
fib Bulletin 105 over vezelversterkt beton

Eind 2022 is fib Bulletin 105 verschenen. Dit rapport bevat state-of-the-art kennis over vezelversterkt beton, ook kennis die niet is opgenomen in Model Code 2020. Het gaat daarbij niet alleen om staalvezelbeton maar om meerdere typen vezels.



Vezelversterkt beton (*Fibre Reinforced Concrete* ofwel FRC) is een composietmateriaal dat wordt gekenmerkt door het nascheurgedrag.

Doordat vezels scheurvlakken overbruggen, behoudt het beton treksterkte na het scheuren. Aan het materiaal is door een brede groep mensen binnen *fib* meer dan 30 jaar gewerkt, onder meer door *fib* Task Group 4.1 (FRC) en *fib* Task Group 4.2 (*Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete*, UHPFRC). Alle ontwikkelde kennis is nu gebundeld in *fib* Bulletin 105 – Fibre Reinforced Concrete, met als doel ontwerpers te helpen in de praktijk. In dit artikel wordt een korte samenvatting gegeven van het rapport.

Het rapport gaat, na een inleiding met een toelichting op de toepassingsmogelijkheden van staalvezelbeton, in op de theoretische achtergronden. De invloeden van eigenschappen van de vezels worden geschetst, net als de manier waarop de mechanische eigenschappen van vezelbeton moeten worden bepaald. Het rapport licht toe hoe met het materiaal moet worden ontworpen, in zowel de SLS als de ULS, en gaat in op aspecten als levensduur, brand en mengselsamenstelling. Daarnaast worden de toepassingsmogelijkheden voor de versterking van bestaande constructies en voor aardbevingsbestendigheid behandeld. Het rapport geeft een aantal ontwerpvoorbeelden met analytische en meer geavanceerde niet-lineaire eindige-elementenanalyses (NLFEA) en sluit af met verschillende praktijkvoorbeelden van de toepassing van *Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete* (UHPFRC) zowel in de civiele sector als in de utiliteitsbouw. Op de meest relevante onderdelen wordt in dit artikel nader ingegaan.

Toepassingen

Vezelversterkte materialen worden al lange tijd gebruikt, ook in constructieve toepassin-

auteur



ING. AB VAN DEN BOS

Directeur
NlyseConsultants.com

gen. In beton zijn staalvezels de meest toegepaste vezels (SFRC). Ze kunnen in beton goed worden gecombineerd met traditionele wapening. In dat geval wordt gesproken van hybride wapening (SF+RC).

De toegevoegde waarde van vezels komt het meest tot uiting bij hogere betondoorsnedes, omdat daar over het algemeen een groter deel aan ongewapend beton onder trek aanwezig zal zijn. Deze trekcapaciteit, die zich ook vertaalt in dwarskrachtsterkte, blijft na het scheuren van het beton aanwezig op een bepaald sterkteniveau.

In het bulletin worden verschillende toepassingen voor vezelbeton genoemd. Bekend zijn vloeren gefundeerd op staal of op palen. Ook in dikkere constructies zoals onderwaterbeton of funderingen voor windturbines is FRC interessant, vanwege de verhoogde dwarskrachtsterkte. Verder wordt geprefabriceerd beton genoemd, waarbij het toepassen van vezels het storten vereenvoudigt, doordat de hoeveelheid traditionele wapening kan worden beperkt. Minder traditionele wapening door het gebruik van vezels leidt ook bij gebogen schaalconstructies (bijvoorbeeld tunnels of gebouwen) tot interessante mogelijkheden, onder meer dankzij de eenvoudigere detaillering (foto 1). In geval van vermoeiing, bijvoorbeeld bij brugdekken, leidt de toepassing tot minder onderhoud en ten slotte kunnen de seismische eigenschappen worden verbeterd (vanwege verhoogde energieabsorptie).

Voor constructieve toepassingen werken vezels met een hogere stijfheid dan het (betonnen) basismateriaal het beste. Synthetische vezels hebben meestal een lagere stijfheid en presteren daardoor in constructief opzicht vaak onvoldoende. Ze hebben meer scheurwijdte nodig om te worden geactiveerd. Kunststofvezels (polypropyleen, PP) zijn voor toepassing tegen plastische krimp en voor het verhogen van de brandwerendheid wel interessant. Voor deze laatste toepassing →

worden microvezels toegepast, die smelten bij hoge temperaturen en daardoor lege kanaaltjes achterlaten, waardoor de opbouw van hoge dampdrukken en het afspatten van de dekkingszone bij brand wordt voorkomen. Andere vezels en materialen met hoge stijfheid/sterkte kunnen constructief geschikt zijn, maar zijn in economisch opzicht tot op heden vaak minder interessant.

Ondanks de voordelen en bekende succesvolle toepassingen sinds de jaren 1960, is het gebruik van vezelbeton nog geen standaard. Vaak wordt dit geweten aan het gebrek aan regelgeving. Dit argument is slechts gedeeltelijk gerechtvaardigd. Veel landen zoals Oostenrijk, Frankrijk, Duitsland, Italië, Spanje, Zweden, de VS en Japan hebben al richtlijnen voor het gebruik. Ook Nederland heeft zijn eigen CUR-Aanbeveling 111 (met toepassingsgebied voor vloeren). Vele onderzoekers uit de academische wereld en de industrie werken voortdurend samen om ingenieurs en constructeurs over de hele wereld te begeleiden bij het correct en veilig ontwerpen van FRC-constructies op basis van state-of-the-art kennis. Het nieuwe *fib* bulletin 105 is hiervan een voorbeeld.

Invloed eigenschappen vezels

Vezels verbeteren voornamelijk het treksterktegedrag na het scheuren (*hardening effect*). De vorm en de verankering, alsmede de draadsterkte en de stijfheid van de vezels zijn het meest bepalend voor het gedrag. Daarbij presteren dunnere vezels in technisch opzicht beter, want bij een gelijke dosering in kg/m^3 leidt het gebruik van een dunnere vezel tot meer vezels per m^3 en zijn er meer vezels beschikbaar om een scheur te overbruggen. Maar aan de andere kant zorgen dunnere (lees: meer) vezels tot een slechtere verwerkbaarheid. Om de verankering te verbeteren wordt vaak de vorm van de vezels aangepast. Het bekendste voorbeeld is de eindhaak (*hooked end*).

De lengte van de vezels is bepalend voor de mate waarin vezels scheuren kunnen overbruggen. Ze moeten daarom een minimale lengte hebben; te korte vezels kunnen de scheur niet overbruggen. Bij hoge betonsterkte en kleine korreldiameters

is de aanhechting van de vezels aan het beton beter. In dat geval kunnen dus kortere vezels worden gebruikt. Dat is bijvoorbeeld het geval bij UHPFRC.

Eenvoudige type vezels en lage doseringen leiden tot *tension softening* en één grote scheur. Bij sterke en goed verankerde vezels ontstaat *tension hardening*, waarbij de postpiek treksterkte hoger is dan de scheursterkte. Er ontstaan meer scheuren met een kleinere scheurwijdte (fijner verdeeld scheurenpatroon). Als er sprake is van *tension softening* bij axiale trek, bijvoorbeeld bij verhinderde krimp, kan het beton toch ook *hardening* gedrag vertonen bij buiging (externe belasting). Dit wordt schematisch weergegeven in figuur 2.

Een veelgemaakte opmerking is dat de dispersie/variatie en oriëntatie van de vezels niet constant is, waardoor zwakke zones ontstaan en het materiaal niet robuust is of niet kan worden gebruikt voor constructieve toepassingen. Dit wordt erkend in het document. Deze effecten worden in de ontwerpregels meegewogen en verwerkt in materiaalfactoren en andere factoren in de reken-formules.

Constructieve elementen met een kleiner scheuroppervlak bij bezwijken (bijvoorbeeld smalle balken) zijn gevoeliger voor zwakke zones dan grotere elementen zoals fundering(splaten). Het scheurenpatroon en het scheuroppervlak bij bezwijken is bepalend voor de effectiviteit van de vezels. Hoe meer scheurlengte er optreedt en wordt overbrugd door vezels, des te dichter de capaciteit de gemiddelde sterkte benadert. Als slechts een kleine scheurlengte wordt ontwikkeld (zoals bij balken die in verhouding smal zijn), is de variatie in de resultaten groter (een slechtere of karakteristieke sterktedoorsnede is dan maatgevend). Verhoogde doseringen leiden in het algemeen tot minder zwakke zones, omdat er dan meer vezels een potentiële scheur overbruggen.

Bij statisch onbepaalde constructies, of platen die in meerdere richtingen overspannen, zal het vloeilijnenpatroon bij bezwijken veel

FIB BULLETINS

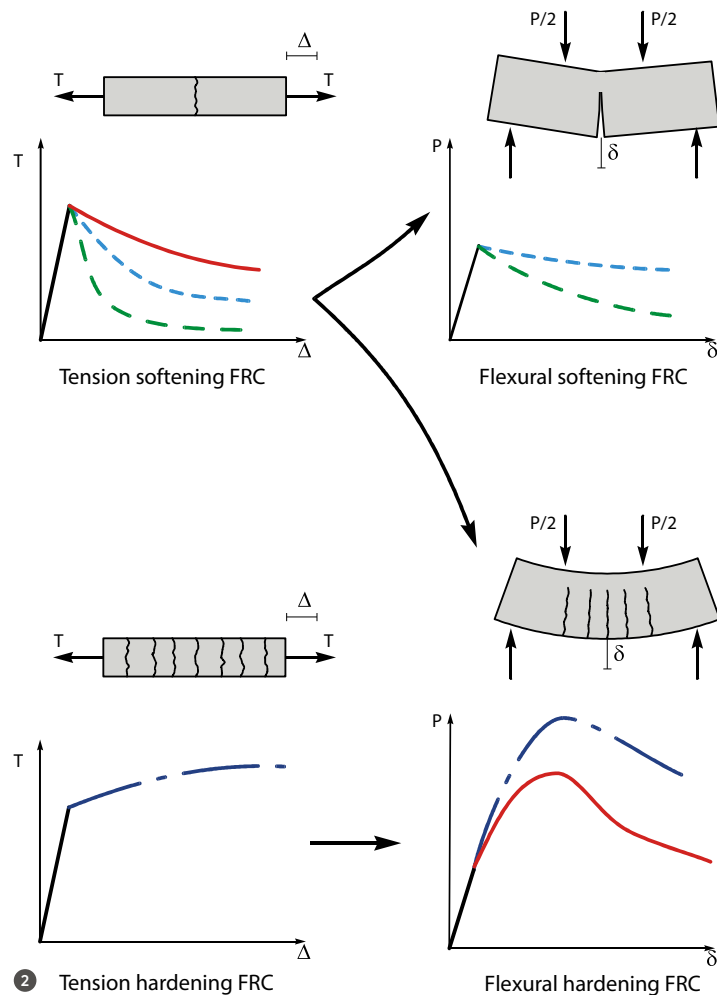
Een aantal maal per jaar publiceert *fib international* een *fib* Bulletin. Dit zijn verschillende rapporten met bijvoorbeeld aanbevelingen, ontwerphandleidingen of state-of-the-art kennis over een specifiek onderwerp. Van de voor *Cement*-lezers meest relevante rapporten publiceren we een samenvatting, in samenwerking met de vaste commissie *fib* van *Stufib*.

De toegevoegde waarde van vezels komt het meest tot uiting bij hogere beton-doorsnedes

VASTE COMMISSIE FIB

Om de link tussen *Stufib* en *fib* te stimuleren is binnen *Stufib* in 2022 de vaste commissie *fib* opgericht. Deze commissie volgt de ontwikkelingen binnen *fib* en informeert de *Stufib*-leden daarover. Ze inventariseert en selecteert onderwerpen waarvoor samenwerking kan worden opgezocht. Ook bewaakt ze de samenwerking tussen *Stufib* studiecellen en *fib* Task Groups. Zitting in de commissie hebben:

- dr.ir. Agnieszka Bigaj-Van Vliet
- ing. Ab van den Bos
- ir. Henco Burggraaf (namens bestuur *Stufib*)
- ir. Jasper Doorgeest (secretaris)
- ing. Ronald Klein-Holte
- ir. Thijs Pierik
- ir. Rob Vergoossen (voorzitter)



langer zijn dan in de hiervoor genoemde balk. De capaciteit over dit grotere scheuroppervlak zal dan veel dichterbij de gemiddelde sterkte waarde uitkomen.

Afhankelijk van de variatiecoëfficiënt ligt de karakteristieke treksterkte tussen de 50 en 75% van de gemiddelde sterkte. De rekenwaarde van de treksterkte die bij de berekening wordt gebruikt, is ongeveer 1/3 van de gemiddelde axiale treksterkte. Door deze veiligheidsfactoren komt het bij minder goede vezels vaak voor dat de rekenwaarde van de residuele treksterkte zelfs lager is dan de rekenwaarde van ongewapend beton volgens de Eurocode 2.

Voor buiging kan men voor een vereenvoudigde benadering een factor van 0,45 gebruiken, conform de volgende formule:

$$M_{cr} = 1/6 b h^2 f_t = M_u = 0,45 b h^2 f_{Ftu}$$

Als $f_{Ftu} > 0,37 f_t$, kan *tension hardening* bij buiging worden waargenomen ($M_u > M_{cr}$, want $0,37 \cdot 0,45 \geq 1/6$), waarbij f_{Ftu} het niveau van de resttreksterkte overeenkomt met het niveau bij een scheuropening van 2,5 mm (gesteld als uiterste grens) in de ULS-toestand.

Bij het combineren met traditionele wapening moet men ontwerpen op spanning-rekrelaties. De optredende scheurrekken worden omgezet in een scheurwijdte door te vermenigvuldigen met een karakteristieke lengte, die de afstand tussen de scheuren vertegenwoordigt (fig. 3). Figuur 3 laat zien dat een toenemende constructiehoogte (h^2) kan leiden tot een hogere sterkte (moment in de rechter grafiek, *direct analysis*), maar de grotere karakteristieke lengte leidt tot een →

De fib Model Code biedt voor vezelbeton sterkteklassen 1a tot 8e

afnemend rekvermogen (verminderde ϵ_{wm2} en lagere rotatie φ en dus meer brosheid, met uiteindelijk zelfs vezeluittrekking). Het is behoorlijk complex om de karakteristieke lengte (tussen de scheuren) te bepalen. Deze hangt met name af van de constructiehoogte en de hoeveelheid traditionele wapening. In het bulletin worden handvatten gegeven om de karakteristieke lengte voor verschillende constructies te benaderen.

Als scheurwijdtes moeten worden beperkt, zijn hybride oplossingen beter dan wanneer alleen vezels worden toegepast. Dit omdat het *size effect* minder invloed heeft, omdat de traditionele wapening de scheurwijdte in de uiterste vezel vermindert. De vezels kunnen bovendien leiden tot een betere hechtsterkte van de traditionele wapening aan het beton (met reductie van de verankeringslengte tot gevolg). Het voert te ver om in dit artikel een voorbeeld uit te werken (indien daar behoefte aan is, dan kan dit als reactie op het artikel worden aangegeven bij de online publicatie).

Bepaling mechanische eigenschappen

Voor het bepalen van de mechanische eigenschappen, schrijven Model Code 2010 en 2020 een driepuntsbuigproef voor op een ingezaagde balk (150 mm hoog), conform EN 14651. Daaruit volgt een kracht-verplaatsing- en scheurwijdterelatie. Die kan worden omgezet naar een spanning-rekrelatie. Bij enkele specifieke scheuropeningen (CMOD's) worden in de proef resttreksterktes bepaald (*residual strength*). De belangrijkste zijn f_{R1} op 0,5 mm (SLS) en f_{R3} op 2,5 mm (ULS) scheuropening. In de praktijk kan de scheurwijdte in SFRC veel groter worden (> 10 – 20 mm)

met behoud van de trekbijdrage van de vezels, maar omwille van de veiligheidsmarges is deze afgetopt. De f_{R1} - en de f_{R3} -waarden uit de proeven fluctueren overigens flink, omdat er slechts een klein scheuoppervlak in het balkje optreedt.

Eerst wordt uit de proeven een karakteristieke waarde berekend. De ontwerpwaarden volgen door de waarde te delen door een materiaalfactor van 1,5. Voor CC1 wordt (in het buitenland) vaak een materiaalfactor van 1 gebruikt voor vloeren op staal.

Ook andere tests worden in het bulletin besproken. De spreiding van resultaten, de relatie met het constructieve gedrag en de hoeveelheid materiaal gebruikt bij de test zijn de belangrijkste parameters voor de keuze van het type test.

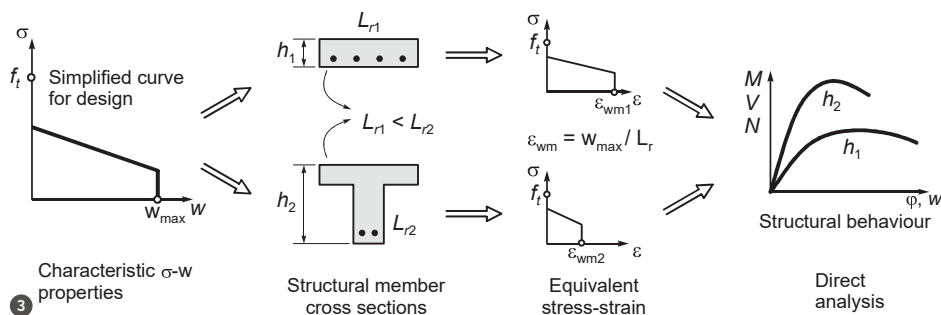
Ontwerpaanpak

Bij het ontwerpen van constructies zijn classificaties van materialen belangrijk om als constructeur te kunnen rekenen. De Model Code biedt voor vezelbeton sterkteklassen 1a tot 8e, waarbij het cijfer staat voor de reststerktewaarde f_{Rik} en de index a tot e voor de verhouding tussen f_{R3k}/f_{R1k} .

- a: $0,5 < f_{R3k}/f_{R1k} < 0,7$
- b: $0,7 < f_{R3k}/f_{R1k} < 0,9$ (*tension softening*)
- c: $0,9 < f_{R3k}/f_{R1k} < 1,1$
- d: $1,1 < f_{R3k}/f_{R1k} < 1,3$ (*tension hardening*)
- e: $1,3 < f_{R3k}/f_{R1k}$

Om bros bezwijkgedrag te voorkomen worden de volgende robuustheidseisen gesteld:

$f_{R1k}/f_{Lk} > 0,4$ (de sterkte bij 0,5 mm dient minimaal 40% van de scheursterkte te bedragen);
 $f_{R3k}/f_{R1k} > 0,5$ (de sterkte in de ULS dient minimaal 50% van de sterkte in de SLS te bedragen).



Vezels kunnen een negatief effect hebben op de reologie van de verse specie

De *fib* Model Code gaat uit van zogeheten *level of approximation*. Er worden eenvoudige rekenregels gegeven en oplopend meer geavanceerde rekenregels waarbij meer input en effort wordt verlangd, maar ook een hoger resultaat verkregen kan worden.

Er worden in het bulletin twee eenvoudige ontwerpregels gegeven. Eén waarbij f_{Fu} (reststerkte ULS bij 2,5 mm scheuropening) als constante sterkte wordt gebruikt (*rigid plastic* in fig. 4). En één met een lineair aflopende *softening* van f_{Fts} (grofweg de reststerkte SLS bij 0,5 mm) naar f_{Fu} (bij 2,5 mm) (*linear* in fig. 4).

Vervolgens worden meer geavanceerde rekenregels gegeven om met behulp van een NLFEA en een meervoudig spanning-rekdiagram te rekenen.

Om scheurlokalisatie te verkrijgen in uitgesmeerde scheurmodellen, wordt een spannings-rekmodel gegeven met een artificieel 'droppunt' na het initiërende scheurmoment. Dit leidt tot een scheurlokalisatie en betere voorspelling van de scheurposities en -wijdten in de NLFEA-modellen.

In het bulletin zijn verschillende mesh-groottestudies en experimentele studies op balken uitgevoerd om de spanning-rekrelaties te valideren voor uitgesmeerde rekenmodellen. Verder wordt een validatie gegeven van een enkelvoudige overspanning met een vierpuntsbuigproef op volle schaal en een voorbeeld van een duiker.

Verder zijn er ook nog *strut and tie* modellen uitgewerkt, waarbij het positieve effect van vezels in de drukstaven wordt aangetoond.

SLS en ULS

Voor constructies met alleen vezels (*fibres only*) is het belangrijk om niet alleen naar de bezwijkcapaciteit te kijken, maar ook rekening te houden met de SLS, inclusief krimpeffecten voor belemmerde constructies. In de SLS zijn vezels juist effectief; scheurafstanden worden korter en scheuren kleiner.

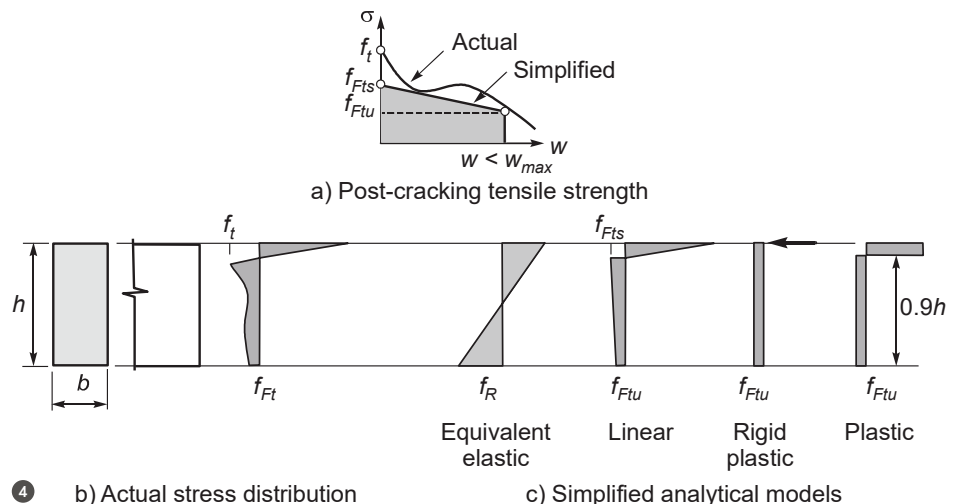
Voor conventioneel en hybride gewapend beton wordt, door het minimale wapeningsgehalte, een *tension harding* gedrag verkregen. Bij *fibres only* constructies treedt er vaak *tension softening* op (met een enkele wijde scheur en zonder de gewenste regelmatige (fijne) scheurafstand).

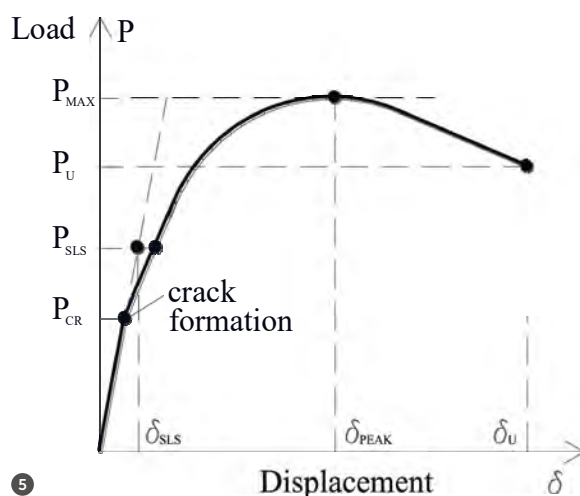
In de ULS moeten de volgende faalmechanismen worden gecontroleerd:

- maximale drukspanning en rek van het beton;
- maximale trekspanning en rek van de traditionele wapening;
- maximale trekrek. Dit is een belangrijke toets ten behoeve van de ductiliteit en robuustheid (tegen het uittrekken van de vezels, ($w_u = \min(l_{cs} e_{Fu} ; 2,5 \text{ mm})$)).

Voor verdiepingsvloeren (of CC2/CC3-constructies in het algemeen) wordt geadviseerd extra wapening van oplegging naar oplegging te plaatsen als maatregel voor ductiliteit (robuustheid).

Om voldoende ductiliteit (fig. 5) in de constructie te waarborgen, wordt verder een eis gesteld aan de verhouding van de →





FIB BULLETIN 105

fib Bulletin 105 'Fibre Reinforced Concrete' is te koop op de website van fib.



BETONIEK OVER VEZELBETON

Meer over de verschillende soorten constructieve vezels en hun gedrag staat in *Betoniek 17/12* – Met elke vezel.



doorbuiging bij de grootste capaciteit, de doorbuiging in de SLS (>5), de verhouding van de doorbuiging bij bezwijken en SLS moet groter zijn dan 20. Een constructie zal dan voldoende waarschuwen voordat hij bezwijkt.

Er zijn naast de hiervoor besproken buiging een aantal constructieve eigenschappen die kunnen worden verbeterd door vezels. Vezels dragen bij aan de dwarskrachtcapaciteit. Dit komt doordat de betonreksterkte wordt vergroot na de het optreden van (micro)scheurvorming. De verhoogde capaciteit wordt berekend met een verhouding van $(f_{\text{Ftuik}} / f_{\text{ctk}})^{1/3}$. Voor de capaciteitverhoging bij torsiebelasting zijn er nog niet genoeg testresultaten beschikbaar om consensus over rekenformules te krijgen. Wel is er consensus dat er een positieve bijdrage is. De bijdrage tegen splijtgedrag van vezels is niet constant genoeg voor robuuste rekenregels. In theorie zullen vezels de splijtscheuren rondom wapeningsstaven overbruggen, maar in de praktijk is het gebied zo klein dat het effect niet kan worden gegarandeerd, omdat er niet altijd voldoende vezels aanwezig zijn in de splijtzone.

Het bulletin gaat verder met een reductiefactor K , die wordt geïntroduceerd om rekening te houden met de vezeloriëntatie. Als bekend is dat een constructie een minder gunstige vezeloriëntatie heeft, moet deze K -waarde worden gebruikt. Deze kan leiden tot 50% reductie op de sterkte. In dunnere

platen en schalen zijn vezels juist positief georiënteerd (minder uit het vlak en meer in de optredende trekrichting). De spreiding van testresultaten in een driepuntsbuigproef is veel groter dan in een werkelijke constructie. Het materiaalgedrag neigt meer naar gemiddelde waarden, als er meer vezels in het bezwijkoppervlak of een groter volume worden aangesproken (bijvoorbeeld bij een grotere lengte van een vloeilijnpatroon). Er kan hiervoor een positief werkende K_{rd} -factor worden gebruikt met een bovengrens van 1,7.

Voor SLS-condities zijn veel kruiponderzoeken uitgevoerd. De conclusie in het bulletin is dat kruip sterk afhankelijk is van het belastingniveau en de scheurtoestand van de constructie. Krimp kan (vooral in *fbre only* constructies) een belangrijk effect hebben op het ontstaan van scheuren. Als het materiaal *tension softening* vertoont, kunnen een paar dominante en wijde scheuren ontstaan. De combinatie met traditionele wapening kan dit voorkomen.

Betontechnologische aspecten

Voor een sterk beton zonder overmatige krimp is het altijd zoeken naar een balans. Dit is niet anders bij FRC. De vezels kunnen een negatief effect hebben op de reologie van de verse specie. Aandacht moet worden besteed aan de juiste korrelgrootteverdeling; er moet niet te veel grof grind worden toegepast. Verder zal er afhankelijk van het vezeltype en de verlijming een extra luchtpercentage worden geïntroduceerd. Dit is ongewenst.

Het verwerken van de vezels in het beton kan het beste in de betoncentrale gebeuren (dwangmenger). Het kan ook worden gedaan in de truckmixer met behulp van een blaasmachine of een transportband. Het wordt niet aanbevolen om rechtstreeks vanuit dozen in de truckmixer te storten. ●