



Basaltvezelwapening voor busremise

Basaltvezelwapening in brandwanden busremise Breda:
van materiaaleigenschappen tot constructieve berekening

In de prefab brandwandpanelen van de busremise Breda is het wapeningsstaal volledig vervangen door basaltvezelwapening. Hierdoor wordt een 31% lagere milieubelasting op de wapening bereikt (in productiefase, ofwel LCA-fase A1 t/m A3). De eigenschappen van basaltvezelwapening verschillen in bijna alle opzichten van wapeningsstaal. Het rekenen met basaltvezelwapening vergt daarom extra aandacht.

In beton wordt veel wapeningsstaal toegepast. Gemiddeld 44 kg staal per m³ beton [1], op een totale betonhoeveelheid van circa 14 miljoen m³ per jaar [2]. Wapeningsstaal heeft verschillende voordelen: eenvoudige verwerking, goede vervormbaarheid, lange levensduur bij goede bescherming, goede samenwerking met beton en uitgebreide ervaring in het gebruik ervan. Met gewapend beton kunnen indrukwekkende bouwwerken worden gemaakt. De keerzijde van staal is echter de hoge milieupact bij de productie, de enorme prijsfluctuaties en het risico op corrosie.

Vanwege de groeiende vraag naar verduurzaming staat de bouwsector steeds meer open voor het gebruik van alternatieven. Basaltvezelwapening (of basaltwapening) is zo'n alternatief.

Basaltvezelwapening valt in de familie-groep van composietwapening en *fiber reinforced polymer* (FRP), net als glasvezelwapening.

De eigenschappen van basaltvezelwapening verschillen op meerdere vlakken sterk van wapeningsstaal. Afhankelijk van de beoogde toepassing zijn sommige eigenschappen gunstiger, maar er zijn ook minder aantrekkelijke kanten. De belangrijkste reden om het gebruik van basaltvezelwapening te onderzoeken, is de lagere milieubelasting. De MKI is per volume-eenheid 40 tot 50% lager.



auteur

IR. FELIX LEENDERS

Betonadviseur &
Constructeur
Van Hattum en
Blankevoort

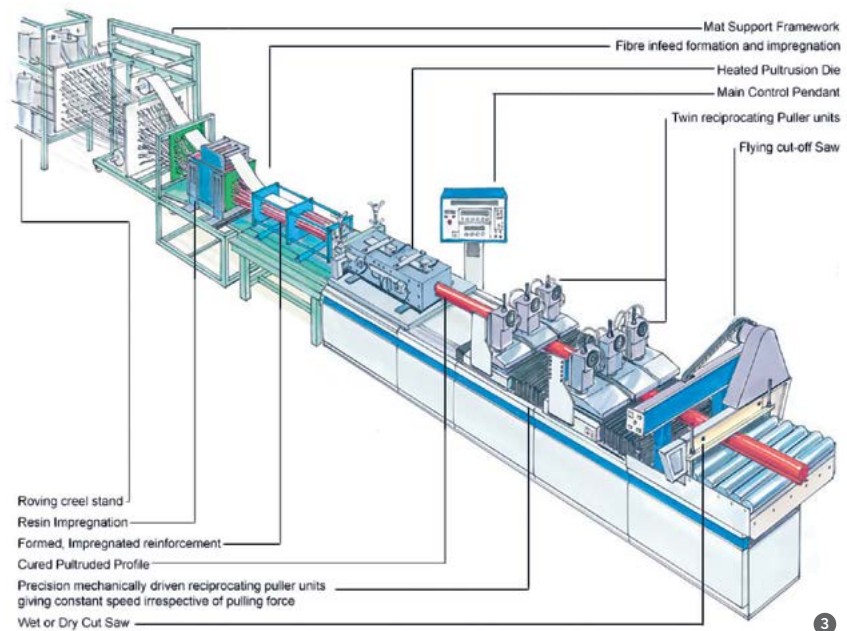
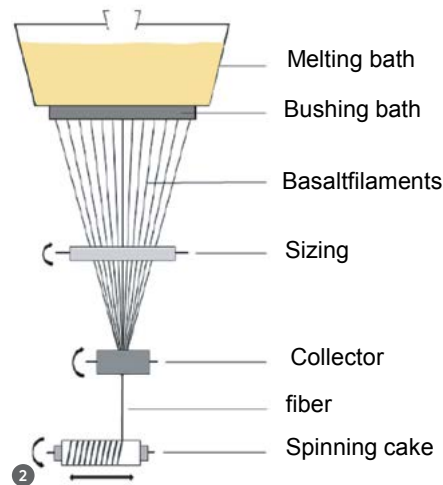
Productie en milieuwinst

Basaltgesteente is gestolde lava dat, wanneer het de juiste chemische samenstelling heeft, kan worden gebruikt voor wapening. Bij de productie van de wapening wordt het gesteente verhit tot ongeveer 1400 °C. Uit deze vloeibare substantie worden zeer dunne vezels getrokken die op rollen worden gewikkeld (fig. 3). Deze rollen worden vervolgens uitgerold, waarbij de dunne vezels, in combinatie met epoxyhars, worden gevormd tot een staaf met de gewenste diameter en voorzien van een profilering (fig. 4). Diameters variërend van 4 mm tot 32 mm zijn mogelijk.

In het productieproces van zowel staalwapening als basaltwapening is een aanzienlijke hoeveelheid warmte nodig. Per gewichtseenheid is er zelfs meer energie nodig om basalt te laten smelten. De volumieke massa van basalt is echter vier keer lager, waardoor de milieubelasting (MKI) in de productiefase per staafdiameter omgerekend 40 tot 50% lager is, gebaseerd op een interne berekening.

Eigenschappen en prestaties

Basaltvezelwapening vertoont van nature een anisotroop gedrag. De eigenschappen hangen af van het productieproces, de verhouding en oriëntatie van de vezels in de wapeningsstaaf, het vezeltype, het type hars, dimensionele effecten en kwaliteitscontrole. De specifieke eigenschappen kunnen dus →



PROJECTGEGEVENS

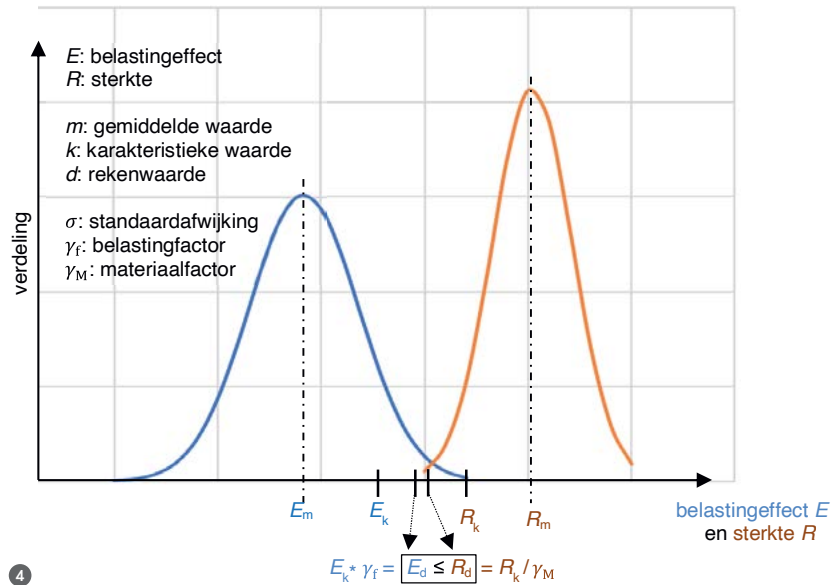
- project**
Busremise Breda
- opdrachtgever**
Provincie Noord-Brabant
- bevoegd gezag**
Gemeente Breda
- constructeur**
Van Hattum en
Blankevoort
(VolkerWessels)
- aannemer**
Van de Ven / KWS
(VolkerWessels)
- onderaannemer**
Holland Scherm
(VolkerWessels)
- constructieve
berekening brandwand**
Lincon
- leverancier wapening,
incl. technische
ondersteuning**
Orlitech
- leverancier elementen**
Van Dijk Beton

Tabel 1 Eigenschappen basaltvezelwapening en betonstaal

gegevens	basaltvezelwapening	betonstaal
diameter [mm]	4-32	6-40
karacteristieke vloeigrens* [MPa]	n.v.t.	500
karacteristieke treksterkte* [MPa]	800-1300	500
E-modulus [GPa]	50-75	210
thermische geleidbaarheid [W/m/°C]	<0,46	56
thermische uitzettingscoëfficiënt (α) [$10^{-5} K^{-1}$]	lengterichting 0,04 tot 0,05	1,0
	dwarsrichting 0,20 tot 0,22	
dichtheid [g/cm ³]	1,9-2,0	7,85
elektrische geleidbaarheid	niet geleidend	geleidend
corrosie- en alkalibestendigheid (weerstand tegen de inwerking van stoffen met een pH > 7)	heel hoog	laag
magnetische kenmerken	niet-magnetisch	magnetisch
breukrek [%]	1,33-2,8	10

*in langsrichting, voor basaltvezelwapening loodrecht op de vezel is de sterkte minder

De treksterkte van basaltvezelwapening neemt fors af over de tijd



variëren per leverancier. Het is van belang om deze specifieke eigenschappen bij de betreffende leverancier op te vragen.

In tabel 1 worden enkele belangrijke eigenschappen gepresenteerd. De (korte duur) treksterkte van basaltvezelwapening is ongeveer 1,5 tot 3 keer zo hoog als traditioneel wapeningsstaal (B500). Tot aan de breukrek gedraagt het zich volledig elastisch, het materiaal vloeit dus niet.

Een nadeel is dat de treksterkte van de wapening in de tijd afneemt. Wapeningsstaven die gedurende langere tijd aan een constante spanning worden blootgesteld kunnen plotseling falen, wat bekend staat als kruipbreuk. De spanning waarbij kruipbreuk optreedt, kan afnemen onder ongunstige omgevingsomstandigheden zoals hoge temperaturen, blootstelling aan UV-straling, natte en droge cycli, of vries- en dooicycli [3].

Ondanks de hogere treksterkte is de elasticiteitsmodulus tot wel vier keer lager dan die van staal.

De invloed van deze afwijkende mechanische eigenschappen op de constructie zal moeten blijken uit berekeningen.

De meerwaarde van basaltvezelwapening zit hem vooral in het feit dat het niet kan corroderen. Corrosie als gevolg van carbonatatie, chloride-indringing en elektrische stroom treedt niet op. Hierdoor is een minimale

dekking voor duurzaamheid niet van toepassing. Uiteraard moet nog wel worden voldaan aan de minimale dekking voor de overdracht van aanhechtkrachten en, indien van toepassing, voldoende brandweerstandheid.

Uitvoeringsaspecten

Basaltvezelwapening is een factor 4 lichter dan traditionele wapening. Dat levert voordelen op ten aanzien van de arbeidsomstandigheden (ARBO); de wapening is immers handzamer. Een nadeel is echter dat de staven ter plaatse niet kunnen worden gebogen. Ze moeten vooraf gebogen worden geproduceerd.

Circulariteit

In het kader van duurzaamheid is het van belang ook het einde van de levenscyclus te beschouwen. Een traditioneel gewapend betonnen element, dat niet in originele staat kan worden hergebruikt, kan worden gebroken. Vervolgens kan het betongranulaat opnieuw worden ingezet als grondstof. Het staal is eenvoudig te scheiden en kan worden versmolten om er weer nieuw staal van te produceren.

Over de circulariteit van basaltvezelwapening is nog weinig bekend. Op basis van huidige kennis is het niet mogelijk om nieuwe wapening te maken uit gebruikte →



basaltvezelwapening, in tegenstelling tot staal. Vanwege de brosheid van basaltvezelwapening zal deze waarschijnlijk breken tijdens de sloop. Betongranulaat zal dus vermoedelijk worden 'vervuild' met granulaten van basaltvezelwapening. Er is nog niet veel over bekend, maar aangezien het grootste deel van basaltvezelwapening een gesteente is, is de aanname dat de gegranuleerde staven samen met betongranulaat weer in nieuw beton kan worden verwerkt.

Regelgeving

Basaltvezelwapening valt, net als glasvezelwapening, onder de categorie composietwapening of FRP's. In de Verenigde Staten en Canada zijn hiervoor respectievelijk de normen ACI 440.1R-15 [3] en CSA S806:12 [4] van toepassing. Op Europees niveau is momenteel nog geen specifieke norm beschikbaar. In de nieuwe versie van de Eurocode [5] is wel een informatieve Bijlage R opgenomen met ontwerpuitgangspunten voor composietwapening, maar zonder ontwerpformules. Daarbij is deze bijlage beperkt tot glasvezel- en koolstofvezelwapening, en dus niet

voor basaltvezelwapening. In Nederland is BRL 0513 [6] van toepassing voor glasvezelwapening. Vanwege de nagenoeg gelijke eigenschappen kunnen zowel Bijlage R als de BRL ook worden toegepast voor basaltvezelwapening.

Een belangrijk aandachtspunt is dat het gebruik van verschillende normen, richtlijnen of testmethodes ook veiligheidskwesties met zich mee kan brengen. Om een bepaald betrouwbaarheidsniveau te waarborgen, worden karakteristieke waarden vastgelegd voor sterkte en belastingen, met bijbehorende kansen van overschrijding en onderschrijding. De karakteristieke sterkte wordt gedeeld door een materiaalfactor. De belastingen worden vermenigvuldigd met een belastingfactor, afhankelijk van het type belasting en gevolgklasse. Uiteindelijk moet de sterkte (R_d) hoger zijn dan het belastingeffect (E_d) (fig. 4).

De waarden die daarbij worden aangehouden zijn afhankelijk van de testmethode die een bepaalde norm voorschrijft. De treksterkte van basaltvezelwapening is bijvoorbeeld mede afhankelijk van de belas-

tingsnelheid. Een treksterkteproef met een belastingsnelheid van 0,2 kN/s en 1 kN/s leverde een verschil van 280 MPa op [7].

Het door elkaar gebruiken van Europese en Amerikaanse normen/richtlijnen kan de veronderstelde veiligheid in gevaar brengen.

Project busremise

Hoe in de praktijk kan worden omgegaan met toepassing en berekening van basaltvezelwapening, wordt toegelicht aan de hand van een praktijkvoorbeeld: een busremise die momenteel wordt gebouwd in Breda.

De huidige busremise bevindt zich aan de Slingerweg, waar vandaan de bussen zich door regulier verkeer naar het centraal station begeven. De nieuwe remise wordt geplaatst langs een snelle busbaan naar het station, tussen de Druivenstraat en de Oosterhoutse busbaan (fig. 6). Dit bevordert de verkeersveiligheid en leidt tot tijdwinst, aangezien de verbinding sneller en betrouwbaarder is. Daarnaast streeft de provincie Noord-Brabant ernaar het openbaar vervoermaterieel te verduurzamen (zero-emissie). Deze schone, elektrische bussen moeten worden opgeladen, wat meer ruimte vereist.

Brandwanden Voor de veiligheid moeten er brandwanden tussen de bussen worden geplaatst om te voorkomen dat een eventuele brand overslaat. Deze brandwanden, met een totaal oppervlak van ongeveer 2500 m²,

zijn opgebouwd uit een fundering van stalen buispalen, stalen stijlen en betonnen brandwandpanelen tussen de stijlen (impressie zie fig. 7). De betonpanelen hebben een minimale dikte van 120 mm, conform de standaard brandwerendheid EI 120 voor niet-dragende wanden (NEN-EN 1992-1-2, tabel 5.3). De lengte varieert tussen de 3,0 en 6,0 m. De constructieve belastingen op de brandwandpanelen zijn beperkt tot het eigen gewicht en wind.

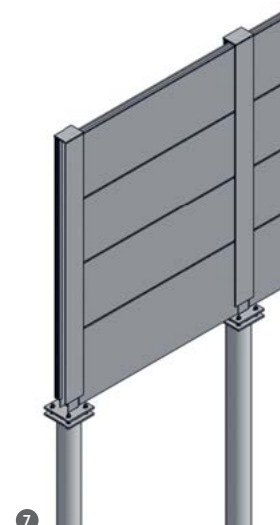
Oorspronkelijk waren brandwanden ontworpen met wapeningsstaal. In het kader van verduurzaming is op initiatief van Holland Scherm onderzocht wat de impact zou zijn van het gebruik van basaltvezelwapening in de brandwandpanelen.

Rekenen met basaltvezelwapening

De eigenschappen van basaltvezelwapening verschillen zoals gezegd (bijna) op alle vlakken met die van wapeningsstaal. Dit heeft ook invloed op de berekeningen. Voor de busremise zijn berekeningen gemaakt op basis van zowel de Amerikaanse norm [3] als de Nederlandse beoordelingsrichtlijn [6].

In het oorspronkelijke ontwerp is onderscheid gemaakt tussen panelen met een lengte van 3,0 tot 4,0 m en van 6,0 m. Het aangepaste ontwerp in basaltvezelwapening is alleen gebaseerd op het maatgevende paneel met een lengte van 6,0 m; die wapeningsconfiguratie is in alle panelen toegepast. →

De meerwaarde van basaltvezelwapening zit hem vooral in het feit dat het niet kan corroderen



6 Locatie huidige remise, het Centraal Station en de te realiseren remise [9]

7 3D-impressie brandwand

Hoewel uit de berekening bleek dat de hoeveelheid basaltvezelwapening kon worden geoptimaliseerd, is besloten dezelfde hoeveelheid wapening aan te houden als in het oorspronkelijke ontwerp. Er is immers al aanzienlijke milieuwinst te behalen met dezelfde diameters en het is nog een relatief nieuw materiaal waar nog weinig ervaring mee is, zowel bij de aannemer, het bevoegd gezag als de opdrachtgever.

In de berekening is uitgegaan van de volgende uitgangspunten voor het maatgevende paneel:
 → Sterkteklasse: C35/45
 → Afmetingen ($l \times b \times h$): 6,0 x 1,0 x 0,12 m³
 → Enkel wapeningsnet Ø8-100 (horizontaal) + Ø6-250 (verticaal) (fig. 9)

Rekenwaarde treksterkte basaltvezelwapening Omdat de treksterkte zoals gezegd in de tijd afneemt, moet zowel volgens de BRL 0513 [6] als de nieuwe Eurocode [5] de langeduurtreksterkte van de wapening worden bepaald op basis van de korteduurtreksterkte. Hiervoor geeft de nieuwe Eurocode [5] de volgende formule:

$$f_{\text{fid}} = \frac{C_t \cdot C_c \cdot C_e \cdot f_{\text{fk0}}}{\gamma_{\text{FRP}}} \quad [\text{formule R.1 en R.2}]$$

Waarbij:

f_{fid} is de ontwerptreksterkte van composietwapening

γ_{FRP} is de partiele factor voor composietwapening

C_t is de factor die temperatureffecten in rekening brengt

C_c is de factor tussen de treksterkte onder langdurige en korte belasting

C_e is de verouderingsfactor

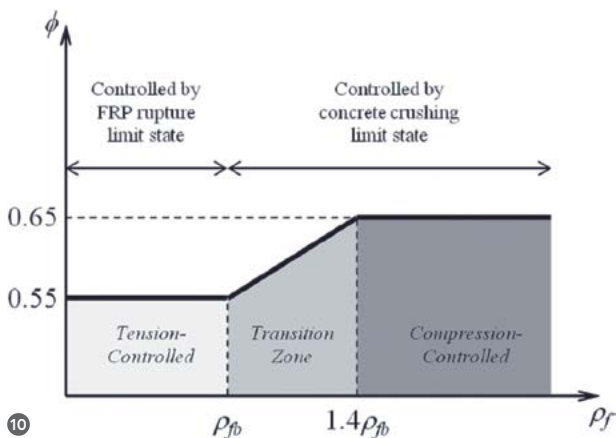
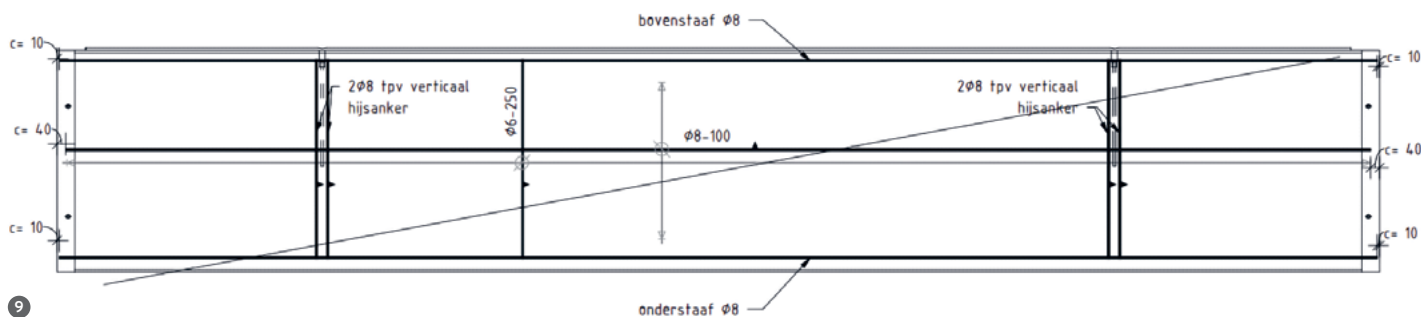
Als er geen informatie bekend is over de langeduursterkte, geeft de nieuwe Eurocode [5] reductiefactoren (C-factoren) voor glasvezel- en koolstofvezelwapening, maar niet voor basalt. In het meest ongunstige geval is het product van de C-factoren voor glasvezelwapening 0,196 en voor koolstofvezelwapening 0,448. De leverancier van de wapening van de busremise heeft enkel een korte duur karakteristieke treksterkte opgegeven (voldoende voor de Amerikaanse rekenmethode).

Om conform de Europese aanpak invulling te kunnen geven aan de reductie voor basaltvezelwapening, zijn verschillende normen geraadpleegd. Voor het langetermijneffect gebruikt ACI 440 een factor ϕ , variërend tussen de 0,55 en 0,65, afhankelijk van het wapeningspercentage (zie fig. 10). Als materiaalfactor wordt, in zowel de BRL 0513 als de Eurocode voor composietwapening, de factor $\gamma_{\text{FRP}} = 1,5$ gegeven. De Amerikaanse norm hanteert geen materiaalfactor.

Om de rekenwaarde van de langeduurtreksterkte te verkrijgen, is de korteduurtreksterkte vermenigvuldigd met:

$$\frac{C_{t,c,e}}{\gamma_{\text{FRP}}} = 0,55/1,5 = 0,37$$





De rekenwaarde is dus 2,7 keer lager! Hierdoor is de door de leverancier opgegeven korteduurtrekspanning van $f_{tko} = 1278$ MPa gereduceerd tot een langeduurrekenwaarde van $f_{nd} = 469$ MPa.

Ondanks het raadplegen van verschillende normen om de materiaaleigenschappen te bepalen, is beredeneerd dat deze reductie voor een betonnen paneel, dat nauwelijks wordt belast en een levensduur van 30 jaar heeft, een veilige aanname is.

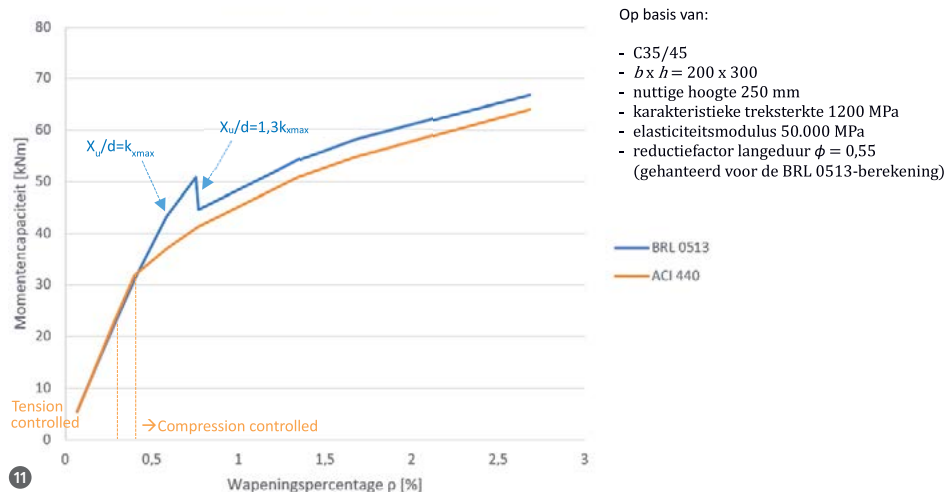
Uiterste momentencapaciteit Bij het ontwerpen van een gewapende doorsnede wordt uitgegaan dat het wapeningsstaal de vloeispanning heeft bereikt op het moment van de uiterste momentencapaciteit. De kracht in de wapening (N_s) is eenvoudig te bepalen, en door het vloedgedrag van staal treedt er een (zeer) sterk toenemende vervorming op voordat staalbreuk optreedt.

Basaltvezelwapening is zoals gezegd volledig lineair elastisch. Afhankelijk van de hoeveelheid wapening zal één van beide materialen, de wapening of het beton, als eerste bezwijken. Om de maximale momentenca-

paciteit van een constructie met basaltvezelwapening te bepalen, is daarom zowel in de ACI [3] als de BRL [6] een tweedeling in de formules zichtbaar.

De ACI maakt helder onderscheid tussen drie zones (fig. 10). Bij lage wapeningspercentages wordt de wapening snel tot de breukspanning belast (*tension controlled*). Bij hoge wapeningspercentages zal de drukzone van het beton als eerste bezwijken (*compression controlled*). En er is ook een overgangsfase (*transition zone*). Volgens Antonio Nanni, professor aan de Universiteit van Miami en autoriteit op het gebied van composiet wapening, heeft het de voorkeur om in de *compression controlled zone* te ontwerpen (art. 7.1.1 [3]). De BRL 0513 onderscheidt deze drie zones ook, maar het onderscheid is minder duidelijk.

In de *tension controlled zone* wordt de momentencapaciteit direct beïnvloed door de hoeveelheid wapening. Verhogen van de hoeveelheid wapening leidt tot een hogere momentencapaciteit. In de *compression controlled zone* geldt dit niet meer. De grafiek in →



figuur 11 laat voor een balkje $200 \times 300 \text{ mm}^2$ de momentencapaciteit zien bij verschillende wapeningspercentages volgens zowel de ACI 440 als de BRL 0513. Vanaf de *compression controlled zone* is een duidelijke afvlakking te zien, het toevoegen van extra wapening heeft dan een beperkte(re) bijdrage. Opvallend is dat de fase-overgangen totaal niet gelijk vallen; dit is niet nader beschouwd.

Daarentegen is het verloop van beide berekeningsmethodes redelijk vergelijkbaar. In het eerste deel is de capaciteit hetzelfde; uiteraard mede afhankelijk van de gehanteerde reductiefactor. Bij de hogere wapeningspercentages is het verschil beperkt (<10% verschil), in deze zone heeft de treksterkte van de wapening geen invloed meer op de capaciteit. De BRL 0513 geeft in de zone van $k_{x_{max}} < X_u/d < 1,3 k_{x_{max}}$ wel een sterk afwijkende maximale momentencapaciteit.

De hoeveelheid wapening in de brandwandpanelen is zodanig, dat conform de ACI [3] het element *compression controlled* is en conform de BRL 0513 [6] in de *transition zone* ($X_u/d > k_{x_{max}}$). Er is voor gezorgd dat de brandwandpanelen aan beide berekeningsmethodes ruim voldoen.

Dwarskracht De optredende belastingen in de brandwandpanelen van de busremise zijn dermate laag dat er geen rekenkundige dwarskrachtwapening benodigd is en dat het betonaandeel $V_{Rd,c,min}$ voldoende is. De dwarskrachtcapaciteit van een betonnen

element, gewapend met basaltvezelwapening, vereist in algemeenheid extra aandacht om de volgende redenen:

- 1 Het toestaan van grotere scheuren resulteert in een afname van de scheurvertanding (*aggregate interlock*).
- 2 De deuvewerking van de basaltvezelwapening is verwaarloosbaar vanwege de lage stijfheid en lagere belastbaarheid loodrecht op de vezel.
- 3 De bijdrage van basaltvezelbeugelwapening aan de dwarskrachtcapaciteit is minder dan die van wapeningsstaal. Voor wapeningsstaal wordt de vloeispanning gehanteerd, terwijl bij basaltvezelwapening fenomenen zoals twee-assige spanningen, gebogen staven, slip en verlenging een grotere rol spelen. Voor gebogen staven geldt dat ter plaatse van de buiging een maximale spanning van 40-50% van de gegarandeerde uniaxiale sterkte wordt geadviseerd (H6.2.4 [10]).

Hechting met beton De aanhechtingsfactor van de basaltvezelwapening aan het beton is onbekend en moet eigenlijk worden beproefd. De aanhechtingsfactor speelt een belangrijke rol bij het bepalen van onder andere de scheurwijdte en is afhankelijk van het type profilering (glad, geribd, zandcoating). Bij de berekening van de panelen is de hechting gelijkgesteld aan die van traditioneel wapeningsstaal. In de uiteindelijke fase is het scheurmoment hoger dan het optredende moment, waardoor de constructie in de gebruiksfase niet zal scheuren.

Tabel 2 Resultaten o.b.v. BRL 0513

	optredend	grenswaarde	UC
moment	$M_d = 4,4 \text{ kNm}$	$M_u = 11 \text{ kNm}$	0,40
dwarskracht	$V_d = 2,9 \text{ kN}$	$V_u = 33 \text{ kN}$	0,09
scheurwijdte	$w_k = 0,101 \text{ mm}$	$W_{\max} = 0,5 \text{ mm}$	0,20

Resultaten berekening De resultaten van de berekening op basis van de BRL 0513 zijn weergegeven in tabel 2. Vanwege onzekerheden, zoals de aanname van de langeduurtreksterkte, is er gekozen voor een robuust ontwerp.

Conclusie

Het niet-geoptimaliseerde ontwerp van de brandwanden in de busremise met basaltvezelwapening resulteerde in een MKI-reductie van 31% op de wapening en een afname van 8% in CO₂-uitstoot voor fase A1-A3. De resultaten zijn veelbelovend op zowel constructief als duurzaamheidsgebied in deze casus. Voor bredere toepassing is echter meer kennis en ervaring vereist.

De twee grote onbekenden in deze berekening zijn de langeduurtreksterkte en de aanhechtingsfactor, waarbij dit project zich leende voor een pragmatische benadering. Twee aandachtspunten voor rekenen met basaltvezelwapening zijn (hoge) dwarskrachten en locaties waar gebogen trekwapening nodig is.

Er bestaat geen specifieke Europese of Nederlandse rekenmethode voor basaltvezelwapening. Wel wordt er in de nieuwe Eurocode invulling aan gegeven. Daarom is het verstandig om ter verificatie, naast de Europese en Nederlandse methodes voor glasvezelwapening, ook de Amerikaanse norm toe te passen tijdens het ontwerp. ●



12

LITERATUUR

- 1 Klimaatimpact van betongebruik in de Nederlandse bouw, CE Delft, september 2020.
- 2 Betonhuis, betonmarkt in Nederland.
- 3 ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.
- 4 CSA S806:12 Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers.
- 5 prEN 1992-1-1:2021 General rules – rules for buildings, bridges and civil engineering structures.
- 6 BRL 0513 Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton.
- 7 https://orlitech.co.uk/wp-content/uploads/2022/10/Thompson_Bridge_Concrete_Magazine.pdf
- 8 De breedplaatvloerenproblematiek uitgelicht, cement 2020
- 9 <https://www.brabant.nl/onderwerpen/verkeer-en-vervoer/openbaar-vervoer/bussen/nieuwe-busremise-westbrabant>.
- 10 FRP reinforcement in RC structures, fib bulletin 40.