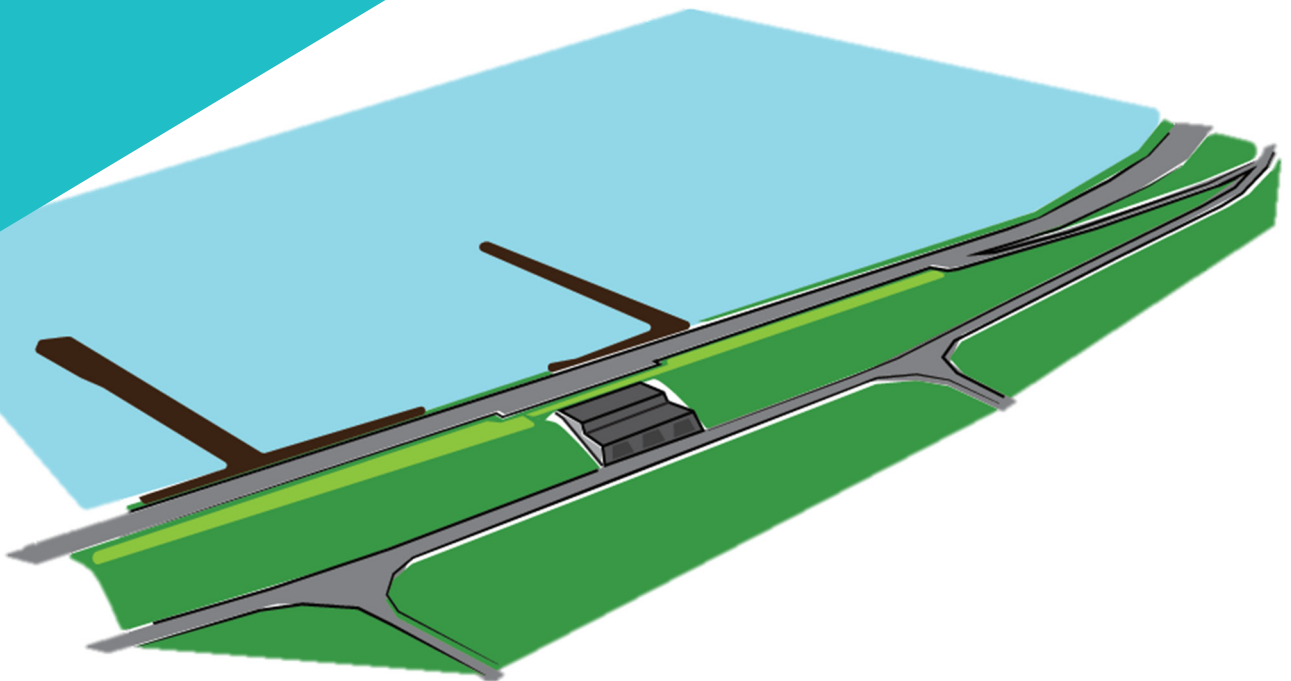


Testen en ontwerpwaarden hergebruikt composiet

Ten behoeve van engineering van composietschuiven met kernen van hergebruikt composiet.

Onderzoek voor ingenieursbureau Provincie Groningen



Colofon

Titel:	Testen en ontwerpwaarden hergebruikt composiet
Subtitel:	Ten behoeve van engineering van composietschuiven met kernen van hergebruikt composiet
Publicatie nummer:	LKT-CE-109684-2111
Publicatie datum:	November 2021
Auteurs:	P. Schreuder BSc K. Hermans BSc A. ten Busschen PhD.
In opdracht van:	Ingenieursbureau provincie Groningen
Fotografie:	In eigen beheer

Deze publicatie van Windesheim valt onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal-licentie. Dit betekent dat de kennis uit deze publicatie hergebruikt mag worden als basis voor de ontwikkeling van nieuwe kennis mits de naam van de auteur en/of Windesheim hierbij vermeld wordt.

Deze publicatie wordt uitgebracht door het Lectoraat Kunststoftechnologie, een praktijkgerichte onderzoeksgroep op Hogeschool Windesheim die zijn basis heeft in Engineering & Design. Zoals passend bij lectoraten in combinatie met de gebruikte subsidieregeling, is het onderzoek uitgewerkt tot een TRL niveau van maximaal 7: demonstratie systeemprototype in operationele omgeving. Het werk is zo opgeschreven dat het na-werkbaar is, maar bedrijfsspecifieke data is soms weggelaten.



Inhoudsopgave



Inleiding	4
1 Selectie en inkoop van vlokken van EoL composiet	5
2 Productie van proefmateriaal voor de tests	7
3 Testen van proefstaven en resultaten.....	11
4 Bepaling van ontwerpwaarden	13
Bijlagen.....	16
Literatuur	17

Inleiding

De Provincie Groningen gaat in 2022 een duiker plaatsen in de primaire waterkering in Hoogwatum, nabij de Eemshaven. In deze duiker worden twee schuiven geplaatst die bij extreme omstandigheden (hoog water) gesloten kunnen worden. De schuiven hebben elk afmetingen van 2,3 x 3,8 m (BxH). De ontwerpbelasting die incidenteel kan voorkomen is 100 kN/m². De gedachte is om de schuiven uit te voeren glasvezelversterkt kunststof (GVK). Gezien de belasting zal het ontwerp leiden tot een sandwichconstructie. Normaalgesproken wordt in een dergelijke sandwichconstructie kunststofschuim toegepast als kernmateriaal. Echter, omdat de schuiven bij voorkeur zwaar moeten zijn (garantie om te kunnen sluiten, ook bij stroomstoring) zou het kernmateriaal kunnen worden uitgevoerd in hergebruikt composiet.

Het ingenieursbureau van de Provincie Groningen is deelnemer aan de projecten op het gebied van hergebruik van composieten bij het Lectoraat Kunststoftechnologie (LKT) van Windesheim en heeft de verwachting dat hergebruikt composiet als kernmateriaal in de schuiven een goede optie kan zijn. Het ingenieursbureau van de Provincie Groningen verwacht dat voor het kernmateriaal van de schuiven balkelementen nodig zijn met een doorsnede van 200 x 200 mm. Tussen de balkelementen kunnen in de sandwich-uitvoering shear-webs worden gerealiseerd. De verwachting is dat er in totaal ca. 3 m³ kernmateriaal in de vorm van balken nodig is.

Om een producent van dergelijke schuiven een ontwerp te kunnen laten maken zullen ontwerpwaarden beschikbaar moeten zijn van kernmateriaal op basis van hergebruikt composiet. Het hergebruikt composiet is als grondstof beschikbaar van verschillende bronnen, zoals bootrompen, rotorbladen van windmolens, trein-interieurpanelen of bedrijfsafval van pultrusie of filament winding. Het is daarom belangrijk dat van het type hergebruikt composiet dat gebruikt wordt om de ontwerpwaarden van te bepalen ook uit dezelfde batch voldoende beschikbaar is om uiteindelijk het kernmateriaal voor de schuiven mee te maken.

In aansluiting hierop heeft het ingenieursbureau van de Provincie Groningen het Lectoraat Kunststoftechnologie (LKT) van Windesheim opdracht gegeven voor de volgende activiteiten:

1. Selectie van geschikte bron van vlokken van hergebruikt composiet en bestellen van voldoende materiaal hiervan bij CRC in Moerdijk voor het maken van testmateriaal en voor ca. 3 m³ kernmateriaal voor de schuiven. Vervaardiging van balkmateriaal hiervan dat op een manier is geproduceerd zoals dat ook voor het later te vervaardigen kernmateriaal voor de schuiven kan worden toegepast. Hiervoor zal het LKT zorgen voor een geschikte vorm-mal en zal het LKT een geschikte polyesterhars inkopen voor het maken van het balkmateriaal voor de tests in deze opdracht.
2. Maken van proefstaven van dit balkmateriaal voor het bepalen van mechanische eigenschappen van kernmateriaal van hergebruikt composiet.
3. Bepaling van mechanische eigenschappen door middel van driepuntsbuigtesten.
4. Verwerking van de testresultaten volgens Eurocode EN 1990 – Annex D in combinatie met de CUR96 tot ontwerpwaarden en verslaglegging in een rapport in het Nederlands.

Het onderhavige rapport beschrijft de bovengenoemde activiteiten.

1 Selectie en inkoop van vlokken van EoL composiet

Voor het selecteren van vlokken van End-of-Life (EoL) composiet is overlegd met Circular Recycling Company (CRC) in Moerdijk. Dit bedrijf heeft zich de afgelopen jaren toegelegd op het industrieel en gecontroleerd verkleinen van diverse EoL composietproducten. Belangrijke voordelen van het proces van verkleining dat CRC hanteert zijn:

- Gescheiden houden van batches vlokken uit EoL composiet van verschillende herkomst.
- Uitzeven van stof (dit wordt verwerkt tot pyrolyse-olie in een ander proces)
- Gescheiden houden van fracties vlokken met verschillende afmetingen
- Droge vlokken

Voor het betreffende onderzoek en de mogelijk latere toepassing in schuiven is verder van belang:

- Grote L/D-verhouding van de vlokken (bij voorkeur gemiddeld hoger dan 50)
- Beschikbaarheid van dezelfde batch voor zowel het onderzoek als voor kernmateriaal in de later te vervaardigen schuiven.

CRC heeft met bovengenoemde punten voorgesteld om vlokken afkomstig van GRE-buis te gebruiken. Van dit materiaal is door CRC op 25 augustus 2021 een bigbag bij Windesheim afgeleverd voor het onderzoek en is 4 ton van dit materiaal gereserveerd voor Windesheim voor eventuele latere productie. Bij het nameten blijkt de L/D-verhouding gemiddeld rond de 70 te liggen. Dit komt vooral doordat het materiaal over de dikte is gespleten tijdens het shredder-proces, waardoor de vlokdikte 0,2 tot 0,4 mm bedraagt terwijl de lengte van de vlokken enkele centimeters bedraagt.



Om indicatief te bepalen wat de mogelijkheden zijn voor versterking met deze vlokken is een laminaat gemaakt door een laag van deze vlokken te impregneren met epoxy-lamineerhars (Epoxyhars L + Verharder GL1, carbonwinkel.nl). Door epoxy te gebruiken zal er een zeer goede hechting optreden met de vlokken en kan worden bepaald met een mechanische test welk versterkend vermogen aanwezig is.



Laminaat van vlokken gelamineerd met epoxy-lamineerhars

Uit dit laminaat zijn 6 staafjes gezaagd en getest middels een 3-punts buigproef. Uit deze buigtest werden gemiddelden bepaald van de E-modulus (5597 MPa) en buigsterkte (63,8 MPa), beiden met een variatiecoëfficiënt van 12%.

2 Productie van proefmateriaal voor de tests

Voor de productie van proefmateriaal voor de tests zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Vervaardigen vanuit een doorsnede als van later te maken kerndelen (200 x 200 mm)
- Vervaardigen met een DCPD-polyesterhars (i.v.m. kosten)
- Vervaardigen met een laag viskeuze hars (i.v.m. productie door gieten of injecteren)

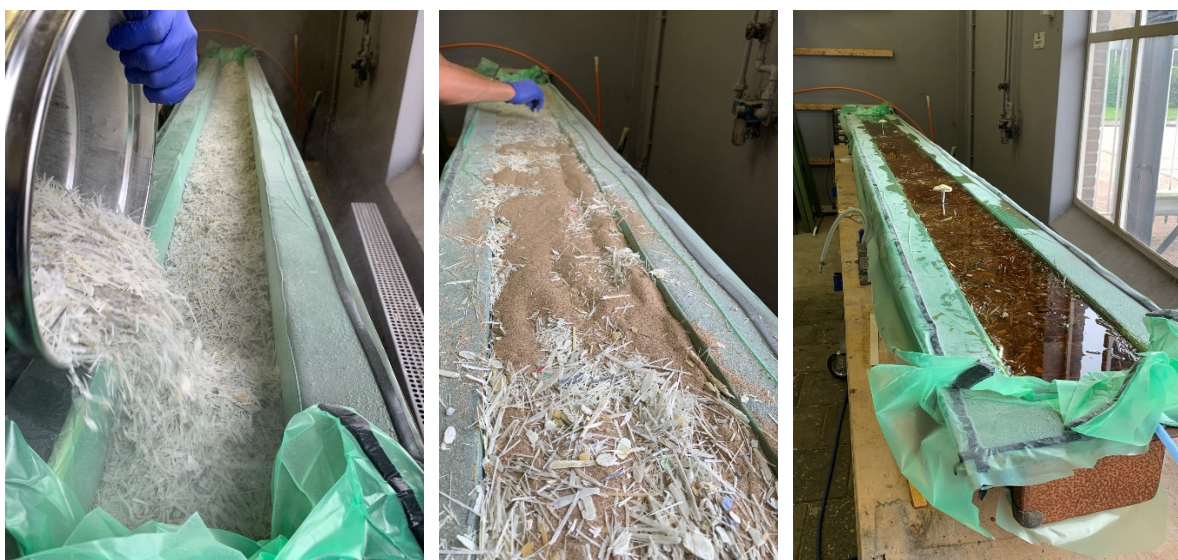
Er is een bestaande stalen mal gebruikt waarin een balk van 200 x 200 x 4000 mm kan worden gemaakt. Dit is veel meer dan nodig voor dit onderzoek maar hiermee wordt ook materiaal gemaakt voor het doen van langeduurtesten (hetgeen geen onderdeel is van dit onderzoek).

De mal is voorbereid door er middels vacuüm een folie in te trekken, zie foto. Dit is gedaan omdat de mal erg gecorrodeerd is en dit een goede methode is om een losse laag in de mal aan te brengen. De malvorm heeft als binnen afmetingen 200 x 200 x 4000 mm.



Folie in binnen-holte van de mal getrokken middels vacuüm

De mal is laagsgewijs gevuld met vlokken en zand. Daarna is het geheel afgegoten met Synolite 1967-G-5 (uitgehard met 2% Trigonox 249). Na het afgieten zijn twee hijspunten van boven in het nog niet uitgeharde samenstel gestoken. Zie foto's.



Vullen van de mal met vlokken en zand, vervolgens gieten en aanbrengen hijspunten

De hoeveelheden van de grondstoffen die gebruikt zijn bij het vullen van de mal zijn gewogen en het totaalgebruik staat in de volgende tabel.

Component	Hoeveelheid (kg)	Percentage van totaal (%)
Vlokken EoL composiet	60	25,5
Droog zand (zeefmaat 0,2 – 0,6 mm)	50	21,3
Droog zand (zeefmaat 0,7 – 1,2 mm)	25	10,6
Polyesterhars Synolite 1967-G-5	100	42,6
TOTAAL	235 kg	100 %

Het zand is gebruikt om het gebruik van de giethars terug te dringen. Het droge zand vloeit in de holtes tussen de vlokken en neemt daarmee ruimte in die anders door hars gevuld zou worden. Dit is een methode die in RAAK-MKB-project 'Industrieel hergebruik van end-of-life thermohardende composieten' ook is toegepast.

De balk is na uitharden gelost uit de mal en vervolgens door een betonslijpbedrijf met een diamantzaag in lengterichting in plakken gezaagd van 50 mm dikte en 500 mm lengte. Zie foto's.



Lossen en eerste verkleining in plakken van 50 mm dikte en 500 mm lengte

De verdere verkleining is gedaan met de tafelsteenzaag van het lectoraat tot de benodigde proefstaven, zie foto.



Verdere verkleining tot proefstaven met de tafelsteenzaag van het lectoraat

Voor het onderzoek zijn proefstaven gemaakt voor het uitvoeren van 3-punts buigproeven en voor ILSS (interlaminaire afschuifsterkte middels 3-punts buigtest met korte opleglengte). Bij het zagen van de proefstaven zal een deel van de vlokken doorgezaagd worden. Om het effect hiervan te verkleinen is gekozen voor een proefstaafdikte van 22 mm. Hierbij is het uitgangspunt dat de vlokken bij het instrooien in de mal redelijke plat liggen. De gedachte is dat bij deze proefstaafdikte het merendeel van de vlokken niet is doorgezaagd en dus zoveel mogelijk effectief zijn in de versterkende werking.

Uitgaande van deze proefstaafdikte volgen de verdere proefstaafafmetingen uit de eisen die staan gegeven in de norm ISO 178 voor het uitvoeren van een 3-punts buigproef, zie tabel.

Parameter	Symbool	Voorschrift	Geselecteerde waarde
Dikte	t	Gegeven dikte	22 mm
Oplegafstand	l	16 x t	352 mm
Totale lengte	L	minimaal 20 x t	500 mm
Breedte	B	2 tot 3 x t	50 mm

Voor het uitvoeren van een ILSS-test is de norm ISO 14130 gehanteerd, waaruit de proefstaafafmetingen volgen zoals in onderstaande tabel gegeven.

Parameter	Symbool	Voorschrift	Geselecteerde waarde
Dikte	t	Gegeven dikte	22 mm
Oplegafstand	l	5 x t	110 mm
Totale lengte	L	minimaal 8 x t	250 mm
Breedte	B	2 tot 3 x t	60 mm

3 Testen van proefstaven en resultaten

Voor het testen is een Testometric testbank gebruikt met een loadcell van 100 kN. De proefstaven zijn na het zagen gedroogd en zijn 5 dagen geconditioneerd in de testruimte op ca. 20 °C.

Voor de buigtest is een oplegafstand van 352 mm ingesteld en bij de start van de test is een voorbelasting van 10 N op de proefstaaf aangebracht. Vervolgens is de staaf belast met een belastingsnelheid van 10 mm/min. tot breuk. De foto hieronder toont de testopstelling.



Breukgedrag driepuntsbuigproef

Er zijn 10 buigstaven getest. Ze vertoonden alle een relatief bros breukgedrag aan de trekzijde. Het gemiddelde en de standaarddeviatie van de E-modulus en buigsterkte staan weergegeven in onderstaande tabel. In de tabel wordt ook de variatiecoëfficiënt (V) gegeven. De individuele waarden van de proefstaven staan gegeven in de bijlage van dit rapport.

Parameter	Symbol	Gemiddelde waarde	Standaarddeviatie	V
E-modulus	E	5590 MPa	699 MPa	12,50 %
Buigsterkte	σ	23,8 MPa	6,83 MPa	28,70 %

Bij de ILSS-test zijn 10 staven getest. Ze vertoonden geen van allen delaminatie-breuk. Het breukgedrag was vergelijkbaar met het breukgedrag van de buigstaven. De foto toont het breukbeeld: een bros breukgedrag dat ontstaat aan de trekzijde.



Breukgedrag bij ILSS-test

Dit betekent dat het materiaal zich niet gedraagt als een gelaagd composiet met duidelijk lagere sterkte tussen de lagen dan in de lagen. Om die reden wordt voorgesteld om het materiaal te beschouwen als isotroop, waarbij de sterkte- en stijfheidseigenschappen kunnen worden afgeleid uit de resultaten van de buigtesten.

De individuele testresultaten van de ILSS-testen zijn te vinden in de bijlage van dit rapport.

4 Bepaling van ontwerpwaarden

In dit hoofdstuk wordt de systematiek van het bepalen van ontwerpwaarden volgens de Annex D van EN 1990 in combinatie met specifieke gegevens uit de CUR96 voor vezelversterkte kunststoffen in hoofdlijnen toegelicht.

Rekenwaarde UGT via karakteristieke waarde

De rekenwaarde van een materiaaleigenschap, X_d , in de uiterste grenstoestand (UGT, beoordeling van sterkte en stabiliteit), wordt bepaald via de karakteristieke waarde met:

$$X_d = \eta_c \cdot X_{k(n)} / \gamma_m = \eta_c \cdot m_X \cdot \{ 1 - k_n \cdot V_X \} / \gamma_m$$

In deze formule stellen de parameters het volgende voor:

X_d = rekenwaarde van materiaaleigenschap X

η_c = conversiefactor

$X_{k(n)}$ = 5% karakteristieke waarde van metingen

γ_m = materiaalfactor

m_X = gemiddelde van gemeten waarden

k_n = factor voor 5% karakteristieke waarde

V_X = variatiecoëfficiënt (= s_X / m_X)

s_X = standaard deviatie van metingen

De waarde van k_n hangt af van het aantal proeven (n) dat is uitgevoerd. Deze waarden staan in Tabel D1 van EN 1990 (en in tabel B.3 van CUR 96), waarvan er een aantal gegeven zijn in *Tabel 1*, juist bij de minimum aantal proefstukken zoals genoemd in CUR 96 in 'Bijlage B5 Steekproefgrootte' voor verschillende aspecten.

Aantal proeven (n)	3	6	10	20	∞
V_X bekend k_n	1,89	1,77	1,72	1,68	1,64
V_X niet bekend k_n	3,37	2,18	1,92	1,76	1,64

Tabel 1. Waarden van k_n voor de 5 % karakteristieke waarde

Als van een materiaal voor de beschouwde eigenschap de variatiecoëfficiënt (V_X) op voorhand bekend is, zijn de waarden voor k lager dan wanneer de variatiecoëfficiënt niet vooraf bekend is en bepaald moet worden uit de standaarddeviatie en het gemiddelde van de metingen met de formule $V_X = s_X / m_X$.

De conversiefactor, η_c , is materiaal specifiek en verwerkt de invloed van externe effecten op het materiaal: 1) temperatuur, 2) vocht, 3) lange-duur belasting (kruip) en 4) wisselende belasting (vermoeiing). De conversiefactor is kleiner dan 1.

Als de systematiek van de CUR96 gevolgd wordt kunnen voor de toepassing in de schuiven de volgende conversiefactoren worden gehanteerd:

1	Temperatuur	η_{ct}	=	0,9	(standaard voor sterkte)
2	Vocht	η_{cm}	=	0,7	(permanent vochtig)
3	kruip	η_{cv}	=	0,728	(24 uur belasting *)
4	Vermoeiing	η_{cf}	=	1,0	(geen vermoeiing **)

(*) Voor kruip wordt de conversiefactor bepaald door de formule:

$$\eta_{cv} = t^{-n}$$

De waarde voor n wordt gesteld op $n = 0,1$ omdat het materiaal, net zoals een glasmat versterkt laminaat in alle richtingen is versterkt met onderbroken (niet-continue) versterkingselementen. Onderstaande tabel toont een aantal waarden voor deze conversiefactor als functie van de tijd in uren.

Tijd (t)	1 uur	10 uur	24 uur (1 dag)	48 uur	8760 uur (1 jaar)
η_{cv}	1,000	0,794	0,728	0,679	0,403

(**) Er wordt uitgegaan van minder dan 5000 belasting-wisselingen gedurende het gebruik van de schuiven waardoor volgens de CUR96 deze conversiefactor op 1 gezet kan worden.

De totale conversiefactor wordt hiermee:

$$\eta_c = \eta_{ct} \cdot \eta_{cm} \cdot \eta_{cv} \cdot \eta_{cf} = 0,459$$

De materiaalfactor, γ_M , is ook materiaal specifiek met daarin verwerkt: a) onzekerheden in de geometrie, b) modelonzekerheden in het krijgen van de juiste materiaaleigenschap en c) onzekerheden in de spreiding van de materiaaleigenschap. Een en ander is mede afhankelijk van de productiemethode. De materiaalfactor is groter dan 1. Als de systematiek van de CUR96 gevolgd wordt kunnen voor de toepassing in de schuiven de volgende materiaalfactoren worden gehanteerd:

$$\gamma_M = \gamma_{M1} \cdot \gamma_{M2} = 1,15 \cdot 1,5 = 1,725$$

Voor de eerste materiaalfactor (waarde 1,15) is hierbij uitgegaan dat direct uit testgegevens het materiaalgedrag bepaald wordt en voor de tweede materiaalfactor geldt voor sterkte voor materialen met een hogere variatiecoëfficiënt een waarde van 1,5.

Hiermee kan de ontwerpwaarde voor de treksterkte (σ_{dt}) worden bepaald uit de gemeten buigsterkte:

$$\begin{aligned}\sigma_{dt} &= \eta_c \cdot \sigma_{b,gem} \cdot \{ 1 - k_n \cdot V_x \} / \gamma_m \\ &= 0,459 \cdot 23,8 \{ 1 - 1,92 \cdot 0,287 \} / 1,725 \\ &= 2,84 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Omdat het materiaal zich min of meer isotroop en bros gedraagt kan de afschuifsterkte van het materiaal gelijk gesteld worden aan de ontwerpwaarde voor de treksterkte. Immers, bij afschuiving van een isotroop materiaal leidt een afschuifspanning tot een hoofdspanning op trek met dezelfde waarde, georiënteerd onder 45 graden, dus:

$$\tau_d = \sigma_{dt} = 2,84 \text{ MPa}$$

Verder blijkt uit de buigtesten en de ILSS-testen dat in geen van de gevallen het materiaal aan de drukzijde bezwijkt. Dit betekent dat de druksterkte in elk geval hoger is dan de treksterkte. In een conservatieve benadering kan de ontwerpdruksterkte van het materiaal gelijk gesteld worden aan de ontwerptreksterkte:

$$\sigma_{dc} = \sigma_{dt} = 2,84 \text{ MPa}$$

Rekenwaarde BGT

De rekenwaarde van een materiaaleigenschap, X_d , in de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT, beoordeling van doorbuiging en trillingen) wordt bepaald via de gemiddelde waarde met:

$$X_d = \eta_c \cdot m_X$$

Hiermee volgt voor de ontwerp-elasticiteitsmodulus:

$$E_d = 0,459 \cdot 5590 = 2566 \text{ MPa}$$

Omdat het materiaal zich min of meer isotroop gedraagt en voor dit soort materialen de dwarscontractiecoëfficiënt rond 1/3 is, kan met de isotrope formule ook de ontwerpwaarde voor de glijdingsmodulus worden bepaald:

$$G_d = E_d \cdot (3/8) = 962 \text{ MPa}$$

Bijlagen

Driepuntsbuigproef	buigmodulus <i>MPa</i>	buigsterkte <i>MPa</i>
1	5499	21.6
2	6259	28.5
3	5999	28.5
4	4222	11.8
5	5614	30.9
6	6001	31.0
7	6176	25.3
8	4929	16.5
9	4894	16.3
10	6272	27.3
gemiddelde	5587	23.8
sd	699	6.83

ILSS	Kracht <i>N</i>	breedte <i>mm</i>	hoogte <i>mm</i>	b * h <i>mm²</i>	ILSS <i>MPa</i>
1	8288	57.37	23.80	1365	4.55
2	4620	57.36	21.53	1235	2.81
3	4898	57.45	20.40	1172	3.13
4	4363	59.25	21.69	1285	2.55
5	2585	57.08	23.40	1336	1.45
6	6395	59.27	22.05	1307	3.67
7	5889	59.29	22.24	1319	3.35
8	9319	59.05	22.47	1327	5.27
9	3158	58.82	21.91	1289	1.84
10	5330	58.93	21.71	1279	3.12
gemiddelde	5485				3.2
sd	2102				1.1

Literatuur

CUR-Aanbeveling 96: 2017

Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies

Tweede herziene uitgave, CROW 2018, ISBN 978-90-5367-645-5

European standard EN 1990: Eurocode – Basis of structural design

Annex D (informative): Design assisted by testing, December 2005

Nederlandse norm NEN-EN-ISO 14130:1997 Met vezel versterkte kunststofcomposieten,
bepaling van de schijnbare interlaminaire afschuifsterkte met de korte-armmethode

Nederlandse norm NEN-EN-ISO 178:2019 Kunststoffen - Bepaling van de buigeigenschappen

Busschen, A. ten, Topp, M.D.C., Bouwmeester, J., Schreuder, P., Bosman, P., Roetman, E.
Industrieel hergebruik van end-of-life thermoharde composieten.

Report of Professorship for Polymer Engineering, Windesheim.

LKT-RE-106851-1903, September 2019.



Lectoraat Kunststoftechnologie

Tests en ontwerpwaarden hergebruikt composiet

Ten behoeve van engineering van composietschuiven met kernen van hergebruikt composiet.

Over het lectoraat Kunststoftechnologie

Het lectoraat Kunststoftechnologie stimuleert innovatie op het gebied van kunststofverwerking en -producten in het midden- en kleinbedrijf. Vanuit de onderzoeksprojecten, uitgevoerd door docenten van de technische opleidingen bij de Hogeschool Windesheim in samenwerking met bedrijven, vloeien nieuwe kennis en inzichten naar het Hoger Onderwijs én het bedrijfsleven.