



Richtlijnen en Normen

TETRA project C-Bridge

Deze whitepaper werd opgesteld in het kader van het TETRA project C-Bridge en geeft een overzicht van de Europese richtlijnen die momenteel beschikbaar zijn voor het ontwerp van composietstructuren in bouwkundige en civieltechnische toepassingen, de verschillen tussen de Nederlandse richtlijn CUR96:2019 en het EuCIA document Prospect for new guidance in the design of FRP structures en een bespreking van de verschillende hoofdstukken in de CUR-Aanbevelingen.



AANSPRAKELIJKHEID

De Universiteit Gent en degenen die aan dit product hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze publicatie. Toch kan niet worden uitgesloten dat de inhoud onjuistheden bevat. De gebruiker van dit product aanvaardt daarvoor het risico. De Universiteit Gent sluit, mede ten behoeve van de auteurs, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van informatie uit dit product

TOELATING TOT BRUIKLEEN

De auteurs geven de toelating dit document voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van het document te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit dit document.

VLAAMSE CONTEXT

Aangezien gebruik gemaakt wordt van de Nederlandse CUR-Aanbevelingen, kunnen bepaalde begrippen gebruikt in de aanbevelingen anders vertaald worden in dit document om te passen binnen de Vlaamse context.

- Laminatentheorie – Laminaattheorie
- Bruikbaarheidsgrenstoestand – Gebruiksgrenstoestand
- Poisson coëfficiënt – Poisson-factor

INHOUDSOPGAVE

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Inleiding | 4 |
| 2 | Europese richtlijnen | 4 |
| 3 | Vergelijking CUR96:2019 en JRC-Document | 10 |
| 4 | CUR96:2019..... | 11 |
| 4.1 | Algemeen..... | 11 |
| 4.2 | Grondslagen van het ontwerp en de berekening..... | 12 |
| 4.3 | Materialen en materiaaleigenschappen | 14 |
| 4.4 | Duurzaamheid | 15 |
| 4.5 | Uitgangspunten constructieve berekening | 16 |
| 4.6 | Uiterste grenstoestand (UGT) | 17 |
| 4.6.1 | Sterkte | 17 |
| 4.6.2 | Stabiliteit | 18 |
| 4.6.3 | Vermoeiing | 19 |
| 4.6.4 | Kruip | 19 |
| 4.6.5 | Vandalisme en Brand..... | 19 |
| 4.7 | Gebruiksgrenstoestand (GGT) | 20 |
| 4.7.1 | Vervormingen..... | 20 |
| 4.7.2 | Trillingen en Comfort..... | 20 |
| 4.7.3 | Schade | 21 |
| 4.8 | Verbindingen | 21 |
| 4.8.1 | Lijmverbindingen..... | 21 |
| 4.8.2 | Mechanische verbindingen | 22 |
| 4.9 | Detailering | 22 |
| 4.10 | Realisatie, beheer en onderhoud..... | 23 |
| 4.11 | Bijlagen | 24 |
| 4.12 | Opmerkingen..... | 25 |
| 5 | Conclusie | 26 |

LIJST MET FIGUREN

Figuur 1: Referentie-as georiënteerde lamel (1,2) ten opzichte van de globale laminaatassen (x,y) .. 12

LIJST MET TABELLEN

Tabel 1: Overzicht toe te passen conversiefactoren 14

Tabel 2: Gebruikelijke toetsingsmethoden per type constructie..... 17

Tabel 3: Vereiste deskundigheid en (extern) toezicht 23

1 INLEIDING

Op het moment van deze publicatie is er geen enkele officiële Belgische of Europese norm rond het ontwerp van composietstructuren zoals bruggen. Wel is er een “Technical Specification” in voorbereiding die op termijn omgezet zal worden in een Eurocode. Voor pultrusieprofielen bestaat reeds een Europese productnorm EN13706, maar deze is vooral relevant voor de productiekenmerken en -eisen en niet voor het eigenlijke ontwerp.

In het verdere verloop van deze whitepaper zullen de Europese richtlijnen die momenteel beschikbaar zijn voor het ontwerp van composietstructuren opgesomd en kort besproken worden. De verschillen tussen de Nederlandse richtlijn CUR96:2019 en de JRC prospect for new guidance in the design of FRP structures, waar verder naar verwezen wordt als het JRC-document, zullen vervolgens besproken worden, waarna de verschillende hoofdstukken van de CUR-Aanbevelingen toegelicht worden. Hierbij zal enkel het ontwerp van composietstructuren voor civieltechnische toepassingen besproken worden. Voor een uiteenzetting van de berekeningsmethode wordt verwezen naar de whitepaper in verband met de ontwerpmethodes en softwarematige analysetechnieken, eveneens uitgebracht in het TETRA project C-Bridge.

2 EUROPESE RICHTLIJNEN

Verschillende landen, voornamelijk uit Europa, hebben bijgedragen tot de ontwikkeling van beschikbare richtlijnen voor het ontwerp van structurele composieten elementen, met als belangrijkste:

- EUROCOMP – Structural Design of Polymer Composites (1996)
- BD90/05 – Design of FRP Bridges and Highway Structures (2005)
- CNR-DT 205/2007 – Guide for the Design and Construction of Structures made of Pultruded FRP elements (2008)
- ACMA – Pre-Standard for Load and Resistance Factor Design of Pultruded Fiber Polymer Structures (2010)
- DIN 13121 – Structural Polymer Components for Building and Construction
- BÜV – Tragende Kunststoff Bauteile im Bauwesen (2014)
- CIRIA – Fibre-reinforced polymer bridges – guidance for designers (2018)
- CUR96:2019 – Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies (2019)
- EuCIA – Prospect for guidance on the design of FRP structures (2018)
- EN 13706 – Reinforced plastics composites – specifications for pultruded profiles
- Fiberline Design Manual for structural composite pultruded profiles

Volgende pagina's geven een korte beschrijving van de verschillende normen. Hier komen tevens het toepassingsdomein en de bruikbaarheid aan bod.

Naast deze richtlijnen voor structurele elementen worden VVK's ook gebruikt in andere sectoren zoals de energie- en offshoresector voor de productie van de windturbinebladen en de transportsector voor de productie van opslagvaten en leidingen. Hieronder worden dan ook nog bijkomende normen voor deze speciale gevallen vermeld.

- DIBt – Medienliste 40 für Behälter, Auffangvorrichtungen und Rohre aus Kunststoff (2015)
- GL – Guidelines for the Certification of Offshore Wind Turbines (2012)

- DNV-OS-C501 – Offshore standard for Composite components (2013)
- BS EN13121-3:2008 – GRP tanks and vessels for use above ground (2008)

Deze normen zijn hier enkel ter informatie opgenomen en worden in het verdere verloop van deze tekst niet besproken.

| Richtlijn | Beschrijving |
|--|--|
| <p>EUROCOMP – Structural Design of Polymer Composites</p> <p><u>Publicatie</u> 1996</p> <p><u>Landen</u> Finland, Frankrijk, Zweden, Verenigd koninkrijk</p> | <p>Deze richtlijn is opgesteld door een consortium, bestaande uit bedrijven en universiteiten vanuit heel Europa, met het doel om een code voor de goede praktijk te ontwikkelen die de ontwerpers vanuit de industrie in staat stelt om een breed scala aan polymere composieten te gebruiken voor structurele toepassingen. De ontwerpcode is bedoeld voor ingenieurs die vertrouwd zijn met het ontwerp van structuren uit conventionele materialen zoals staal en (gewapend) beton. Het bereik van deze code is gelimiteerd tot glasvezelversterkte kunststoffen materialen, onderdelen, verbindingen en assemblages, en sluit volledige structuren zoals gebruikt in de auto-industrie en de luchtvaart uit. Het resulterende document bestaat uit drie onderdelen: Deel 1 is de EUROCOMP ontwerpcode en Deel 2 is het EUROCOMP handboek dat meer achtergrondinformatie geeft. Deel 3 bevat korte technische rapporten van onderzoek dat uitgevoerd werd gedurende de ontwikkeling van de EUROCOMP ontwerpcode. Door de afwezigheid van officiële codes, kan dit document gezien worden als een vastlegging van de goede praktijk. Het document is gebaseerd op de beste beschikbare informatie en heeft geen enkele wettelijke status.</p> |
| <p>BD90/05 – Design of FRP Bridges and Highway Structures</p> <p><u>Publicatie</u> 2005</p> <p><u>Landen</u> Verenigd koninkrijk</p> | <p>Deze richtlijn geeft de eisen voor het ontwerp van wegbruggen en structuren en voor het vernieuwen van het dek van een bestaande brug met behulp van structurele elementen gemaakt uit vezelversterkte kunststofmaterialen weer. Ze heeft als doel om brugontwerpers met een zekere kennis van VVK materialen, maar zonder gespecialiseerde expertise en uitrusting voor de analyse op materiaalniveau, in staat te stellen een VVK brug te ontwerpen door gebruik te maken van standaardonderdelen die gevalideerd en geleverd zijn door de producent. Op maat gemaakte oplossingen die ontworpen zijn voor een specifieke individuele structuur zijn ook toegelaten, op voorwaarde dat de brugontwerper een gespecialiseerde kennis heeft in het ontwerp van VVK structuren op materiaalniveau en dat de structuren geverifieerd worden aan de hand van testen zoals voorgeschreven in deze richtlijn. Volgende onderdelen van een wegbrug zijn opgenomen in deze richtlijn: rijweg, dragende onderdelen, verbindingen tussen de beiden, oppervlaktesystemen (waterdichting/slijtlaag), verbindingen (bout/lijm), leuningverankering en toebehoren (stoepranden/voetpaden/afwatering/serviceleidingen/verankering van straatmeubilair).</p> |
| <p>CNR-DT 205/2007 - Guide for the Design and Construction of Structures made of Pultruded FRP elements</p> <p><u>Publicatie</u> 2008</p> <p><u>Landen</u> Italië</p> | <p>Dit document handelt over structuren opgebouwd uit VVK gepultrudeerde elementen. De meest gebruikte vezels zijn glas, carbon en aramide. Voor de huidige toepassingen in de burgerlijke bouwkunde worden in het algemeen glasvezels gebruikt, waarnaar een verwijzing wordt gemaakt in dit document. Het orthotrope gedrag beïnvloedt sterk de lokale en globale instabiliteit. Het voorgestelde analytische model veronderstelt een lineair-elastisch gedrag van de VVK, terwijl het verificatiemodel gebaseerd is op een weerstandmodel, zelfs in het geval van instabiliteit. De ontwerpisen nemen de experimentele kennis in rekening.</p> |
| <p>ACMA – Pre-Standard for Load and Resistance Factor Design of</p> | <p>Deze richtlijn heeft als doel om gebruikt te worden voor het ontwerp van gebouwen en andere structuren uit gepultrudeerde VVK composieten structurele elementen, verbindingen en geprefabriceerde bouwproducten.</p> |

| Richtlijn | Beschrijving |
|---|---|
| <p>Pultruded Fiber Polymer Structures Publicatie 2010 <u>Landen</u> Verenigde Staten</p> | <p>Voorspankabels en gewone kabels worden niet behandeld in deze richtlijn. De richtlijn is toepasbaar voor gepultrudeerde VVK structurele elementen met een symmetrische en gebalanceerde opbouw van de glasvezelversterking gecombineerd met een polymeermatrix.</p> |
| <p>BÜV – Tragende Kunststoff Bauteile im Bauwesen Publicatie 2014 <u>Landen</u> Duitsland</p> | <p>Deze richtlijn geeft aanbevelingen voor het ontwerp, de constructie en de dimensionering van dragende structuren in de burgerlijke bouwkunde, die geheel of gedeeltelijk uit uitgeharde thermohardende of thermoplastische kunststoffen bestaan. Het doel van dit document is een verhandeling te ontwikkelen waarin alle toepassingen van kunststofcomponenten in de zin van standaardisatie worden samengevat, waarbij ook rekening wordt gehouden met het ontwerpconcept op basis van de nieuwe ontwerpnormen, in het bijzonder DIN EN 1990, en geeft de ontwerper mogelijke planningstips. Het was niet de bedoeling van de commissie om een nieuwe norm te ontwikkelen.</p> |
| <p>CIRIA – Fibre-reinforced polymer bridges – guidance for designers Publicatie 2018 <u>Landen</u> Verenigd Koninkrijk</p> | <p>Deze richtlijn is besteed voor het ontwerp, inkoop, uitvoering, monitoring en inspectie van nieuwe bruggen waarvan de onderdelen, in de vorm van structurele elementen of vormen, bestaan uit VVK composietmaterialen. Dit document heeft als doel om de nodige informatie te verschaffen aan alle partijen die betrokken zijn bij het ontwerp, de productie, het onderhoud, het beheer en de controle van VVK bruggen en een nuttige richtlijn te voorzien voor andere burgerlijke structuren met VVK onderdelen. Dit is ook nuttig voor andere leden in de keten, van materiaalleveranciers tot eigenaars van de bruggen, door het voorzien van een algemeen bewustzijn over de belangrijkste uitdagingen en voordelen bij het gebruik van VVK en het contrast met conventionele materialen gebruikt in de bruggenbouw. Hoofdstuk 2 geeft de historische ontwikkeling van VVK bruggen. Hoofdstuk 3 biedt advies voor het conceptuele ontwerp van VVK bruggen, terwijl hoofdstuk 4 de bestanddelen en VVK materiaaltypes en hun mechanische eigenschappen voor het ontwerp behandelt. Hoofdstuk 5 geeft de structurele ontwerprichtlijnen gebaseerd op recente publicaties, onderzoeksresultaten en feedback op bestaande toepassingen. Vervolgens geven hoofdstuk 6 en 7 het praktische aspect weer van de inkoop, de productie en de installatie, naar de monitoring en de inspectie, tot het lage CO₂ ontwerp, de afbraak en de recyclage. Ten slotte behandelt hoofdstuk 8 de duurzaamheidsproblemen die belangrijk zijn voor ontwerpers, aangezien het lage onderhoud een belangrijke eigenschap is voor VVK bruggen.</p> |
| <p>CUR96:2019 – Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies Publicatie 2017</p> | <p>Deze CUR-Aanbeveling geeft richtlijnen voor het constructief ontwerpen en rekenregels voor het dimensioneren van vezelversterkte kunststoffen (VVK) in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies. De richtlijn is van toepassing op thermohardende VVK's met een vezelvolumepercentage (V_f) van ten minste 15%. In afwachting van de Eurocode in verband met vezelversterkte kunststoffen voor structurele toepassingen wordt deze richtlijn gebruikt in</p> |

| Richtlijn | Beschrijving |
|---|---|
| <p><u>Landen</u> Nederland, België</p> <p>EuCIA – Prospect for guidance on the design of FRP structures</p> <p>Publicatie 2018</p> <p><u>Landen</u> Europa</p> | <p>Nederland en België voor het ontwerp van composieten dragende elementen die geen gebruik maken van gepultrudeerde vezelversterkte elementen.</p> <p>Het rapport, opgesteld door , presenteert wetenschappelijke en technische achtergronden die bedoeld zijn om het debat te stimuleren en dient als basis voor verder werken aan een geharmoniseerde Europese visie op het ontwerp en de verificatie van dergelijke constructies.</p> |
| <p>EN 13706 – Reinforced plastics composites – specifications for pultruded profiles</p> <p>Publicatie 2002</p> <p><u>Landen</u> Europa</p> | <p>Deze Europese norm is enkel van toepassing voor gepultrudeerde profielen voor structurele doeleinden, welke in de norm zijn gedefinieerd als profielen waarvoor “de dragende eigenschappen het belangrijkste ontwerpcriterium zijn en waar het product deel is van een dragend systeem”. De norm specificeert de minimale eisen voor de kwaliteit, toleranties, sterkte, stijfheid en oppervlak van de profielen. In deze norm worden de profielen tevens in twee klassen verdeeld volgens de striktheid op de eisen voor de kwaliteit. De norm bestaat uit drie delen:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Specificatie voor de aanduiding/etikettering/markering van structurele profielen ten aanzien van de selectie van materialen, vezelversterking, oppervlaktebehandeling, enz. 2. Aanduiden van testen en toleranties voor gepultrudeerde structurele profielen. Een richtlijn voor de kwaliteit en de kwaliteitsbewaring is hier tevens gegeven. 3. Aanduiding van minimale waarden voor de technische eigenschappen van structurele profielen in relatie tot de twee standaardklassen. |
| <p>The Fiberline Design Manual for structural composite pultruded profiles</p> <p>Publicatie 2003</p> <p><u>Landen</u> Europa</p> | <p>Deze handleiding, ontwikkeld door Fiberline, biedt architecten, ingenieurs en technici een werkinstrument om het ontwerp en de constructie van structuren met composieten profielen te vergemakkelijken. Na een korte introductie over composietmaterialen, productiemethoden en toepassingen, bevat deze handleiding in het eerste hoofdstuk informatie omtrent de profielen, materialen en de theoretische basis voor de statische berekening. Hierin worden methoden beschreven voor de berekening van kolommen, transversaal belaste kolommen en balken met één, twee en drie overspanningen en geboute verbindingen. Verschillende voorbeelden van kolommen, balken en verbindingen zijn opgenomen aan de hand van gegevenspagina's. De voorkant van een dergelijke pagina beschrijft telkens de geometrie en belastingscapaciteit in druk en trek van het profiel, terwijl de achterkant het transversaal belaste profiel beschrijft voor één, twee en drie overspanningen. In dit eerste hoofdstuk worden tevens de uiterste grenstoestand (UGT), gebruiksgrenstoestand (GGT), de vervorming, agressieve omgevingen en accidentele belasting beschreven. Hoofdstuk 2 bevat gegevenstabellen over gepultrudeerde transversaal belaste composieten planken en roosters over</p> |

| Richtlijn | Beschrijving |
|-----------|---|
| | één, twee en drie overspanningen en de detaillering in verband met de bevestiging en uitvoering. Verder beschrijven hoofdstuk 3, 4 en 5 respectievelijk de beugels voor montage, de brandtechnische eigenschappen en chemische weerstand van de gepultrudeerde composieten profielen. De laatste hoofdstukken, 6, 7 en 8, geven informatie omtrent het transport, de eindelevensduur en de toleranties op de Fiberline profielen. |

3 VERGELIJKING CUR96:2019 EN JRC-DOCUMENT



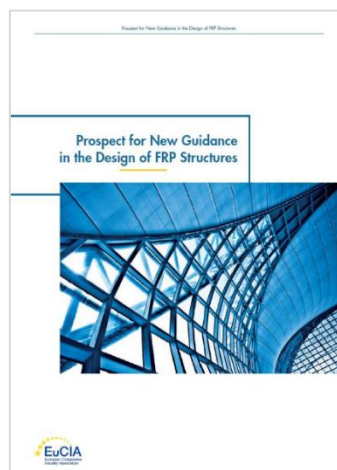
Nederlandse richtlijn

Publicatie: 2019

196 pagina's

Inhoud

1. Algemeen
2. Grondslagen van het ontwerp en de berekening
3. Materialen en materiaaleigenschappen
4. Duurzaamheid
5. Uitgangspunten constructieve berekening
6. Uiterste grenstoestand (UGT)
7. Gebruiksgrenstoestand (GGT)
8. Verbindingen
9. Detaillering
10. Realisatie, beheer en onderhoud



Europese richtlijn

Publicatie: 2018

173 pagina's

Content

1. General
2. Basis of design
3. Materials
4. Durability
5. Basis of structural design
6. Ultimate limit states (ULS)
7. Serviceability limit states (SLS)
8. Connections
9. Production, installation and maintenance

Zoals uit bovenstaande vergelijking van de inhoud kan gezien worden, zijn de beide documenten vrij gelijkaardig en behandelen deze dezelfde onderwerpen. Toch zijn er nog enkele verschillen merkbaar wanneer de hoofdstukken geanalyseerd worden. Hieronder volgt een korte opsomming en beschrijving van de verschillen.

- De materiaalfactoren en sommige van de conversiefactoren hebben een verschillende waarde in de CUR-Aanbeveling en het JRC-document. Het materiaalgebruik wordt in belangrijke mate beïnvloed door deze parameters en het belang ervan kan daardoor niet onderschat worden.
- Een toetsing op doorsnedeniveau in de uiterste grenstoestand (UGT) is niet voorzien in het JRC-document. De weerstand van een composiet kan hier enkel op lamel- of laminaatniveau bepaald worden.
- Het JRC-document beschrijft de belangrijkste faalmechanismen die kunnen optreden in een composieten sandwichpaneel, wat niet het geval is in de CUR96:2019.
- De toetsing in de gebruiksgrenstoestand (GGT) van de trillingen en het comfort neemt een minder prominente rol in bij het JRC-document in vergelijking met CUR-Aanbevelingen. De CUR geeft tevens formules voor de bepaling van de eigenfrequentie en grenswaarden waaraan

deze dient te voldoen. Tevens zijn in het JRC-document geen dempingswaarden opgenomen terwijl de Nederlandse aanbeveling een minimale en gemiddelde richtwaarde opgeeft.

- Het JRC-document bevat geen hoofdstuk in verband met de detaillering.

In het volgende deel zal de CUR96:2019 voor het ontwerp van structurele elementen verder toegelicht worden aan de hand van de verschillende hoofdstukken. Voor meer informatie omtrent de berekening wordt verwezen naar de whitepaper in verband met de ontwerpmethodes en softwarematige analysetechnieken die ook in het kader van werkpakket 3 werd ontwikkeld.

4 CUR96:2019

De Nederlandse CUR96:2019-richtlijn geeft de technische grondslagen voor het ontwerp en berekenen van draagconstructies met VVK's.

Deze CUR-Aanbeveling beschrijft in hoofdstuk 2 de grondslagen voor het ontwerp en de berekening van VVK's. Daarbij wordt, in aansluiting op de Eurocodes, ingegaan op diverse aspecten, zoals de fundamentele eisen, de betrouwbaarheid en de in rekening te brengen belastingen. Verder wordt ingegaan op partiële factoren en conversiefactoren. Met conversiefactoren worden op een eenvoudige wijze invloeden in rekening gebracht op de materiaaleigenschappen van een VVK door bijvoorbeeld onzekerheid of invloeden van buitenaf, zoals effecten van water(damp) en temperatuur.

In hoofdstuk 3 zijn eisen opgenomen op de materialen waaruit een VVK is opgebouwd, zoals de vezels, hars en eventuele vul- en hulpstoffen. Ook zijn in dit hoofdstuk eigenschappen beschreven voor de daarmee te vervaardigen lamellen, laminaten en doorsneden.

Hoofdstuk 4 beschrijft de maatregelen die kunnen worden genomen om de duurzaamheid te borgen van een VVK. Uitgangspunten voor de berekening van een VVK zijn opgenomen in hoofdstuk 5. Rekenregels voor de sterkte en stabiliteit (uiterste grenstoestanden) zijn opgenomen in hoofdstuk 6 en voor de vervormingen, trillingen en comfort (gebruiksgrenstoestanden) in hoofdstuk 7. Verbindingen komen aan bod in hoofdstuk 8. De detaillering enerzijds en de uitvoering, het beheer en het onderhoud anderzijds krijgen aandacht in respectievelijk hoofdstuk 9 en 10.

4.1 Algemeen

De CUR-Aanbeveling is van toepassing op thermohardende VVK's met een vezelvolumepercentage (V_f) van ten minste 15% en is voornamelijk van toepassing op VVK's met een vezelversterking van glas- en koolstofvezels met een thermohardende matrix van onverzadigd polyester-, vinylester- of epoxyhars en sluit andere materialen voorlopig grotendeels uit.

De richtlijn is van toepassing op constructies waar microscheurtjes in het laminaat zijn toegestaan. Echter is ze niet van toepassing op wapeningsstaven, kabels uit VVK of uitwendige versterkingen van bestaande VVK constructies.

Doordat een VVK een gelaagd opgebouwd orthotroop materiaal is, moet bij de toetsing van een VVK constructie daarom niet alleen de hoogst belaste richting beschouwd worden, maar ook de andere richtingen, met name richtingen zonder vezelversterking. Door het gelaagde karakter van het materiaal moet in het ontwerp van VVK naast het toetsen van spanningen en vervormingen in het vlak ook worden getoetst op bezwijkvormen tussen lagen, zoals interlaminaire afschuiving, bezwijken door afpelspanningen en delaminaties.

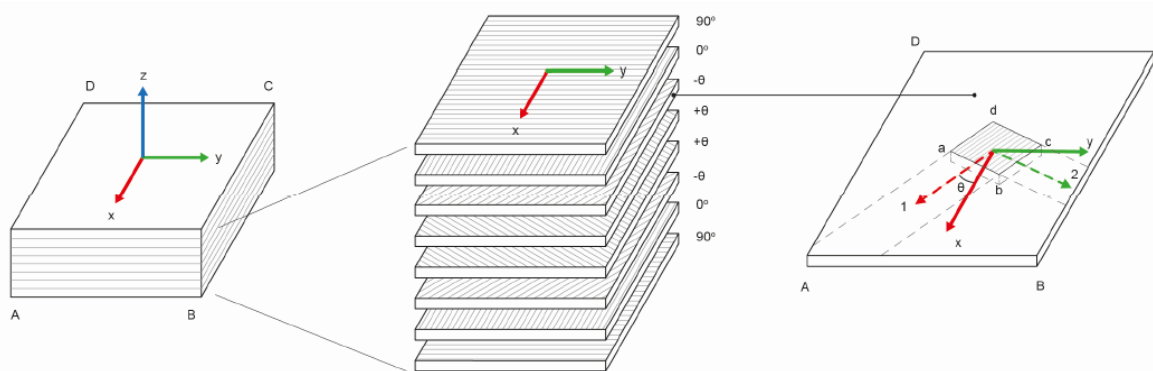
Omdat VVK niet plastisch vervormt, mag geen rekening worden gehouden met herverdeling van spanningen door plasticiteit. Voorts zijn de VVK-eigenschappen afhankelijk van omgevingscondities en tijdsafhankelijk.

In CUR96 zijn belangrijke normen en richtlijnen voor het ontwerp, de materialen en de beproeving van VVK constructies opgesomd. Verder kunnen de voorwaarden teruggevonden worden voor het

ontwerpen en berekenen van constructies volgens de constructieve eisen van het Bouwbesluit. In de volgende secties worden de termen, definities, afkortingen en symbolen die gebruikt worden in de richtlijn besproken en wordt de eenheid voor de desbetreffende symbolen vermeld.

Voor vezels, lamellen, laminaten en constructie-elementen gelden de volgende regels voor de definiëring van de asoriëntaties, zoals ook weergegeven in Figuur 1:

- Voor lamelassen wordt de codering 1, 2, 3 gebruikt, waarbij 1 de vezelrichting en 3 de richting loodrecht op het lamelvlak voorstelt;
- Voor de laminaatassen de codering x, y, z, waarbij z de richting loodrecht op het laminaatvlak voorstelt;
- Voor de globale assen van een constructie element wordt de codering X, Y, Z gebruikt. De keuze van de richting van de globale assen wordt veelal logischerwijze gerelateerd aan de positionering van het laminaat in het constructie-element;
- De hoek θ is de hoek tussen de 1- richting van een lamel en de x-richting van het laminaat.



Figuur 1: Referentie-as georiënteerde lamel (1,2) ten opzichte van de globale laminaatassen (x,y)

De hoeveelheid vezels in de verschillende richtingen van een lamel of laminaat wordt uitgedrukt in:

- een vezelvolumepercentage [%] van de aanwezige vezelversterking in het lamel of laminaat of,
- het oppervlaktegewicht van de vezelversterking in g/m^2 .

4.2 Grondslagen van het ontwerp en de berekening

De fundamentele eisen voor het ontwerp en de berekening van een VVK constructie moeten voldoen aan de algemene regels in EN 1990 en EN 1991. Deze eisen zijn van toepassing, waarbij geldt dat:

- het ontwerp is gebaseerd op grenstoestanden met de in EN 1990 en EN 1991 voorgeschreven belastingen en belastingscombinaties;
- de voorgeschreven regels en procedures in deze CUR-Aanbeveling voor weerstanden, bruikbaarheid en duurzaamheid zijn toegepast;
- aangetoond is dat de in een berekening aangehouden mechanische eigenschappen en geometrische toleranties zijn gerealiseerd, waarbij dit ten minste is beoordeeld op de meest ongunstige locatie in de constructie en waarbij rekening is gehouden met de mogelijke invloeden van additieven en het productieproces en met de afname van de eigenschappen gedurende de ontwerplevensduur.

In de CUR-Aanbeveling zijn rekenregels opgenomen waarbij gebruik gemaakt wordt van partiële factoren, karakteristieke waarden, materiaal- en conversiefactoren. Voor het werken met partiële factoren geldt hoofdstuk 6 van EN 1990. Voor de bepaling van de rekenwaarden van de weerstand en

van de materiaal- en producteigenschappen zal gebruik gemaakt worden van conversie- en materiaalfactoren. De materiaalfactor is afhankelijk van het al dan niet uitgevoerd zijn van testen op de lamel of het laminaat en de variatie op het productieproces (pultrusie, prepreggen, vacuüminjectie, wikkelen, handlamineren of spuiten).

Lamel- of laminaateigenschappen kunnen worden bepaald dan wel worden afgeleid uit:

- a) testen (zie bijlage B van de CUR-Aanbeveling);
- b) testen die zijn uitgevoerd voor een eerder project aan vergelijkbare materialen of constructie(elementen). Randvoorwaarde is dat de gegevens zijn bepaald met laminaten die zijn samengesteld uit dezelfde combinatie van hars- en vezeltype, met hetzelfde proces en onder dezelfde omstandigheden geproduceerd. Het vezelvolumegehalte mag afwijken maar dan moet daarop worden gecorrigeerd volgens hoofdstuk 3. Bij hars-gedomineerde sterkte-eigenschappen (druksterkte, sterkte dwars op een vezelrichting, afschuifsterkte en ILSS) moet zijn vastgesteld dat op de vezel hetzelfde type sizing is aangebracht in het beoogde lamel of laminaat als in die van een eerder project;
- c) waarden opgegeven door de leverancier onder voorwaarde dat deze zijn bepaald volgens een representatieve norm en dat de vereiste betrouwbaarheid is gespecificeerd of is af te leiden;
- d) theoretische modellen zoals beschreven in hoofdstuk 3 van de CUR-Aanbeveling;
- e) representatieve waarden uit erkende vakliteratuur. Als een betreffende eigenschap bepalend is in het ontwerp moet de waarde door testen worden onderbouwd.

De volgende materiaaleigenschappen moeten altijd, ongeacht of deze gegevens zijn te herleiden uit eerdere projecten of literatuur, worden bepaald door middel van testen op het laminaat. Dit als onderdeel van een kwaliteitscontrole:

- de treksterkte, elasticiteitsmodulus en breukrek (trektest);
- de interlaminaire schuifsterkte (ILSS test);
- de glastransitietemperatuur (T_g test).

De conversiefactor verdisconteert te verwachten effecten gedurende de levensduur van onder andere veroudering en omgevingscondities op de materiaaleigenschappen van VVK. De effecten van water(damp), temperatuur, tijdsduur van de belasting (kruip) en cyclische belasting (vermoeiing) beïnvloeden de sterkte en stijfheid van het composietmateriaal. Tabel 1 vermeldt de verschillende toetsingsaspecten en welke conversiefactoren gebruikt moeten worden.

Tabel 1: Overzicht toe te passen conversiefactoren

| Toetsaspect | Conversiefactoren | | | |
|---|-------------------|-------------|-------|------------|
| | Temperatuur | Water(damp) | Kruip | Vermoeiing |
| Sterkte (UGT) | √ | √ | √ | |
| Stabiliteit (UGT) | √ | √ | √ | √ |
| Vermoeiing (UGT) | √ | √ | | |
| Vervorming onder quasi-permanente belasting (GGT) | √ | √ | √ | √ |
| Vervorming onder kortdurende belasting (GGT) | √ | √ | | √ |
| Trillingen en Comfort (GGT) | √ | √ | | √ |
| Schade (GGT) | √ | √ | √ | √ |

De materiaal- of constructie-eigenschappen en effecten van externe invloeden moeten, indien geen betrouwbaar theoretisch model voorhanden is, door proeven worden bepaald, overeenkomstig EN 1990 en weergegeven in bijlage B van de CUR-Aanbeveling.

4.3 Materialen en materiaaleigenschappen

In het hoofdstuk ‘Materialen en materiaaleigenschappen’ van de CUR-Aanbeveling wordt voor mechanische materiaaleigenschappen onderscheid gemaakt in karakteristieke waarden en richtwaarden. Hiervoor geldt:

- Karakteristieke waarden mogen zonder meer worden gebruikt in ontwerpberekeningen.
- Richtwaarden van een bepaalde eigenschap van een materiaal moeten worden onderbouwd met testresultaten. Richtwaarden mogen worden gebruikt als referentie of voor een eerste inschatting van de haalbaarheid van een bepaald ontwerp.

Voor zowel vezels (glas en koolstof), thermoplastische harsen (polyester, vinylester en epoxy) en enkele kernmaterialen (PUR, PVC en PMI) zijn richtwaarden opgegeven voor de belangrijkste eigenschappen zoals de dichtheid, de glastransitietemperatuur voor het hars, de Poisson-factor, de stijfheid in langse en dwarse richting, de afschuifstijfheid, de rekgrens, de sterkte en de thermische uitzetting.

De keuze van het hars moet worden afgestemd op de vereiste eigenschappen, zoals glastransitietemperatuur, chemische resistentie, brandwerendheid en elektrische geleidbaarheid. De eigenschappen van thermohardende harsen moeten zijn bepaald door testen conform bijlage B van de CUR-Aanbeveling. Tevens moet de invloed van additieven, vul- en hulpstoffen op de materiaaleigenschappen van de VVK worden meegenomen in het ontwerp.

Lamellen, opgebouwd door combinatie van vezels en een hars, worden geclassificeerd op basis van oriëntatie van de vezelversterking. Onderscheid wordt gemaakt in:

- Unidirectionele lamellen (UD-roving, UD-tapes, UD-legsels);
- Bidirectionele lamellen (woven roving (WR), woven fabric, woven cloth, stitched fabric);
- Matlamellen (discontinue glasvezelmat (CSM), continue glasvezelmat en spuitroving).

Lameleigenschappen moeten worden bepaald volgens proeven beschreven in bijlage B van de CUR-Aanbeveling of door gebruik te maken van de formules van Halpin-Tsai voor UD- en bidirectionele lamellen en Manera voor matlamellen. In de CUR-Aanbeveling kunnen tabellen gevonden worden voor de karakteristieke stijfheidswaarden voor verschillende vezelvolumepercentages en voor de

rekgrenzen gebruikt voor de toetsing op de lamelsterkte van een UD-, gebalanceerde bidirectionele en matlamel op basis van E-glas met een onverzadigde polyester. Tevens zijn er ook tabellen opgenomen voor de thermische uitzettings- en geleidingscoëfficiënt voor de hierboven vernoemde vezelconfiguraties.

De stapeling van lamellen met verschillende hoeken leidt tot de opbouw van een laminaat met een welbepaalde dikte en opbouw. Karakteristieke waarden van laminaateigenschappen mogen worden bepaald:

- door berekening met de klassieke laminaattheorie (KLT) vermeld in bijlage C van de CUR-Aanbeveling, waarbij de karakteristieke lameleigenschappen afkomstig zijn uit de tabellen;
- door het afleiden uit testresultaten van vergelijkbare laminaten, waarbij gecorrigeerd moet worden voor afwijkende vezelvolumegehaltes, volgens bijlage C van de CUR-Aanbeveling;
- op basis van testen volgens bijlage B van de CUR-Aanbeveling.

Voor vezelversterkte thermohardende kunststoffen met een vezelvolumegehalte van minder dan 15% of in één van de hoofdrichting (0° , 90° , $+45^\circ$ en -45°) minder dan 12,5% van de vezelversterking, moeten de eigenschappen van het laminaat in de afwijkende hoofdrichting afgeleid of bepaald worden uit testresultaten conform bijlage B van de CUR-Aanbeveling.

Bij het bepalen van de laminaateigenschappen moet rekening gehouden worden met de invloed van de lamelstapeling en daarmee samenhangende koppeling van krachten en vervormingen. Het is aan te bevelen een symmetrische en gebalanceerde laminaatopbouw toe te passen. Een niet-symmetrische laminaatopbouw kan leiden tot vervormingen tijdens belasting en productie.

Voor de karakteristieke waarde van de stijfheid mag worden uitgegaan van de gemiddelde stijfheid. Om te komen tot de karakteristieke waarde van de laminaatsterkte mag worden uitgegaan van:

- de in de CUR-Aanbeveling vermelde sterktecriteria opgebouwd aan de hand van het vereenvoudigd rekriterium en gecombineerd spanningscriterium;
- representatieve testdata, waarbij gecorrigeerd moet worden voor afwijkende parameters;
- testen volgens bijlage B van de CUR-Aanbeveling.

Voorts geeft de CUR-Aanbeveling ook richtwaarden voor de interlaminaire afschuif- en treksterkte (ILSS en ILTS) van het laminaat voor verschillende hars types, aangezien het hars de grootste invloed heeft op deze eigenschappen tussen de verschillende lagen van een laminaat.

4.4 Duurzaamheid

In het hoofdstuk 'Duurzaamheid' in de CUR-Aanbeveling wordt ingegaan op maatregelen om de VVK constructie tegen veroudering en verwerking te beschermen. Bij het bepalen van de vereiste mate van bescherming van de constructie moet rekening worden gehouden met het gebruik, de ontwerp levensduur, het onderhoudsprogramma, de optredende belastingen, effecten van langdurige en wisselende belastingen en het milieu waarin de constructie zich bevindt. Gecombineerde milieuomstandigheden kunnen in sommige gevallen een groter effect hebben dan de individuele effecten.

Laminaatkenmerken die bepalend zijn voor de duurzaamheid van een VVK zijn o.a.:

- Het aantal gasinsluitingen in de hars (voidgehalte).
- Het uithardingsproces. Een goede doorharding (bijvoorbeeld door post cure) draagt bij tot een langere levensduur.
- De chemische resistentie van het toegepaste hars en beschermende stoffen. Aanbevolen wordt om in overleg met de harsleverancier de geschiktheid van het hars te beoordelen.

- De vezel-harsinterface. Deze wordt onder andere bepaald door vezeltype, hars, sizing en procescondities, waaronder temperatuur en druk bij de uitharding.

Voorts beschrijft de CUR-Aanbeveling maatregelen voor specifieke milieu-omstandigheden die een invloed hebben op VVK constructies, zoals:

- UV-straling die zorgt voor degradatie van polymeren en sterktereductie van het hars en in sommige gevallen ook van de vezelversterking (aramide). Beschermingsmaatregelen tegen UV zijn: het toepassen van een gelcoat, topcoat of laklaag; het gebruik van een UV-bestendige hars; het toevoegen aan het hars van pigment of UV-absorbers.
- Thermische materiaaleffecten die voornamelijk belangrijk zijn voor aramidevezels.
- Water(damp) en chemicaliën kunnen leiden tot schade en een reductie van stijfheid en sterkte van het VVK materiaal. Om dit te voorkomen dient het laminaat volledig uitgehard te zijn alvorens het te belasten of dient een coating toegepast te worden.
- Statische oplading kan voorkomen worden door het aanbrengen van bliksemgeleiding.
- De constructie moet voldoen aan de voor de toepassing geldende brandklasse of brandeisen. Er moet rekening worden gehouden met het feit dat brandvertragende vulstoffen en harsmodificaties van invloed kunnen zijn op de bestandheid tegen omgevingscondities.

Voorts moet elke constructie van VVK vergezeld gaan van een beheer- en onderhoudsplan waarin ten minste is vastgelegd:

- welke onderdelen onderhoud behoeven;
- waaruit dit onderhoud bestaat, met welke middelen en op welke wijze;
- de frequentie waarmee dit onderhoud uitgevoerd moet worden.

4.5 Uitgangspunten constructieve berekening

Het berekeningsmodel moet geschikt zijn voor de berekening van VVK constructies. Dit betekent dat rekening moet worden gehouden met:

- a) De samenstelling van de constructie (lamellen, laminaten, vezelrichting en -oriëntatie) en de daarmee samenhangende orthotrope eigenschappen.
- b) Het optreden van dwarskrachtvervormingen. Een effect van dwarskracht op de vervorming mag bij VVK constructies over het algemeen niet worden verwaarloosd in de bijdrage aan de totale vervorming, in tegenstelling tot staal- en betonconstructies. Bij eindige-elementenanalyses moeten dan ook elementtypen worden gebruikt die afschuifvervorming meenemen.
- c) Het lineair-elastische gedrag. Hierdoor mag er niet gerekend worden op herverdeling van de spanningen door plasticiteit.
- d) Tijdsafhankelijke effecten op het gedrag van VVK en de invloed hiervan op de geometrie door het toepassen van conversiefactoren.
- e) Een mogelijke koppeling van normaalkrachten en momenten. Bij een niet-symmetrische en niet-gebalanceerde laminaatopbouw kan een axiale normaalkracht ook kromming veroorzaken. De meest eenvoudige manier om koppeling te vermijden is een volledig symmetrische en gebalanceerde opbouw van de laminaten en constructies.

Nagegaan moet worden wat het effect is van een verbinding op de krachten in de constructie en op de vervorming van de constructie. Indien het effect van invloed is op de krachten en vervormingen moet daarmee rekening worden gehouden in de berekening. In een globale analyse mogen

lijmverbindingen worden beschouwd als continue verbindingen. Boutverbindingen moeten afhankelijk van de uitvoering worden beschouwd als scharnierend, semicontinue of continue verbinding.

Verder dient er ook rekening gehouden te worden met zettingen van de steunpunten en dienen de berekeningen uitgevoerd te worden onder de belastingen en belastingscombinaties van EN-1990 en EN-1991.

Voor het schematiseren van de constructie voor analytische en numerieke modellen mogen de liggers en kolommen gemodelleerd worden door lijnvormige elementen terwijl platen en schalen door vlakke of gekromde elementen worden gemodelleerd. In beide gevallen dient rekening gehouden te worden met de invloed van orthotropie en afschuifvervorming. Tevens zal, indien dit een belangrijke invloed heeft op het resultaat van de berekening, het effect van “shear lag” en lokaal plooiën in rekening gebracht moeten worden.

Voor de gebruiksgrenstoestanden (GGT) en de uiterste grenstoestanden (UGT) mag een lineair-elastische berekening worden gebruikt. Vervorming ten gevolge van tweede-orde-effecten moeten in beschouwing genomen worden als deze de snedekrachten in belangrijke mate verhogen, of als door de vervorming het constructiegedrag in belangrijke mate wijzigt. Hiervoor moet gebruik worden gemaakt van een geometrisch niet-lineaire berekening of tweede-orde berekening.

Verder dient rekening gehouden te worden met imperfecties. Hieronder worden verstaan restspanningen door uitharding of geometrische imperfecties zoals scheefstand, het niet volledig recht zijn, onvlakheid, passingson nauwkeurigheden ter plaatse van voegen en verbindingen en geometrische excentriciteiten.

Twee berekeningsmethoden worden voorzien in de CUR-Aanbevelingen:

1. Analytische berekening, hierbij mogen vereenvoudigde berekeningsmethoden op basis van isotroop materiaalgedrag niet worden gebruikt, tenzij wordt aangetoond dat deze berekeningsmethoden adequate resultaten geven. Bij het vereenvoudigen van constructie-eigenschappen en details in analytische modellen moeten de aannames en modelkeuzes conservatief zijn.
2. Eindige-elementenberekening, waarbij de elementtypes moeten worden gekozen op basis van de aard van de situatie. Het gedrag van een model moet het gedrag van de constructie goed beschrijven.

4.6 Uiterste grenstoestand (UGT)

Voor de toetsing van de uiterste grenstoestand gelden door het optreden van kruip andere conversiefactoren voor langdurig aanwezige belastingen dan voor kortdurend aanwezige belastingen. Een toets op sterkte en stabiliteit in de uiterste grenstoestanden moet worden uitgevoerd op één van de volgende niveaus: lamelniveau, laminaatniveau en doorsnedeniveau. Het bezwijken van de eerste lamellen in een laminaat leidt in het algemeen slechts tot geringe reductie van de stijfheid en is daarom niet als uitgangspunt genomen voor het bezwijken. De ontwerper dient zelf te beoordelen welke schade die optreedt voor het bezwijkpunt (het maximum in het spanning-rekdiagram of kracht-verplaatsingsdiagram) acceptabel is en waar de limiet wordt gelegd.

4.6.1 Sterkte

Hieronder worden drie methoden toegelicht voor het bepalen van de weerstand van het laminaat of de doorsnede in een beschouwde belastingssituatie. Deze methoden vormen de basis van de toets voor staven, platen en schalen en worden in Tabel 2 weergegeven.

Tabel 2: Gebruikelijke toetsingsmethoden per type constructie

| Type constructie | Lamelniveau | Laminaatniveau | Doorsnedeniveau |
|------------------|-------------|----------------|--------------------|
| Staven | √ | √ | √ (Meest gangbare) |

| | | | |
|-------------------|---|---|---|
| Platen en schalen | √ | √ | X (Niet mogelijk door de variërende spanningen over de doorsnede) |
|-------------------|---|---|---|

1. Toets op **lamelniveau** wordt gebruikt bij meerassige spanningen en bij combinatie van verschillende vezelversterkingsmaterialen in één laminaat. Hierbij wordt vastgesteld wanneer het laminaat bezwijkt op basis van het bezwijken van de afzonderlijke lamellen. Het laminaat wordt als bezweken beschouwd als de laatste lamel is bezweken. In de analyse wordt vastgesteld wanneer de eerste lamel bezwijkt. Indien het bezwijken van de eerste lamel toelaatbaar is, kan een verdere iteratieve analyse uitgevoerd worden totdat de volgende lamel bezwijkt. Bezweken lamellen mogen niet meer in rekening gebracht worden bij de berekening van de reststerkte van het laminaat door de stijfheid ervan gelijk te stellen aan 0 N/mm^2 . De optredende rekken of spanningen in de lamel mogen bepaald worden door:

- a. Analytische berekening met behulp van KLT;
- b. Numerieke berekening met FEA-software.

De weerstand van een lamel of laminaat mag worden vastgesteld door testen of uit de tabellen uit hoofdstuk 3 van de CUR-Aanbeveling indien het laminaat voldoet aan de gestelde voorwaarden.

2. Toets op **laminaatniveau**: Hierbij wordt bepaald wanneer het laminaat bezwijkt op basis van een spannings- of rek criterium voor het laminaat als geheel. De weerstand van het laminaat moet worden vastgelegd door testen of, indien het gaat om een glasvezelversterkte thermohardende kunststof met in elke hoofdrichting ten minste 12,5% vezels, volgens het vereenvoudigde rek criterium gedefinieerd in sectie 6.2.2 van de CUR-Aanbeveling.

3. Toets op **doorsnedeniveau** kan enkel voor staven (profielen, kolommen, balken, liggers) toegepast worden. Hier wordt de weerstand bepaald op het niveau van krachten en momenten. Hierbij mag de rekenwaarde van de optredende snedekracht in elke doorsnede de rekenwaarde van de bijbehorende weerstand niet overschrijden. De weerstand van de doorsnede van de staaf moet worden vastgesteld door testen of mag analytisch worden bepaald op basis van de weerstand van het laminaat.

4.6.2 Stabiliteit

Bij het bepalen van de stabiliteit van constructieve elementen moet rekening worden gehouden met invloeden van kruip op de optredende vervormingen. Kruip heeft geen invloed op de stijfheid maar kan bij langdurige belasting zorgen voor grotere excentriciteiten en dus instabiliteit in de structuur.

Bij staven die belast zijn op druk dient de knikstabiliteit gecontroleerd te worden, terwijl bij staven belast op buiging de kipweerstand belangrijk wordt. De stabiliteit van plaatvelden en schalen moet worden bepaald op plaatniveau en laminaatniveau. In het algemeen wordt de weerstand tegen knik, hetzij globaal of lokaal, vastgesteld door een analyse met een programma op basis van de eindige-elementenmethode. Voor eenvoudige plaatconfiguraties en belastingssystemen mag gebruik worden gemaakt van een analytische benadering aan de hand van formules voor het bepalen van de elastische kritieke knikspanning. Voor platen wordt het knikgedrag bij belasting op druk, afschuiving en zuivere buiging gecontroleerd.

De te beschouwen bezwijkvormen van sandwichelementen zijn:

- Globale instabiliteit van sandwichelementen, zijnde Eulerse knik en instabiliteit door afschuiving van de kern onder druk (shear crimping) alsook de combinatie hiervan.
- Bezwijken van de huiden door plooi van de huid.
- Bezwijken van de kern op lokale instabiliteit (honingraat).

Bij de analyse van sandwichelementen moet rekening worden gehouden met de invloed van imperfecties en kromming, de orthotropie van de huiden, invloeden van omgevingscondities en degradatie op de materiaaleigenschappen van de huiden en het kernmateriaal, en afschuifvervorming.

Een schuimkern mag als verende steun worden beschouwd als de werking van de sandwich over de levensduur kan worden gegarandeerd. Een lichtgewicht, brosse schuimkern mag niet als dragend worden beschouwd, tenzij de constructieve bijdrage door testen (langeduur) is aangetoond.

4.6.3 Vermoeiing

Met vermoeiing moet rekening gehouden worden bij constructies:

- Waarbij de grootte van de belasting cyclisch varieert en het aantal te verwachten belastingswisselingen groter is dan 5000, of
- Waarbij het absolute maximum van de cyclische belasting groter is dan 40% van de breukbelasting.

Voor verkeersbruggen moet gebruik gemaakt worden van de belastingsmodellen van EN 1991-2. Vermoeiing van VVK is niet alleen afhankelijk van het bereik van de spanning maar ook van de hoogte van de gemiddelde spanning.

Voor kritische onderdelen moet een representatieve test aantonen dat de vermoeiingslevensduur binnen specificaties blijft na (impact)schade. De combinatie van (impact-)schade en daaropvolgende vermoeiingsbelasting kan negatieve invloed hebben op de vermoeiingslevensduur. Schade kan voorkomen worden door bijvoorbeeld het toepassen van een beschermende oppervlaktelaag. Aangetoond moet worden dat schadegroei binnen de levensduur niet tot bezwijken of onacceptabel prestatieverlies leidt. Impact kan leiden tot (inwendige) delaminatie. Analytische modellen zijn nog onvoldoende nauwkeurig om het ontstaan van schade of schadegroei te voorspellen. Indien schade niet uitgesloten is, is testen noodzakelijk. Testprotocollen zijn nog in ontwikkeling.

4.6.4 Kruij

Kruijbreuk moet voorkomen worden door het limiteren van de spanningen. Voor de toetsing van kruijbreuk geldt dat alleen het aandeel van de langdurig aanwezige belasting in beschouwing moet worden genomen. Dit komt overeen met de quasi-blijvende combinatie. Onder deze belasting moeten de optredende spanningen in de doorsnede onder de kruijbreuklimiet blijven.

Als vereenvoudigde aanname geldt voor glas- en koolstofvezelversterkte laminaten met hoofdzakelijk UD-vezelversterking in de belaste richting voor axiale trekspanningen een karakteristieke kruijbreuklimietwaarde van respectievelijk 30% en 90% van de karakteristieke sterkte. In overige gevallen kan gebruik gemaakt worden van literatuur of moet de kruijbreuklimiet bepaald worden uit testen.

4.6.5 Vandalisme en Brand

In het ontwerp moet rekening worden gehouden met het mogelijke optreden van vandalisme (vernieling) en de eventuele gevolgen voor de constructie. De draagkracht van de constructie en verbindingen bij brand moeten worden getoetst. Op kritische plaatsen moet worden vastgesteld dat geen bezwijken optreedt binnen de voorgeschreven tijdsperiode van brandwerendheid en dat rookontwikkeling binnen de eisen blijft. Brand kan op drie manieren leiden tot schade:

1. wegbranden van de hars en schade aan de vezels;
2. overschrijding van de maximale gebruikstemperatuur van de hars;
3. overschrijden van de sterkte door overbelasting door andere constructiedelen.

4.7 Gebruiksgrenstoestand (GGT)

De constructie dient gedurende de levensduur te voldoen aan de criteria horende bij de gebruiksgrenstoestanden (GGT):

- Vervormingen die het uiterlijk van de constructie, het comfort van mensen en het functioneren van de constructie aantasten of schade toebrengen;
- Trillingen die ongemak voor mensen veroorzaken of de functie van de constructie beperken;
- Schade die nadelig uitwerkt op het uiterlijk, de duurzaamheid of het functioneren van de constructie.

VVK combineert in het algemeen een relatief lage stijfheid met een relatief hoge sterkte. GGT-criteria zijn daardoor veelal meer maatgevend voor het ontwerp van de globale constructie dan criteria voor de uiterste grenstoestanden (UGT). Voor details zoals verbindingen zijn in het algemeen de UGT-criteria bepalend. Bij een VVK constructie kunnen grotere vervormingen en trillingen optreden onder incidentele belasting in vergelijking met constructies uit bijvoorbeeld staal of beton.

Er wordt aanbevolen om de vervormingen in relatie tot doorsnede/profiel en de schade te beoordelen aan de hand van de karakteristieke belastingscombinaties, terwijl vervormingen in relatie tot discomfort gerelateerd kunnen worden aan frequente belastingscombinaties.

Bij de berekening van vervormingen en het trillingsgedrag moet rekening worden gehouden met effecten op de stijfheid van het materiaal door omgevingscondities en veroudering. Uitgegaan moet worden van de voor het ontwerp meest ongunstige situatie.

Indien een lagere stijfheid ongunstig is, dan moet in de berekening worden uitgegaan van een gereduceerde stijfheid door het invoeren van conversiefactoren. Indien een hogere stijfheid ongunstig is, moet in de berekening worden uitgegaan van de niet-gereduceerde gemiddelde stijfheid van het laminaat, dus zonder rekening te houden met invloeden van onder meer veroudering en omgevingscondities. Bij blijvende en quasi-blijvende belastingen moet rekening gehouden worden met kruip en relaxatie. Dit mag door het toepassen van de partiële factor voor kruipeffecten.

4.7.1 Vervormingen

De vervorming moet worden bepaald met representatieve analytische formules of een berekening met de eindige-elementenmethode. Rekening moet worden gehouden met effecten van orthotropie en afschuifvervorming. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van de algemene liggerformules uitgebreid met de vervorming ten gevolge van afschuiving, aangezien de bijdrage van de vervorming door afschuiving relatief groot is in vergelijking met betonnen en stalen constructies. Vervormingen mogen niet leiden tot onveilige situaties en discomfort en mogen niet groter zijn dan de vervorming die kan worden gevolgd door andere aansluitende elementen.

Bij het bepalen van de doorbuiging van plaatvormige elementen van VVK constructies moet rekening worden gehouden met anisotropie. Bij dikke laminaten (breedte/dikteverhouding ≥ 10) moet ook rekening worden gehouden met de afschuifvervorming.

4.7.2 Trillingen en Comfort

VVK constructies kunnen trillingsgevoelig zijn door de hoge sterkte en relatief lage stijfheid, waardoor bij het ontwerp moet rekening worden gehouden met het optreden van trillingen en resonantie. Hierbij kan de eigenfrequentie in belaste toestand aanmerkelijk lager zijn dan de eigenfrequentie in onbelaste toestand.

De eigenfrequentie en het trillingsgedrag moeten worden bepaald in de situatie met en zonder invloeden van de omgevingsconditie en verouderingseffecten. Dat wil zeggen op basis van de richtwaarde van de stijfheid en de gereduceerde stijfheid rekening houdende met conversiefactoren.

Bij de bepaling van de eigenfrequentie van een verticale of laterale trilling van een ligger met een constante doorsnede moet rekening gehouden worden met buigstijfheid van de ligger en de randvoorwaarden van de ligger. Indien de belasting die de trilling veroorzaakt meer bedraagt dan 5% van het eigengewicht van de draagconstructie, dient deze in rekening gebracht te worden bij het bepalen van de eigenfrequentie.

Comfort voor mensen, uitgedrukt in termen van perceptie van trillingen, wordt bepaald door de combinatie van versnelling, doorbuiging en frequentie van de respons. Het relatief lichte gewicht van VVK constructies maakt dat deze gevoelig zijn voor trillingshinder. Voor de comfortcriteria gelden de eisen volgens EN 1990 en de bijbehorende trillingsbelastingen volgens EN 1991-1-4 (wind) en EN 1991-2 (bruggen). Deze kunnen aangevuld worden met de aanbevelingen uit het JRC wetenschappelijk en technisch rapport voor het ontwerp van lichtgewicht voetgangersbruggen voor mens-geïnduceerde trillingen (*Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations*).

Voor VVK voetgangersbruggen moet bij de bepaling van de verticale versnelling tussen 2,2 Hz en 3,4 Hz de resulterende amplitude tot een kwart gereduceerd worden. Het comfort moet worden getoetst in de situatie met en zonder invloed van omgevingscondities en verouderingseffecten. Tevens geeft de CUR-Aanbeveling een minimale en gemiddelde waarde voor de dempingsfactor van een VVK brug. De waarde van de demping van het materiaal is afhankelijk van veel factoren, waaronder constructiedetails, de vezeloriëntaties en het vezelvolumegehalte.

4.7.3 Schade

In het ontwerp van een VVK constructie moet rekening worden gehouden met schade aan de constructie door eigenlijk en oneigenlijk gebruik als deze schade is te verwachten en de constructie na het toebrengen van de schade functioneel moet blijven.

4.8 Verbindingen

Van een verbinding in een VVK constructie is sprake als afzonderlijke (uitgeharde) laminaten en/of sandwichpanelen met elkaar of met andere constructiedelen van een ander materiaal worden verbonden. In de CUR-Aanbeveling wordt onderscheid gemaakt in lijmverbindingen en mechanische verbindingen.

Een verbinding die tot stand komt door het oplamineren of injecteren van een composietlaag op geheel of gedeeltelijk uitgeharde delen (lamineerverbinding), moet als lijmverbinding worden beschouwd. Hier is er sprake van secondary bonding, wat kan leiden tot een gereduceerde sterkte.

Verbindingen moeten robuust ontworpen worden. Indien er sprake is van bros bezwijken van een verbinding, zoals bij lijmverbindingen of bij boutverbindingen anders dan op vlaktedruk, moet een tweede draagweg zijn voorzien als bezwijken van de verbinding leidt tot (voortschrijdend) bezwijken van de constructie.

De werking van een verbinding moet door validatie of testen zijn aangetoond:

- a) In het geval van een analytische beschouwing met behulp van theoretische/empirische formules en/of een analyse met de eindige-elementenmethode.
- b) Voor het beoordelen van de effecten van langeduurbelasting en vermoeiing op verbindingen.

Testen mag achterwege blijven indien gebruik wordt gemaakt van testgegevens van eerder uitgevoerde, gevalideerde testen op vergelijkbare verbindingen, getest onder vergelijkbare belastingcondities.

4.8.1 Lijmverbindingen

De invloed van veroudering, water(damp) en temperatuur op de sterkte van de lijmverbinding moet in het ontwerp worden meegenomen door het toepassen van conversiefactoren of worden bepaald

uit testen. De volgende eigenschappen van een lijmverbinding zijn van invloed op de sterkte en moeten in het ontwerp worden gespecificeerd:

- gebruikte materialen;
- oppervlaktebehandeling;
- aanbrengmethode en uitharding van de lijm (zoals druk en omgevingscondities);
- geometrie lijmverbinding, zoals:
 - type verbinding (bijvoorbeeld enkele of dubbele lapsverbinding);
 - lijmlaagdikte;
 - stijfheid en afschuining van de te verbinden delen;
 - afschuining ("fillet") van de lijmlaag, zie bijlage G van de CUR-Aanbeveling;
 - overlaplengte.

4.8.2 Mechanische verbindingen

De bepalingen in de CUR-Aanbeveling zijn van toepassing op boutverbindingen en bij uitbreiding klinknagels. De sterkte van een boutverbinding, inclusief die onder vermoeiingsbelasting, moet worden getoetst op basis van testen conform bijlage B van de CUR-Aanbeveling. De test moet representatief zijn voor de sterktebepalende parameters van een boutverbinding, de belasting, veroudering en de omgevingscondities. De invloed van veroudering en omgevingscondities moet worden verdisconteerd door het toepassen van conversiefactoren.

Er mag niet worden gerekend met een sterktewinst door voorspannen van bouten anders dan de kracht die ontstaat door "handvast" aandraaien, tenzij door middel van testen is aangetoond dat:

- De berekende sterkte-toename door voorspannen in de praktijk ook wordt gerealiseerd.
- De voorspanning in de bout door spanningsrelaxatie gedurende de levensduur van de verbinding niet daalt tot beneden de waarde die nodig is voor de aangehouden sterkte-toename in het werk, zonder tussentijds aandraaien van de verbinding.

In het ontwerp moeten ten minste de sterktebepalende parameters van een boutverbinding worden vastgelegd:

- a) Omschrijving van het laminaat waarin de boutverbinding is aangebracht (materiaal, opbouw, dikte)
- b) Het verbindingsmateriaal dat wordt toegepast (type, materiaal, afmetingen, sluitring, ...)
- c) De geometrie van de verbinding (breedte, overlaplengte, aantal bouten, boutconfiguratie, ...)

Bij het ontwerp van een boutverbinding moet worden gestreefd naar een hoge mate van opsluiting van het laminaat. Dit kan bijvoorbeeld door het toepassen van sluitringen en ten minste gecontroleerd aandraaien met een momentsleutel.

Verder beschrijft de aanbeveling de analyse van boutverbindingen en hoe de weerstand van verschillende boutconfiguraties kan berekend worden.

4.9 Detaillering

Bij het beoordelen van de uitvoering en sterkte van details moet rekening gehouden worden met de effecten van orthotropie, interlaminaire schuifspanningen en spanningen loodrecht op het vlak. Een gedetailleerde spanningsanalyse is doorgaans noodzakelijk. Indien er geen betrouwbaar theoretisch model voorhanden is om de respons te bepalen moet de invloed van details op de sterkte van de

constructie worden afgeleid uit testen. Dit geldt in ieder geval indien een detail kritisch is ten aanzien van vermoeiing.

In het ontwerp moet rekening gehouden worden met onder andere verbindingen, krachtsinleidingen, dikteveranderingen en stijfheidsovergangen, gaten en uitsnijdingen.

4.10 Realisatie, beheer en onderhoud

De procedures voor productie, uitvoering en montage moeten schriftelijk zijn vastgelegd. De vereisten zijn weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3: Vereiste deskundigheid en (extern) toezicht

| Fase | Eisen t.a.v. uitvoering | Eisen t.a.v. toezicht |
|---------------------------------|---|--|
| Productie | Producenten en personeel met voldoende aantoonbare ervaring en expertise in VVK materialen en productietechnieken. | Onafhankelijke toetsing van kwaliteit t.a.v. gebruikte materialen, vezellegging, harsmenging, laminaatkwaliteit en uithardingsprocedure. |
| Montage- installatie | Uitvoerend personeel moet vertrouwd zijn met het werken met VVK-constructies en duidelijke instructies hebben ontvangen van de werkzaamheden. | Onder toezicht van een deskundige met ervaring in het werken met VVK materialen en constructies |
| Inspectie | Geïnstreerde inspecteur die werkt volgens een bijgeleverd inspectieplan. | |

In het kwaliteitssysteem moeten ten minste de materiaalcontroles (o.a. opslagcondities, hoeveelheid water(damp)), de procescontrole (o.a. malcontroles, omgevingscondities, vezellegging, uitharding) en de eindcontrole worden beschreven. Tevens wordt de producent verplicht om bepaalde informatie bij te houden omtrent de materialen, gewichten en kwaliteitscontrole.

Grondstoffen voor VVK moeten voldoen aan het betreffende deel van EN 16245. De herkomst van materialen en componenten voor het vervaardigen van een VVK moet traceerbaar zijn. Voorts moet de opslag van de materialen plaatsvinden volgens voorschriften van de leverancier. De CUR-Aanbeveling geeft tevens ook de parameters die gecontroleerd en beheerst moeten worden gedurende en voorafgaande aan het productieproces van VVK structuren. Bij een afnametoets moet ten minste een controle worden uitgevoerd op of wordt voldaan aan de uitgangspunten in het ontwerp ten aanzien van de geometrische maten en toleranties, vlakheid en rechtheid en de materiaalimperfecties.

Tijdens het hanteren en transport van VVK delen moeten geconcentreerde belastingen worden voorkomen. Optillen (hijsen) van VVK-delen mag alleen gebeuren op vooraf bepaalde punten en met hijsmiddelen die de constructie niet beschadigen. In het werkplan moet een hijsplan zijn opgenomen.

De VVK constructie moet voorzien zijn van een beheer- en onderhoudsplan (B&O plan). Dit plan moet het mogelijk maken:

1. Het object over de gehele ontwerplevensduur binnen de grenstoestanden te houden.
2. Een deugdelijke en verantwoorde inspectie uit te voeren.

Het beheer- en onderhoudsplan moet een beschrijving geven van het reguliere periodieke onderhoud en bevat de punten waarop de constructie geïnspecteerd moet worden, toetsingscriteria, uit te voeren onderhoud en eventueel interval ervan, beperkingen in het gebruik en uitgesloten handelingen, een

opleveringsdossier, reparatie-instructies voor belangrijke componenten en instructie voor het vervangen van delen die binnen de levensduur te verwachten waren.

Om de staat van een constructie te kunnen beoordelen ten opzichte van de beginsituatie, is het wenselijk direct na installatie een nulmeting uit te voeren. Hierbij moet rekening worden gehouden met temperatuurinvloeden. De temperatuur ten tijde van de beoordeling moet worden vastgelegd.

Noodzakelijk onderhoud moet worden uitgevoerd om de constructie te laten voldoen aan de ontwerputgangspunten. Het onderhoud van VVK constructiedelen betreft zowel preventief als correctief onderhoud. Onderscheiden worden:

- Reparatie van scheuren, delaminaties en schade aan laminaten.
- Repareren van oppervlakkige schades aan de coating of kitlagen.
- Onderhoud van verbindingen.
- Het repareren of vervangen van onderdelen met een kortere levensduur dan de constructielevensduur (bijvoorbeeld slijtlagen).
- Reiniging van oppervlakken.

De VVK constructie moet met een vooraf vastgestelde frequentie worden geïnspecteerd en periodiek worden onderhouden. Een periodieke visuele inspectie moet regelmatig uitgevoerd worden, terwijl een gedetailleerde inspectie aanvullend op de visuele inspectie moet uitgevoerd worden bij bijvoorbeeld blijvende vervormingen.

Bij reparatie van schade moet rekening worden gehouden met een mogelijk veranderde verdeling van spanningen in de constructie. De wijze van reparatie bij schade of defecten aan het VVK moet worden afgestemd met de ontwerper of een VVK constructeur. Voor de reparatie geldt:

- a) Reparaties moeten onder schone droge stofvrije omstandigheden worden uitgevoerd, tenzij is aangetoond dat onder de gestelde omstandigheden voldoende resultaat wordt bereikt.
- b) Bij het ontwerpen en uitvoeren van de reparatie moet deze zo worden uitgevoerd dat de restlevensduur van de constructie is geborgd.
- c) De reparatie moet voorzien zijn van een inspectie-instructie.

4.11 Bijlagen

De CUR-Aanbeveling bevat de hieronder beschreven bijlagen.

- A. Literatuur: Nuttige en informatieve bronnen en normdocumenten.
- B. Testen: Geeft de verschillende testen en normdocumenten die geraadpleegd kunnen worden voor het bepalen van de materiaalparameters, vermoeiingseigenschappen, de verificatietesten en constructieproeven op full-scale proefstukken. Tevens is een tabel opgenomen voor het nemen van de juiste grootte van de steekproef voor de testen en zijn formules weergegeven voor het afleiden van de karakteristieke waarde uit de steekproef en het bepalen van de rekenwaarde bij toetsing in de uiterste grenstoestand (UGT).
- C. Klassieke laminaattheorie en D-matrix: Uitwerking van klassieke laminaattheorie voor planparallele laminaten om te komen tot de ABD-matrix, gebruikt voor het omrekenen van krachten en momenten naar rekken en krommingen.
- D. Milieu-impact: Bedoeld op de gevolgen die een product of materiaal heeft op het milieu, het menselijke leven en het klimaat waaronder bijvoorbeeld het gebruik van grondstoffen, energiegebruik, landgebruik, watergebruik en de vervuiling van de lucht en water behoren. Voor een beoordeling van het materiaal moet de milieu-impact over de gehele levenscyclus (productiefase, gebruiksfase en eindgebruiksfase) beschouwd worden aan de hand van een

LCA-studie. Tevens worden maatregelen gegeven die bijdragen aan een lagere milieu-impact in de levenscyclus van een VVK constructie.

- E. Formules voor de lokale knikspanning van profielen.
- F. Interactiefactoren voor toets stabiliteit.
- G. Verbindingen: Aanvullende informatie in verband met verbindingen zoals de detaillering en analyse van lijmverbindingen.
- H. Acceptatieniveaus imperfecties en defecten bij oplevering: Geeft een tabel met de verschillende schadefenomenen die zich kunnen voordoen in een VVK constructie, een korte beschrijving over het desbetreffende schadefenomeen en het acceptatieniveau dat toegelaten is bij de inspectie van een VVK constructie.
- I. Specifieke aandachtspunten vezelversterkte kunststoffen: In de laatste bijlage worden verschillende aandachtspunten voor VVK draagconstructies vermeld.

4.12 Opmerkingen

In dit laatste deel worden enkele opmerkingen belangrijk voor de interpretatie van deze CUR96:2019-Aanbevelingen geformuleerd.

1. Over het algemeen komt het karakter van de CUR96 op veel plaatsen overeen met een norm voor het ontwerp van staalconstructies. Echter is er in de CUR-Aanbevelingen weinig oog voor de specifieke constructievormen die in vezelversterkte kunststoffen (VVK) veel voorkomen, namelijk schaalconstructies en sandwichconstructies.
2. In de CUR96 worden veel conservatieve overwegingen gevolgd bij het ontwerp van een VVK draagconstructie. In vele gevallen wordt er verwezen naar testen.
3. Materiaalfactoren worden zeer detaillistisch behandeld, zoals bijvoorbeeld voor de lijmverbindingen. De relatie met de praktijk is hiermee zoek.
4. Imperfecties worden hier beschouwd als een raamwerk. Dit is een type constructie die in VVK's weinig voorkomt en is daardoor niet herkenbaar voor de praktijk. In de praktijk worden schaalvormige delen of sandwichconstructies toegepast. Veeleer treden imperfecties op doordat schaalvormige delen krom of scheef trekken door uitharding.
5. De formule voor vermoeiingsberekening baseert zich op de maximale spanning in tegenstelling tot de staalnormen waar het verschil tussen de maximale en de minimale spanning in het materiaal gebruikt wordt. In alle gevallen moeten testen uitgevoerd worden om de vermoeiingslevensduur van de constructie te bepalen. Kennis die hierover beschikbaar is over de vermoeiing van windmolenbladen wordt niet meegenomen in de vermelde formules, wat wel het geval was in de eerste versie van de CUR96.
6. In afwijking van de Eurocode is in de figuur voor de bepaling van de reductiecoëfficiënt op de amplitude van de trilling een rode stippellijn getrokken tussen de frequenties veroorzaakt door de eerste (1,25 – 2,3 Hz) en tweede (2,5 – 4,6 Hz) harmonische trilling. Een grote groep Europese deskundigen heeft echter bepaald dat deze verbindingslijn tussen de eerste en tweede harmonische trilling niet gerechtvaardigd is, waardoor het ontwerp van een composietstructuur op basis van trillingen versoepeld wordt.
7. De opgevoerde berekeningswijze voor de analyse van een lijmverbinding in bijlage G.2 van de CUR-Aanbevelingen is in tegenspraak met de doctoraatsstudie van Daniel Gleich. Hierin wordt onder meer aangetoond dat met name de verbetering van de sterkte door een grotere lijmdikte volgend uit de formules van CUR96, niet strookt met de werkelijkheid. De spanningen aan het einde van een lijmverbinding zijn niet op deze wijze te berekenen omdat er een singulariteit optreedt. Overigens zijn er andere parameters die de lijmsterkte beïnvloeden,

maar deze worden niet meegenomen in de berekening van de sterkte van de lijmverbinding door CUR96.

5 CONCLUSIE

In dit document werd een overzicht gegeven van de Europese richtlijnen die momenteel beschikbaar zijn voor het ontwerp van composietstructuren in bouwkundige en civieltechnische toepassingen. Daarnaast werden de verschillen tussen de Nederlandse richtlijn *CUR96:2019* en het *EuCIA document Prospect for new guidance in the design of FRP structures* toegelicht en werden de verschillende hoofdstukken in de CUR-Aanbevelingen besproken. Op het moment van deze publicatie is een *Technical Specification* in voorbereiding die in de toekomst op Europees niveau in parallel met landgebonden richtlijnen kan worden gebruikt. Op termijn zal deze worden omgezet in een Eurocode.