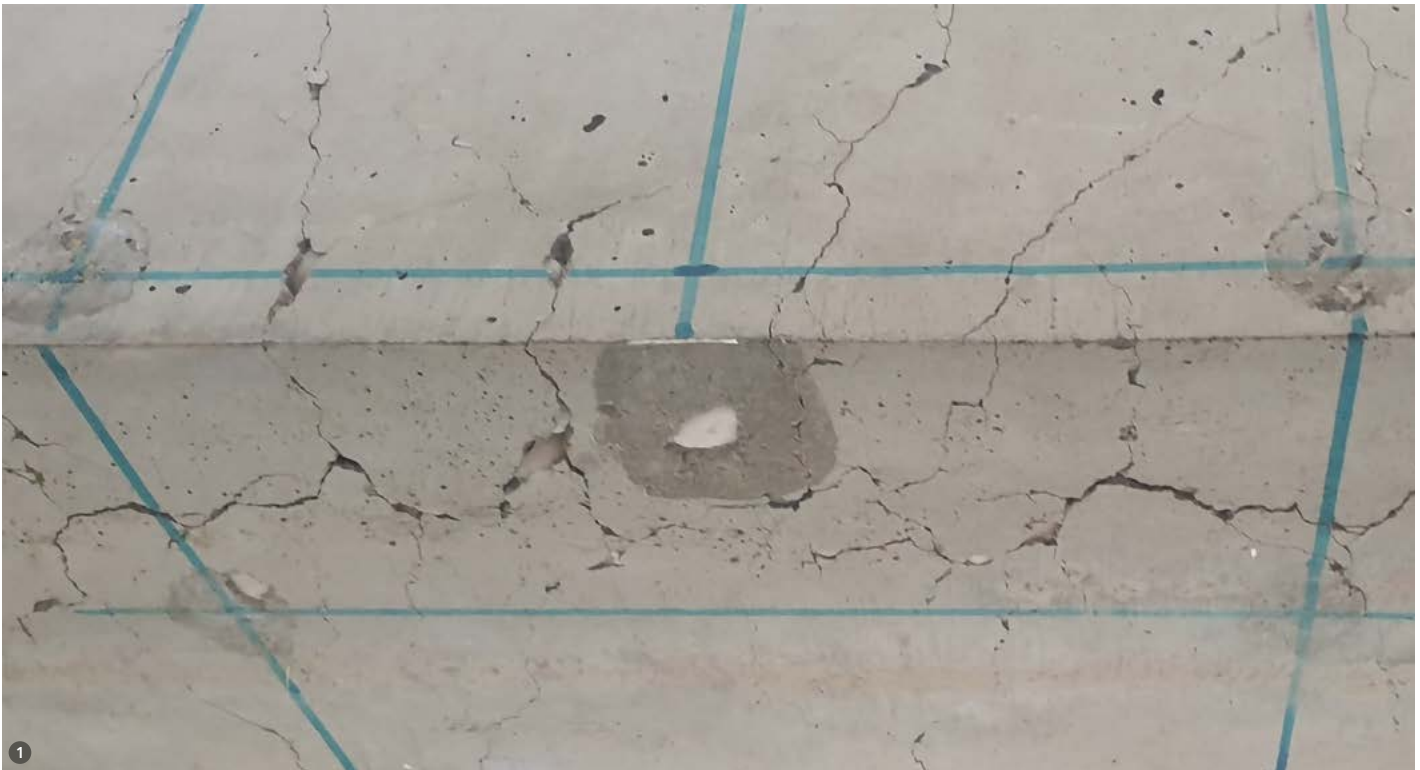

Buig- en scheurgedrag van beton met basaltvezelwapening

Experimenteel onderzoek aan de TU Delft



Experimenten tonen aan dat basaltvezelwapening anders reageert dan wapeningsstaal: een volledig lineair-elastisch gedrag van het materiaal, bros bezwijken van de wapening en grotere vervormingen van de gewapende proefstukken. Balken met basaltvezelwapening laten meer scheuren zien en grotere scheurwijdte bij lagere belasting, vergeleken met balken gewapend met wapeningsstaal. Deze verschillen benadrukken de noodzaak voor ontwerprichtlijnen.

In reactie op klimaatverandering streeft de bouwsector naar duurzamere betonconstructies.

Alternatieve materialen en methoden worden onderzocht om de milieueffecten van traditioneel gewapend beton te verminderen. Een van de mogelijkheden is het verduurzamen van de wapening, bijvoorbeeld door toepassing van basaltvezelwapening als alternatief voor wapeningsstaal.

Sinds de late jaren 80 winnen alternatieve wapeningsmaterialen aan populariteit, vooral uit de FRP-familie (*Fibre Reinforced Polymer*). FRP-wapeningsstaven combineren meerdere materialen waarmee unieke eigenschappen worden gecreëerd. Basaltvezelwapening behoort tot de FRP-familie. Het bestaat uit sterke basaltvezels en een rigide matrix van bijvoorbeeld epoxy, polyester of vinylester (fig. 2). De vezels in de matrix zijn grotendeels bepalend voor de treksterkte van de staaf. Ter bevordering van het hechtgedrag aan het beton kan een gladde staaf worden voorzien van een oppervlaktevervorming, zoals een zandcoating, geribde profilering of spiraalwikkeling.

Van Hattum en Blankevoort is geïnteresseerd in alternatieven voor wapenings-



IR. KEVIN VAN DER LINGEN

Constructeur
Van Hattum en
Blankevoort

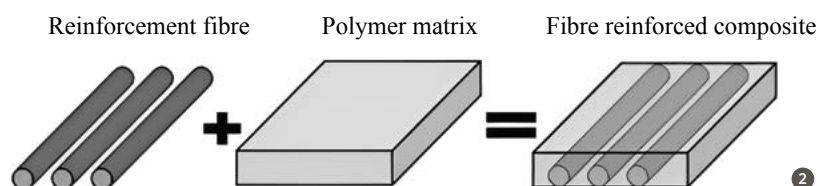
staal, zoals basaltvezelwapening. Er is veel internationale literatuur beschikbaar waaruit blijkt dat de eigenschappen en rekenmethodiek verschillen van wat we met wapeningsstaal gewend zijn. Om ervaringen op te doen, is in samenwerking met Van Hattum en Blankevoort een experimenteel onderzoek opgezet als afstudeerproject aan de TU Delft. Dit onderzoek richt zich specifiek op de stijfheid en het buigsgedrag van basaltvezelgewapende elementen.

Onderzoeksoepzet

Het experimentele programma bestond uit twee type testen. Allereerst zijn de mechanische eigenschappen van de individuele staven onderzocht en vervolgens het constructieve gedrag in gewapende balken.

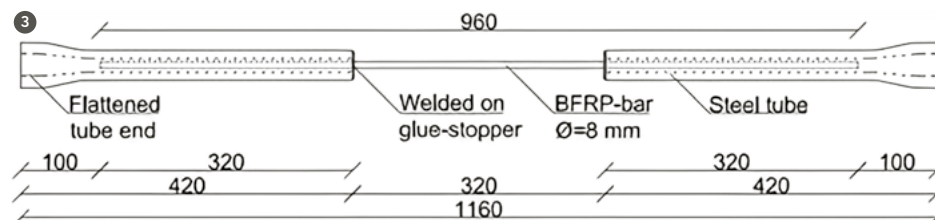
Het experimentele onderzoek had een focus op het scheurpatroon en buiggedrag. De onderzochte parameters zijn:

- trekgedrag van basaltvezelwapening versus wapeningsstaal;
- buiggedrag van beton gewapend met basaltvezel versus staal;
- ontwikkeling van scheurpatronen en scheurwijdte;
- invloed van staafdiameter, wapenings- →



AFSTUDEERONDERZOEK

Dit artikel is gebaseerd op de afstudeerstudie 'Flexural Behaviour of Concrete Reinforced With Basalt Fibre Reinforcement Bars' dat Kevin van der Lingen uitvoerde op de TU Delft, faculteit Civil Engineering & Geosciences, in samenwerking met Van Hattum en Blankevoort. Hij werd voor zijn onderzoek begeleid door dr.ir. Mladena Lukovic, prof.dr.ir. Erik Schlangen, ir. Jelle Bezemer (TU Delft) en ir. Felix Leenders (Van Hattum en Blankevoort). Ook ir. Sonja Fennis heeft bijgedragen. Een link naar het afstudeerrapport staat op www.cementonline.nl.



verhouding en betondekking op buig- en scheurgedrag.

Trekproeven

Om het gedrag onder trek te onderzoeken is zijn proefstukken gemaakt, die bestaan uit een staaf basaltvezelwapening, ingelijmd in twee ronde stalen buizen (fig. 3). Het proefstuk is ontworpen volgens richtlijn ACI440.3R [2]. Deze richtlijn schrijft voor dat de buizen aan weersijden van het blootgestelde deel van de staaf moet worden geplaatst. De uiteinden van de proefstukken zijn geplet om in de bekkenvorm van de machine te passen en voldoende grip te hebben (fig. 3). Conform ACI440.3R moet er minimaal veertig maal de staafdiameter vrije ruimte zijn tussen de buizen, zodat de staaf ongehinderd kan bezwijken op het zwakste punt. Voor staafdiameter van 8 mm is dit 320 mm.

Met een extensometer is op het blootgestelde deel van het proefstuk de rek gemeten. De trekproeven zijn verplaatsingsgestuurd met een snelheid van 1 mm per minuut (conform ACI440.3R).

Resultaten Voor zowel het bepalen van de mechanische eigenschappen als de statistische interpretatie is gebruikgemaakt van ACI440.1R [3] en ACI440.3R. De verkregen eigenschappen zijn:

- kracht bij bezwijken;
- spanning bij bezwijken;
- rek bij bezwijken;
- elasticiteitsmodulus.

De beproefde basaltvezelstaven hadden alle drie hetzelfde bezwijkmechanisme (foto 4). Tijdens de trekproef bezweken eerst de individuele vezels aan de buitenzijde van de staafdoorsnede (de perimeter). Hierna nam de kracht nog iets toe totdat uiteindelijk de hele staaf bros bezweek.

Voor het bepalen van de materiaaleigenschappen beschrijft de ACI440.3R twee methoden: de composietoppervlaktemethode en de vezelgehaltemethode. In deze studie is de composietoppervlaktemethode aangehouden, omdat de matrix ook invloed heeft op de treksterkte. Op basis van drie testen zijn het gemiddelde, de standaarddeviatie en de variatiecoëfficiënt bepaald. De spanning bij bezwijken is verkregen door de maximale bezwijkkracht te delen door het theoretische oppervlak (staafdiameter 8 mm). De resultaten zijn weergegeven in tabel 1.

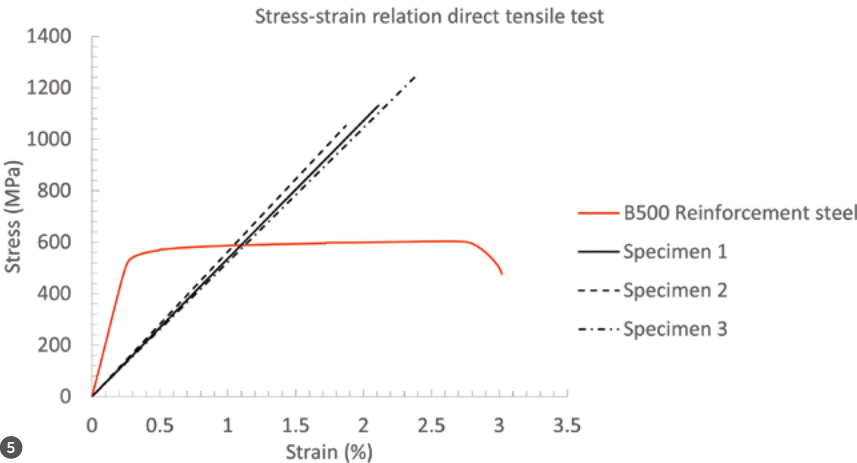
De trekproeven tonen een zekere spreiding in de spanning-rekrelatie (fig. 5), wat blijkt uit de standaarddeviatie. Hoe kleiner deze spreiding van de resultaten door variatie in breukrek en maximale trekspanning, hoe gunstiger de gegarandeerde eigenschappen volgens richtlijn ACI440.1R. Spreidingen in de testresultaten kunnen worden veroorzaakt door materiaalonthooftheid of foutieve uitlijning tijdens de testvoorbereiding van de proefstukken.

Voor een vergelijking van de basaltvezelwapening met wapeningsstaal is uit dezelfde batch als het gebruikte wapeningsstaal voor de balkproeven één staaf getest.

Basaltvezel-
wapening is
lineair-elastisch
tot bezwijken

Tabel 1 Resultaten trekproeven

	Kracht bij bezwijken [kN]	Spanning bij bezwijken [MPa]	Rek bij bezwijken [%]	Elasticiteitsmodulus [GPa]
Proefstuk 1	55,90	1112,15	2,09	54,16
Proefstuk 2	53,85	1071,26	1,87	54,86
Proefstuk 3	62,23	1238,00	2,39	51,44
Gemiddelde	57,33	1140,51	2,12	53,49
Standaarddeviatie	3,57	71,01	0,21	1,47
Variatiecoëfficiënt	6,23%	6,23%	9,94%	2,75%



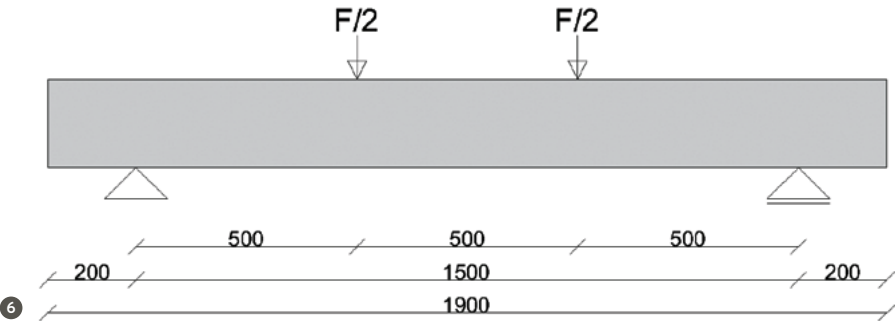
Het resultaat is een vloeispanning (f_y) van 520 MPa en een rek van 0,26%. De uiterste treksterkte (f_u) is 600 MPa, met een bijbehorende rek van 2,70%.

Vierpuntsbuigproeven

Om inzicht te krijgen in de stijfheid en het buigscheurgedrag van een betonnen element gewapend met basaltvezelwapening, zijn verschillende vierpuntsbuigproeven uitgevoerd (fig. 6). Een vierpuntsbuigproef bestaat uit een tweezijdig scharnierend opgelegde balk en twee aangrijpingspunten voor de belasting. Zodanig ontstaat er in het midden een zone met een constant moment zonder dwarskracht.

De beproefde balken hebben een afmeting van 1900 x 150 x 200 mm³ ($l \times b \times h$). Er zijn vier balken met basaltvezelwapening en twee met wapeningsstaal beproefd. De balken gewapend met wapeningsstaal dienden ter referentie om het gedrag te kunnen vergelijken. De balken zijn gecodeerd op basis van het toegepaste wapeningsmateriaal, de wapeningsconfiguratie en de betondekking. Een overzicht van de beproefde balken is weergegeven in tabel 2.

Tussen de aangrijpingspunten is het scheurpatroon gemonitord door middel van *Digital Image Correlation* (DIC). Dit is een optische techniek, waarbij aan één van →



De balken met basaltvezelwapening scheuren eerder dan die met wapeningsstaal

Tabel 2 Lijst met beproefde balken

Balktype	Wapeningsmateriaal	Toegepaste wapening [mm²]	Betondekking [mm]
B-3r8-c31	Basaltvezel	3Ø8 [151]	31
B-2r10-c31	Basaltvezel	2Ø10 [157]	31
B-2r8-c31	Basaltvezel	2Ø8 [101]	31
B-3r8-c11	Basaltvezel	3Ø8 [151]	11
S-3r8-c31	Wapeningsstaal	3Ø8 [151]	31
S-3r8-c11	Wapeningsstaal	3Ø8 [151]	11

de zijkanten van de balk met verf een spikelpatroon (pixels) wordt aangebracht, waar hoogwaardige foto's van worden gemaakt. Met een computerprogramma kunnen vervolgens de rekken, verplaatsingen en scheurvorming van de balk nauwkeurig inzichtelijk worden gemaakt. De verticale verplaatsing van het midden van de balk is gemonitord door middel van een laser. Lokale horizontale verplaatsingen (druk en trek) zijn bepaald met LVDT's die aan de zijkant waren aangebracht. Een LVDT (*linear variable differential transformer*) is een sensor die verplaatsing meet over een zekere afstand.

Resultaten Een samenvatting van de testresultaten voor alle geteste balken is gegeven in tabel 3. De belangrijkste resultaten op constructief gedrag zijn de maximale belastingen bij bezwijken, de daarbij behorende doorbuiging en de maximale doorbuiging. Met betrekking tot de scheurvorming worden het aantal scheuren en de gemiddelde scheurafstand gepresenteerd.

Alle balken met een betondekking van 31 mm zijn bezweken bij een belasting van ongeveer 60-65 kN, terwijl alle balken met een kleinere dekking, en daardoor een grotere interne hefboomarm, zijn bezweken bij ongeveer 65-70 kN.

Beschouwing stijfheidscurves Een gewapend betonnen balk doorloopt over het alge-

meen vijf stadia vanaf de eerste belasting tot en met bezwijken:
→ ongescheurd stadium;
→ initiële scheurvorming;
→ gestabiliseerde scheurvorming;
→ vloeien van het wapeningsstaal (niet van toepassing bij basaltvezelwapening);
→ bezwijken betondrukzone.

In het ongescheurde traject is een vergelijkbare stijfheid te zien ongeacht het wapeningsmateriaal. De balken met basaltvezelwapening (blauwe lijn) scheuren eerder dan die met wapeningsstaal (rode lijn); de scheurbelasting is respectievelijk 12 en 17 kN. De reden hiervan is dat de gecombineerde stijfheid lager is vanwege de aanzienlijk lagere stijfheid van basaltvezelwapening.

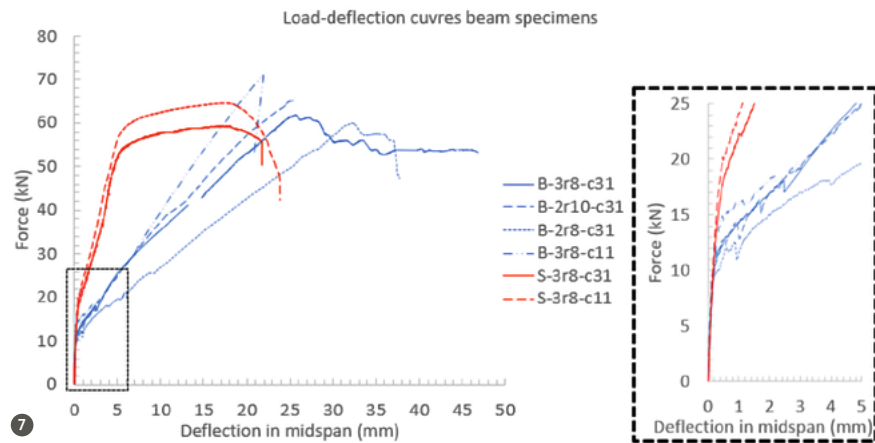
Zodra initiële scheurvorming begint, neemt de wapening de trekkracht over die eerst door het ongescheurde beton werd opgenomen. Na scheurvorming is de doorbuiging van de balken gewapend met basaltvezelwapening aanzienlijk groter dan de balken met wapeningsstaal, wat wijst op een grotere stijfheidsreductie, zoals te zien is in figuur 7.

De balken gewapend met staal bereiken bij een relatief kleine doorbuiging van 5 mm de vloeigrens. Vanaf dit punt neemt de vervorming significant toe terwijl de belasting nagenoeg gelijk blijft. Bij basaltvezelwapening treedt dit fenomeen niet op.

Tabel 3 Samenvatting testresultaten balken vierpuntsbuigproef

	B-3r8-c31	B-2r10-c31	B-2r8-c31	B-3r8-c11	S-3r8-c31	S-3r8-c11
Maximum belasting [kN]	61,89	65,17	59,96	71,05	59,38	64,77
Verticale verplaatsing bij maximum belasting [mm]	25,64	25,47	32,16	21,90	17,17	17,47
Maximale verticale verplaatsing [mm]	46,83	25,47	37,76	21,90	21,76	23,87
Aantal waargenomen scheuren	7	7	7	8	5	7
Gemiddelde scheurafstand	71,43	71,43	71,43	62,5	100	71,43

Bij de balken met basaltvezelwapening treedt wel voldoende waarschuwingscapaciteit op



Basaltvezelwapening is lineair-elastisch tot bezwijken en dit vertaalt zich in een lineaire stijfheidscurve na initiële scheurvorming.

De manier van bezwijken van beide typen gewapende balken verschilde ten opzichte van elkaar. De balken met wapeningsstaal bezweken op de wapening, oftewel vloei. De balken met basaltvezelwapening bezweken op betonstuik. Uit de proeven met de balken met basaltvezelwapening is echter wel gebleken dat er – hoewel de balk bestond uit materialen met ieder een bros bezwijkmechanisme – voldoende waarschuwingscapaciteit optreedt in de vorm van vervorming, voordat de constructie bezwijkt.

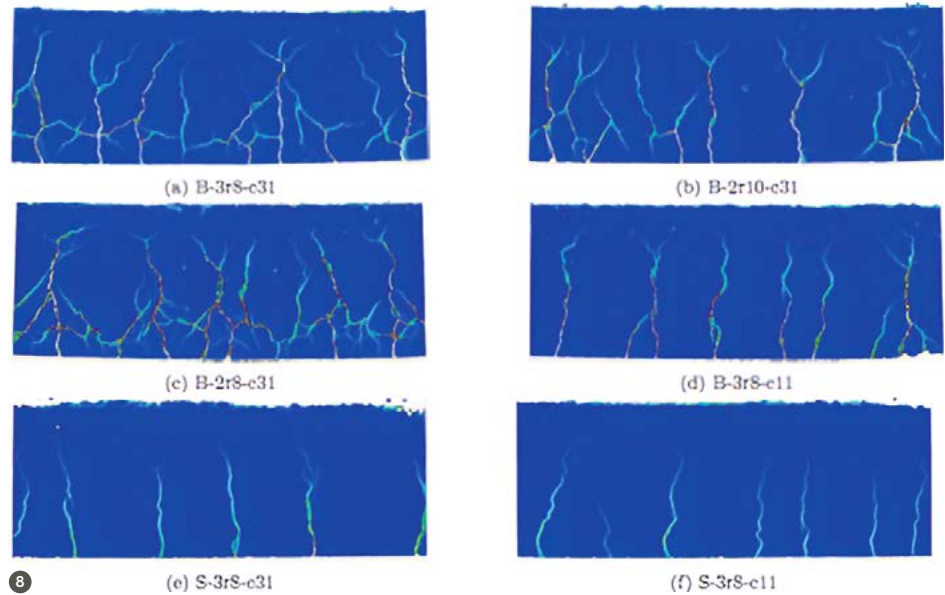
De balken met basaltvezelwapening vertoonden, zoals eerder aangegeven, eerder scheurvorming door hun lagere elasticiteitsmodulus in de ongescheurde doorsnede, zoals verondersteld door Shamass & Cashell [4]. De balken met de grootste interne hefboomsarm (kleinste dekking) vertoonden de laatste scheurvorming in de belastingscyclus voor beide wapeningsmaterialen. De vroegst waargenomen scheurvorming is gevonden in balk B-2r8-c31 vanwege de laagste wapeningsverhouding, waardoor de neutrale as het minst naar beneden verschuift. Het berekende scheurmoment op basis van de betonddoorsnede en de betoneigenschappen van 2,90 kNm met een overeenkomstige kracht van 11,60 kN bleek algemeen accuraat voor balken met staven basaltvezelwapening, maar conservatief voor balken met stalen staven. Afwijkingen kunnen worden toegeschreven aan de werkelijke betoneigenschappen, waar de berekening was gebaseerd

op een veronderstelde betonsterkteklasse van C30/37.

De met basaltvezelwapening gewapende balken missen het vloeistadium, omdat dit materiaal geen plastische vervorming kent. Bij een belastingniveau van ongeveer 50 kN zijn de scheurpatronen in het gemonitorde deel van de balken volledig ontwikkeld (fig. 8). Scheuren in balken gewapend met staven basaltvezelwapening (fig. 8a t/m d) hebben een aanzienlijk grotere scheurwijdte dan de met wapeningsstaal gewapende tegenhangers (fig. 8e en f). Dit is veroorzaakt door de lagere elasticiteitsmodulus van staven basaltvezelwapening.

Splijtscheuren Een verschijnsel dat niet was voorzien, is dat er op wapeningsdiepte aanzienlijke horizontale secundaire scheurvorming is waargenomen bij de balken gewapend met basaltvezelwapening. Dat was niet het geval bij de balken met wapeningsstaal. De horizontale secundaire scheuren ontstaan uit primaire buigscheuren. Volgens de theorie van Tepfler (beschreven in *fib* bulletin 40 [5]) is dit mechanisme te wijten aan een te goede aanhechting. Deze secundaire scheuren laten zich dan ook uitleggen als splijtscheuren. Deze scheuren ontstaan als de spanning ten gevolge van de hechting ter plaatse van de wapening aan het beton de trekspanning van het beton overschrijdt. In de richtlijnen BRL0513 en ACI440 is er echter geen enkele verwijzing naar het ontstaan en beperkingen van dit type scheurvorming.

De genoemde splijtscheuren in de balken met basaltvezelwapening en een →



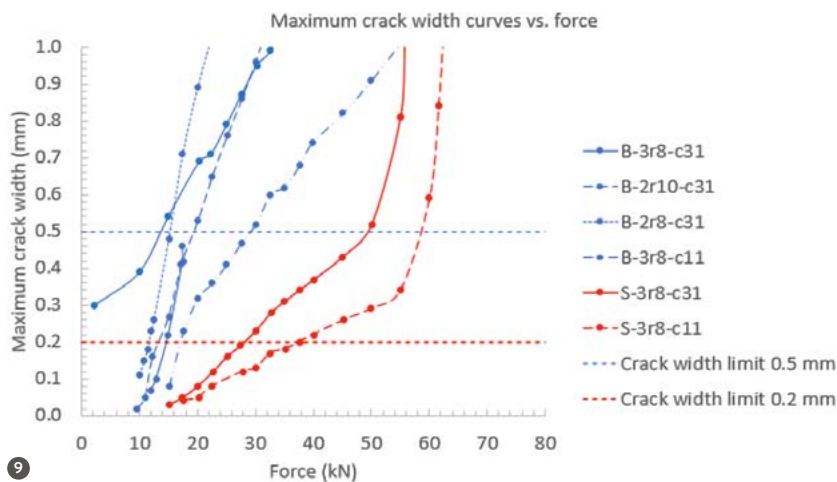
dekking van 31 mm verschillen bij een verschillende hoeveelheid wapening. Bij 2Ø10 (B-2r10-c31) is een significant kleinere ontwikkeling van dit type scheurvorming te zien, waar bij 3Ø8 (B-3r8-c31) en 2Ø8 (B-2r8-c31) wel over de gehele lengte scheurontwikkeling plaatsvindt. Dit is toe te schrijven aan de hart-op-hart-afstand in combinatie met het wapeningspercentage. 2Ø8 (B-2r8-c31) komt neer op dezelfde hart-op-hart-afstand als 2Ø10 (B-2r10-c31), maar heeft een aanzienlijk lager wapeningspercentage, waardoor de hechtspanning sneller toeneemt in vergelijking met de andere balken. Dit versnelt de ontwikkeling van de splitscheuren over de lengte.

Scheurwijdtes Basaltvezelwapening wordt veelal geprezen vanwege de hoge trekspanningen en dat het niet kan corroderen, waardoor een grotere scheurwijdte wordt toegestaan in relatie tot met staal gewapend beton. Hieruit wordt door menigeen snel de conclusie getrokken dat men uit kan met minder wapening en daarmee eenzelfde weerstand te behalen. Echter suggereert de beschikbare literatuur snellere ontwikkeling van scheurwijdte dan bij elementen gewapend met staal. Dit kan echter logisch worden verklaard doordat basaltvezelwapening een elasticiteitsmodulus bezit die ongeveer een factor 4 kleiner is.

De ontwikkeling van de scheurwijdte is beschouwd met de DIC-gegevens en uitgezet in figuur 9. Deze resultaten bevestigen hetzelfde beeld als de literatuur schetst. Wanneer dezelfde hoeveelheid wapening wordt toegepast, is te zien dat de ontwikkeling van scheurwijdte bij balken met basaltvezelwapening significant sneller gaat.

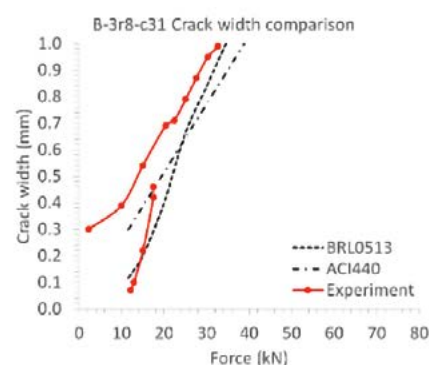
Voor Nederland geldt dat buigscheuren in agressieve omstandigheden voor gewapend beton doorgaans beperkt moeten blijven tot 0,2 mm. In de BRLO513 [6] (de Nederlandse richtlijn voor glasvezelstaven, vergelijkbaar met basaltvezelwapening) zijn scheuren beperkt tot 0,5 mm voor beton met basaltvezelwapening. Het is dus toegestaan om aanzienlijk grotere scheuren toe te laten voor composietwapening. Uit het experiment volgt echter dat, ondanks de grotere toegestane scheurwijdte, bij basaltvezelwapening deze grenswaarde bij lagere belastingen wordt gehaald dan dat wapeningsstaal de strenge grenswaarde behaalt (fig. 9). Een vergelijking met de theoretische modellen om de scheurwijdtecurves in perspectief te plaatsen, is voor elke beproefde balk in de vierpuntsbuigproeven weergegeven in figuur 10.

De resultaten laten een patroon zien dat er in de balken met basaltvezelwapening een grotere scheurwijdte optreedt, dan uit de →

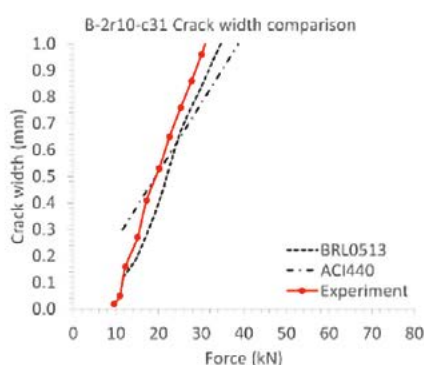


9

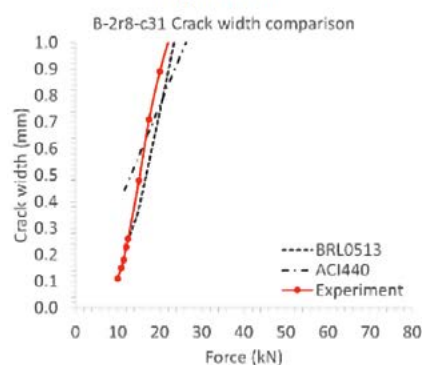
Beton met basaltvezelwapening vertoont een grotere ontwikkeling van scheurvorming bij dezelfde kracht



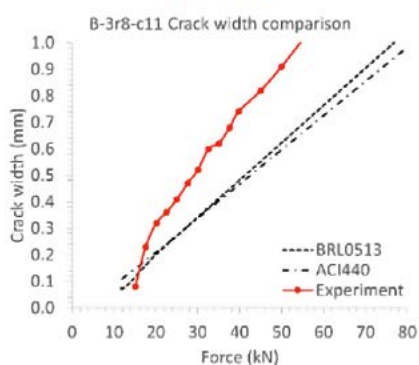
(a) B-3r8-c31



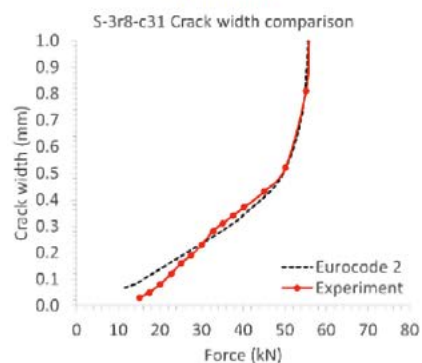
(b) B-3r8-c31



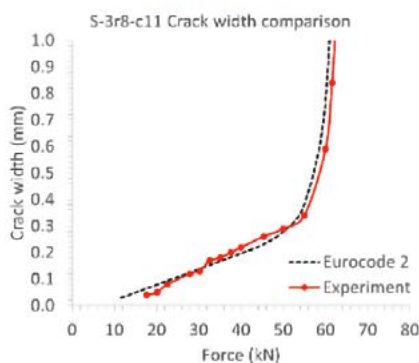
(c) B-3r8-c31



(d) B-2r10-c31



(e) S-3r8-c31



(f) S-3r8-c11

10

LITERATUUR

- 1 Erden, S. and Ho, K., Fiber reinforced composites. In *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, Elsevier, 2017, p. 51–79.
- 2 ACI 440.3R-12: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. Technical Report ACI 440.3R-12, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., 2012.
- 3 ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. Technical Report ACI 440.1R-15, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., 2015.
- 4 Shamass, R. and Cashell, K., Experimental investigation into the flexural behaviour of basalt frp reinforced concrete members. *Engineering Structures*, 220:110950, 2020.
- 5 fib bulletin 40: Frp reinforcement in rc structures. *fib*, International Federation for Structural Concrete, 2007.
- 6 BRL0513 - Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton. KIWA, Gouda, Netherlands, 2015.
- 7 Harajli, M. H., Hamad, B. S., and Rteil, A. A., Effect of confinement of bond strength between steel. *ACI Structural Journal* 101(5), p. 595–603, 2004.

berekening zou moeten volgen. Dat terwijl de operende scheurwijdte in balken met wapeningsstaal vrij goed lijkt te overlappen. De balk met 3Ø8 en dekking 11 mm (B-3r8-c11) echter laat een aanzienlijk grotere afwijking zien ten opzichte van de afwijkingen van de andere balken. Dit is toe te schrijven aan de kleinere betondekking, waardoor een grotere gevoeligheid ontstaat voor het ontstaan van slijtscheuren. Dit sluit aan bij de theorie van Tepfler, die stelt dat een kleinere dekking leidt tot een grotere gevoeligheid voor slijtscheuren. Een theorie van Harajli [7] stelt dat het ontstaan slijtscheuren als gevolg heeft dat de hechtsterkte van de wapeningsstaaf aan het beton afneemt. Deze afname van hechtsterkte heeft weer als gevolg dat de benodigde afstand om spanningen over te brengen van de wapening naar het beton, groter wordt. Hierdoor ontstaat een grotere scheurafstand over het gemonitorde deel van de balk, wat uiteindelijk leidt tot grotere ontwikkeling van scheurwijdte.

Conclusie

Het afstudeeronderzoek heeft zich voornamelijk gericht op het buig- en scheurgedrag van balken gewapend met basaltvezelwapening. Deze balken zijn vergeleken met twee referentiebalken uitgevoerd met wapeningsstaal.

De balken met basaltvezelwapening vertonen significant meer doorbuiging en vertonen eerder scheurvorming. Dit is te relateren aan de lagere elasticiteitsmodulus van de staaf zelf. Deze lagere elasticiteitsmodulus zorgt ervoor dat de neutrale lijn van een ongescheurde sectie minder naar de trekzone verschuift. Hierdoor wordt eerder de scheurspanning van het beton overschreden.

Na het scheuren van het beton biedt de basaltwapening minder weerstand tegen vervorming.

Basaltvezelwapening is volledig lineair elastisch, wat ook terug te zien is in de stijfheidscurve van de balken. De balken met wapeningsstaal laten na scheuren maar een beperkte vervorming zien tot aan het vloeien van de wapening, waarna de doorbuiging snel toeneemt. Echter blijft deze vervorming wel kleiner dan de balken met basaltvezelwapening. Interessant is dat ondanks het

gebruik van twee brosse materialen (beton en basaltvezelwapening), er toch een enorme mate van vervormingscapaciteit in zit en daarmee ook een waarschuwingsmechanisme voordat breken optreedt.

Opmerkelijk bij de balken met basaltvezelwapening was dat er na het ontstaan van de eerste buigscheuren vrij snel secundaire horizontale scheuren ontstonden, die zijn uit te leggen als spijtscheuren. In de raadpleegde rekennormen en -richtlijnen (o.a. ACI440 en BRL0513) wordt hier geen aandacht aan besteed. Deze secundaire horizontale scheuren worden veroorzaakt door een te goede aanhechting aan het beton. Tegelijkertijd zorgen deze scheuren er meteen voor dat de aanhechting afneemt. Dit resulteert erin dat het aantal buigscheuren niet significant hoger is dan is waargenomen bij balken met wapeningsstaal maar wel dat de scheurwijdtes groter zijn. Het ontstaan en de ontwikkeling van deze splitscheuren wordt mede beïnvloed door de staafdiameter, de dekking en de hart-op-hart-afstand van de onderlinge staven.

De waargenomen buigscheurwijdtes zijn door de splitscheuren significant groter dan in de referentiebalken met wapeningsstaal. Nu kan basaltvezelwapening niet corroderen, waardoor grotere scheuren toelaatbaar zijn. Maar ondanks dit feit worden de grenswaardes van de scheuren bij een lagere belasting gehaald dan is waargenomen bij wapeningsstaal. Het beperken of voorkomen van splitscheuren zal hier waarschijnlijk een positief effect op hebben.

Het onderzoek heeft interessante inzichten opgeleverd voor zowel een praktische invulling als voor de theoretici. Met name de aanhechting en de daaruit ontstane splitscheuren zijn aanleiding voor vervolgonderzoek. ●