

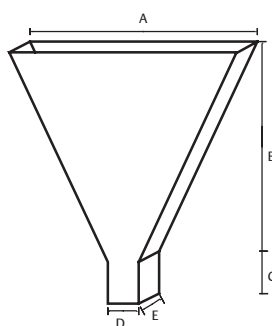
Deel 2: Proeven op mortel en betonspecie

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 vorige nummer van *Cement* is de theorie van de Chinese ZVB-mengselontwerpmethode besproken; een methode die het ontwerpen van zo economisch mogelijke mengsels als uitgangspunt heeft. Gesteld is dat het toepassen van fijn zand een goede optie kan zijn om het verbruik van andere poedermaterialen terug te dringen. In dit vervolgartikel worden de resultaten van mortel- en betonspecieproeven beschreven.

7 | Trechter met afmetingen voor bepalen trechtertijd mortel [2]



trechterafmetingen [mm]	
A	270
B	240
C	60
D	30
E	30
volume (l)	1,13

De mortels zijn aangemaakt volgens een procedure afgeleid van een cursus ZVB [1, 2]. Een mortel (cement, vulstof, zand, water en superplastificeerder (SP)) is onderworpen aan een vloeien- en trechterproef. De eerste geeft de mate van vloeibaarheid; de tweede de mate van samenhang van de mortel. De vloeiproeven zijn uitgevoerd met een Haegermannkegel, net als de pastaproeven (zie eerste artikel). Van de uitgevloeide

mortel zijn twee diameters opgemeten [2]. De vloeimaat is:

$$\text{vloeimaat} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1)$$

Daarna volgde de trechterproef (fig. 1).

In de literatuur zijn verschillende eisen gegeven die aan de vloeimaat en trechtertijd worden gesteld:

- vloeimaat 240 – 260 mm, trechtertijd 7 – 11 s [3];
- vloeimaat 290 ± 25 mm, trechtertijd 9 - 10 s [4];
- vloeimaat 305 – 325 mm, trechtertijd 7 – 9 s [1];
- vloeimaat 250 mm, trechtertijd 9 – 11 s [5].

Gestreefd is naar een vloeimaat van 320 mm en een trechtertijd van 8 s [6]. Mortelproeven met betonzand 0-4 mm wezen uit dat een aggregaatporositeit van 48% leidt tot mengsels die de gewenste vloeieigenschappen bezitten. Gebleken is dat $n = 1,2\%$ (= % SP op poeder, zie eerste artikel) goede resultaten geeft [2]. Latere proeven met betonspecie wezen echter uit dat een morteltrechtertijd van 8 s toch te hoog is; 5 à 6 s is gewenst.

De mengselsamenstelling met betonzand 0-4 mm kon verder worden geoptimaliseerd door het toepassen van fijner zand, zoals

metselzand 0–2 mm (meer fijn materiaal, dus betere vloeibaarheid en samenhang van het mengsel). Daarom is 40% van het betonzand vervangen door metselzand 0-2 mm; dit bij gelijke porositeit (48%). Met een lagere dosering SP, $n = 1,1\%$, is de gewenste morteltrechtertijd van 5 s verkregen.

Bij het toepassen van fijn zand 0-1 mm kon naar verwachting de hoeveelheid poeder nog verder worden gereduceerd, zonder de samenhang van het mengsel nadelig te beïnvloeden. Daarom werd 40% van het betonzand vervangen door fijn zand 0-1 mm. Wederom was de porositeit 48%; nu volstond $n = 1,0\%$.

Toepassing van fijnere soorten zand draagt bij aan de verwerkbaarheid en leidt dus tot een lagere n .

Proeven betonspecie

Op de drie mengsels, ontworpen voor de mortelproeven, werden ook specieproeven uitgevoerd. Uiteraard werd dan wel de grindfractie meegenomen. De zelfverdichtende eigenschappen werden beoordeeld en de mengselsamenstelling zo nodig bijgesteld [2]. Voor de beproevingsmethoden wordt verwezen naar [7 en 8] en tabel 1.

Slump flow

De consistentie van de betonspecie is beoordeeld op basis van de vloeimaat en de vloeitijd (slump flowproef met de kegel van Abrams). Naast de vloeimaat (vgl. 1; streefwaarde 630-800 mm) is ook de tijd gemeten wanneer de betonspecie een uitspreiding van 500 mm had bereikt. Deze vloeitijd (t_{500} ; streefwaarde 2-5 s) geeft een indicatie van de snelheid van uitvloeien en van de vloeibaarheid van de betonspecie. De slump

Tabel 1 | Beproevingsmethoden ter beoordeling van de verwerkbaarheid [6]

eigenschap	testmethode
vullend vermogen	slump flow
	slump flow ($t_{500 \text{ mm}}$)
	V-funnel (trechter)
passerend vermogen	J-ring
weerstand tegen segregatie	V-funnel ($t_{5 \text{ minuten}}$)

flowproef geeft tevens een indicatie van de stabiliteit (weerstand tegen ontmengen) op basis van een visuele beoordeling van de uitgevloeide specie.

V-funnel

Met de V-funnel (fig. 1) is de gemiddelde doorstroomtijd bepaald [8]. Dit is een maat voor de viscositeit van de betonspecie en de mate van samenhang, en dus stabiliteit van de betonspecie. De afmetingen van de trechter zijn afhankelijk van de maximale korrel diameter van het grind (tabel 2).

De gemiddelde trechertijd is:

$$t_{\text{tbs}} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (2)$$

Uit [8] volgt $t_{\text{tbs}} = 5 - 15$ s; de Aanvulling op BRL 1801 noemt 9 - 25 s.

De maat voor de stabiliteit is:

$$S_t = t_3 - t_{\text{tbs}} \quad (3)$$

Hierin is t_3 de trechertijd nadat het mengsel eerst vijf minuten in de trechter heeft stilgestaan ($S_t = 0$ als $t_3 < t_{\text{tbs}}$). De Aanvulling op de BRL 1801 eist $S_t < 3$ s.

J-ring

Het zelfverdichtend vermogen en de blokkeringsgevoeligheid zijn onderzocht met de J-ring; een stalen ring met spijlen die om de kegelmantel werd geplaatst (fig. 2a). Als na het optrekken van de kegel de specie tot rust was gekomen (fig. 2b), werd de blokkeringsmaat B bepaald [8]:

$$B = 2 \cdot (h_{\text{in}} - h_{\text{ex}}) - (h_c - h_{\text{in}}) \quad (4)$$

waarin h_c , h_{in} en h_{ex} de speciehoogte is in, respectievelijk, het midden, aan de binnenzijde en aan de buitenzijde van de J-ring. Vereist is $B < 15$ mm. Uit visuele observatie van het specieoppervlak konden ook conclusies worden getrokken over de kans op ontmengen en blokkering.

Ten slotte is het luchtgehalte bepaald. In het mengselontwerp is uitgegaan van een luchtgehalte van 1,5 vol.-% (zie eerste artikel).

Superplastificeerders hebben een beperkte werkingsduur [9]. Vooral voor de in situ betonindustrie is de ontwikkeling in de tijd van de verwerkbaarheid na aanmaak van de betonspecie van groot belang. Om deze te onderzoeken, zijn de slump flow- en de J-ringproef herhaald 15, 30, 45, 60, 90 en 120 minuten na aanmaak van de betonspecie. Tijdens de uitvoering van deze proef is de betonspecie in beweging gehouden om zo de werkelijkheid (het agiteren; het langzaam ronddraaien van de trommel van de truckmixer) zo goed als mogelijk na te bootsen. Daartoe heeft de betonmolen steeds 1 minuut gedraaid nadat deze 4 minuten had stilgestaan.

Resultaten proeven betonspecie

Tabel 3 toont de definitieve ZVB-mengselsamenstellingen zoals ontwikkeld met de mortel- en specieproeven. Het blijkt dat het gehalte zand hoog is; het gehalte cement en vulstof (kalksteenmeel) is slechts 473 – 499 kg/m³. De mengsels hebben een (aggregaat-) porositeit van 36%. Alle mengsels voldoen aan de hiervoor beschreven eisen (tabel 4). Tabel 5 geeft het luchtgehalte en de volumieke massa.

Het luchtgehalte van de drie mengsels is hoger dan de 1,5% die is aangenomen in de mengselberekeningen. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de specie bij de meting (5 min. nadat het luchtdrukvat was gevuld) nog niet voldoende tijd heeft gehad om te ont-

Tabel 2 | Afmetingen V-funnel (zie fig. 1)

type	gradering			
	0-4	0-8	0-16	0-32
A	270	390	515	600
B	240	350	450	515
C	60	105	150	195
D	30	40	65	85
E	30	40	75	95
vol. (l)	1,13	3,27	10,51	18,30

Tabel 3 | Definitieve mengselsamenstellingen

materiaal	mengsel A	mengsel B	mengsel C
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
CEM III/B 42,5 N LH/HS	310	315	320
kalksteenmeel	189	164	153
zand 0-1 mm	-	-	388
zand 0-2 mm	-	306	-
zand 0-4 mm	1018	719	628
grind 4-16 mm	667	673	687
water	170	173	174
superplastificeerder	6,0	5,51	5,21
water-cementfactor	0,55	0,55	0,55
water-poederfactor	0,34	0,36	0,37



luchten. De waarden blijven echter wel binnen de eis van 3% (NEN 5962; 1988).

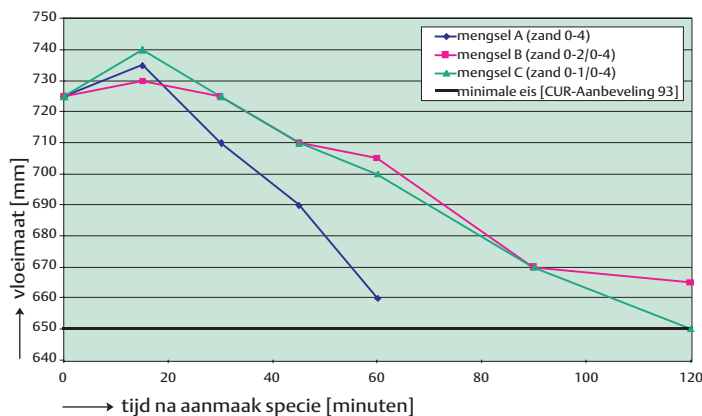
2 | Opstelling J-ring (a) en resultaat proef (b)

Figuren 3 en 4 tonen de ontwikkeling van de vloe- en blokkeringsmaat [2]. Uit figuur 3 blijkt dat de vloeimaat nagenoeg lineair afneemt in de tijd. Bij de meting na 15 minuten valt echter op dat de vloeimaat van alle drie de mengsels juist is toegenomen. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat het enige tijd kost voordat de werking van de superplastificeerder optimaal is. De vloeimaat van mengsel A neemt sterk af in de

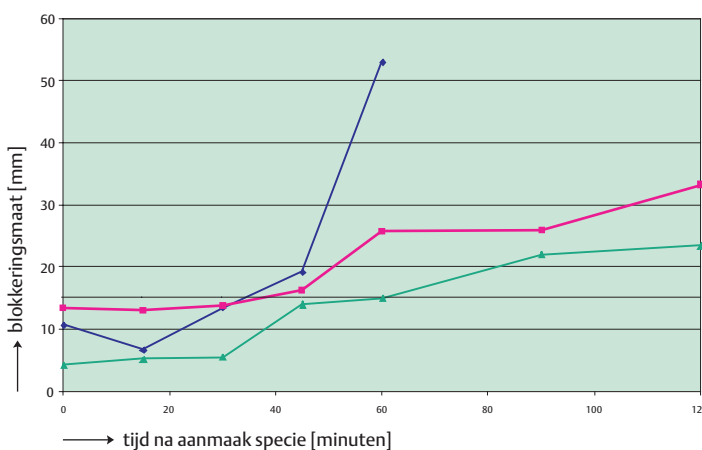
Tabel 4 | Resultaten specieproeven

resultaat	mengsel A	mengsel B	mengsel C
gemiddelde vloeimaat [mm]	720	745	730
vloeijsd t_{500} [s]	3	3	3
blokkeringsmaat [mm]	14,5	4,0	12,5
gemiddelde trechertijd [s]	12	11,5	12
trechertijd na 5 minuten [s]	15	14	15

3 | Terugloop vloeimaat in de tijd



4 | Toename blokkeringsmaat in de tijd



tijd; na 60 minuten laat de J-ring-proef dan ook een duidelijke mate van blokkering zien (fig. 4).

Mengsels B en C echter voldoen na 2 uur nog aan de eis (vloeimaat van min. 650 mm). Wel moet worden opgemerkt dat dit voor mengsel C maar net aan is. Uit figuur 4 blijkt dat mengsel A na 45 minuten niet meer voldoet aan de eis $B < 15$ mm en na 60 minuten vertoont het mengsel blokkering: de specie vloeit nog wel tussen de spijlen door, maar een groot ge-

deelte blijft aan de binnenzijde van de ring liggen. Mengsel B presteert beter dan mengsel A, maar voldoet na 45 minuten niet meer aan de eis. Mengsel C voldoet na 60 minuten nog juist aan de eis, maar na 90 minuten voldoet ook deze specie niet meer. Wel moet worden opgemerkt dat de berekening van de blokkeringsmaat erg gevoelig is voor kleine afwijkingen in de speciehoogte. De eis die aan B wordt gesteld is dan ook zeer streng en eigenlijk alleen te hanteren als de speciehoogte tot

op 0,1 mm nauwkeurig kan worden opgemeten (bijv. door lasermeting). In Duitsland wordt daarom niet de speciehoogte als richtlijn aangehouden, maar wordt gekeken naar het verschil in vloeimaat met en zonder J-ring. Het verschil mag niet meer dan 50 mm bedragen. Dit is eenvoudiger dan de meetmethode die CUR voorschrijft. Alle drie de mengsels voldoen trouwens zonder meer aan de gestelde eis.

Korrelopbouw

In het eerste artikel is toegelicht dat de korrelopbouw belangrijk is. Daarom zijn in figuren 5 en 6 de korrelgrootteverdelingen van de drie mengsels weergegeven, zowel op dubbel- als enkellogaritmische schaal. De dubbellogaritmische schaal maakt eventuele afwijkingen in de gradering van met name het fijne materiaal (< 250 mm) duidelijk zichtbaar; de enkellogaritmische schaal de eventuele afwijkingen in het grovere materiaal. In beide figuren zijn tevens het Andreasen en Andersenmodel, het Aangepaste Andreasen en Andersenmodel en het Fullermode (zie eerste artikel) weergegeven.

Uit de figuren blijkt dat de korrelgrootteverdeling van ZVB duidelijk niet verloopt volgens de ideale korrelgrootteverdeling van Fuller zoals voor 'normaal' beton gebruikt. De verdeling voldoet, volgens verwachting, veel beter aan het Aangepaste Andreasen en Andersenmodel. De q -waarde is 0,25, wat overeen komt met de bevindingen van [10].

Toch is er nog enig verschil: tussen 100 μ m en 4 mm treedt een duidelijke verstoring op. Deze is te verklaren door naar de korrelgrootteverdeling van het zand te kijken, omdat dat tussen 100 μ m en 4 mm de belangrijkste bijdrage levert aan het mengsel.

Gezocht zou moeten worden naar toeslagmaterialen waarvan de korrelgrootteverdeling volgens een rechte lijn verloopt en minder een S-vormig patroon beschrijft. De

Tabel 5 | Resultaten bepaling luchtgehalte en volumieke massa

	mengsel A	mengsel B	mengsel C
luchtgehalte [vol %]	2,6	1,7	2,5
volumieke massa [kg/m ³]	2220	2200	2200

Tabel 6 | Hoeveelheid fijn materiaal (< 250 μ m) per m³ beton

	mengsel A	mengsel B	mengsel C
volume fijn materiaal (< 250 μ m) per m ³ beton [m ³]	0,195	0,189	0,245
massa cement [kg]	310	315	320
massa kalksteenmeel [kg]	189	164	153
gedeelte zand 0-1 mm kleiner dan 250 μ m [kg]	-	-	180
gedeelte zand 0-2 mm kleiner dan 250 μ m [kg]	-	20	-
gedeelte zand 0-4 mm kleiner dan 250 μ m [kg]	55	39	34
totale massa fijn materiaal (< 250 μ m) per m ³ beton [kg]	554	538	687

verwachting is dat dit een positieve bijdrage levert aan de verwerkbaarheid en stabiliteit. Uit de resultaten van de specieproeven blijkt dat mengsel C meer samenhang en een betere stabiliteit heeft dan de andere twee mengsels. Het fijne zand 0–1 mm heeft hieraan bijgedragen. Daarom konden, ten opzichte van de mengsels A en B, de hoeveelheden poedermateriaal en SP worden gereduceerd. In tabel 6 is de hoeveelheid fijn materiaal weergegeven.

Het volume aan fijn materiaal is bij mengsel C ongeveer $0,245 \text{ m}^3$, wat tweemaal zo hoog is als het volume fijn materiaal dat NEN 5950 voorschrijft voor een normaal beton met een maximale korreldiameter van 16 mm (zie eerste artikel). De korrelgrootteverdeling van mengsel C voldoet onder de $250 \mu\text{m}$ het beste aan het Aangepaste Andreasen en Andersenmodel.

Geconcludeerd kan worden dat met name het gehalte aan materiaal dat kleiner is dan $250 \mu\text{m}$ grote invloed heeft op de stabiliteit en verwerkbaarheid van een mengsel. Door de korrelgrootteverdeling ook in het nanogebied ($< 1 \mu\text{m}$) te optimaliseren is het wellicht mogelijk om toepassing van SP geheel overbodig te maken.

Conclusies

Op basis van de in het eerste artikel besproken uitgangspunten zijn mengsels ontwikkeld en beproefd. Het blijkt mogelijk mengsels te maken die voldoen aan de criteria van de slump flow-, V-funnel- en J-ringproef en aan het toelaatbare luchtgehalte. Bij de korrelopbouw is zo goed als mogelijk het Aangepaste Andreasen en Andersenmodel gevolgd, en zijn binnen deze randvoorwaarde de goedkoopste materialen geselecteerd. Dit leidt tot een relatief laag poedergehalte ($\pm 480 \text{ kg/m}^3$ beton-specie) en tot toepassing van goedkoop fijn zand. Het gebruik van SP kan worden beperkt tot 1% van het poedergehalte. In een derde

artikel zullen de eigenschappen van het verharde product worden beschreven. ■

Literatuur

1. Cursushandboek Zelfverdichtend Beton. Bond van Fabrikanten van Betonproducten in Nederland (BFBN), 2001.
2. Radix, H.J., Chinese mengselontwerpmethode voor Zelfverdichtend Beton; Onderzoek naar goedkope ZVB mengsels met normale druksterkte, op basis van een nieuwe ontwerpmethode en de toepassing van fijn zand. Afstudeerscriptie, Universiteit Twente, Enschede, 2004.
3. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures), februari 2002 (www.efnarc.org).
4. Ankoné, S.F.A., Zelfverdichtend Beton. Stageverslag, Universiteit Twente, Enschede, 2000.
5. Walraven, J.C., K. Takada en G.I. Pelova, Zelfverdichtend beton, hoe maak je dat? *Cement* 1999 nr. 3.
6. Bos, B., Persoonlijk contact, Bas BV, Venray, 2003.
7. Aanvulling op de Nationale Beoordelingsrichtlijn Betonmortel (BRL 1801), Hoogvloei-bare, verdichtingsarme en zelfverdichtende betonmortel. Gouda, Certificatie Instelling Stichting BMC, 2002.
8. CUR-Aanbeveling 93, Zelfverdichtend Beton. Gouda, Stichting CUR, september 2002.
9. Souwerbren, C., Betontechnologie. 9e geheel herziene druk. 's-Hertogenbosch, Stichting BetonPrisma, 1995.
10. Elkem Materials, User Documentation Language Independent Size Distribution Analyser (L.I.S.A.), 2003 (www.concrete.elkem.com).

