

# BETONIEK

Een maandelijks uitgave van de  
Vereniging Nederlandse Cementindustrie  
postbus 3011, 5203 DA 's-Hertogenbosch  
telefoon 073-150150 (abonnementen 150231)

maart 1983

# 6/3

## Hoe poreus is beton?

Bouwmaterialen in een agressieve omgeving worden aangetast. Soms nauwelijks merkbaar, soms ook heel snel. De snelheid van aantasting hangt af van de bestandheid van het materiaal tegen de invloeden van de omgeving. De mate van aantasting hangt ook af van de grootte van het geëxposeerde oppervlak.

Dat lijkt logisch, maar in het geval van beton bestaan over die grootte toch nog wel eens misverstanden. Het geëxposeerde oppervlak is namelijk niet hetzelfde als het zichtbare oppervlak.

De agressieve omgeving stopt niet bij het van buitenaf zichtbare oppervlak: zij dringt het beton ook binnen. Hoever hangt van de omstandigheden af. Laten we, om de gedachten te bepalen, zeggen tot op 1 cm diepte. Bij een uitwendig oppervlak van 1 cm<sup>2</sup> is dan een hoeveelheid beton van 1 cm<sup>3</sup> blootgesteld. Wat is, bij dat uitwendig oppervlak, het bijbehorende inwendige oppervlak? Daar kan wel een ruwe schatting van worden gemaakt, er van uitgaande dat cement de zwakke schakel in het geheel is.

### Inwendig oppervlak

Het specifiek oppervlak van portlandcement klasse A, bekend als de Blaine-waarde, bedraagt ongeveer 3000 cm<sup>2</sup>/g. Anders gezegd, 1 gram cement heeft een oppervlak van circa 3000 cm<sup>2</sup>. Beton met een cementgehalte van 320 kg/m<sup>3</sup> of

0,32 g/cm<sup>3</sup>, heeft dus (als het cement ongehydrateerd zou zijn), per cm<sup>2</sup> buitenoppervlak een geëxposeerd inwendig oppervlak van 0,32 x 3000 = 1000 cm<sup>2</sup>. Het geëxposeerde oppervlak is dus maar liefst 1000 maal zo groot als het zichtbare oppervlak.

Maar in beton is het cement voor het grootste deel niet meer in de oorspronkelijke vorm aanwezig: het is gehydrateerd. En die hydratatieproducten hebben nog weer eens een duizend maal zo groot oppervlak als het cement waar ze uit zijn ontstaan. Dat betekent dus dat elke cm<sup>2</sup> buitenoppervlak overeenkomt met een miljoen maal zo groot, kwetsbaar, inwendig oppervlak.

Misschien wat meer dan u had verwacht!

Deze redenering geldt voor beton; bij staal is het aantastbare oppervlak niet veel groter dan het zichtbare buitenoppervlak. Wat is het verschil tussen staal en beton?

### Porïën

Het verschil wordt in eerste instantie veroorzaakt doordat de agressieve buitenwereld, volgens onze veronderstellingen, een centimeter diep het beton kan binnendringen terwijl haar, in het geval van staal, al bij het buitenoppervlak een halt wordt toegeroepen. De vraag moet dus luiden hoe het komt dat de omgeving zo diep in het beton kan doordringen? Omdat beton een poreus materiaal is en staal niet.

Porïën zijn de toegangswegen voor een vaak agressieve omgeving tot het inwendige van bouwmaterialen als baksteen, kalkzandsteen en beton.

Hoe poreus is beton?

### Beton, een heterogeen materiaal

Om die vraag te kunnen beantwoorden, moeten



1

Getekend cementsteenmodel

LP = luchtporie

KP = capillaire porie

(ontleend aan: Richartz en Locher, Zement-Kalk-Gips 1965 nr. 9)

we eerst wat dieper ingaan op de opbouw van beton. Beton is namelijk geen homogeen materiaal, zoals staal. Het bestaat uit toeslagmateriaal, cementsteen en ongehydrateerd cement. Het inwendige oppervlak van één  $\text{cm}^3$  beton was rond een miljoen  $\text{cm}^2$ . Dat oppervlak is echter geconcentreerd in de cementsteen, dus in ca. 30% van het betonvolume.

De resterende 70% wordt ingenomen door toeslagmateriaal, met (in Nederland) een poriegehalte van meestal minder dan 1%. Dat is niet veel, en men mag daarom wel aannemen, dat zand en grind niet zo erg toegankelijk zijn voor een agressieve omgeving. Het zou trouwens weinig uitmaken: het Nederlandse rivierzand en -grind heeft een lange en moeilijke reis achter de rug en alle zwakke broeders zijn allang uitgeschakeld. Ze bedekken als rivierklei de uiterwaarden. Alleen het sterke en duurzame materiaal heeft de reis overleefd.

Blijft over de cementsteen, met dat enorme inwendige oppervlak. Cementsteen is helaas verre van duurzaam. Bij portlandcementbeton bestaat het voor zo'n 20 volumeprocenten uit kalk, een zeer reactief materiaal. Maar ook de overige cementhydraten zijn, vergeleken met het toeslagmateriaal, nog zeer reactief.

De duurzaamheid van beton met Nederlands

toeslagmateriaal hangt dus bijna volledig af van de kwaliteit van de cementsteen.

De porositeit van het toeslagmateriaal was ca. 1%. Wat is, naar uw schatting, de porositeit van cementsteen: 10, 20, 30, 40, 50 of 60%? Of nog meer?

#### Porositeit van cementsteen

De vraag is gemakkelijker gesteld, dan beantwoord. Cementsteen begint als een mengsel van cement, water en een restantje lucht. Het porievolume is in dit geval het niet door cement ingenomen volume; dat is nog gemakkelijk te berekenen.

Stel 320 kg cement per  $\text{m}^3$ , bij een wcf van 0,6. Het cement neemt dan (bij een soortelijke massa van 3,15 kg/l) een volume in van  $320 : 3,15 = 102 \text{ l}$ , het water  $0,6 \times 320 = 192 \text{ l}$ , terwijl misschien nog 10 l lucht ingesloten blijft.

Het volume van de cementpasta is

$$102 + 192 + 10 = 304 \text{ l.}$$

De porositeit (in volumeprocenten) is dan

$$100 \times (192 + 10) : 304 = 66\%.$$

#### Hydratatie

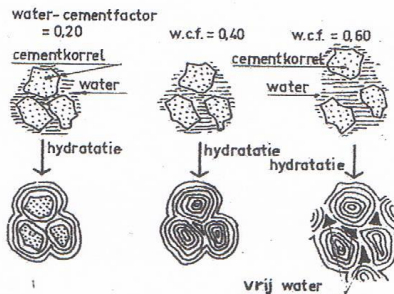
Een poriegehalte van meer dan 65% klopte misschien niet met uw schatting. Maar die 65% slaat natuurlijk wel op de porositeit van *cementpasta* (met ook nog een vrij hoge wcf) en niet op die van *cementsteen*. Het cement is nog niet gehydrateerd; al het water, toegevoegd om de massa verwerkbaar te maken, is nog poriewater. Ook dat is te berekenen.

Cement bindt bij volledige hydratatie ongeveer 25% van zijn gewicht aan water in de vorm van *cementhydraten*, en nog eens 15% in de vorm van 'gelwater', dat wil zeggen water dat weliswaar niet chemisch is gebonden, maar toch ook niet zo



2

*Hydratatie van cementpasta met verschillende water-cementfactoren*  
(ontleend aan Betoniek 1/11)



3

*Volumepercentages cement, water en lucht in cementpasta en -steen, voor water-cementfactoren 0,55 en 0,7*  
(ontleend aan Betoniek 1/11)

bewegelijk is als het normale poriewater. Voor de porositeit van de cementsteen gaan we er daarom voorlopig maar van uit dat ongeveer 40% van het cementgewicht aan water gebonden kan worden. Dat betekent, toegepast op het eerdere voorbeeld, dat  $0,4 \times 320 = 128$  l water wordt gebonden. Er blijft dus  $192 - 128 = 64$  l water over. De porositeit zou bij volledige hydratatie dus

$100 \times (64 + 10) : 304 = 24\%$  bedragen.

Een niet onbelangrijk verschil met de oorspronkelijke 66%!

### Verhardingskrimp

Hierboven is met opzet gezegd dat de porositeit 24% zou bedragen. Helemaal juist is bovenstaande berekening namelijk niet. Dat komt omdat verhardende cementpasta krimpt. De hydratatieproducten nemen minder ruimte in dan het cement en water waaruit ze zijn ontstaan. Door de volumevermindering ontstaat een onderdruk in het poriesysteem, waar de reacties plaatsvinden. Door die onderdruk wil de verhardende massa zich samentrekken: er ontstaat krimp. Men noemt deze krimp verhardingskrimp, ook wel hydratatie- of chemische krimp. Verhardingskrimp uit zich overigens niet in een vermindering van het totale volume: een proefkubus heeft ook na verharding nog vrijwel dezelfde maten als de mal waarin hij is gevormd.

De in het poriesysteem optredende onderdruk zal dus op een andere manier moeten worden gecompenseerd. Dat kan doordat water uit de nabijgelegen poriën wordt aangezogen. Maar ook die poriën verbruiken water. Uiteindelijk draait het er op uit dat, afhankelijk van de wijze van nabehandeling, water dan wel lucht van buitenaf naar binnen wordt gezogen. Men kan

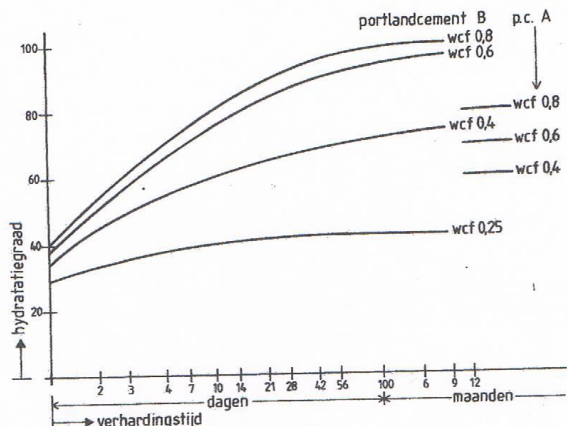
cementpasta niet gehydrateerd	cementsteen gehydrateerd								
<table border="1"> <tr><td>luchtgehalte 5%</td></tr> <tr><td>water 59%</td></tr> <tr><td>cement 36%</td></tr> </table>	luchtgehalte 5%	water 59%	cement 36%	<table border="1"> <tr><td>luchtgehalte 5%</td></tr> <tr><td>vrij water 13%</td></tr> <tr><td>fysisch gebonden water</td></tr> <tr><td>chemisch gebonden water 46%</td></tr> <tr><td>cement 36%</td></tr> </table>	luchtgehalte 5%	vrij water 13%	fysisch gebonden water	chemisch gebonden water 46%	cement 36%
luchtgehalte 5%									
water 59%									
cement 36%									
luchtgehalte 5%									
vrij water 13%									
fysisch gebonden water									
chemisch gebonden water 46%									
cement 36%									
w.c.f.=0,55									
<table border="1"> <tr><td>luchtgehalte 5%</td></tr> <tr><td>water 64%</td></tr> <tr><td>cement 31%</td></tr> </table>	luchtgehalte 5%	water 64%	cement 31%	<table border="1"> <tr><td>luchtgehalte 5%</td></tr> <tr><td>vrij water 27%</td></tr> <tr><td>fysisch gebonden water</td></tr> <tr><td>chemisch gebonden water 37%</td></tr> <tr><td>cement 31%</td></tr> </table>	luchtgehalte 5%	vrij water 27%	fysisch gebonden water	chemisch gebonden water 37%	cement 31%
luchtgehalte 5%									
water 64%									
cement 31%									
luchtgehalte 5%									
vrij water 27%									
fysisch gebonden water									
chemisch gebonden water 37%									
cement 31%									
w.c.f.=0,70									

ook zeggen dat door de verhardingskrimp extra porievolume ontstaat, die de afname van het porievolume door hydratatie gedeeltelijk weer ongedaan maakt.

Bij de normale nabehandeling van een proefkubus, dat wil zeggen bij het bewaren onder water, wordt door de verhardingskrimp zoals gezegd water naar binnen gezogen. Tijdens de verharding wordt de kubus daardoor steeds zwaarder; in 28 dagen zo'n 50 à 60 g. Voor betontechnologen een bekend verschijnsel, waarvan de oorzaak echter niet altijd wordt beseft.

Wordt beton niet onder water, maar aan de lucht bewaard, dan wordt op dezelfde manier lucht naar binnen gezogen. In het betonoppervlak ontstaat daardoor een tekort aan water, waardoor de hydratatie ter plaatse stopt. Het gevolg is een slechte oppervlaktekwaliteit.

Het belang van een goede nabehandeling, dat wil zeggen nathouden van het oppervlak tot dit voldoende gehydrateerd is, dient dus niet alleen om het verdampen van water tegen te gaan of te compenseren, maar houdt ook verband met de verhardingskrimp.



4  
 Het verloop van de hydratatie als functie van de verhardingstijd voor verschillende water-cementfactoren, voor portlandcement klasse A en B

Uit nauwkeuriger metingen dan door het wegen van een betonkubus mogelijk is, blijkt dat per 100 g gehydrateerd cement ca. 7 ml extra porievolume wordt gevormd. Voor onze 320 kg cement per m<sup>3</sup> dus ca. 22 l. De werkelijke porositeit van onze (volledig gehydrateerde) cementsteen wordt dus

$$100 \times (64 + 10 + 22) : 304 = 32\%.$$

Teruggerekend op beton betekent dit dat goed verdicht beton met een wcf van 0,6 bij volledige hydratatie een poriëngehalte van rond de 11% heeft.

#### Hydratatiegraad

Bij een wcf van 0,6 loopt het poriënaandeel van de cementpasta door de hydratatie dus terug van ongeveer 2/3 tot ongeveer 1/3. Voor de duurzaamheid van het betonoppervlak is van belang het porievolume op het moment dat de omgeving op dat beton kan inwerken. Vaak is dat al direct na het ontkisten, en op dat moment is de hydratatiegraad beslist nog geen 100%. Voor de praktijk is daarom de vraag van belang hoeveel de hydratatiegraad bedraagt op een bepaald, voor de aantasting van het oppervlak kritisch moment.

Een vraag overigens, die niet zo gemakkelijk is te beantwoorden. De hydratatiegraad hangt af van

cementsoort en -klasse, de wcf, de verhardingstemperatuur en natuurlijk van de verhardingsduur.

Zoals we gezien hebben kan ook vroegtijdige uitdroging van het oppervlak, hetzij door verdamping, hetzij door verhardingskrim, een grote invloed hebben. Overigens kan beton ook door andere oorzaken dan voortijdige uitdroging plaatselijk een andere hydratatiegraad hebben; denk bijvoorbeeld maar aan ontmenging, (vooral ook tengevolge van waterafscheiding) of aan variërende verhardingstemperaturen.

Om enigszins een idee te geven wordt in figuur 4 schematisch de invloed van verhardingstijd en wcf voor een portlandcement klasse B bij 20°C gegeven. Het is interessant om te zien, dat bij een wcf van 0,25 een hydratatiegraad van ca. 40% het maximaal haalbare lijkt te zijn. Terwijl toch voldoende water aanwezig is om al het cement te hydrateren, en bovendien nog ca. 3% water door verhardingskrim kan worden aangezogen. De verklaring hiervoor is, dat bij zo'n lage wcf de cementsteen zo dicht wordt, dat de overmaat aan water het restant van het cement niet meer kan bereiken. Het wordt volledig afgeschermd door de gevormde gel.

Wat is de porositeit van deze cementsteen?

Op 100 g cement is 25 g water toegevoegd. Als volledige verdichting wordt verondersteld, is het volume  $100 : 3,15 + 25 = 57$  ml. Bij 100% hydratatie wordt 40 ml water gebonden, (25 als hydraatwater, 15 als gelwater). Bij een hydratatiegraad van 40% dus 16 ml water. Blijft over 9 ml als effectief poriewater, of wel 16%.

Uit figuur 4 blijkt verder dat, bij een bepaalde verhardingstijd, een hogere wcf een hogere hydratatiegraad tot resultaat heeft. Bij een wcf



van 0,6 is, voor het betreffende cement, na 28 dagen de hydratatiegraad ongeveer 85%. Het poriënvolume is nu, per 100 g cement  $60 - 0,85 \times (40 - 7) = 32$  ml, bij een totaal volume van  $100 : 3,15 + 60 = 92$  ml; de porositeit is dus ca. 35%.

Op vergelijkbare wijze kan voor andere gevallen het op een bepaald moment aanwezige poriënvolume worden berekend. Als men tenminste op de een of andere manier op de hoogte is van de hydratatiegraad op dat moment. Daarbij moet worden bedacht dat de resultaten waarop figuur 4 is gebaseerd, zijn gemeten bij de hydratatie van een portlandcement klasse B, dus van een betrekkelijk fijn gemalen cement met een groot reactief oppervlak. Verwacht mag worden dat de hydratatiegraad van een klasse A cement onder dezelfde omstandigheden duidelijk lager zal zijn. Literatuurgegevens spreken over maximale hydratatiegraden van rond de 60, 70 en 80% bij watercementfactoren van resp. 0,4, 0,6 en 0,8.

Een directe meting van de hydratatiegraad is overigens niet zo eenvoudig. Zo'n meting komt in feite neer op de bepaling van het chemisch gebonden water, en mogelijk ook nog van het gelwater, bij een bekend verondersteld cementgehalte. Dat zou kunnen gebeuren door bij verschillende temperaturen te drogen. Het probleem daarbij is echter dat tijdens het droogproces de hydratatie doorgaat. Bij verhoogde temperatuur zelfs extra snel. Het is grappig dat juist de verhardingskrim een mogelijkheid biedt om de hydratatiegraad te schatten. Bij volledige hydratatie van 100 g cement werd ca. 7 ml water naar binnen gezogen. Door nu een proefstuk direct na verdichten te wegen en opnieuw na een zekere verhardingsperiode, kan een ruwe indruk worden verkregen van de verhardingskrim, daarmee van de

hoeveelheid gehydrateerd cement, en daarmee weer van de hydratatiegraad.

#### **Porositeit en permeabiliteit**

Bij de bespreking van de 15% water dat zich in het cementgel bevindt, is gezegd dat we het voorlopig niet als poriewater zouden beschouwen. Onder normale omstandigheden gedraagt het zich meer als chemisch gebonden water dan als het beweeglijke water in de capillaire poriën. Een scherpe scheiding is echter toch niet te maken. In een voldoende droge omgeving kan ook het gelwater verdampen. Aan de andere kant is het water in de capillaire poriën ook niet altijd even beweeglijk. Vloeistoffen, gassen en ionen kunnen zich gemakkelijker door de poriën bewegen naarmate de poriën grover zijn. Porositeit is dus wel een nuttige maat met betrekking tot duurzaamheid, maar zegt niet alles.

Bij eenzelfde porositeit is het materiaal met een fijnere poriestructuur in principe dichter dan een materiaal met een grovere poriestructuur. Men zegt dat het materiaal met de grove structuur meer *permeabel* is.

Voor de beoordeling van de duurzaamheid van een materiaal zou dus naast de porositeit ook de poriestructuur bekend moeten zijn. Uit deze beide grootheden zou de permeabiliteit dan min of meer kunnen worden afgeleid. Meestal geeft men er echter de voorkeur aan om de permeabiliteit rechtstreeks te meten. Hoe dat gaat en hoe de resultaten kunnen worden geïnterpreteerd is een onderwerp apart. Een onderwerp overigens dat belangrijk genoeg is om er een volgende maal op terug te komen.

#### **Literatuur**

Czernin, Cementchemie voor de bouwwereld.



BETONIEK verschijnt 10 x per jaar.  
Abonnementsprijzen per jaar, inclusief verzamelband  
voor 3 jaargangen (incl. 4% BTW):  
Nederland, Nederlandse Antillen, België f 15,-  
overige landen f 25,-

ISSN 0166-137x

administratie:  
postbus 3011, 5203 DA 's-Hertogenbosch  
telefoon (073) 150231

Abonnementen lopen per kalenderjaar. Aan het eind  
van een kalenderjaar wordt het abonnement auto-  
matisch verlengd, tenzij het abonnement vóór  
1 december schriftelijk wordt opgezegd.