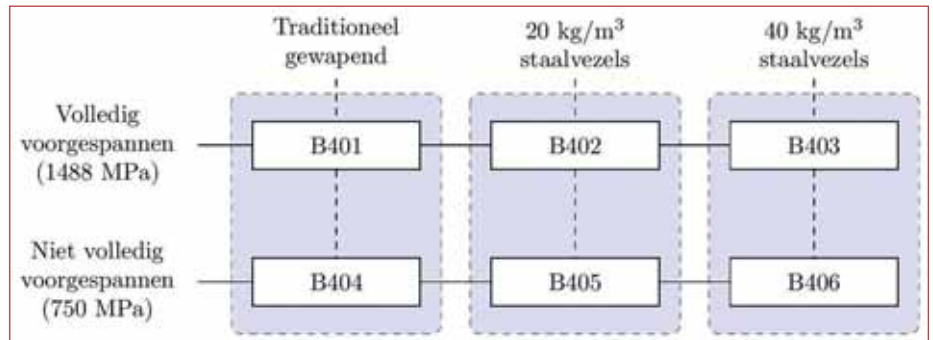


Experimentele en analytische analyse van de dwarskrachtcapaciteit van voorgespannen staalvezelversterkte betonbalken

De Studieprijs 2016 van de Belgische betongroepering (BBG) werd op de Concrete Day in Anderlecht uitgereikt aan Maure De Smedt, doctoraatstudente aan de KU Leuven. In haar thesisonderzoek onderzocht ze experimenteel en analytisch het mechanische gedrag van voorgespannen staalvezelversterkte betonbalken, belast met dwarskracht. Hiervoor werden zes balken met een lengte van 7 m getest. Het onderzoek beoogde bij te dragen aan het beter begrijpen van het materiaal en zijn complexe gedrag onder dwarskrachtbelasting, omdat de toepassing van staalvezelversterkt beton nog beperkt is ten opzichte van zijn mogelijkheden. Dit wordt vooral veroorzaakt door het gebrek aan rekenmodellen en internationale ontwerpcodes, in het bijzonder voor de dwarskracht. In dit artikel licht zij haar thesisonderzoek toe en blikt ze vooruit op haar doctoraatsonderzoek.



Figuur 1: De zes verschillende balken met hun nummer en types wapening.

Staalvezelversterkt beton

Staalvezelversterkt beton (SVB) bestaat uit een betonmatrix met korte, willekeurig verspreide staalvezels. Deze vezels kunnen gebruikt worden voor het (gedeeltelijk) vervangen van traditionele wapening zoals langs- en dwarsstaven. Doordat het toevoegen van de vezels minder arbeidsintensief is dan het voorbereiden van de wapeningskorf kan het gebruik van SVB tijd- en kostenbesparend zijn. Daarom worden verschillende rekenmodellen voor dwarskracht van SVB verder onderzocht.

Proefstukken

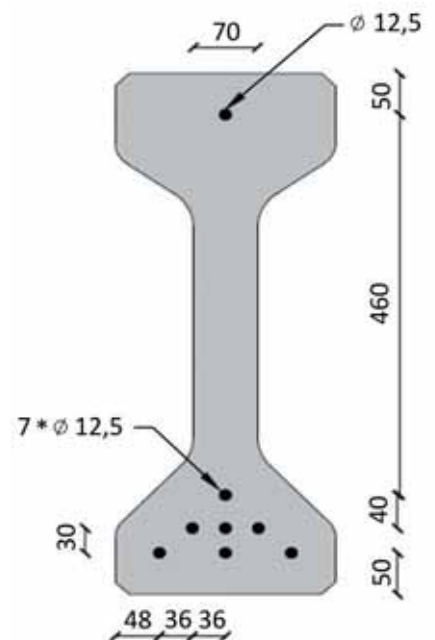
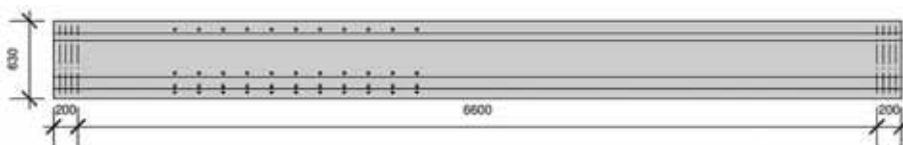
Zes I-vormige voorgespannen SVB-balken van 7 m lang en 0,63 m hoog (zie figuur 2) zijn onderworpen aan een vierpuntsbuigproef (getoond in figuren 3 en 4). De belangrijkste onderzochte parameters zijn de hoeveelheid staalvezels, voorspanning en dwarskrachtwapening. Zo hebben twee balken conventionele dwarskrachtwapening en vier balken staalvezels, waarvan twee met 20 kg/m³ en twee met 40 kg/m³. Daarnaast is er in elke balk ook voorspanwapening aanwezig. De helft van de balken is volledig

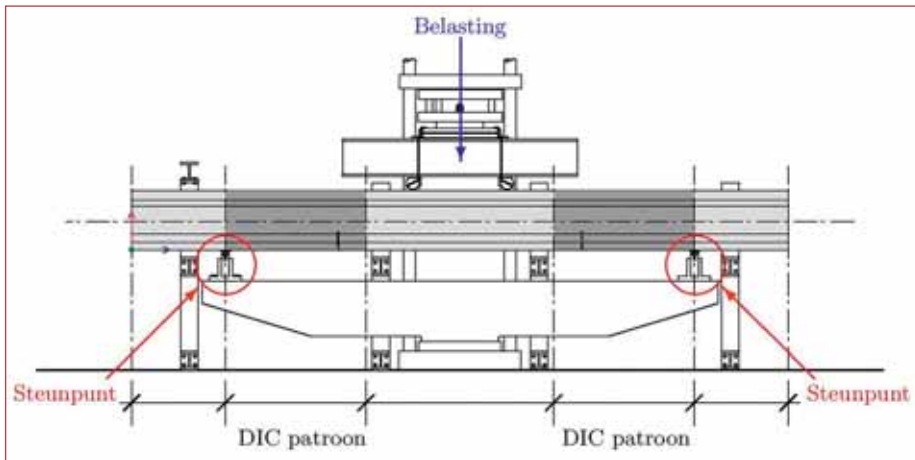
voorgespannen (1.488 MPa) en de andere helft is niet volledig voorgespannen (750 MPa). De combinatie van voorspanning en het type wapening geeft dus zes verschillende balken, getoond in figuur 1. Elke balk heeft een eigen nummer, gaande van 401 tot 406.

Meettechnieken

Tijdens de vierpuntsbuigproeven worden niet alleen de faalmode en -last geobserveerd, maar ook het gedrag onder dwarskrachtbelasting wordt geanalyseerd door middel van het opmeten van vervormings-, verplaatsings- en scheur-

Figuur 2: (a) Langs- en (b) dwarsdoorsnede van de balken met staalvezels.

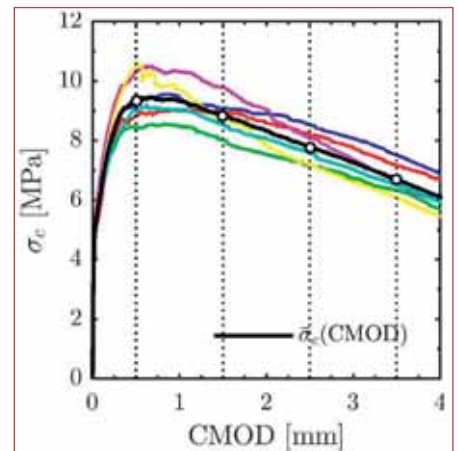
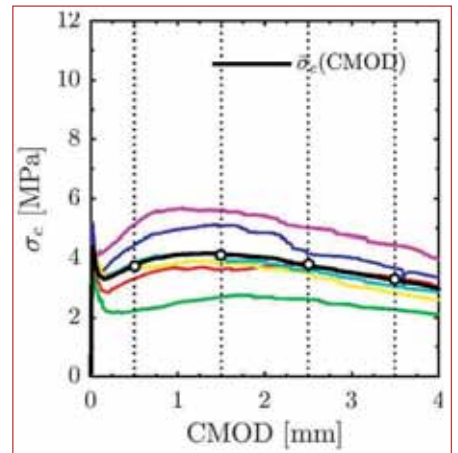




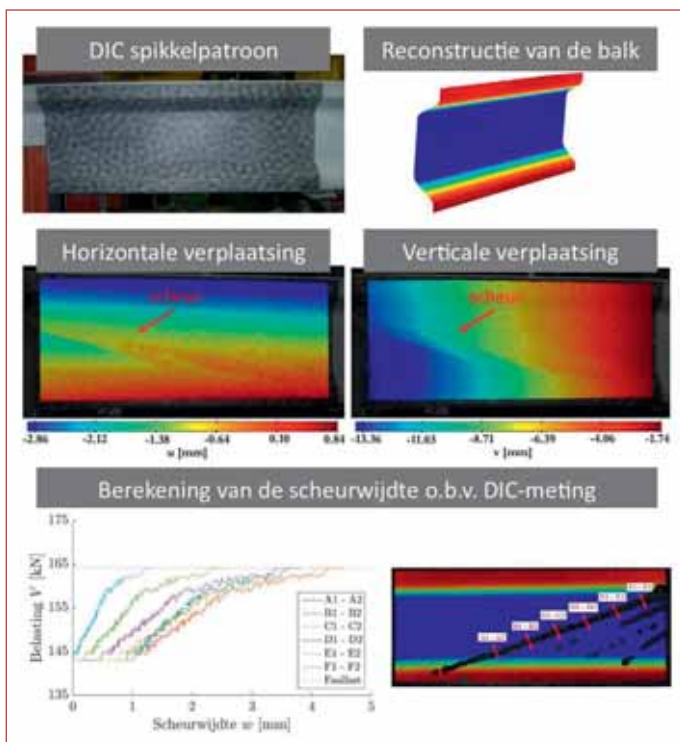
Figuur 3: Opstelling van de vierpuntsbuigproef.



Figuur 4: Foto uit het labo van een balk in de testopstelling.



Figuur 6: CMOD-spanningscurven voor drie prisma's per SVB-balk met (a) 20 kg/m³ staalvezels en (b) 40 kg/m³.

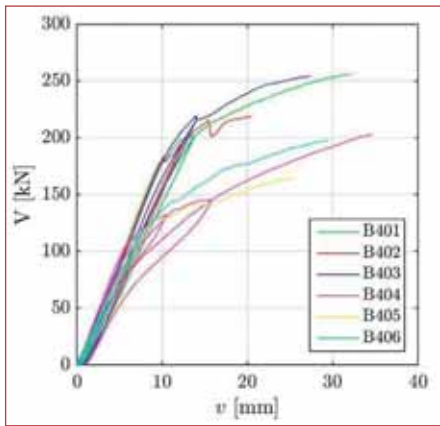


Figuur 5: Typische DIC-resultaten: reconstructie van het gekromde balkoppervlak, horizontale en verticale verplaatsing van de balk tijdens de toename van de belasting (waarbij het ontstaan van de scheur zichtbaar wordt) en meting van de scheurwijdte.

patroongegevens tijdens het belasten. Zowel traditionele meettechnieken (zogenaamde demountable mechanical strain gauges, linear variable differential transformers and optical photoelectric sensor) als geavanceerde optische meettechnieken (zogenaamde Bragg grating optical fibres en stereo-vision digital image correlation) zijn gebruikt. Voor de laatste techniek, digital image correlation (DIC), wordt op delen van de balk een uniek gespikkeld DIC-patroon aangebracht (zie figuren 3 en 4). Door elke seconde foto's te nemen van het patroon kan de beweging van de balk en het ontstaan van scheuren nauwkeurig in beeld gebracht worden. Zo kan bv. de scheurwijdte van de balken gemeten en vergeleken worden, zoals getoond wordt in figuur 5.

Materiaalproeven

Voor elke balk zijn ook materiaaleigenschappen bepaald door middel van materiaalproeven volgens de Europese normen. Specifiek voor SVB wordt de buigtreksterkte bepaald volgens



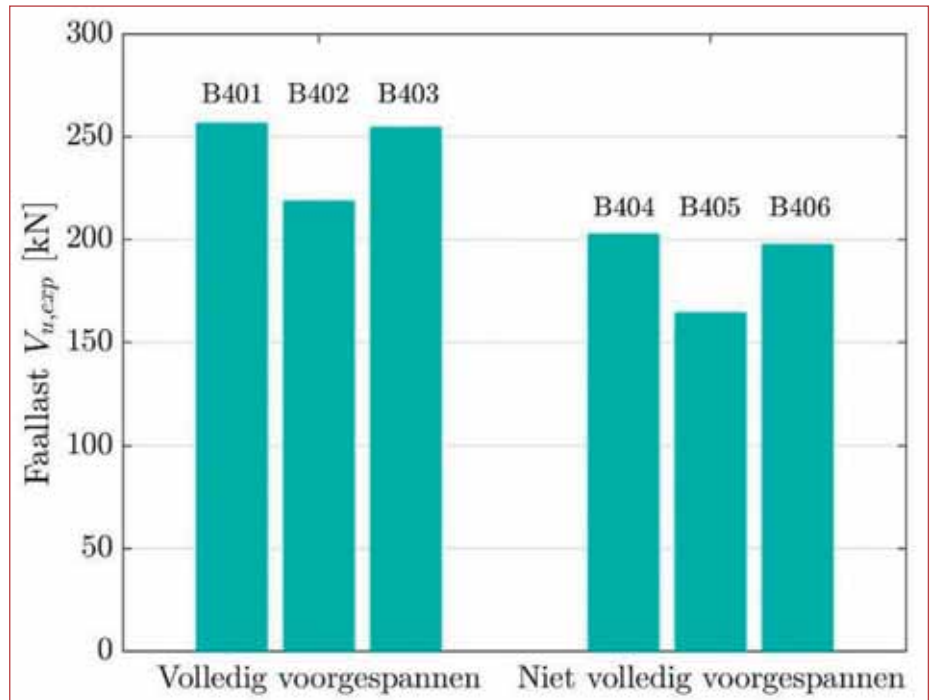
Figuur 7: (a) Kracht-verplaatsingscurve en (b) faallast van de zes verschillende balken.

EN14651 met een driepuntsbuigproef. De resulterende CMOD (crack mouth opening displacement) – spanningscurven worden getoond in figuur 6. Hierbij is het zichtbaar dat de balken met 20 kg/m³ staalvezels een zogenaamd softening behaviouur vertonen, terwijl de balken met 40 kg/m³ een hardening behaviouur hebben. Bij het eerste type SVB wordt een grotere scheur gevormd, bij het tweede worden verschillende kleinere scheuren gevormd. Dit gedrag is later ook waarneembaar bij de testen op de grote balken.

Resultaten

Figuur 7 toont de kracht-verplaatsingscurven en de faallast van de verschillende balken en figuur 8 toont de manier waarop ze faalden. Er kan geconcludeerd worden dat een toenemende vezeldosering resulteert in een uitgebreider nascheurgedrag, een meer graduele energiedissipatie en een verhoogde dwarskrachtweerstand (B403 vergeleken met B402 en B406 vergeleken met B405). Een toenemende voorspanning resulteert in een uitgebreidere elastische zone, een lagere scheurhelling en een verhoogde dwarskrachtweerstand (B401 vergeleken met B404, B402 met B405 en B403 met B406).

Bovendien kan een hoeveelheid van 40 kg/m³ staalvezels de conventionele dwarskrachtwapening vervangen om een gelijke dwarskrachtcapaciteit te bekomen in deze proeven (B403 vergeleken met B401 en B406 met B404). Het gedrag onder dwarskrachtbelasting is echter wel verschillend op vlak van scheurlast en nascheurgedrag. Balken zonder vezels ‘exploderen’, ze hebben één grote scheur (B401 en B404 in figuur 8). Balken met vezels hebben verschillende kleinere scheuren doordat de vezels het materiaal meer samenhouden



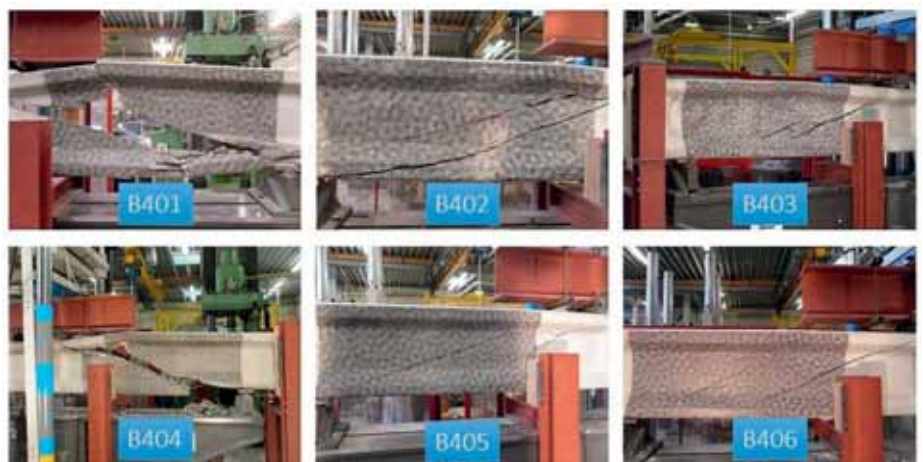
(B402, B403, B405 en B406 op figuur 8). Daarnaast zijn deze resultaten geldig voor dit type experimenten, maar kunnen ze niet veralgemeend worden naar alle types.

Niet enkel de staalvezels, maar ook de hoeveelheid voorspanning heeft invloed op de manier van falen. Hoe hoger de voorspanning, hoe lager de scheurhelling en hoe breder de scheuropening. Uit de DIC-meting wordt berekend dat de scheur van balk B402 tot 6 mm opengaat en die van balk B405 slechts tot 4 mm.

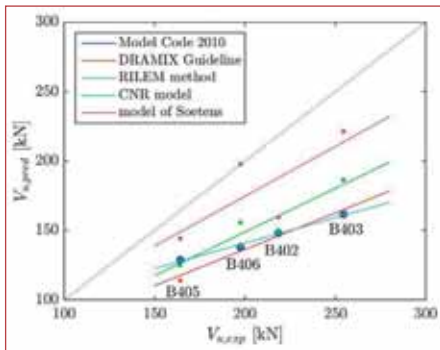
Rekenmodellen

Op dit moment zijn er in Eurocode 2 nog geen ontwerpregels voor dwarskracht in SVB te vinden. Een gebrek aan ontwerp-

codes zorgt mede voor het beperktere gebruik van SVB. In Model Code 2010 is hier wel al een aanzet voor gegeven en doorheen de jaren ontwikkelden verschillende onderzoeksgroepen ook rekenregels, namelijk de Dramix-richtlijn, de RILEM-methode, het CNR-model en het model ontwikkeld door Soetens. De faallasten zijn dan ook vergeleken met de voorspellingen. De conclusie is dat alle modellen de dwarskrachtcapaciteit onderschatten, zie figuur 9. Een lichte onderschatting is goed om extra veiligheid in te bouwen, te veel onderschatting zorgt voor te dure ontwerpen. De onderschatting neemt toe bij een grotere voorspanning. Voor sommige modellen is het effect van meer vezels beter



Figuur 8: Verschillende manieren van falen van de zes balken, afhankelijk van hun eigenschappen.



Figuur 9: Experimentele faallasten ($V_{u,exp}$ op de horizontale as) vergeleken met de analytische voorspellingen ($V_{u,pred}$ op de verticale as) volgens de verschillende modellen voor de vier SVB-balken. Op de diagonale lijn is de berekening gelijk aan de experimentele waarde, eronder is de experimentele waarde groter dan de berekening.

ingerekend, voor de anderen is het net omgekeerd.

Voor Eurocode 2 (B401 en B404) en Model Code 2010 (B402, B403, B405 en B406) is – bij het weglaten van de partiële veiligheidsfactoren en het gebruik van gemiddelde materiaalparameters – de gemiddelde verhouding van experimentele tot voorspelde faallast gelijk aan 1,43 met een coëfficiënt van variatie

van 7,2%. De andere modellen verschillen in het ontwerp van de dwarskrachtweerstand en het inrekenen van beïnvloedende parameters, resulterend in variërende gemiddelde verhoudingen en modelonzekerheden. Verder experimenteel en numeriek onderzoek is dus nodig om de rekenmodellen voor SVB te verbeteren. Alleen zo kan het economisch interessanter worden om dit soort beton te gebruiken.

Conclusie en vervolg

Op basis van de experimenten en de analyse uitgevoerd in dit thesisonderzoek op voorgespannen SVB balken kunnen de volgende conclusies getrokken worden. Ten eerste resulteert de vervanging van de conventionele dwarskrachtwapening door 40 kg/m³ staalvezels in een gelijkaardige dwarskrachtcapaciteit, maar een verschillend dwarskrachtgedrag. Ten tweede is er nog geen optimaal rekenmodel, aangezien zowel het effect van de voorspanning als van de staalvezels moeilijk in te rekenen is huidige modellen geven wel allemaal een onderschatting van de dwarskrachtcapaciteit voor het geteste type balken, wat een veilige benadering is. Kortom, het onderzoek naar SVB moet nog verder uit-

gebreid worden. Naar schatting wordt momenteel 4% van het gewapend betonvolume in België ingenomen door staalvezels, terwijl dit op termijn tot 15% zou kunnen uitgebreid worden.

Omdat meer onderzoek naar SVB nodig is, gaat mijn doctoraatsonderzoek hier ook over. Het vermoeiingsgedrag op gescheurd SVB onder trek zal onderzocht worden op verschillende niveaus. Ten eerste worden pull out-proeven uitgevoerd op individueel ingebedde vezels, waarbij gebruik gemaakt wordt van zogenaamde high-cycle loading. Dit zijn een groot aantal belastingscycli op een lager spanningsniveau, in tegenstelling tot low-cycle loading waarbij slechts enkele belastingscycli op een hoog spanningsniveau voorkomen. Een voorbeeld van het eerste is vermoeiing door verkeer, een voorbeeld van het tweede zijn aardbevingen. Tijdens deze proeven worden verschillende metingen uitgevoerd, onder andere met het gebruik van de akoestische emissietechniek en micro-CT-scans. Behalve het experimentele onderzoek zal ook een numeriek model opgesteld worden. Het eerste niveau wordt daarna uitgebreid naar kleine SVB-elementen, om tenslotte toegepast te worden op grootschalige SVB-balken.

NIEUW

Brandstofcel haalt energie uit levende plant

Het jonge Nederlandse bedrijf Plant-e ontwikkelt producten waarbij levende planten elektriciteit genereren. De oprichters van het bedrijf hebben een brandstofcel ontwikkeld die energie uit planten kan omzetten naar bruikbare energie. Deze superinnovatieve manier van stroomwinning is niet alleen milieubewust maar ook trendy en kan vrijwel overal worden ingezet. De brandstofcel wordt al toegepast om een viaduct en een kunstwerk te verlichten met lantaarnpalen die worden gevoed door energie-opwekkende planten. Plant-e zoekt nieuwe toepassingen voor de brandstofcel.

De producten zijn gebaseerd op een technologie ontwikkeld aan Wageningen University. De energie komt vrij tijdens de natuurlijke processen in de bodem van iedere plant. De technologie werd in 2007 gepatenteerd met Plant-e als patenthouder. De technologie maakt het mogelijk om elektriciteit te produceren met levende planten op vrijwel elke locatie waar planten kunnen groeien en waar veel water aanwezig is. De technologie is gebaseerd op natuurlijke processen en is veilig voor zowel de plant als de omgeving.

Door middel van fotosynthese produceert een plant organisch materiaal. Een deel van dit organische materiaal gebruikt de plant voor de eigen groei, maar een groot deel is niet nodig of kan niet worden gebruikt en wordt door de plant via de wortels uitgescheiden in de grond. In de grond rondom deze wortels

leven bacteriën die het organische materiaal afbreken. Tijdens dit afbraakproces komen elektronen vrij als afvalproduct.

Marjolein Helder en een onderzoeksteam van de vakgroep Milieutechnologie van de Wageningen Universiteit ontwikkelden een technologie waarmee deze elektronen kunnen opgevangen worden en vervolgens omgezet naar elektriciteit. Onderzoek wijst uit dat plantengroei niet aangetast wordt door het ‘oogsten’ van de elektriciteit, wat inhoudt dat de plant gewoon kan blijven groeien terwijl elektriciteit wordt opgewekt.

De onderzoekers zagen zoveel interessante toepassingsmogelijkheden voor de brandstofcel dat ze in september 2009 als spin-off van het subdepartement Milieutechnologie van de Wageningen Universiteit het bedrijf Plant-e oprichtten.