

Dwarskracht- capaciteit van beton met basaltbeugels

Experimenteel afstudeeronderzoek naar de bijdrage
van beugels van basaltvezelcomposiet aan de
dwarskrachtcapaciteit

1

Als alternatief voor traditionele stalen beugels kunnen beugels van basaltvezelcomposiet worden toegepast. Op de TU Delft is onderzoek gedaan naar het gedrag van betonnen balken op dwarskracht bij toepassing van deze basalt-beugelwapening. Daartoe zijn riepuntsbuigproeven uitgevoerd op zes gewapende betonbalken met verschillende beugelconfiguraties.

Door het hoge energieverbruik en de uitstoot van broeikasgassen bij de productie van staal, zorgt de toepassing van traditionele wapening voor een flinke milieu-impact.

Daarnaast is staal gevoelig voor corrosie, wat regelmatig leidt tot forse renovatiekosten. Basaltvezelcomposiet wapening (*Basalt Fibre Reinforced Polymer*, BFRP) is een veelbelovend alternatief, met een hogere treksterkte en betere corrosiebestendigheid.

In een voorgaand *Cement*-artikel [1] is het buig- en scheurgedrag van beton met BFRP-wapening toegelicht. Dit artikel beschrijft het gedrag van beton met BFRP-beugelwapening onder dwarskracht.

BFRP-beugelwapening

BFRP biedt voordelen zoals hogere treksterkte, corrosiebestendigheid en lage milieu-impact. Ondanks deze voordelen is de toepassing van BFRP als dwarskrachtwapening beperkt. Een van de redenen is dat de kunstvezelcomposietstaven – als gevolg van het uitharden van de kunstharsmatrix – na productie niet meer buigbaar zijn. Het richten van de staven moet dus tijdens het productieproces gebeuren.

Basaltvezelstaven worden veelal geproduceerd door middel van pultrusie (gebruikt voor rechte wapeningsstaven van kunstvezelcomposiet [1, 2]). Deze lenen zich niet voor ombuiging, omdat de vezels in de

auteurs



**IR. STEFAN
TEEUWEN**

Projectingenieur
Witteveen+Bos



**IR. PIETER
SCHOUTENS**

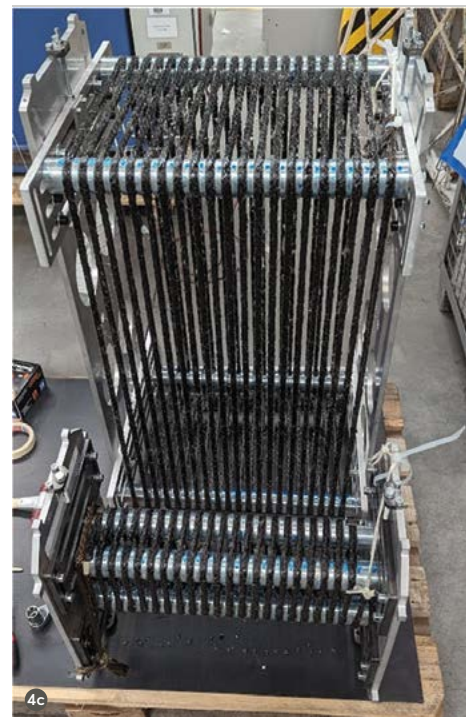
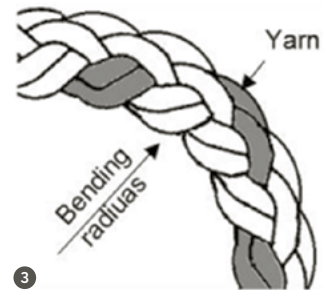
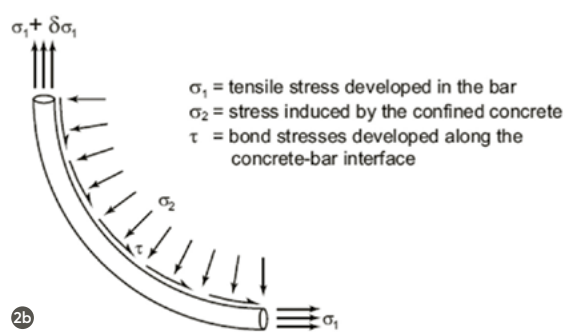
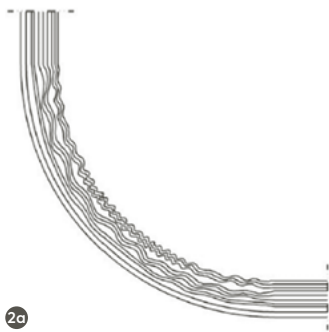
Constructeur
Witteveen+Bos

binnenbocht dan zullen gaan plooiën (fig. 2a). Hierdoor kunnen alleen de vezels in de buitenbocht bij belasting goed op spanning worden gebracht. Daarnaast worden de buitenste vezels van een staaftbundel in een ombuiging bovengemiddeld zwaar belast als gevolg van de hoge schuifspanning die op deze buitenste vezels aangrijpt (fig. 2b). Deze effecten tezamen, en het gebrek aan een vloeitraject van basaltvezels die voor interne herverdeling kan zorgen, leiden er bij gebogen gepultrudeerde basaltvezelcomposietstaven toe dat de staven een sterke verzwakking in de ombuiging vertonen.

Een andere reden waardoor de toepassing van basaltvezelcomposiet als dwarskrachtwapening twijfelachtig is, is de relatief lage rekstijfheid. Hierdoor ontstaan grotere scheurwijdtes dan met stalen beugelwapening met gelijke doorsnede-oppervlakte. En de breedte van de dwarskrachtscheuren is sterk bepalend voor de samenwerking tussen beton en beugelwapening en daarmee voor de effectiviteit van de diverse afschuifmechanismen die samen de dwarskrachtcapaciteit bepalen. Het effect van relatief rekslappe basaltvezelcomposietbeugels op deze mechanismen is nog nauwelijks onderzocht.

Beugelontwerpen

In de studie aan de TU Delft zijn twee alternatieve BFRP-beugelontwerpen – gevlochten →



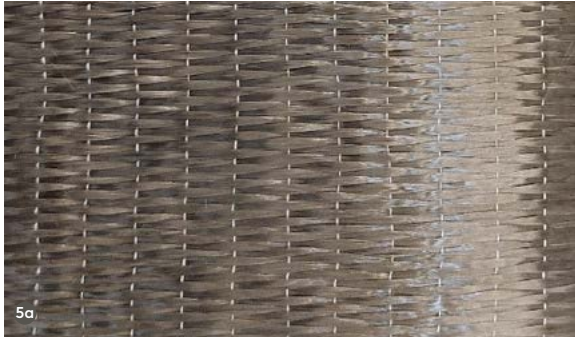
BFRP-staven en gelamineerde unidirectionele (UD) BFRP-strips – vergeleken met traditionele stalen beugels.

Gevlochten staven Gevlochten BFRP-staven bestaan uit een bundel vezelstrengen (fig. 3), die tijdens het vlechtproces zijn geïmpregneerd met epoxyhars (foto 4a en 4b). Voordat het opstijven van de hars begint, worden de nog flexibele staven rond een malframe gewikkeld (foto 4c). Daarbij zorgt de vlechtstructuur ervoor dat vezels bij ombuigen gemakkelijker kunnen herschikken en er dus minder knikken.

Gelamineerde unidirectionele strips Gelamineerde unidirectionele BFRP-strips wor-

den vervaardigd door een aantal lagen gewoven unidirectioneel basaltvezeldoek (foto 5a) te impregneren met vloeibare hars en vervolgens rondom een EPS-kern te wikkelen. Om overtollige epoxy af te voeren en de vezelagen te comprimeren, wordt het laminaat hierna in een vacuümzak geplaatst om uit te harden (foto 5b). Uit dit product zijn individuele beugels met gelijke breedte verkregen door er stroken van te zagen en de EPS-kern te verwijderen. Het eindresultaat is een brede, dunne stripbeugel met een vrijwel identieke buigradius aan zowel de binnen- als buitenzijde om de mate van vezeluitknikking te minimaliseren.

De voltooide BFRP-beugels met de twee alternatieve beugelontwerpen, zoals



AFSTUDEERONDERZOEK

Dit artikel is gebaseerd op het afstudeeronderzoek 'Shear Capacity of Concrete Beams Reinforced with Basalt Fibre-Reinforced Polymer Stirrups' dat Stefan Teeuwen heeft uitgevoerd aan de TU Delft, faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, in samenwerking met Witteveen+Bos en met financiering van Rijkswaterstaat. Hij werd voor zijn onderzoek begeleid door dr.ir. Mladena Luković, prof.dr.ir. Max Hendriks, ir. Jelle Bezemer, dr.ir. M. Pavlović (allen TU Delft) en ir. Pieter Schoutens (Witteveen+Bos). Ook dr.ir. Sonja Fennis (Rijkswaterstaat) en dr.ir. Kees Blom (TU Delft/Gemeente Rotterdam) hebben bijgedragen. Scan de QR-code voor het afstudeer-rapport.



gebruikt in de balkproeven, zijn weergegeven in foto 6a en 6b.

Materiaaleigenschappen

In voorbereidend onderzoek zijn voor de twee BFRP-beugelvarianten rechte proefstukken gemaakt (code B voor gevlochten beugels en UD voor de gelamineerde UD-stripbeugel). Hiervan zijn de dichtheid en het vezelaandeel bepaald. Dat geldt ook voor een pultrusiestaaf, die als referentie diende (afkomstig van dezelfde leverancier als in [1]).

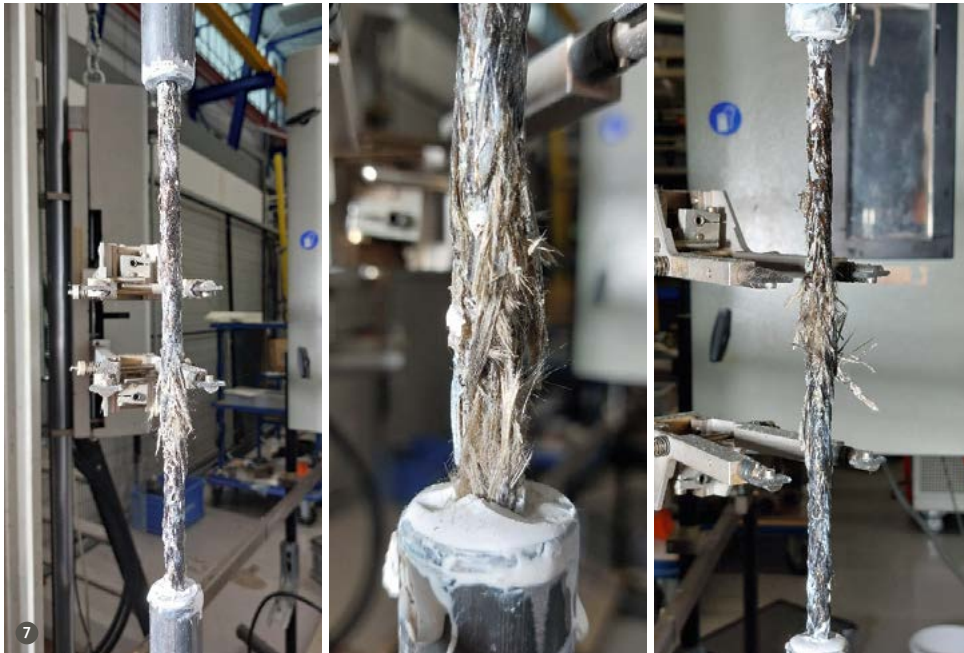
De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 1.

Op enkele van de proefstukken zijn uniaxiale trekproeven uitgevoerd (foto 7 en 8). De resultaten zijn weergegeven in figuur 9 en tabel 2. De resultaten hiervan zijn vergeleken met pultrusiestaven uit het onderzoek in het voorgaande artikel [1]. Voor de methodiek van deze trekproeven wordt verwezen naar dit artikel.

De trekproeven laten zien dat zowel gevlochten staven als de gelamineerde →

Tabel 1 Dichtheid en vezelaandeel proefstukken

BFRP-proefstuk	Dichtheid [kg/m ³]	Vezelaandeel [%]
Pultrusiestaaf	2118	61
Gevlochten staaf	1812	54
UD-strip	1848	53



UD-strips een lagere sterkte en stijfheid vertonen dan de gepultrudeerde staven. Dit wordt toegeschreven aan het lagere vezel-aandeel (tabel 1) en de niet-axiale oriëntatie (golvigheid) van de vezels in de vlechtstaven en strippen, in tegenstelling tot de parallelle uitlijning in gepultrudeerde staven. Desalniettemin tonen alle BFRP-trekproefstukken een hogere treksterkte dan staal (B500B), zij

het met een aanzienlijk lagere stijfheid van ongeveer 40 GPa in plaats van 200 GPa.

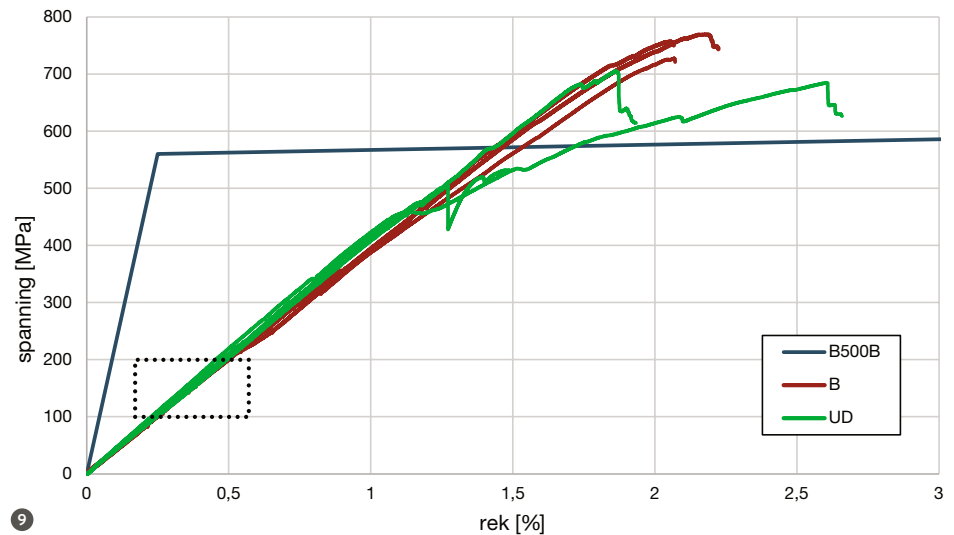
In tegenstelling tot staal, dat kan vloeien, vertoont BFRP een bijna lineair elastisch gedrag tot het breekpunt. Enige afwijking hiervan wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door vervormingen in de staafverankering en afwijkend faalgedrag als delaminatie en langscheuren in de gelamineerde vezelstrips.

Tabel 2 Trekproefresultaten

Proefstuk	Uiterste trekkracht F_u [kN]	Dwarsdoorsnede oppervlak A [mm ²]	Uiterste treksterkte f_u [MPa]	Breukrek ϵ_u [%]	E-modulus E [GPa]
Pultrusiestaaf (gemiddelde uit [1])	57,3	50,3	1141	2,12	53,5
Gevlochten staaf B1	43,9	58	757	2,05	39,6
Gevlochten staaf B2	44,6	58	769	2,19	40,5
Gevlochten staaf B3	42,2	58	727	2,07	41,0
Gemiddelde gevlochten staven			751	2,10	40,4
UD-strip UD1	29,7	57,2	520	1,50	40,6
UD-strip UD2	30,1	56,6	532	1,58	40,6
UD-strip UD3	38,2	55,8	685	2,60	43,8
UD-strip UD4	39,0	55,2	706	1,86	40,5
Gemiddelde UD-strips			706*	1,86*	41,4

* Alleen proefstuk UD4 is succesvol tot bezwijken gebracht in het midden tussen de trekankers, dus de breukspanning en -rek van dit proefstuk worden als maatgevend beschouwd. De overige proefstukken zijn vroegtijdig bezwiken op een niet-representatief bezwijkmechanisme

Gebogen pultrusiestaven vertonen een sterke verzwakking ter plaatse van de ombuiging



Balkproeven

Zes slanke, gewapende betonnen liggers met betonsterkteklasse C30/37 met verschillende beugelconfiguraties zijn onderworpen aan verplaatsingsgestuurde driepuntsbuigproeven om de dwarskrachtcapaciteit en faalmechanismen te bepalen (foto 10). Om de effecten van de BFRP-beugels te isoleren, is ervoor gekozen om in alle balken traditionele stalen trek- en drukwapening B500B te gebruiken. De balken zijn zo ontworpen dat er voldoende momentweerstand aanwezig was om de proefstukken op dwarskracht te laten falen.

Twee balken zijn versterkt met respectievelijk vier gevlochten BFRP-beugels (proefstuk B4) en vier gelamineerde BFRP UD-stripbeugels (proefstuk UD4). In proef-

stukken B8 en UD8 is het aantal BFRP-beugels verdubbeld (tot acht). Twee balken dienden als referentie: één zonder beugels (proefstuk NS) en één gewapend met vier stalen beugels (proefstuk S4). De details van de beugelconfiguraties per proefstuk zijn weergegeven in tabel 3 en een typische langsdoorsnede is weergegeven in figuur 11.

Meetmethodes Voor de analyse van de vervorming en het scheurgedrag van de proefstukken is gebruikgemaakt van *Digital Image Correlation* (DIC). Hiertoe is de zijkant van de balkproefstukken voorzien van een willekeurig zwart spikkelpatroon. Tijdens de belasting van de proefstukken zijn periodiek foto's gemaakt van dit patroon. De gemaakte foto's zijn vervolgens ingeladen →

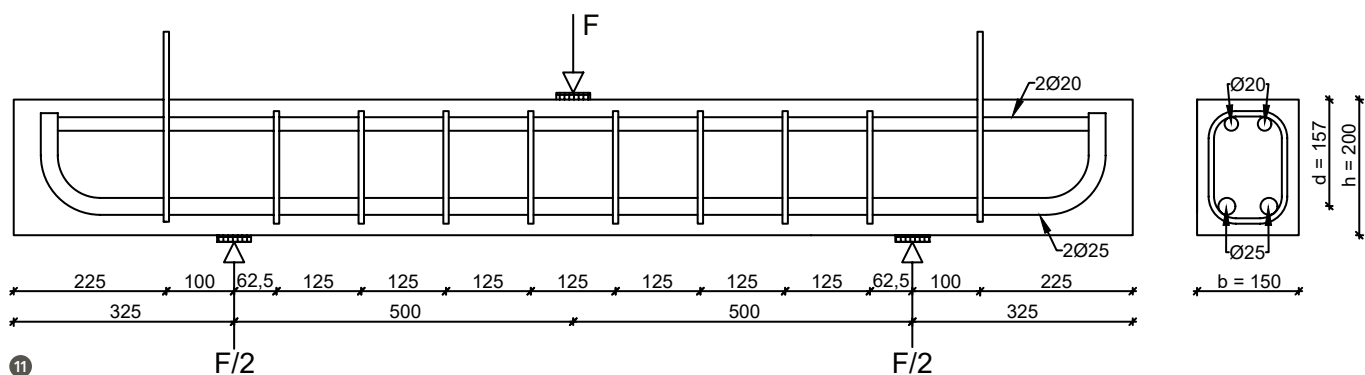


in gespecialiseerde software, waarmee het vervormingsgedrag van de proefstukken is geanalyseerd. Hierbij zijn de relatieve verplaatsingen van de spikkels in het patroon vergeleken met hun oorspronkelijke posities in de onbelaste toestand. Hierdoor is op nauwkeurige wijze inzicht verkregen in de vervormingen en scheurvorming van het materiaal.

Om het rekgedrag van de beugels inzichtelijk te maken, is gebruikgemaakt van *Distributed Fibre Optic Sensing* (DFOS). Deze techniek maakt gebruik van optische glasvezels en de principes van lichtverstrooiing om vervormingen over de hele lengte van de vezel te meten. In dit onderzoek zijn de optische vezels aan de buitenzijde van de beugels verwijmd, zodat de rek in de beugels periodiek

Tabel 3 Overzicht balkproefstukken en details van configuraties beugelwapening

Proefstuk	Details beugelconfiguratie					
	Aantal en type	Spacing [mm]	Diameter [mm]	Breedte [mm]	Dikte [mm]	Dwarsdoorsnede per twee benen [mm ²]
NS	-	-	-	-	-	-
S4	4 stalen beugels (B500B)	250	8	-	-	100
B4	4 gevlochten BFRP-beugels	250	8	-	-	116
B8	8 gevlochten BFRP-beugels	125	8	-	-	116
UD4	4 BFRP UD-stripbeugels	250	-	19	2,3	86
UD8	8 BFRP UD-stripbeugels	125	-	19	2,3	86



kon worden gemeten. De verlijmdde vezels zijn gesegmenteerd in gebieden A t/m E (fig. 12) om meer inzicht te krijgen in de locatie van eventuele piekspanningen.

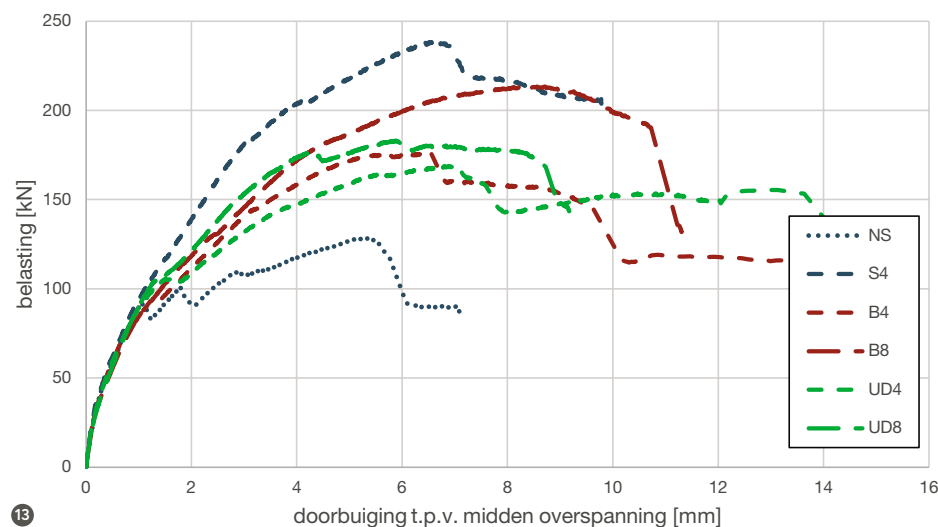
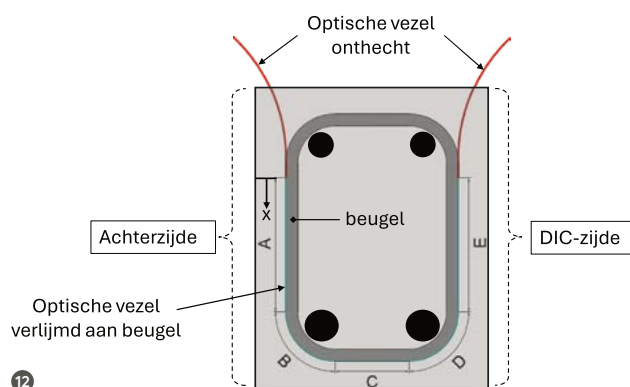
Resultaten balkproeven

De kracht-verplaatsingsdiagrammen voor alle proefstukken zijn weergegeven in figuur 13. Hieruit blijkt dat alle balken dezelfde initiële stijfheid vertonen tot een kracht van ongeveer 90 kN. Rond deze belasting beginnen de

eerste dwarskrachtscheuren te ontstaan. Vanaf dit punt verschilt de kracht-verplaatsingsrespons per balk, afhankelijk van de specifieke configuratie van de beugels en de effectiviteit waarmee deze de propagatie van de dwarskrachtscheuren beheerst.

Om de prestatie van de BFRP-beugels te bepalen, is de toegenomen dwarskrachtcapaciteit ten opzichte van de balkproef zonder beugels (NS) bepaald. De toename aan dwarskrachtcapaciteit is toegekend →

Zes slanke, gewapende betonnen liggers zijn onderworpen aan verplaatsingsgestuurde driepuntsbuigproeven



Tabel 4 Analyse van balkproefresultaten

Proefstuk	Piekbelasting	Dwarskrachtcapaciteit		Genormaliseerde beugelprestatie	
	T.p.v. midden [kN]	Totaal [kN]	Beugelbijdrage [kN]	O.b.v. doorsnede-oppervlak [-]	O.b.v. massa beugelwapening* [-]
NS	128,5	64,3	-	-	-
S4	238,5	119,3	55,0	(1,0)	(1,0)
B4	175,5	87,8	23,5	0,37	1,61
B8	213,2	106,6	42,4	0,34	1,45
UD4	168,0	84,0	19,8	0,42	1,79
UD8	183,0	91,5	27,3	0,29	1,24

* Dichtheid BFRP conform tabel 1. Voor de dichtheid van staal (S4) is 7850 kg/m³ gehanteerd

Per kg wapening is de bijdrage van basaltvezelbeugels aan de dwarskrachtcapaciteit effectiever dan stalen beugels

aan de beugelwapening. Vervolgens is deze capaciteitstoename als gevolg van de BFRP-beugels vergeleken met de variant met stalen beugelwapening ($S_4 = 1,0$). Hierbij is de relatieve prestatie van de BFRP-beugels zowel bepaald naar rato van doorsnede-oppervlakte van de beugelwapening als naar rato van massa aan beugelwapening (tabel 4).

Uit de metingen en waarnemingen aan de proefstukken blijkt het volgende:

- De variant zonder beugelwapening vertoont twee duidelijke primaire dwarskrachtscheuren. De variant met stalen beugelwapening laat een fijner verdeeld scheurpatroon zien, terwijl de varianten met BFRP-beugels veelal een duidelijke primaire en secundaire dwarskrachtscheur hebben (fig. 14).
- De maximale rek concentreert zich bij stalen beugels op de verticale beugelsecties en

neemt sterk toe bij overschrijden van de vloeispanning. Bij BFRP-beugels verdeelt de rek zich meer over de omtrek van de beugel, wat duidt op een slechtere aanhechting aan het beton (fig. 15).

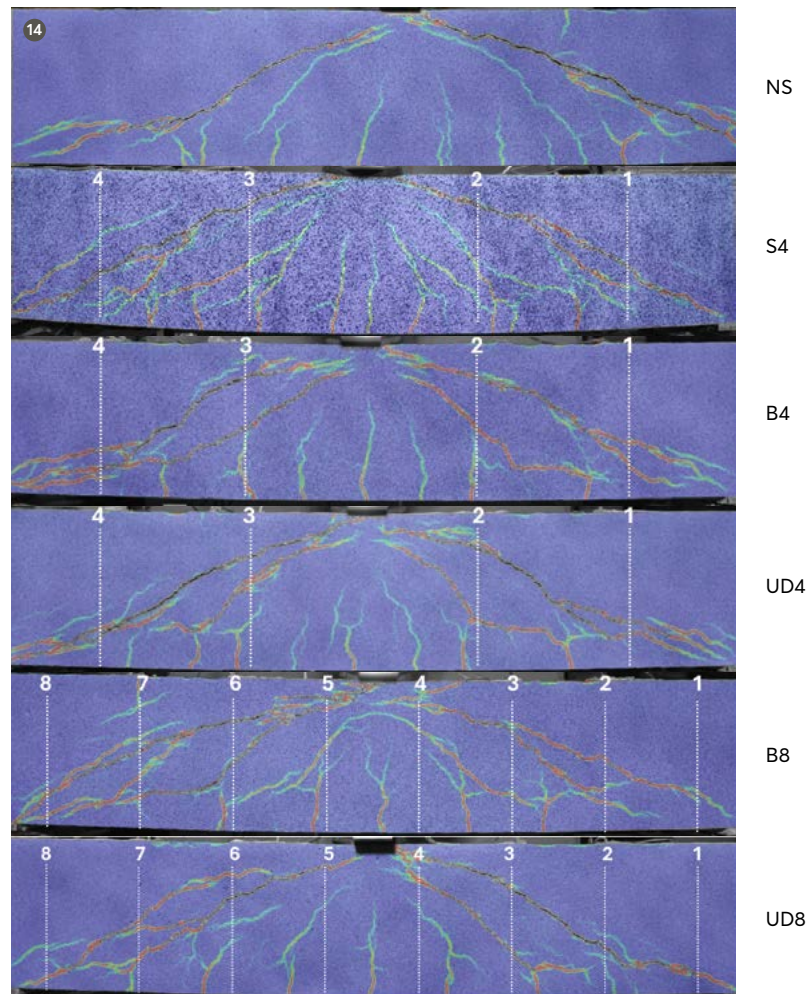
→ Het falen van de balken met BFRP-beugels werd geïnitieerd door het bezwijken van één van de beugels in een hoeksectie (foto 16).

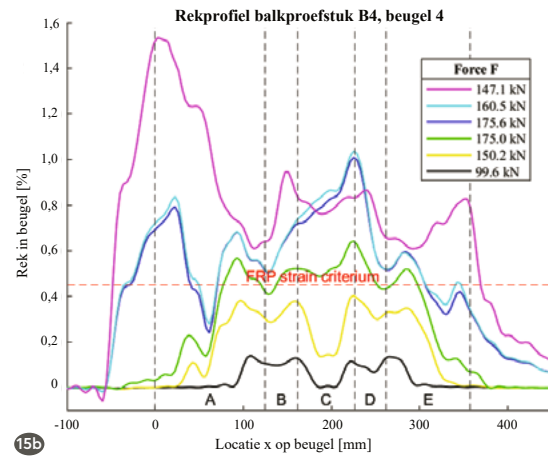
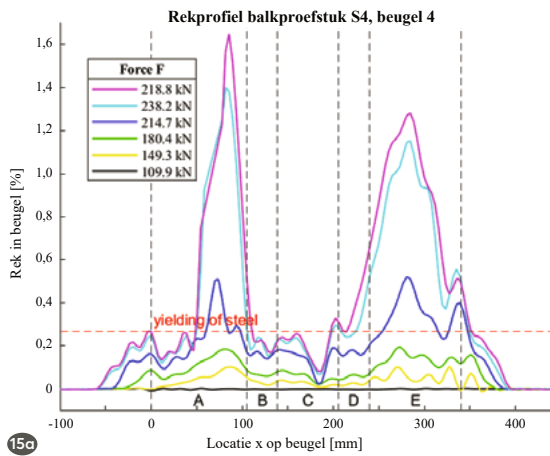
Conclusies

Uit de resultaten van de proeven is het volgende te concluderen.

→ Zowel beugels van gevlochten BFRP-staven als beugels uit gelamineerde BFRP UD-vezelstrips zijn in staat om de dwarskrachtcapaciteit van een gewapend betonnen balk te verhogen.

→ Als gevolg van een lager vezelvolume en niet-parallele vezels hebben gevlochten BFRP-staven en gelamineerde BFRP UD- →





15 Rekgrafieken bij verschillende belastingniveaus voor (a) typische stalen beugel en (b) BFRP-beugel. Zones A t/m E zoals aangegeven in figuur 12

16 Bezweken BFRP-beugels in de hoeksecties: (a) B4, (b) B8, (c) UD4 en (d) UD8

vezelstrips een lagere uniaxiale treksterkte en stijfheid dan gepultrudeerde BFRP-staven. Desondanks is de treksterkte nog steeds hoger dan de vloeispanning van staal.

- Genormaliseerd naar doorsnede-oppervlak presteren de gevlochten beugels en stripbeugels gelijkwaardig. De proefstukken met stripbeugels vertoonden echter meer spreiding in de resultaten. Dit wordt toegekend aan de gebruikte productiemethode, waarbij plooiën in de hoeken van de beugel geïntroduceerd werden.
- Genormaliseerd naar doorsnede-oppervlak presteren stalen beugels circa drie maal zo goed als BFRP-beugels. Echter, genormaliseerd naar massa beugelwapening presteren de BFRP-beugels circa 50% beter dan stalen beugels.
- Stalen beugels bevorderen de krachtsherverdeling tussen de individuele beugels, doordat ze kunnen vloeien, met een meer gelijkmatige bijdrage aan de afschuifcapaciteit tot gevolg. De BFRP-beugels, die geen vloeigedrag vertonen, hebben een ongelijke krachtsverdeling over de beugels.
- In het geval van BFRP-beugels verspreidt de rek zich over de volledige omtrek van de beugel. Dit suggereert dat de aanhechting tussen BFRP en beton minder effectief is. Daarentegen concentreert de maximale rek zich bij stalen beugels in de verticale secties; vooral wanneer de vloeigrens wordt overschreden, neemt de rek in deze zones snel toe.
- De lagere rekstijfheid in BFRP-beugels leidt tot wijdere dwarskrachtscheuren dan bij reguliere stalen beugels. Dit verzwakt de interne afschuifmechanismen in het beton, zoals *aggregate interlock* en de uvelwerking. Hierdoor bereiken balken met BFRP-beugels hun maximale afschuifcapaciteit ruim voordat de uniaxiale treksterkte van de beugels volledig is benut. Doordat hierna nog enige herverdeling kan plaatsvinden (in dit geval van beton naar beugels), is het bezwijkgedrag redelijk ductiel.

wapening heeft geresulteerd in aanzienlijke de uvelwerking, wat een forse bijdrage heeft geleverd aan de dwarskrachtcapaciteit van de liggers. Dit effect is deels geïsoleerd door het beproeven van de balk zonder dwarskrachtwapening, maar de interactie van dit mechanisme met andere afschuifmechanismen (met name *aggregate interlock* en de effectiviteit van beugelwapening) is verder niet onderzocht. In het onderzoek is elke capaciteitsverhoging bovenop de capaciteit van de ligger zonder beugels, toegeschreven aan de beugelwapening.

Hoewel dit onderzoek de potentie van BFRP als dwarskrachtwapening in betonnen constructies laat zien, moet worden opgemerkt dat in deze studie geen aandacht is besteed aan de effecten op lange termijn of aan vermoeiingsverschijnselen. Het meenemen van deze factoren zal mogelijk tot afwijkende bevindingen kunnen leiden.

Tot slot

Het onderzoek laat zien dat staal niet langer de enige keuze is voor beugelwapening in beton; door onder meer de gunstige sterkte-gewichtsverhouding en corrosiebestendigheid biedt BFRP een veelbelovend toekomstperspectief. De praktijk wijst echter uit dat BFRP niet zomaar een directe vervanger is voor stalen beugels: de grotere scheurwijdtes en ongelijke krachtsverdeling over de beugels resulteren in een fundamenteel ander dwarskrachtgedrag. De toekomstige Eurocode 2 zal constructeurs houvast bieden voor het ontwerpen van betonconstructies met vezelcomposietwapening, maar vooralsnog beperkt deze zich tot buigtrekwapening. Voordat vanuit de normen met BFRP-beugelwapening kan worden ontworpen, is aanvullend onderzoek noodzakelijk; de puzzel is nog niet helemaal gelegd. ●

LITERATUUR

- 1 Lingen, Kevin van der, Buig- en scheurgedrag van beton met basaltvezelwapening. *Cement* 2024/6, pp. 20-28.
- 2 Leenders, F., Basaltvezelwapening voor busremise. *Cement* 2024/3, pp. 28-37.
- 3 Ahmed et al, Bend strength of FRP stirrups: Comparison and evaluation of testing methods. *Journal of Composites for Construction* 14(1) 2010, pp. 3-10.
- 4 *fib* Bulletin No. 40: FRP reinforcement in RC structures (2007).
- 5 Lindner et al. (2019). Fibre-reinforced polymer stirrup for reinforcing concrete structures. *Technologies for Lightweight Structures* 3(1) 2019, pp. 17-24.

Discussie

Om zeker te zijn dat de liggers zouden bezwijken op dwarskracht, is een grote hoeveelheid buigtrekwapening (3,3%) en relatief veel drukwapening toegepast. Deze langs-