

# DUURZAAM BETON DOOR BEHEERSING VAN DE WATERABSORPTIE

TECHNOLOGIE | NOVEMBER 2009



BB/SfB

- WATERABSORPTIE DOOR ONDERDOMPELING
- EISEN VOLGENS DE NORMEN
- ABSORPTIE DOOR ONDERDOMPELING EN WATERGEHALTE VAN HET BETON
- PARAMETERS VOOR DE BETONSAMENSTELLING





Het beheersen van de wateropsorping door onderdampeling vormt een essentiële voorwaarde om de duurzaamheid van het beton te garanderen. *(foto's PVA)*

Om beton duurzaam te maken is een doeltreffende en daadwerkelijke controle vereist van alle factoren die het gedrag van het materiaal in de tijd kunnen beïnvloeden. De ervaring leert dat volgende factoren veruit de belangrijkste zijn en bijgevolg nauwgezet moeten worden opgevolgd : betonsamenstelling (cementgehalte en water-cementfactor), betondekking, compactheid van het beton en bescherming van het jonge beton tijdens het verhardingsproces.

De compactheid van het beton beïnvloedt rechtstreeks zijn porositeit. Het doel van deze publicatie is de « porositeit » nader te bestuderen. Zij wordt doorgaans gecontroleerd door de wateropsorping door onderdampeling van het verharde beton te meten. Aan de hand van de norm NBN B 15-001:2004 kan beton vandaag worden voorgeschreven op prestaties, eventueel met inbegrip van specificaties voor waterabsorptie door onderdampeling. Het beheersen van de wateropsorping bij beton kan eenvoudig lijken. Nochtans moet iedereen zijn steentje bijdragen. De duurzaamheid van een bouwwerk staat of valt er immers mee.

Vertrekkend van de huidige kennis van het onderwerp worden de voornaamste parameters onderzocht waarmee aan de criteria van de norm NBN B 15-001:2004 inzake waterabsorptie door onderdampeling kan worden voldaan.

# 1. WATEROPSLORPING DOOR ONDERDOMPELING

Beton is een poreus materiaal. Het bevat met andere woorden poriën of holle ruimten. Deze poriën zijn bepalend voor de sterkte en de duurzaamheid van het beton. Een geringe porositeit vormt voor beton inderdaad de beste verdediging tegen agressieve stoffen.

Porositeit is het natuurlijke gevolg van het feit dat enerzijds meer water aanwezig is dan nodig voor de hydratatie en anderzijds de granulaten eventueel holtes kunnen bevatten. Dit heeft een ongunstig effect op de mechanische weerstand van het beton en op zijn duurzaamheid. De hoeveelheid water die door portlandcement chemisch kan worden gebonden, bedraagt ongeveer 25 % van de cementmassa. Hiernaast wordt nog een hoeveelheid water, ongeveer gelijk aan 15 % van de cementmassa, gebonden als gelwater. Dit gelwater bestaat uit water dat fysisch geadsorbeerd is aan het oppervlak van de hydratatieproducten en uit een monomoleculaire waterfilm die gebonden is tussen de vlakke kristallisatieproducten (interlayer-water). Het gelwater ontwijkt volledig in een droogstoof bij 105°C, maar is ondanks deze losse binding toch niet in staat om met het nog niet gebonden cement te reageren. Bovendien nemen de vaste hydratatieproducten een absoluut volume in dat kleiner is dan de som van de absolute volumes water en cement die reeds gereageerd hebben. Er is bijgevolg ruimte vrijgekomen binnen het omschreven volume : capillaire holten. Deze holten kunnen leeg zijn of gevuld met water. Voor een goede verwerkbaarheid van het beton wordt de W/C-factor immers meestal groter genomen dan 0,40. Een deel van het water wordt dus niet chemisch noch fysisch gebonden, en zal zich in de capillaire holten vestigen (poriënwater), waaruit het later eventueel kan verdampen. De gevormde capillaire holten betekenen een verzwakking van het beton. Aangezien agressieve stoffen via dit poriënnetwerk bovendien gemakkelijk het beton binnendringen, wordt ook de duurzaamheid nadelig beïnvloed <sup>[1]</sup>.



De porositeit van een materiaal is een maat voor het volume van de som van alle capillaire holten. Van belang is het onderscheid tussen porositeit en permeabiliteit (doorlatendheid). Zo kan een materiaal slechts weinig poreus zijn en toch zeer doorlatend (bijvoorbeeld beton met een halfopen structuur); en omgekeerd, een materiaal kan relatief poreus zijn zonder een druppel water door te laten (compact beton van zeer middelmatige kwaliteit). De porositeit wordt uitgedrukt in volume. Een porositeit van 5 % betekent dat één dm<sup>3</sup> van het beschouwde materiaal 0,05 dm<sup>3</sup> of 50 cm<sup>3</sup> inwendige capillaire holtes bevat. Ze wordt over het algemeen gemeten door een onderdompelingsproef in water bij atmosferische luchtdruk. Inderdaad, om de porositeit van een gegeven beton te bepalen volstaat het de waterabsorptie door onderdompeling (in %) te vermenigvuldigen met de droge specifieke massa (in kg/dm<sup>3</sup>) van dat beton. Veronderstel bijvoorbeeld een stuk beton van 2,2 dm<sup>3</sup> dat 5,0 kg weegt in droge toestand en 5,3 kg na langdurige onderdompeling in water. De hoeveelheid geabsorbeerd water bedraagt bijgevolg 0,3 kg of 0,3 dm<sup>3</sup>. De wateropsorping door onderdompeling is dan gelijk aan 0,3 kg/5 kg = 6 %.

De porositeit kan rechtstreeks worden afgeleid uit deze proef, namelijk  $0,3 \text{ dm}^3 / 2,2 \text{ dm}^3 = 13,6 \%$ . Is de specifieke massa van het materiaal in droge toestand gekend ( $5,0 / 2,2 = 2,27 \text{ kg/dm}^3$ ), dan kan ze ook berekend worden aan de hand van de wateropsorping ( $6 \% \times 2,27 = 13,6 \%$ ).

De wateropsorping door onderdompeling is het resultaat van vochttransport in de capillaire poriën die in verbinding staan met de omgeving. Om de waterabsorptie te bepalen wordt het betonnen proefstuk ondergedompeld tot de massa constant blijft, waarna de massatoename wordt geregistreerd. Ze wordt uitgedrukt in procent ten opzichte van de droge massa van het proefstuk. Omdat ze een beeld geeft van de porositeit, wordt de waterabsorptie gebruikt als indicator van de kwaliteit van het beton.



*Kunstwerken worden in sterke mate blootgesteld aan agressieve stoffen. Daarom moet bijzondere aandacht worden besteed aan de samenstelling en de verwerking van het beton teneinde de porositeit laag te houden. (foto's CLP)*

## Bepalen van de waterabsorptie door onderdompeling van verhard beton

De waterabsorptie door onderdompeling van beton wordt bepaald volgens de richtlijnen van de norm NBN B 15-215:1989. Sommige normatieve documenten of lastenboeken schrijven proefmethodes voor die enigszins van deze norm afwijken. Dit is vaak zo voor producten in prefab beton (zie in dit verband annex G van de norm NBN EN 13369:2004), of ook voor wegebeton. In dit laatste geval wordt de waterabsorptie door onderdompeling niet bepaald aan de hand van een proefkubus maar van een boorkern afkomstig uit het wegdek. Enkel de bovenkant van de kern (een schijf van 4 à 5 cm dikte) wordt aan de proef onderworpen, vermits dat deel blootgesteld wordt aan agressieve stoffen, met name dooizouten. De verschillen met de norm NBN B 15-215:1989 hebben vanzelfsprekend een significante weerslag op het resultaat.

### TYPES PROEFSTUKKEN

De proeven worden uitgevoerd op proefstukken die door boren of zagen zijn weggenomen uit een bouwwerk, uit een betonproduct, of uit een proefstuk dat in een mal is gegoten. Het volume van de proefstukken die aan de absorptieproef door onderdompeling worden onderworpen bedraagt minstens 800 cm<sup>3</sup> en ten hoogste 1200 cm<sup>3</sup>. Bovendien moet de verhouding V/S van volume V (in cm<sup>3</sup>) tot oppervlak S (in cm<sup>2</sup>) begrepen zijn tussen 1,2 en 2.

Noteer dat de proef meestal wordt uitgevoerd op kernen met een doorsnede van 100 cm<sup>2</sup> (diameter 113 mm) en een hoogte van 10 cm, waarbij alle oppervlakken het resultaat zijn van boren of zagen.

### BEHANDELING VAN DE PROEFSTUKKEN VÓÓR DE METINGEN

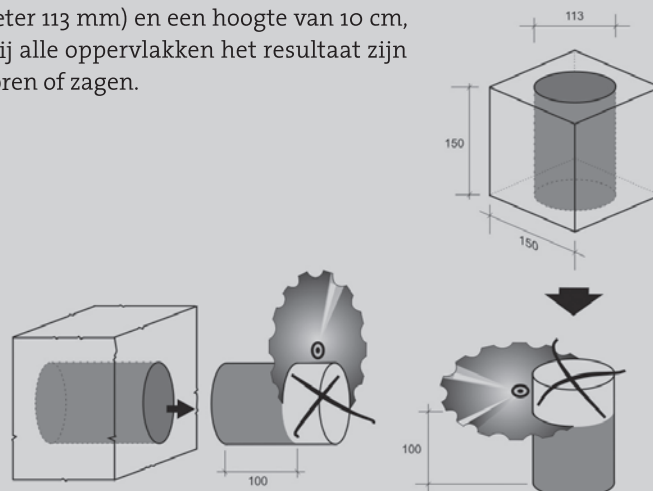
#### Gegoten proefstukken

Na ontvormen worden de proefstukken bewaard in een vochtige kamer bij een temperatuur van  $20 \pm 2$  °C en een relatieve vochtigheid van minstens 90 %, en dit tot ze 14 dagen oud zijn. Dan worden de te testen monsters op vorm gebracht (boren, zagen). De aldus geprepareerde proefstukken worden vervolgens gedurende 28 dagen aan de lucht blootgesteld bij een RV van  $60 \pm 2$  % en een temperatuur van  $20 \pm 2$  °C.

#### Proefstukken afkomstig uit een bouwwerk dat minstens 14 dagen oud is

Ze worden gedurende 28 dagen blootgesteld aan de lucht, bij een relatieve vochtigheid van  $60 \pm 2$  % en een temperatuur van  $20 \pm 2$  °C. Deze termijn kan eventueel worden ingekort tot wanneer het verschil tussen twee opeenvolgende wegingen van het proefstuk, uitgevoerd met een tussentijd van 24 uur, minder dan 0,05 % bedraagt van de massa die bij de laatste weging werd opgetekend.

*Er moet worden onderstreept dat deze behandeling in een droge kamer absoluut noodzakelijk is, opdat het water dat zich in niet onderling verbonden poriën bevindt uit het monster kan ontwijken. Zoniet zal het bij het geabsorbeerde water worden opgeteld. Uit proeven is gebleken dat het kan gaan om een hoeveelheid variërend van 0,0 tot 0,3 % t.o.v. het geabsorbeerde water, afhankelijk van het type beton.*

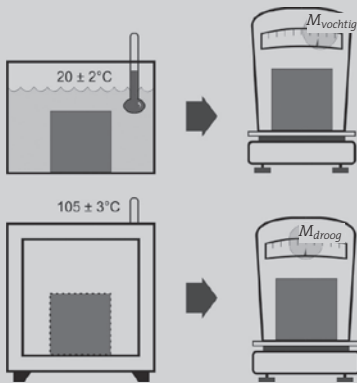


## UITVOERING VAN DE PROEF

De proef omvat de volgende verrichtingen :

- Het proefstuk onderdompelen in een bak water van  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , gedurende minimum 48 uur en tot de vochtige massa constant blijft. Het proefstuk vóór het wegen afvegen met een vochtig zeemvel teneinde het water op het oppervlak weg te nemen.
- Het proefstuk drogen gedurende minimum 72 uur en tot de droge massa constant blijft. Dit gebeurt in een geventileerde droogstoof waarin een temperatuur van  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  wordt aangehouden.

De massa wordt als constant beschouwd wanneer het verschil tussen twee opeenvolgende wegingen met een tussentijd van 24 uur niet groter is dan 0,1 %.



## WEERGAVE VAN HET RESULTAAT

De waterabsorptie door onderdompeling (Abs) wordt uitgedrukt in procent van de droge massa. Ze wordt als volgt berekend :

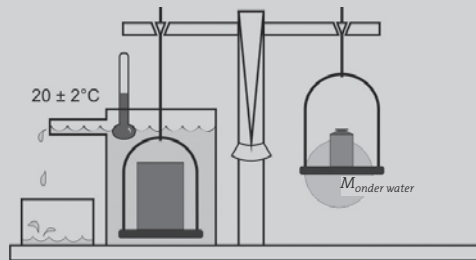
$$Abs = \frac{m_{vochtig} - m_{droog}}{m_{droog}} \times 100$$

Hierbij is

- $m_{vochtig}$  de constante vochtige massa van het proefstuk na onderdompeling ;
- $m_{droog}$  de constante droge massa van het proefstuk na droging in de droogstoof.

## Meting van de vochtige en droge volumemassa's

Het kan nuttig zijn om naast de waterabsorptie door onderdompeling ook de vochtige en droge volumemassa van het proefstuk te bepalen. Dit gebeurt volgens de richtlijnen van de norm NBN EN 12390-7:2009.



Het volume van het proefstuk wordt bepaald door hydrostatische weging. Nadat de constante vochtige massa is opgetekend, wordt de massa bepaald van het proefstuk onder water.

Het volume  $V$  van het proefstuk wordt als volgt berekend :

$$V = \frac{m_{vochtig} - m_{onder\ water}}{\rho_w (= 1000)}$$

Hierbij is

- $m_{vochtig}$ , de vochtige massa van het proefstuk, gemeten nadat het na onderdompeling weer uit het water is gehaald ;
- $m_{sous\ eau}$ , de massa van het proefstuk onder water, bepaald door hydrostatische weging ;
- $\rho_w$ , de volumemassa van het water, gelijk aan  $1000\text{ kg/m}^3$ .

De vochtige en droge volumemassa's, respectievelijk VVM en DVS, worden als volgt berekend :

$$VVM = \frac{m_{vochtig}}{V} \quad \text{en} \quad DVS = \frac{m_{droog}}{V}$$

## 2. EISEN VAN DE NORMEN NBN EN 206-1 EN NBN B 15-001

De normen NBN EN 206-1:2001 en NBN B 15-001:2004 bieden de mogelijkheid om naast de omgevingsklassen ook een klasse van waterabsorptie door onderdompeling van het verharde beton voor te schrijven. De klassen worden aangeduid met het letterwoord WAI (van het Engelse Water Absorption by Immersion) en zijn gelinkt aan het betontype. De eisen van de norm die voor de WAI-klassen gelden, zijn samengevat in tabel 1. Zo kan bijvoorbeeld voor een beton met een voorgeschreven omgevingsklasse EE4 – m.a.w. betontype T(0,45) – de waterabsorptieklasse WAI (0,45)

worden gespecificeerd. Naast de prestaties van minimum sterkteklasse C35/45, gewapend of ongewapend, omgevingsklasse EE4 – dus betontype T(0,45), W/C-factor  $\leq 0,45$  en cementgehalte  $\geq 340 \text{ kg/m}^3$  – zal het beton een waterabsorptie door onderdompeling vertonen die, gemeten op proefstukken volgens de richtlijnen van de norm NBN B 15-215, beantwoordt aan volgende eisen: gemiddelde waarde (meting op 3 proefstukken) lager dan 5,5 % en individuele waarde lager dan 6,0 %. Noteer dat de norm deze eisen vastlegt in functie van de water-cementfactor van het beton.

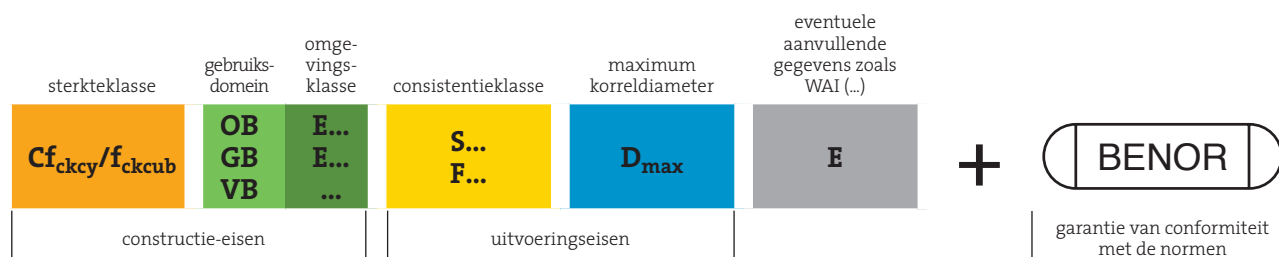
TABEL 1 –

Waterabsorptieklassen door onderdompeling en overeenkomstige duurzaamheidseisen volgens de norm NBN B 15-001:2004

Waterabsorptie door onderdompeling	Klassen	WAI (0,50)	WAI (0,45)
	Gemiddelde waarde (%)	$\leq 6,0$	$\leq 5,5$
	Individuele waarde (%)	$\leq 6,5$	$\leq 6,0$
Betontypes		T(0,50)	T(0,45)
Omgevingsklassen	Ongewapend beton	EA2	EE4 ES4 EA3
	Gewapend beton	EE3	EE4
		ES1	ES3
ES2		ES4	
	EA2	EA3	
Water-cementfactor		$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Cementgehalte ( $\text{kg/m}^3$ )		$\geq 320$	$\geq 340$
Minimum sterkteklasse		C30/37	C35/45

In deze publicatie wordt abstractie gemaakt van betonsoorten met ingebrachte lucht. Hun toepassingsgebied omvat doorgaans betonverhardingen in buitenomgeving die worden blootgesteld aan dooizouten. Op basis van de normen NBN EN 206-1:2001 en NBN B 15-001:2004 kunnen nochtans ook voor beton met luchtbelvormer grenzen worden opgelegd inzake waterabsorptie. In dat geval worden de maxima uit tabel 1 verhoogd met exact 0,3 %. Enerzijds vormen de luchtballen

een onderbreking van de capillaire poriën, waardoor de hoeveelheid geabsorbeerd water daalt ; anderzijds heeft een beton met luchtbelvormer een kleinere massa dan beton zonder ingebrachte lucht. Laatstgenoemd kenmerk geeft evenwel de doorslag, zodat de waterabsorptie, uitgedrukt in % van de droge massa van het beton, meestal hoger is. De lezer mag er evenwel van uitgaan dat de hierna uitgewerkte principes ook van toepassing zijn voor beton met luchtbelvormer.



Beton voorschrijven op prestaties betekent :

(1) verwijzen naar de normen NBN EN 206-1:2001 en NBN B 15-001:2004 ;

(2) sterkteklasse, gebruiksdomein, omgevingsklasse, consistentieklasse en maximum korreldiameter aanduiden ;

en (3) eventuele bijkomende gegevens vermelden, bijvoorbeeld de waterabsorptieklasse zoals toegelicht in annex O van de norm NBN B 15-001:2004.

Alleen deze methode laat toe beton voor te schrijven dat drager is van het BENOR-merk. Dit garandeert dat het beton aan de gespecificeerde prestatie-eisen voldoet, met inbegrip van de eventueel voorgeschreven waterabsorptieklasse.

### 3. VERBAND TUSSEN DE WATEROPSLORPING DOOR ONDERDOMPELING EN HET WATERGEHALTE VAN HET BETON

Figuur 1 geeft voor verschillende in het labo vervaardigde betonstalen de waterabsorptie door onderdompeling in functie van hun W/C-factor, los van cementtype en -gehalte, korrelverdeling enz. Wel moet worden genoteerd dat de nominale diameter van de grofste korrels steeds boven 16 mm ligt. Uit de grafiek valt geen enkele relatie af te leiden tussen de waterabsorptie door onderdompeling van verhard beton en zijn water-cementfactor.

Figuur 2 geeft het verband weer tussen de waterabsorptie door onderdompeling van verhard beton en het totale watergehalte van het beton in verse toestand. De grafiek is gebaseerd op gegevens afkomstig van verschillende betons gemaakt op bouwplaatsen. Ze werden vervaardigd op basis van verschillende cementtypes en -gehalten, en van verschillende korrelverdelingen (type en gehalte aan zand, type en gehalte aan grove korrels, maar wel allemaal van natuurlijke oorsprong en met een waterabsorptiecoëfficiënt lager dan 1%). Elk beton werd in verse en verharde toestand gecontroleerd door het labo van het Nationaal Centrum voor Wetenschappelijk en Technisch Onderzoek voor de Cementnijverheid (CRIC-OCCN).

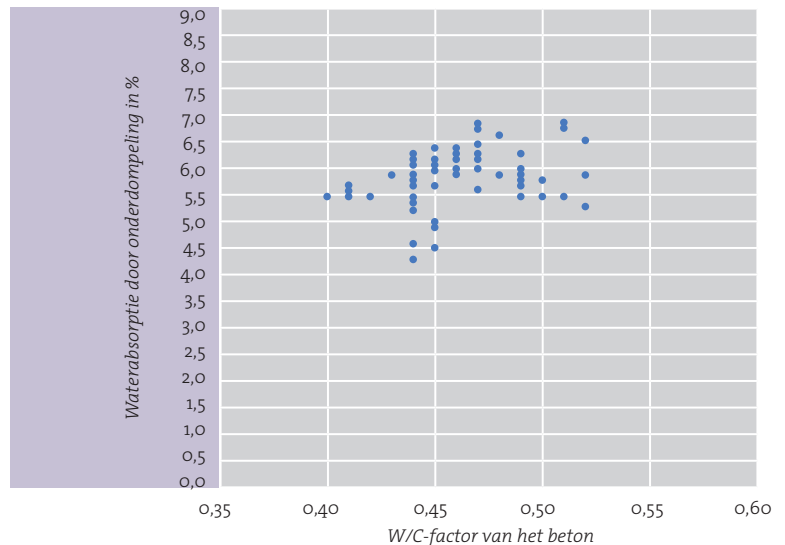
Op de bouwplaats worden doorgaans de volgende proeven op vers beton uitgevoerd :

- zetmaat, d.w.z. de slumptest met de Abramskegel volgens NBN EN 12350-2:2009 ;
- vochtige volumemassa volgens NBN EN 12350-6:2009 ;
- luchtgehalte volgens NBN EN 12350-7:2009 ;
- watergehalte volgens de methode beschreven op pagina 13 ;
- realiseren van proefstukken voor de controle van het verharde beton volgens NBN EN 12390-2:2009.

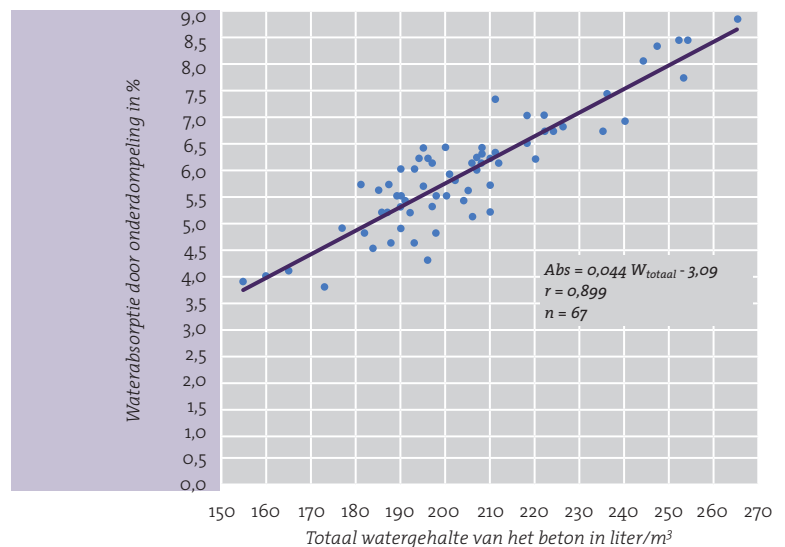
Van het verharde beton worden de volgende eigenschappen bepaald :

- druksterkte volgens NBN EN 12390-3:2009 op kubussen met zijde 15 cm ;
- waterabsorptie door onderdompeling volgens NBN B 15-215:1989, op kernen van 1 dm<sup>3</sup> geboord uit betonplaten.

De betonplaten worden na 1 dag naar het labo van CRIC-OCCN overgebracht waar ze na ontvorming worden bewaard in een vochtige kamer bij (20 ± 2) °C en meer dan 90 % relatieve vochtigheid. Na 14 dagen worden volgens de richtlijnen van



**FIGUUR 1** – Waterabsorptie door onderdompeling van verhard beton in functie van zijn W/C-factor (proeven uitgevoerd op beton gemaakt in het labo). Elk punt is het gemiddelde van 3 meetresultaten.



**FIGUUR 2** – Verband tussen waterabsorptie door onderdompeling van verhard beton en het totale watergehalte van dat beton in verse toestand. Elk punt is het gemiddelde van 3 resultaten.

de norm NBN B 15-215 drie kernen geboord. Die worden gedurende 28 dagen in een droogkamer bewaard bij (20 ± 2) °C en 60 à 65 % RV.

De eigenlijke waterabsorptieproeven vangen aan met de onderdompeling in water bij 20 °C tot wanneer de vochtige massa constant blijft, gevolgd door een verblijf in de droogstoof bij 105 °C tot wanneer de droge massa constant blijft. Behalve de waterabsorptie worden ook de vochtige en de droge volumemassa van de proefstukken bepaald, cfr. NBN EN 12390-7:2009.

Uit de grafiek kan een verband worden afgeleid met een vrij goede correlatiecoëfficiënt, zodanig dat vertrekkend van het totale watergehalte van het verse beton, de waterabsorptie door onderdompeling van het verharde beton kan worden voorspeld :

$$Abs = 0,044 \times W_{\text{totaal}} - 3,09 \quad (1)$$

Hierbij is :

- Abs (in %) de waterabsorptie door onderdompeling van het verharde beton ;
- $W_{\text{totaal}}$  (in l/m<sup>3</sup>) het totale watergehalte van het beton in verse toestand.

Noteer dat een gelijkaardig verband werd vastgelegd voor betons gefabriceerd in het labo, maar waarschijnlijk is dat niet correct. Een verklaring moet wellicht gezocht worden in het feit dat in een labo beton wordt gemaakt met droge granulaten. Op het ogenblik dat water aan het mengsel wordt toegevoegd, zullen de granulaten er een deel van absorberen. Deze hoeveelheid is evenwel zeker kleiner dan het absorptievermogen van de granulaten. De korrels worden inderdaad vrij snel door cementpasta omhuld, zodat ze er niet in slagen water te absorberen tot verzadiging. Dit is vooral het geval bij gebroken granulaten, waar het water meer oppervlak te bevochtigen heeft. Het resultaat is dat de poriën niet verzadigd raken en dat de werkelijke W/C-factor hoger is dan bij een maximale waterabsorptie door de granulaten. Aldus zal bij gelijke betonsamenstelling een beton vervaardigd met droge granulaten een lagere mechanische weerstand en een hogere waterabsorptie laten optekenen dan een beton gemaakt met vochtige granulaten, en dit bij eenzelfde totale watergehalte.

Uit vergelijking (1) kunnen we afleiden dat voor elke verhoging van het totale watergehalte met 1 liter/m<sup>3</sup>, de waterabsorptie door onderdompeling met 0,044 % stijgt.

Welnu, zoals vastgelegd in de norm NBN B 15-215 wordt de waterabsorptie door onderdompeling berekend uit de volgende vergelijking (zie kaderstuk op pagina's 4 en 5) :

$$Abs = \frac{m_{\text{vochtig}} - m_{\text{droog}}}{m_{\text{droog}}} \times 100 \quad (2)$$

met :

- $m_{\text{vochtig}}$ , de vochtige massa van het proefstuk na onderdompeling ;
- $m_{\text{droog}}$  de massa na drogen in droogstoof.

Deze vergelijking kan ook als volgt worden geschreven :

$$Abs = \frac{VVM - DVM}{DVM} \times 100 \quad (3)$$

met :

- VVM de vochtige volumemassa van het proefstuk na onderdompeling ;
- DVM de droge volumemassa van het proefstuk na drogen in droogstoof.

Wordt de teller in vergelijking (3) gelijkgesteld aan 1 en de noemer aan 2250 (gemiddelde DVM van verhard beton gelijk aan 2250 kg/m<sup>3</sup>, hetgeen een klassieke waarde is voor de droge volumemassa van gewoon beton), dan wordt Abs = 0,044 %.

Dit is precies de hellingscoëfficiënt van de rechte lijn in figuur 2 (vergelijking 1).

Uit dezelfde vergelijking (1) kan ook worden afgeleid dat het totale watergehalte waarbij de waterabsorptie gelijk is aan nul, 70 l/m<sup>3</sup> bedraagt. In feite stemt deze waarde overeen met de hoeveelheid scheikundig gebonden water (gemiddelde van 67 betonstalen). De rest van het totale watergehalte is verrekend in de waterabsorptiewaarde. Het gaat om fysisch gebonden water (gelwater), vrij water en water dat door de granulaten is geabsorbeerd. Vertaald naar waterabsorptie door onderdompeling wordt dit water genoteerd als VVM - DVM, hetgeen de teller is in vergelijking (3). Dit betekent :

$$W_{\text{totaal}} = VVM - DVM + 70 \quad (4)$$



Uit (3) en (4) volgt dan) :

$$Abs = \frac{W_{\text{totaal}} - 70}{DVM} \times 100 \quad (5)$$

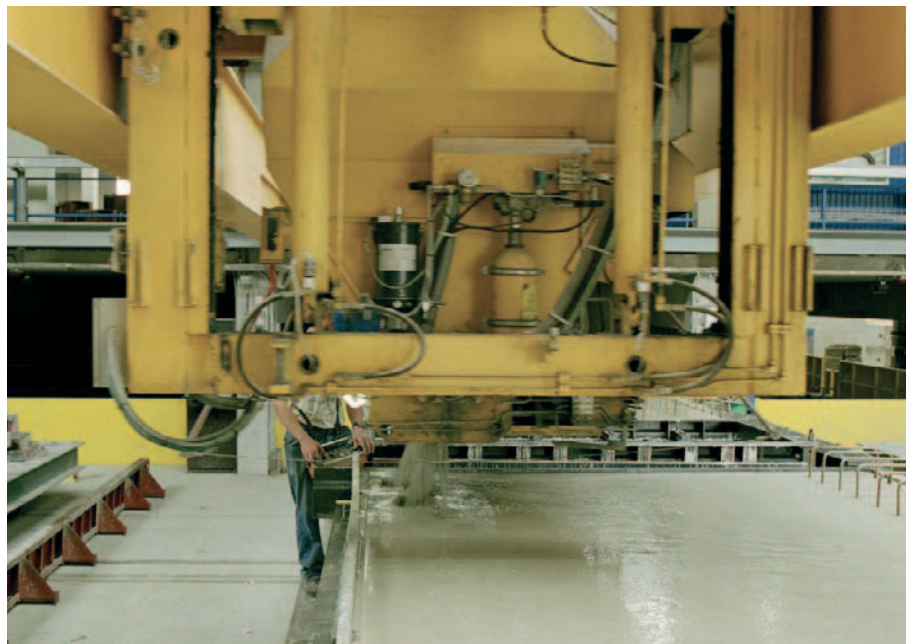
In tabel 2 staan alle resultaten die in deze analyse zijn verrekend. Er kan worden vastgesteld dat het experimenteel bepaalde watergehalte waarbij de waterabsorptie gelijk is aan nul, gemiddeld 73 l/m<sup>3</sup> bedraagt. Er is dus een zeer goede overeenkomst met de waarde bepaald uit vergelijking (1).

Figuur 3 geeft het verband tussen de waterabsorptie door onderdompeling van beton en zijn droge volumemassa, en wel voor alle hier beschouwde resultaten. Met deze figuur is het mogelijk om op basis van proefresultaten die voor een willekeurig beton de waterabsorptie door onderdompeling en de droge volumemassa geven, na te gaan of een beton aan dezelfde wetmatigheid voldoet. Vervolgens kan met vergelijkingen (1) en (5) een raming gemaakt worden van zijn totale watergehalte.

Zo te zien hangt de waterabsorptie door onderdompeling van een beton enkel af van het totale watergehalte van het beton in verse toestand. In feite wordt ze rechtstreeks bepaald door het totale watergehalte, en onrechtstreeks door alle factoren die een invloed hebben op het watergehalte van het beton. Zo moet bijvoorbeeld de impact van de kwaliteit van het zand vermeld worden. Een beton gemaakt op basis van alleen maar te fijn zand heeft geen verdere commentaar. Dergelijk zand vraagt veel aanmaakwater, waardoor de porositeit van het beton aanzienlijk stijgt. Breekzand biedt het voordeel van een beter gespreide korrelverdeling van 0 tot 4 mm. Anderzijds blijkt breekzand door de hoekige korrelvorm veel minder verwerkbaar. Om de gewenste consistentie te halen moet de cementpasta vloeibaarder worden gemaakt. Hoekig zand heeft daarom dezelfde uitwerking als fijn zand, met bovendien nog een bijkomend risico. Het vloeibaar maken van de cementpasta heeft immers een ongunstige invloed op de stabiliteit van het mengsel en leidt tot ontmenging en overvloedig uitzweten ('bleeding'). Vooral dit laatste fenomeen tast de kwaliteit van de betonhuid aan en precies aan de kwaliteit van dat oppervlaktelaagje moet voldoende aandacht worden besteed om de

duurzaamheid van het beton te verzekeren. Zand van kaliber 0/2 of 0/4, namelijk rivieren- en zeezand – dit laatste gebaggerd in de grote riviermondingen en mits strikte beperking van het gehalte aan schelpen en chloor – en in mindere mate mengsels van gewassen breekzand en fijn zand, lenen zich goed tot de fabricage van beton (figuur 4). Zij worden gekenmerkt door :

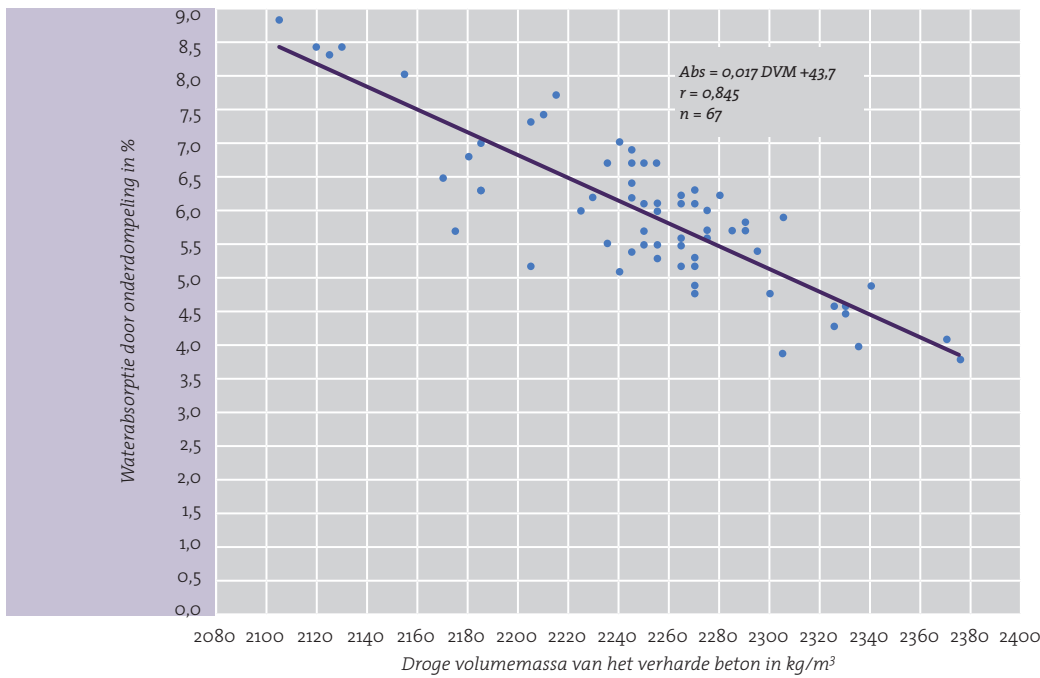
- een goede korrelverdeling : deze zandtypes bevatten hoofdzakelijk grove en vooral middelgrove korrels, met een ideale afgeronde vorm, waardoor ze slechts een minimum aan water vergen om bevochtigd te worden ;
- een laag gehalte aan fijne deeltjes (< 0,063 mm) ; het is deze fijne fractie die een 'dorstige natuur' heeft ;
- het aandeel van de korrels groter dan 2 mm beslaat niet meer dan 15 %, of beter nog, niet meer dan 10 %.



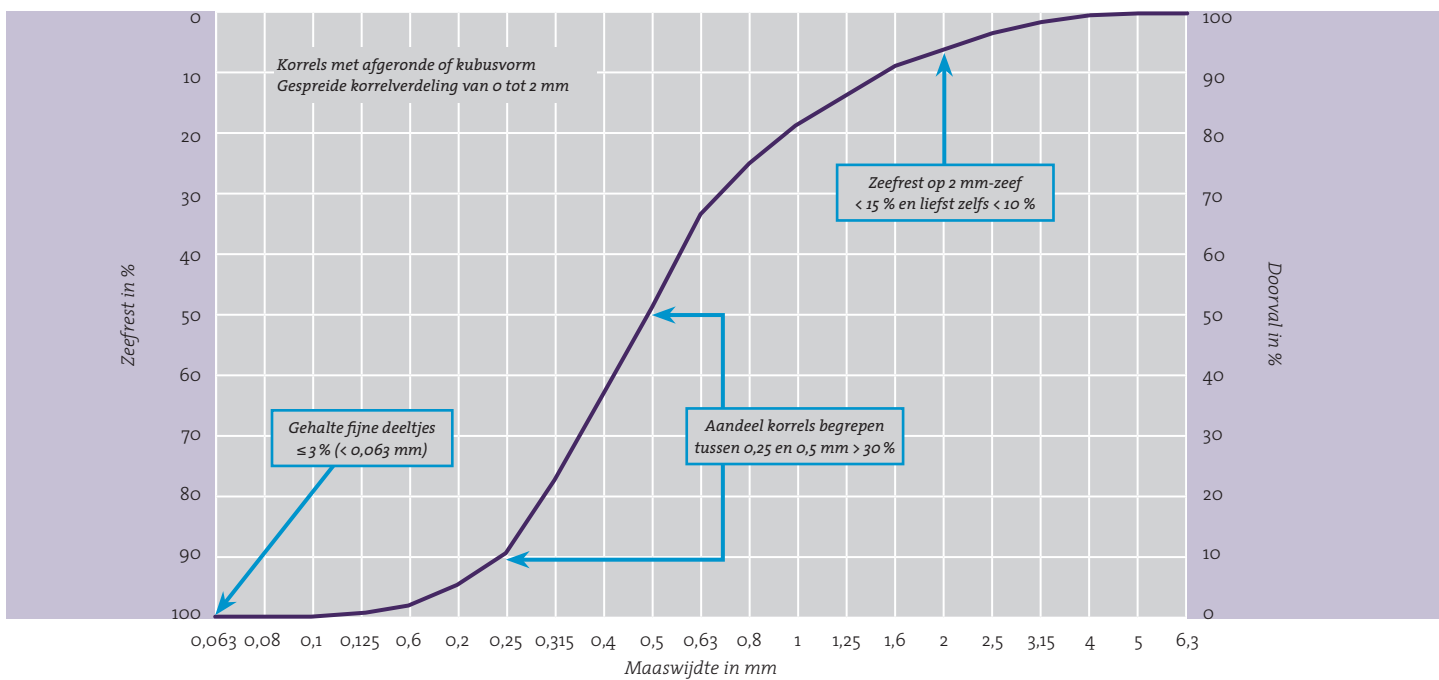
Het verband tussen de waterabsorptie door onderdompeling van verhard beton en het totale watergehalte van het beton in verse toestand geldt ook voor zelfverdichtend beton. Enkele van de resultaten in figuur 1 hebben overigens betrekking op dergelijk beton. Zelfverdichtend beton heeft een groter volume aan cementpasta dan gewoon beton en vertoont een specifiek rheologisch gedrag dat afwijkt van klassiek vloeïende betonsoorten. Omwille van dit grotere volume aan pasta zou zelfverdichtend beton een grotere porositeit kunnen hebben, maar dit vermoeden wordt ontkracht door de uitgevoerde metingen. Uit studies in verband met de invloed van de nabehandelingsmethode en de duurzaamheid van zelfverdichtend beton is bovendien gebleken dat de bestandheid van zelfverdichtend beton tegen uitwendige en inwendige vormen van aantasting onderhevig is aan mechanismen die vergelijkbaar zijn met deze gekend bij gewoon beton.

Totaal watergehalte in l/m <sup>3</sup>	Druksterkte gemeten op kubussen na 28 dagen in N/mm <sup>2</sup>	Abs in %	VVM in kg/m <sup>3</sup> (± 5 kg)	DVM in kg/m <sup>3</sup> (± 5 kg)	Geabsorbeerd water in l/m <sup>3</sup> (= VVM - DVM)	Gebonden water in l/m <sup>3</sup> (= totaal water - geabsorbeerd water)
155	62,5	3,9	2395	2305	90	65
160	67,4	4,0	2430	2335	95	65
165	88,7	4,1	2465	2370	95	70
173	63,0	3,8	2465	2375	90	83
177	47,8	4,9	2380	2270	110	67
181	51,5	5,7	2415	2285	130	51
182	48,7	4,8	2375	2270	105	77
184	59,5	4,5	2435	2330	105	79
185	46,4	5,6	2390	2265	125	60
186	57,4	5,2	2385	2265	120	66
187	56,5	5,7	2300	2175	125	62
187	50,0	5,2	2385	2270	115	72
188	53,9	4,6	2430	2325	105	83
189	48,6	5,5	2390	2265	125	64
190	76,1	4,9	2455	2340	115	75
190	72,8	5,5	2370	2250	120	70
190	55,6	5,3	2390	2270	120	70
190	41,8	6,0	2355	2225	130	60
191	73,1	5,4	2365	2245	120	71
192	57,9	5,2	2390	2270	120	72
193	53,3	4,6	2435	2330	105	88
193	51,9	6,0	2395	2255	140	53
194	54,2	6,2	2385	2245	140	54
195	56,6	5,7	2375	2250	125	70
195	52,0	6,4	2390	2245	145	50
196	76,2	4,3	2420	2325	95	101
196	56,8	6,2	2380	2245	135	61
197	57,5	5,3	2375	2255	120	77
197	51,2	6,1	2410	2270	140	57
198	81,1	4,8	2395	2300	95	103
198	54,1	5,5	2380	2255	125	73
200	46,4	5,5	2360	2235	125	75
200	54,2	6,4	2395	2255	140	60
201	45,0	5,9	2440	2305	135	66
202	51,8	5,8	2420	2290	130	72
204	47,8	5,4	2420	2295	125	79
205	74,8	5,6	2390	2275	115	90
206	51,0	5,1	2385	2240	145	61
206	46,0	6,1	2395	2255	140	66
207	44,5	6,2	2405	2265	140	67
207	59,8	6,0	2415	2275	140	67
208	52,2	6,3	2410	2270	140	68
208	48,3	6,1	2405	2265	140	68
208	42,5	6,4	2385	2245	140	68
210	70,9	5,2	2325	2205	120	90
210	68,6	6,2	2365	2230	135	75
210	40,2	5,7	2420	2290	130	80
210	45,1	5,7	2405	2275	130	80
211	43,9	7,3	2360	2205	155	56
211	75,4	6,3	2325	2185	140	71
212	45,4	6,1	2385	2250	135	77
218	35,3	7,0	2335	2185	150	68
218	74,7	6,5	2310	2170	140	78
220	48,2	6,2	2420	2280	140	80
222	49,7	6,7	2385	2235	150	72
222	43,0	7,0	2395	2240	155	67
224	38,0	6,7	2390	2245	145	79
226	34,0	6,8	2330	2180	150	76
235	31,3	6,7	2375	2250	125	110
236	42,5	7,4	2370	2210	160	76
240	43,0	6,9	2400	2245	155	85
244	42,4	8,0	2325	2155	170	74
247	41,9	8,3	2300	2125	175	72
252	35,8	8,4	2310	2130	180	72
253	35,9	7,7	2350	2215	135	118
254	41,6	8,4	2300	2120	180	74
265	39,6	8,8	2285	2105	180	85
<b>Gemiddelde</b>						
205	53,1	6,0	2385	2250		73,0

TABEL 2 – Synthese van de verkregen resultaten uit 67 betons gemaakt op de bouwplaats



**FIGUUR 3** – Verband tussen de waterabsorptie door onderdempeling van verhard beton en zijn droge volumemassa. Betons gemaakt op de bouwplaats. Elk punt is het gemiddelde van 3 resultaten.

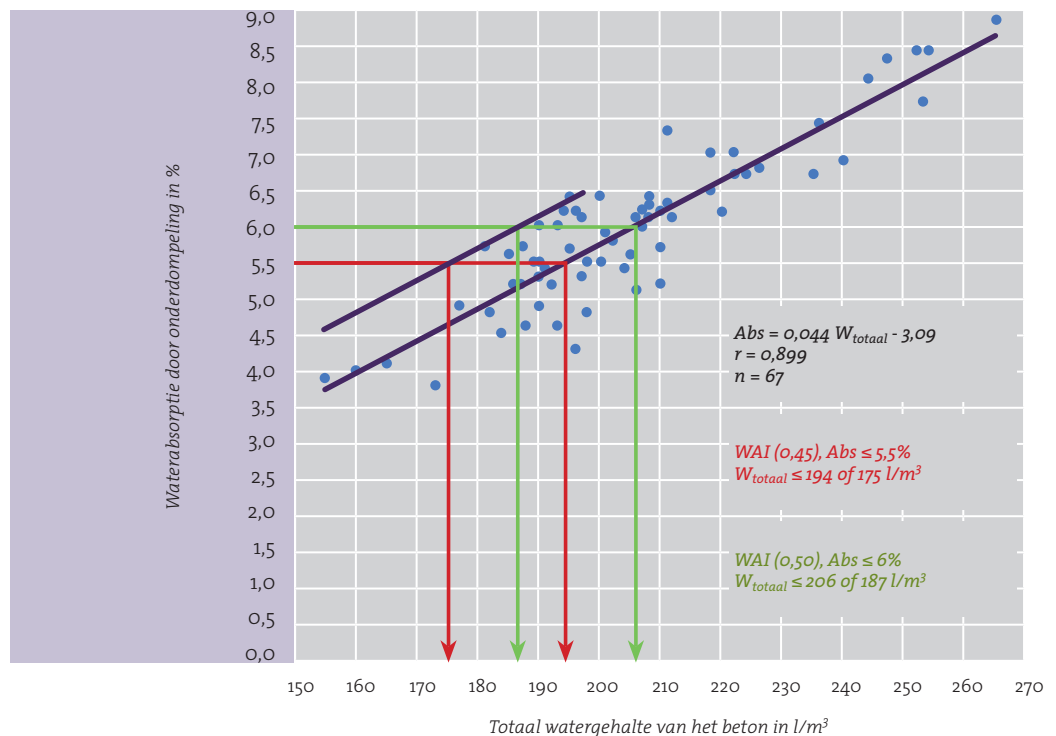


**FIGUUR 4** – Kenmerken van goed betonzand.

## 4. « MINIMALE » BETONSAMENSTELLING WAARBIJ VOLDAAN WORDT AAN DE EISEN VOOR WATERABSORPTIE DOOR ONDERDOMPELING EN AAN DE WATER-CEMENTFACTOR IN FUNCTIE VAN DE OMGEVINGSKLASSEN

Vertrekkend van de grafiek die het verband geeft tussen de waterabsorptie door onderdompeling van het verhard beton en het totale watergehalte van dat beton in verse toestand (figuur 2), kunnen de voornaamste parameters van de betonsamenstelling worden vastgelegd, zodat aan alle in tabel 1 vermelde eisen van de norm NBN B 15-001:2004 wordt voldaan.

Aan de hand van figuur 5 kan inderdaad het watergehalte van het verse beton bepaald worden dat niet mag overschreden worden om te voldoen aan de voorgeschreven waarden voor waterabsorptie door onderdompeling.



**FIGUUR 5** – Totaal watergehalte dat niet mag overschreden worden om een lage waterabsorptie door onderdompeling te garanderen

Indien als totaal watergehalte enkel de waarde wordt beschouwd die volgt uit de regressielijn – namelijk 206 en 194 l/m<sup>3</sup> voor respectievelijk WAI(0,50) en WAI(0,45) – dan blijft het risico bestaan dat een hogere uitkomst voor de waterabsorptie wordt verkregen dan de geschatte. Daarom is evenwijdig met de regressielijn een tweede lijn getekend. Deze rechte loopt door de hoogste waarde voor de waterabsorptie door onderdompeling die werd vastgesteld in het gebied onder de 6 % absorptie. Met deze rechte kunnen twee waarden voor de totale waterhoeveelheid van het verse beton worden bepaald, onder dewelke nooit een waterabsorptie is waargenomen die hoger lag dan de vereiste:

- voor WAI(0,45) moet het totale watergehalte lager blijven dan 175 l/m<sup>3</sup> ;
- voor WAI(0,50) moet het totale watergehalte lager blijven dan 187 l/m<sup>3</sup>.

Welnu, onder totale watergehalte van het beton ( $W_{\text{totaal}}$ ), wordt verstaan :

$$W_{\text{totaal}} = W_{\text{granulaten}} + W_{\text{toegevoegd}} + W_{\text{hulpstoffen}} \quad (6)$$

In verband hiermee stelt de norm dat enkel het effectieve watergehalte ( $W_{\text{eff}}$ ) werkzaam is. Anders uitgedrukt, het water dat door de granulaten wordt geabsorbeerd, moet niet meegeteld worden bij de berekening van de W/C-factor, omdat het de kwaliteit van de cementmatrix niet beïnvloedt. Eenvoudigheidshalve wordt aangenomen dat de granulaten die doorgaans in België worden gebruikt (natuurlijke of weinig poreuze granulaten zoals kalksteen, profier,...) ongeveer 10 liter water per m<sup>3</sup> beton opslorpen :

$$W_{\text{eff}} = W_{\text{totaal}} - 10 \quad (7)$$



Zoals andere materialen wordt ook beton blootgesteld aan de impact van vervuiling; het vervuult al of niet snel, en zelden op een uniforme manier. Dit complexe fenomeen wordt versterkt in functie van de oorsprong van de vervuilende elementen – mineralen en micro-organismen – en van factoren als klimaat, wind en oriëntatie. Beton van goede kwaliteit, met een lage porositeit, draagt bij tot de beperking van de vervuiling van het geveleppervlak omdat het beter weerstand biedt tegen de indringing van agressieve stoffen. (© arch. L. Binst / Crepain Binst Architecture nv)

Dit betekent :

- voor T(0,45) en WAI(0,45) moet het effectieve watergehalte lager blijven dan  $165 \text{ l/m}^3$ . Omdat de W/C-factor kleiner moet zijn dan 0,45, bedraagt het minimum cementgehalte  $367 \text{ kg/m}^3$ , en dit onafhankelijk van het type cement en het korrelskelet van het beton ;
- voor T(0,50) en WAI(0,50) moet het effectieve watergehalte lager blijven dan  $177 \text{ l/m}^3$ . Omdat de W/C-factor kleiner moet zijn dan 0,50 is dus een minimum cementgehalte van  $354 \text{ kg/m}^3$  vereist, onafhankelijk van het type cement en het korrelskelet van het beton.

Het is belangrijk dat deze gehalten aan water en cement gekend zijn en ook toegepast worden. Is dit niet het geval, en wordt een watergehalte gekozen in de buurt van bovenvermelde waarden ( $170$  à  $180 \text{ liter/m}^3$ ), en een cementgehalte dat

voldoet aan de minimumeis van de norm (zie tabel 1), dan wordt de hoeveelheid cementpasta weliswaar beperkt, maar ze is van lagere kwaliteit (water-cementfactor niet gerespecteerd).

Anderzijds, met een watergehalte dat beperkt wordt om nauwgezet te voldoen aan de voorgeschreven W/C-factor zal het beton een cementpasta van goede kwaliteit bevatten, maar in een te geringe hoeveelheid om aan het verse beton een goede interne cohesie te verlenen. Er mag niet uit het oog worden verloren dat met een lichte overmaat aan cementpasta (en dus ook aan aanmaakwater) een betere verwerkbaarheid en een betere omhulling van wapeningen en granulaten worden bereikt, hetgeen ook gunstig is voor de weerstand tegen corrosie. Een grotere cohesie tussen de verschillende korrels van het betonskelet maakt de betonspecie ook beter bestand tegen ontmenging.

## 5. BESLUIT

Om beton te beschermen tegen uitdroging, bestaan er verschillende oplossingen : een voldoende lange ontkistingstermijn voorzien, verstuiven van een curing compound, het beton afdekken met een plastic folie, een zeil of vochtige dekens, of het onder water zetten. (Foto's PVA)



De lezer moet onthouden dat de duurzaamheid van beton het resultaat is van een lage porositeit, een goede verwerking (betondekking, geen ontmenging,...) en van een voldoende cementgehalte. Het cement is het bestanddeel dat verantwoordelijk is voor de alkalische eigenschappen van beton en een reserve aan alkaliniteit vormt een natuurlijke barrière tegen carbonatatie. Daarom moeten onderstaande fundamentele regels gerespecteerd worden :

- voor beton van sterkteklasse C35/45 of hoger en waterabsorptieklasse WAI (0,45) :  
cementgehalte  $\geq 370 \text{ kg/m}^3$  en totaal watergehalte  $\leq 175 \text{ l/m}^3$  ( $W/C \leq 0,45$ ) ;
- voor beton van sterkteklasse C30/37 en waterabsorptieklasse WAI(0,50) :  
cementgehalte  $\geq 350 \text{ kg/m}^3$  en totaal watergehalte  $\leq 185 \text{ l/m}^3$  ( $E/C \leq 0,50$ ) ;
- een continu korrelskelet en gebruik van goed betonzand (ronde korrels met een gespreide korrelverdeling van 0 tot 2 mm) ;
- verwerkbaarheid in overeenstemming met de verwerkingsmiddelen ; afhankelijk van de waterbehoefte van de betonbestanddelen moet de vloeibaarheid aangepast worden door het toevoegen van een (super)plastificeerder ;
- het beton na verwerking doeltreffend en gedurende een voldoende lange tijdspanne beschermen tegen uitdroging.

Alle actoren van het bouwproces hebben er belang bij zorg te besteden aan het materiaal dat zij aanwenden. Zij moeten voor ogen houden dat beton maar duurzaam is wanneer het correct is samengesteld. Het cementgehalte en de waterdosering zijn hiervan een onderdeel.

Tot slot, het verse beton onmiddellijk na het verwerken beschermen tegen uitdroging, blijft een essentiële opdracht. Het meest kritisch zijn de niet bekiste betonoppervlakken, vermits zij worden blootgesteld aan zon en wind. De controle van de doeltreffende bescherming tegen het voortijdig verdampen van het water nodig voor de hydratatie bekleedt een belangrijke functie met het oog op het gedrag van het beton tijdens de latere gebruiksfase. Blijft deze bescherming in gebreke dan ontstaat aan het betonoppervlak een tekort aan water nodig voor de hydratatie van het cement. De betonhuid zal poreuzer zijn, de kleine en grotere inwendige holten vormen doorsteken voor allerhande agressieve stoffen.

## Bepalen van het watergehalte van vers beton

### PRINCIPE VAN DE METHODE

Een hoeveelheid vers beton wordt gedroogd met behulp van een intense warmtebron, en wel zo snel mogelijk om te vermijden dat waterverlies plaatsvindt door binding met het cement.

Met de hierna beschreven methode kan het totale watergehalte van het verse beton bepaald worden ; om het effectieve watergehalte te kennen, moet rekening worden gehouden met het water dat door de granulaten geabsorbeerd wordt.

### UITRUSTING

- Een recipiënt met een inhoud van ongeveer 10 liter, die hermetisch kan worden afgesloten.
- Een weegschaal waarmee een hoeveelheid vers beton tot op 10 g nauwkeurig kan worden gewogen.
- Een vlakke metalen schaal met een oppervlakte van minstens 2000 cm<sup>2</sup> en voldoende hoge randen.
- Een krachtige warmtebron waarmee een temperatuur van 300 °C kan worden gehaald (gasvuur, kookplaat).
- Gereedschap om het beton om te roeren (kleine hark, truweel, enz.).

### MONSTERNEMING

De betonmonsters worden genomen conform de norm NBN EN 12350-1:2009.

De hoeveelheid beton die aan de proef onderworpen wordt, bedraagt 4 à 5 liter. Dit komt neer op een vochtige betonmassa van 10 à 12 kg (beton met een normale volumemassa begrepen tussen 2350 et 2450 kg/m<sup>3</sup>).

De proef moet zo snel mogelijk na de monster-neming beginnen. Tot dan wordt het monster bewaard in een hermetisch gesloten recipiënt.

### VERLOOP VAN DE PROEF

- De metalen schaal en het roergereedschap tot op 10 g nauwkeurig wegen : noem  $m_0$  de massa van schaal en gereedschap, uitgedrukt in gram.
- Spreid het verse beton uit in de schaal en weeg het geheel tot op 10 g nauwkeurig : noem  $m_1$  de gezamenlijke massa van schaal, gereedschap en beton, uitgedrukt in gram.
- Droog het beton door het op te warmen boven de warmtebron.



Controle van het verse beton op de bouwplaats. Op de achtergrond : beton wordt gedroogd met het oog op het bepalen van het watergehalte.

- Roer het beton regelmatig om tijdens het drogen.
- Vermijd elk materiaalverlies.
- Het drogen moet worden voortgezet tot het gewichtsverlies van het beton, gemeten tussen twee opeenvolgende wegingen met een tussentijd van minstens 15 minuten, kleiner is dan 0,1 %.
- Weeg het geheel na drogen opnieuw tot op 10 g nauwkeurig: noem  $m_2$ , uitgedrukt in gram, de massa van schaal, gereedschap en gedroogd beton.

*NB : Drogen in een droogstoof bij 105 °C is geen optie. Deze werkwijze verloopt immers te traag,; het water dat door het cement gebonden is, zal niet kunnen verdampen.*

### WEERGAVE VAN HET RESULTAAT

Het totale watergehalte van het verse beton  $w$ , uitgedrukt in procent van de droge massa, wordt berekend met de formule :

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100$$

Het resultaat wordt uitgedrukt tot één cijfer na de komma.

Vertrekkend van de vochtige volumemassa  $VVM$  van het verse beton, uitgedrukt in kg/m<sup>3</sup> en bepaald volgens de richtlijnen van de norm NBN EN 12350-6:2009, kan het totale watergehalte van het verse beton  $W_{\text{totaal}}$  (l/m<sup>3</sup>) gevonden worden aan de hand van de volgende formules :

$$DVM = \frac{VVM}{1 + w/100} \text{ en } W_{\text{totaal}} = VVM - DVM$$

Hierbij is  $DVM$  de droge volumemassa van het beton, uitgedrukt in kg/m<sup>3</sup>.  $W_{\text{totaal}}$  wordt weergegeven tot op de eenheid nauwkeurig.



T-2

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

Cover foto's :  
A. Nullens

Wettelijk depot :  
D/2009/0280/12

V.U.: A. Jasienski

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] **Betontechnologie**  
Brussel : BBG - Belgische Betongroepering, 2006
- [2] **NBN B 15-001:2004 : Aanvulling op NBN EN 206-1:2001 - Beton - Specificaties, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit**  
Brussel : BIN, 2004
- [3] **NBN EN 206-1:2001 : Beton – Deel 1 : Specificatie, eigenschappen, vervaardiging et conformiteit**  
Brussel : BIN, 2001
- [4] **NBN B 15-215:1989 : Proeven op beton – Wateropsorping door onderdompeling**  
Brussel : BIN, 1989
- [5] **NBN EN 13369:2004 : Algemene bepalingen voor geprefabriceerde betonproducten**  
Brussel : BIN, 2004
- [6] **La maîtrise de l'eau dans le béton hydraulique – Guide technique**  
Parijs : LCPC, 2001
- [7] **NEVILLE A.**  
**Propriétés des bétons**  
Parijs : Eyrolles, 2000

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