

1 Inleiding

1.1. De anisotropie van vezelversterkte kunststoffen

In de technische sector worden voor het materialiseren van een ontwerp veelal homogene, isotrope materialen gebruikt, en dan voornamelijk metalen. *Homogeen* betekent dat het materiaal in elk punt dezelfde eigenschappen heeft; deze zijn dus plaatsonafhankelijk. *Isotroop* wil zeggen dat de eigenschappen richtingsonafhankelijk zijn.

De in de natuur groeiende constructiematerialen als vezels, hout en been, zijn in het algemeen niet homogeen en isotroop. Zij hebben een structuur die in groeirichting andere eigenschappen aan het materiaal verleent dan in richtingen dwars erop. Zo is in hout een in de groeirichting georiënteerd vaatstelsel te onderkennen, en bestaan de celwanden ervan uit kruislings op elkaar liggende lagen van evenwijdige vezels in een inbeddingsmateriaal.

Daardoor geïnspireerd worden steeds meer *composietmaterialen* ontwikkeld en toegepast. Hieronder worden materialen verstaan die zijn samengesteld uit ten minste twee verschillende, duidelijk onderscheiden componenten. Deze materialen zijn dus *heterogeen* van structuur: plaatselijk bevindt zich of de ene component of een andere; de eigenschappen zijn *plaatsafhankelijk*.

Als er sprake is van twee componenten, dan fungeert de ene component meestal als inbeddingsmateriaal en wordt daarom *matrix* genoemd. De andere component dient ter versterking van de matrix. Naar de vorm kan er bij het versterkingsmateriaal onderscheid worden gemaakt tussen partikels en vezels. De partikels hebben afmetingen kleiner dan 50 μm , waarvan er in het algemeen geen overheerst (bol, kubus, viervlak, of daarop gelijkend), behalve bij plaatjes. Daarom zijn de partikelversterkte materialen meestal ook isotroop. Maar bij een vorm als die van plaatjes kan er *anisotropie* optreden, zoals bij coatings met aluminium plaatjes die parallel aan het oppervlak gaan liggen: de eigenschappen zijn dan *richtingsafhankelijk*.

Vezelversterkte materialen zijn opgebouwd uit vezels die zijn ingebed in een matrix. Diverse materialen kunnen als matrix worden toegepast: beton (met staalvezels), metalen (zoals aluminium met boronvezels), kunststoffen. De onderhavige materie blijft beperkt tot *vezelversterkte kunststoffen*; ook wel gewapende kunststoffen genoemd, al kan laatstgenoemde benaming een wijdere betekenis hebben en ook kunststoffen omvatten die met een vulstof versterkt zijn (in de vorm van een dispersie).

Vezel is de algemene benaming voor een constructie-element dat gekenmerkt wordt door zijn kleine afmetingen in de dwarsdoorsnede en zijn in verhouding daartoe grote lengte en daarmee gepaard gaande grote flexibiliteit. Een continue vezel wordt vaak *filament* genoemd. Een *monofilament* is een 'garen' dat slechts uit één, relatief dikke, filament bestaat. Een garen dat uit meerdere, vaak zeer vele, filamenten bestaat wordt *multifilamentgaren* genoemd.

De meest bekende vezelsoorten ter versterking van kunststoffen zijn glas-, koolstof- en aramidevezels. De diameter van deze vezels ligt in de orde van 10 μm . Ter vergelijking: een mensenhaar is een factor 10 dikker. Voor het opnemen van de mechanische belasting vormen de vezels de belangrijkste component van het composietmateriaal.

De matrix zorgt voor het onderlinge, stijve verband, beschermt de vezels tegen mechanische en chemische aantasting en draagt in meer of mindere mate belasting over van de ene vezel op de andere. Daarvoor is een goede hechting tussen vezels en matrix van wezenlijk belang.

De als matrix in gebruik zijnde kunststoffen kunnen globaal worden onderscheiden in twee groepen: thermoharders en thermoplasten.

Thermoharders (harsen) harden, na menging in de vloeibare fase, uit door netwerkvorming (Eng. *cross-linking*). Bij te hoog oplopende temperaturen verbrost de uitgeharde hars en valt uiteen. Voorbeelden ervan zijn onverzadigde polyesterharsen en epoxyharsen.

Thermoplasten daarentegen bestaan gewoonlijk uit lange ketenmoleculen. Zij verweken bij toenemende temperatuur, worden dan plastisch. Dit proces is reversibel: bij afkoelen worden ze weer stijf. Voorbeelden zijn polypropreen en polyamide.

Er wordt hier uitgegaan van langvezelige versterking, waarbij de vezeloriëntatie een wezenlijke rol speelt in het gedrag van de vezelversterkte kunststof (vvk). En wel in een zodanige mate dat het zaak is om de vvk er zelf voor te ontwerpen.

De richtingsafhankelijkheid blijft niet alleen beperkt tot de mechanische eigenschappen, maar strekt zich uit tot vele andere fysische eigenschappen. Een beknopt overzicht:

- *vormverandering* ten gevolge van mechanische belasting: stijfheid;
t.g.v. temperatuurverandering: thermische expansie;
t.g.v. opname van vloeistof: zwellings;
- *transport* elektrische geleiding;
diffusie van gas of vloeistof;
- *geleiding* van warmte: warmtegeleidingscoëfficiënt;
magnetisch veld: magnetische permeabiliteit;
elektrisch veld: diëlektrische constante;
- *bezwijken* t.g.v. mechanische belasting: sterkte;
t.g.v. verschil in thermische uitzetting.

De mathematische beschrijving van het stijfheidsgedrag van een composietmateriaal blijkt ook bruikbaar te zijn voor de beschrijving van het gedrag met betrekking tot andere richtingsafhankelijke eigenschappen.

1.2. Kort historisch overzicht

De mens maakt composietmaterialen sedert hij de wanden van zijn uit takken gevlochten hut dichtsmeedde met leem. Het gebruik van stenen in de vorm van gedroogde mengsels van *stro en leem* was in de oudheid wijd verspreid: bij zowel Chinezen als Egyptenaren en Israëlieten. De functie van het stro was tweeledig: waterafvoer om tot in de kern te drogen, en versterking om ook bij scheurvorming voor verband te zorgen. De Egyptenaren lijmden *fineerlagen* op elkaar om de sterkte van het hout te verhogen en de gevolgen van zwellen en krimpen tegen te gaan. Er is daarvan een

vondst bekend uit ca. 1500 v. Chr. In het graf van Toetanchamon (ca. 1350 v. Chr.) zijn *composietbogen* gevonden die zijn opgebouwd uit op elkaar gelijmde dierlijke pezen en houtlagen. Soortgelijke gelamineerde bogen zijn ook aangetroffen bij de Mongolen. Andersoortige gelamineerde structuren heeft men gevonden bij ceremoniële zwaarden uit het Oude China en Japan: daarbij zijn bewerkt ijzer en staal op elkaar gesmeed.

De geschiedenis van vezelversterkte kunststoffen is echter vrij recent; lit.: [34]. Het kunststoftijdperk laat men aanvangen in 1868, toen John Wesley Hyatt in de USA het *celluloid* ontwikkelde. Het beginpunt van de vezelversterkte kunststoffen ligt in 1907. In dat jaar vroeg Leo H. Baekeland, een beroemd uitvinder van Belgische origine, in de USA patent aan op een proces waarbij de reeds bekende reactie van phenol en formaldehyde zodanig werd beheerst, dat op een gewenst ogenblik een versterkingsmateriaal, zoals zaagsel, weefsel, papier of ander vezelmateriaal, kon worden toegevoegd, en na het harden een zeer bruikbaar isolatiemateriaal werd verkregen. In 1909 werd het patent verleend, in 1922 de merknaam *bakelite* geïntroduceerd.

In 1913 vroeg Daniel J. O'Connor een Amerikaans patent aan – dat pas in 1918 werd verleend – voor de vervaardiging van het zogenoemde *formica*. Het vervaardigingsproces bestaat uit het wikkelen van papier, dat vóór het wikkelen wordt gedrenkt in hars; de niet-geharde buis wordt doorgesneden, vlak gedrukt en tijdens het persen uitgehard tot een vlakke plaat. In eerste instantie werd formica gebruikt ter vervanging van mica voor elektrische isolatiedoelinden, vandaar de naam.

In de werktuigbouw werden in het begin van de dertiger jaren van de afgelopen eeuw tandwielen, vervaardigd uit met linnen of katoenen weefsels versterkte phenolhars (*celleron*), in grote aantallen gebruikt voor de overbrenging van krukas naar nokkenas in automobielmotoren om het lawaai te reduceren.

Van oudere datum is de wefselversterking van rubber. In 1845/6 ontwikkelde en octrooieerde de Schot R.W. Thomson een *luchtband* voor rijtuigen, overigens zonder veel commercieel succes. In 1887 vond John Boyd Dunlop, eveneens een Schot, de luchtband opnieuw uit, verbeterde deze en verkreeg er in 1888 octrooi op. In datzelfde jaar werd de eerste luchtbandenfabriek gesticht. Deze banden waren voor rijwielen bestemd.

De exponentiële groei van het gebruik van vezelversterkte kunststoffen begon in 1940. Voor het beschermen van radarantennes in militaire vliegtuigen werden “radar domes” (afgekort tot *radomes*) ontwikkeld uit *onverzadigde polyester versterkt met glasvezels*. Deze koepels bleken bestand tegen de aerodynamische belastingen en extreme weersinvloeden, én – daar ging het om – ze waren doorlaatbaar voor radarstraling.

In 1944 vloog het eerste vliegtuig (een BT-15) met een vezelversterkte kunststof romp.

Na de tweede wereldoorlog werden de glasvezelversterkte kunststoffen in de burgermaatschappij geïntroduceerd. De toepassing ervan bleef stijgen: boten, automobielen, vrachtwagens, bussen, opslagvaten, materialen in de elektroindustrie, pijpleidingen, drukvaten, windmolenwieken. En niet te vergeten in de sportsector: polsstokken, vishengels, ski's, zeiljachten en motorboten, zeilplanken, hockeysticks, tennisrackets, enzovoort.

Tegelijkertijd breidde het aantal materialen, waarvan composieten (kunnen) worden gemaakt, zich gestaag uit. Naast de glasvezel kunnen hier genoemd worden de *koolstofvezel* en de *aramidevezel*. Deze vezels worden weer in verschillende typen,

dikten en vormen op de markt gebracht. Ook polyesterhars is in verschillende soorten verkrijgbaar, met elk zijn specifiek toepassingsgebied. Een van de belangrijkste thermohardende harsen naast polyester is *epoxyhars*, eveneens in vele soorten verkrijgbaar, ook als tweecomponentenlijm. En verder neemt de toepassing van thermoplastische kunststoffen – zoals polyamide en polypropreen, en meer geavanceerde als polyetherimide – als inbeddingsmateriaal toe.

1.3. Samenstelling; mengselregel

Om de samenstelling van vezelversterkt materiaal te bepalen, wordt er een proefstuk uitgenomen waarvan mag worden verondersteld, dat het qua samenstelling representatief is voor dat materiaal. Noem de massa van het proefstuk M_c , en het volume ervan V_c (subscript c van composietmateriaal). De massa's van de afzonderlijke componenten zijn respectievelijk M_f (subscript f van Eng. *fib*re, filament) en M_m (subscript m van matrix), en de volumes V_f en V_m . Stel dat er geen holtes (Eng. *voids*) in het materiaal aanwezig zijn, dan geldt:

$$M_c = M_f + M_m; \quad V_c = V_f + V_m.$$

Massa en volume zijn aan elkaar gerelateerd door de *volumieke massa* ρ , dit is de massa per volume-eenheid. De respectieve volumieke massa's zijn:

$$\rho_f = \frac{M_f}{V_f}; \quad \rho_m = \frac{M_m}{V_m}; \quad \rho_c = \frac{M_c}{V_c}. \quad (1.1)$$

De *volumefracties* v van de componenten zijn:

$$v_f = \frac{V_f}{V_c}; \quad v_m = \frac{V_m}{V_c}; \quad v_f + v_m = 1. \quad (1.2)$$

Indien deze volumefracties bekend zijn evenals de volumieke massa's van de componenten, dan volgt daaruit de volumieke massa van de composiet:

$$\rho_c = \frac{M_f + M_m}{V_c} = \frac{V_f \rho_f + V_m \rho_m}{V_c} \quad \rightarrow \quad \rho_c = v_f \rho_f + v_m \rho_m. \quad (1.3)$$

Deze laatste formulevorm wordt *mengselregel* (Eng. *rule of mixture*) genoemd.

In de praktijk wordt de samenstelling van bijvoorbeeld glas/polyester bepaald door van een proefstuk massa en volume te meten en vervolgens in een oven het polyester te verwijderen ('af te branden'), waarna het overblijvende glas materiaal kan worden geanalyseerd (opbouw van het vezelpakket, massa). Omdat de volumieke massa van de glasvezels genoegzaam bekend is, kunnen nu onder meer de volumefracties worden berekend.

Bij het vervaardigen van vvk producten zijn in het algemeen van het vezelmateriaal de massa's bekend (bijvoorbeeld van een weefsel of een gesneden-vezelmat de *areïeke*

massa, dat is de massa per oppervlakte-eenheid) en wordt de hoeveelheid hars afgewogen.

Anders gezegd, de *massafracties* m van de componenten zijn gegeven.

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} = \frac{V_f \rho_f}{V_c \rho_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} v_f; \quad m_m = \frac{M_m}{M_c} = \frac{V_m \rho_m}{V_c \rho_c} = \frac{\rho_m}{\rho_c} v_m; \quad m_f + m_m = 1. \quad (1.4)$$

Indien de volumieke massa's van de componenten bekend zijn, kunnen met (1.3) en (1.4) de massafracties worden berekend.

En omgekeerd, uit de massafracties de volumefracties. Uit (1.4) volgt de formule waarmee de volumieke massa van het composietmateriaal kan worden berekend uit de massafracties van de componenten:

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{v_f + v_m}{\rho_c} = \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m} \rightarrow \rho_c = \left[\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m} \right]^{-1}. \quad (1.5)$$

Substitutie in (1.4) levert de volumefracties. Uitgewerkt:

$$v_f = \frac{\rho_m}{m_m \rho_f + m_f \rho_m} m_f; \quad v_m = \frac{\rho_f}{m_m \rho_f + m_f \rho_m} m_m. \quad (1.6)$$

Juist deze volumefracties blijken voor diverse berekeningen nodig te zijn.

1.4. Technische constanten van een anisotroop materiaal

Om het stijfheidsgedrag van *isotroop, lineair elastisch* materiaal te karakteriseren worden de technische constanten *elasticiteitsmodulus* E , *glijdings- of afschuivingsmodulus* G , en *poissonverhouding* of *dwaarscontractiecoëfficiënt* μ gebruikt. Hiervan zijn er twee onderling onafhankelijk (o.o.); de derde kan berekend worden uit de andere met de relatie

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (1.7)$$

Aangenomen wordt dat de elasticiteitsmoduli voor trek en druk aan elkaar gelijk zijn. Daarnaast wordt voor kunststoffen vaak gebruik gemaakt van de *compressiemodulus* K (Eng. *bulk modulus*). Neem, om deze te definiëren, een lichaam van het bewuste materiaal met daaraan gekoppeld een orthogonaal assenstelsel $x_1 x_2 x_3$. Het lichaam wordt onderworpen aan een hydrostatische spanningstoestand met alzijdige spanning p . Bijvoorbeeld door het te dompelen in een vloeistof die wordt gecomprimeerd. Ten gevolge van deze spanningstoestand treedt er een relatieve volumeverandering ε_v op, *volumetrische rek* of *volumerek* genoemd, waarvoor geldt:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V' - V}{V} = \frac{V'}{V} - 1 = (1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_3) - 1 \approx \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3.$$

Hierin is V het oorspronkelijke volume en V' het volume van het lichaam onder de gegeven hydrostatische spanning; met ε_i , $i=1,2,3$ worden de (klein veronderstelde) relatieve rekken in de onderling loodrechte coördinaatrichtingen x_1, x_2, x_3 aangeduid. Bij isotroop materiaal zullen die gelijk zijn. De definitie van de compressiemodulus K luidt nu:

$$K \equiv \frac{p}{\varepsilon_v} = \frac{p}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}. \quad (1.8)$$

Bij druk zijn zowel p als ε_v negatief. Bijgevolg is K positief.

Het gebruik van de compressiemodulus blijft niet beperkt tot compressie, maar wordt ook uitgebreid tot expansie.

Voor isotroop materiaal gelden de onderlinge verbanden:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} = \frac{GE}{9G-3E} = \frac{2(1+\mu)G}{3(1-2\mu)}. \quad (1.9)$$

Voor de beschrijving van het stijfheidsgedrag van *anisotroop, lineair elastisch* materiaal kunnen evenzo de technische constanten worden gebruikt, maar deze grootheden zijn dan wel richtingsafhankelijk. Voor een goed begrip is het dan ook noodzakelijk om deze technische constanten opnieuw te definiëren.

Ga uit van genoemd orthogonaal assenstelsel $x_1x_2x_3$. Om de elasticiteitsmodulus in de x_1 -richting te kennen, dient er een *lijnsparing* in die richting, σ_1 , te worden aangelegd; de overige spanningscomponenten zijn dan 0. De rek in die richting, hier *primaire rek* genoemd, wordt weergegeven met ${}^1\varepsilon_1$. Met superscript 1 vóór ε_1 wordt aangegeven dat deze rek ε_1 wordt veroorzaakt door normaalspanning σ_1 . Zie fig. 1.1(a).

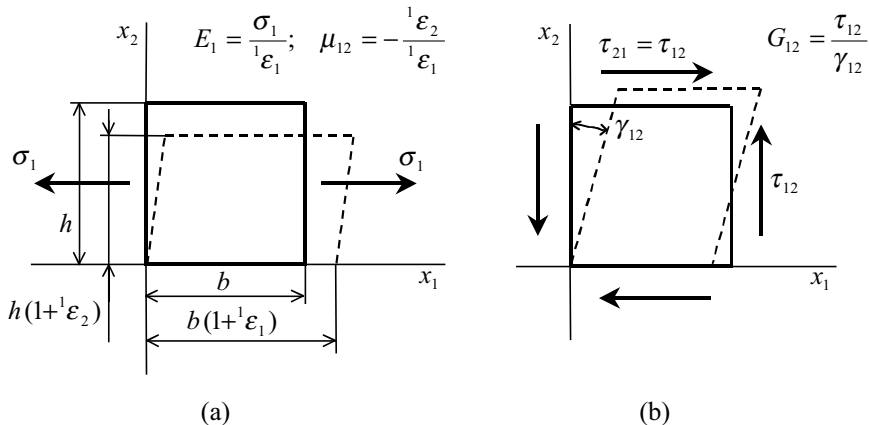


Fig. 1.1. Definitie van (a) elasticiteitsmodulus E_1 en poissonverhouding μ_{12} , en van (b) glijdingsmodulus G_{12} .

Het quotiënt van lijnspanning en primaire rek is per definitie gelijk aan de *elasticiteitsmodulus* in de lijnspanningsrichting:

$$E_1 \equiv \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}. \quad (1.10)$$

Dezelfde lijnspanning in x_1 -richting veroorzaakt een dwarsrek in x_2 -richting, aangeduid met ε_2 . De bijbehorende *poissonverhouding* is gelijk aan het quotiënt van dwarsrek en primaire rek, aangevuld met een minteken om het materiaalgedrag met een positieve waarde te karakteriseren:

$$\mu_{12} \equiv -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \quad (1.11)$$

Om de situatie ondubbelzinnig vast te leggen zijn er twee indices nodig. Afspraak is om die te geven in de volgorde '*oorzaak en gevolg*'. Index 1 duidt op de (enige) spanningscomponent die ongelijk 0 is, en 2 op de richting van de door die spanning veroorzaakte (dwars)rek.

Bij dezelfde lijnspanningstoestand is op analoge wijze de poissonverhouding μ_{13} te definiëren.

Evenzo wordt bij een lijnspanningstoestand in x_2 -richting met de technische constanten E_2 , μ_{23} en μ_{21} de vervorming van het materiaal beschreven; en bij lijnspanning in x_3 -richting met de technische constanten E_3 , μ_{31} en μ_{32} .

Let op: uit de definities volgt direct dat in het algemeen $\mu_{21} \neq \mu_{12}$, enzovoort.

Een *schuifspanning* $\tau_{12} = \tau_{21}$ in het x_1x_2 -vlak veroorzaakt er een *technische hoekvervorming* γ_{12} , d.i. de hoekverkleining van de rechte hoek tussen de positieve takken van x_1 - en x_2 -as, ook wel *afschuifhoek* genoemd. Verder wordt *zuivere schuifspanning* aangenomen: de andere spanningscomponenten zijn 0. Zie fig. 1.1(b). De bijbehorende *glijdingsmodulus* is dan, voorzien van de twee indices 1 en 2, per definitie:

$$G_{12} \equiv \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}}. \quad (1.12)$$

Op dezelfde wijze zijn de glijdingsmoduli G_{23} en G_{31} maatgevend voor de stijfheid tegen afschuiving in het x_2x_3 - respectievelijk x_3x_1 -vlak.

1.5. Eenvoudige modellen voor de stijfheid van unidirectioneel materiaal

De meest eenvoudige vorm van een materiaal met versterking van continue vezels – filamenten – is die waarbij de filamenten alle evenwijdig aan elkaar ingebed liggen: *unidirectioneel materiaal*, afgekort met u.d. materiaal. Ter illustratie daarvan kan dienen een gepultrudeerde staaf met een constante doorsnede en de filamenten in de lengterichting van de staaf. De filamentrichting van het u.d. materiaal wordt de

longitudinale richting genoemd, aangeduid met subscript L ; een richting loodrecht daarop *transversale richting*, onderscheiden met subscript T .

Wordt zo'n staaf in lengterichting getrokken, dan wordt zowel de filamenten als de omhullende matrix eenzelfde longitudinale rek opgelegd: filamenten en matrix vervormen in dit geval gezamenlijk. Deze situatie kan worden beschreven met een *parallelmodel* (zie fig. 1.2). De door filamenten en matrix ingenomen oppervlakken in de dwarsdoorsnede zijn constant en respectievelijk aangeduid met A_f en A_m . In longitudinale richting wordt een kracht F uitgeoefend; deling door de totale oppervlakte van de dwarsdoorsnede, $A_f + A_m$, levert de globale (of gemiddelde) longitudinale spanning, σ_L . De totale kracht is op te vatten als de som van de kracht in de filamenten, F_f , en die in de matrix, F_m . Dus:

$$F = \sigma_L(A_f + A_m) = F_f + F_m = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m. \quad (a)$$

Voor de longitudinale spanning geldt zodoende de mengselregel

$$\sigma_L = \frac{A_f}{A_f + A_m} \sigma_f + \frac{A_m}{A_f + A_m} \sigma_m = v_f \sigma_f + v_m \sigma_m. \quad (b)$$

Omdat de dwarsdoorsneden steeds identiek zijn, zijn de oppervlaktefracties gelijk aan de volumefracties!

Er wordt aangenomen dat de verschillen in dwarscontractie tussen filamenten en matrix mogen worden verwaarloosd (!). Dan mag worden verondersteld dat zowel in de filamenten als in de matrix een lijnspanningstoestand heerst.

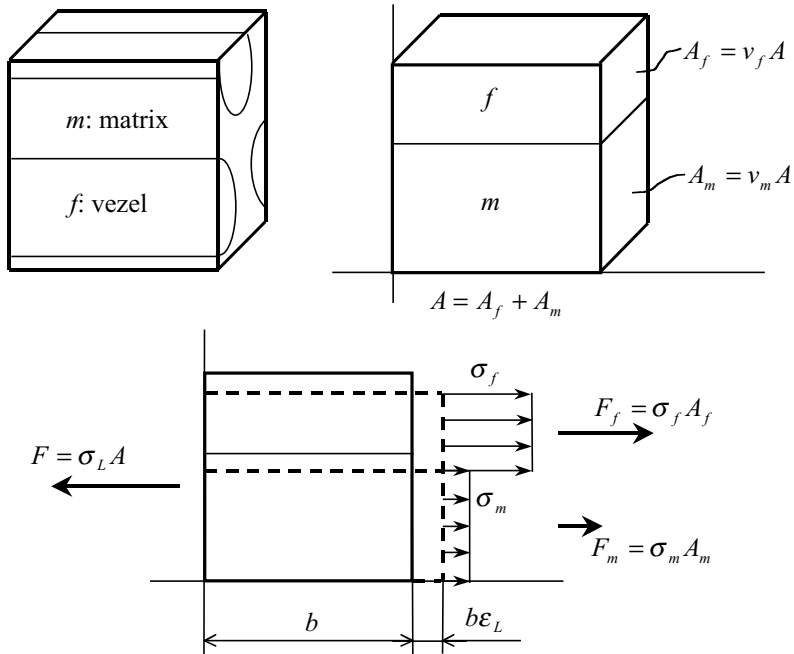


Fig. 1.2. Parallelmodel voor in longitudinale richting belaste unidirectionele vezelversterkte kunststof.

Geef de elasticiteitsmodulus van filamenten en matrix – beide isotroop verondersteld – aan met respectievelijk E_f en E_m . Dan geldt voor de rek(ken) in longitudinale richting, conform (1.10):

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = \varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L}. \quad (c)$$

Hiermee is de *longitudinale elasticiteitsmodulus* van het u.d. materiaal, E_L , geïntroduceerd. Met behulp van (b) volgt daarvoor uit (c) de mengselregel

$$E_L = \frac{\sigma_L}{\varepsilon_L} = \frac{v_f \sigma_f + v_m \sigma_m}{\varepsilon_L} = \frac{v_f \sigma_f}{\varepsilon_f} + \frac{v_m \sigma_m}{\varepsilon_m} = v_f E_f + v_m E_m. \quad (1.13)$$

Om een idee te hebben van het aandeel van de vezels daarin: de elasticiteitsmodulus van een glasvezel is ruwweg het 20-voudige van die van een thermoharder; en aramide en koolstof zijn nog aanzienlijk stijver dan glas.

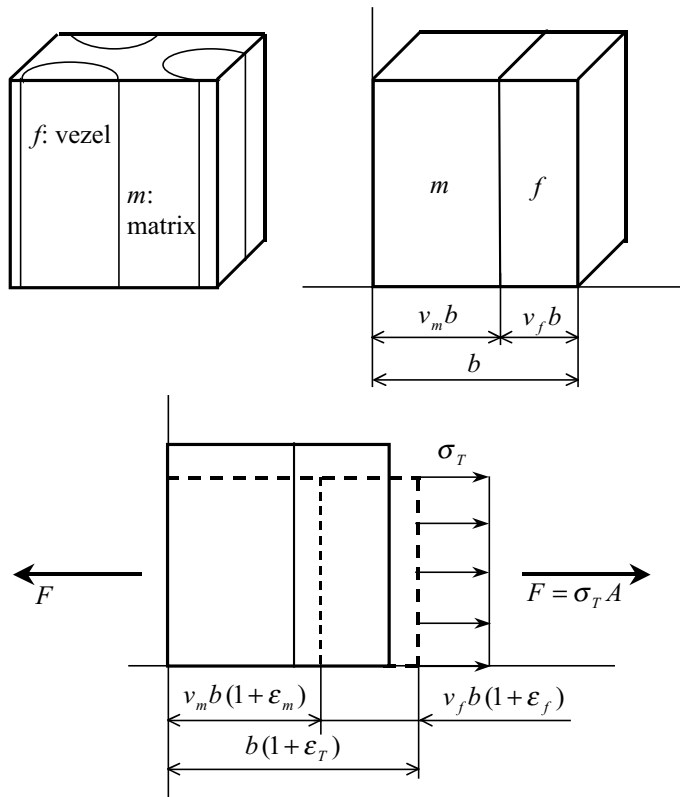


Fig. 1.3. Seriemodel voor in transversale richting belaste unidirectionele vezelversterkte kunststof.

De meest simpele benadering om de *transversale elasticiteitsmodulus* te schatten is bovenstaand parallelmodel in dwarsrichting te belasten met een lijnspanning. Zo wordt het *seriemodel* verkregen (zie fig. 1.3).

Nu heerst in beide componenten dezelfde transversale spanning σ_T , onder invloed waarvan de rekken in belastingsrichting verschillend zijn, ε_f en ε_m . De transversale rek van de composiet, ε_T , is gelijk aan de gewogen som van deze componentrekken:

$$\varepsilon_T = v_f \varepsilon_f + v_m \varepsilon_m \quad (d)$$

Omdat de spanningen gelijk zijn en er lijnspanning mag worden verondersteld, geldt:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f = \sigma_m = E_m \varepsilon_m = \sigma_T = E_T \varepsilon_T. \quad (e)$$

Uit de twee laatste vergelijkingen volgt:

$$\frac{1}{E_T} = \frac{\varepsilon_T}{\sigma_T} = \frac{v_f \varepsilon_f + v_m \varepsilon_m}{\sigma_T} = \frac{v_f \varepsilon_f}{\sigma_f} + \frac{v_m \varepsilon_m}{\sigma_m} = \frac{v_f}{E_f} + \frac{v_m}{E_m}. \quad (1.14)$$

Deze formule is op te vatten als een mengselregel voor de reciproke waarden van de elasticiteitsmoduli, $1/E$.

De schatting van de transversale modulus met behulp van (1.14) blijkt nogal af te wijken van de realiteit en is daarom in de praktijk niet bruikbaar! Deze afwijking wordt vooral veroorzaakt, doordat het seriemodel impliceert dat de dwarscontractie in beide componenten (in ten minste één richting) gelijk is. Maar in u.d. materiaal liggen de filamenten ingebed in de matrix, waardoor het matrix-'netwerk' vrijer kan contracteren. Er zijn gebiedjes die met een seriemodel kunnen worden vergeleken naast gebiedjes die meer op een parallelmodel lijken (zie fig. 1.4).

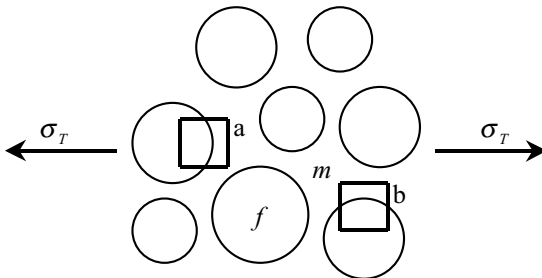


Fig. 1.4.
Dwarsdoorsnede van
transversaal belaste u.d.
vfk met gebiedjes met
een seriemodel (a) en met
een parallelmodel (b).

Het model kan worden verbeterd door een combinatie te nemen van een seriemodel en een parallelmodel. Neem een eenheidscel bestaande uit een filament met vierkante doorsnede en matrixmateriaal aan twee onderling loodrechte zijden. Door repetitie van de eenheidscel ontstaat een u.d. materiaal met een vierkant rooster van identieke vezels met vierkante doorsnede. De eenheidscel heeft ribben met lengte 1, zodat de vierkante vezeldoorsnede zijden ter lengte $\sqrt{v_f}$ heeft. Nu kan de eenheidscel op twee manieren worden opgedeeld: in een parallelmodel van matrix en een serieschakeling van filament en matrix (fig.1.5, deling a-a) respectievelijk een seriemodel van matrix

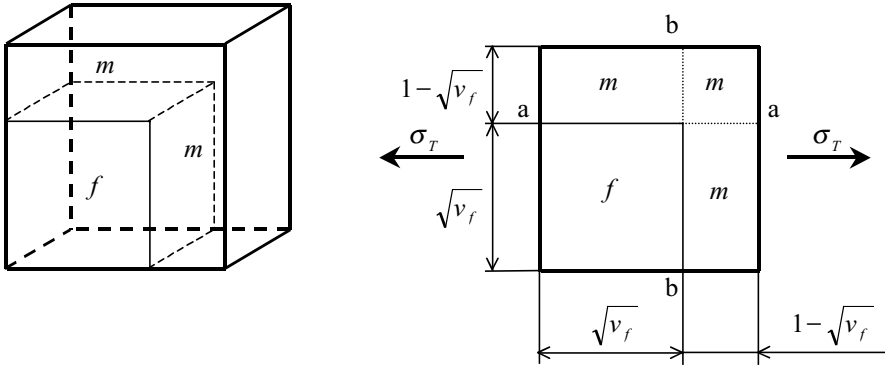


Fig. 1.5. Een transversaal belaste eenheidscel met vierkante vezel voor u.d. vvk. Het model is op te vatten als een parallelmodel van matrix en een serieschakeling van vezel en matrix (scheiding a-a) of als een seriemodel van matrix en een parallelschakeling van vezel en matrix (scheiding b-b).

en een parallelschakeling van filament en matrix (fig. 1.5, deling b-b). Eerstgenoemd model levert met de regels (1.13) en (1.14) voor de transversale elasticiteitsmodulus de schatting

$$E_T = \sqrt{v_f} \left[\frac{\sqrt{v_f}}{E_f} + \frac{1 - \sqrt{v_f}}{E_m} \right]^{-1} + (1 - \sqrt{v_f}) E_m. \quad (1.15)$$

Het tweede model levert de schatting

$$E_T = \left[\frac{\sqrt{v_f}}{\sqrt{v_f} E_f + (1 - \sqrt{v_f}) E_m} + \frac{1 - \sqrt{v_f}}{E_m} \right]^{-1}. \quad (1.16)$$

De verdere afleiding wordt aan de lezer overgelaten.

Dezelfde eenheidscel is geschikt voor de schatting van de *longitudinaal-transversale poissonverhouding* μ_{LT} (zie fig. 1.6). Er heerst dan een lijnspanning in longitudinale richting ('oorzaak'), met in beide componenten dezelfde longitudinale rek ε_L . Duid de poissonverhouding van een filament aan met μ_f en die van de matrix met μ_m . Als de filament vrijelijk kan contraheren, dan zullen de zijden van de vierkante doorsnede een factor $1 - \mu_f \varepsilon_L$ kleiner worden en de oppervlakte een factor $(1 - \mu_f \varepsilon_L)^2$.

Een soortgelijke contractie ondervindt de matrix als deze niet wordt gehinderd door de filamenten. Voor de respectieve oppervlakten in onbelaste en belaste toestand – zonder en met accent – geldt dus:

$$\begin{aligned} A'_f &= A_f (1 - \mu_f \varepsilon_L)^2 \approx A_f (1 - 2\mu_f \varepsilon_L); \\ A'_m &= A_m (1 - \mu_m \varepsilon_L)^2 \approx A_m (1 - 2\mu_m \varepsilon_L). \end{aligned} \quad (f)$$

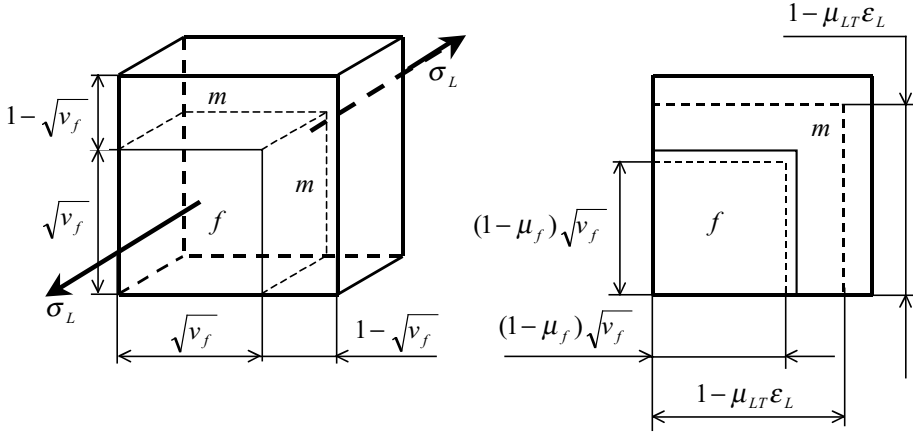


Fig. 1.6. Een longitudinaal belaste eenheidscel met vierkante vezel voor u.d. vvk. De vierkante doorsnedes van vezel en eenheidscel blijven vierkant, maar contraheren in verschillende mate.

Voor de totale oppervlakte geldt bij benadering:

$$\begin{aligned} A' &= A'_f + A'_m \approx A_f(1 - 2\mu_f\epsilon_L) + A_m(1 - 2\mu_m\epsilon_L) = \\ &= (A_f + A_m) \left[1 - 2 \frac{A_f\mu_f + A_m\mu_m}{A_f + A_m} \epsilon_L \right]. \end{aligned} \quad (g)$$

Uitgedrukt in μ_{LT} :

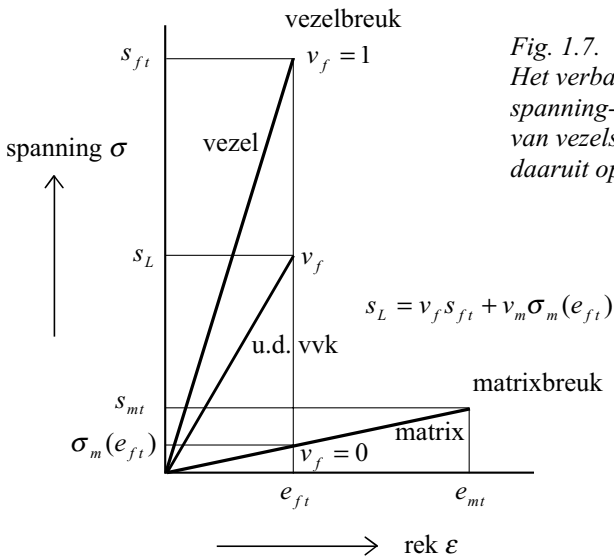
$$A' = A(1 - \mu_{LT}\epsilon_L)^2 \approx A(1 - 2\mu_{LT}\epsilon_L). \quad (h)$$

Uit een vergelijking van beide laatste formules volgt voor de longitudinaal-transversale poissonverhouding de mengselregel:

$$\mu_{LT} = \frac{A_f}{A_f + A_m} \mu_f + \frac{A_m}{A_f + A_m} \mu_m = v_f \mu_f + v_m \mu_m. \quad (1.17)$$

1.6. Eenvoudige modellen voor de sterkte van unidirectioneel materiaal

Unidirectioneel materiaal heeft diverse sterkten die gekoppeld zijn aan de hoofdrichtingen van het materiaal: de longitudinale treksterkte en druksterkte, de transversale trek- en druksterkte, de longitudinaal-transversale afschuifsterkte en de transversale afschuifsterkte. De gebruikelijke versterkingsvezels glas, koolstof en aramide gedragen zich bij zeer goede benadering lineair elastisch tot aan breuk. Zij zijn zeer veel stijver en sterker dan de kunststof matrix. De longitudinale sterkten worden gedomineerd door de vezels, – mits de breukrek van de matrix voldoende groot is ten opzichte van die van de vezels, – de andere sterkten meer door de matrix.



Bij een trekproef aan een u.d. staaf zullen de vezels breken als hun breukrek is bereikt. Als de breukrek van de matrix groter is, is de matrix nog niet aan breuk toe mits de verlenging wordt opgelegd. Zie het spanning-rekdiagram in fig. 1.7. Noem de spanning die op dat moment in de vezels heerst, de treksterkte van de vezels of *vezelsterkte*, aangeduid met s_{ft} (subscript t van trek). Als de bijbehorende *breukrek* van de vezels wordt aangegeven met e_{ft} , dan kan de spanning in de matrix op dat moment worden weergegeven met $\sigma_m(e_{ft})$. De *longitudinale treksterkte* van de u.d. staaf, s_{Lt} , is gelijk aan de gemiddelde of globale spanning bij vezelbreuk die volgt uit het parallelmodel:

$$s_{Lt} = v_f s_{ft} + v_m \sigma_m(e_{ft}) \approx v_f s_{ft}. \quad (1.18)$$

Het aandeel van de matrix in de longitudinale treksterkte van de u.d. vvk is gewoonlijk te verwaarlozen.

Intermezzo.

Maar de treksterkte van een vezel is niet uitsluitend een materiaalparameter. Tijdens een trekproef breekt de vezel in de zwakste doorsnede, zoals een ketting in de zwakste schakel (Eng. weakest link). Zodoende is de treksterkte afhankelijk van de inspanlengte: bij toenemende inspanlengte neemt de waargenomen treksterkte af.

Neem in gedachten een vezel met een gegeven lengte en bepaal er de sterkte van. Vervolgens wordt die vezel verdeeld in twee evenlange helften. De ene helft met de zwakste doorsnede heeft dezelfde sterkte als de oorspronkelijke, maar de andere helft is sterker. Het gemiddelde van de sterkte van beide helften is daarom groter dan de oorspronkelijke waarde.

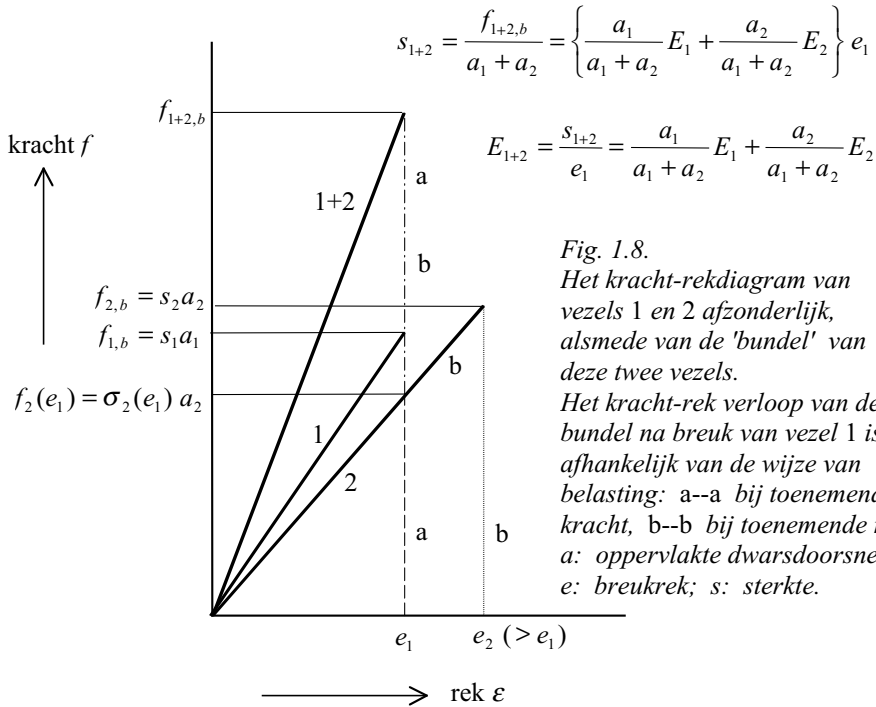


Fig. 1.8.

Het kracht-rekdiagram van vezels 1 en 2 afzonderlijk, alsmede van de 'bundel' van deze twee vezels.

Het kracht-rek verloop van de bundel na breuk van vezel 1 is afhankelijk van de wijze van belasting: a--a bij toenemende kracht, b--b bij toenemende rek. a: oppervlakte dwarsdoorsnede; e: breukrek; s: sterkte.

Bij het trekken van een bundel vezels wordt iedere vezel dezelfde verlenging opgelegd. De kracht in iedere vezel is een afgeleide grootheid. Een vezel breekt op het moment dat de kracht in de bewuste vezel de sterkte van de zwakste doorsnede overschrijdt. Daarom breken de vezels individueel, na elkaar, en zijn de breukplaatsen willekeurig verdeeld over de gehele inspanlengte: de breukzone valt samen met de inspanlengte. De bundelsterkte is door dat proces beduidend kleiner dan de som van de sterkten van de afzonderlijke vezels. In fig. 1.8 wordt dat gedemonstreerd aan de hand van het geval van een 'bundel' van twee vezels. Als de eerste vezel bezwijkt, zal de tweede vezel bij een trekproef met een continu toenemende kracht onmiddellijk ook bezwijken (traject a), maar bij een trekproef met continu toenemende verlenging verder worden uitgerekt tot zijn eigen breukrek is bereikt (traject b).

Indien de bundel vezels geïmpregneerd is met een kunststof, wordt door deze matrix verhinderd dat de vezels onafhankelijk van elkaar worden belast. Terwijl van een afzonderlijke vezel het ene lengtesegment bij dezelfde kracht meer uitrekt dan het andere ('dunnere en dickere doorsneden'), ondergaan in een geïmpregneerde bundel de vezels tussen twee dwarsdoorsneden dezelfde verlenging. De breukplaats wordt bepaald door de zwakste bundeldoorsnede; de breukzone is zeer kort van lengte. Op grond daarvan is de treksterkte van de geïmpregneerde bundel aanzienlijk groter dan die van de bundel in niet-geïmpregneerde toestand en ook groter dan de som van de treksterkten van de vezels.

Gezien het in dit intermezzo gestelde is het voor het toepassen van formule (1.18) noodzakelijk voor s_{fi} de treksterktewaarde in te vullen die wordt gemeten aan een *geïmpregneerde bundel*. Gewoonlijk wordt door de fabrikant deze sterktewaarde opgegeven. Overigens treedt ook bij de geïmpregneerde bundel het lengte-effect op. De *longitudinale druksterkte*, s_{Lc} (subscript c van compressie), is meestal lager dan de longitudinale treksterkte, absoluut gezien. Van de longitudinale elasticiteitsmodulus mag in het algemeen worden verondersteld dat hij voor druk dezelfde waarde heeft als voor trek. Maar de vezels kunnen bij longitudinale druk uitknikken in de relatief slappe matrix, en koolstof- en aramidevezels kunnen daarenboven nog inwendig stuijk en knik vertonen.

Trek- en druksterkte in transversale richting worden vooral door de matrix bepaald. Vanwege de hoge stijfheid van de vezels moet bij transversale trek de verlenging in die richting praktisch geheel worden opgebracht door de matrix. Beschouw een eenheidscel met twee helften van cirkelvormige vezeldoorsneden die door repetitie uitgroeit tot een vierkant rooster met ronde vezeldoorsneden (zie fig. 1.9). Bij trek in de richting van de verbindingslijn tussen de vezelmiddens zullen de grensvlakken van de eenheidscel loodrecht op de trekrichting parallel blijven vanwege symmetrie. Met het gevolg, dat zich in het matrixbruggetje tussen de twee vezels in trekrichting een sterke *rekconcentratie* voordoet. (Vaak wordt over *spanningsconcentratie* gesproken, maar hier is rekconcentratie meer op zijn plaats.) De vervormingstoestand in dat bruggetje is bepalend voor de *transversale treksterkte* van het u.d. materiaal, omdat hier veel eerder de grenswaarde van de vervorming van de matrix wordt bereikt dan in het doorlopende matrixgebied langs de vezeldoorsneden.

$$\frac{\ell'_b - \ell_b}{\ell_b} \gg \frac{\ell'_a - \ell_a}{\ell_a} \rightarrow \varepsilon_b \gg \varepsilon_a \rightarrow s_{Tt} \ll s_{mt}. \quad (1.19)$$

Bijgevolg is de transversale treksterkte van het u.d. materiaal, s_{Tt} , aanmerkelijk kleiner dan de treksterkte s_{mt} van de matrix.

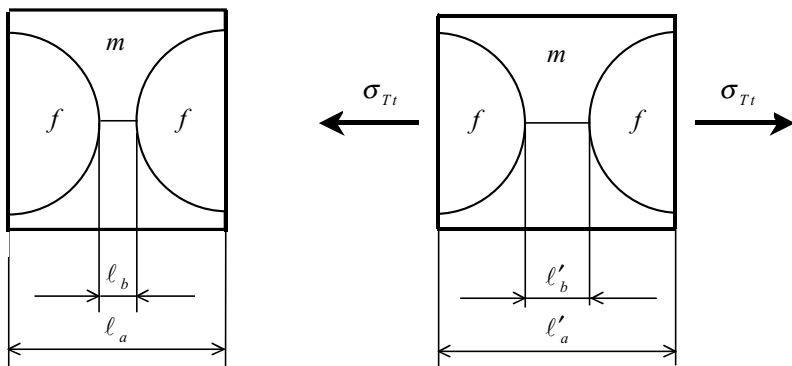


Fig. 1.9. *Rekconcentratie in het matrixbruggetje tussen twee vezels bij transversale trekbelasting van u.d. vvk.*

Het zal duidelijk zijn dat *hechting* tussen vezel en matrix een belangrijke rol speelt bij diverse bezwijkmechanismen. Door een zorgvuldige keuze van op elkaar afgestemde componenten en een goede uitvoering van het vervaardigingsproces is een zodanige hechting te verwezenlijken, dat niet onthechting maar matrixsterkte bepalend is voor de transversale sterkte-eigenschappen van de vvk.

Bij transversale druk treedt een ander bezwijkmechanisme op, namelijk afschuiving in vlakken evenwijdig aan de vezels die een hoek van $\pm 45^\circ$ maken met de drukrichting. (Zie fig. 1.10.) In die vlakken is de schuifspanning het hoogst. Het is de matrix die door afschuiving bezwijkt. Omdat bij druk van een kunststof staaf eenzelfde bezwijkmechanisme optreedt – afschuiving van de kunststof – is de *transversale druksterkte* van het u.d. materiaal, s_{Tc} , ongeveer gelijk aan de druksterkte s_{mc} van de matrix.

$$s_{Tc} \approx s_{mc} \quad (1.20)$$

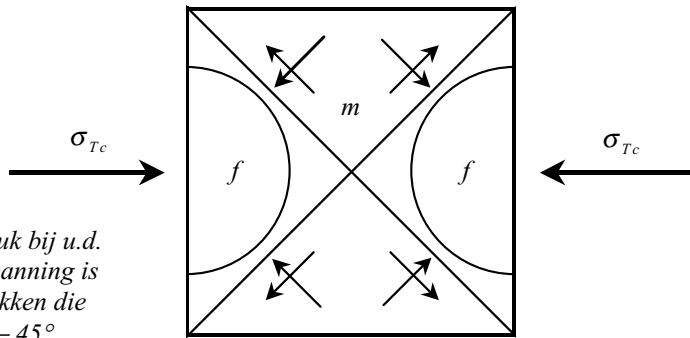


Fig. 1.10.
Transversale druk bij u.d. vvk. De schuifspanning is maximaal in vlakken die een hoek van $\pm 45^\circ$ maken met de lijnspanningsrichting.

Ook de *longitudinaal-transversale afschuifsterkte* in een vlak evenwijdig aan de vezels wordt gedomineerd door de afschuifsterkte van de matrix. Zie fig. 1.11(a). Er treedt breuk op door afschuiving van de matrix evenwijdig aan de vezels. In het transversale vlak heerst dezelfde schuifspanning, maar de vezeldoorsneden daarin verhinderen de afschuiving. In de praktijk wordt deze afschuifsterkte gemeten aan een korte u.d. proefstaaf met vierkante dwarsdoorsnede. De staaf wordt getest met een driepunts buigproef met korte *opleglengte* (fig. 1.12). Door de dwarskracht ontstaat er over de dwarsdoorsnede een parabolisch schuifspanningsverloop, met een maximum in het midden onder het middelste drukpunt. Daar bezwijkt de staaf door afschuiving in het middenvlak.

De zo bepaalde longitudinaal-transversale afschuifsterkte (Eng. *ILSS: interlaminar shear strength*) volgt uit de formule:

$$s_{LT} = \frac{3F_{\max}}{4bh} \quad (1.21)$$

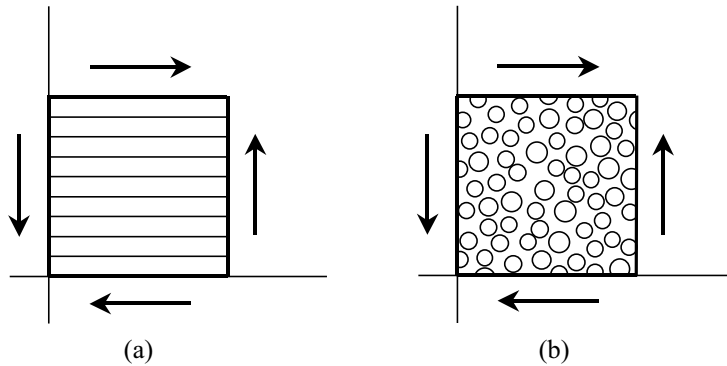


Fig. 1.11. Bijzondere schuifspanningen bij u.d. vvk. (a) Longitudinaal-transversale schuifspanning (de evenwijdige lijnen geven de vezelrichting aan). (b) Transversale schuifspanning.

Hierin zijn b en h respectievelijk breedte en dikte (hoogte) van de staafdoorsnede; in het geval van een vierkante doorsnede zijn deze vanzelfsprekend aan elkaar gelijk.

Bij afschuiving in het transversale vlak werken de schuifspanningen in vlakken evenwijdig aan de vezels. Zie fig. 1.11(b). Omdat het bezwijkmechanisme dan ongeveer gelijk zal zijn aan dat bij longitudinaal-transversale afschuiving, zal de bijbehorende *transversale afschuifsterkte* in de buurt liggen van de longitudinaal-transversale afschuifsterkte. Wel zullen de vezels hier eerder een obstakel vormen tegen afschuiving omdat de schuifspanning loodrecht op de vezels staat. Maar de breuk kan ook nu, om de vezels heen, uitsluitend door de matrix lopen.

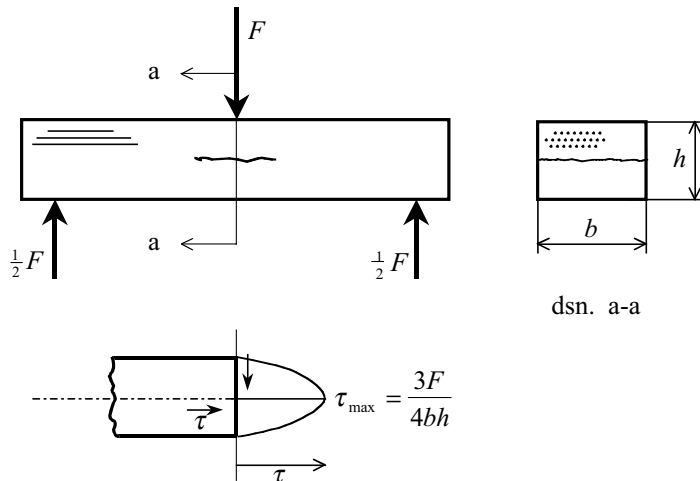


Fig. 1.12. Driepunts buigproef van u.d. vvk met korte opleglengte ter bepaling van de interlaminaire afschuifsterkte.

Het is in de praktijk niet verantwoord af te gaan op voorspelde sterktewaarden. Voor sterkteberekeningen aan vvk producten dient te worden uitgegaan van experimentele gegevens. Verder zal het noodzakelijk zijn prototypen, zo mogelijk op ware grootte, eventueel in het laboratorium, maar dan wel liefst onder praktijkomstandigheden, uitgebreid te beproeven. Denk daarbij ook aan de invloed van tijd, temperatuur, vochtigheid, straling, etc.

1.7. Specifieke stijfheid en specifieke sterkte

Een belangrijk argument voor het gebruik van vvk is het kunnen creëren van een lichte constructie. De mogelijkheid daartoe wordt vaak gestaafd door waarden voor de specifieke stijfheid en de specifieke sterkte. Om het begrip specifieke stijfheid nader te bekijken, worden twee cilindrische staven van verschillend materiaal, onderscheiden met de subscripts 1 en 2, met elkaar vergeleken. Aan deze staven wordt de eis gesteld, dat ze onder invloed van eenzelfde kracht F in lengterichting dezelfde rek ε vertonen. Als A de oppervlakte van de staafdoorsnede is en E de elasticiteitsmodulus van het materiaal, dan geldt voor spanning en rek:

$$\sigma = \frac{F}{A}; \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{EA}. \quad (a)$$

De gestelde eis resulteert in een gelijke trekstijfheid EA .

$$E_1 A_1 = E_2 A_2 \quad \rightarrow \quad \frac{A_1}{A_2} = \frac{E_2}{E_1}. \quad (b)$$

De zwaarte van een staaf kan worden uitgedrukt in de massa per lengte-eenheid, λ , *lineïeke massa* genoemd. Als ρ de volumieke massa is van het materiaal, dan geldt:

$$\lambda = \rho A. \quad (1.22)$$

De lineïeke massa's van de staven verhouden zich dan tot elkaar als:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\rho_1 A_1}{\rho_2 A_2} = \frac{\rho_1 E_2}{\rho_2 E_1} = \frac{E_2 / \rho_2}{E_1 / \rho_1}. \quad (1.23)$$

Dus, hoe groter de *specifieke elasticiteitsmodulus* E / ρ van het materiaal is, des te lichter zal de staaf zijn voor eenzelfde trekstijfheid.

Een andere eis voor de vergelijking van twee staven kan zijn dat ze bezwijken bij dezelfde grootte van de trekkracht. Als s_t de treksterkte is, dan is de trekkracht bij breuk gelijk aan:

$$F_{tb} = s_t A. \quad (c)$$

Uit de gestelde eis volgt:

$$F_{tb1} = F_{tb2} \quad \rightarrow \quad s_{t1} A_1 = s_{t2} A_2 \quad \rightarrow \quad \frac{A_1}{A_2} = \frac{s_{t2}}{s_{t1}}. \quad (d)$$

De lineïeke massa's van de staven verhouden zich dan tot elkaar als:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\rho_1 A_1}{\rho_2 A_2} = \frac{\rho_1 s_{t2}}{\rho_2 s_{t1}} = \frac{s_{t2} / \rho_2}{s_{t1} / \rho_1}. \quad (1.24)$$

In woorden: hoe groter de *specifieke treksterkte* s_t / ρ van het materiaal is, des te lichter zal de staaf zijn voor eenzelfde trekkracht bij breuk.

In de volgende paragraaf zal worden ingegaan op werkelijk haalbare waarden.

1.8. Reële waarden voor stijfheid en sterkte van vezelversterkte kunststoffen

Materiaaleigenschappen zijn meestal afhankelijk van de omgeving, van de condities waaronder deze eigenschappen zich manifesteren. Bij kunststoffen zijn dat allereerst de atmosferische condities, zoals luchttemperatuur en (relatieve) luchtvochtigheid (r.h.: *relative humidity*). De versterkingsvezels – glas, koolstof en aramide – zijn daarvoor minder gevoelig. Maar dat neemt niet weg, dat interlaboratoriumproeven onder *geconditioneerde omstandigheden* dienen te worden verricht. Voor kunststoffen: 23 °C en 50 % r.h. Proeven om reële materiaalgegevens die bruikbaar zijn voor constructieberekeningen, te verkrijgen, vragen evenzo om nauwkeurig vastgelegde condities, zij het dan vaak om in het laboratorium nagebootste praktijkomstandigheden.

Niet alleen de airconditioning, maar ook andere testvoorwaarden spelen een belangrijke rol. Neem een *trekproef* om de stijfheid en sterkte van een vezel te bepalen. Dan blijken *inspanlengte* en *treksnelheid* (niet in absolute zin, maar relatief, dus in procenten rek per tijdseenheid) van grote invloed te zijn op de meetresultaten. Een hoge treksnelheid (zoals bij impact) levert aanzienlijk hogere waarden voor modulus en treksterkte dan een standaard treksnelheid.

Om te kunnen communiceren is het noodzakelijk standaard testmethoden te gebruiken, maar voor specifieke toepassingen is het eveneens noodzakelijk de invloed van afwijkende omstandigheden op het gedrag van het materiaal kwantitatief te kennen.

In par. 1.6 is al aandacht besteed aan de invloed van de hars op de sterkte van een vezelbundel, waarbij vooral is gekeken naar de rol van de inspanlengte (*weakest link theory*) en de verkleining van de lengte van de breukzone door de hars.

Er zijn echter ook andere fysische redenen voor het versterkend effect van de hars: de hars beschermt de brosse filamenten (minder spanningsconcentratie bij de haarscheurtjes – Eng. *flaws* – in de filamenten, vooral bij glas), en bij filamentbreuk leidt de hars middels schuifspanning kracht in bij de filamenteeinden, zodat de gebroken filament op enige afstand van de breukplaats weer volledig bijdraagt aan het opnemen van de belasting (de invloedszone van een filamentbreuk is klein; daarom blijft de breukzone ook zo kort).

Op grond van al deze overwegingen is het gewenst stijfheid en sterkte van versterkingsvezels te meten aan verstijfde (d.w.z. in hars gedrenkte en uitgeharde) filamentbundels, met toerekening aan de filamenten. Het verdient dan verder de voorkeur om in de mengselregels (1.13) voor de longitudinale modulus en (1.18) voor de longitudinale treksterkte de bijdrage van de kunststof matrix te verwaarlozen.

Glasvezels

Het hoofdbestanddeel van glas is Si-oxyde (kwarts). Daarin kunnen diverse andere oxyden worden bijgemengd, zoals die van B, Al, Na, K, Ca en Mg, waarmee de eigenschappen van het glas worden beïnvloed. Op die manier zijn meerdere glasvezelsoorten ontwikkeld, die ter onderscheiding een (hoofd)letteraanduiding hebben meegekregen.

De verreweg het meest toegepaste glasvezel is de E-glasvezel. Deze glassoort was oorspronkelijk bedoeld voor elektrotechnische doeleinden, met name vanwege zijn elektrisch isolerend vermogen. Hij is daarom dan ook arm aan K en Na, die anders aan het oppervlak in combinatie met water voor geleiding zouden zorgen.

De samenstelling van E-glas en enkele andere glasvezel-soorten staan vermeld in tabel 1.1. Voor E-glas blijkt de samenstelling qua verhouding niet zo kritisch te zijn: daarom is de samenstelling in ranges gegeven.

glastypen	E-glas (range)	C-glas	S-glas
bestanddelen [massaprocenten]			
SiO ₂	52 - 56	65	65
Al ₂ O ₃	12 - 16	4	25
B ₂ O ₃	8 - 13	5,5	
MgO	0 - 6	3	10
CaO	16 - 25	14	
Na ₂ O	0 - 3*	8	
K ₂ O		0,5	
Fe ₂ O ₃	0,05 - 0,4		
F ₂	0 - 0,5		
TiO ₂	0 - 0,4		

*incl. K₂O.

Tabel 1.1. Chemische samenstelling van de meest toegepaste glasvezel-soorten, weergegeven in procenten van de massa.

C-glas heeft een relatief hoge chemische bestendigheid en wordt daarom in de vorm van een oppervlaktevlies gebruikt als barrière tegen een agressief medium ter bescherming van het achterliggende laminaat met E-glasvezels.

S-glas heeft een (relatief) zeer hoge sterkte, maar het is door hoge fabricagekosten duur en komt daarom alleen voor speciale toepassingen in aanmerking.

De D-glasvezel is een voorbeeld van een vezel die voor een speciaal doel is ontwikkeld. Vanwege zijn goede eigenschappen ten aanzien van radarstralen en zijn lage volumieke massa is hij geschikt voor radomes.

In tabel 1.2 staan enkele eigenschappen – met de nadruk op de mechanische – van E-glasvezels en S-glasvezels naast die van enkele koolstofvezel-soorten en een aramidevezel. Vooral glas is zeer gevoelig voor (haar)scheurtjes aan de oppervlakte. Ter illustratie daarvan staan in de tabel ook de praktisch niet bruikbare waarden voor treksterkte en breukrek van de maagdelijke (Eng. *virgin*) vezels.

De voor versterking van kunststoffen gebruikte vezels vertonen in het algemeen een lineair verband tussen spanning en rek tot aan breuk. Om daarvan een indruk te krijgen, zie de (slechts enigszins gestileerde) grafieken in fig. 1.13.

vezelsoorten	E-glas	S-glas	SM-koolstof	HT-koolstof	HM-koolstof	HM-aramide
vezeleigenschappen						
volumieke massa ρ_f [kg/m ³]	2540	2490	~ 1800	~ 1800	~ 1850	1450
elasticiteitsmodulus E_f [GN/m ²]	70	85	220-240	250-300	360-420	130
poissonverhouding μ_f [trek in vezelrichting]	0,22	0,26	0,26	0,26	0,28	~ 0,3
maagdelijke vezelsterkte [GN/m ²]	3,5	4,6				
maagdelijke vezelbreukrek [%]	4,8	5,4				
vezel(bundel)sterkte s_f [GN/m ²]	1,7 - 2,7	2 - 3	3,5 - 4,5	4,4 - 5,0	2,0 - 3,0	3,0 - 3,5
vezel(bundel)breukrek e_f [%]	2,4 - 3,7	2,3 - 3,5	1,5 - 1,9	1,5 - 1,8	0,5 - 0,7	2,3 - 2,6
lin. therm. uitz.coëff., long. α_{fL} [10 ⁻⁶ /K] transv. α_{fT} [10 ⁻⁶ /K]	5		1	0	- 0,5	- 3 + 60

Tabel 1.2. Eigenschappen van verschillende vezelsoorten bij kamertemperatuur.

Koolstofvezels

Zuivere koolstof komt in twee verschillende kristalvormen voor: diamant en grafiet. Diamant heeft een ruimtelijk kristalrooster. Grafiet daarentegen is laminair opgebouwd, waarbij de lagen uit zesringen van C-atomen bestaan. Terwijl diamant in alle richtingen stijf en sterk is (maar niet in alle richtingen in gelijke mate), is grafiet dat alleen in het vlak van de lagen; tussen de lagen is de binding zwak. Koolstofvezels hebben de grafietstructuur. Het is dan wel zaak dat de roosterlagen evenwijdig aan elkaar in de lengterichting liggen. De koolstofvezel is dan ook in dwarsrichting aanzienlijk minder stijf en sterk dan in lengterichting.

De parameters bij de productieprocessen van koolstofvezel bieden de mogelijkheid om heel verschillende koolstofvezel-soorten te vervaardigen. In de loop der jaren zijn zodoende vezels ontwikkeld met een hoge stijfheid, de zogeheten hoge-modulus (HM: *high modulus*) koolstofvezels, vezels met een hoge sterkte (HT: *high tenacity*, of HS: *high strength*), en andere die meer modaal zijn qua stijfheid en sterkte en relatief

goedkoop (A, of SM: *standard modulus*). De ontwikkeling zet zich door met *ultra-high* soorten. Verhoging van de stijfheid gaat gewoonlijk gepaard met een verhoging van de brosheid, hetgeen nadelig is voor de verwerkbaarheid van het materiaal.

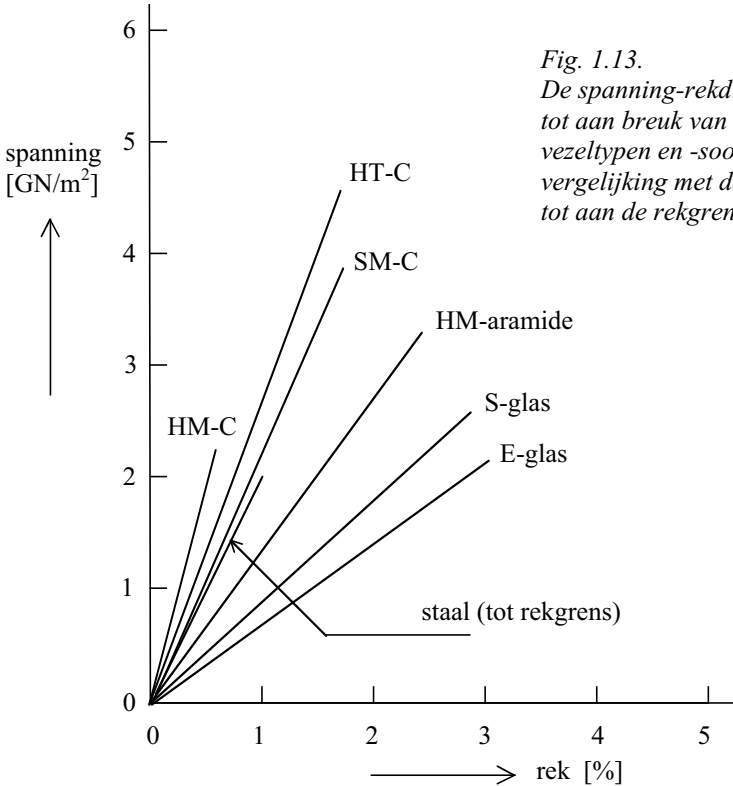


Fig. 1.13.
De spanning-rekdiagrammen tot aan breuk van diverse vezeltypen en -soorten, mede in vergelijking met dat van staal tot aan de rekgrens.

Aramidevezels

Aramiden zijn aromatische polyamiden. Aramidevezels behoren tot de organische, synthetische vezels. Ze onderscheiden zich van de bekende polyamiden (nylon), doordat er in de ketenmoleculen aromatische ringen (zesringen van C-atomen) zijn opgenomen, waardoor ze aanmerkelijk stijver en sterker zijn. De merknamen zijn kevlar en twaron. Het aantal uitgebrachte typen aramidevezel is klein. Het type dat als versterkingsmateriaal in kunststoffen wordt toegepast is HM aramide; onder meer verkrijgbaar onder de naam kevlar 49.

Opvallend is de negatieve waarde van de lineieke (of lineaire) thermische uitzettingscoëfficiënt (zie ook par. 5.1). Bij bepaalde soorten koolstofvezel is dat ook het geval.

Vezels met een hoge breukenergie

Voor speciale toepassingen van vvk, zoals helmen en pantserplaten, is het geboden dat de vezels een grote hoeveelheid energie kunnen opnemen alvorens te breken. Deze vezels worden met HE (*high energy*) onderscheiden. Kevlar 29 is er een voorbeeld

van: grofweg even sterk als kevlar 49, maar met een bijna tweemaal zo hoge breukrek en vanwege zijn lineaire elasticiteit een elasticiteitsmodulus die bijna de helft is van die van kevlar 49. Een andere vezel voor ditzelfde doel is dyneema, een polyetheen vezel met zeer lange ketenmoleculen en een hoge oriënteringsgraad. De elasticiteitsmodulus ervan is 110 GN/m^2 , de treksterkte $3,4 \text{ GN/m}^2$ en de breukrek 3,6 %. Bij gebruik in vvk moet rekening worden gehouden met het lage smeltpunt ($114\text{-}152 \text{ }^\circ\text{C}$), dat kan conflicteren met de gebruikelijke uithardingstemperaturen van bijvoorbeeld epoxyharsen. Mede vanwege het textiele karakter van genoemde HE vezels vinden zij toepassing in onder andere kabels, kogelvrije vesten, parachutedoek en jachtzeildoek. Dyneema is daarbij in het voordeel door zijn lage dichtheid van slechts 975 kg/m^3 .

Matrixmaterialen

Er zijn zeer vele harssoorten en -typen die verschillen in samenstelling en eigenschappen, en die qua receptuur zijn aangepast aan de beoogde fabricagewijze.

In tabel 1.3 staan voor een onverzadigde polyester en drie epoxyharsen met verschillende uithardingstrajecten de waarden van voornamelijk mechanische eigenschappen. Zij zijn niet meer dan een indicatie, ter vergelijking met de eigenschappen van de versterkende vezels.

Voor meer gedetailleerde informatie, alsmede voor andere harssoorten als vinylesters en phenolharsen, zij verwezen naar enerzijds de vakliteratuur, [26], [29], [33], [34], anderzijds de brochures van de harsfabrikanten en -leveranciers.

harssoorten	UP-hars	EP-hars	EP-hars	EP-hars
hardingstemp. [$^\circ\text{C}$]		kamertemp.	80 + 140	120 + 160
matriceigenschappen				
volumieke massa ρ_m [kg/m^3]	1150-1250	1150-1200	1150-1200	1200-1300
elasticiteitsmodulus E_m [GN/m^2]	2,4 - 4,6	3,5	3,5	3,5
poissonverhouding μ_m [-]	0,35	0,35	0,35	0,35
treksterkte s_{mt} [MN/m^2]	40 - 85	50 - 70	60 - 80	80 - 90
druksterkte $-s_{mc}$ [MN/m^2]	140 - 150	90	130	120
breukrek e_m [%]	1,2 - 4,5	2 - 4	3 - 5	4 - 5
lin. therm. uitz. coëff. α_m [$10^{-6}/\text{K}$]	80 - 150	90	60	65

Tabel 1.3. Eigenschappen van enkele thermohardende kunststoffen die als matrixmateriaal worden toegepast.

Unidirectionele vezelversterkte kunststoffen

Ter completering is een tabel opgenomen met eigenschappen van u.d. vvk voor verschillende vezelsoorten. Om een onderlinge vergelijking in zekere mate mogelijk te maken is een gelijk (hoog) vezelgehalte van 60 volumeprocenten gekozen. De tabel is weliswaar opgesteld aan de hand van verscheidene literatuurplaatsen, maar bij dat literatuuronderzoek is gebleken dat diverse lijsten met eigenschappen verre van compleet zijn en dat er tevens sprake is van een grote variatie. Ook zijn de testomstandigheden en andere gegevens niet altijd voorhanden. Daarom is bij het opstellen van de tabel noodzakelijkerwijs een zekere vrijheid betracht. Het is onmogelijk een tabel

voor u.d. vvk op te stellen met de pretentie van een staaltabel. De waarden zijn dus bedoeld als een indicatie en niet meer.

u.d. vezel/epoxy; $v_f = 0,6$	E-glas	SM-koolstof	HT-koolstof	HM-aramide
composieteigenschappen				
volumieke massa ρ [kg/m ³]	2000	1550	1550	1350
longitudinale elast.modulus E_L [GN/m ²]	40	130	150	75
buigmodulus [GN/m ²]	35	125	130	70
transversale elast.modulus E_T [GN/m ²]	10	9	10	5,5
long.-transv. glijdingsmod. G_{LT} [GN/m ²]	4,5	6	6	2,5
long.-transv. poissonverhouding μ_{LT} [-]	0,27	0,30	0,30	0,32
longitudinale treksterkte s_{Lt} [MN/m ²]	800	1550	1700	1400
longitudinale druksterkte $-s_{Lc}$ [MN/m ²]	500	1250	1500	270
buigsterkte (4-punts buiging) [MN/m ²]	850	1600	1750	625
transversale treksterkte s_{Tt} [MN/m ²]	30	70	55	30
transversale druksterkte $-s_{Tc}$ [MN/m ²]	140	200	250	55
long.-transv. afschuifsterkte s_{LT} [MN/m ²]	65	90	80	35
interlamin.afschuifsterkte $ILSS$ [MN/m ²]	40	100	125	60
long. lin. therm. uitz.coëff. α_L [$10^{-6}/K$]	7	1,5	0,5	-2
transv. lin.therm. uitz.coëff. α_T [$10^{-6}/K$]	20	25	30	60

Tabel 1.4. Eigenschappen, voornamelijk qua stijfheid en sterkte, van u.d. vvk met verschillende vezelsoorten en een vezelvolumegehalte van 60 %.

Als hars is epoxy gebruikt, omdat deze vanwege betere eigenschappen (betere hechting en minder volumekrimp bij uitharding) ondanks een hogere prijs de voorkeur krijgt boven polyester bij de duurdere vezels koolstof en aramide. De waarden van vezelbepaalde eigenschappen zullen bij gebruik van polyester in dezelfde orde van grootte liggen; die van matrixbepaalde eigenschappen kunnen echter enigermate afwijken naargelang de eigenschap.

De eigenschappen van het u.d. materiaal kunnen verder dienen als basis voor berekeningen ter voorspelling van de eigenschappen van ingewikkelder samengestelde vvk delen zoals laminaten.