

Deel 3: Proeven op verhard beton

Zelfverdichtend beton volgens de Chinese methode

ir. H.J. Radix en dr.ir. H.J.H. Brouwers, Universiteit Twente, faculteit Construerende Technische Wetenschappen, afdeling Bouwtechnologie

In het eerste artikel in een serie van drie is de theorie besproken achter een Chinese methode om zelfverdichtend-betonmengsels te ontwerpen. In het tweede artikel zijn de resultaten van proeven met pasta en betonspecie behandeld. Drie verschillende mengsels zijn ontworpen die voldoen aan de eisen die in de verse toestand aan ZVB worden gesteld. In dit artikel komen de sterkte- en duurzaamheidsproeven op het verhard beton aan de orde [1].

De volumieke massa is bepaald op kubussen (riblengte 150 mm), een en ander conform NEN 5967:

1988. Tabel 1 bevat de resultaten. De verschillen tussen charges met dezelfde mengselsamenstelling zijn ook onderzocht. Het verschil in volumieke massa blijkt kleiner dan 1% te zijn.

Druk- en splijtsterkte

De bepaling van de druksterkte van de proefstukken is uitgevoerd conform NEN 5968: 1988 op kubussen met 150 mm riblengte. Bepalingen zijn in vijfvoud uitgevoerd op een ouderdom van 1, 3, 7 en 28 dagen (tabel 2 en fig. 1). De druksterkte van mengsel C is het hoogste, waarschijnlijk dankzij de toepassing van fijn zand 0-1 mm. De druksterkte van mengsel B (toevoeging van metselzand 0-2 mm) blijkt het laagste. Verwacht was echter dat deze tussen die van mengsels A en C in zou liggen. Bij bepalingen op vijf proefstukken is de karakteristieke waarde (ondergrens) gelijk aan:

$$\bar{x}_5 - 2,37 S_5 \quad (1)$$

Hier is 2,37 de excentriciteitsfactor. Deze is 1,53 als conform NEN 5950: 1995 minimaal twaalf bepalingen plaatsvinden.

Tabel 3 toont de karakteristieke druksterkte van de drie verschillende mengsels op een ouderdom van 28 dagen. Uit de resultaten blijkt dat de drie mengsels

kunnen worden geclassificeerd als sterkteklasse B 45.

In het eerste artikel is besproken dat in de Chinese methode het cement wordt beschouwd als de primaire factor die de eindsterkte van het beton bepaalt. De vereiste hoeveelheid cement is gelijk aan de gewenste karakteristieke 28-daagse kubusdruksterkte gedeeld door de druksterkte die elke kilogram cement per m³ betonspecie levert.

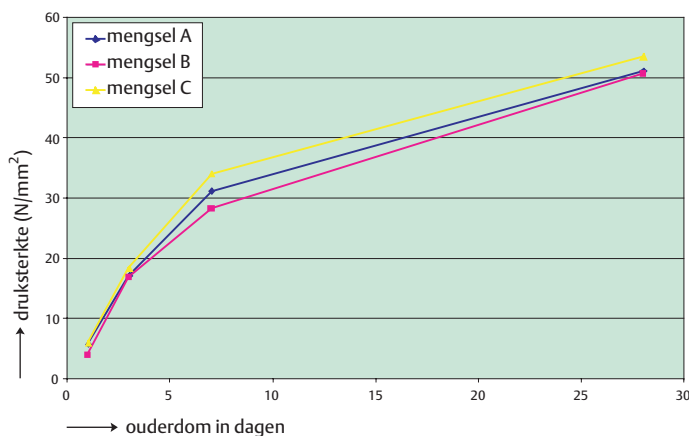
Tabel 1 | Volumieke massa van de drie verschillende mengsels

	mengsel A	mengsel B	mengsel C
gemiddelde volumieke massa [kg/m ³]	2367	2358	2350
standaardafwijking [kg/m ³]	33,3	13,0	7,5
variatiëcoëfficiënt [-]	0,014	0,055	0,003

Tabel 2 | Kubusdruksterkte na 1, 3, 7 en 28 dagen [N/mm²]

1 dag	mengsel A	mengsel B	mengsel C
gemiddelde druksterkte	5,7	3,9	5,9
standaardafwijking	0,1	0,7	0,1
variatiëcoëfficiënt [%]	2,4	16,8	1,8
3 dagen			
gemiddelde druksterkte	17,2	16,9	18,4
standaardafwijking	0,3	0,6	0,2
variatiëcoëfficiënt [%]	1,9	3,6	1,0
7 dagen			
gemiddelde druksterkte	31,2	28,3	34,0
standaardafwijking	1,8	0,8	1,0
variatiëcoëfficiënt [%]	5,7	2,8	3,0
28 dagen			
gemiddelde druksterkte	51,2	50,7	53,6
standaardafwijking	1,5	1,7	1,8
variatiëcoëfficiënt [%]	3,0	3,3	3,4

1 | Ontwikkeling in de tijd van de gemiddelde kubusdruksterkte



Tabel 3 | Bepaling karakteristieke druksterkte

	mengsel A	mengsel B	mengsel C
gemiddelde druksterkte [N/mm ²]	51,2	50,7	53,6
standaardafwijking [N/mm ²]	1,5	1,7	1,8
karakteristieke kubusdruksterkte [N/mm ²]	47,6	46,7	49,3

Tabel 4 | Kubusdruksterkte per kilogram cement

mengsel	hoeveelheid cement [kg/m ³ beton]	kubusdruksterkte	kubusdruksterkte
		na 28 dagen [N/mm ²]	per kilogram cement [N/mm ² /kg/m ³ beton]
A	310	47,6	0,154
B	315	46,7	0,148
C	320	49,3	0,154

Tabel 4 geeft aan hoe groot de bijdrage aan de kubusdruksterkte is als de 28-daagse karakteristieke waarden als uitgangspunt worden genomen. In China is de ervaring dat per kilogram cement (portland) een bijdrage aan de kubusdruksterkte van 0,11 - 0,14 N/mm² wordt verkregen [2, 3].

Uit de resultaten blijkt dat per kilogram van het gebruikte CEM III/B 42,5 N LH/HS een bijdrage van ongeveer 0,15 N/mm² wordt geleverd. Deze waarde komt overeen met resultaten die door ENCI zijn verkregen, namelijk 0,13 - 0,16 N/mm² (cementgehalte 330 kg/m³; water-cementfactor circa 0,50; toeslagmateriaal hard, dicht, rond, nominaal 31,5 mm; gradering A31,5-B31,5, consistentiegebied 3) [4]. Het in Nederland gevonden resultaat ligt hoger dan dat uit China. Er wordt op gewezen dat de resultaten uit China zijn gebaseerd op portlandcement, terwijl in het hier beschreven onderzoek CEM III is gebruikt.

De splijttrekproeven zijn uitgevoerd conform NEN 5969: 1988 op kubussen met 150 mm riblengte. Ook hier vijf bepalingen per ouderdom van 1, 3, 7 en 28 dagen. Tabel 5 en figuur 2 bevatten de resultaten.

De treksterkte van beton wordt meestal gerelateerd aan de druksterkte. De ontwikkeling van de treksterkte voldoet daarmee aan de verwachting, aangezien mengsel C de hoogste treksterkte heeft en mengsel B de laagste. In Neder-

land wordt de splijttreksterkte van normaal beton berekend als [5]:

$$f_b = 1 + 0,05 \cdot f_c \text{ in N/mm}^2 \quad (2)$$

In figuur 3 is de druksterkte uitgezet tegen de splijttreksterkte van de verschillende mengsels op een ouderdom van 28 dagen. In de figuur is tevens de relatie volgens vgl. (2) getoond. Nu blijkt dat de

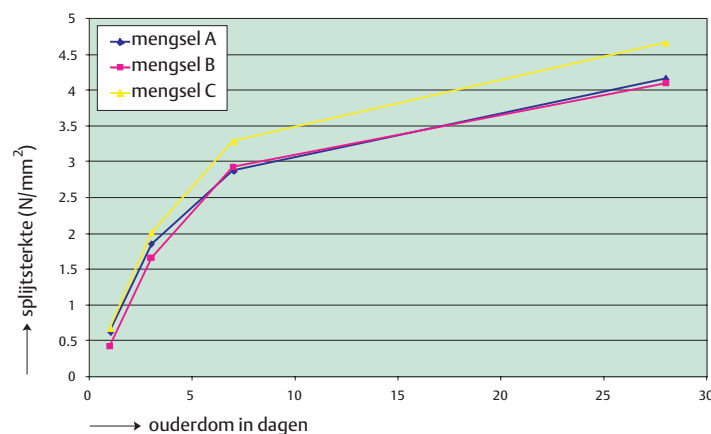
gemeten splijttreksterkte boven de rekenwaarde ligt. Dit is in overeenstemming met eerder uitgevoerd onderzoek [6], waarin ook werd geconcludeerd dat de splijttreksterkte van ZVB systematisch hoger ligt dan die van normaal beton. Ook blijkt dat het verschil tussen de verwachtingswaarde en de gemeten splijttreksterkte toeneemt naarmate de druksterkte van het beton hoger is. Als reden hiervoor wordt de betere kwaliteit van het contactvlak tussen de cementsteenmatrix en de grove toeslag genoemd [6].

Duurzaamheid

De mate waarin vloeistoffen het beton kunnen binnendringen en door het korrelskelet kunnen stromen bepaalt in belangrijke mate de duurzaamheid van het beton. Twee mechanismen zijn van belang bij het transport van

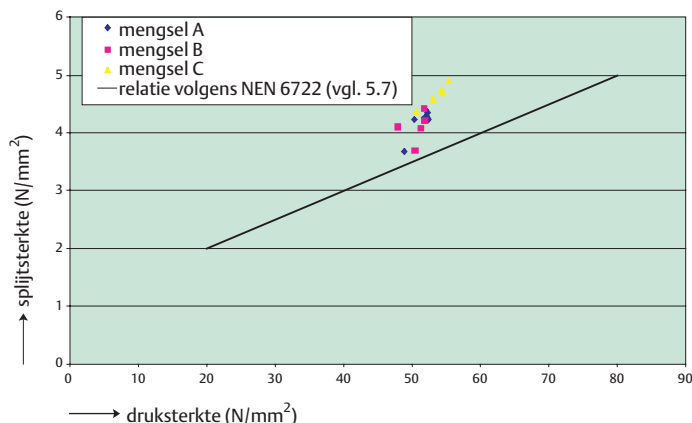
Tabel 5 | Splijttreksterkte na 1, 3, 7 en 28 dagen [N/mm²]

1 dag	mengsel A	mengsel B	mengsel C
gemiddelde splijttreksterkte	0,6	0,4	0,7
standaardafwijking	0,02	0,12	0,01
variatiecoëfficiënt [%]	0,026	0,027	0,018
3 dagen			
gemiddelde splijttreksterkte	1,9	1,7	2,0
standaardafwijking	0,09	0,14	0,08
variatiecoëfficiënt [%]	0,050	0,085	0,040
7 dagen			
gemiddelde splijttreksterkte	2,9	2,9	3,3
standaardafwijking	0,14	0,10	0,16
variatiecoëfficiënt [%]	0,0496	0,034	0,048
28 dagen			
gemiddelde splijttreksterkte	4,2	4,1	4,7
standaardafwijking	0,27	0,27	0,20
variatiecoëfficiënt [%]	0,065	0,065	0,042



2 | Ontwikkeling in de tijd van de gemiddelde splijttreksterkte

3 | Relatie splijttreksterkte – kubusdruksterkte (conform de theorie voor 'normaal' beton en proefresultaten)



vloeistoffen, namelijk permeabiliteit en absorptie. Permeabiliteit is een maat voor het stromen van een vloeistof onder druk in een verzadigd medium en absorptie is het vermogen om water te absorberen door capillaire zuiging. Beide mechanismen zijn onderzocht voor de drie mengsels.

De indringingsdiepte van water is bepaald door kubussen (riblengte 150 mm; ouderdom 28 dagen) in een testopstelling te plaatsen en op een zijvlak een waterdruk van

5 bar (0,5 MPa) aan te brengen, een en ander conform NEN-EN 12390-8. De kubussen zijn na 72 uur uit de testopstelling genomen en vervolgens loodrecht op het beproefde oppervlak gespleten (conform NEN 5969). De ligging van het waterindringingsfront is na enige tijd waar te nemen, waarna de grootste afstand waarover indringing heeft plaatsgehad, wordt gemeten (fig. 4). De waterindringing is per mengsel op twee proefstukken bepaald. Tabel 6 bevat de resultaten.

De resultaten laten zien dat de toevoeging van fijn zand 0-1 mm en 0-2 mm een gunstige invloed heeft op de waterindringing: De indringing is bij mengsel B enigszins lager dan bij mengsel A en bij mengsel C is duidelijk te zien dat de indringing aanzienlijk is afgenomen door de toepassing van fijn zand 0-1 mm. Door toepassing van fijn zand zijn mogelijk een betere pakking en verdichting van het mengsel bereikt, waardoor een dichtere en minder doordringbare matrix is verkregen.

Beton met een waterindringingsdiepte kleiner dan 50 mm wordt als zijnde ondoorlatend beschouwd [5]. Alle drie de mengsels voldoen hieraan.

De capillaire absorptie is bepaald door kubussen (riblengte 150 mm) in een dun laagje water te plaatsen. De toename van de massa van een kubus geeft aan hoeveel water door capillaire zuiging is opgenomen [7, 8]. De test is in twee-

voud uitgevoerd met kubussen met een ouderdom van 28 dagen. Voorafgaand aan de test zijn de kubussen gedurende 48 uur gedroogd in een oven bij 105 ± 5 °C. Na 24 uur afkoeling bij een omgevingstemperatuur van ongeveer 20 °C zijn de kubussen op twee stalen staven Ø10 mm geplaatst, zodanig dat het waterniveau tot 5 ± 1 mm boven de onderzijde van de kubus reikte. De test werd uitgevoerd op de ondermalzijde van de kubus. Voorafgaand aan de test en na 1/4, 1/2, 1, 3, 6, 24, 72 en 168 uur absorptie werd de massa van de kubus bepaald. Ook werd de hoogte van de capillaire stijging gemeten in het midden van de vier zijvlakken.

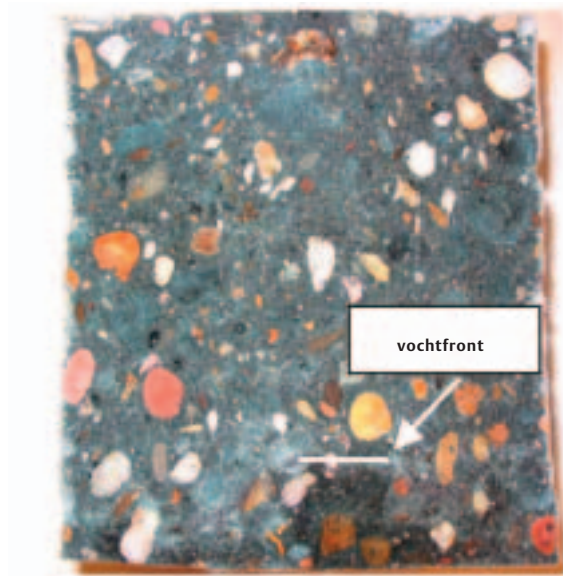
Figuren 5 en 6 tonen de resultaten, respectievelijk de toename van de massa en de capillaire stijghoogte.

Tussen de opzuiging van water door een bepaald betonoppervlak en de wortel uit de tijd bestaat een lineaire relatie [7, 8]:

$$I = A + S_t^{0.5} \quad (3)$$

Hierin is I de hoogte van het capillaire vochtfront [mm], A het snijpunt met de y-as [mm], S de sorptieindex [$\text{mm}/\text{h}^{0.5}$] en t de tijd [h]. De sorptieindex is een maat voor de snelheid van opname van water door een betonoppervlak dat is blootgesteld aan bijvoorbeeld regen. Audenaert e.a. [7] stellen dat de sorptieindex kleiner dan $3 \text{ mm}/\text{h}^{0.5}$ moet zijn. In tabel 7 zijn de resultaten van regressieanalyse op de meetresultaten uit figuur 6 weergegeven. Alle proefstukken hebben een sorptieindex die kleiner is dan $3 \text{ mm}/\text{h}^{0.5}$. De sorptie van mengsel A is kleiner dan die van de mengsels waarin een gedeelte van het betonzand is vervangen door fijner zand. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de mengsels met fijn zand een dichter korrelskelet hebben, waardoor meer fijne capillaire poriën aanwezig zijn en de sorptie toeneemt.

4 | Resultaat indringingsproef



Tabel 6 | Waterindringing op een ouderdom van 28 dagen

proefstuk	indringingsdiepte [mm]		
	meting 1	meting 2	gemiddeld
A1	30	26	28
A2	30	24	27
B1	17	21	19
B2	21	26	23.5
C1	8	6	7
C2	10	7	8.5

Ten slotte

In dit laatste artikel uit een serie van drie is gerapporteerd over proeven die zijn uitgevoerd op verhard ZVB. Uit de bereikte druksterkten blijkt dat mengsels zijn te classificeren als sterkteklasse B 45. Het doel: ZVB met 'normale sterkte' te ontwikkelen, is daarmee bereikt. De treksterkte, bepaald met een splijtproef, is hoger dan bij normaal beton met een overeenkomstige druksterkte. Dat is in overeenstemming met eerdere bevindingen.

Uit de duurzaamheidsproeven (in-dringing en sorptie van water) volgt dat de drie betonmengsels als in voldoende mate ondoorlatend en duurzaam kunnen worden gekwalificeerd.

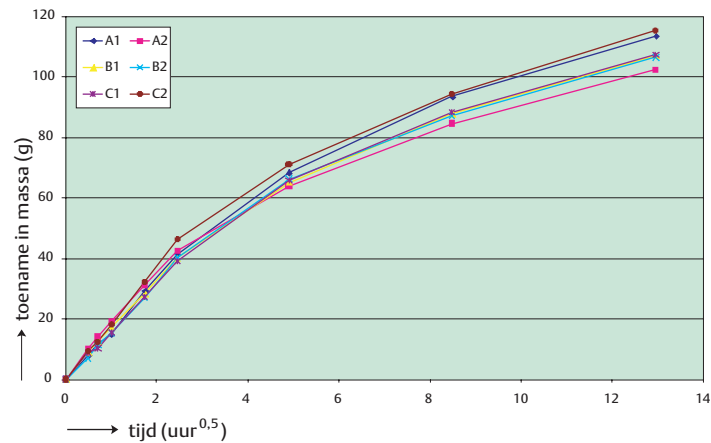
De conclusie is dat de Chinese mengselontwerpmethode goed toepasbaar is in de Nederlandse situatie. Met de methode is het mogelijk gebleken goedkope mengsels met een laag poedergehalte en een normale druksterkte te ontwerpen.

Dankwoord

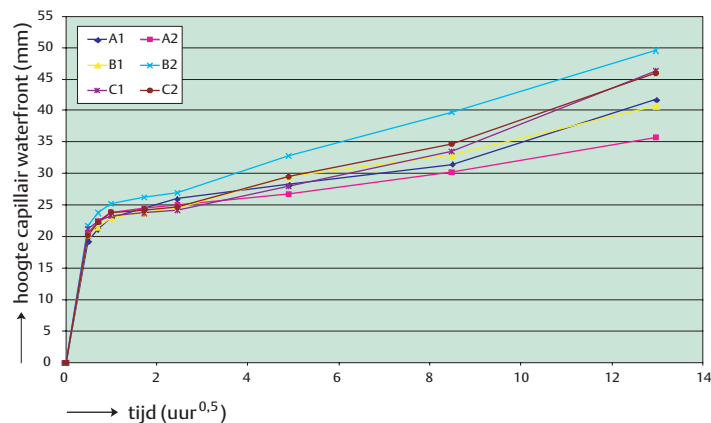
De auteurs danken ir. W.J. Bouwmeester-van den Bos (DMC), ing. H. ter Welle (Betoncentrale Twenthe), B. Bos (BAS), B.M. Piscaer (Omya Concrete Materials) en hun collega's ing. G.H. Snelink en H.M. Menkehorst voor hun assistentie en ondersteuning van dit onderzoek. Dit onderzoek is financieel ondersteund door de Cornelis Lely Stichting, Delta Marine Consultants, Betoncentrale Twenthe, Rouwmaat Bouwgroep, Jaartsveld Groen en Milieu, Service Centrum Grond en de Bouwdienst Rijkswaterstaat. ■

Literatuur

- Radix, H.J., Chinese mengselontwerpmethode voor Zelfverdichtend Beton; Onderzoek naar goedkope ZVB-mengsels met normale druksterkte, op basis van een nieuwe ontwerp-methode en de toepassing van fijn zand. Afstudeerscriptie, Universiteit Twente, Enschede, 2004.



5 | Toename massa proefstuk door capillaire absorptie



6 | Hoogte capillair vochtfront in de tijd

Tabel 7 | Resultaten van regressieanalyse op de toename van de hoogte van het capillair vochtfront

proefstuk	snijpunt met de y-as (A) [mm]	sorptieindex (S) [mm/h ^{0.5}]	regressiecoëfficiënt
A1	20,57	1,63	0,977
A2	21,99	1,03	0,951
B1	20,69	1,54	0,988
B2	22,07	2,11	0,994
C1	20,43	1,82	0,962
C2	20,39	1,89	0,985

- Su, N., K.C. Hsu en H.W. Chai, A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 2001 vol. 31.
- Su, N. en B. Miao, A new method for mix design of medium strength concrete with low cement content. *Cement & Concrete Composites*, 2003 vol. 25.
- Informatie van de website van ENCI, 2003, www.enci.nl.
- Reinhardt, H.W., Beton als constructiemateriaal, eigenschappen en duurzaamheid. Delftse Universitaire Pers, 1998.
- CUR-Rapport 2002-4, Zelfverdichtend beton – Achtergrond-rapport bij CUR-Aanbeveling 93. Gouda, Stichting CUR, 2002.
- Audenaert, K., V. Boel en G. de Schutter, Water permeability of self compacting concrete. Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC), 2003.
- Zhu, W. en P.J.M. Bartos, Permeation properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 2003 vol. 33.