

# SCHEURVORMING BEPERKEN : NOODZAKELIJKE VOORWAARDE VOOR DUURZAAM BETON

TECHNOLOGIE | NOVEMBER 2010

BBSfB

	Ef2	(F47)
--	-----	-------

- HYDRATATIE EN KRIMPMECHANISMEN
- WATERAFSCHEIDING ('BLEEDING')
- PLASTISCHE KRIMP
- AUTOGENE KRIMP
- HYDRAULISCHE KRIMP
- THERMISCHE KRIMP

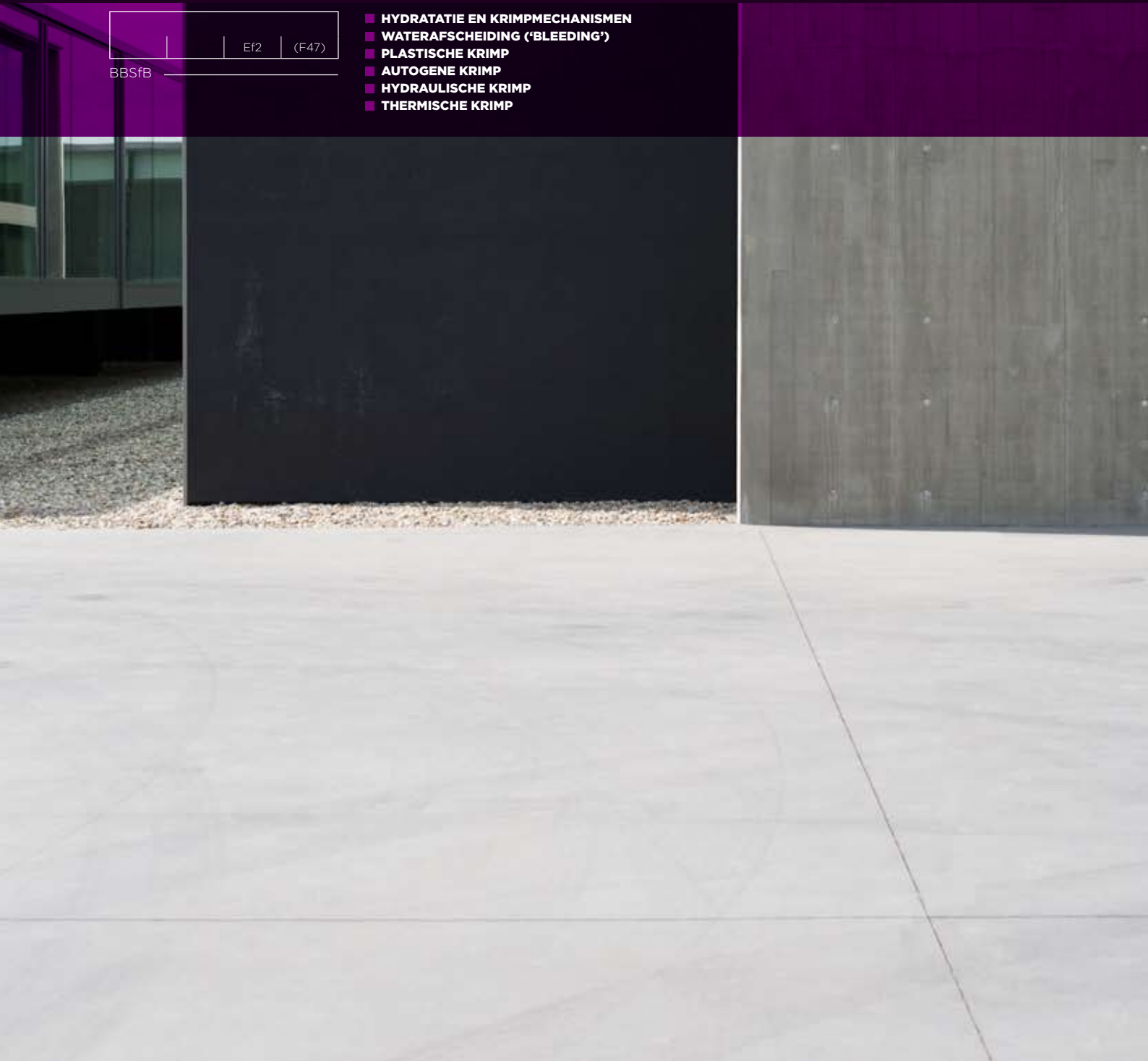




foto PHA

(coverfoto's.)  
arch. Govaert en  
Vanhoutte  
© A.Nullens

Met de huidige kennis inzake betonsamenstelling en -verwerking is het mogelijk om aan betonconstructies een uitzonderlijke duurzaamheid te verlenen. Een belangrijk element hierbij is het beheersen van de vervormingen van deze constructies. Elke verhinderde vervorming (of krimp) speelt inderdaad een cruciale rol, want zij grijpt in op de bewegingsmechanismen van agressieve stoffen die in het materiaal binnendringen en migreren. Verhinderde krimp is verantwoordelijk voor het ontstaan van microscheuren en zelfs van doorgaande scheuren. Dit leidt tot een verhoging van de porositeit en bijgevolg ook van de permeabiliteit.

Dit bulletin gaat over het beheersen van scheurvorming in beton, meer bepaald de scheuren veroorzaakt door verschillende soorten krimp. Scheuren te wijten aan andere externe krachten dan verhinderde krimp (bijvoorbeeld dimensioneringsfouten of accidentele belastingen) komen hier niet aan bod.

# 1. HYDRATATIEPROCES EN KRIMPMECHANISMEN

De exotherme reactie tussen water en cement bestaat uit de omzetting van watervrije calciumsilicaten en -aluminaten in gehydrateerde silicaten en aluminaten.

De hydratatie van de silicaten verloopt relatief traag en vervult een essentiële rol. Zij levert immers de mechanische sterkte op. Eerst doet ze hydratatieproducten ontstaan (gehydrateerde kalkhoudende silicaten) met de consistentie van een gel. Aanvankelijk zijn deze nog week, maar geleidelijk ontwikkelen ze een grotere cohesie en worden onoplosbaar. De nog niet volledig gehydrateerde gels zijn in dit stadium tweemaal zo « dik » als in watervrije toestand. In de beginfase vertragen de hydratatieproducten het reactieproces; de gevormde gels verhinderen dat water tot bij de nog watervrije kristallen geraakt. Na enige tijd versnelt het proces, het specifiek oppervlak wordt gevoelig groter, en de hydratatiefronten transformeren tot een continue structuur. Deze evoluerende microstructuur vormt de basis voor de sterkteopbouw. Zij is tevens van doorslaggevend belang voor de bescherming van het beton tegen agressieve stoffen.

De hydratatie omvat complexe scheikundige reacties. Hierbij speelt de water-cementfactor een belangrijke rol. Een deel van het aanmaakwater ( $\pm 40\%$  van de cementmassa) wordt chemisch en fysisch gebonden. Tijdens de reacties ontstaan capillaire holtes: het volume van het percolerende vaste agglomeraat is immers kleiner dan de som van de afzonderlijke volumes van het water en het cement. Maar vermits meer water nodig is om de gewenste verwerkbaarheid van het beton te garanderen, vullen deze capillaire holtes zich met « interstitieel » water. Nadien zal dit water eventueel verdampen, met krimp tot gevolg. Hoe meer water aanwezig is, hoe verder de cementkorrels zich van elkaar bevinden. De microstructuur ontwikkelt zich minder snel, het beton blijft poreuzer.

De hydratatiereacties zijn bovendien exotherm en doen een grote hoeveelheid warmte vrijkomen. In massieve constructies stapelt deze warmte zich op, wat kan leiden tot thermische krimp van het jonge beton. De snelheid waarmee de warmte zich ontwikkelt, is een bepalende factor.

Tijdens het hydratatieproces vermindert de vervormbaarheid sterk, de breukrek (de vervorming waarbij breuk optreedt) daalt tot een minimumwaarde (fig. 1). In dit stadium is de sterkte nog zeer gering (kritieke fase); uitdroging en thermische effecten kunnen dan zelfs leiden tot scheurvorming.

Water is fundamenteel voor de hydratatie van cement. Daarnaast is het echter samen met de hydratatiereacties ook verantwoordelijk voor voorschillende types vervorming of krimp (fig. 2):

- zetting van het verse beton (zwaartekracht, ontmenging/sedimentatie, waterafscheiding of 'bleeding');
- hydratatiereactie en inwendige droging (autogene krimp, waaronder chemische krimp);
- verdamping van het aanmaakwater tijdens de binding (plastische krimp);
- vochtafgifte na verharding (hydraulische krimp of drogingskrimp);
- thermische krimp veroorzaakt door een temperatuurdaling volgend op de opwarming tijdens de hydratatie van het cement (exotherme reactie), ofwel door schommelingen van omgevingstemperatuur.

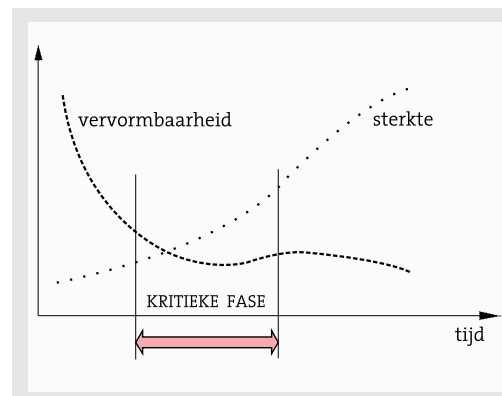
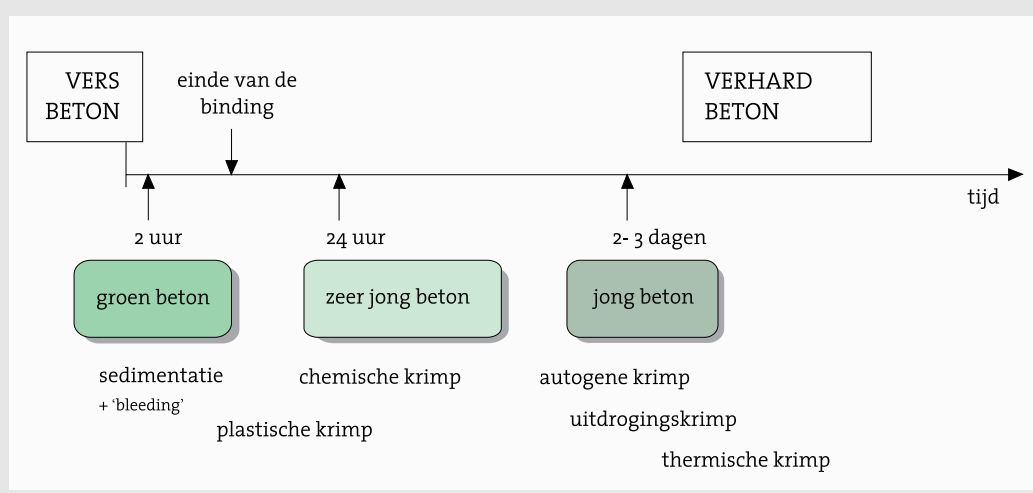


Fig. 1 – Evolutie van vervormbaarheid en sterkte tijdens de hydratatie

Fig. 2 – Schematische voorstelling van de fenomenen teweeggebracht door veranderingen in het vochttransport



TABEL 1 – SCHEURRISICO IN FUNCTIE VAN HET TYPE KRIMP

Type krimp	Scheurrisico		Nut / doeltreffendheid van diverse maatregelen		
	Tijdstip van verschijnen	Type scheuren	Betonsamenstelling	Nabehandeling	Wapening
Plastische krimp	voor of tijdens de binding	oppervlakkig	gering	zeer groot	geen
Krimp door (inwendige) droging, dw.z. opname van het aanmaakwater van het beton tijdens de verharding (autogene krimp), of verdamping uit het verharde beton (hydraulische krimp)					
• op korte termijn	enkele dagen tot enkele weken na het betonneren	oppervlakkig of over de volledige dikte	zeer groot	zeer groot	matig
• op lange termijn	enkele maanden tot enkele jaren na het storten	over de volledige dikte	zeer groot	groot	zeer groot
Thermische krimp	15 uur tot 10 dagen na het storten	oppervlakkig of over de volledige dikte	groot	zeer groot	matig

Volledigheidshalve moet ook nog de carbonatatiekrimp worden vermeld. Die is het gevolg van de volumevermindering waarmee de omzetting van portlandiet in calciumcarbonaat (carbonatatiereactie) gepaard gaat. Deze krimp is evenwel verwaarloosbaar.

Voor de ingenieur is krimp een uitgestelde vervorming die optreedt in afwezigheid van een belasting. De krimp neemt toe in de tijd, tot hij na verloop van enkele jaren een limiet bereikt. Die hangt vooral af van de

betonsamenstelling, het cement- en watergehalte, de dikte van de betonelementen en de relatieve vochtigheid van de omgeving. In ons klimaat bedraagt de krimp globaal 0,4 tot 0,8 mm/m (0,4 – 0,8 ‰). Krimp is een van de redenen waarom voegen worden voorzien in structuren.

Vooraf scheuren die ontstaan omdat krimpeffecten verhinderd worden, houden ernstige consequenties in voor de kwaliteit en duurzaamheid van beton. Tabel 1 vat de scheurrisico's samen in functie van het type krimp.

## 2. WATERAFSCHEIDING ('BLEEDING')

Pas gestort beton heeft de neiging om aanmaakwater af te scheiden. Onder invloed van de zwaartekracht en van het verdichten zakken de zwaardere bestanddelen van het beton in de waterige cementpasta (sedimentatie). Het water wordt hierdoor omhoog gestuwd, op het betonoppervlak vormt zich een waterfilm. Dit verschijnsel van waterafscheiding wordt ook *bleeding* genoemd. De omvang ervan hangt hoofdzakelijk af van de betonsamenstelling, de consistentie en het watergehalte van het verse beton, alsook van de hoogte van de betonkolom. Het fenomeen komt niet zelden voor bij gewoon beton en manifesteert zich vóór de binding. Zolang het beperkt blijft, heeft het een gunstige invloed op het beton, want het voorkomt dat plastische krimp optreedt. De waterfilm op het oppervlak van het verse beton biedt immers bescherming tegen uitdroging. Niettemin leidt dit aangevoerde bleedingwater tot de vorming van een betonhuid met een hoge water-cementfactor. Het betonoppervlak is hierdoor van minder goede kwaliteit en in het geval van een bodemverharding zal het beton minder bestand zijn tegen afslijting, vorst, dooizouten...

Waterafscheiding kan zetting veroorzaken van het betonskelet en scheuren doen ontstaan die enkele tienden van een millimeter breed zijn (zie fig. 3: type A, B of C). Zolang het beton evenwel een voldoende vervormbaarheid behoudt, is geen typische scheurvorming te vrezén.

### INVLOEDSFACTOREN EN VOORZORGSMAATREGELEN

- Zettingscheuren boven wapeningsstaven (type A- fig. 3) komen het meest voor, vooral in het geval van grote betonsecties. Voldoende betondekking boven de wapening volstaat om veel problemen te vermijden. Soms kan horizontale delaminatie optreden (horizontale scheur ter hoogte van de wapening), wat leidt tot verminderde hechting. In ieder geval moet erop gelet worden de wapening niet te trillen.
- Zettingscheuren kunnen worden geëlimineerd door het beton opnieuw te trillen (tot onder het wapeningsnet). Dit herverdichten mag echter niet te vroeg gebeuren. Het beste tijdstip is wanneer de trilnaald nog net geen sporen laat. Dit is nog tot 2 à 3 uur na het storten mogelijk.
- Een lage omgevingstemperatuur of het gebruik van een vertrager verlengt de bindingstijd en bijgevolg ook de tijdsduur tijdens dewelke zetting en bleeding mogelijk blijven. Ook moet bij koud weer het gebruik van cementtypes van sterkteklasse 32,5 vermeden worden, vermits deze een langere bindingstijd hebben. Deze cementtypes zijn minder fijn dan cement van een hogere sterkteklasse. Zij leiden bijgevolg tot een minder stabiel betonmengsel

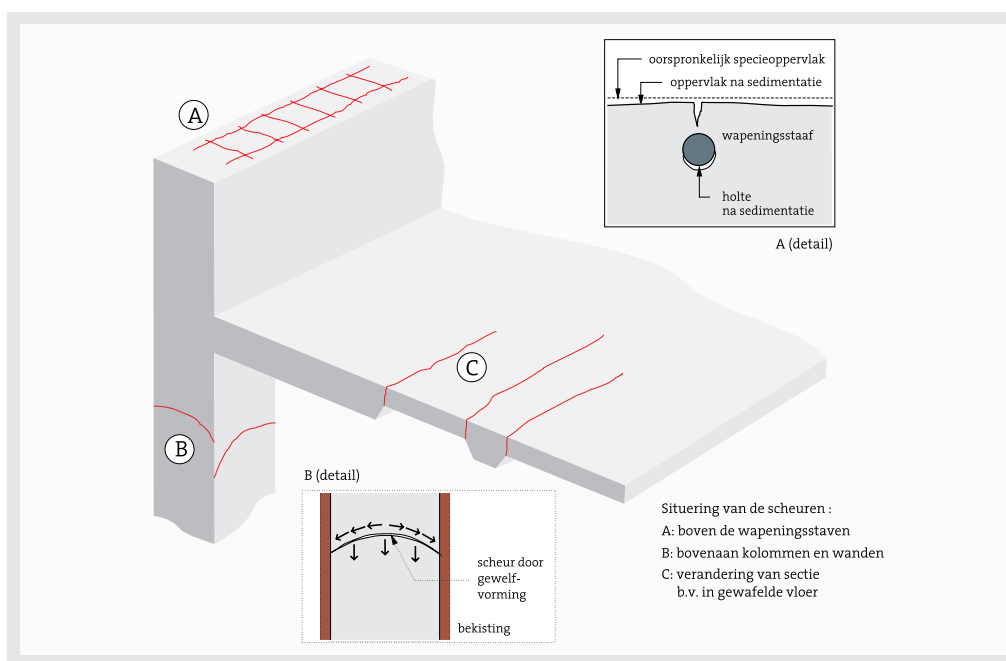


Fig. 3 – Zettingscheuren

- Een correcte samenstelling van het beton is onontbeerlijk, hetgeen betekent :
  - een voldoende gehalte aan cement en eventuele toevoegsels;
  - geen overmatig hoog watergehalte;
  - een continue korrelverdeling; vooral de fractie 2/8 verdient bijzondere aandacht;
  - geen overdreven gebruik van superplasticizers, en zeker niet ten koste van het cementgehalte.
- Uitsluitend zand met platte en hoekige korrels en platte granulaten gebruiken is eveneens ongunstig. Het vergroot immers de weerstand tegen het verdichten, waardoor meer holtes ontstaan, met een minder compact beton tot gevolg. Bovendien vergen dergelijke toeslagmaterialen een hogere waterdosering. Ook monogranulair zand maakt het beton gevoeliger voor waterafscheiding.



Het loskomen van de slijtlaag van een bedrijfsvloer kan zijn oorzaak hebben in sterke en langdurige bleeding. Inderdaad, omdat de slijtlaag (1 deel cement en 2 delen zand), sneller verhardt dan het onderliggende beton (meestal 1 deel cement voor ongeveer 6 delen inerte materialen), kan bleedingwater opgesloten raken tussen de twee lagen, met een gebrekkige hechting tot gevolg.

In het geval van bedrijfsvloeren zal de waterafscheiding des te groter zijn, naarmate het beton meer water bevat, het verdichten niet correct gebeurt (bij langzame bleeding) en de bindingstijd langer is.



Bleeding aan het betonoppervlak is een bekend verschijnsel. Maar daarnaast bestaan nog andere fenomenen, zoals opwaartse watermigratie tussen het beton en de bekisting.

De foto toont hoe het water kleine stroompjes heeft gevormd waarlangs fijne deeltjes naar het oppervlak zijn meegevoerd. Oorzaken: grote overmaat aan water, discontinue korrelverdeling en lokaal te lang trillen.

### 3. PLASTISCHE KRIMP

Krimp tijdens de plastische fase van het beton is het gevolg van het snel uitdrogen – vooral aan het oppervlak – van het nog niet verharde beton onder de invloed van wind, zon, of een zuigende onderliggende laag. Het temperatuurverschil tussen lucht en beton speelt eveneens een belangrijke rol, zodat plastische krimp niet alleen bij grote hitte maar ook in de winter te vreezen is. Een dergelijke uitdroging brengt een aanzienlijke volumevermindering teweeg (0,2 à 5 mm/m (vrije krimp – zie fig. 4), die tot 10 keer groter kan zijn dan de krimp tijdens de verhardingsfase (hydraulische krimp).

Vooraf beton dat in buitenomgeving verhardt, moet tegen plastische krimp beschermd worden (scheuren D en E – fig. 5).

Maar opgelet, ook binnenvloeren kunnen worden blootgesteld aan wind (tocht)! Scheuren veroorzaakt door plastische krimp zijn het zichtbare resultaat van het vroegtijdig uitdrogen van beton. Voor de kwaliteit van het beton zijn de onzichtbare effecten evenwel erger. Een falende bescherming tegen uitdroging leidt tot :

- een oppervlak van minder goede kwaliteit dat slecht bestand is tegen afslijting (verpulvering, stofafgifte);
- een betonhuid met een grotere porositeit en bijgevolg daling van de prestaties van het beton (o.a. lagere bestandheid tegen vorst in combinatie met dooizouten).

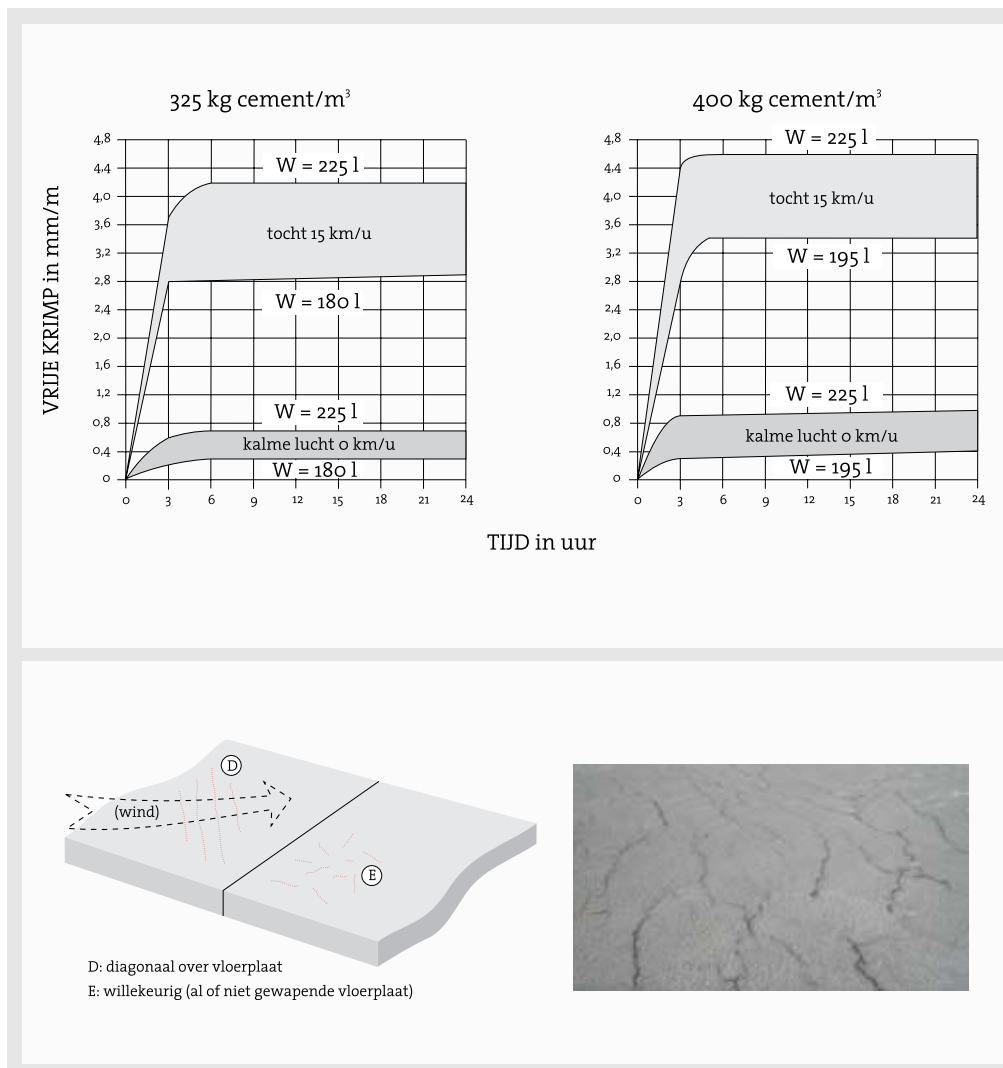


Fig. 4 – Vrije plastische krimp veroorzaakt door luchtstromingen, bij verschillende luchtsnelheden. De metingen werden uitgevoerd op kleine monsters. In de praktijk wordt geen rekening gehouden met de absolute waarden maar wel met de verhoudingen tussen de waarden die op deze diagrammen vermeld zijn. Men kan zich immers niet voorstellen dat een vloerplaat die blootgesteld wordt aan een windsnelheid van 15 km/u in die mate zal scheuren dat de som van de scheuropeningen, verdeeld over een lengte van 1 m, gelijk zou zijn aan 4 mm ! Door wrijving met zijn bekisting en door plastische kruip zal het verse beton zich min of meer aan zijn nieuwe volume aanpassen, maar het risico op scheurvorming en/of de opening van de scheuren zal wel toenemen volgens de verhoudingen die door de diagrammen aangegeven worden

Fig. 5 a, b – Scheuren door plastische krimp



Fig. 7 a, b – Betonwand na ontkisting beschermd met behulp van een zeil

## INVLOEDSFACTOREN EN VOORZORGSMAATREGELEN

In principe wordt het water in het beton vastgehouden door verdamping te beletten (« het beton tegen uitdroging beschermen »). Om de vochtigheid te handhaven moeten de blootgestelde oppervlakken beschermd worden door middel van een curing compound, een ondoordlatend membraan of een ander procédé. Voor zover de uitvoering het mogelijk maakt, moet de tijd die verstrijkt tussen het storten van het beton en het aanbrengen van de bescherming, zo kort mogelijk zijn. Het grootste waterverlies vindt immers plaats tijdens de eerste uren volgend op het verdichten van het beton (fig. 6). Meestal wordt het beton afgedekt met een plastic folie, of anders wordt een curing compound verstoven. Dit laatste gebeurt op het ogenblik dat het bleedingwater verdwenen is.

Nabehandlungsproducten kunnen immers geen continue film vormen op een wateroppervlak.

Bevindt het beton zich in een bekisting, dan helpt deze eveneens bij het vochtig houden van het beton. Het niet bekiste oppervlak moet nochtans steeds beschermd worden. Na ontlasting moet het beton nog enkele dagen afgedekt worden met een vochtig gehouden zeil, of eventueel met een plastic folie.

De duur van de bescherming hangt af van een groot aantal factoren (weersomstandigheden, cementtype, betonsamenstelling – secundaire bestanddelen zoals slak of vliegas, een overmaat aan aanmaakwater, of het gebruik van hulpstoffen met een vertragende component maken de bindingstijd langer en vergroten zo de kans op plastische krimp...)

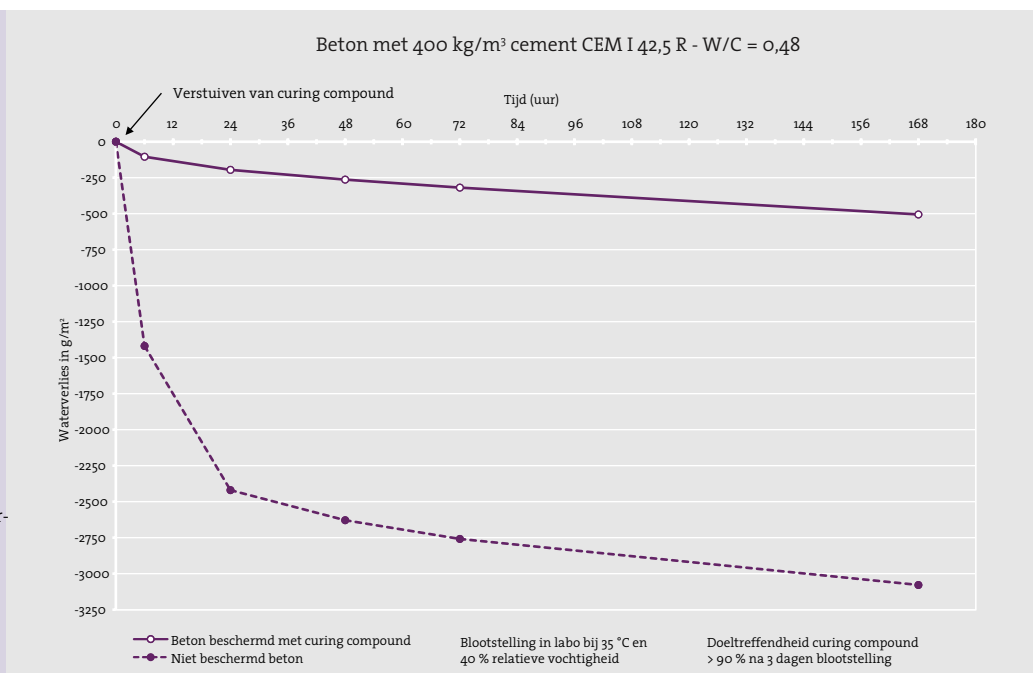


Fig. 6 – Evolutie van het waterverlies uit betonmonsters (één blootgesteld oppervlak), met en zonder bescherming door een curing compound



In tabel 2 staan de aanbevolen duurtijden uitgedrukt in dagen. Er mag niet worden vergeten dat de bescherming niet alleen nuttig is om scheurvorming te voorkomen tijdens de eerste uren, maar ook in een later stadium, want het is dan dat zich het grootste deel van de krimp na de binding ontwikkelt. Hoewel minder groot in omvang is deze krimp zeer gevaarlijk omwille van de effecten die hij heeft op een materiaal dat reeds opgestijfd is, maar nog niet veel sterkte bezit. De tabel definieert de minimale nabehandelingstijden in functie van de omgevingsvoorwaarden en van de sterkteontwikkeling van het beton, uitgedrukt door de verhouding  $f_{cm2} / f_{cm28}$ .

Zijn geen gegevens beschikbaar over het beton, dan biedt de verhouding van de druksterktes op 2 en 28 dagen verkregen tijdens de controle van het cement een goed alternatief (mortel vervaardigd en getest volgens de norm NBN EN 196-1). Deze gegevens staan vermeld op de technische fiche van het cement. Noteer dat de norm prNBN EN 13670 ANB : 2010 de sterkteontwikkeling van het beton op een andere manier definieert, namelijk enkel op basis van het cementtype en de W/C-factor van het beton. Ons inziens is dit nochtans een nogal conventionele definitie om het gedrag van het beton weer te geven. Daarom raden wij de lezer aan om bij

**TABEL 2 – AANBEVELINGEN BETREFFENDE DE MINIMALE NABEHANDELINGSDUUR**

Omgevingsomstandigheden	Temperatuur aan het betonoppervlak	Sterkteontwikkeling van het beton (*)			
		Snel	Gemiddeld	Traag	Zeer traag
GOED Geen rechtstreekse blootstelling aan zon en wind Relatieve vochtigheid $\geq 80\%$	$\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$	1 dag	2 dagen	3 dagen	4 dagen
	$< 10\text{ }^\circ\text{C}$	2 dagen	4 dagen	5 dagen	6 dagen
NORMAAL Matige bezonning en/of relatieve vochtigheid $\geq 50\%$	$\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$	2 dagen	3 dagen	4 dagen	6 dagen
	$< 10\text{ }^\circ\text{C}$	4 dagen	6 dagen	8 dagen	12 dagen
SLECHT Sterke bezonning en/of veel wind en/of relatieve vochtigheid $< 50\%$	$\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$	3 dagen	4 dagen	7 dagen	10 dagen
	$< 10\text{ }^\circ\text{C}$	5 dagen	8 dagen	10 dagen	15 dagen
(*) Sterkteontwikkeling van het beton bij $20\text{ }^\circ\text{C} = (f_{cm2} / f_{cm28})$ [verhouding tussen de gemiddelde druksterkte na 2 dagen ( $f_{cm2}$ ) en 28 dagen ( $f_{cm28}$ )]					
Snel $\geq 0,5$	Gemiddeld $\geq 0,3 \text{ à } < 0,5$	Traag $\geq 0,15 \text{ à } < 0,3$	Zeer traag $< 0,15$		

voorkeur de aanbevelingen uit tabel 2 te volgen. Door de volgende voorzorgsmaatregelen kan het risico van scheurvorming door plastische krimp eveneens verminderd worden :

- bij warm weer, de temperatuur van het verse beton verlagen;
- de granulaten bevochtigen indien zij water kunnen opslorpen;
- vooraleer het beton te storten : bekistingen, bekistingbodemp of andere betonoppervlakken bevochtigen indien zij van nature wateropslopend zijn;
- door een geschikte isolatie vermijden dat het beton door de zon opwarmt; curing compounds met witte of gemetalliseerde kleurpigmenten verdienen aanbeveling omdat zij een reflecterende film vormen.

Ook het inmengen van synthetische vezels (bijvoorbeeld polypropyleen) kan de vorming van plastische krimpscheuren beperken. Indien toch scheuren ontstaan, dan zullen zij fijner zijn maar wel talrijker. Los van de aanwezigheid van polypropyleenvezels blijft het aanbrengen van een nabehandlungsproduct absoluut noodzakelijk. Polypropyleenvezels kunnen daarnaast ook de neiging tot sedimentatie van het beton verminderen.

## 4. AUTOGENE KRIMP

Autogene krimp vindt zijn oorsprong in inwendige uitdroging, d.w.z. het inwendig opnemen van het water tijdens de hydratatie van het cement. Elk betonelement dat niet in water ondergedompeld is, vertoont inderdaad de neiging in de loop van de tijd te krimpen, ook als het van de omgeving werd geïsoleerd om verdamping te beletten. Deze krimp kan worden verklaard aan de hand van de volgende hypothesen :

- het volume van de gevormde hydraten is kleiner dan de som van de initiële volumes van water en cement. Dit fenomeen wordt Le Chatelier-contractie genoemd en slaat op chemische krimp;
- vanaf het begin van de binding kan deze volumevermindering niet meer vrij plaatsvinden, vermits ze gehinderd wordt door het minerale skelet dat zich aan het vormen is. De hydratatie van het cement gaat evenwel door. Dit resulteert in een fysico-chemisch verschijnsel dat gekoppeld is aan capillaire effecten veroorzaakt door de opname van het poriënwater.

Gedurende de eerste uren van de hydratatie van het cement (vanaf het contact tussen cement en water tot aan het begin van de binding) worden de capillaire effecten als verwaarloosbaar beschouwd. Gedurende deze fase komt de autogene krimp grotendeels overeen met de chemische krimp.

Autogene krimp blijft beperkt in omvang, maar mag toch niet over het hoofd worden gezien indien hij bij andere krimpfenomenen wordt samengevoegd. Wanneer autogene krimp bovendien vanaf de aanvang

van de binding belet wordt, of zelfs maar gehinderd (doorlopende stijve ondersteuning, hernemingen tijdens het storten...), dan kan dit een belangrijke medeoorzaak zijn van vroegtijdige scheurvorming.

De ontwikkeling van autogene krimp volgt ongeveer gelijke tred met die van de mechanische sterkte : snel tijdens de eerste dagen, om vervolgens na 28 dagen 80 à 90 % van haar eindwaarde te bereiken. Autogene krimp mag over het algemeen beschouwd worden als gelijkmatig verdeeld over het betonelement, ten minste voor zover het een inwendige zone betreft die tijdens eenzelfde betonneerfase is gerealiseerd. Door de geringe permeabiliteit van beton zijn de vochtigheidsgradiënten binnen in de structuur immers klein.

### INVLOEDSFACTOREN EN VOORZORGSMAATREGELEN

Autogene krimp is des te belangrijker naarmate de W/C-factor van het beton lager is. Bij een lage water-cementfactor (< 0,40 of eventueel 0,45) en verhinderde vervorming, is het niet altijd mogelijk scheurvorming door inwendige droging te vermijden. Wel kan de scheuropening beperkt blijven :

- door rekening te houden met de bijkomende spanningen eigen aan het ontwerp (wapening, voorspanning);
- door het oppervlak in een waterverzadigde toestand te houden vanaf het einde van de verwerking van het beton.

De intensiteit van autogene krimp is omgekeerd evenredig met de W/C-factor.  
Bij gewone betonsoorten met een W/C-factor groter dan 0,5 is de autogene krimp gering.  
Bij hoge-sterktebeton daarentegen mag die niet verwaarloosd worden.

## 5. HYDRAULISCHE KRIMP (DROGINGSKRIMP)

Hydraulische krimp is het gevolg van het langzaam drogen van het beton en ontstaat uit een hygrometrisch onevenwicht tussen het beton en zijn omgeving. Is de relatieve vochtigheid van de lucht kleiner dan die van het beton, dan komt een droogproces op gang, met een volumevermindering tot gevolg. In het tegenovergestelde geval zwelt het beton.

Het droogproces en de ermee gepaard gaande krimp zijn des te relevanter naarmate de overmaat aan niet gebonden water groter is (hoge W/C-factor). Porositeit en doorlatendheid nemen immers toe, zodat het fenomeen nog versneld wordt. Wanneer bovendien het ongebonden water snel verdampt, treedt ook de krimp intenser en sneller op.

De eindwaarde voor de hydraulische krimp situeert zich tussen 0,3 en 0,8 mm/m. De grootte hangt hoofdzakelijk af van de hoeveelheid aanmaakwater in het beton. Elke verhoging van het watergehalte geeft aanleiding tot een twee maal grotere relatieve toename van de krimpwaarde. Vandaar dat het belangrijk is de waterdosering zo laag mogelijk te houden. Dit houdt in dat de korrelverdeling – en zeker die van de zandfractie – met zorg moet worden gekozen en regelmatig gecontroleerd.

### INVLOEDSFACTOREN EN VOORZORGSMAATREGELEN

Met volgende maatregelen kan scheurvorming ten gevolge van hydraulische krimp vermeden worden :

- een continue korrelverdeling kiezen met een zo groot mogelijke nominale korreldiameter (hierdoor blijft de porositeit minimaal en de waterbehoefte zo laag mogelijk);
- de W/C-factor op een optimaal peil houden door middel van een superplastificeerder (als algemene regel geldt :  $W/C \leq 0,50$ );
- de eerder opgesomde maatregelen toepassen inzake nabehandeling en duur ervan;
- krimpvoegen voorzien, zodat scheuren geconcentreerd blijven;
- een voldoende minimale hoeveelheid wapening en/of staalvezels voorzien, zodat de scheurvorming gespreid wordt (het verschijnen van een aantal microscheurtjes is minder erg dan wanneer enkele gapende scheuren ontstaan).



Bodemverhardingen in buitenomgeving die met een « helikopter » (vlindermachine) zijn gladgestreken kunnen pas tegen uitdroging beschermd worden eens de afwerking helemaal voltooid is, d.w.z. verschillende uren na de eigenlijke verwerking van het beton. Hierdoor ontstaat een zeer lange en risicovolle periode tijdens dewelke plastische krimpscheuren kunnen ontstaan. Het netwerk van plastische krimpscheuren heeft echter geen structurele gevolgen, vermits zij zich aan de oppervlakte bevinden. Niet de aanwezigheid van scheuren, maar de scheuropening is bepalend. Het risico van verlies aan vorstbestandheid (in aanwezigheid van dooizouten) door een falende bescherming tegen uitdroging is wel veel schadelijker.



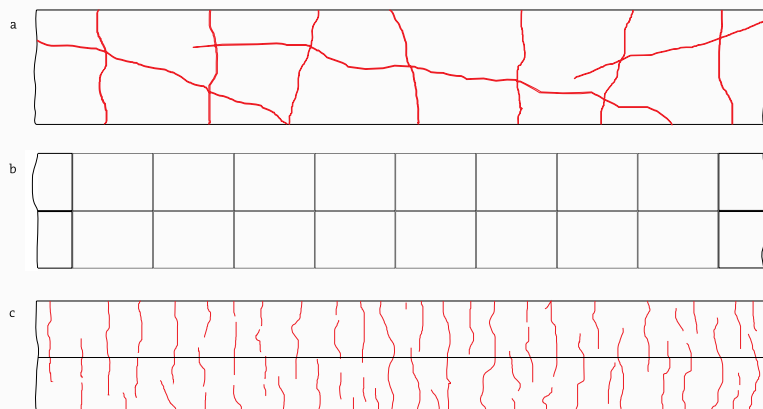
Verstuiven van een curing compound op het oppervlak van een pas aangelegde betonweg.



Doordat het beton uitdroogt, ontstaat tijdens het verhardingsproces hydraulische krimp. Bij deze krimp voegen zich thermische contracties. Wanneer zij afgeremd of verhinderd worden – in het geval van een betonverharding bijvoorbeeld, door wrijving op de bodem of de fundering – veroorzaken deze bewegingen trekspanningen in het beton, met eventueel ongecontroleerde scheurvorming tot gevolg. In tegenstelling tot plastische krimp-scheuren zijn dergelijke «wilde» scheuren breder en lopen doorheen de volledige plaatdikte.



Om scheuren te voorkomen moet het beton tegen uitdroging beschermd worden, en om scheurvorming op een gecontroleerde manier te laten verlopen moet een van de mogelijke oplossingen gekozen worden. Ofwel worden de scheuren geconcentreerd in krimpvoegen (verharding onderverdeeld in platen), ofwel worden ze gespreid over een reeks microscheuren (verharding in doorgaand gewapend beton). In dit laatste geval worden de scheuren over een ontelbaar aantal fijne barstjes verdeeld door middel van een langswapening die zodanig berekend is dat de structurele continuïteit van het beton verzekerd blijft : scheuropening van maximum 0,3mm en tussenafstand variërend van 0,80 tot 1,5 m.



- a- Ongecontroleerde scheurvorming
- b- Scheurvorming geconcentreerd ter hoogte van krimpvoegen
- c- Microscheurvorming gerealiseerd door middel van doorgaande wapening

## 6. THERMISCHE KRIMP

De hydratatie van het cement is een reactie waarbij warmte vrijkomt; hierdoor kan de temperatuur van het beton aanzienlijk oplopen. Dit kan ook gebeuren wanneer de omgevingstemperatuur stijgt (bijvoorbeeld door rechtstreekse bezonning na ontkisting). Tijdens de erop volgende afkoeling – en bijgevolg contractie of thermische krimp – kunnen zich scheuren vormen indien een obstakel het betonelement belet te krimpen. In dit geval is er sprake van scheurvorming door verhinderde krimp. Scheuren kunnen zich ook manifesteren als gevolg van een temperatuurgradiënt, namelijk wanneer de temperatuur van de zone gelegen dicht bij het uitwisselingsoppervlak (de « betonhuid ») veel sneller zakt dan die van het hart van de structuur. Dan treedt aan het oppervlak meer krimp op dan binnenin het beton. De betonhuid wordt met andere woorden aan grote trekspanningen onderworpen, terwijl de kern drukspanningen ondergaat. Dit proces doet zich evenwel alleen voor in massieve constructies (meer dan 50 cm dik) en veroorzaakt geen doorgaande scheuren.

De thermische krimp  $\epsilon$  kan berekend worden met de volgende formule:  $\epsilon = \alpha \Delta T$ . Hierbij is  $\alpha$  de thermische uitzettingscoëfficiënt van beton en  $\Delta T$  het temperatuurverschil.

Voor verhard beton varieert de coëfficiënt  $\alpha$  van  $7$  tot  $14 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ( $7$  à  $14 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ ). Hij is sterk afhankelijk van de dosering en de aard van de granulaten in het beton, zoals blijkt uit fig. 8. Bij een zelfde  $\Delta T$ , zal grindbeton 33 % meer thermische krimp vertonen dan beton van gebroken kalksteen. Bovendien (zie fig. 9) is de treksterkte van beton met gerolde kiezel duidelijk lager dan die van beton met gebroken granulaten. Het ruw oppervlak van deze laatsten beïnvloedt immers gunstig de hechting met de omhullende mortel.

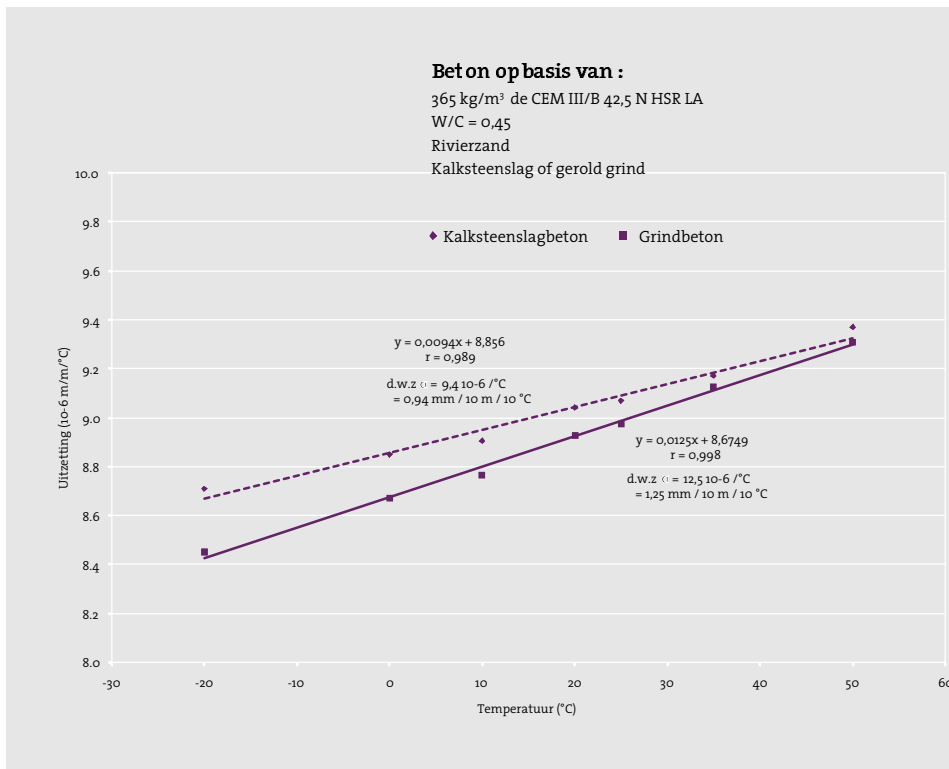
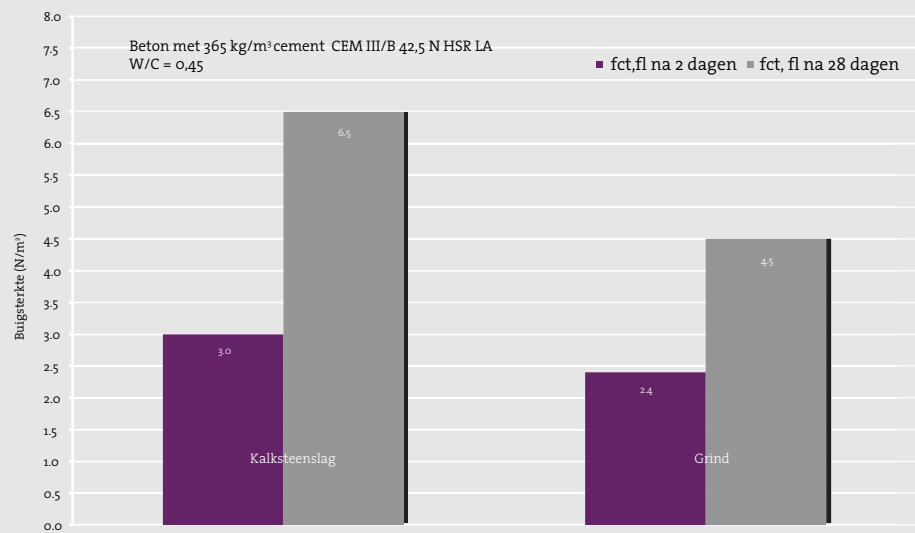


Fig. 8 – Thermische uitzettingscoëfficiënt  $\alpha$  in functie van het type toeslagmateriaal

Fig. 9 – Buigtreksterkte van het beton in functie van het type toeslagmateriaal



## SCHEURVORMING DOOR VERHINDERDE KRIMP

Elk betonelement dat vrij kan werken zal, wanneer het gelijkmatig opwarmt en afkoelt, uitzetten en samentrekken zonder enige spanningsophoping. Hetzelfde geldt overigens voor de andere types krimp. In de praktijk gebeurt het echter zeer vaak dat een massief betonelement gestort wordt op en/of tussen reeds bestaande, min of meer gestabiliseerde constructies.

Het fenomeen is in alle gevallen gelijkaardig en vindt zijn oorsprong in het feit dat de hydratatie van cement een chemisch proces is waarbij veel warmte vrijkomt. De temperatuur van het beton zal hierdoor oplopen tot wanneer de warmteverliezen aan het oppervlak groter zijn dan de hoeveelheid warmte die door de hydratatie geproduceerd wordt. Dit temperatuurverloop wordt schematisch weergegeven in fig. 10, voor een betonelement van gemiddelde dikte. De figuur geeft tevens de spanningen aan die optreden wanneer de vervorming van het jonge beton wordt belemmerd.

Beton zet uit wanneer het opwarmt. Indien deze thermische uitzetting verhinderd wordt, dan wordt zij aanvankelijk integraal omgezet in plastische vervorming, zonder spanningen. Pas vanaf een temperatuur  $T_{01}$  ontstaan

drukspanningen, namelijk wanneer het beton een meetbare weerstand ontwikkelt tegen de thermische uitzetting. Deze drukspanning is niet groot, aangezien de elasticiteitsmodulus nog laag is en het relaxatievermogen (vermindering van de spanningen door kruip) nog hoog.

Wanneer het beton afkoelt, worden de drukspanningen weer kleiner. Bij  $T_{02}$ , d.i. de temperatuur waarbij de spanningen gelijk zijn aan nul, nemen trekkrachten hun plaats in. Vanaf dat ogenblik ontstaan door de verhinderde contractie van het rijpere beton almaar grotere trekspanningen: de elasticiteitsmodulus is immers reeds groot, de kruip daarentegen beperkt.

Doorgaande scheuren kunnen zich manifesteren wanneer de afkoeling doorgaat tot op een temperatuur waarbij de trekspanningen groter zijn dan de treksterkte van het beton. Ter herinnering, de limietwaarde voor de vervorming onder trek bedraagt ongeveer  $150 \cdot 10^{-6}$  m/m (d.w.z. beton scheurt bij vervormingen in de buurt van  $150 \cdot 10^{-6}$  m/m). Vertrekkend van een thermische uitzettingscoëfficiënt  $\alpha$  van  $10 \cdot 10^{-6}$  m/m/°C, kan de temperatuurdaling  $\Delta T$  berekend worden waarbij scheurvorming plaatsvindt:

$$\Delta T = \frac{150 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-6}} = 15 \text{ °C}$$

Dergelijke scheurvorming is aanzienlijk; inderdaad, voor de hoger vermelde waarde van  $\alpha$  bedraagt de samentrekking door afkoeling ongeveer 0,1 mm/m per 10 °C. De combinatie met de autogene krimp en later de hydraulische krimp doet de scheuropening verder toenemen.

Scheurverdeling en -richting zijn ook zeer karakteristiek. Bijvoorbeeld, in een verticale betonwand lopen de scheuren in de meeste gevallen vertikaal en doorheen de volledige wanddikte; ze beginnen een paar centimeter boven de grond en eindigen op een zekere afstand van de bovenrand van het element.

#### OPMERKING :

- In werkelijkheid is het fenomeen veel complexer, want bovenop de samentrekking komen ook nog buigeffecten, en gelijktijdig hiermee is er nog de invloed van de temperatuurgadiënt.
- Afgezien van de uitzettingscoëfficiënt  $\alpha$ , die als een constante kan worden beschouwd, evolueren elasticiteitsmodulus, breukrek, kruip en hechting tussen staal en beton tijdens de verharding continu en bovendien ongelijkmatig. Bij een erg jong beton ontwikkelt de stijfheid zich inderdaad sneller dan de sterkte. Dit verhoogt het scheurrisico, vermits de spanningsopbouw functie is van de elasticiteitsmodulus (stijfheid), terwijl het vermogen om aan spanningen te weerstaan bepaald wordt door de sterkte. Bij verschillende in het labo vervaardigde betons met 365 kg/m<sup>3</sup> cement en een W/C-factor van 0,45 of 0,50, varieert de secans-elasticiteitsmodulus na 2 dagen tussen 70 en 81 % van zijn waarde op 28 dagen, terwijl de trekweerstand na 2 dagen schommelt tussen 27 en 47 % van deze op 28 dagen. Een idee van het verloop van de elasticiteitsmodulus wordt gegeven in fig. 11, volgens [4]. De laboratoriumresultaten stemmen overeen met deze grafiek.

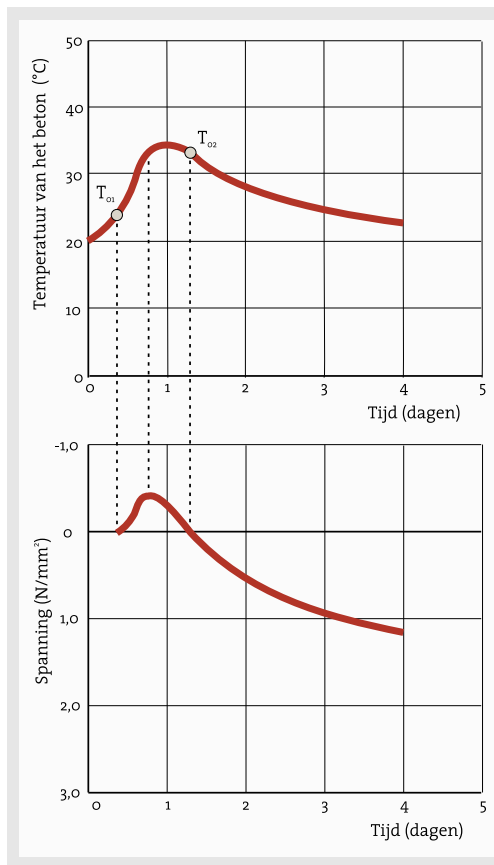


Fig. 10 – Temperatuurverloop tijdens de hydratatie in constructie-elementen met een gemiddelde dikte. Spanningsopbouw in het geval van verhinderde vervorming

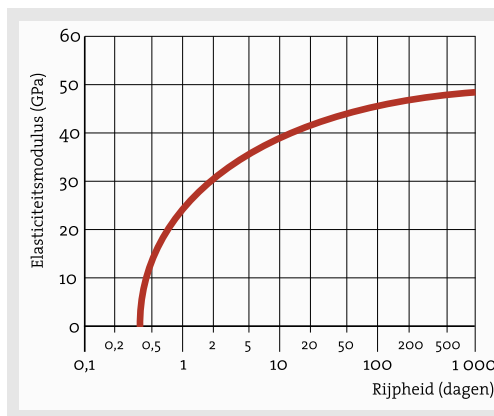


Fig. 11 – Evolutie van de elasticiteitsmodulus in functie van de tijd

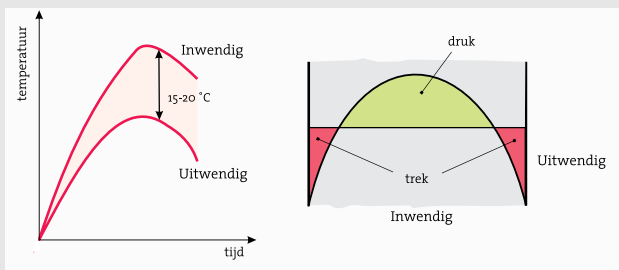


Fig. 12 – Spanningsdiagram bij een temperatuurverschil van 15-20 °C tussen oppervlak en kern



Fig. 13 – Scheurvorming door verhinderde krimp in een betonwand. De eerder aangelegde funderingsplaat belet dat het beton vervormt door thermische samentrekking

## SCHEURVORMING DOOR TEMPERATUURGRADIËNT

Alle auteurs zijn het erover eens dat een temperatuurverschil van 15 à 20 °C tussen het oppervlak en de betonkern volstaat om scheuren te veroorzaken. Dit kan het geval zijn wanneer het oppervlak sneller afkoelt dan de kern (meestal na ontkisting). Het spanningsverloop is parabolisch, zoals voorgesteld in fig. 12 en scheuren ontstaan aan het oppervlak.

## ANALYSE VAN ENKELE GEVALLEN

In fig. 14 en 15 wordt het temperatuurverloop weergegeven in de betonwand van een waterzuiveringsstation vanaf de verwerking van het beton. De temperaturen werden geregistreerd met behulp van thermokoppels die zich ongeveer op halve hoogte bevonden.

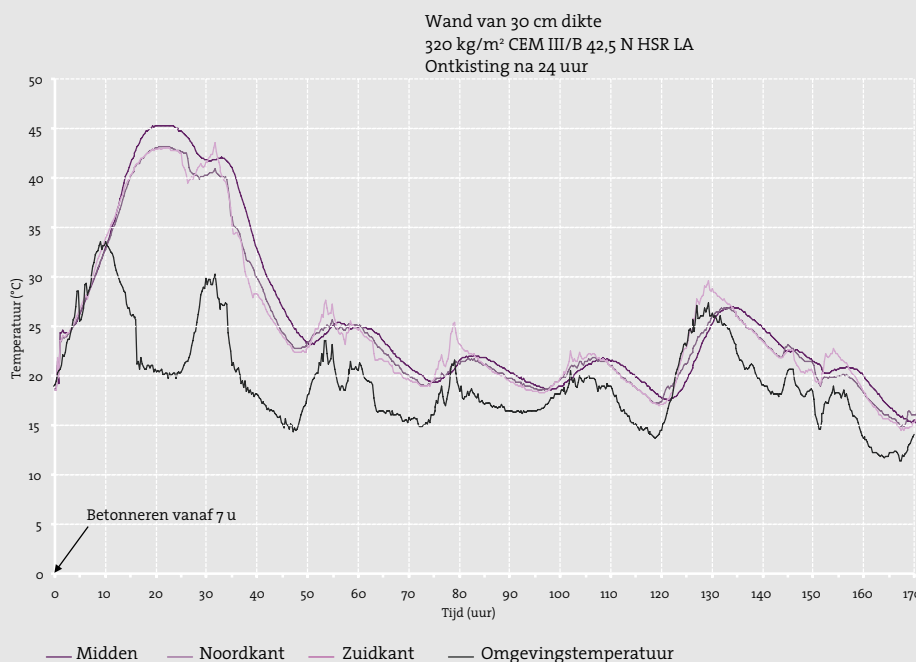


Fig. 14 – Geval 1 : cement CEM III/B 42,5 N HSR LA, snelle ontasting



Aan de hand van fig. 14 kunnen volgende vaststellingen worden gedaan :

- de temperatuur van het beton stijgt van 20 naar 45 °C. Deze verhoging vindt haar oorzaak in de warmte die geproduceerd wordt door de hydratatie van het cement, maar ook in de stijging van de omgevingstemperatuur (van 20 naar 33 °C);
- de temperatuurverschillen tussen het midden van de wand en de noord- en zuidkant van de wand zijn klein en blijven dat ook na ontkisting (rechtstreekse bezonning van de zuidkant). Het scheurrisico door thermische gradiënt is bijgevolg onbeduidend;
- ontkisting van het beton na 24 uur heeft een snelle temperatuurdaling tot gevolg (meer dan 20 °C). Zij wordt evenwel lichtjes gecompenseerd door de stijging van de omgevingstemperatuur (dag 2). Het risico van scheurvorming door verhinderde krimp is nu reëel et hangt van :
  - de mate waarin de wand star verbonden is met de rest van de constructie, de afmetingen van de wand en zijn eventuele kromming (een gebogen element heeft een grotere neiging tot scheurvorming dan een recht element);
  - de treksterkte van het beton (deze is laag gezien het cementgehalte en de jonge leeftijd van het beton);
  - de elasticiteitsmodulus van het beton (eveneens klein gezien het cementgehalte en de jonge leeftijd van het beton);
  - de eventuele relaxatie door kruip (het relaxatievermogen is evenwel beperkt gezien de snelheid waarmee de afkoeling plaatsvindt);
  - eventuele andere bijkomende vervormingen (verkorting door autogene en drogingskrimp);
  - het percentage horizontale wapening evenals de verdeling ervan (het betreft hier twee lagen van 21 staven – 3 m hoog – met een diameter van 12 mm, hetzij een horizontaal wapeningspercentage van 0,53 %).

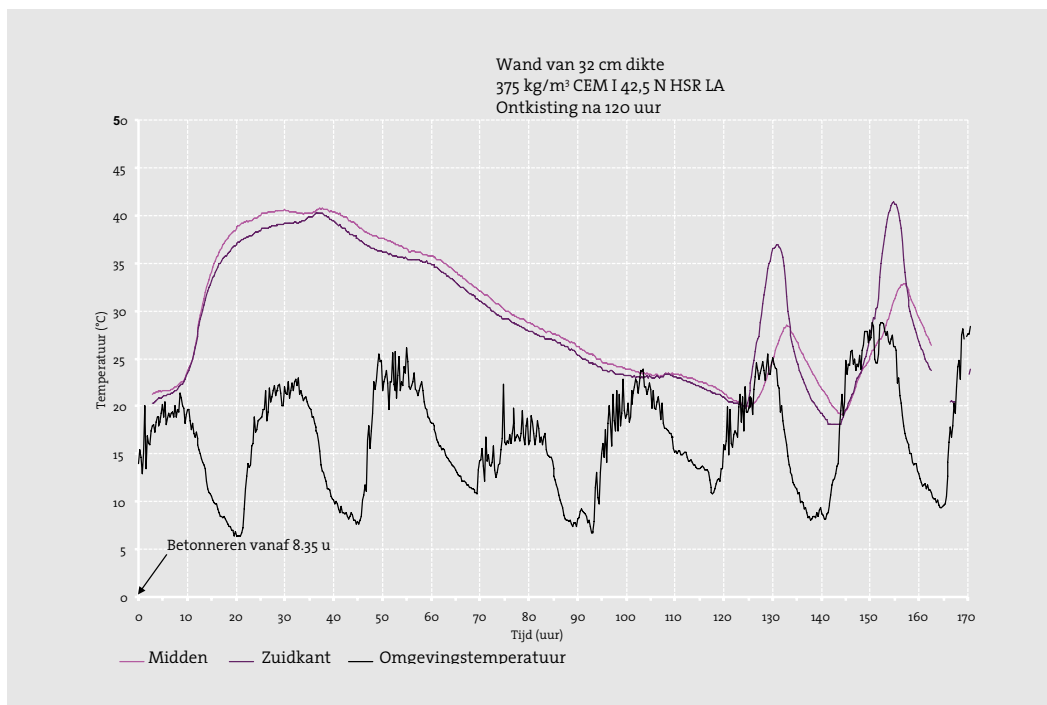


Fig. 15 – Geval 2 : cement CEM I 42,5 HSR LA, ontkisting na 5 dagen

Uit fig. 15 kunnen de volgende besluiten worden getrokken :

- de temperatuurstijging van het beton blijft beperkt tot ongeveer 20 °C, ondanks de hoge cementgehalten;
- voor de ontkisting is het temperatuurverschil tussen het midden van de wand en de zuidkant klein. Het gevaar voor scheurvorming door temperatuurgradiënt is bijgevolg nihil;
- door het beton pas te ontkisten na 120 uur koelde het beton traag en volledig af (tot het niveau van de omgevingstemperatuur). Dit is gunstig met het oog op het voorkomen van thermische scheuren door verhinderde krimp, des te meer omdat de temperatuurstijging beperkt bleef tot 20 °C;
- na de ontkisting doet de rechtstreekse bezonning de temperatuur aan de zuidkant van de wand stijgen met 17 °C, terwijl de stijging in het midden slechts 8 °C bedraagt. Hierdoor is de afkoeling aan het eind van de dag aanzienlijk. Idem de dag nadien. Rekening houdend met de (beperkte) temperatuurstijgingen na ontkisten, bestaat er een klein scheurrisico door temperatuurgradiënt en verhinderde krimp. Niettemin heeft het laattijdig ontkisten gezorgd voor een zekere trekweerstand. Bovendien is voor de constructie van dit bassin een zeer hoog percentage horizontale wapening voorzien (1,14 %).

## INVLOEDSFACTOREN EN VOORZORGSMAATREGELEN

Door de volgende maatregelen met betrekking tot betonsamenstelling, uitvoeringstechnieken en ontwerp kan scheurvorming door thermische krimp vermeden of eventueel beperkt worden :

- keuze van cementtype en -gehalte : voor massieve constructies (vanaf 50 cm dikte) geniet een cementtype met een lage hydratiewarmte – namelijk LH-cement (Low Heat) beantwoordend aan de norm NBN EN 197-1/A1 : 2005 – uiteraard de voorkeur. Bij eenzelfde cementgehalte zal LH-cement de piektemperatuur doen dalen met 10 à 15°C in vergelijking met gewone cementsoorten. Uiteraard zal deze trage warmteontwikkeling de opbouw van de mechanische

sterkte afremmen. Wordt een gewone cementsoort gebruikt, dan kan temperatuurstijging beperkt worden door een lager cementgehalte toe te passen (voor zover dit compatibel is met de eisen op het vlak van duurzaamheid en sterkte);

- aard van de granulaten : zoals reeds eerder vermeld, speelt de mineralogische oorsprong van de granulaten, de belangrijkste component van het betonmengsel, een grote rol. De thermische uitzettingscoëfficiënt  $\alpha$  van de granulaten (variërend van  $7 \cdot 10^{-6}$  tot  $14 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) heeft immers een grote invloed op die van het beton. Kalksteen-slag verdient de voorkeur, vermits het een kleinere thermische uitzettingscoëfficiënt heeft en bovendien een grotere betontrekweerstand oplevert dan gerold grind;
- water-cementfactor van het beton en hulpstoffen : de sterkteontwikkeling verbetert bij een lage W/C-factor zodat het gebruik van superplastificeerders steeds nuttig is; bindingsvertragers zorgen bij warm weer voor een langer behoud van de rheologische kenmerken van het verse beton en vergemakkelijken het storten zonder extra watertoevoeging. Toch wordt het eventuele probleem van de hydratatie-warmte hierdoor enkel maar uitgesteld;
- temperatuur van het beton : tijdens het storten moet rekening worden gehouden met de betontemperatuur, d.w.z. bij warm weer moet de temperatuur van de betonspecie beperkt blijven tot maximum 25 °C;
- wapening : zowel de hoeveelheid als de verdeling zijn van groot belang (kleine diameters, korte tussenafstanden, langsstaven aan de buitenkant, geringe betondekking maar wel voldoende om de richtlijnen te respecteren ter bescherming tegen corrosie). Wapening verhindert niet dat het beton scheurt, maar ze controleert wel de scheurvorming. Op die manier ontstaan in plaats van enkele grote scheuren meerdere kleine barstjes, zogenoemde « gesloten » scheurtjes, die de waterdichtheid van de constructie niet in het gedrang brengen;
- omgevingstemperatuur : de invloed van een periode met hoge temperaturen op de warmte-ontwikkeling van het beton is duidelijk. Indien de temperatuur  $T_{\text{oz}}$  (zie

**TABEL 3 – AANBEVELINGEN VOOR DE VERWERKING EN NABEHANDELING VAN HET BETON IN FUNCTIE**

Hygrometrie	Omgevingstemperatuur			
	van 5 tot 20 °C	van 20 tot 25 °C	van 25 tot 30 °C	> 30 °C
van 60 tot 100 %	Normale omstandigheden voor het storten van het beton			Versterkte nabehandeling
van 50 tot 60 %		Versterkte nabehandeling		Storten van het beton vanaf 12 uur
van 40 tot 50 %	Versterkte nabehandeling		Storten van het beton vanaf 12 uur	Versterkte nabehandeling
< 40 %			Versterkte nabehandeling	Geen beton storten

fig. 10) hoog is, zullen de trekspanningen ten gevolge van de afkoeling veel groter zijn dan in het geval van een beton dat bij een lagere temperatuur gestort wordt. De aanbevelingen van tabel 3 moeten dan ook gerespecteerd worden. Zij beperken tevens de plastische en drogingskrimp van het beton;

- koeling van massieve betonstructuren tijdens de verhardingsfase : door het laten circuleren van koelwater via buizen die in het beton zijn ingestort, kunnen temperatuurverschillen en grote temperatuurgradiënten in de constructie beperkt worden. Toch kan een koelprocédé pas worden toegepast na voorafgaande studie van de opstelling van de koelbuizen in de constructie en van de intensiteit van de koeling. Het is overigens aangewezen de temperatuurevolutie te registreren en te controleren;
- de vervormingsverhinderend zoveel mogelijk beperken (differentiële vervorming tussen de opeenvolgende stortfasen reduceren). In het geval van een wand die op een funderingsplaat wordt gestort, betekent dit :
  - de drogingskrimp van de funderingsplaat uitstellen. Hiertoe moet de plaat tegen uitdrogen beschermd worden. Een goedkope en doeltreffende manier bestaat erin de plaat gewoon onder water te zetten. Beton dat permanent in contact is met water vertoont immers geen krimp;
  - na het realiseren van de vloerplaat zo snel

mogelijk de wanden storten. Het verdient bovendien aanbeveling de tijdsintervallen tussen de opeenvolgende betonneerfasen zo kort mogelijk te houden, om de nefaste effecten van differentiële krimp te reduceren (fig. 16 - 18)

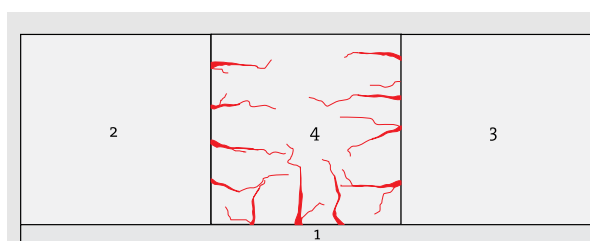


Fig. 16 – Ongunstige stortfasering (verhoogd scheurrisico) :

- Tijdens fase 4 van het betonneren is de temperatuur in wand 4 hoger dan die van de funderingsplaat 1 en van wanden 2 en 3.
- De temperatuur van wand 4 stijgt tijdens de verharding; die van wanden 1, 2 en 3 nauwelijks  
 ⇒ uitzetting van beton in wand 4 wordt belemmerd door 1, 2 en 3; vermits wand 4 nog niet zeer stijf is, ontstaan slechts geringe spanningen : geen scheurvorming.
- Wanneer wand 4 afkoelt, wil hij samentrekken, maar dit wordt verhinderd door 1, 2 en 3  
 ⇒ verhoogd scheurrisico want het beton is reeds stijf (hoge elasticiteitsmodulus), terwijl het nog maar weinig treksterkte (jong beton) heeft.

Fig. 17 – Gunstige stortfasering (laag scheurrisico)

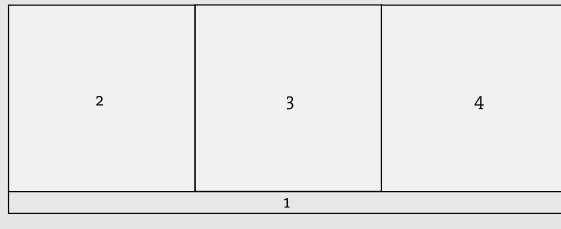
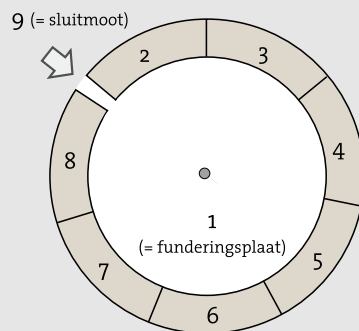


Fig. 18 a,b – Stortfasering, realisatie van een « sluitmoot ». Bij grote bouwwerken zoals bijv. bezinkbekkens kan het scheurrisico aanzienlijk verkleind worden door een dergelijke sluitmoot te voorzien, d.w.z. een tijdelijke krimpvoeg die indien mogelijk enkele maanden wordt opengelaten en pas daarna dichtgestort.



- Ontkisting : door de ontkisting uit te stellen blijft het beton langer beschermd tegen uitdroging en kan de temperatuur van het constructie-element dalen zonder bruske thermische schokken (afkoeling zonder mogelijkheid tot relaxatie van de spanningen, opwarming door directe bezonning). Wanden mogen nooit reeds na 24 uur ontkist worden, maar pas ten vroegste nadat het temperatuurverschil tussen de betonkern en de omgevingstemperatuur minder dan 15 °C bedraagt. Na het ontkisten moeten de nabehandelingstijden (cfr. tabel 2) gerespecteerd worden om het beton op een doeltreffende manier tegen uitdroging te beschermen. In de praktijk betekent dit dat het gebruik van al te isolerende bekistingen (b.v. houten bekistingen) moet worden vermeden, of dat zij pas mogen gedemonteerd worden wanneer de temperatuur in de kern gedaald is. Om thermische gradiënten te vermijden kan dit soms lang duren.

## BODEMVERHARDINGEN

Gedurende de binding en de verharding van het beton kunnen ook in bodemverhardingen (bedrijfsvloeren, wegen, ...) thermische vervormingen optreden, door de ontwikkeling van hydratatie-warmte en door schommelingen in de omgevingstemperatuur. De temperatuurschommelingen in het beton zijn analoog met de eerder beschreven fenomenen (fig. 10, 14 en 15).

In fig. 19-20 wordt het temperatuurverloop weergegeven in een wegverharding. De temperaturen werden gemeten met behulp van thermokoppels die in het beton waren geïntegreerd ongeveer op halve hoogte. De metingen startten vanaf de verwerking van het beton. Er kan worden vastgesteld dat de

temperatuurstijging en de daaropvolgende afkoeling ook hier tot aanzienlijke krimp leiden. De temperatuur daalt met meer dan 15°C, dwarsscheuren zijn niet te vermijden. In fig. 19 vangt de afkoeling in het geval van een niet geïsoleerde verharding aan na 15 uur. Bij de thermisch geïsoleerde verharding wordt de afkoeling uitgesteld, hetgeen gunstig is voor de scheurbeheersing. In fig. 20 begint de afkoeling ongeveer 4 1/2 uur na de verwerking van het beton. De zeer hoge omgevingstemperatuur is verantwoordelijk voor deze korte tijdspanne. Bovendien is de afkoeling, d.w.z. de krimp van het beton, hierdoor ook aanzienlijk ( $\Delta T_{\max} = 55,0 - 30,2 = 24,8 \text{ °C}$  in 16 1/2 uur).

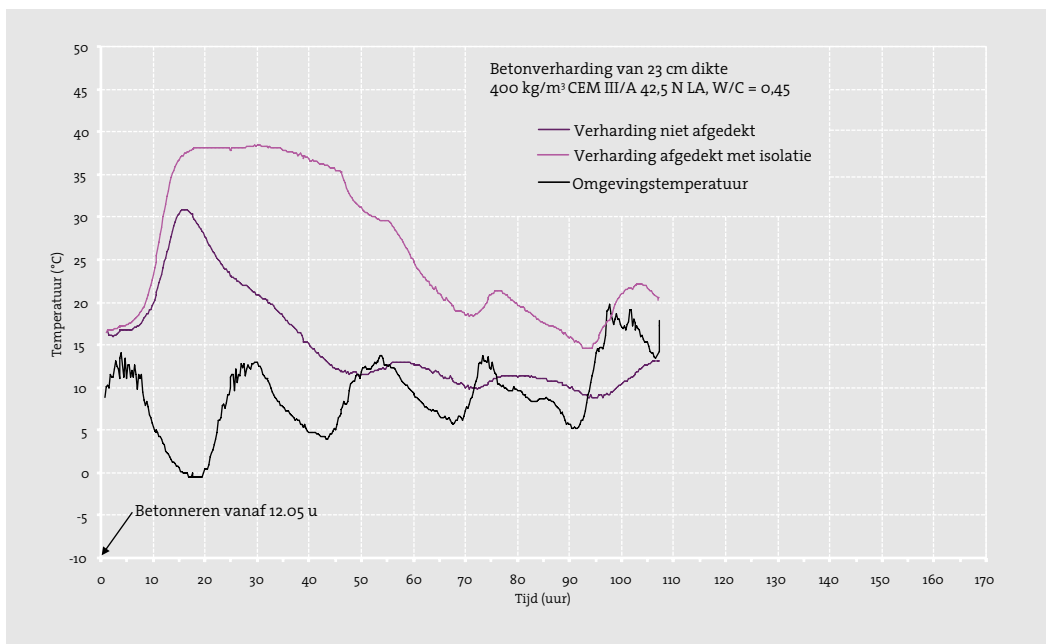


Fig. 19 – Voorbeeld van temperatuurcurven in een betonnen wegverharding in het geval van een lage omgevingstemperatuur, koel weer.

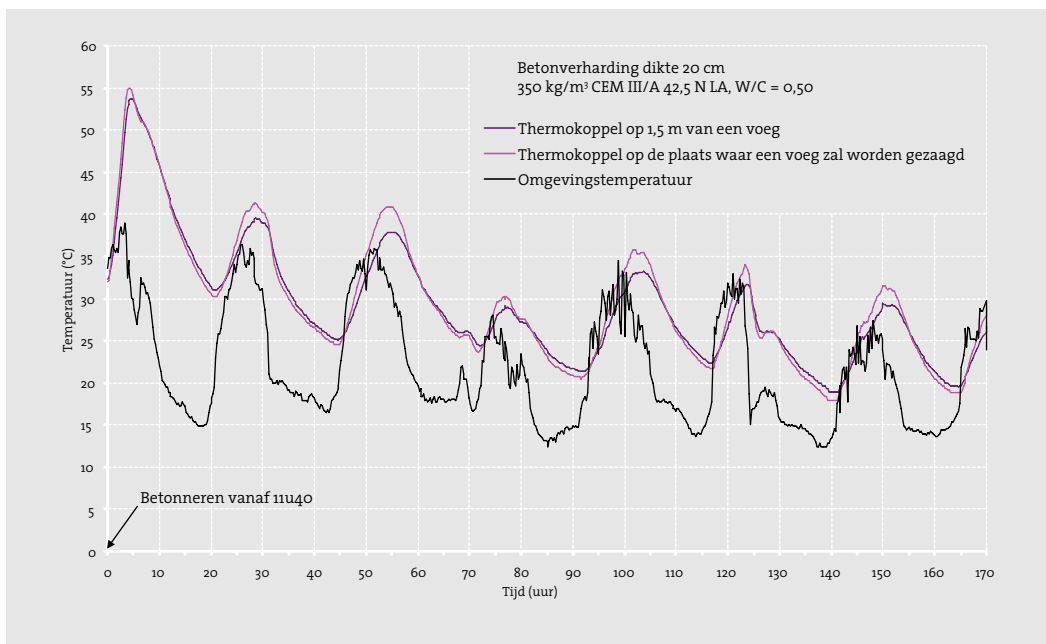


Fig. 20 – Voorbeeld van temperatuurcurven in een betonnen wegverharding in het geval van een hoge omgevingstemperatuur, zeer warm weer.

Naast deze uitzetting en samentrekking ontstaat door de bruuske temperatuurschommelingen een temperatuurgradiënt in de betonplaat, meer bepaald een temperatuurverschil tussen de bovenkant en de onderkant. Door deze gradiënt heeft de betonplaat de neiging te vervormen, maar wordt hierin tegengewerkt door haar eigen gewicht. Dit leidt tot inwendige spanningen, die des te

belangrijker zijn naarmate de gradiënt groter is en de betonplaat langer, breder en dikker. Indien geen maatregelen worden genomen, kan deze combinatie van hygrothermische krimp en thermische bewegingen ernstige gevolgen hebben voor het beton, en zelfs resulteren in het scheuren van de verharding.

Het probleem van de spanningsopbouw kan als volgt worden verholpen:

- de lengte van de platen beperken door voegen te voorzien op voldoende korte tussenafstanden indien het ongewapend of lichtgewapend beton betreft, ofwel kiezen voor doorgaand gewapend beton (de gevormde scheurtjes fungeren als voegen) (fig. 21);
- de breedte van de platen beperken met behulp van langsvoeegen;
- bruuske opwarming van het oppervlak vermijden gedurende de eerste 72 uur (met behulp van een curing compound die een reflecterende film vormt).

Wanneer beton wordt gegoten langsheen een reeds bestaande betonverharding (naast een eerste rijstrook wordt bijvoorbeeld een tweede aangelegd) moet erop gelet worden dat de dwarsvoegen in elkaars verlengde liggen. Een voeg aangebracht in één rijstrook moet inderdaad absoluut doorlopen in de rijstroken ernaast. Bewegingen in de bestaande verharding zullen scheuren veroorzaken in het beton dat zich nog in zijn verhardingsfase bevindt (« sympathiescheuren »).

Algemeen zijn voor de realisatie van de voegen volgende regels van toepassing:

- elke door voegen begrensde plaat moet een zo vierkant mogelijke vorm hebben; de verhouding lengte/breedte moet tussen 1 en 1,5 begrepen zijn;
- platen met een meer onregelmatige geometrie mogen geen scherpe hoeken hebben, maar steeds hoeken vormen van minstens 90°;

- in buitenomgeving moet de afstand tussen twee voegen kleiner zijn dan 25 maal de dikte van de verharding, voor binnenvloeren 30 maal. Binnenvloeren zijn immers, voor zover ze worden aangelegd wanneer het gebouw er reeds staat, minder onderhevig aan bezonning en temperatuurschommelingen;
- de oppervlakte van ongewapende platen mag in de openlucht niet groter zijn 25 m<sup>2</sup>, in een binnenruimte maximum 30 m<sup>2</sup>;
- de diepte van de ingezaagde scheuraanzet is gelijk aan 1/3 van de plaatdikte, de voegen moeten realiseerd worden tussen 5 en 24 uur na het betonneren. Eigenlijk moet rekening worden gehouden met het tijdstip waarop de afkoeling begint, d.w.z. het ogenblik waarop de eerste trekspanningen ontstaan (zie fig. 19-20);
- de continuïteit van alle voegen moet verzekerd zijn, m.a.w. geen voegpatronen in « T ».

Kunnen deze regels om de een of andere reden niet gerespecteerd worden (bijvoorbeeld, ter hoogte van een kruising van twee wegen), dan moeten de platen van een wapening voorzien worden. Om scheurvorming te kunnen beheersen, moet zij evenwel geplaatst worden in het bovenste deel van de plaat en onderbroken (doorgezaagd !) ter hoogte van de voegen. Een wapeningsstaaf van 10 mm diameter om de 15 cm in de twee richtingen, en met een betondekking van 40 mm, is over het algemeen een goede oplossing. Noteer dat hoe groter de betondekking is, hoe minder de wapening in staat zal zijn de scheurvorming onder controle te houden.

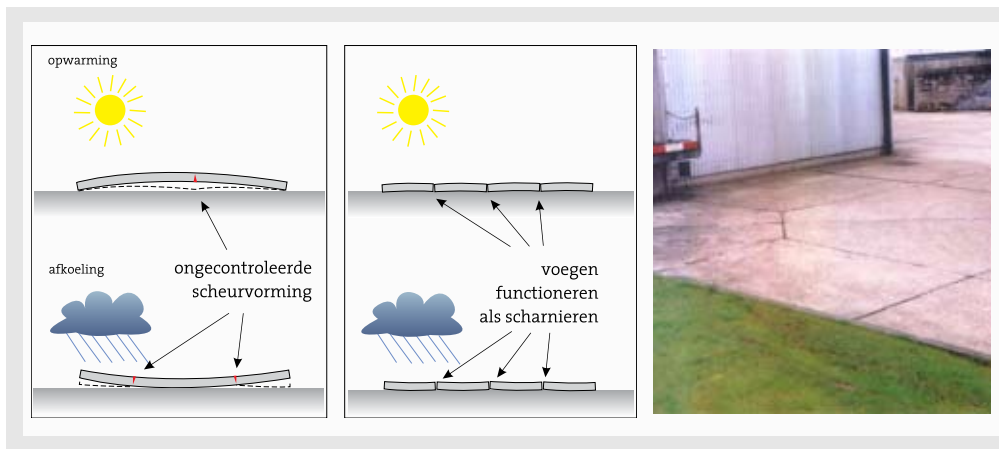


Fig. 21 : Vervorming van de betonplaten door temperatuurgadiënt

Fig. 22 : Een juist voegpatroon is essentieel om ongecontroleerde scheurvorming tegen te gaan

**TABEL 4 : MAXIMUM TUSSENAFSTAND VOOR VOEGEN IN BODEMVERHARDINGEN, IN BUITENOMGEVING EN BINNEN**

Plaatdikte [cm]	Maximum voegafstand [m]	
	Binnenomgeving	Buitenomgeving
10	3,0	2,5
12	3,6	3,0
14	4,2	3,5
16	4,8	4,0
18	5,4	4,5
20	5,0 tot 6,0	5,0
22	5,0 tot 6,0	5,0
25	5,0 tot 6,0	5,0

## 7. BESLUIT

Vroegtijdige scheurvorming heeft zeer ingrijpende gevolgen voor de duurzaamheid van betonconstructies. In de praktijk is zij nochtans steeds vermijdbaar. Als voornaamste voorzorgsmaatregelen moeten worden vermeld :

- de betonsamenstelling zo formuleren dat het gehalte aan fijne bestanddelen (cement inbegrepen) optimaal is, en dat het kaliber van de grootste granulaatfractie compatibel is met de afmetingen van de bekisting en het ruimtebeslag van de wapening. Het risico dat het verse beton scheurt door zetting wordt op die manier beperkt, een goede waterretentie blijft gegarandeerd;
- zo snel mogelijk na het verdichten van het beton een curing compound aanbrengen of een doeltreffende nabehandelingstechniek toepassen;
- van bij het ontwerp van het bouwwerk rekening houden met het gevaar voor thermische krimp;
- ervoor zorgen dat de weersomstandigheden het betonneren niet schaden. Windsnelheid, temperatuur, bezonning en relatieve vochtigheid hebben een rechtstreekse impact op het scheurgedrag. Hogere waarden van deze parameters doen de krimp en bijgevolg ook de kans op scheuren toenemen.



T-3

Dit bulletin is een publicatie van :  
**FEBELCEM**  
Federatie van de Belgische Cementnijverheid  
Vorstlaan 68 - 1170 Brussel  
tel. 02 645 52 11 - fax 02 640 06 70  
[www.febelcem.be](http://www.febelcem.be)  
[info@febelcem.be](mailto:info@febelcem.be)

Auteur :  
ir. C. Ployaert

Foto's :  
Ing. Paul Van Audenhove  
(tenzij anders vermeld)

Wettelijk depot :  
D/2010/0280/12

V. u. : A. Jasienski

[infobeton.be](http://infobeton.be)

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] VERHOEVEN K., Krimp in jong verhardend beton, Dossier Cement, bulletin nr. 16 - FEBELCEM, 1998
- [2] NEVILLE A. Propriétés des bétons, Paris : Eyrolles, 2000
- [3] La durabilité des bétons - Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement, Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques, Paris : Presses de l'école des ponts et chaussées, 2008
- [4] ACKER P. ; MICHAUD-POUPARDIN V. Limiter la fissuration : conditions indispensables à la durabilité des structures en béton, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 238, 2002
- [5] VENSTERMANS J. ; VAN NIEUWENBURG D. ; VYNCKE J., Scheurvorming in wanden van gewapend beton, WTCB Tijdschrift, 1995
- [6] PLOYAERT C., Aanbevelingen voor de bouw van waterzuiveringsinstallaties in beton FEBELCEM, 2006
- [7] SION P., Wegen van cementbeton, Verbond der Cementnijverheid (FEBELCEM), 1988
- [8] Scheuren in jong beton, ENCI HeidelbergcementGroup, 2001
- [9] Praktische handleiding - Duurzaam beton : samenstelling, productie en verwerking, HOLCIM, 2007
- [10] NBN EN 13670 : 2010 en prNBN EN 13670 ANB : 2010 - Uitvoering van betonconstructies