worden bepaald. Dit geeft met het gegeven materiaal een afwijking van 9% bij een fouthoek van 10°.

Hypothese:

“De treksterkte van het gegeven koolstofvezel-epoxy laminaat verandert maximaal 9% als de vezelmatten een mis-oriëntatie van 10 graden hebben.”

2. Methode

Om te onderzoeken welke invloed de legfout van de vezelmatten in het koolstofvezellaminaat op de treksterkte heeft zijn er meerdere laminaten samengesteld, waarin de vezellagen verschillende oriëntaties hebben. Uit ieder laminaat zijn zeven stroken gehaald die in de trekbank op treksterkte zijn getest. Voor het vergelijken van de resultaten met ander onderzoek is er gekozen voor het volgen van de teststandaard ASTM D3039. Teststroken moeten volgens deze standaard de afmetingen hebben zoals weergegeven in tabel 1.1

Tabel 1.1 Afmetingen teststroken volgens ASTM D3039

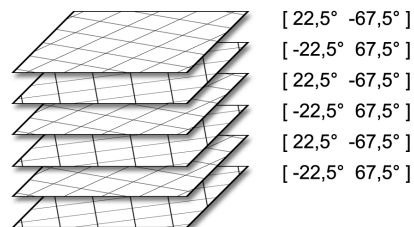
Lengte	Breedte	Dikte	Reksnelheid
250 mm	25 mm	2,5 mm	2mm/min

Het materiaal dat wordt gebruikt is:

Koolstofvezel [0/90]
 Dikte per laag 0,4mm
 Aantal lagen 6
 Oriëntaties [0/90 +45°/-45°]
 Belastingshoek 22.5
 Hars: Dow XZ 92742, harder XZ 92594

In het onderzoek is uitgegaan van 6 lagen koolstofvezel, waarmee de totale dikte op 2,4mm uit zou moeten komen. Deze kwam echter uit op 1,7mm. Voor de vergelijking met andere onderzoeken is dit nadelig, maar binnen dit onderzoek niet.

Als het gehele [0°/90° +45°/-45°] laminaat onder een hoek van 22,5° wordt belast, ligt geen van de matten met de vezels in de belastingsrichting, waardoor veranderingen binnen het laminaat beter zijn waar te nemen. Dit is dan ook de uitgangoriëntatie voor ons onderzoek; de basisoriëntatie (figuur 2.1)



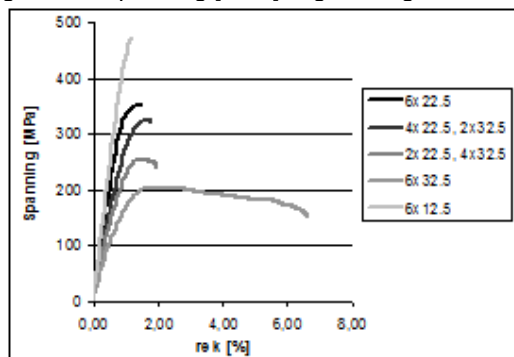
Figuur 2.1 Basisoriëntatie testsample

Gezorgd is voor een symmetrie in de lagen zodat de schuifspanningen beperkt blijven, omdat zijwaartse vervormingen nadelig zijn voor de meetresultaten. Daarom zijn in dit onderzoek telkens twee lagen tegengesteld gedraaid over een hoek van 10° t.o.v. de basisoriëntatie (zie Tabel 3.1), zodat zij onder een hoek van $[32,5^\circ-57,5^\circ]$, respectievelijk $[-32,5^\circ/57, 5^\circ]$ t.o.v. de belastingsrichting kwamen te liggen. Dit is gedaan tot alle 6 de lagen onder deze hoeken lagen. Om aan de andere kant van de basisoriëntatie veranderingen te meten zijn alle 6 de lagen ook onder een hoek van $[12,5^\circ-77,5^\circ]$ en $[-12,5^\circ/77,5^\circ]$ t.o.v. de belastingsrichting gelegd. Tabel 3.1 geeft de met de KLT berekende treksterkte per oriëntatie.

Voor de vervaardiging van de laminaten gebruikt FS een techniek die vacuüm bagging heet. Voor het vervaardigen van de proefstukken is dezelfde techniek gebruikt waarbij alle omgevingsinvloeden gelijk gehouden zijn.

3. Resultaten

In figuur 3.1 is per type laminaat de gemiddelde gemeten spanning [MPa] uitgezet tegen de rek [%].



Figuur 3.1 Spanning van de samples uitgezet tegen de rek

De treksterkte is per type weergegeven in tabel 3.1, de rek bij maximale belasting en de maximale rek in tabel 3.2.

Tabel 3.1 Treksterkte

Oriëntatie	Theoretische treksterkte [MPa]	Gemeten treksterkte [MPa]	Std. Afw meting
6x22.5	326,7	354,0	4,43
4x22.5, 2x32.5	312,3	320,6	3,55
2x22.5, 4x32.5	298,7	255,5	1,81
6x32.5	310,1	205,0	2,55
6x12.5	350,4	472,3	11,4

Tabel 3.2 Maximale rek en rek bij maximale belasting

Oriëntatie	Rek bij f_{max} [%]	St. afw.	Max rek [%]	St. afw.
6x22.5	1,40	0,341	1,42	0,336
4x22.5, 2x32.5	1,46	0,150	1,57	0,172
2x22.5, 4x32.5	1,17	0,494	1,52	0,580
6x32.5	1,86	0,146	6,80	0,812
6x12.5	1,09	0,238	1,09	0,238

Na het breken van de eerste vezels was in de testresultaten plastisch gedrag waar te nemen. Belastingscurven van laminaattypen waarbij de vezels minder recht in de belastingsrichting liggen, vertoonden een groter plastische gebied.

De maximale spanning verschilt met een significantieniveau van 1% per type. De laminaattypen waarbij alle lagen zijn verdraaid vertonen een significant (1%) verschil in rek bij maximale belasting. De overige twee typen niet.

4. Discussie en conclusies

Als de vezelmatten een mis-oriëntatie van 10° hebben, verandert de treksterkte van het gegeven koolstofvezel-epoxy laminaat maximaal 42% t.o.v. de basisoriëntatie en maximaal 35% t.o.v. de berekende waarde. De hypothese moet dus worden verworpen.

Over de rek kan geen directe conclusie getrokken worden. Er is een lichte tendens te zien dat het materiaal meer rekt, naarmate er minder vezels in de richting van de belasting liggen. Opvallend is dat de rek fors toeneemt als alle vezelmatten onder een hoek van $\pm 32,5^\circ$ liggen. In deze situatie hebben alle vezels een grote hoek t.o.v. de belastingsrichting en kunnen zich allen evenveel herschikken in het materiaal alvorens te bezwijken. Bij een hoek van $\pm 12,5$ graden is de rek juist kleiner. Hier liggen de vezels meer in de belastingsrichting en kunnen zich daardoor minder herschikken.

Voor hoekverdraaiingen tot 10° geeft de KLT geen goede indicatie voor de treksterkte. De afwijking t.o.v. de KLT wordt groter naarmate de vezels meer afwijken van de basisoriëntatie. Het is daarom aannemelijk dat de veronderstelling in de KLT, dat de hechting tussen de verschillende lagen perfect is, niet correct is. Ook wordt verwacht dat het materiaalgedrag niet zo ideaal is als gemodelleerd.

FS houdt in haar berekeningen geen rekening met de werkelijke oriëntatie van de vezelmatten, maar gebruikt enkel vaste materiaalwaarden. Bij volgende berekeningen wordt aanbevolen in de treksterkte een marge van ten minste 50% aan te houden.

Hoe het materiaal zich onder dynamische belasting gedraagt, is niet bekend. In de toepassing bij FS, wordt het materiaal wel aan dergelijke belastingen blootgesteld. In deze richting valt dus nog voldoende te onderzoeken. Ook de invloed van het verdraaien van vezelmatten bij een grotere hoeveelheid lagen is nog niet bekend.

Referenties

- 1) Mechanical testing of advanced fibre composites ed. by J. Hodgkinson
- 2) Fracture of polymers, composites and adhesives 33 papers presented at the second ESIS TC4 Conference
- 3) Vezelversterkte kunststoffen mechanica en ontwerp, A.H.J Nijhof, VSSD
- 4) ASTM D3039