

Om te voldoen aan de almaar strenger wordende eisen (duurzaamheid, mechanische sterkte, ...) wordt er in de betontechnologie de laatste jaren voortdurend geïnnoveerd. Dit heeft geleid tot het verschijnen van nieuwe betonsoorten, zoals hoge-sterktebeton en zelfverdichtend beton. Deze betontypes vertonen doorgaans betere mechanische prestaties en fysisch-chemische eigenschappen, maar blijken gevoeliger voor krimp en scheurvorming tijdens de vroegste fase van het verhardingsproces door hun lagere water-/cementfactor en de grotere hoeveelheid fijne stoffen die ze bevatten.

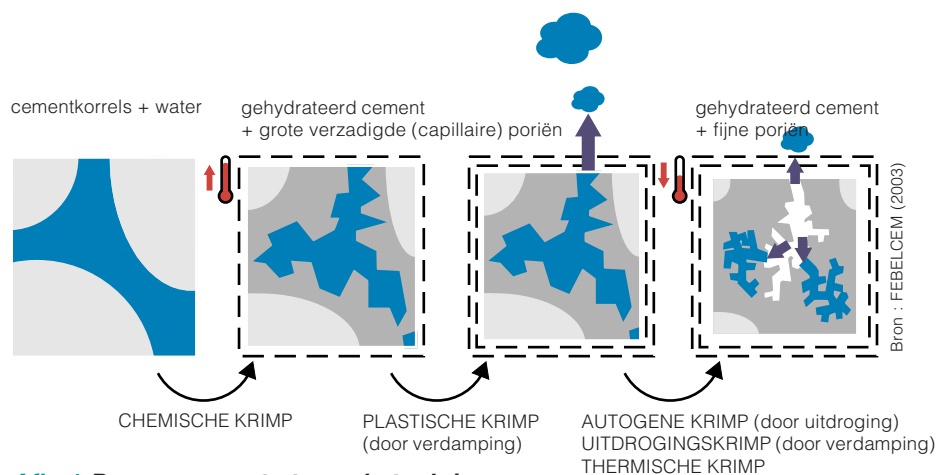
## 1 KRIMPTYPES

Heel jong beton (in zijn plastische fase) en jong beton (in zijn verhardingsfase) worden gekenmerkt door verschillende krimpmechanismen, die enerzijds te wijten zijn aan processen die zich afspelen in het beton zelf en anderzijds aan de wisselwerking met de omgeving (zie afbeelding 1).

- *Chemische krimp* is een rechtstreeks gevolg van de hydratatie van het cement. Het volume van het gehydrateerde cement is immers kleiner dan de som van het oorspronkelijke volume van cement en water.
- *Plastische krimp* is te wijten aan de verdamping van het water aan het vrije oppervlak van het verse beton na zijn uitvoering. Wanneer het beton verhard is (of tijdens zijn verhardingsfase) heeft men het ook over *uitdrogingskrimp* of *hydraulische krimp*. Het risico is erg groot in het geval van onbekiste vlakke horizontale oppervlakken die niet beschermd zijn aan hun bovenzijde (wegen, bedrijfsvloeren, ...).
- *Autogene krimp* komt vooral voor bij betonsoorten met een lage water-/cementverhouding (W/C) en een hoog gehalte aan fijne stoffen (cement en/of andere fijne minerale toevoegingen). In deze omstandigheden neemt het cement tijdens de hydratatie van het jonge beton grote hoeveelheden op, zodat er snel met lucht gevulde poriën ontstaan. Dit verschijnsel (interne uitdroging) veroorzaakt capillaire druk, wat leidt tot een snelle krimp in de volledige massa van het beton.
- *Thermische krimp* is de samentrekking die gepaard gaat met de afkoeling van het beton na de exotherme hydratatiereactie. In

Julie Piérard, ir., onderzoeker, laboratorium Betontechnologie, WTCB  
Vinciane Dieryck, ir., projectleider, laboratorium Betontechnologie, WTCB

# De krimp van jong speciaal beton



Afb. 1 De voornaamste types betonkrimp.

het geval van massieve constructies of bij elementen met een variërende doorsnede, leidt de ongelijke afgifte van de hydratatie-warmte tot grote temperatuurgradiënten en dus tot trekspanningen.

Het krimpverschijnsel is een belangrijke factor voor de praktijk, omdat hierdoor scheuren kunnen ontstaan die soms een negatieve invloed hebben op de duurzaamheid van het beton. De scheuren die ontstaan bij jong beton (zie afbeelding 2) kunnen gekarakteriseerd worden door een grote scheuropening, wat het transport van agressieve stoffen tot in de kern van het bouwwerk bevordert. Dit kan leiden tot de beschadiging van de cementmatrix en de corrosie van de wapeningsstaven, wat de prestaties van het bouwwerk op lange termijn in het gedrang kan brengen.

## 2 SPECIAAL BETON

In deze paragraaf komen op beknopte wijze twee nieuwe betonsoorten aan bod:

- hoge-sterktebeton (HSB) vertoont een hogere mechanische sterkte en betere fysisch-chemische eigenschappen dan traditioneel beton
- zelfverdichtend beton (SCC – *self compacting concrete*) is een supervloeibare betonsoort die uitgevoerd wordt zonder toevoeging van externe energie (trilling).

Voor meer informatie omtrent speciaal beton en zijn voornaamste bestanddelen verwijzen we naar de volgende twee artikels uit WTCB-Tijdschrift: “Zelfverdichtend beton: techno-

logie van de toekomst” [2] en “Speciale betonsoorten” [4].

### 2.1 HOGE-STERKTEBETON EN ULTRA-HOGESTERKTEBETON

Traditioneel beton vertoont na 28 dagen een druksterkte begrepen tussen 20 en 50 MPa. De waterhoeveelheid, gebruikt bij de vervaardiging, is altijd groter dan de hoeveelheid, nodig voor de volledige hydratatie van het cement. Hoewel de capillaire porositeit tengevolge van deze overmaat aan water de uitvoering vergemakkelijkt, heeft deze negatieve gevolgen voor de sterkte en de duurzaamheid van het beton. Het zou dus interessant zijn indien men deze waterhoeveelheid zou kunnen verminderen zonder de verwerkbaarheid van het verse beton in het gedrang te brengen. Dit werd mogelijk dankzij de ontwikkeling van nieuwe materialen zoals sterk waterreducerende superplastificeerders en ultrafijne stoffen (bv. silica fume).



Afb. 2 Plastische krimp scheuren.

De silica fumedeeftjes zijn uiterst fijn, zodanig dat ze de holten tussen de grotere cementdeeltjes kunnen opvullen. Ze zijn bovendien erg reactief en nemen deel aan de hydratatiereactie. Deze twee eigenschappen zorgen voor een bijkomende opvulling van de poriën en voor een verdichting van de microstructuur van het beton.

Men spreekt van hoge-sterktebeton wanneer de druksterkte groter is dan 50 MPa na 28 dagen en van een ultrahoge-sterktebeton (UHSB) wanneer de druksterkte groter is dan 80 MPa.

Naast een verhoogde verwerkbaarheid van het verse beton bij eenzelfde hoeveelheid water [5] vertonen HSB en UHSB de volgende karakteristieken :

- verbeterde mechanische karakteristieken (druk, trek, elasticiteitsmodulus), zowel van het jonge beton als op termijn, wat de ontkistingstijd bij prefabricage verkort (afbeelding 3) en waardoor het mogelijk wordt slankere constructies te bouwen dankzij de verhoging van het draagvermogen
- een beperkte doorlaatbaarheid voor lucht en water tengevolge van de grotere dichtheid, zodat de wapening beter bestand is tegen corrosie
- een hogere weerstand tegen agressieve producten, wat de duurzaamheid verhoogt en de vorst- en zeewaterweerstand van bijvoorbeeld offshore constructies (boorplatformen) ten goede komt
- een grotere slijtsterkte
- een verbeterde bestandheid tegen vorstdoocyclus
- een vermindering van de kruip, wat erg interessant is voor de constructie van bruggen.



**Afb. 3** Gebruik van HSB bij prefabricage.

## 2.2 ZELFVERDICTEND BETON

Zelfverdichtend beton, ook wel zelfnivellerend beton genoemd, is een nieuw betontype dat in verse toestand een uitzonderlijke vloeibaarheid vertoont, tengevolge van zijn speci-

fieke samenstelling en de toevoeging van sterk waterreducerende superplastificeerders. De techniek van zelfverdichtend beton werd in de jaren '80 ontwikkeld in Japan en kende in de jaren '90 een groeiend succes in Europa.



**Afb. 4** Uitvoering van een zelfverdichtend beton.

Om als zelfverdichtend beschouwd te kunnen worden, moet het beton een grote vloeibaarheid en een voldoende segregatieweerstand vertonen. Bovendien mogen de granulaten niet geblokkeerd worden ter hoogte van de wapening. De grote vloeibaarheid van zelfverdichtend beton (afbeelding 4) kan bekomen worden zonder de water-cementfactor te verhogen door gebruik te maken van superplastificeerders. Om een voldoende segregatieweerstand te verkrijgen, kan men dan weer gebruik maken van een van de drie volgende methoden, waarbij elke methode specifiek is voor een bepaalde soort zelfverdichtend beton :

- bij zelfverdichtend beton van het poederige type verlaagt men de verhouding tussen de hoeveelheid water en poeder die in het mengsel aanwezig is door de toevoeging van een bijkomende hoeveelheid fijne stoffen (cement en/of minerale toevoegingen)

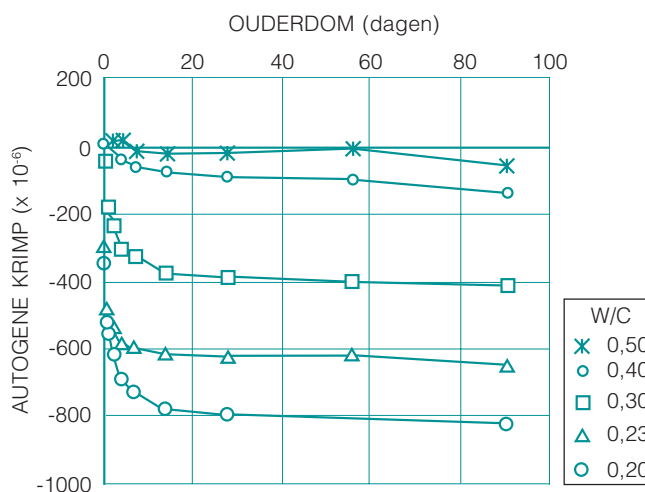
- het beton kan uitgevoerd worden met een viscositeitsverbeteraar
- bij zelfverdichtend beton van het gecombineerde type wordt zowel een grote hoeveelheid fijne stoffen als een viscositeitsverbeteraar toegevoegd.

Er bestaat dus een breed gamma van samenstellingen, met druksterkten tussen 35 en 75 MPa.

## 3 VERSCHIL TUSSEN UITDROGINGSKRIMP EN AUTOGENE KRIMP

Autogene krimp verschilt van uitdrogingskrimp door de wijze waarop het vochtgehalte van het beton vermindert. Het essentiële verschil ligt in het feit dat het waterverlies bij uitdrogingskrimp te wijten is aan verdamping en bij autogene krimp aan de hydratatiereactie. Aangezien de autogene krimp veroorzaakt wordt door interne uitdroging, verhoogt deze naarmate de W/C-factor vermindert. Het water wordt in dit geval immers snel verbruikt tijdens de hydratatiereactie.

Door de lage water-/cementfactor en de grote hoeveelheid fijne stoffen die de hiervoor vermelde speciale betonsoorten bevatten, zijn de mechanische effecten van de autogene krimp belangrijker dan de effecten van de uitdrogingskrimp (tabel 1). Zonder een aangepaste nabehandeling blijft de autogene krimp van een traditionele betonsoort beperkt (0,05 tot 0,1 mm/m). Bij HSB en UHSB kan deze krimp oplopen tot 0,5 à 1 mm/m, naargelang van het cementgehalte en de W/C-factor (afbeelding 5). Voor zelfverdichtend beton vindt men in de literatuur tegenstrijdige resultaten terug. Dit is te wijten aan het uitgebreide gamma van samenstellingen.



**Afb. 5** Evolutie van de autogene krimp, afhankelijk van de W/C-verhouding (1000 x 10<sup>-6</sup> komt overeen met 1 mm/m) [8].

**Tabel 1** Vergelijking tussen de krimp van traditioneel beton en deze van HSB.

Betontypes	W/C-verhouding	Uitdrogingskrimp	Autogene krimp
Traditioneel beton	≈ 0,5	aanzienlijk	beperkt of geen
HSB	< 0,4	beperkt	aanzienlijk

**Afb. 6** Toestel voor het lineair bepalen van de autogene krimp van jong beton.

Het jonge beton vertoont in het algemeen een te beperkte mechanische sterkte om de spanningen tengevolge van de krimp op te nemen. In dit stadium kan vroegtijdige scheurvorming ontstaan, die soms schadelijk is voor de duurzaamheid van de constructie op lange termijn. Het is dus belangrijk om te beschikken over betrouwbare meetmethoden om de autogene krimp van deze speciale betonsoorten vanaf hun aanmaak te bepalen.

#### 4 PROBLEMEN BIJ DE BEPALING VAN DE AUTOGENE KRIMP

Om de autogene krimp afzonderlijk te kunnen bepalen, d.w.z. zonder de andere elementen die de totale krimp beïnvloeden, moet tijdens de experimenten aan twee voorwaarden voldaan worden [1] :

- het materiaal moet afgeschermd worden van elke vorm van vochtuitwisseling met de buitenomgeving (het mag geen water verliezen door verdamping). Op deze manier worden de plastische krimp en de uitdrogingskrimp niet in rekening gebracht
- het materiaal moet bewaard worden bij een constante temperatuur. Indien dit tijdens de experimenten niet kan gewaarborgd worden, moet men rekening houden met de thermische vervormingen.

Deze twee voorwaarden, samen met het feit dat de meting zo snel mogelijk na de aanmaak van het beton moet gebeuren (aangezien de vervormingen plaatsgrijpen zodra het materiaal hydrateert), impliceren dat de meting van de autogene vervormingen erg moeilijk is.

Men kan twee belangrijke types meetmethoden voor de autogene krimp onderscheiden : lineaire (verticale of horizontale) meetmethoden en volumieke meetmethoden.

##### 4.1 LINEAIRE MEETMETHODEN

Bij de lineaire bepaling van de autogene vervormingen worden de dimensionale veranderingen van een proefstuk in een specifieke richting bepaald. De resultaten worden uitgedrukt volgens de volgende formule :

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

waarbij L overeenstemt met de lengte van het proefstuk op het moment van de meting en  $L_0$  met de initiële lengte (bij de eerste meting).

Het WTCB beschikt over een toestel voor het lineair bepalen van de krimp van jong beton, waarmee het mogelijk is de meting reeds te starten voor de ontlasting van het beton (afbeelding 6).

De lineaire bepaling van de autogene vervormingen kan beïnvloed worden door verschillende factoren :

- de sedimentatie en het uitzweten (verschijnen van helder water aan het oppervlak van het proefstuk) : deze verschijnselen brengen dichtheidsgradiënten teweeg in de dikte van de proefstukken, wat leidt tot de asymmetrie van het systeem en tot een plaatselijke wijziging van de samenstelling van het bestudeerde materiaal. Ze kunnen beperkt

worden door de proefstukken te doen draaien tot hun verharding of door de toevoeging van viscositeitsverbetersaars

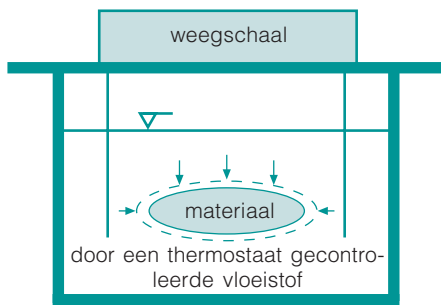
- de wrijving tussen het proefstuk en de bekisting : deze kan de vervormingen van het proefstuk verhinderen. De meest gebruikte oplossing ter beperking van de problemen, veroorzaakt door de bekisting, bestaat in de behandeling van haar binnenwanden door bevochtiging of door het voorzien van een kunststof of teflon membraan. Men kan ook de soepelheid van de bekisting aanpassen (gebruik van een bekisting uit teflon of polystyreen)
- het tijdstip van de eerste meting : de autogene krimp verschijnt vanaf het ogenblik dat de hydratatiereactie begint, d.w.z. zodra het water in contact komt met het cement. Men dient de meting daarom zo snel mogelijk na de aanmaak van het beton uit te voeren. De lineaire metingen kunnen enkel uitgevoerd worden indien het beton voldoende sterk is om ontlast te worden en om de aangebrachte bewegingsdetectoren te dragen. De autogene krimp voor de verharding kan bijgevolg moeilijk met deze methode bepaald worden
- de dichtheid van het systeem : om de dichtheid van de meetapparatuur te waarborgen, dient de bekisting uitgevoerd te worden met een weinig absorberend materiaal (metaal of teflon). De bescherming tegen de uitdroging van de blootgestelde zijden van het proefstuk wordt verzekerd door een kunststof membraan (voor de ontlasting) of door een dubbele laag hechtend aluminium (na de ontlasting). Door regelmatig het gewicht te bepalen, wordt gecontroleerd dat het proefstuk geen water opneemt of verliest gedurende de proef.

##### 4.2 VOLUMIEKE MEETMETHODEN

De volumieke bepaling van de autogene vervormingen bestaat in de registratie van de dimensionale veranderingen van een proefstuk uit cementpasta, dat vanaf het storten van de buitenomgeving afgeschermd is door middel van een soepel dichtingsmembraan. Het "pasta + membraan"-systeem wordt vervolgens volledig ondergedompeld in een door een thermostaat gecontroleerde vloeistof. De meting van de vervormingen van het materiaal gebeurt door de opvolging van het niveau van de onderdompelingsvloeistof of door een hydrostatische gewichtsbepaling. Dankzij de meting van de schommelingen van de opwaartse druk kan men de volumeveranderingen nagaan (afbeelding 7).

De volumieke bepaling van de autogene vervormingen kan beïnvloed worden door verschillende factoren :

- de sedimentatie en het uitzweten : de aanwezigheid van uitzweetwater aan het op-



**Afb. 7 Volumieke bepaling van de endogene krimp van jong beton (door hydrostatische gewichtsbepaling) [3].**

pervlak van het proefstuk (tussen de cementpasta en het membraan) kan de meetresultaten beïnvloeden. Deze waterfilm wordt tijdens de hydratatie immers opnieuw geabsorbeerd tot het membraan in contact komt met het oppervlak van de cementpasta. De gemeten vervormingen bij uitzweten zijn daarom veel groter dan de werkelijke vervormingen

- de controle van de temperatuur : water heeft een thermische uitzettingscoëfficiënt die ongeveer 17 keer groter is dan deze van beton. Bij temperatuurschommelingen zullen de volumieke veranderingen in de onderdompelingsvloeistof dan ook groter zijn dan deze van het bestudeerde materiaal, wat de meetresultaten kan beïnvloeden
- de druk : de druk die door de onderdompelingsvloeistof uitgeoefend wordt en deze, veroorzaakt door de spanning van het membraan, kunnen – tot aan de verharding – leiden tot een verplettering van de

structuur. De vervormingen die gemeten worden tijdens deze periode zullen dan ook groter zijn dan de werkelijke autogene vervormingen

- de dichtheid van het membraan : de dichtheid van het membraan moet gewaarborgd zijn opdat het water uit het onderdompelingsbad niet zou kunnen doordringen in de cementpasta.

## 5 DOELTREFFENDE MANIEREN OM DE KRIMP TE BEPERKEN

Om te vermijden dat het water in een vroegtijdig stadium uit het beton zou verdwijnen en om de plastische krimp te verminderen, dient men een doeltreffende nabehandeling uit te voeren door het beton af te schermen van de weersomstandigheden [6] [7].

In het geval van traditionele betonsoorten bestaat een van de meest gebruikte technieken ter bescherming tegen krimp (voornamelijk de gecombineerde werking van de plastische krimp en de uitdrogingskrimp) in de afdekking van het betonoppervlak door kunststof platen of zeilen (indien mogelijk).

Bij speciale betonsoorten (waarbij de autogene krimp belangrijker is dan de uitdrogingskrimp), kunnen deze beschermingsmaterialen slechts tijdelijk toegepast worden. Wanneer het risico op plastische krimp verdwenen is, heeft de afdekking van het beton met niet-doordrenkte materialen geen enkel nut meer voor de vermindering van de autogene krimp. Hun verdere toepassing kan zelfs schadelijk

zijn, aangezien het doordringen van water, wat de grootte van de autogene krimp zou kunnen beperken, hierdoor verhinderd of vertraagd wordt.

De beste manieren om een goede nabehandeling van deze speciale beton types te verzekeren, bestaan daarom in :

- de onderdompeling van het beton of in het besproeien van het betonoppervlak met water
- de afdekking van het betonoppervlak met jute doeken of met water doordrenkte geotextielen.

De nabehandeling met water kan stopgezet worden na 7 dagen, omdat een groot deel van de hydratatie dan achter de rug is.

Naast deze traditionele nabehandelingstechnieken kunnen ook andere middelen toegepast worden om de autogene krimp van speciale betonsoorten te beperken en de scheurvorming te beheersen, met name :

- het gebruik van nieuwe hulpstoffen (krimpreducerende hulpstoffen en expansiemiddelen)
- het gebruik van synthetische vezels
- interne nabehandelingstechnieken waarbij er een intern waterreservoir gevormd wordt voor het beton door toevoeging van lichte, met water verzadigde granulaten of superabsorberende polymeren.

Deze nieuwe middelen zullen onderzocht worden in het kader van een onderzoeksproject dat momenteel gevoerd wordt in het WTCB. ■



## LITERATUURLIJST

1. Boivin S.  
Retrait au jeune âge du béton. Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Parijs, 2001.
2. Braquenier J.-C. en Desmyter J.  
Zelfverdichtend beton : technologie van de toekomst. Brussel, WTCB-tijdschrift, herfst 2000.
3. Charron J.-P., Marchand J. en Bissonnette B.  
Early-age deformations of hydrating cement systems : comparison of linear and volumetric shrinkage measurements. Concrete Science & Engineering, Vol. 3, Nr. 1, 2001.
4. Desmyter J., Dieryck V. en Leuridan A.  
Speciale betonsoorten. Brussel, WTCB-Tijdschrift, lente 2002.
5. Dreux G. en Festa J.  
Nouveau guide du béton. Parijs, Editions Eyrolles, 7<sup>e</sup> uitgave, 1995.
6. Pien A., Pollet V. en Vyncke J.  
Nabehandeling van vers beton. Brussel, WTCB-Tijdschrift, zomer 1998.
7. Pollet V. en Jacobs J.  
Beton nabehandelen. Brussel, WTCB-Contact, Nr. 2004/1.
8. Tazawa E. en Miyazawa S.  
Influence of cement composition on autogenous shrinkage of concrete. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg (Zweden), Vol. 2, 2 - 6 juni 1997.