



Eindige-elementenmethode én vereenvoudigde rekenmethode bieden  
inzicht in scheurvorming in beton

# Voorspellen en beheersen scheurvorming

*Het gebruik van eindige-elementenpakketten om de spanningen in beton te berekenen, wordt in Nederland al tientallen jaren toegepast. Door het modelleren van de doorsnede, het fitten van de gemeten materiaaleigenschappen en het invoeren van de verwachte omgevingsomstandigheden kan ook het risico van scheuren in een constructie worden voorspeld. En die scheurvorming is sterk bepalend voor de waterdichtheid van een constructie.*

De waterdichtheid van een betonnen constructie is voor een belangrijk deel afhankelijk van de optredende scheurvorming. Die scheurvorming is ook bepalend voor de levensduur van een constructie. Scheurvorming moet daarnaast worden beperkt uit esthetische overwegingen. Men kan ervoor kiezen scheuren te voorkomen of scheuren voldoende fijn te verdelen.

## Voorkomen scheurvorming

Er zijn vele mogelijkheden om de kans op scheurvorming in een constructie te verkleinen. De constructeur, de betontechnoloog en de uitvoerder kunnen hieraan allen bijdragen.

### Constructeur

De constructeur kan zorgen voor aanpassingen in de constructie op het gebied van stortvoegen, voorspanning, stortgrootte, dikteverschillen en verhinderde vervorming: aspecten die allemaal invloed hebben op de scheurvorming. Ook is het van belang dat de constructeur de juiste sterkteklasse en milieu-klasse combineert. De constructeur hanteert in zijn ontwerp betonsterkten die sterk kunnen afwijken van de sterkte in de praktijk. Dit kan leiden tot onbeheerste scheurvorming. Bij bepaalde milieuklassen hoort immers vaak al een minimale betonsterkteklasse [3]. Daarom moet de constructeur in zijn berekeningen rekening houden met de daadwerkelijk te realiseren betonsterkten.

### Betontechnoloog

De betontechnoloog kan ook een bijdrage leveren aan het verlagen van de kans op scheuren. Dit bijvoorbeeld door een mengsel te ontwerpen met een lagere temperatuurontwikkeling, het verlagen van het cementgehalte, het kiezen van een ander cementtype of het werken met hulpstoffen en/of vulstoffen. Daarnaast kan het kiezen van een ander toeslagmateriaal met een lagere warmtegeleiding een relatief eenvoudige oplossing zijn om de kans op scheuren te beperken. Daarnaast speelt de thermische geleiding een rol. De thermische uitzettingscoëfficiënt

## Historische ontwikkeling eisen

In het verleden was het vaak de opdrachtgever die eisen opnam in het bestek waar de constructie aan moest voldoen om scheuren te voorkomen. In diverse artikelen werd omschreven dat aan bepaalde onderdelen berekeningen moesten worden uitgevoerd, dat spanningen niet boven een bepaalde limiet mochten komen of dat temperatuurgradiënten niet hoger mochten worden dan een bepaald temperatuurverschil. Iedere bestekschrijver gebruikte daarbij zijn eigen bestekteksten. Rond de eeuwwisseling verscheen in de Standaard RAW Bepalingen [1] voor het eerst artikel 42.15.03, waarin de eisen voor het ontwerpen van een koelsysteem werden vastgelegd. Van dit artikel werd veelvuldig gebruikgemaakt, hoewel sommige bestekschrijvers zoals Holland Railconsult nog steeds hun eigen eisen in hun bestekken opnamen [2].

Na deze periode zijn de moderne, geïntegreerde contracten opgekomen. Hierin kan de aannemer zelf kiezen en afwegen of scheuren worden voorkomen of juist voldoende fijn worden verdeeld. Het gaat steeds meer om de prestatie van de constructie in relatie tot de kosten.

van kalksteen is circa 20-25% lager dan die van grind. En minder uitzetting geeft bij dezelfde verhinderde vervorming minder spanningen en dus een lagere kans op scheuren. De betontechnoloog kan ook nadenken over de autogene krimp van het toe te passen mengsel. De laatste jaren zijn er diverse voorbeelden bekend van projecten met onverwachte scheurvorming. Bij proeven is gebleken dat het mengsel een hogere autogene krimp vertoonde dan werd verwacht. Om die reden is eind 2015 de SBRCURnet-commissie Autogene Krimp gestart. Het doel van deze commissie is autogene krimp als fenomeen eenduidig te omschrijven, de omvang en gevolgen hiervan inzichtelijk te maken en maatregelen te benoemen om de nadelige gevolgen van excessieve scheurvorming te voorkomen.

### Uitvoering

Tot slot kan ook de uitvoering een grote rol spelen. Door het toepassen van koeling, isolatie, verwarmen en het verlagen van de specietemperatuur zijn er in de uitvoering voldoende mogelijkheden de kans van scheuren te beperken. In diverse artikelen zijn hiervan in de afgelopen jaren al verscheidene voorbeelden en ontwikkelingen beschreven [4, 5].

## Voldoende fijne verdeling scheuren

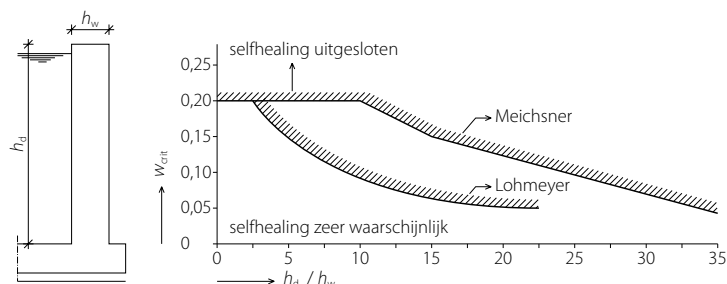
In plaats van het voorkomen van scheuren, is het ook mogelijk te kiezen scheuren toe te laten maar voldoende fijn te verdelen.

Dit kan door het aanbrengen van (aanvullende) langswapening. Het fijn verdelen van de scheuren is nodig om aan de vereiste milieuklasse te voldoen en een waterdichte constructie te garanderen. Daarvoor mag de scheurwijdte niet te groot worden. Lohmeyer heeft een relatie gelegd tussen de kritische scheurwijdte enerzijds en de verhouding van de hoogte van de waterkolom  $h_d$  (drukhoogte) en de dikte van de constructie  $h_w$  anderzijds (fig. 2 [6]). Hieruit blijkt dat de maximaal toelaatbare scheurwijdte 0,2 mm bedraagt. Bij hogere scheurwijdten treedt lekkage op. Bij lagere scheurwijdten kan selfhealing optreden, het gevolg van doorgaande hydratatie, sedimentatie van vaste deeltjes in het penetrerende water, afzetting van kalk/carbonaat en/of zwellen van de cementsteen.

De constructeur moet de maximaal toelaatbare scheurwijdte bepalen. Hierbij moet hij uitgaan van de milieuklassen van het toepassingsgebied voor het beton en dichtheidsklassen uit EN 1992-3: 0, 1, 2 of 3 (tabel 2). Hierbij is dichtheidsklasse 0 de minst strenge klasse zonder bijzondere maatregelen en zijn bij dichtheidsklasse 3 aanvullende maatregelen als voorspanning of een lining (beschermende laag) noodzakelijk. Voor de dichtheidsklassen 0 en 1 kan de scheurwijdte worden bepaald met EN 1992-1 paragraaf 7.3.1. Volgens de Nationale Bijlage bij EN 1992-1 leidt dit voor de in Nederland gebruikte betonsoorten in buitentoepassingen (milieuklassen XD, XS, XF en XA) bijna altijd tot een maximaal toelaatbare scheurwijdte van 0,1 mm of 0,2 mm. Dit zijn dus waarden onder de maximale grens van Lohmeyer waarbij selfhealing nog mogelijk is.

### EEM-berekening

Om te bepalen of een constructie waterdicht kan worden gebouwd met behulp van (aanvullende) langswapening, kan



2

gebruik worden gemaakt van een eindige-elementenpakket zoals HEAT van FEMMASSE. Hierbij kan rekening worden gehouden met diverse omstandigheden die invloed hebben op de sterkteontwikkeling en de scheurvorming. Zo wordt vooraf bepaald wanneer de constructie zal worden gestort (seizoen: omgevingstemperatuur, spocitemperatuur, windsnelheid, zinstraling), hoe lang de constructie in de kist blijft (tijdsduur en type kist), welk mengsel wordt toegepast (alle relevante materiaaleigenschappen als druksterkteontwikkeling, treksterkteontwikkeling, adiabatische warmteontwikkeling, E-modulusontwikkeling en indien relevant de autogene krimp). Als alle waarden zijn ingevoerd, berekent het pakket de sterkteontwikkeling en de spanning.

### Voorbeeldconstructie

Om dit toe te lichten, is de output van een voorbeeldconstructie van een wand op een vloer weergegeven in figuur 3 en 4. Het voorbeeld betreft een wand met een dikte van 1200 mm. Op basis van deze output wordt bekeken of er verhoogde kans op scheuren is. Het gaat daarbij om de verhouding trekspanning/

Tabel 1 Aanbevolen waarden voor  $w_{max}$  uit Nationale Bijlage EN 1992-3

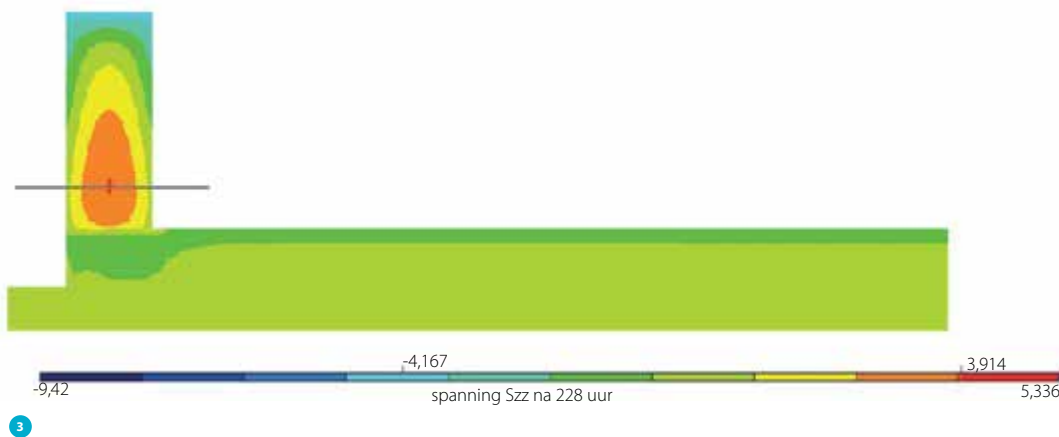
| milieuklasse                 | elementen met betonstaal en/of voorspanstaal zonder aanhechting | elementen met combinatie van betonstaal en voorspanstaal met aanhechting | elementen met uitsluitend voorspanstaal met aanhechting |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                              | frequentie belastingcombinatie                                  | frequentie belastingcombinatie                                           | frequentie belastingcombinatie                          |
| X0, XC1                      | $w_{max} \leq 0,4 \text{ m}^*$                                  | $w_{max} \leq 0,3 \text{ m}$                                             | $\Delta\sigma_p \leq \xi 275 \text{ N/mm}^2$            |
| XC2, XC3, XC4                | $w_{max} \leq 0,3 \text{ m}$                                    | $w_{max} \leq 0,2 \text{ m}$                                             | $\Delta\sigma_p \leq \xi 175 \text{ N/mm}^2$            |
| XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3 | $w_{max} \leq 0,2 \text{ m}$                                    | $w_{max} \leq 0,1 \text{ m}$                                             | $\Delta\sigma_p \leq \xi 75 \text{ N/mm}^2$             |

\*) 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.

Tabel 2 Dichtheidsklassen volgens EN 1992-3

| dichtheidsklasse | eisen voor lekkage                                                  |
|------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 0                | enige mate van lekkage acceptabel                                   |
| 1                | lekkage gelimiteerd tot kleine hoeveelheid; vochtplekken acceptabel |
| 2                | minimale lekkage; uiterlijk mag niet worden aangetast door vlekken  |
| 3                | geen lekkage toegestaan (speciale maatregelen)                      |

- 3 Maximale spanning in de constructie (contourplot met de spanningen)
- 4 Een snede over de dikte van de wand
- 5 Ontwikkeling van spanning en treksterkte in de constructie



treksterkte. Als limiet wordt vaak 50% aangehouden. Deze waarde staat ook in de Standaard RAW Bepalingen 2015 in artikel 42.15.03. Deze limiet is mede gebaseerd op de resultaten van experimenteel onderzoek bij de TU Delft [7]. In dit onderzoek is aangetoond dat als de spanningen onder 50% blijven, de kans op scheuren voldoende klein is.

In het voorbeeld blijkt dat de spanning in de wand maximaal is na circa 10 dagen. In figuur 3 is de spanningsverdeling in de wand na circa 10 dagen weergegeven. In de kern van de wand is de spanning maximaal. Naast een contourplot met de spanningen is ook een snede over de dikte van de wand weergegeven.

Voor de locatie met de maximale spanning in figuur 3 (de rode vlek) is de ontwikkeling in de tijd weergegeven in figuur 5.

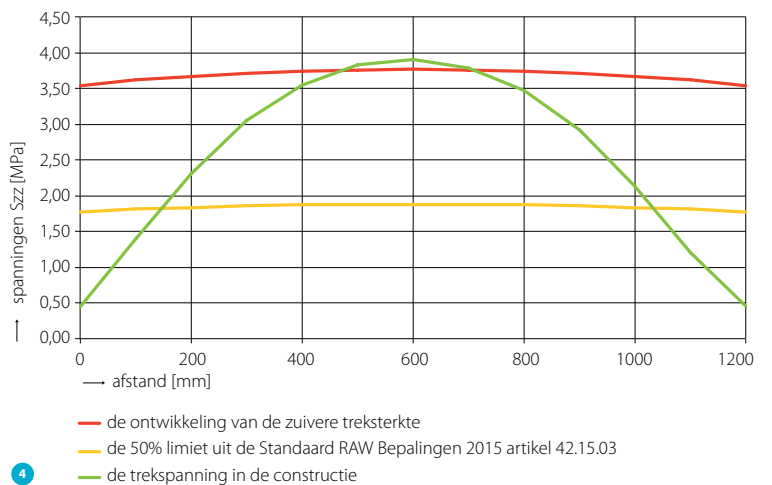
### Vereenvoudigde berekening bijlegwapening

Met de uitkomsten uit de analyses kan met behulp van de vereenvoudigde berekeningsmethode voor een trekstaaf volgens Van Breugel [9] een indicatie van de benodigde hoeveelheid wapening worden berekend. Hiermee kan de scheurwijdte voldoende worden beperkt en daarmee wordt aan de waterdichtheidseis voldaan. Bij deze berekening wordt aangenomen dat we te maken hebben met een onvoltooid scheurpatroon. Om dit toe te lichten, wordt het eerdergenoemde voorbeeld hieronder nader uitgewerkt (formules gebaseerd op [9]).

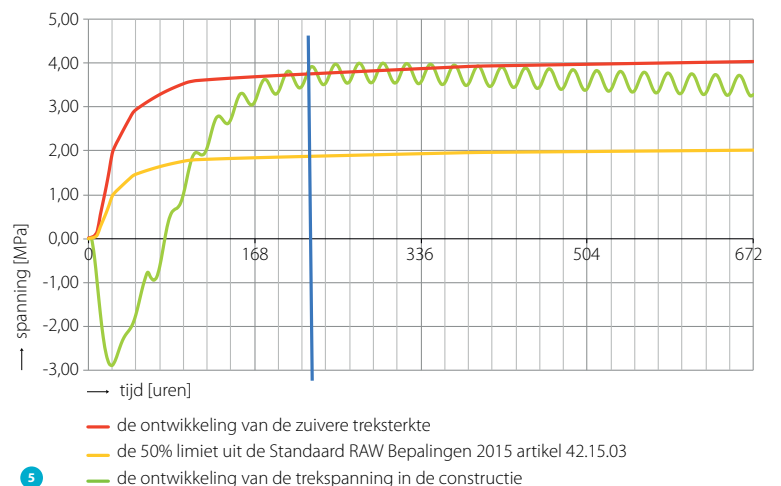
### Input

Van het beton zijn vooraf in het laboratorium de relevante materiaaleigenschappen als druksterkte- en treksterkteontwikkeling bepaald. HEAT rekt deze om naar de werkelijke sterkteontwikkeling op basis van de temperatuurontwikkeling en rijpheid. Voor deze analyses wordt uitgegaan van werkelijke waarden zonder veiligheidsfactoren en 50% limieten. In deze analyse is de treksterkte van het beton na bijna 10 dagen 3,50 N/mm<sup>2</sup>. Dit is op de kruising van de rode lijn en de blauwe lijn in figuur 5. In deze analyse nemen we niet de 28-daagse waarden van de beton-eigenschappen, maar de werkelijke waarden op het moment

waarop de spanning in de doorsnede maximaal is. Deze waarde is dus ook afhankelijk van het seizoen. In de winter gaat de sterkteontwikkeling soms langzamer dan in laboratoriumomstandigheden. Bij dunne wanden kan dit extra invloed hebben. Overige input, als de staafdiameter voor de langswapening en

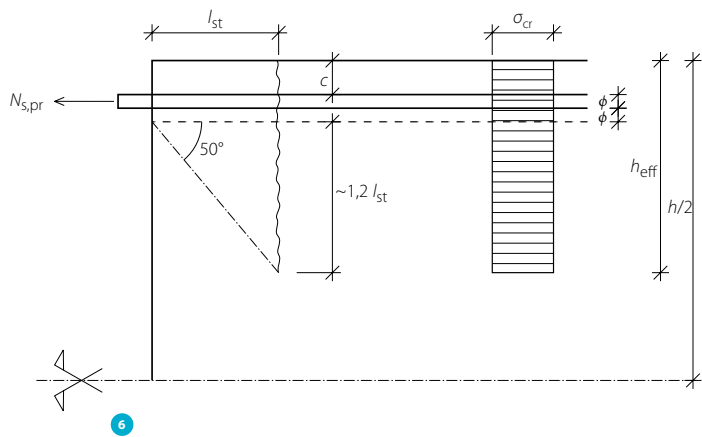


4



5

- 6 Schema voor evenwicht in een betonmootje tussen primaire en secundaire scheur op het moment van het ontstaan van een secundaire scheur
- 7 Watervoerende scheur in een betonnen keldervloer



de dekking, komt van de constructeur en de tekeningen. In dit voorbeeld is door de constructeur een langswapening  $\varnothing 16$  en een dekking van 50 mm aangegeven.

Uitgangspunt voor het rekenmodel is het krachterevenwicht in een betonmootje tussen een primaire en een secundaire scheur in een dikwandige constructie. Schematisch is dit weergegeven in figuur 6.

Voor de betontreksterkte op het moment van scheuren geldt:

$$\sigma_{cr} = 0,75 f_{ctm} = 0,75 \cdot 3,50 = 2,63 \text{ N/mm}^2$$

Op basis van milieuklasse XD3 geldt volgens de Nationale Bijlage een maximaal toelaatbare scheurwijdte  $w_k = 0,20$  mm.

### Resultaten

Omdat rekening wordt gehouden met de spreiding en de lange-duureffecten wordt de maximaal toelaatbare scheurwijdte aangepast:

$$w_{mo} = \frac{w_k}{(\gamma_s \cdot \gamma_{\infty})} = \frac{0,20}{(1,3 \cdot 1,3)} = 0,118 \text{ mm}$$

waarin:

- $w_{mo}$  = gemiddelde korteduurscheurwijdte
- $w_k$  = maximaal toelaatbare scheurwijdte
- $\gamma_s$  = optredende spreidingsfactor
- $\gamma_{\infty}$  = langeduur-/wisselbelastingsfactor

Uitgaande van een E-modulus van het beton na bijna 10 dagen van  $E_{beton} = 35\,000 \text{ N/mm}^2$ , geldt voor de verhouding van de E-modulus van het staal en het beton:

$$n = \frac{E_{staal}}{E_{beton}} = \frac{200\,000}{35\,000} = 5,71$$

Voor de staalspanning na scheuren geldt:

$$\sigma_{s,cr} = \frac{n \cdot \sigma_{s,cr}}{2} + \sqrt{\left(\frac{n \cdot \sigma_{s,cr}}{2}\right)^2 + \frac{f_{ccm} \cdot E_s (0,5w_{mo})^{1,18}}{0,4\phi}}$$

waarin:

- $\sigma_{s,cr}$  = staalspanning in het beton na scheuren
- $\phi$  = staafdiameter
- $f_{ccm}$  = gemiddelde kubusdruksterkte. Voor deze analyse gebruiken we de werkelijke druksterkte.

Na 10 dagen bedraagt deze  $f_{ccm} = 48 \text{ N/mm}^2$ .

Dit levert voor dit voorbeeld:

$$\sigma_{s,cr} = \frac{5,71 \cdot 2,63}{2} + \sqrt{\left(\frac{5,71 \cdot 2,63}{2}\right)^2 + \frac{48 \cdot 200\,000 (0,5 \cdot 0,118)^{1,18}}{0,4 \cdot 16}} = 241,0 \text{ N/mm}^2$$

Voor de rek bij voltooid scheurpatroon geldt:

$$\varepsilon_{fdc} = (60 + 2,4 \sigma_{s,cr}) \cdot 10^{-6}$$

waarin:

$\varepsilon_{fdc}$  = rek bij voltooid scheurpatroon

Dit levert voor dit voorbeeld:

$$\varepsilon_{fdc} = (60 + 2,4 \cdot 241,0) = 638 \cdot 10^{-6}$$

De optredende spanning in de wand is  $3,91 \text{ N/mm}^2$ . Dit is overgenomen uit figuur 3.

Voor de rek  $\varepsilon$  geldt:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{cr}}{E_{cr}} = \frac{3,91}{35\,000} = 111,4 \cdot 10^{-6}$$

Aangezien  $111,4 \cdot 10^{-6} < 638 \cdot 10^{-6}$  geldt een onvoltooid scheurpatroon. De aanname voor een onvoltooid scheurpatroon was dus juist. Als de aanname onjuist was, mag deze vereenvoudigde rekenmethode niet worden toegepast. Echter in het overgrote gedeelte (> 95%) van de analyses voldoet deze aanname wel.

### Overdrachtslengte en effectieve hoogte

In de volgende stap wordt de overdrachtslengte en de effectieve hoogte van de randzone bepaald.

Voor de overdrachtslengte  $l_{st}$  geldt:

$$l_{st} = \frac{1,2 \cdot w_{mo} \cdot E_s}{\sigma_{s,cr}} = \frac{1,2 \cdot 0,118 \cdot 200\,000}{241} = 117,85 \text{ mm}$$

waarin:

$w_{mo}$  = gemiddelde korteduurscheurwijdte

$E_s$  = E-modulus staal

$\sigma_{s,cr}$  = staalspanning in het beton na scheuren

Voor de effectieve hoogte  $h_{eff}$  geldt:

$$h_{eff} = c + 2\phi + 1,2l_{st} = 50 + 32 + 141,42 = 223,4 \text{ mm}$$

waarin:

$c$  = dekking

$\phi$  = wapeningsdiameter

$l_{st}$  = overdrachtslengte

Benodigde staaldoorsnede  $A_s$  per zijde kan dan als volgt worden berekend:

$$A_s = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{s,cr}} \cdot b \cdot h_{eff} = \frac{2,63}{241} \cdot 1000 \cdot 223,4 = 2438 \text{ mm}^2$$

waarin:

$\sigma_{s,cr}$  = staalspanning in het beton na scheuren

$\sigma_{cr}$  = betontreksterkte op moment van scheuren

$b$  = breedte (in voorbeeld 1 m)

$h_{eff}$  = effectieve hoogte

Bij een diameter van  $\varnothing 16$  zou dat 12,1 staven per meter betekenen, ofwel  $\varnothing 16-80$ . Dit is de wapening per zijde.

## Resultaten vergelijken

Bovenstaande vereenvoudigde berekening kan worden uitgevoerd door een (extern) adviseur of door de constructeur zelf. De resultaten moeten altijd worden vergeleken met de eerder bepaalde langswapening. Op basis daarvan kan worden bepaald of wapening moet worden bijgelegd of dat de langswapening van de gebruiksfase voldoende is om de spanningen op te nemen. De constructeur heeft als enige dit totaaloverzicht om deze keuze te kunnen maken en te onderbouwen. Uit de berekeningen blijkt dat het percentage wapening benodigd voor het beperken van de scheurwijdte kan oplopen tot 0,5 tot 1,5%. Een en ander is sterk afhankelijk van de maximaal toelaatbare scheurwijdte en de dikte van de constructie.

## Tot slot

Door het combineren van een eindige-elementenberekening en de vereenvoudigde rekenmethode kan relatief eenvoudig inzicht worden verkregen in de benodigde langswapening om de scheurwijdte zo te beperken dat een waterdichte constructie kan worden gemaakt. Het geeft inzicht aan de constructeur wat er gebeurt voordat de 28-daagse sterkte van een constructie-



7

onderdeel is bereikt. Met deze informatie kunnen in een vroeg stadium de verschillende opties om waterdichtheid te garanderen, met elkaar worden vergeleken op onder andere techniek en kosten. ☒

### LITERATUUR

- 1 Standaard RAW Bepalingen 2000, CROW, 2000.
- 2 Baetens, B.E.J., Schlangen, E., Het traditionele bestek. *Cement* 2006/2.
- 3 Betonsterkte vs. Duurzaamheid – relatie tussen sterkte en duurzaamheid van beton, Stufib/Stutech-rapport 20, 2012.
- 4 Bouwmeester-van den Bos, W.J., Innovatieve koelkist bij bouw kade-muur. *Cement* 1997/3.
- 5 Kronemeijer, J., Beheersing van scheurvorming in vloestofdichte(re) constructie, Innovatief verhardingsconcept HyMoCo. *Civiele Techniek* 1/2, 2012.
- 6 Lohmeyer, G., Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Gegenmaßnahmen bei Durchfeuchtungen. *Beton* 2/84.
- 7 Schlangen, E., Baetens, B.E.J., Haverkort, R., Constructieve randvoorwaarden. *Cement* 2006/2.
- 8 Lokhorst, S.J., 2001: Deformational behaviour of concrete influenced by hydration related changes of the microstructure. Report 25.5-99-05, TU Delft.
- 9 Van Breugel, K., Concrete Structures under Imposed Thermal and Shrinkage Deformations, Theory and Practice, TU Delft, 2013.