

Geopolymeerbeton voor infrastructurele toepassingen (1)

Ontwikkeling van zelfverdichtende mengsels

Zhang, S.; Ye, G.; Lukovic, M.; Hendrik, H.; Scharringa, A.

Publication date

2022

Document Version

Final published version

Published in

Cement: vakblad voor de betonwereld

Citation (APA)

Zhang, S., Ye, G., Lukovic, M., Hendrik, H., & Scharringa, A. (2022). Geopolymeerbeton voor infrastructurele toepassingen (1): Ontwikkeling van zelfverdichtende mengsels. *Cement: vakblad voor de betonwereld*, 2022(7), 42-50. <https://www.cementonline.nl/geopolymeerbeton-voor-infrastructurele-toepassingen-1>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

Geopolymeerbeton voor infrastructurale toepassingen (1)

Ontwikkeling van zelfverdichtende mengsels

In Nederland wordt veel aandacht besteed aan geopolymeerbeton als een van de mogelijkheden om de CO₂-voetafdruk van beton te verlagen. Hoewel dit materiaal op laboratoriumschaal uitgebreid is onderzocht, zijn praktische toepassingen en ervaringen nog maar beperkt beschikbaar. Bovendien bestaan er voor een brede en grootschalige constructieve toepassing een aantal uitdagingen op technologisch en technisch gebied. Er is een onderzoeksproject gestart waarin een zelfverdichtend geopolymeerbeton (ZGB) is ontwikkeld voor toepassing in een prefab voorgespannen verkeersbrug. Dit onderzoek is uitgevoerd door het Microlab en de sectie Betonconstructies van de TU Delft, Haitsma Beton en de Universiteit Gent en wordt door de provincie Fyslân ondersteund als launching customer.

Geopolymeerbeton ook wel alkalisch geactiveerd beton genoemd, bestaat in de basis uit dezelfde grondstoffen als traditioneel beton, namelijk een bindmiddel, toeslagmateriaal (zand en grind), water en eventuele hulp- en vulstoffen. Voor het bindmiddel wordt echter geen traditioneel cement gebruikt maar alkalisch te activeren grondstoffen (de zogeheten *precursor*). Voor het activeren van de reactie wordt een *activator* toegevoegd.

Met het in het onderzoek ontwikkelde

mengsel zal mogelijk, na afronding van het gehele onderzoek, een prototype brug worden gebouwd. Het geopolymeerbeton wordt gebruikt voor zowel de prefab voorgespannen brugliggers als de in situ druklaag.

Voor het ontwikkelde beton golden de volgende eisen, nodig om opschaling op industriële schaal bij Haitsma mogelijk te maken:

- 1 sterkteklasse: C45/55;
- 2 sterkte na 1 dag: > 30 MPa;
- 3 uitvloeimaat: SF2 (initiële uitvloeit 660-750 mm);
- 4 viscositeitsklasse: VS1 (T500 ≤ 2s);

auteurs



IR. SHIZHE ZHANG

TU Delft, sectie
Materialen en Milieu,
Microlab



DR. GUANG YE

TU Delft, sectie
Materialen en Milieu,
Microlab



DR. IR. MLADENA
LUKOVIĆ

TU Delft, fac. CiTG,
Sectie
Betonconstructies



HENDRIK HERDER

Haitsma Beton



ING. AREND
SCHARRINGA

Provincie Fryslân

- 5 *passing ability class*: PA1 (J-ring blokke-ringsmaat ≤ 15 mm);
- 6 weerstand tegen ontmengen klasse (zeef-segregatie): $SR_2 \leq 15\%$;
- 7 zetmaat: 45 min > 580 (580-640) mm SF1.

Betonmengsel

In het mengsel wordt als bindmiddel (*pre-cursor*) hoogovenslak toegepast. Dit wordt geactiveerd met behulp van een alkalische oplossing op basis van natrium. Er wordt ook gebruikgemaakt van een vertragende hulpstof om een goede consistentie te garanderen. De gebruikte toeslagmaterialen zijn vergelijkbaar met conventioneel beton: fijn zand (0-4 mm) en grind (4-16 mm).

De mengprocedure is vergelijkbaar met die van conventioneel beton. Nadat het bindmiddel is gemengd met het zand en het toeslagmateriaal, wordt de alkalische activatoroplossing geleidelijk toegevoegd, gevolgd door de vertragende hulpstof. Het mengen gaat door totdat het beton een optimale vloeibaarheid heeft bereikt.

Na het storten zijn proefkubussen (150 x 150 x 150 mm³) geseald en gedurende 1 dag bewaard onder 25 °C. Dit is gedaan om ervoor te zorgen dat de druksterkte na 1 dag hoger is dan 30 MPa. Dit is belangrijk voor de toekomstige productie in de fabriek. De proefstukken werden na 1 dag ontkist en

bewaard in een klimaatkamer bij 20°C met een relatieve vochtigheid (RV) > 95% tot de testleeftijd (standaard uitharding). Het oppervlak van de proefstukken is afgedekt met plastic folie om direct contact met water te voorkomen.

Specie-eigenschappen

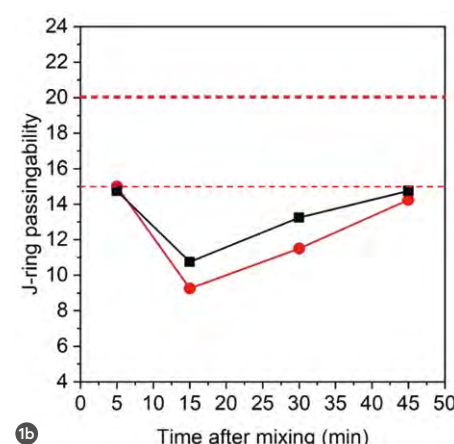
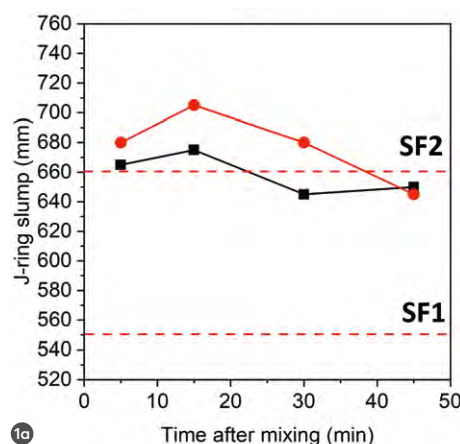
De eigenschappen van het verse ZGB zijn getest volgens EN 12350-12. De viscositeit is bepaald met behulp van een J-ringtest. Omdat T500-tijd (maat voor de viscositeit) altijd al lager is dan twee seconden, moet deze voor de ontworpen ZGB nog lager zijn. Volgens EN 206-1 en EN 13369 voldoet het mengsel daarmee aan de eisen voor viscositeitsklasse VS1 (T500 $\leq 2s$).

De J-ringuitvloeimaat van het ZGB-mengsel is weergegeven in figuur 1a. De uitvloeimaat bereikt ongeveer 15 minuten na de start van het mengen het maximum en neemt daarna geleidelijk af. Binnen 20 minuten na het mengen kan het ZGB een uitvloeimaat van meer dan 660 mm behouden. Volgens de grenswaarden van EN 206-1 (tabel 1), voldoet het aan klasse SF2 (volgende voor zelfverdichtend beton).

Om de *passing ability* te bepalen, ofwel het vermogen de wapening te passeren, wordt de J-ringblokkeeringsmaat (B_j) bepaald (het verschil in hoogte tussen de

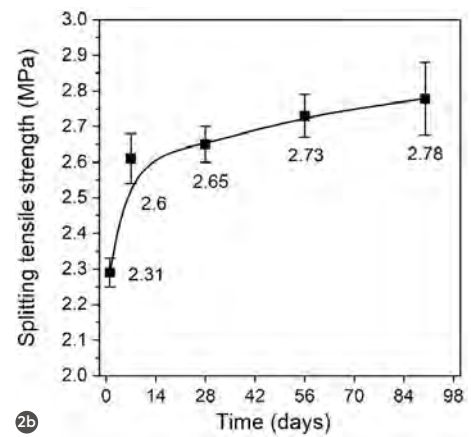
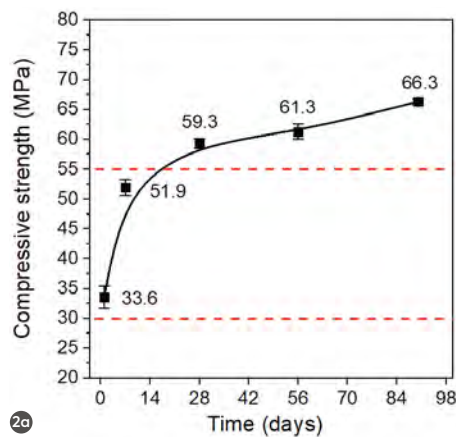
Tabel 1 Uitvloeimaat (SF) volgens EN 206-1

uitvloeimaat (SF)	grenswaarden [mm]
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850



1 (a) J-ring uitvloeimaat en (b) J-ring *passing ability* van 5 tot 45 minuten na mengen. De bovenste (rode) en onderste (zwarte) lijn tonen de grenzen van de resultaten

Het ontwikkelde ZGB heeft goede eigenschappen die voldoen aan alle eisen voor de productie van het mengsel op industriële schaal



speciekoek aan de binnenzijde én de buitenzijde van de ring). Een lagere B_j duidt op een hogere *passing ability* van het mengsel. Zoals weergegeven in figuur 1b wordt de maximale waarde na 15 minuten mengen bereikt, net als bij de J-ringuitvloeimaat. De B_j voor conventioneel zelfverdichtend cementbeton ligt normaal gesproken tussen de 3-20 mm, met een aanbevolen waarde lager dan 10 mm. De ervaring tijdens de ontwikkeling van het ZGB-mengsel lijkt uit te wijzen dat een kritische B_j -waarde van 15 mm geschikt is. In dit onderzoek wordt de *passing ability* tot 45 minuten na het mengen als voldoende beschouwd (hiermee wordt voldaan aan *passing ability class PA1*).

De weerstand tegen ontmengen van het ZGB wordt beoordeeld met behulp van de zeefsegregatietest volgens EN 12350-11. Het resultaat is het percentage fijne materialen dat door de zeven weglekt. In dit onderzoek ligt de waarde voor de ontmengde portie tussen 7-8%, wat voldoet aan de eisen van SR2-klasse voor zelfverdichtend beton ($SR < 15\%$).

Mechanische eigenschappen

Druksterkte en slijttreksterkte De mechanische eigenschappen van ZGB, zoals de druksterkte, de slijttreksterkte, elasticiteitsmodulus en Poisson-ratio (ν) zijn bepaald volgens de EN 12390-normen. De druksterkte en slijttreksterkte zijn getest op kubussen $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ (fig. 1a en 2b). De gemiddelde kubusdruksterkte na 1 dag is 33,0 MPa, waarmee het mengsel voldoet aan eisen. De gemiddelde kubusdruk-

sterkte na 28 dagen is 59,3 MPa. Aangezien de standaarddeviatie zeer klein is, voldoet deze waarde aan de sterkteklasse C45/55. De ontwikkeling van de slijttreksterkte laat een vergelijkbare trend zien als de druksterkte.

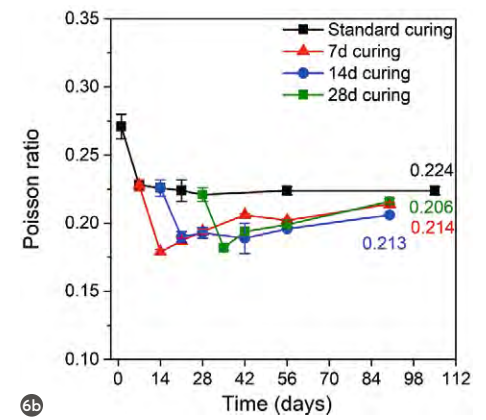
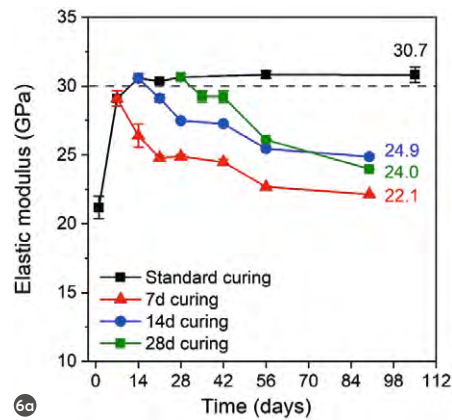
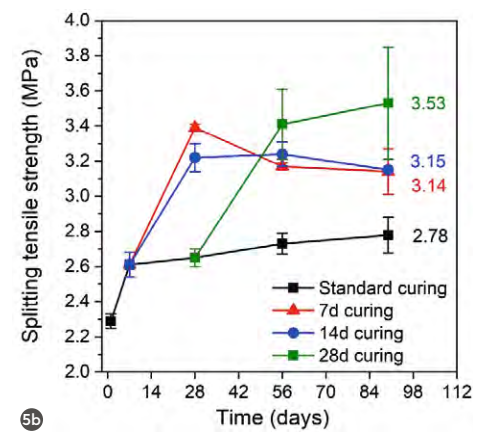
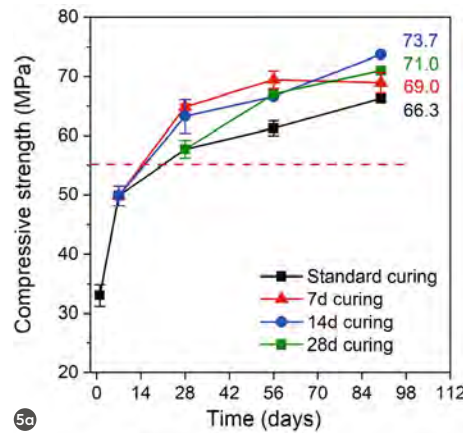
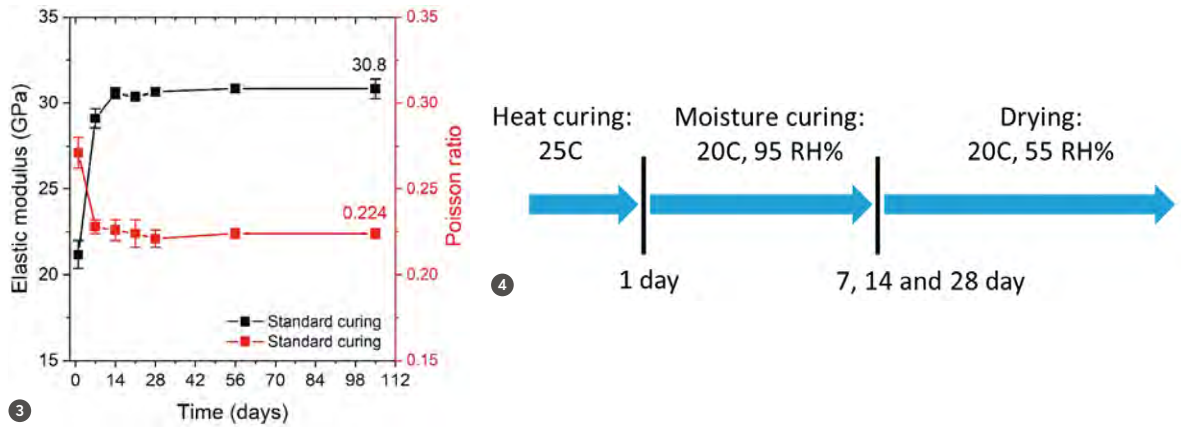
Elasticiteitsmodulus en Poisson-ratio De elasticiteitsmodulus en de Poisson-ratio van ZGB staan in figuur 3. De elasticiteitsmodulus neemt toe van 21,2 GPa op 1d tot 30,5 GPa op 14 dagen. Na 14 dagen lijkt het erop dat de elasticiteitsmodulus al stabiel is. De ontwikkeling van de Poisson-ratio laat een vergelijkbare trend zien, hoewel deze omgekeerd gerelateerd is aan de elasticiteitsmodulus. De Poisson-ratio is maximaal op 1 dag (0,27) en neemt geleidelijk af en stabiliseert na 14 dagen (0,22). Let erop dat de elasticiteitsmodulus ongeveer 20% lager is in vergelijking met die van conventioneel beton met een vergelijkbare sterkteklasse, wat in overeenstemming is met de resultaten van Prinsse [1].

Mechanische eigenschappen op de lange termijn Om betrouwbare opschaling mogelijk te maken, zijn ook de mechanische eigenschappen van ZGB op de lange termijn, na droging onderzocht. Alle tests zijn uitgevoerd volgens EN 12390. Voor alle tests zijn de ZGB-proefstukken verhard conform het proces in figuur 4. Het droogproces begint na 7, 14 en 28 dagen. De relatieve vochtigheid van de omgeving voor het drogen is ingesteld op 50% RV.

De druksterkte en de slijttreksterkte staan in figuur 5a en 5b. Zowel de druk-

TWEELUIK

Dit is het eerste van twee artikelen over een onderzoek naar de toepassing van geopolymerbeton in de infrastructuur. Dit eerste artikel gaat in op fase I van het onderzoek, de ontwikkeling van een betonmengsel. Het tweede deel op fase 2, de productie op industriële schaal.



sterkte als de splijttreksterkte nemen toe na het drogen. Er is een significantere toename gevonden bij de splijttreksterkte. Dit kan komen door het droogproces dat de eigen-spanning in het proefstuk beïnvloedt.

De elasticiteitsmodulus en de Poisson-ratio staan in figuur 6. In tegenstelling tot de eerder waargenomen trend met proefstuk-

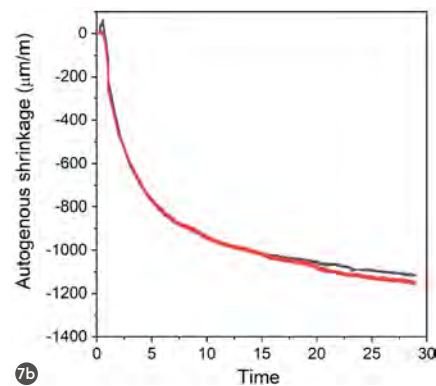
ken die vóór het testen onder standaard uitharding (RV > 95%) zijn gehouden, begint de elasticiteitsmodulus af te nemen zodra het proefstuk wordt blootgesteld aan drogen. Op de leeftijd van 90 dagen bereikt het ZGB gedroogd na 7 dagen uitharding 22,1 GPa. Het lijkt erop dat het verlengen van de uithardingstijd helpt om de daling van de →

3 Elasticiteitsmodulus en de Poisson-ratio van ZGB als functie van de uithardingstijd

4 Uithardings- en droogproces van ZGB-proefstukken voor testen mechanische eigenschappen op lange termijn

5 (a) Ontwikkeling van de druksterkte en (b) splijttreksterkte na droging op verschillende leeftijden

6 (a) Elasticiteitsmodulus en (b) Poisson ratio na droging op verschillende leeftijden



elasticiteitsmodulus te verminderen. Zelfs na 28 dagen te zijn verhard, hebben ZGB-proefstukken onder droging op de leeftijd van 90 dagen een elasticiteitsmodulus van 24,9 GPa. In feite is in alle drie de gedroogde proefstukken de daling van de elasticiteitsmodulus zeer significant. Dit fenomeen werd ook al eerder gemeld door Prinsse et al [1].

Bij gebruik van voorspanning kan de daling van de elasticiteitsmodulus leiden tot een hogere elastische vervorming en daardoor tot een afname van de voorspanning. Als gevolg hiervan moet het gerapporteerde gedrag zorgvuldig worden beschouwd voor het ontwerp van de liggers.

Met drogen daalden de waarden van de Poisson-ratio tot 0,2 ~ 0,21. Deze veranderingen zijn niet zo significant als de daling van de elasticiteitsmodulus.

Krimp en scheurgevoeligheid

Krimp De autogene krimp is vanaf 6 uur na het storten gemeten (fig. 7a). De proefstukken zijn gedurende 1 dag verhard bij 25 °C en vervolgens tot 28 dagen bij 20 °C. De resultaten zijn weergegeven in figuur 7b. De autogene krimp bedraagt ongeveer 650 μe na 3 dagen, 850 μe na 7 dagen en

1100 μe na 28 dagen. Dit is redelijk aangezien de meeste autogene krimp op jonge leeftijd plaatsvindt. De autogene krimp is echter aanzienlijk hoger (ongeveer 4 tot 5 keer) dan die van cementbeton met een vergelijkbare druksterkte [2].

De totale krimp is gemeten volgens EN 12390-16. Er is gebruikgemaakt van betonprisma's (100 x 100 x 400 mm³). Nadat de proefstukken gedurende 7, 14 en 28 dagen waren verhard, zijn ze blootgesteld aan de omgeving met 50% relatieve vochtigheid (RV) en een temperatuur van 20 °C. Zowel de krimp als het massaverlies zijn gemeten (fig. 8).

De totale krimp omvat zowel autogene krimp als uitdrogingskrimp, hoewel de bijdrage van autogene krimp afneemt bij een langere uithardingstijd vóór blootstelling aan droging. De krimp na 7 dagen is ongeveer 2 tot 3 keer groter dan cementbeton met een vergelijkbare druksterkte [3]. Met name de krimp en het massaverlies van ZGB nemen bij een langere uithardingstijd af. Dit suggereert dat langdurige uitharding gunstig is om de krimp van ZGB te verminderen.

Kruip Kruip is onderzocht volgens EN 12390-17 (fig. 9a). Als gevolg van de voorspanning be-

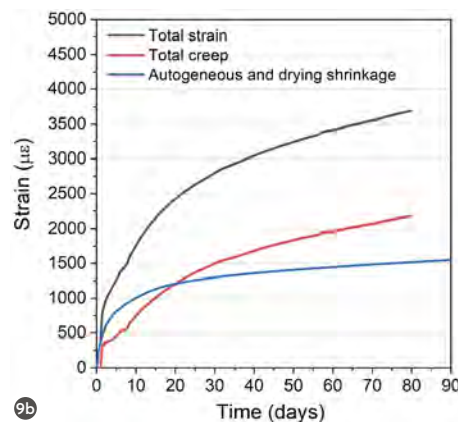
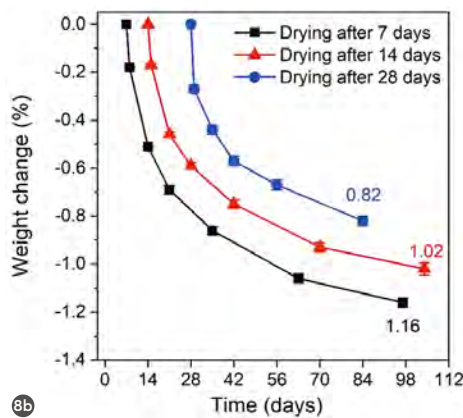
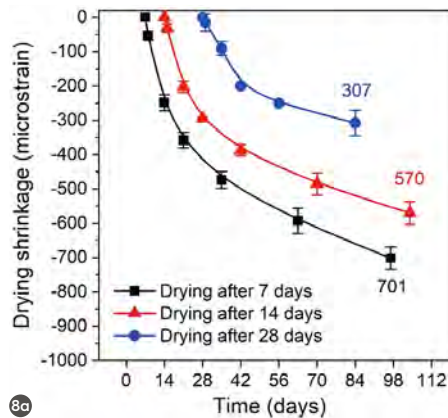
draagt de spanning 17,0 MPa. De proefstukken zijn gedurende 1 dag verhard voordat de spanning van 17,0 MPa is toegepast. Dit om de toepassing van de voorspanning na 1 dag uitharding in de fabriek na te bootsen.

De resultaten van de totale vervorming (kruip, autogene en uitdrogingskrimp) zijn weergegeven in figuur 9b. Hier is de elastische vervorming, veroorzaakt door de belasting, niet meegenomen. Uit de resultaten blijkt dat de kruip op 890 dagen na de belasting 2200 $\mu\epsilon$ bedraagt. Deze waarde is twee keer zo hoog als die van cementbeton met een vergelijkbare druksterkte [4]. Een dergelijke grote kruip is in lijn met eerdere onderzoeken naar alkalisch geactiveerd beton. De grote kruip van ZGB is te wijten aan de intrinsieke eigenschappen van de reactieproducten in geopolymeerbeton (CASH-gel).

Scheurgevoeligheid Gezien de grote autogene krimp en uitdrogingskrimp van de ZGB-mengsels, was het cruciaal om hun scheurgevoeligheid te onderzoeken. Dit is gedaan met behulp van een *Temperature Stress Testing Machine (TSTM)* (fig. 10), waarbij geen longitudinale vervorming plaatsvindt. Als de spanning plotseling afneemt, treedt scheurvorming op. De tijd tussen het storten en scheuren is gebruikt om de scheurgevoeligheid te bepalen.

De verharding vindt op een vergelijkbare manier plaats als de eerdere tests. Het proefstuk is gedurende de gehele test ge-seald om te garanderen dat alle krimp autogene krimp is. De kerntemperatuur van het proefstuk is gemonitord met behulp van vijf thermokoppels op verschillende plaatsen. De temperatuur wordt tot 1 dag op 25 °C gehouden en daarna op 20 °C. Dit helpt om te bepalen of: 1) de vroege temperatuurdaling →

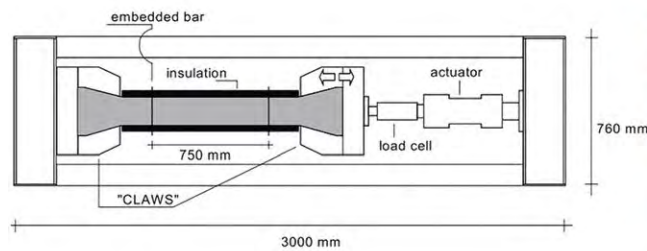
ZGB heeft een goede weerstand tegen chloride-diffusie



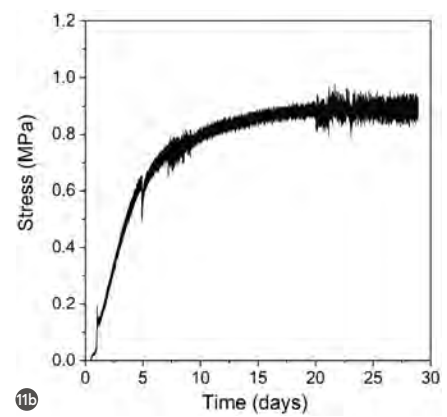
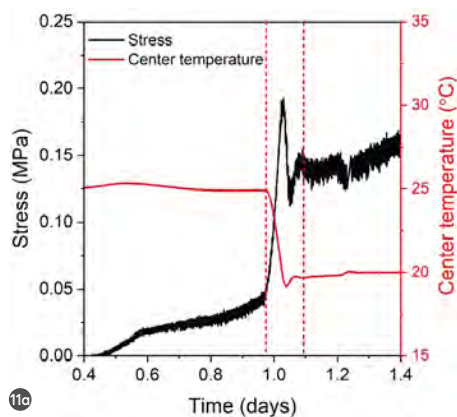
8 (a) Totale krimp en (b) massaverlies 7, 14, 28 dagen standaard uitharding

9 (a) Testopstelling voor kruiptests en (b) totale spanning, totale kruip en autogene/uitdrogingskrimp

De carbonatatie-weerstand en de vorst-dooi-weerstand met dooizouten van ZGB is niet zo goed als die van cementbeton



10



11a

11b

tijdens het uitharden vroege scheuren veroorzaakt en 2) de autogene krimp, in combinatie met ontspanning, scheurvorming veroorzaakt.

De resultaten zijn weergegeven in figuur 11a. De temperatuur daalt van 25 tot 20 °C en veroorzaakt inderdaad spanning in de proefstukken als gevolg van de thermische krimp. Deze spanning zorgt er echter niet voor dat het proefstuk scheurt. Dit geeft aan dat het uithardingsproces, dat wil zeggen 25 °C gedurende 1 dag en 20 °C tot 28 dagen, veilig is en niet tot scheurvorming leidt. De spanning als gevolg van autogene krimp tot 28 dagen is weergegeven in figuur 11b. Zoals te zien, ontwikkelt de spanning zich snel op jonge leeftijd tot 7 dagen. Dit is niet vreemd, aangezien de autogene krimp zich vooral binnen de eerste 7 dagen ontwikkelt (fig. 7). De spanning die in het proefstuk is opgebouwd, stabiliseert na 21 dagen en bereikt uiteindelijk ongeveer 0,89 MPa. Deze waarde is veel lager dan de slijttreksterkte van het beton.

Om de scheurgevoeligheid verder te onderzoeken, is de classificatie volgens ASTM C1581 [6] geïntroduceerd (tabel 2). Gekeken is naar de scheurtijd (in dagen) en de gemiddelde spanningsratio (in MPa/dag). Volgens de definitie is de scheurgevoeligheid van ZGB laag. Dit zou verklaard kunnen worden door het krimp- en ontspanningsgedrag. De spanning die wordt veroorzaakt door de hoge autogene krimp kan tot op zekere hoogte worden vrijgegeven door het ontspanningsgedrag. De bevindingen zijn positief voor de toepassing van ZGB als bouw materiaal. Aangezien ZGB echter een relatief nieuw materiaal is, is geschiktheidsonderzoek voor de lange termijn nodig. Dit zal worden uitgevoerd als de productie van de ZGB-liggers is voltooid.

Levensduur

Weerstand tegen chloride-indringing De weerstand tegen chloride-indringing is onderzocht met behulp van een RCM-test

Tabel 2 Classificatie van de scheurgevoeligheid volgens ASTM C1581 [6]

scheurtijd T_{cr} [dagen]	gemiddeld spanningsratio S [MPa/day]	scheurgevoeligheid
$0 < t_{cr} \leq 7$	$S \geq 0,34$	hoog
$7 < t_{cr} \leq 14$	$0,17 \leq S < 0,34$	gemiddeld-hoog
$14 < t_{cr} \leq 28$	$0,10 \leq S < 0,17$	gemiddeld-laag
$t_{cr} > 28$	$S < 0,10$	weinig/laag

(versnelde chloride-indringing) volgens NT Build 492 [7]. De gemiddelde indringingsdiepte van chloride in het beton X_d is geschat op 1,0 mm en de niet-stationaire chloride-diffusiecoëfficiënt D_{nssm} is berekend op $0,22 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Deze waarde is erg laag; bijna tien keer lager dan de gebruikelijke waarden van cementbeton. Hoewel de geschiktheid van de RCM-test voor geopolymerbeton ter discussie staat, kan het zo zijn dat ZGB een goede weerstand tegen chloride-indringing heeft. Dit kan te maken hebben met de dichte microstructuur.

Carbonatatieweerstand De carbonatatieweerstand is getest volgens EN 12390-12 (versnelde carbonatatiemethode). De opstelling is aangepast volgens de RILEM-aanbeveling [8], waarmee hij geschikt is voor alkalisch geactiveerd beton. De CO_2 -concentratie is ingesteld op 1,0% en de relatieve vochtigheid ligt op 60% RV.

De resultaten kunnen worden beoordeeld met behulp van de carbonatatiesnelheid zoals weergegeven in figuur 12. De relatie tussen de carbonatatediepte en de tijd (vierkantwortel) kan worden beschreven door de eerste wet van Fick. De carbonatatiesnelheid is $1,65 \text{ mm} \cdot \text{dag}^{-0,5}$. Dat is een orde van grootte meer in vergelijking met cementbeton, maar wordt beschouwd als vergelijkbaar met het meeste alkalisch geactiveerde beton dat eerder in de literatuur is gerapporteerd [8] en het beton dat eerder door de TU Delft is ontwikkeld [9].

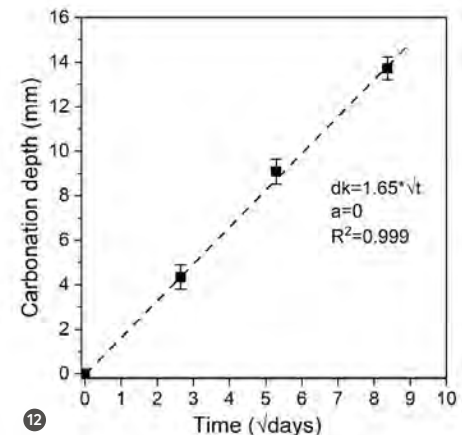
De carbonatatieweerstand van ZGB is over het algemeen niet zo goed als die van cementbeton. Dit komt doordat de meer alkalische omgeving de carbonatiereactie bevordert. Bovendien zijn de belangrijkste reactieproducten meer amorf en hebben een lagere Ca/Si-verhouding [10]. Deze reactieproducten zijn gevoeliger voor carbonatatie dan CSH-gel met een hoge Ca/Si-verhou-

ding, die normaal wordt aangetroffen in cementbeton [11]. Ten slotte zit er geen Portlandiet in ZGB als buffer voor carbonatatiereactie. Al deze factoren resulteren in de lagere carbonatatieweerstand van ZGB tijdens de versnelde carbonatatietests. Op dit moment is het echter nog grotendeels onbekend of de versnelde carbonatatietestmethode, hoewel aangepast conform de RILEM-aanbeveling, de carbonatatieweerstand in natuurlijke omstandigheden juist weergeeft. Het wordt aanbevolen in de toekomst hier meer onderzoek naar te doen. Dit kan ook het standaardisatieproces voor de toepassing van dit materiaal bevorderen.

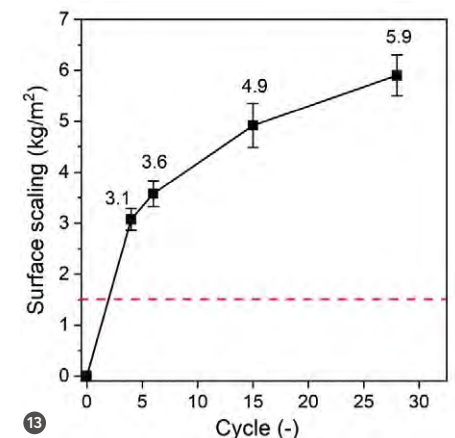
Vorst-dooiweerstand met dooizouten De vorst-dooiweerstand is onderzocht op basis van de CDF-methode volgens EN 12390-9. De resultaten van het massaverlies door afschilfering van het oppervlak na 3, 7, 14 en 28 cycli zijn weergegeven in figuur 13. Het massaverlies neemt toe met een toenemend aantal cycli. Na 28 cycli bedraagt het massaverlies $5,9 \text{ kg/m}^2$. Deze is zeer hoog. Een algemeen aanvaardbare waarde voor cementbeton is $1,5 \text{ kg/m}^2$ [12].

De lagere vorst-dooiweerstand hangt samen met de fijne poriestructuur van ZGB. De poriegrootte is veel kleiner in vergelijking met cementbeton en de verbinding tussen de poriën is over het algemeen niet zo goed. Beide aspecten zijn nadelig wanneer het water in de porie befrist, omdat het leidt tot een hogere lokale spanning waardoor het risico ontstaat op afschilfering en scheurvorming.

Dit is een zeer belangrijke bevinding, aangezien het suggereert dat ZGB niet goed presteert onder vorst-dooicycli met dooizouten. Het wordt dus niet aanbevolen het ZGB te gebruiken bij milieuklasse XF2 of hoger. Omdat de liggers worden beschermd door de bovenste betonlaag, vormen dooizouten →



12



13

12 De carbonatatiesnelheid van ZGB bij versnelde carbonatatie met 1% CO_2 -concentratie en 60% RV

13 Afschilfering van het ZGB-oppervlak bij beproeving vorst-dooiweerstand met behulp van de CDF-methode volgens EN 12390-9

LITERATUUR

- 1 Prinsse, S., Hordijk, D.A., Ye, G., Lagendijk, P. en Luković, M., Time-dependent material properties and reinforced beams behavior of two alkali-activated types of concrete. *Structural Concrete* 21, 2020, p. 642-658.
- 2 Li, Z., Lu, T., Liang, X., Dong, H. en Ye, G., Mechanisms of autogenous shrinkage of alkali-activated slag and fly ash pastes. *Cement and Concrete Research* 135, 2020, p. 106-107.
- 3 Li, Z., Liu, J. en Ye, G., Drying shrinkage of alkali-activated slag and fly ash concrete; A comparative study with ordinary Portland cement concrete. *Heron* 64, 2019, p. 149-163.
- 4 Hu, Z., Prediction of autogenous shrinkage in fly ash blended cement systems, EPFL, 2017.
- 5 Ye, H. en Radlińska, A., Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research* 88, 2016, p. 126-135.
- 6 C. ASTM, 1581-04, Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage, ASTM International, West Conshohocken, PA 4, 2004, p. 787-792.
- 7 Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. *NT Build* 492, 1999.
- 8 Gluth, G.J., Arbi, K., Bernal, S.A., Bondar, D., Castel, A., Chithiraputhiran, S., Dehghan, A., Dombrowski-Daube, K., Dubey, A. en Ducman, V., RILEM TC 247-DTA round robin test: carbonation and chloride penetration testing of alkali-activated concretes. *Materials and Structures* 53, 2020, p. 1-17.
- 9 Nedeljković, M., Carbonation mechanism of alkali-activated fly ash and slag materials: In view of long-term performance predictions, Delft University of Technology, 2019.
- 10 Zhang, S., Li, Z., Ghiassi, B., Yin, S. en Ye, G., Fracture properties and microstructure formation of hardened alkali-activated slag/fly ash pastes. *Cement and Concrete Research* 144, 2021, p. 106-447.
- 11 Nedeljković, M., Ghiassi, B., Laan, S. van der, Li, Z., en Ye, G., Effect of curing conditions on the pore solution and carbonation resistance of alkali-activated fly ash and slag pastes. *Cement and Concrete Research* 116, 2019, p. 146-158.
- 12 Setzer, M.J. en Auberg, R., Freeze-thaw and deicing salt resistance of concrete testing by the CDF method CDF resistance limit and evaluation of precision. *Materials and Structures* 28, 1995, p. 16-31.

misschien geen probleem (uitgaande van milieuklasse XF1). Voor de toepassing van ZGB in een omgeving met milieuklasse XF2 of hoger kan luchtbelvormer worden overwogen. Uit de studie blijkt verder dat de bestandheid tegen vorst-dooicycli kan worden vergroot door het toevoegen van absorberende polymeren.

Milieuvoordelen

Een levenscyclusanalyse (LCA) laat de milieukosten van ZGB zien in vergelijking met zelfverdichtend cementbeton (fig. 14). De milieukosten worden berekend volgens [13]. Hieruit blijkt dat ZGB per 1 m³ een respectievelijk 81% en 71% lager aardopwarmingsvermogen (GWP) heeft als gevolg van broeikasgasemissies en een respectievelijk 65% en 49% lagere totale milieu-impact dan cementbeton en zelfverdichtend beton met CEM III/B. Verdere reducties zijn mogelijk door gebruik te maken van activatoren die zijn gemaakt van Si-bevattende industriële bijproducten.

Conclusies en aanbevelingen

Uit fase I van dit project, de fase waarin het mengsel is ontwikkeld, kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het ontwikkelde ZGB heeft goede eigenschappen die voldoen aan alle eisen voor de productie op industriële schaal.
- De mechanische eigenschappen van ZGB worden beter tijdens de uitharding onder water. Drogen kan een aanzienlijke invloed hebben op de ontwikkeling van de elasticiteitsmodulus.
- De krimp, zowel uitdrogingskrimp als autogene krimp, van ZGB is over het algemeen

groter dan die van cementbeton. Het verlengen van de uithardingstijd helpt om uitdrogingskrimp te verminderen.

→ ZGB heeft grotere kruipvervormingen dan cementbeton.

→ Ondanks de grote krimp is de scheur gevoeligheid van ZGB laag. Dit komt waarschijnlijk door hoge spanningsrelaxatie (en kruip).

→ ZGB heeft een goede weerstand tegen chloridediffusie.

→ De carbonatatie weerstand en de vorst-dooi weerstand met doozouten zijn niet zo goed als die van cementbeton en vereisen speciale aandacht.

→ De milieu-impact van ZGB per 1 m³ is lager dan die van cementbeton. De verlaging van het GWP en de totale milieu-impact maakt ZGB tot een veelbelovend alternatief voor cementbeton in geschikte toepassingen.

De volgende aanbevelingen worden gegeven:

- Het verlengen van de verhardingstijd is gunstig om de uitdrogingskrimp en de afname van elasticiteitsmodulus te verminderen.
- Er moet speciale aandacht worden besteed aan de afname van de elasticiteitsmodulus tijdens het drogen.
- In het bouwkundig ontwerp moet het mogelijke voorspanverlies als gevolg van krimp, afname van de elasticiteitsmodulus en kruipvervorming goed worden beschouwd.
- Er zijn maatregelen nodig om het betonoppervlak te beschermen voor het verbeteren van de carbonatatie- en vorst-dooi weerstand.
- De geschiktheid van de huidige duurzaamheidstestmethoden (voor chloride-indringing, carbonatatie en vorst-dooi weerstand) die voor cementbeton zijn ontwikkeld voor de beoordeling van de levensduur van geopolymeerbeton, moet goed worden bestudeerd.
- De relatie tussen de prestaties van geopolymeerbeton onder versnelde tests en de prestaties in de natuurlijke omstandigheden moet worden beschouwd. ●

