

Eerste praktijkprojecten van start

# Zelfherstellend beton, nuttig of noodzaak?



<sup>1</sup>  
Tank WBL in opbouw

TU Delft is ruim tien jaar bezig met de ontwikkeling van een bio-based technologie voor zelfherstellend beton. De technologie is gebaseerd op kalksteenvormende bacteriën die samen met benodigde grondstoffen worden toegevoegd aan beton en reparatiemortel. Hoe werkt de technologie precies? Wat zijn de ontwikkelingen geweest in de afgelopen tien jaar? Wat zijn de praktische toepassingen en waarom juist daar? Tijd voor een update!

**S**cheurvorming in beton is een geaccepteerd fenomeen en hoeft niet tot problemen te leiden als het 'binnen de perken' blijft. Deze perken zijn vastgelegd in normen waarin wordt beschreven wat acceptabele scheurwijdten zijn voor betonconstructies in specifieke milieus (tabel 1). Afhankelijk van de mengsamenstelling en de hoeveelheid toegepaste wapening, kan de constructie zodanig worden ontworpen dat optredende scheurvorming aan die eisen voldoet.



Tabel 1 Aanbevolen scheurwijdten versus milieuklassen volgens NEN-EN 1992-1-1 NB: Nationale Bijlage bij Eurocode 2

milieuklasse	elementen met betonstaal en/of voorspanstaal zonder aanhechting <i>frequente belastingscombinatie</i>	elementen met een combinatie van betonstaal en voorspanstaal met aanhechting <i>frequente belastingscombinatie</i>
X0, XC1	$W_{\max} \leq 0,4 \text{ mm}^*$	$W_{\max} \leq 0,3 \text{ mm}$
XC2, XC3, XC4	$W_{\max} \leq 0,3 \text{ mm}$	$W_{\max} \leq 0,2 \text{ mm}$
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3	$W_{\max} \leq 0,2 \text{ mm}$	$W_{\max} \leq 0,1 \text{ mm}$

\* Voor milieuklasse X0 en XC1 heeft de scheurwijdte geen invloed op de duurzaamheid; deze grens is gesteld om een in het algemeen aanvaardbaar uiterlijk te verkrijgen. Bij afwezigheid van voorwaarden ten aanzien van het uiterlijk mag deze beperking zijn afgezwakt.

Toch zien we in de praktijk dat scheurvorming kan leiden tot onvoorziene lekkageproblemen of voortijdige corrosie van de wapening. Dit maakt ingrijpen nodig, vaak tegen hoge reparatiekosten achteraf. Het verschil in scheurvorming tussen theorie en praktijk wordt veroorzaakt door een aantal factoren die vaak buiten de macht van de ontwerper liggen.

Een strategie om het risico op onvoorziene scheurvorming te 'managen', is

het toepassen van beton met een hoog scheurhelend vermogen: zelfherstellend beton.

### Zelfherstellend beton

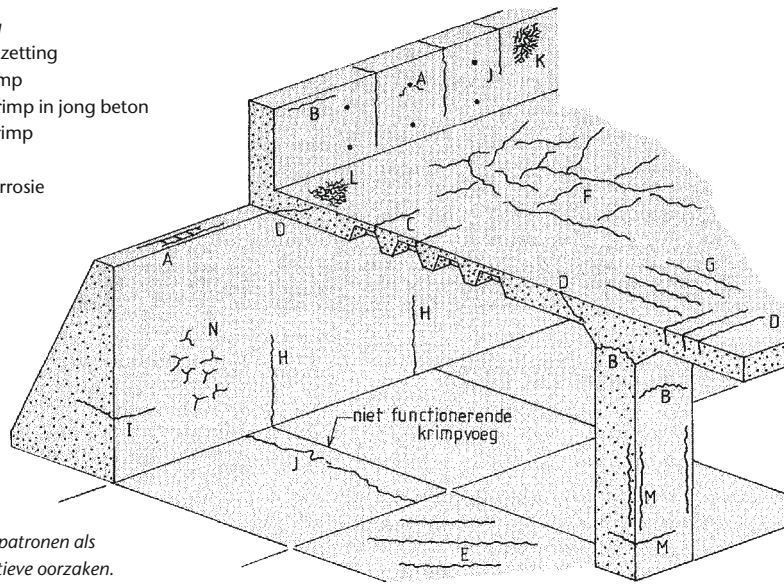
Onder bepaalde omstandigheden kunnen kleine scheurtjes in het beton zichzelf herstellen. We hebben het dan over passief of autogeen zelfherstellend beton. Dit zelfherstellend vermogen kan worden verhoogd door het toepassen van additieven. In dat geval gaat het om actief zelfherstellend beton.

### Autogeen zelfherstellend beton

Elk betonmengsel draagt een zekere mate van scheurherstel in zich mee. Dit gebeurt voornamelijk door een combinatie van vier verschillende processen: kalkvorming, dichtslibben, voortgaande hydratatie van aanwezige cementkorrels en zwellen van de cementsteen. Onderzoek in het verleden heeft aangetoond dat de capaciteit van dit zogenoemde 'autogene' scheurherstel afhankelijk is van het gehalte aan portlandklinker en met

#### Oorzaken scheurvorming

- A t/m D** sedimentatie zetting
- E t/m F** plastische krimp
- H, I** thermische krimp in jong beton
- J** uitdrogingskrimp
- K, L** craquelé
- M** wapeningscorrosie



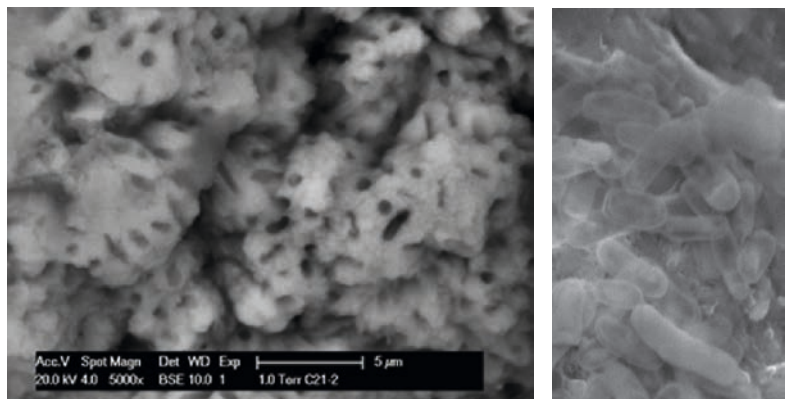
**2**  
Veelvoorkomende scheurpatronen als gevolg van niet-constructieve oorzaken. Zie ook *Betoniek* 8/25 1991

name de deeltjesgrootte van het cement. Hoe grover het cement, hoe hoger de scheurherstellende capaciteit van het beton is [1][2][3].

Dit is dus precies tegengesteld aan de ontwikkelingen die de laatste decennia en zeker in Nederland op het gebied van mengselsamenstelling plaatsvinden. Immers, een laag CO<sub>2</sub>-profiel en beton met snelle sterkteontwikkeling vraagt om een bindmiddelsysteem met laag klinkergehalte en fijne maling. De trend die al jaren zichtbaar is in Nederland – vervangen van klinker voor steeds hogere hoeveelheden slak en/of vliegias – kan daarom leiden tot steeds minder autogene scheurherstellende capaciteit. Vraag die daarbij zijdelings kan worden gesteld is of de huidige en zeker toekomstige mengsels met (zeer) laag klinkergehalte normtechnisch nog wel dezelfde prestatie leveren als vroegere mengsels waarop de scheurwijdte-toleranties zijn gebaseerd. Los van deze laatste vraag staat het vast dat het zeer wenselijk is dat ook CO<sub>2</sub>-arme en snelle betontypen over een voldoende mate van scheurherstellend vermogen beschikken. Gevraagd is dus extra scheurherstellende capaciteit zonder het CO<sub>2</sub>-profiel te verhogen of de sterkteontwikkeling van het beton te verlagen.

#### Zelfherstel door kalksteenvormende bacteriën

Sinds ruim tien jaar is nationaal en internationaal onderzoek gaande dat beoogt beton met een verhoogd zelfherstellend vermogen te ontwikkelen. De TU Delft is koploper in deze ontwikkelingen en heeft een technologie voor zelfherstellend beton ontwikkeld. Sinds 2014 wordt deze door Green Basilisk, een spin-off van de TU Delft, gespecialiseerd in producten die zelfherstellend beton mogelijk maken, nationaal en internationaal in de praktijk toegepast. Dit in vorm van een additief voor zelfhelend beton maar ook als ready mix zelfherstellende reparatiemortel. De technologie is gebaseerd op bacteriën en toegevoegde bio-based grondstoffen.



**3**  
ESEM-foto van kalksteen met bacteriën en een van actieve bacteriën

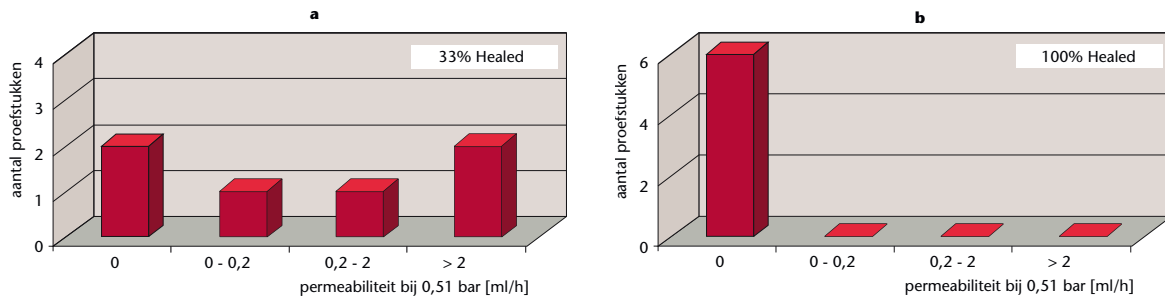
## Werking zelfherstel

### Bacteriën

Vergelijkbaar met planten die zaden vormen, is er een bepaalde groep bacteriën die sporen maakt. Deze sporen zijn zelf eigenlijk ook bacteriën, die zich in een soort van slapende toestand bevinden. Het enige wat ze, net als plantzaden, nodig hebben is voedsel en water waarna ze ontkiemen en actieve bacteriën worden. Afhankelijk van het voedsel dat ze opgediend krijgen, vormen ze tijdens hun groei ook afvalstoffen. In sommige gevallen is dat kalksteen (fig. 3).

Dit kalksteen, in chemische termen 'calciumcarbonaat' genoemd, is een betoneigen materiaal dat uitstekend geschikt is om scheuren in beton te vullen. Gevulde scheuren zorgen ervoor dat het beton weer waterdicht wordt en dat de wapening beter wordt beschermd tegen binnendringende chemicaliën. Dit zorgt er weer voor dat de wapening minder snel gaat roesten en 'betonrot' minder snel optreedt, waardoor de constructie ook veel langer meegaat.

Van de grote hoeveelheid bacteriën die voorkomen in de natuur zijn er maar een beperkt aantal soorten die het 'meestorten' in beton overleven. Deze bacteriën zijn gewend aan sterke alkalische omstandigheden. De sporen die deze bacterie vormt, zijn bestand tegen veel vormen van stress zoals hoge druk, agressieve chemicaliën en uitdroging.



**4** Selfhealing van proefstukken (met 0,2 mm scheurwijdte) met (a) en zonder (b) zonder toevoeging van zelfherstelmiddel. Van de zes controleproefstukken zonder toevoeging zijn er twee waterdicht terwijl alle zes proefstukken met toegevoegd zelfherstelmiddel waterdicht zijn [5]

### Voedsel

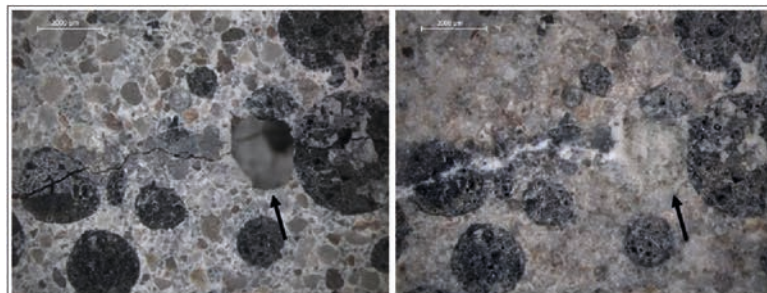
Zoals gezegd is het soort afvalstoffen dat bacteriën vormen afhankelijk van het voedsel. Voor de vorming van kalksteen in beton is het dan ook nodig dat de bacteriën het juiste voedsel voorgeschoteld krijgen. Niet alle voedsel is geschikt: het mag niet iets zijn dat de normale werking van beton, zoals sterkteontwikkeling en duurzaamheid, negatief beïnvloedt. Een goede kandidaat is calciumlactaat, een stof die in grote hoeveelheden in melk voorkomt, maar door specifieke bacteriën gemakkelijk ook uit suikerhoudende industriële afvalstromen kan worden gemaakt. Aanwezigheid van calciumlactaat zorgt ervoor dat bacteriën veel kalksteen kunnen vormen. In de juiste vorm en hoeveelheid toegevoegd aan het betonmengsel, heeft het geen negatieve invloed op andere betoneigenschappen.

### Technologie werkt

In het laboratorium is aangetoond dat de technologie werkt (fig. 4, 5). Afhankelijk van de dosering van bacteriën en voedingsstoffen kunnen scheuren tot 1 mm breedte autonoom worden gedicht. Daarvoor is wel een dosering van 15 kg zelfherstelmiddel per m<sup>3</sup> betonmengsel (bacteriën plus voedingsstoffen in vorm van calciumlactaat) nodig. Minder kan ook, een dosering van 5 kg/m<sup>3</sup> leidt tot het autonoom waterdicht maken van 0,4 mm brede scheuren.

### Zelfherstelmiddel

Handig dus om kalksteenvormende bacteriën en calciumlactaat aan het



**5** Foto's zelfherstel scheuren in beton [5]



**6** Healing agents: eerste generatie (geëxpandeerde klei als dragermateriaal (a)) en tweede generatie (calciumlactaat derivaat pellets (b))

betonmengsel toe te voegen. Wel moeten de bacteriën dan pas kalksteen gaan vormen als het nodig is, dus pas als er een scheur ontstaat. Tien jaar onderzoek aan de TU Delft was er nodig voor – het vinden van de juiste kalksteenvormende bacteriën en deze samen met calciumlactaat leverende stoffen zodanig te verpakken in vorm van – een 'zelfherstelmiddel' (healing agent), dat pas actief wordt in beton wanneer dat echt nodig is. De technologie is nu zover dat het zelfherstellende additief in de praktijk al succesvol is toegepast in vorm van zelfherstellend

beton voor prefab en in-situbeton, maar ook als zelfherstellende reparatiemortel.

Het tweede-generatie-zelfherstelmiddel bestaat uit tot korrels geperste bacteriesporen en calciumlactaat leverende stoffen (fig. 6b). In de eerste-generatie-versies werd nog gebruikgemaakt van poreuze kleikorrels als dragermateriaal (fig. 6a). Nadeel van deze eerste versie is dat grotere hoeveelheden nodig zijn voor voldoende zelfherstel. Hierdoor neemt tegelijkertijd ook de sterkte van het beton af. De tweede generatie van



**7**  
Foto van een zeer fijnmazig wapeningsnetwerk uit de praktijk

het zelfherstelmiddel heeft geen dragermateriaal meer nodig, bestaat uit 100% bio-based actieve ingrediënten en verlaagt – indien juist gedoseerd – de sterkteontwikkeling van het beton niet. Het enige wat nu nog nodig is om het scheurherstel te laten plaatsvinden, is de vorming van een scheur en de aanwezigheid van binnendringend water. Het water vormt de ‘trigger’ waardoor de bacteriesporen gaan ontkiemen en het aanwezige calciumlactaat gaan omzetten in scheurvullend kalksteen.

### De toepassing

Waar kan zelfherstellend beton meerwaarde opleveren? Ook al is een con-

structie van tevoren goed uitgerekend op juiste hoeveelheid wapening en dekking, het kan zoals eerder gezegd in de praktijk toch nog voorkomen dat scheuren ontstaan die groter zijn dan vooraf gedacht. Binnendringend water en meekomende agressieve chemicaliën, zoals chloriden in zeewater en dooizouten, leiden niet alleen tot lekkageproblemen maar ook tot snellere corrosie van de wapening. Constructies in een natte omgeving hebben dus vooral baat bij zelfherstel van scheuren. Ook is het handig als de hoeveelheid wapening tot een minimum kan worden beperkt omdat het niet alleen goedkoper is maar ook het storten van

beton eenvoudiger maakt. Een grover wapeningsnetwerk stelt lagere eisen aan de verwerkbaarheid van het betonmengsel dan een fijnmazig netwerk (fig. 7). Het werkt in principe dus sneller en verlaagt bovendien het risico op vorming van grindnesten en holle ruimten in de constructie.

### Zelfherstellende betontoepassingen

*Prefab toepassing – afvalwaterzuiveringstank WBL*

De eerste grootschalige toepassing van zelfherstellend beton werd uitgevoerd in samenwerking met het Waterschapsbedrijf Limburg (WBL). Vraag van het WBL was of toepassing van zelfherstellend beton kan leiden tot verlagen van ‘cost-of-ownership’, de kosten die worden gemaakt over de hele levensduur van een constructie. Met name onderhoud en reparatiekosten zijn hoog en toepassing van zelfherstellend beton kan deze verlagen door minder noodzaak van reparatie met bijkomstig een langere levensduur van constructies. Om deze vraag beantwoord te krijgen, werd besloten tot het uitvoeren van een demonstratieproject in de vorm van een waterzuiveringstank. De tank, bestaande uit prefab elementen gemaakt door de firma Bestcon, werd geplaatst in maart 2016 op het proefterrein van het WBL in Simpelveld en in bedrijf genomen in augustus 2016 (fig. 8). Een op de vijf van de toegepaste elementen is voorzien van zelfherstelmiddel om vergelijk in prestatie met traditioneel beton mogelijk te maken. Nu, na twee jaar in bedrijf, is nog geen teken van scheurvorming of andere vormen van aantasting aan beide type elementen zichtbaar en kan dus nog geen conclusie worden getrokken of toepassing van zelfherstel qua kosten en baten technisch gezien gunstig is.

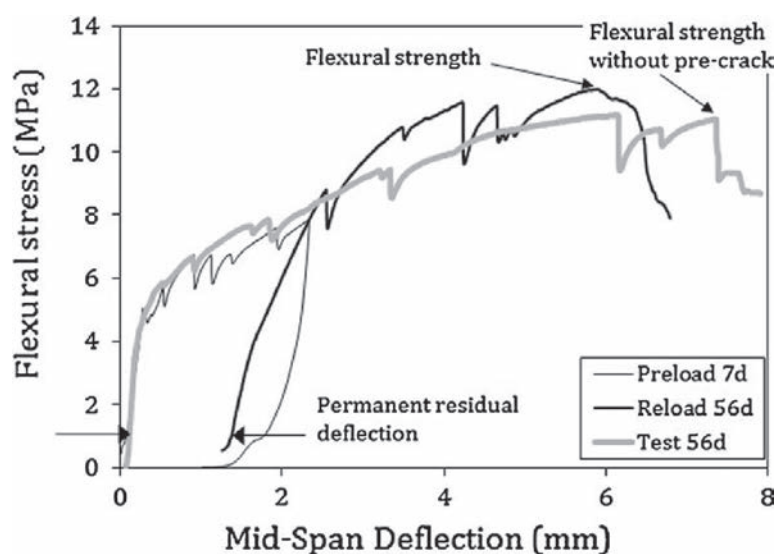
*In-situitoepassing – bluswaterreservoir Hoogvliet*

Naast prefab is zelfherstellend beton recentelijk (oktober 2017) nu ook in een in het werk gestorte constructie



**8**  
Tank WBL in bedrijf

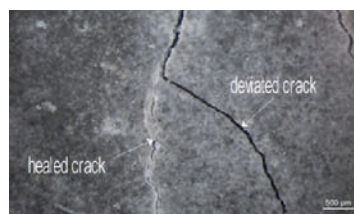
toegepast. Het betreft een bluswaterreservoir voor het Havenbedrijf Rotterdam en is uitgevoerd door BAM Infra. Het reservoir is een betonnen bak van 47 m lang, 5 m hoog en 5,5 m breed (fig. 9). Om ook hier de effectiviteit van het aan het mengsel toegevoegde zelfherstellend beton te beproeven, zijn twee wanden van zelfherstellend beton gemaakt en twee van traditioneel beton. De conform ontwerp hoeveelheid toegepaste wapening in deze constructie moet scheurvorming beperken tot een breedte van maximaal 0,1 mm. Omdat het een waterdicht ontwerp betreft, is in dit geval de zelfhersteltechnologie als extra voorzorgsmaatregel toegepast om eventueel toch voorkomende scheurtjes autonoom te laten herstellen. Hierdoor is achteraf injecteren niet meer noodzakelijk. In de zomer van 2018 zal het bluswaterreservoir in gebruik worden genomen en zal een monitoringsprogramma uitgevoerd door Green Basilisk inzicht moeten verschaffen of toepassing van de zelfhersteltechnologie in dit geval meerwaarde oplevert.



10  
*Strain-hardening zelfherstellende reparatiemortel [6]. In deze grafiek is te zien dat onder toenemende buigbelasting (flexural stress) de mortel niet bros breekt maar vervormt. Bij elk dipje in de curve ontstaat een microscheur die door de sterke vezelwerking niet groter wordt, waardoor de mortel verder kan worden belast*

### Zelfherstellende reparatiemortel

Eerdergenoemde toepassingen van zelfherstellend beton zijn mogelijk voor nieuwe constructies. Het zelfherstellend middel moet immers aan het mengsel worden toegevoegd. Het toepassen van zelfherstel in bestaande verouderde of constructief beschadigde constructies is echter ook mogelijk in vorm van een zelfherstellende reparatiemortel. TU Delft heeft een mortel ontwikkeld die naast een hoog zelfherstellend vermogen ook beschikt over een andere bijzondere eigenschap: hoge *strain-hardening*-vervormingscapaciteit. Deze laatste eigenschap leidt ertoe dat onder hoge trekkrachten de mortel niet bros breekt maar uitrekt tijdens vorming van zeer veel en zeer kleine (< 0,1 mm wijde) scheuren. Het *strain-hardening*-effect wordt bereikt door aanwezigheid van kleine maar sterke vezels waarvan de treksterkte hoger is dan die van de mortelmatrix. Hierdoor ontstaan er



11  
*Een nieuwe scheur (deviated crack) vormt zich naast een zelfherstelde scheur (healed crack) na opnieuw belasten van een reparatiemortel na zelfherstel*

onder trekbelasting op steeds weer nieuwe plaatsen kleine scheuren (fig. 10). In het geval van de vezelversterkte reparatiemortel leidt kalksteenvorming in de scheuren door zelfherstel tot een hogere sterkte van de mortelmatrix. Dit

is duidelijk zichtbaar omdat na opnieuw belasten van een herstelde mortel zich een scheur vormt vlak naast een herstelde scheur. De originele mortelmatrix is dus zwakker dan de herstelde matrix (fig. 11).

Door toepassing van deze vezeltechnologie bedraagt de rek van deze mortel 3 tot 5% ten opzichte van minder dan 0,3% voor traditionele reparatiemortels. De combinatie met bio-based zelfherstellend middel zorgt ervoor dat de ontstane scheurtjes na trekbelasting zeer snel weer dichtgaan. Hierdoor blijft de onderliggende wapening beter beschermd tegen indringend water en corrosie versnellende chemicaliën.



12

Toepassing reparatiemortel Chemelot Limburg

Door de vorming van een duurzame hechting ook tijdens vervorming heeft deze mortel zich in de praktijk bewezen als toepasbaar voor constructieve reparaties maar ook voor het duurzaam repareren van watervoerende scheuren (fig. 12 en 13).

### Scheuren 'managen' in plaats van voorkomen

Waterdichte constructies vragen om geen risico op scheurvorming of in ieder geval slechts heel kleine scheuren van 0,1 mm breed of liefst nog kleiner. Hoe kleiner de beoogde scheuren, hoe meer scheurwijdte-controlerende wapening moet worden toegepast. Hierdoor stroomt het betonmengsel minder eenvoudig door de fijne mazen van de wapening, wat het risico op onvolkomenheden in de uitvoering vergroot. Nu bestaat er dus ook een alternatieve strategie, waarmee voorkomende scheuren worden 'gemanaged': het toepassen van voldoende zelfherstellend vermogen. Een waterdichte constructie zou daarmee met minder scheurwijdte-controlerende wapening kunnen worden uitgevoerd. Dit levert niet alleen materiaalkostenbesparing op maar ook voordelen in de uitvoering,

doordat bij een minder fijnmazige wapening makkelijker kan worden gestort en dus met minder risico op uitvoering gerelateerde problemen. Zelfherstel van 0,2 tot 0,4 mm wijde scheuren zal zorgen voor een waterdichte constructie.

Wat betreft kosten is de zelfherstellende betontechnologie ook veelbelovend. De extra kosten voor toevoeging van zelfherstellend middel aan beton bedragen tussen de € 20,- en € 24,- per m<sup>3</sup> beton. Een bedrag dat zich snel terugverdient door verminderd noodzakelijk

onderhoud, een langere levensduur van de constructie, en sneller kunnen werken zonder verhoogd risico op uitvoeringsproblemen op de bouwplaats. Ook de prijs van de reparatiemortel valt binnen de range van de huidige op de markt verkrijgbare reparatiemortels. Dankzij de zelfhelende technologie kunnen nu scheuren worden 'gemanaged' in plaats van proberen die te voorkomen. Of deze alternatieve strategie daadwerkelijk de genoemde voordelen oplevert, zullen nieuwe projecten moeten bewijzen. ■

### Literatuur

- 1 Neville, A. M., Autogenous healing – A concrete miracle? *Concrete Int*, 2002.
- 2 Edvardsen, C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, 1999.
- 3 Ter Heide, N., Schlangen, E. and van Breugel, K., Experimental Study of Crack Healing of Early Age Cracks, Technical University of Denmark, 2005.
- 4 iDriel, J. van, Jonkers, J., Zelfherstel bewezen in de praktijk, *Cement* 2016-1
- 5 Jonkers, H. M. & Mors, R., Full scale application of bacteria-based self-healing concrete for repair purposes. *Concrete Repair*, 2012.
- 6 Sierra-Beltran M. G. et al., Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair. *Construction and Building Materials*, 2014.



13

Toepassing reparatiemortel Groninger Forum