

Experimentele bepaling van de glijmodulus van vezelversterkte kunststoffen

Dr. Ing. Gerhard Scharr*

Vezelversterkte materialen bezitten richtingsafhankelijke eigenschappen. Door deze anisotropie zijn de glij- en elasticiteitsmodulus niet door middel van de dwarscontractiecoëfficiënt aan elkaar gekoppeld, zodat de glijmoduli experimenteel bepaald worden.

Dit artikel behandelt enkele experimentele methoden om de glijmodulus te bepalen van vezelversterkte kunststoffen in het versterkingsvlak. Er worden vier proefmethoden en hun resultaten beschreven. Deze zijn: trekproeven aan 45°-proefstaven, schuifproeven aan vlakke platen, torsie van prismatische staven en torsie van holle vierkante buisprofielen.

Als proefmateriaal is een met in één richting glasweefsel-versterkte thermohardende onverzadigde polyetherharz gekozen. De metingen zijn gedaan met behulp van rekstrookjes of inductieve verplaatsingsopnemers. De verschillende proefmethoden met hun verschillende meetmethoden resulteerden in nagenoeg vergelijkbare waarden voor de te bepalen glijmodulus. Tot slot wordt geconcludeerd dat de trekproeven aan de 45°-proefstaven het snelst de gewenste meetresultaten geven.

In het laatste hoofdstuk wordt kort ingegaan op de bepaling van alle elasticiteitsgrootheden, dus ook die geïdentificeerd loodrecht op het versterkingsvlak. Het kunnen beschikken hierover kan noodzakelijk zijn voor de nauwkeurige berekening van spanningstoestanden en vormveranderingen van een onderdeel.

Inleiding

Vezelversterkte kunststoffen worden tegenwoordig op veel plaatsen in de techniek toegepast als een volwaardig constructiemateriaal. Hun grote voordeel is de mogelijkheid om de vezelrichting te kiezen in een gewenste richting. Hierdoor is het niet alleen mogelijk hoge specifieke sterkten maar ook zeer hoge stijfheden te bereiken.

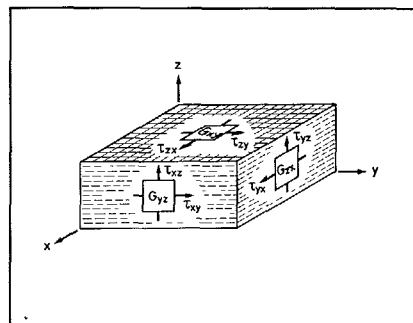
Vanwege hun structuur behoren de vezelversterkte kunststoffen tot de groep van anisotrope materialen. Anisotropie wil zeggen dat de eigenschappen niet in alle richtingen hetzelfde zijn, hetgeen in dit geval betekent dat het elastisch gedrag richtingsafhankelijk is.

Materiaaleigenschappen moeten in kwantitatieve zin bekend zijn, waar-

mee de constructeur dan kan construeren en de staticus onderdelen kan berekenen. Bij met glasvezel versterkte kunststoffen moet, vanwege de relatief geringe verhouding tussen de stijfheid en de sterkte, aan de stabiliteit van onderdelen die hieruit vervaardigd zijn bijzondere aandacht worden geschonken. Daarom is kennis van het elastische deformatiegedrag van het materiaal een vereiste.

Naast de elasticiteitsmodulus is de glijmodulus een van de belangrijkste kenwaarden voor de beschrijving van het elastische gedrag van een materiaal. Bij anisotrope materialen zijn de glijmodulus G en de elasticiteitsmodulus E niet via de dwarscontractiecoëfficiënt ν aan elkaar gekoppeld. Daarom moeten de glijmoduli van vezelversterkte kunststoffen aan het laminaat gemeten worden en kunnen niet indirect met behulp van de bekende elastische materiaalgrootheden E en ν berekend worden. Een uitzondering op deze regel zijn de vezelversterkte kunststoffen die in de richting van het versterkingsvlak quasi-isotropoep zijn; dat zijn die materialen waarvan de vezels in willekeurige richting in het laminaat liggen. Op grond van de orthotropie (dit bete-

kent dat de vezels gaan liggen in de richting van de belasting) zijn er bij vezelversterkte kunststoffen drie glijmoduli die onafhankelijk van elkaar zijn. Dit zijn de in het laminaat aanwezige glijmoduli G_{yz} en G_{zx} loodrecht op het versterkingsvlak en de glijmodulus G_{xy} in het vlak van de versterking. In figuur 1 zijn voor een orthotropoep vezelversterkt materiaal de drie glijmoduli ingetekend. Een manier waarmee deze drie glijmoduli bepaald kunnen worden staat beschreven in [1] en [2].



Figuur 1 De drie schuifmoduli van een orthotropoep vezelversterkte kunststof

In de eerste hoofdstukken van dit artikel wordt uitsluitend de experimentele bepaling van de glijmodulus G_{xy} bij kamertemperatuur besproken, en als dan sprake is van de glijmodulus, dan wordt de glijstijfheid van het orthotropoep materiaal in het versterkingsvlak bedoeld. De glijmodulus G_{xy} is voor het bepalen van spanningen en vervormingen in dunwandige vezelversterkte kunststoffen van essentieel belang.

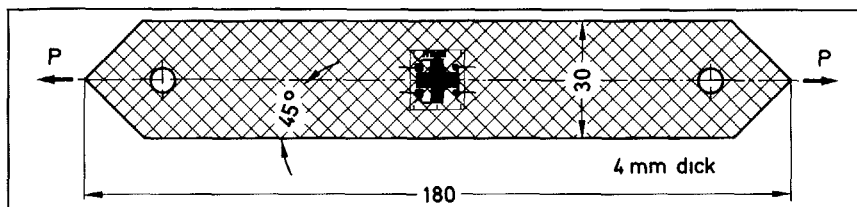
Het bepalen van de glijmodulus van anisotrope vezelversterkte kunststoffen geeft in vergelijking met andere elastische grootheden meer problemen. Het probleem is hier dat zuivere afschuiving in de proefstukken gebracht moet kunnen worden. Om deze ideale toestand zo goed mogelijk te bereiken moeten andere invloeden, zoals b v. buiging, uitgesloten worden [3], hetgeen geen gemakkelijke opgave is.

Het torderen van dunwandige vezelversterkte buizen is een zeer geschikte manier om de glijmodulus te bepalen [4].

In de praktijk is echter heel vaak de glijmodulus van laminaten nodig. Om deze te bepalen is dus een andere

* Dr. Ing. G. Scharr is momenteel werkzaam bij MBB (Messerschmidt Boelko Blohm, divisie Transport- en Verkeersvliegtuigen te Lemwerder in de Bondsrepubliek Duitsland.

Het onderzoek dat in dit artikel wordt beschreven ontstond tijdens zijn dienstverband aan de faculteit Konstruktive Gestaltung aan de RWTH in Aken.



Figuur 2 Schematische afbeelding van de onderzochte 45°-trekstaaf

meetmethode nodig. Deze methode wordt hier niet besproken, daar deze genormaliseerd is en uitgebreid staat beschreven in [4].

In het tweede hoofdstuk van dit artikel worden vier meer of minder uitgebreide proefmethoden voor het bepalen van de glijmodulus beschreven. Ook worden de resultaten van de experimenten met elkaar vergeleken. Twee van de vier statische meetmethoden zijn geheel nieuwe meetmethoden. Bovendien worden de onderzoeksresultaten van vier resp vijf statische methoden met die van een dynamische en een numerieke methode vergeleken. Alle proefstukken zijn uit dezelfde vezelversterkte kunststofplaat vervaardigd. Daarbij gaat het om een met een unidirectioneel glasvezelweefselversterkte, warmtevast en onverzadigde polyesterhars.

Als meetkrachtsensoren zijn rekstrookjes en als lengtesensoren zijn inductieve verplaatsingsopnemers gebruikt. De schuifbelasting is steeds in de richting evenwijdig aan de vezels aangebracht.

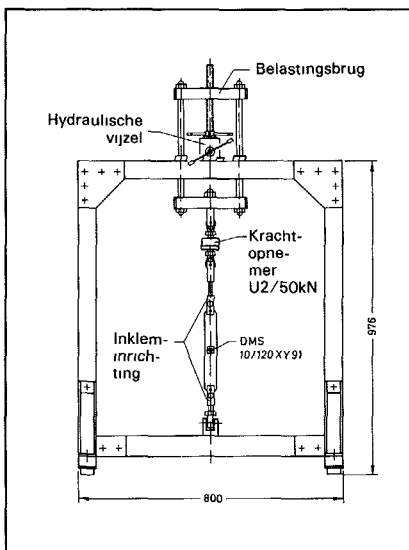
Testmethoden

Het proefstuk

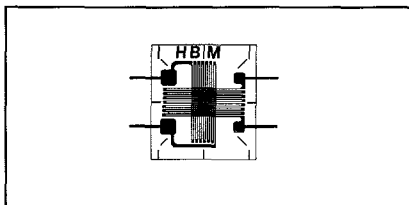
Het uitgangsmateriaal dat werd gebruikt voor het maken van de proefstukken is een 12 mm dikke glasvezelversterkte plaat. De versterking van de onverzadigde polyester bestond uit 30 lagen unidirectioneel versterkt glasjeweefsel. Het vezelvolumebedeel ϕ van dit GF-UP proeflaminaat bedroeg ongeveer 40%. Alle proeven voor de elastische vervorming ten gevolge van schuifkrachten werden in het lineaire gebied uitgevoerd: hierbij bedroeg de maximale schuifspanning $\tau = 1,0 \text{ N/mm}^2$.

Trekproeven aan 45°-proefstaven

Voor deze methode werden vlakke trekproefstaven onder een hoek van 45° t.o.v. de versterkingsrichtingen gezaagd, in figuur 2 is zo'n staaf schematisch weergegeven. De quasi statische trekproeven zijn met het in figuur 3 weergegeven trektoestel uitgevoerd. Daarbij werd de trekkracht met een krachtopnemer van het type U2/50kN gemeten. De kracht werd aangebracht



Figuur 3 Opzet van het trekapparaat met een erin geplaatste 45°-trekstaaf



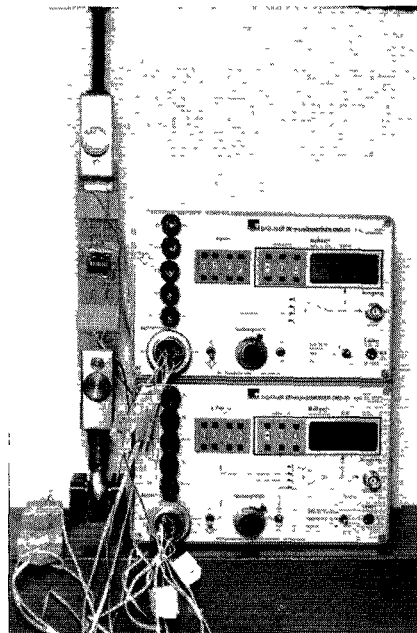
Figuur 4 Het gebruikte rekstrookje, type rosette 10/120 XY 93 met twee rekstrookjes (meettrasters) op ware grootte

door middel van een schroefspil. Hierbij zijn voorzieningen aangebracht die moesten voorkomen dat mogelijke invloeden van de inklemmingen worden vermeden.

Om de vervorming van de vlakke proefstaven te bepalen werden rekstrookjes gebruikt van het type Rosette 10/120XY 93. Deze folierekstrookjes, zoals in figuur 4 te zien is, bestaan uit twee loodrecht op- en over elkaar aangebrachte rekstrookjes. Hiermee kan dus op een en de zelfde plaats op een proefstaaf zowel de langs- als ook de dwarsvervorming gemeten worden.

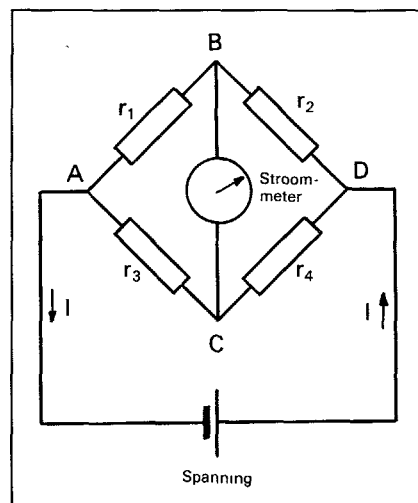
Op elke proefstaaf werd in het midden van de beide brede zijden een rekstrookje bevestigd, die zowel in de langs- als ook in de dwarsrichting werden uitgericht. Als bevestigingsmiddel werd de lijm 270 gebruikt omdat hiermee in het verleden goede resultaten

werden verkregen. Figuur 5 toont de opstelling met de proefstaaf die voorzien is van rekstrookjes, en de daarbij



Figuur 5 In het trekapparaat ingeklemde 45°-proefstaaf met aangebrachte rekstrookjes en de digitale rekmeters DMD20 met de daarbij behorende meetprobes en meetelektronica

behorende elektronica. De aan beide zijden aan de proefstaaf aangebrachte rekstrookjes met beide dezelfde meetrichting, werden telkens als actieve rekstrookjes in een brug van Wheatstone geïntegreerd. Twee gelijk uitgevoerde meetplaatsen werden op een onbelaste proefstaaf aangebracht, blootgesteld aan dezelfde temperatuur, die dienen als compensatie rekstrookje om zo de brugschakeling volledig te maken. In figuur 6 is aangegeven hoe de schakeling van de brug van Wheatstone eruit ziet.



Figuur 6 Principe van de brug van Wheatstone

De brug van Wheatstone (Britse natuurkundige 1802-1875) is een meetopstelling van stroomgeleiders die gebruikt wordt voor het vergelijken van weerstanden, waardoor men de waarde van een onbekende weerstand kan bepalen. In het geval van de meetopstelling die beschreven staat in dit artikel is dat de weerstand van het rekstrookje dat tijdens de proef gebruikt wordt, die verandert ten gevolge van de vervorming van het proefstuk.

In de meetopstelling zijn alle vier de weerstanden de toegepaste rekstrookjes, omdat daarvan alle waarden aan elkaar gelijk zijn. Als deze weerstanden volgens het schema aangesloten worden op een spanningsbron zal er een stroom gaan vloeien die zich vertakt in A en weer samenkomt in D. Wanneer $R1/R2$ gelijk is aan $R3/R4$ - en dat is bij deze opstelling het geval - zal er geen stroom vloeien tussen de punten C en D (de brug).

Stel nu dat $R4$ het rekstrookje is dat zich op het proefstuk bevindt, waarvan de weerstand dus verandert tijdens de belasting, dan zal de totale weerstand in het traject ABD anders zijn dan die van het traject ACD. Als gevolg daarvan zal ook een stroom gaan lopen van B naar C. Deze stroom is een maat voor de verandering van de weerstand.

De verandering in de weerstandswaarde van een rekstrookje is een maat voor de vervorming en zodoende kan afgeleid worden in welke mate het proefstuk vervormd is. Uit de vervormingen en belastingen kan men dan de elasticiteitskenwaarden afleiden zoals dat verder in dit artikel is beschreven.

Door gebruik te maken van de Wheatstone brug konden eventuele temperatuur- of buigingsinvloeden gecompenseerd worden. De rekstrookjes-meetbruggen werden aangesloten op digitale rekmeters DMD 20, waarvan de analoge uitgang werd aangesloten op een meerkanaals schrijver. De rekmeter DMD 20 levert een brugspanning van 1V en is daardoor bijzonder geschikt voor rekstrookmetingen aan kunststoffen.

Opdat vezelversterkte kunststoffen als statisch homogeen mogen worden beschouwd, is het noodzakelijk dat de lengte van de gebruikte rekstrookjes een veelvoud van de laagdikte en maaswijdte van het weefsel bedraagt. Nadat de rek van de 45°-proefstaven in de x- en y-richting gemeten is, kunnen de rekenkundige analyses gemaakt worden en de waarden van G_{xy} met behulp van de volgende vergelijking bepaald worden

$$G_{xy} = \frac{\sigma_y}{2(\epsilon_y - \epsilon_x)} \quad (1)$$

Deze vergelijking kan afgeleid worden van de transformatievergelijkingen van de elastische kenwaarden voor de richting van de belasting t.o.v. de versterking van 45° [3].

Bij deze bijzondere uitvoering van trekproeven aan 45°-vezelversterkte proefstaven kan de glijmodulus G_{xy} , net zoals bij isotrope materialen indirect uit de elasticiteitsmodulus en de dwarscontractiecoëfficiënt bepaald worden. De statistische uitwerking van afzonderlijke metingen gaf bij

deze methode een gemiddelde glijmodulus van $G_{xy} = 5160 \text{ N/mm}^2$.

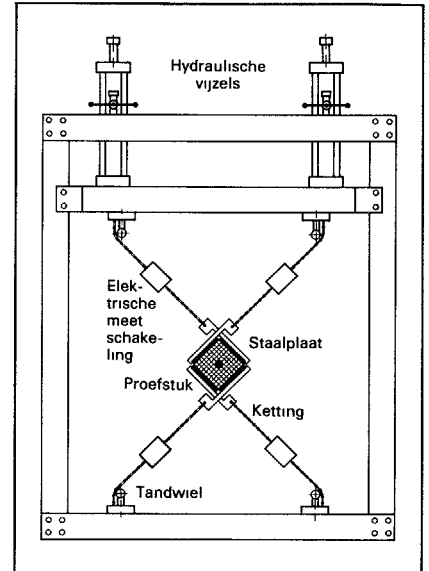
Afschuifproeven aan vlakke platen

Bij deze afschuifproeven werden vierkante platen van het te onderzoeken materiaal gebruikt als proefstuk. De lengte van het vierkant was $l = 100 \text{ mm}$, terwijl de dikte van het laminaat gelijk was aan $t = 12 \text{ mm}$.

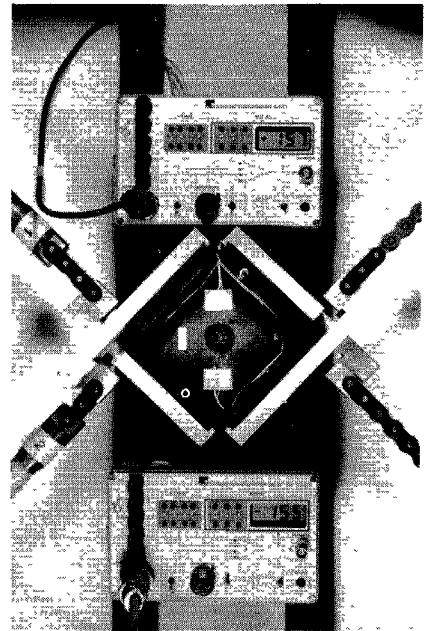
Het toestel dat voor de directe bepaling van de glijmodulus werd gebruikt werd in het kader van een afstudeeronderzoek van Neikes [5] gebouwd. Het idee en het globale ontwerp van dit toestel, oorspronkelijk bedoeld voor het bepalen van glijmoduli van diverse houtsoorten, stamt af van Horig [6].

In figuur 7 is dit toestel in een aanzicht schematisch weergegeven. Een eenvoudige freemconstructie van stalen profielen vormt het tegenlager voor de opname van de krachten.

De trekkrachten grijpen met behulp van twee hydraulische vijzels via vier trekkoorden (kettingen) tangenciaal aan op de vier zijkanten van het proefstuk. De krachtmeting zelf gebeurde door vier zelfgemaakte, in de trekkoorden aangebrachte krachtopnemers. De krachtopnemer bestaat uit een cilindrisch lichaam waarop vier rekstrookjes in een volledige brugschakeling zijn aangebracht. De proeven kunnen in horizontale richting worden uitgevoerd, zodat de proefopstelling gemakkelijk op een tafel geplaatst kan worden. In dit geval was het freem voorzien van een paar poten op wielen, zodat de opstelling zelfs mobiel is.

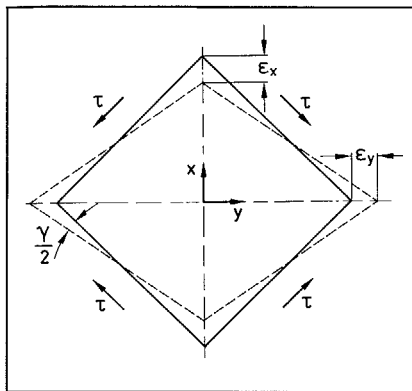


Figuur 7 Opzet van het afschuivingsapparaat met een erin geplaatst proefstuk



Figuur 8 In het afschuivingsapparaat ingebouwd proefstuk met rekstrookjes en rekmeter DMD20

In figuur 8 is een ingebouwd proefstuk met daarop bevestigde rekstrookjes in het snijpunt van de diagonalen te zien. Om uniformiteitsredenen werden, zoals bij de trekproeven de rekstrookjes gebruikt van het rosette-type 10/120 XY 93 die ook weer in een Wheatstone brug werden geschakeld. Ook hier vormden de gelijkgerichte rekstrookjes van de op de twee kopse einden van het proefstuk bevestigde rosetten het actieve deel van de brug van Wheatstone. De beide bruggen werden aan digitale rekmeters DMD 20 aangesloten.



Figuur 9 De geometrie van de vervorming door afschuiving

Om de schuifspanningen zo gelijkmatig mogelijk aan alle zijden te laten aangrijpen werden stijve staalplaten op de zijvlakken van de proefstukken gelijmd met epoxyhars.

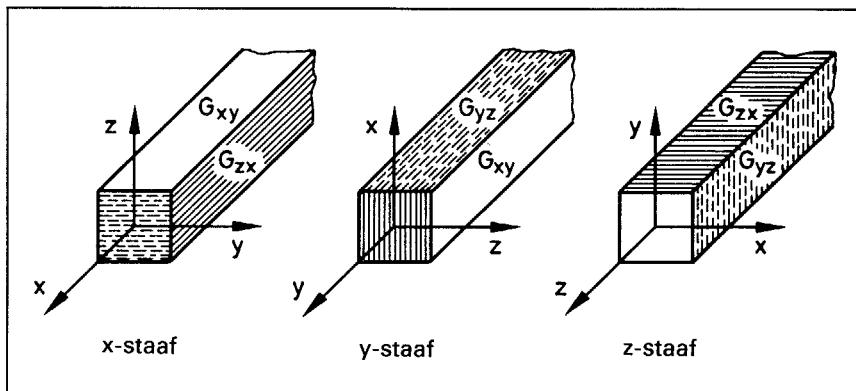
De schuifbelasting liep parallel met de orthotropische as. In figuur 9 is de geometrische vervorming ten gevolge van de op het proefstuk aangebrachte belasting schematisch en sterk overdreven weergegeven. De uitwerking van de proeven resulteerde in een gemiddelde glijmodulus van $G_{xy} = 5370 \text{ N/mm}^2$.

Torsie van prismatische staven

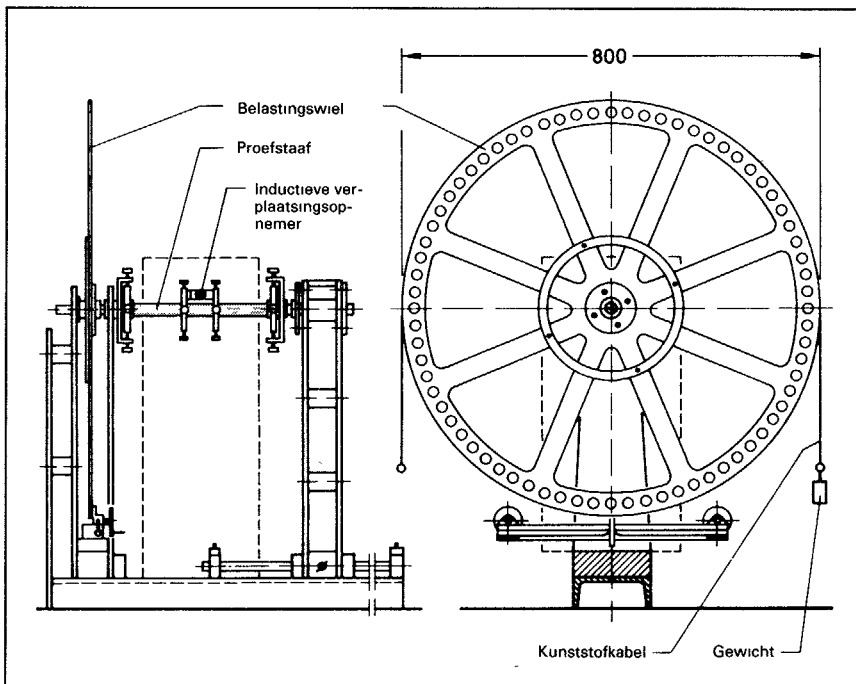
Met deze methode kunnen de drie schuifmoduli van een orthotroop materiaal bepaald worden. Deze experimentele methode is vooral aan te bevelen voor de bepaling van het elastische vervormingsgedrag van een anisotroop constructiemateriaal. In [1] en [2] is deze methode gebaseerd op de verdraaiing van prismatische proefstaven uitvoerig beschreven.

Bij het torderen van de proefstaven, zoals dat in figuur 10 is verduidelijkt, zijn steeds twee van de in totaal drie glijmoduli werkzaam. Om deze reden moeten dan ook verdraaiingsmetingen gedaan worden aan een x-, y- en z-staaf om deze drie glijmoduli te bepalen. Zoals reeds is beschreven zijn de x- en y-proefstaven rechtstreeks uit een plaat vervaardigd en voor de zogenaamde z-staaf zijn vierkantjes uit plaat gezaagd en door middel van epoxylijm op elkaar gelijmd.

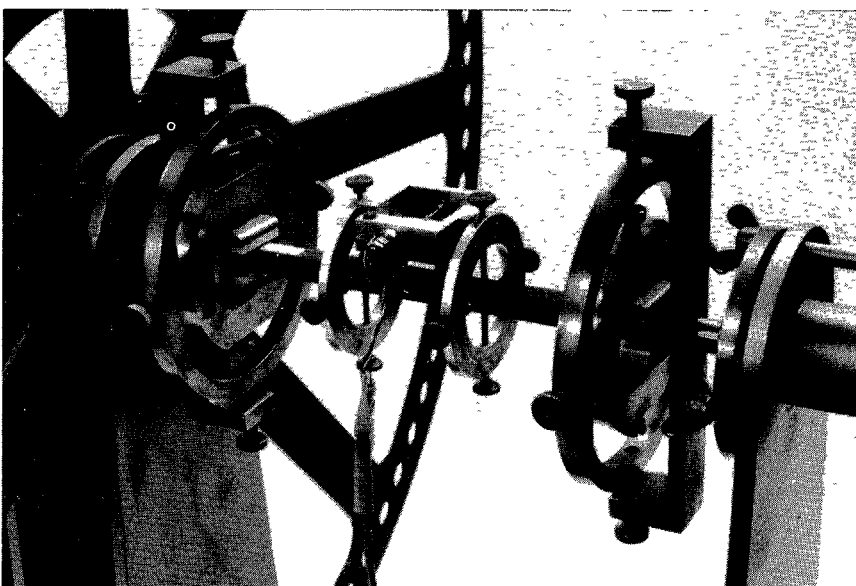
De verdraaiingsmetingen werden met behulp van het in [1] beschreven torsiemeetapparaat uitgevoerd; zie figuur 11. In dit apparaat wordt de horizontaal geplaatste proefstaaf door middel van een wiel belast met een gedefinieerd draaimoment. Bij deze meting werd gemeten met behulp van een inductieve verplaatsingsopnemer W1 EL/5-5 die de relatieve verdraaiing bepaalde van 60 mm van elkaar liggende doorsnedes in de proefstaaf. Fi-



Figuur 10 De ligging van x-, en y- en z-staven in het coördinatensysteem met de daarbij optredende glijmoduli



Figuur 11 Schematische afbeelding van het torsie-apparaat



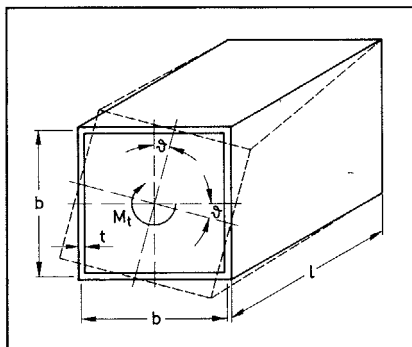
Figuur 12 Torsiemeetinrichting met inductieve verplaatsingsopnemers W1 EL/5 van het torsie-apparaat

guur 12 toont deze torsiemetopstelling. De inductieve verplaatsingsopnemer werd aangesloten op een 5 kHz draaggolf-meetversterker van het type KWS 82.D3.

Voor het uitwerken van de meetresultaten werd de met R(p)-methode aangeduide iteratieve werkwijze van Hörig gebruikt. De statistische uitwerking van de torsieproeven gaf als gemiddelde waarde van de glijmodulus $G_{xy} = 5200 \text{ N/mm}^2$.

Torsie van holle vierkante proefstaven

Bij deze vierde methode werden dunwandige, vierkante buisvormige proefstaven gebruikt. Deze werden samengesteld uit vier wanden, die uit vezelversterkte plaat werden gezaagd en daarna verlijmd. Het uitgangprofiel had een lengte van $l = 250 \text{ mm}$, een breedte van $b = 35 \text{ mm}$ en een wanddikte van $t = 4 \text{ mm}$. Na het uitharden van de lijmverbindingen werden de buizen aan de buitenzijde bewerkt zodat een wanddikte ontstond van $t = 1,5 \text{ mm}$.



Figuur 13 Geometrie van de torsie van een holle vierkante buis

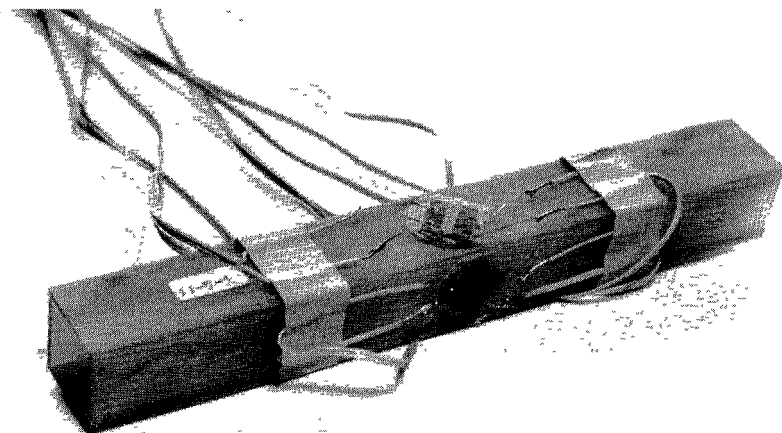
Figuur 13 toont de geometrie van de torsie van een dergelijke buis. De uitwerking van de torsieproeven werd afgeleid van de vergelijking

$$G = \frac{M_t \cdot l}{\delta \cdot b^3 \cdot t} \quad (2)$$

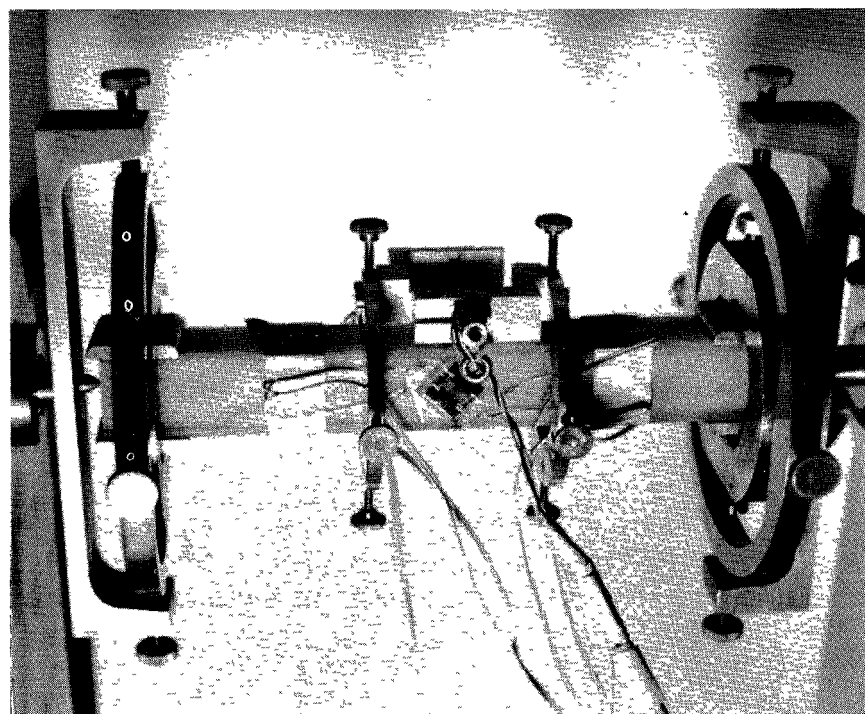
Hierbij is M_t het aangebrachte torsiemoment, l de lengte, b de breedte, t de wanddikte en δ een correctiefactor voor de temperatuur.

Deze vergelijking geldt voor kleine wanddiktes t t.o.v de breedte b .

De versterkingsrichtingen van de vezelversterkte kunststof liepen parallel resp loodrecht ten opzichte van de hartlijn van de buis. Figuur 14 toont een dergelijke proefstaaf met de erop aangebrachte rekstrookjes. Per zijkant werd een rekstrookje van het type Rosette 10/120 XY 93 gebruikt dat onder 45° met de versterkingsrichting



Figuur 14 Proefbuis met daarop bevestigde rekstrookjes



Figuur 15 In het torsie-apparaat geplaatste proefbuis met aangebrachte rekstrookjes en de inductieve verplaatsingsopnemer

en dus ook onder 45° met de hartlijn van de buis werd bevestigd. Ook bij deze metingen werd een volledige brugschakeling toegepast.

Naast de torsiemetingen met behulp van rekstrookjes, werd ook de torsie van de proefbuis gemeten door middel van een inductieve verplaatsingsopnemer. Voor deze metingen kon dezelfde meetopstelling gebruikt worden die voor de uitvoering van de torsieproeven aan staven is beschreven. Figuur 15 toont deze meetopstelling met daarin een buis met de erop aangebrachte rekstrookjes en de inductieve verplaatsingsopnemer.

De uitwerking van de vervormingsme-

tingen voor het bepalen van de glijmodulus met behulp van de rekstrookjes geschiedde via de berekening van de schuifspanning τ en de glijhoek γ . De gemiddelde glijmodulus met deze methode gemeten was $G_{xy} = 4930 \text{ N/mm}^2$.

De uitwerking van de vervormingsmetingen met behulp van de inductieve verplaatsingsopnemer gaf een glijmodulus $G_{xy} = 5140 \text{ N/mm}^2$.

Een torsiemeting aan een proefbuis met een wanddikte van $t = 4 \text{ mm}$ gaf een afwijking van de glijmodulus van meer dan 20%.

Numerieke toetsing

Zoals reeds eerder werd aangehaald

kan de glijmodulus G_{xy} bij isotrope materialen en bij 45°-proefstaven van orthotroop materiaal met behulp van trekproeven worden bepaald. De uitwerking geschiedt daarbij volgens de reeds eerder gegeven vergelijking (1) of volgens [1] en [7]

Voor de 45°-vezelrichting zijn de elasticiteitswaarden bepaald. De berekende glijmodulus bedroeg $G_{xy} = 5200 \text{ N/mm}^2$.

Torsietrillingsproef

De torsietrillingsproef is, zoals reeds uit de benaming valt af te leiden, een dynamische methode voor het bepalen van de glijmodulus. Met het torsietrillingsmeetapparaat kan het verloop van de glijmodulus van kunststoffen over een groot temperatuurgebied goed bepaald worden. Daar deze dynamische meetmethode een genormaliseerde meting is die uitvoerig is beschreven in [8], wordt hierop niet verder ingegaan.

De vergelijkingsmetingen aan het onderzochte materiaal met behulp van een automatische torsieslinger, zijn uitgevoerd door het IKV in Aken. De daarbij gebruikte proefstaven hadden de afmetingen: lengte $l = 74 \text{ mm}$, breedte $b = 10 \text{ mm}$ en dikte $t = 1 \text{ mm}$. Bij een temperatuur van 20°C werd met deze methode een glijmodulus $G_{xy} = 4620 \text{ N/mm}^2$ bepaald. Omdat er slechts twee meetresultaten voorhanden waren en deze kleine afmetingen van de proefstaven bij een niet homogeen materiaal nogal problematisch zijn, is dit resultaat toch wel met enige reserve te beschouwen.

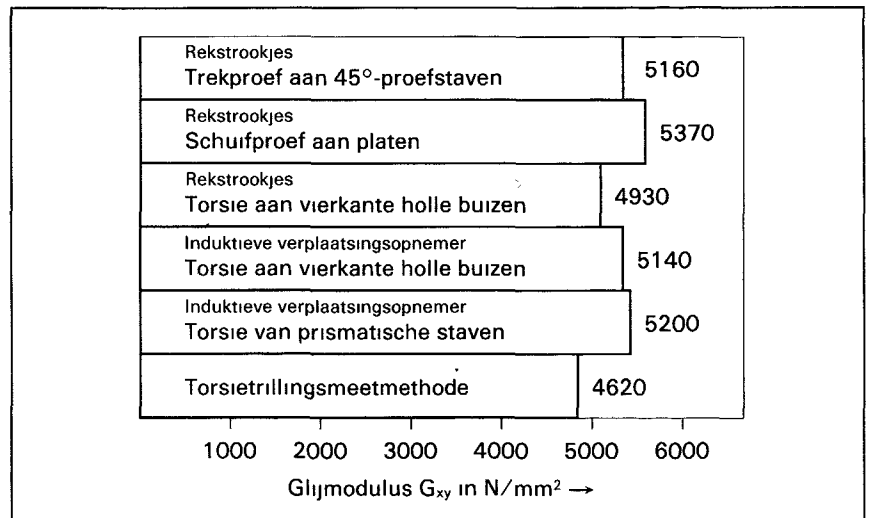
Samenvatting

Het bovenstaande behandelt een aantal methoden die mogelijk zijn voor een experimentele bepaling van de glijmodulus G_{xy} van vezelversterkte kunststoffen. Bij de vier, resp. vijf statische proefmethoden werden rekstrookjes en inductieve verplaatsingsopnemers voor de metingen gebruikt. Alle vijf proefstukvormen werden uit hetzelfde uitgangsmateriaal vervaardigd.

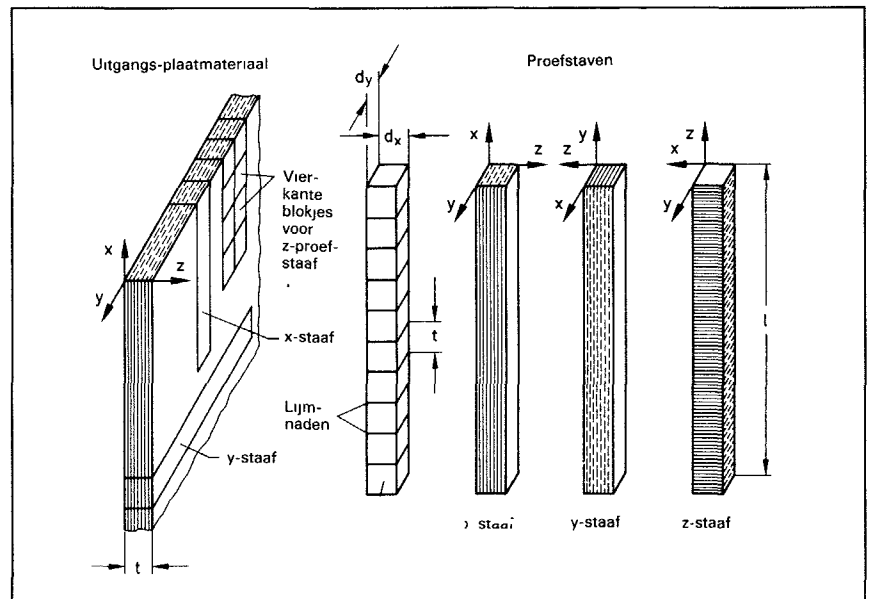
De experimentele methoden leverden, zoals uit figuur 16 blijkt, redelijk overeenstemmende waarden voor de glijmodulus op. In deze figuur zijn de gemiddelde waarden van de proefnemingen aangegeven.

Omdat in elke meting meetfouten gemaakt worden, zullen de resultaten toch meer of minder van de werkelijke glijmodulus afwijken.

Het is moeilijk een van de meetmetho-



Figuur 16 Vergelijking van de met de verschillende meetmethoden bepaalde glijmoduli G_{xy}



Figuur 17 Schematische weergave van de vervaardiging van proefstaven uit een glasvezelversterkte kunststofplaat en de orientatierichting van de vezels in de proefstaven

den in het bijzonder aan te bevelen omdat de uitvoerbaarheid ook van de aanwezige beproevings- en meetrichtingen afhankelijk is.

Tot slot kan wel worden opgemerkt dat met behulp van de 45°-trekproeven op de snelste manier de meetwaarden verkregen werden. In deze uitspraak is de torsietrillingsmethode niet in beschouwing genomen.

Volledige bepaling van de elasticiteitsgrootheden van een vezelversterkte kunststof

Zoals reeds in de inleiding is opgemerkt is het bepalen van de elasticiteitsgrootheden in het versterkings-

vlak vooral van belang voor dunwandige vezelversterkte materialen. Voorzover men die nodig had werden de grootheden die gelden loodrecht op dit vlak geschat.

Voor de nauwkeurige berekening van de spanningstoestanden en vormveranderingen van gecompliceerdere vormen en/of grotere wanddikten moet men over deze grootheden wel kunnen beschikken ten behoeve van het ontwerp.

Het elastische gedrag van een materiaal wordt bepaald door de volgende vergelijkingen.

$$\epsilon_x = \frac{1}{E_x} \cdot \sigma_x - \frac{\nu_{xy}}{E_y} \cdot \sigma_y - \frac{\nu_{xz}}{E_z} \cdot \sigma_z$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E_y} \cdot \sigma_y - \frac{\nu_{yz}}{E_z} \cdot \sigma_z - \frac{\nu_{yx}}{E_x} \cdot \sigma_x$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E_z} \cdot \sigma_z - \frac{\nu_{zx}}{E_x} \cdot \sigma_x - \frac{\nu_{zy}}{E_y} \cdot \sigma_y$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G_{yz}} \cdot \tau_{yz}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{1}{G_{zx}} \cdot \tau_{zx}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}} \cdot \tau_{xy}$$

Hierbij zijn:

E_x, E_y, E_z de elasticiteitsmoduli in de orthogonale richtingen x, y en z .

G_{xy}, G_{yz} en G_{zx} de glijmoduli in de met de indices aangegeven vlakken.

$\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, \nu_{yx}, \nu_{zx}$ en ν_{zy} de dwarscontractiecoëfficiënten. Daarbij geeft de eerste index de vervormingsrichting loodrecht op de belastingsrichting en de tweede index de richting van de belasting.

σ_x, σ_y en σ_z de trek (druk) spanningen in het materiaal.

τ_{yz}, τ_{zx} en τ_{xy} de schuifspanningen in de met de indices aangegeven vlakken.

ϵ_x, ϵ_y en ϵ_z de specifieke rek ten gevolge van trek (druk) krachten.

γ_{yz}, γ_{zx} en γ_{xy} de specifieke glijhoeken ten gevolge van de schuifkrachten.

Bij isotrope materialen is $E_x = E_y = E_z$, zo ook $G_{xy} = G_{yz} = G_{zx}$ en zijn de zes dwarscontractiecoëfficiënten v.. gelijk aan elkaar. De elasticiteitsmodulus en de glijdingsmodulus zijn door de dwarscontractiecoëfficiënt aan elkaar gekoppeld met de vergelijking $G = E/2(\nu + 1)$

Bij anisotrope materialen bestaan deze gelijkheden niet en moeten deze grootheden dan ook allemaal worden bepaald. Dit geschiedt met trekproe-

ven en torsieproeven.

Vervaardiging van de proefstaven

Om de elasticiteitskenwaarden betrouwbaar te kunnen bepalen zijn proefstukken nodig waarvan de langassen evenwijdig zijn aan de orthogonale richtingen x, y en z . Voor het onderzoek werden prismatische proefstaven gekozen met een nagenoeg vierkante doorsnede. Deze geometrie is op eenvoudige wijze uit dikke glasvezelversterkte platen te maken. Voorts is bij eerdere onderzoeken gebleken dat deze vorm goede resultaten geeft. In figuur 17 is te zien hoe de diverse proefstaven uit een plaat van het te onderzoeken materiaal te halen zijn. Daarbij zijn de als x - en y -staaf betitelde proefstukken rechtstreeks uit de plaat te vervaardigen. Het maken van de z -staaf is wat gecompliceerder.

Hierbij worden uit het plaatmateriaal een aantal vierkante blokjes gezaagd, die vervolgens op elkaar worden gelijmd. Na het uitharden van de lijmverbindingen wordt deze z -staaf rondom op dezelfde maten afgewerkt als de x - en y -staaf. Om de invloed van de lijmverbinding zo gering mogelijk te houden wordt de lijm laag zo dun mogelijk gehouden en wordt als lijm dezelfde epoxy gebruikt die ook werd toegepast voor het vervaardigen van de met glasvezel versterkte plaat.

De **trekproeven** aan de x -, y - en z -staven zijn uitgevoerd met het toestel dat hiervoor is beschreven bij de trekproeven met de 45°-proefstaven. De verkregen meetresultaten leverden na uitwerking de drie elasticiteitsmoduli en de zes dwarscontractiecoëfficiënten.

De **torsieproeven** aan de x -, y - en z -staven zijn uitgevoerd zoals reeds geheel is beschreven in het voorgaande; hiermee konden de drie glijmoduli worden bepaald.

Om de invloed van de temperatuur te kunnen vaststellen werden alle proeven uitgevoerd bij 20-30-40-50-60 en 70°C.

Het elasticiteitsonderzoek aan negen vezelversterkte kunststoffen leverde

een grote hoeveelheid interessante informatie op die is vastgelegd in [5].

Literatuur

- [1] Scharr, G., Gemessenes Stoffgesetz von faserverstärkten Kunststoffen, Fortschritt-Berichte der VDI-Z, Reihe 5, Nr 87, 1985
- [2] Scharr, G.; Experimentelle Bestimmung des kompletten Stoffgesetzes von anisotropen faserverstärkten Kunststoffen, Messtechnische Briefe 21 (1985), Heft 1, p 7-11.
- [3] Niederstadt, G., M. Weiz, M. Gaedke, Versuche zur Bestimmung des Schubmoduls glasfasermattenverstärkten Kunststoffe, DFVLR-Braunschweig, Abteilungsbericht FD-30, 1971.
- [4] DIN 53 399, Schubversuche an faserverstärkten Kunststoffen, Teil 1, An Probekörpern in Form von kreisförmigen Hohlzylinderndern
Teil 2; An ebenen Probekörpern
- [5] Neikes, F.-W.; Entwicklung eines Versuchsgeräts zur unmittelbaren Bestimmung des Schubmoduls von Holzern, Unveröffentlichte Diplomarbeit, Lehrstuhl fuer konstruktive Gestaltung, RWTH Aachen, 1983
- [6] Hoerig, H., Über die unmittelbare Messung der Gleitzahlen S44, S55, S66 bei Stoffen von rhombischer Symmetrie und geringer Starrheit, Annalen der Physik, Bd. 43 (1943), p 285-295
- [7] Scharr, G., Veränderung der Elastizitätszahlen infolge Drehung des Koordinatensystems, Kunststoffe 76, (1986), Heft 6, p. 538-540
- [8] DIN 53 445, Prüfung von Kunststoffen, Torsionsschwingversuch, November 1965, Beuth Vertrieb GmbH, Berlin, Köln.

Opmerking van de redactie:

Dit artikel is samengesteld uit de volgende artikelen.

"Experimentelles Prüfverfahren zur Bestimmung des Schubmoduls G_{xy} von faserverstärkten Kunststoffen", Messtechnische Briefe 23(1987)1.

"Experimentelle Bestimmung des Kompletten Stoffgesetzes von anisotropen faserverstärkten Kunststoffen", Messtechnische Briefe 21(1985)1;

"Gemessenes Stoffgesetz von faserverstärkten Kunststoffen", uitgave nr 87 van reeks 5 van de Verein Deutscher Ingenieure

Beide artikelen en het boekje zijn geschreven door Dr. Ing. Gerhard Scharr.