

Deel 1: Theorie en uitgangspunten

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

Voor het ontwerpen van een betonspecie met zelfverdichtende eigenschappen (ZVB) zijn sinds de jaren '80 vele methoden ontwikkeld. De in Japan door professor Okamura ontwikkelde 'japanse methode' is de meest toegepaste en is in Nederland overgenomen. Door het hoge volume-aandeel pasta (35-40% van de betonspecie (fig. 1)) leidt de methode echter niet tot de meest economische mengsamenstellingen en is de eindsterkte vaak hoger dan gewenst. Dat leidt onder meer tot een hoger minimumwapeningspercentage. Veel ZVB-constructies zijn dan ook overgedimensioneerd qua wapening en sterkte, aangezien circa 65% van de markt wordt ingenomen door beton met een lage tot gemiddelde sterkte. In China is een methode ontwikkeld die leidt tot goedkopere mengsamenstellingen voor betonspecies binnen die range van druksterkten (B 25 - B 35) [1, 2].

Dit is bereikt door het cementgehalte, één van de duurste bestanddelen in de betonspecie, te reduceren en het gehalte zand te verhogen. Het is echter de vraag of die kostenvoordelen ook in de Nederlandse praktijk zullen worden bereikt. Door het relatief beperkte geografische voorkomen van geschikt betonzand en het ontgrondingsbeleid van de overheid zal namelijk minder betonzand (gradering 0-4 mm) beschikbaar komen [3, 4]. Een alternatief is de toepassing van fijn(er) zand in beton. Fijn zand (0-1 mm) komt in Nederland in grote hoeveelheden voor en kent tevens een grote geografische spreiding. Uit onderzoek blijkt dat voor normaal beton het vervangen van betonzand door fijn zand betontechnologisch goed mogelijk is voor de sterkteklasse B 25 [3, 4, 5, 6].

Bij ZVB is voor de stabiliteit een relatief hoog gehalte aan fijne delen aanwezig in de vorm van cement en vulstoffen zoals vliegas of kalksteenmeel. Door een groot specifiek oppervlak zijn deze vulstoffen in staat grote hoeveelheden water in de betonspecie vast te houden. Fijn zand kan naar verwachting dan ook een bijdrage leveren aan de stabiliteit van een mengsel en wellicht is het mogelijk om een gedeelte van de (dure) vulstoffen te vervangen door (goedkoper) fijner zand om zo goedkopere mengsels te produceren.

Mengsamenstelling

De Chinese methode modelleert het betonmengsel als een twee-fasenmateriaal opgebouwd uit toeslagmaterialen en pasta. De holle ruimten tussen de toe-

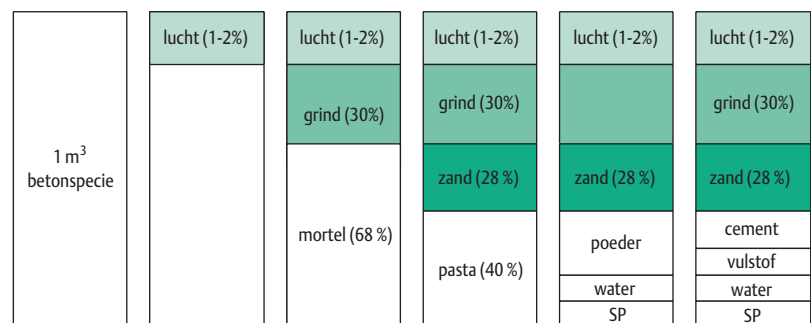
slagmaterialen worden gevuld met pasta, net zolang totdat een vloeibare specie ontstaat die voldoet aan de gestelde eisen met betrekking tot verwerkbaarheid, sterkte en duurzaamheid.

Begonnen wordt bij het gehalte aan toeslagmateriaal dat een grote invloed heeft op de verwerkbaarheid. Immers, hoe meer toeslagmateriaal, hoe minder pasta en des te lager de vloeibaarheid. Vervolgens wordt gekeken naar de hoeveelheid cement. Deze wordt afgestemd op de gevraagde sterkte en duurzaamheid van het verharde beton. Deze aanpak komt overeen met de in Nederland gebruikelijke aanpak voor het ontwerpen van samenstellingen voor normaal beton.

Toeslagmaterialen (zand en grind)

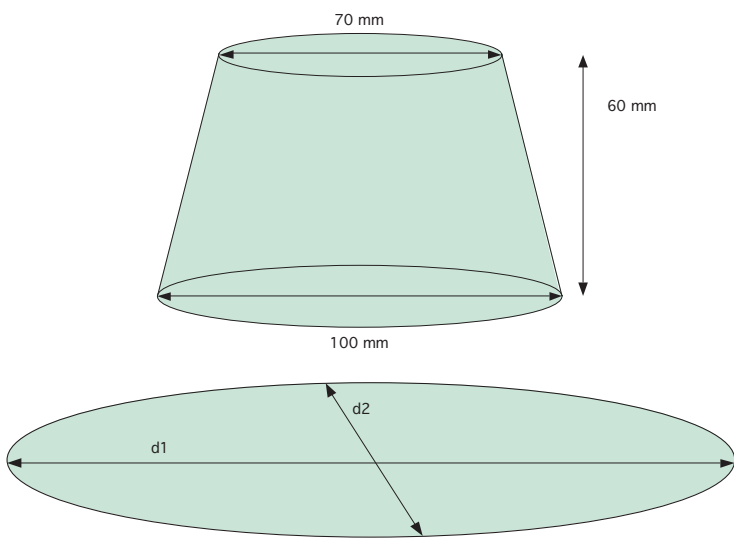
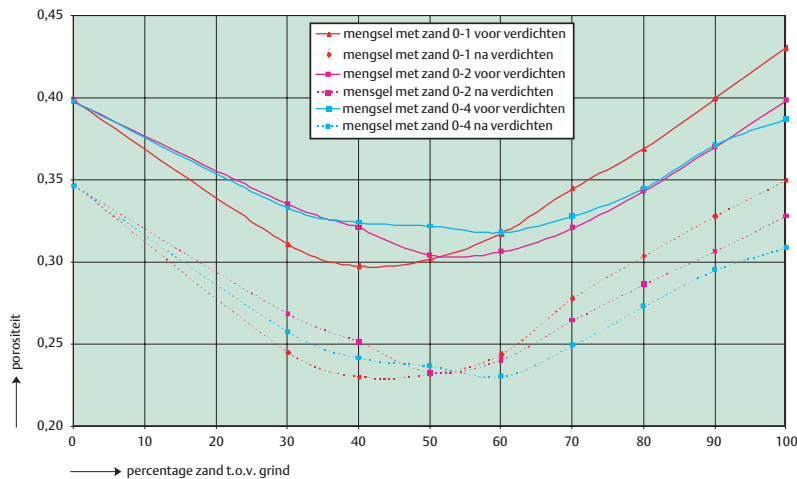
Zoals gemeld is de eerste stap het opvullen van de holle ruimten zoals aanwezig in een skelet van losgestorte toeslagmaterialen met een optimale hoeveelheid pasta. Het volumeaandeel holle ruimten (de porositeit) van losgestorte, grove toeslagmaterialen is 42 – 48%. Na mengen, verwerken en storten (NB: geen 'trillen', want het is ZVB) is dat nog 32 – 41%. De dichtheid en porositeit van zand plus grind zijn mede afhankelijk van de zand-/grindverhouding, en niet alleen van die van het zand en het grind afzonderlijk. Daarom zijn drie soorten zandmengsels samengesteld

1 | Schematische opbouw van 1 m³ beton volgens de Japanse methode [11]



Tabel 1 | Overzicht gebruikte materialen (ρ = dichtheid van het materiaal zelf; ρ^l = dichtheid van losgestort materiaal)

materiaal	type	ρ [kg/m ³]	ρ^l [kg/m ³]	Blaine [cm ² /g]
cement	CEM III/B 42,5 N LH/HS	2950	1100	4700
vulstof	kalksteenmeel	2740	1110	3600
vulstof	vliegas	2250	1000	3900
betonzand	rijnzand 0–4 mm	2650	1631	-
metselzand	rijnzand 0–2 mm	2650	1619	-
fijn zand	zand 0–1 mm	2650	1511	-
grind	rijngrind 4–16 mm	2650	1604	-
superplastificeerder	Glenium 27	1045	-	-



Tabel 2 | Maximale wcf per milieuklasse [NEN 5950]

milieuklasse	1	2	3	4	5a	5b	5c	5d
wcf	0,65	0,55	0,45	0,45	0,55	0,50	0,45	0,45
wcf met luchtbelvormer			0,55	0,55				

2 | Porositeit voor en na verdichten bij verschillende zand-/grindverhoudingen (m/m) en soorten zand

en onderzocht [7]. Tabel 1 bevat de dichtheden en andere gegevens van de gebruikte materialen.

In figuur 2 is de gemiddelde porositeit vóór en na verdichten uitgezet voor verschillende zand-/grindverhoudingen (m/m). In de eerste plaats valt op dat de lijnen vrijwel parallel lopen. Met andere woorden: door verdichten wordt de porositeit met een constant getal (ongeveer 7 procentpunten) gereduceerd.

3 | Afmetingen Haegermannkegel en pastaproef

In de tweede plaats blijkt dat zand-/grindmengsels een minimale porositeit bereiken bij een zand-/grindverhouding tussen 40/60 en 60/40 (zowel in losse als in verdichte toestand). Naarmate het zand grover is, treedt het minimum op bij een hoger zandgehalte. Een lage porositeit is gunstig omdat dan een kleiner deel van het volume moet worden ingenomen door de andere stoffen.

Cement

De volgende stap is bepaling van de hoeveelheid cement aan de hand van de gewenste druksterkte, waarbij een lineaire relatie wordt verondersteld tussen het cementgehalte en de druksterkte. De massa en het volume van het cement volgen dan uit:

$$M_c = \frac{f'_{ck}}{x}; V_c = \frac{M_c}{\rho_c} \tag{1}$$

Omdat Su [1] en Su en Miao [2] OPC (200 kg/m³ beton) en gemalen slakken toepasten, is in de proeven voor hoogovencement gekozen. De waarde van x is voor het gebruikte cement (zie tabel 1) bepaald. Ter indicatie wordt genoemd dat x = 0,11-0,14 N/mm² kubusdruksterkte per kg OPC/m³ beton [2].

Water

De hoeveelheid water wordt bepaald door de eisen met betrekking tot vloeien. Gebruik is gemaakt van de Haegermannkegel (fig. 3). Van verschillende pasta's is de vloeimaat bepaald, waarna de relatieve vloeimaat Γ_{pa} is berekend:

$$\Gamma_{pa} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - 1; d = \frac{d_1 + d_2}{2} \tag{2}$$

Hierin zijn d_1 en d_2 de diameters van de uitvloeiende pasta en is d_0 de diameter van de basis van de Haegermannkegel (100 mm). In figuur 4 is de experimenteel gevonden relatieve vloeimaat uitgezet tegen de volumeverhouding van poeder en water.

Voor vloeien dient $\Gamma_{pa} > 0$, en in een poedermengsel dient Γ_{pa} van de verschillende poedermaterialen gelijk te zijn. Als op basis van een vereiste druksterkte de hoeveelheid cement is vastgelegd (vgl. (1)), is V_c bekend. De relatieve vloeimaat neemt dan toe als $V_w/V_p = V_w / (V_c + V_w)$ toeneemt. Dat is te realiseren met een toename van V_w en/of een afname van V_v . Beide leiden ertoe dat de water-cementfactor (wcf) toeneemt. De wcf wordt echter begrensd door de milieuklasse (tabel 2). Daarom is ervoor gekozen dat $\Gamma_{pa} \approx 0 - 2$. Nu is de verhouding V_w/V_v bekend (fig. 4).

Lucht

Het volume lucht per m³ beton – V_l – wordt geschat op 0,015 m³ (= 1,5%). Deze waarde wordt nog geverifieerd in de experimenten.

Superplastificeerder

Het volume vaste delen in de superplastificeerder volgt uit:

$$V_{SP} = \frac{ds_{SP} \cdot M_{SP}}{\rho_{SP}} \tag{3}$$

In vgl. (3) is M_{SP} de totale massa superplastificeerder (inclusief water), ds_{SP} de fractie droge stof en ρ_{SP} de dichtheid van de vaste stof. Voor het gebruikte Glenium 27 is $ds_{SP} = 20\%$ en $\rho_{SP} = 1045 \text{ kg/m}^3$. De toegepaste hoeveelheid is gerelateerd aan de totale hoeveelheid poeder:

$$M_{SP} = n \cdot (M_c + M_v) = n (\rho_c V_c + \rho_v V_v) \quad (4)$$

Praktische waarden zijn $n = 0,4-1,7\%$.

Vulstof

Het volume vulstof per m^3 beton volgt nu uit

$$V_v = 1 \text{ m}^3 - V_a - V_c - V_w - V_{SP} - V_l \quad (5)$$

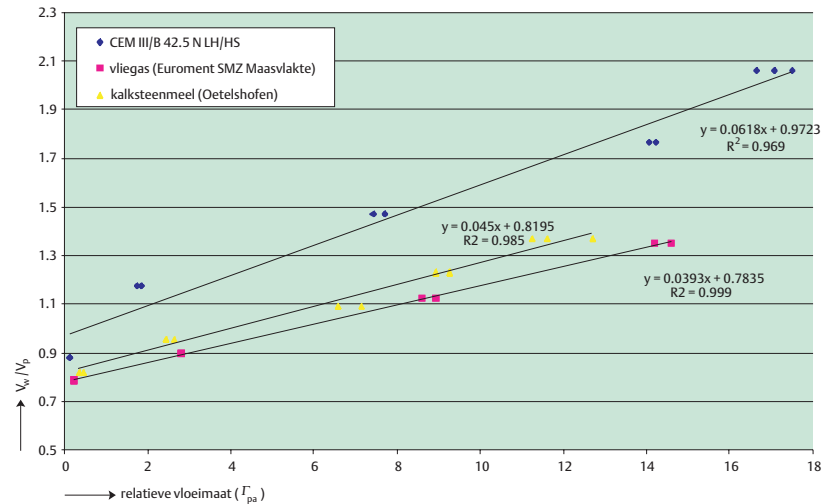
Hierin zijn V_v en V_w de enige overgebleven onbekenden. Omdat de verhouding V_w/V_v bekend is, zijn beide nu te berekenen. De hoeveelheid aanmaakwater wordt gecorrigeerd voor het vocht in het aggregaat en in de superplastificeerder, respectievelijk $(1 - ds_a)M_a$ en $(1 - ds_{SP})M_{SP}$.

Tot zover zijn de massa's en volumes van de componenten bepaald. Het aggregaat werd daarbij als een geheel beschouwd, terwijl het bestaat uit zand en grind en de korrelopbouw van deze componenten aan eisen moet voldoen. Hierna wordt daar nader op ingegaan.

Korrelopbouw

Bij ZVB volgens de Japanse methode wordt geen aandacht besteed aan de korrelgroottverdeling van de toeslagmaterialen. Bij 'normaal beton' wordt in Nederland vooral gebruik gemaakt van mengsels met continue graderingen, aangezien de veelgebruikte toeslagmaterialen een continue korrelopbouw hebben. In zo'n gradering verlopen de korrels van een diameter groter dan $250 \mu\text{m}$ tot de gewenste maximale korreldiameter volgens een S-vormige curve in een grafiek met enkel-logaritmische schaalverdeling. De verkregen betonspecie heeft over het algemeen een hoge sterkte en dichtheid, met een goede verwerkbaarheid en een kleine kans op ontmenging.

Voor moderne betonsoorten zoals hogesterktebeton (HSB) en ZVB is deze theorie van Fuller niet geschikt, omdat deze in het algemeen slechts bruikbaar is voor materiaal met een korreldiameter groter dan $500 \mu\text{m}$. Het zonder meer toepassen van de methode bij kleinere korreldiameters leidt tot cementarme en moeilijk



verwerkbare mengsels. In de VBT [8] wordt dan ook een minimumgehalte aan fijn materiaal ($< 250 \mu\text{m}$) voorgeschreven voor normale betonsamenstellingen (tabel 3).

De theorie van Fuller is eigenlijk een speciaal geval van de meer algemene vergelijking voor het bepalen van een mengsel van toeslagmaterialen zoals in [9] voorgesteld. In die theorie wordt voor het verkrijgen van een optimale pakking van de materialen de korrelgroottverdeling beschreven als:

$$P_i(d) = \left(\frac{d}{D_{\max}} \right)^q \quad (6)$$

Hierin is P_i de fractie toeslagmateriaal dat de zeef met opening d passeert, D_{\max} de grootste korreldiameter en q een parameter gelegen tussen 0 en 1. Voor $q = 0,5$ wordt de verdeling van Fuller gevonden.

Door de variabele q -waarde is het model ook geschikt voor korreldiameters kleiner dan $500 \mu\text{m}$. Voor een goed begrip van de Chinese methode is de korrelopbouw van de gebruikte mengsels geanalyseerd. Gebleken is dat $q = 0,3$ deze goed beschrijft.

Het model uit [9] loopt in theorie door tot een korreldiameter gelijk aan nul. In de praktijk is er echter een minimumdiameter D_{\min} . Daarom wordt bij de experimenten een aangepaste versie van het model gebruikt die daarmee rekening houdt [10]:

$$P_i(d) = \frac{d^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (7)$$

Conclusies

In dit artikel is de achtergrond van de Chinese ontwerp methode beschreven en toegelicht. De pakking en porositeit van het aggregaat die in ZVB kunnen worden bereikt, zijn de belangrijkste parameters omdat deze helpen de hoeveelheid poeder te minimaliseren. De aggregaatporositeit is bepaald door van verschillende zand/grindmengsels de dichtheid voor en na verdichten te bepalen.

4 | Relatieve vloeimaat versus V_w/V_p voor verschillende poedermaterialen (meetwaarden en regressielijnen)

Tabel 3 | Minimale hoeveelheid fijn materiaal per m^3 beton [NEN 5950].

grootste korreldiameter (D_{\max}) [mm]	minimale hoeveelheid fijn materiaal ($< 250 \mu\text{m}$) per m^3 beton [m^3]
8	0,140
16	0,125
31,5	0,115

De viscositeit (waterbehoefte) van een mengsel is minimaal bij een goede korrelopbouw van alle vaste stoffen (aggregaat én poeder) in het mengsel. Een analyse van de korrelopbouw van het aggregaat bij [1] en [2] leert dat deze het model van [9] (vgl. (6)) volgden ($q = 0,30$). Deze theoretische kennis zal worden gebruikt bij het uitvoeren van de proeven die worden beschreven in deel 2. Bij de proeven zal ernaar worden gestreefd dat de gehele korrelopbouw (toeslag en poeder) het aangepaste model van [9] zo goed als mogelijk benadert.

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. Snellink 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

1. Su, N., K.C. Hsu en H.W. Chai, A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001.
2. Su, N. en B. Miao, A new method for mix design of medium strength concrete with low cement content. *Cement & Concrete Composites*, vol. 25, 2003.
3. CUR-Rapport 2003-2, Fijner zand in beton. Aanbevelingen voor gebruik. Stichting CUR, Gouda 2003.
4. Wolsink, G.M., Toepassing van fijn(er) zand in beton. Rijkswaterstaat, DWW rapport W-DWW-95543, Bouwdienst BSW 95-16, Publicatiereeks Grondstoffen 1995/13, september 1995.
5. *Stutech mededelingen* 114. 's-Hertogenbosch, februari 2003.
6. Borsje, H., P.D. Steijaert, Betontechnologische aspecten bij het gebruik van fijn zand in beton. Rijkswaterstaat, DWW rapport W-DWW-96-004, Bouwdienst BSW 96-09, Publicatiereeks Grondstoffen 1996/01, januari 1996.
7. 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.
8. NEN 5950 (VBT 1995), Voorschriften Beton Technologie. Eisen, vervaardiging en keuring.
9. Andreasen, A.H.M. en J. Andersen (1930), Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). *Kolloid-Zeitschrift*, vol. 50, 1930.
10. Funk, J.E. en D.R. Dinger (1994), Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspension, Applied to Ceramic Manufacturing. Kluwer Academic Press, 1994.
11. Ernst, F.M.L., Onderzoek zelfverdichtend beton. Afstudeerscriptie TUE/CCO/00-09, Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, Capaciteitsgroep Constructief Ontwerpen, 2000.

SCC'2005-China

Het eerste internationale symposium over het mengselontwerp, prestaties en toepassingen voor zelfverdichtend beton (Self Consolidating Concrete, SCC'2005-China) wordt gehouden in Changsha, provincie Hunan te China van 26-28 mei 2005. De 'call for papers' sluit op 15 augustus dit jaar en papers over alle aspecten van ZVB zijn welkom.

Onderwerpen op de conferentie zijn onder meer:

- basismateriaal en mengselontwerp van ZVB
- verwerkbaarheid van ZVB
- karakteristieken van verhard ZVB
- constructieve prestaties van ZVB
- construeerbaarheid van ZVB
- case studies
- andere gerelateerde onderwerpen

Auteurs van papers wordt verzocht de titel van de paper aan te geven, hun eigen naam, adres, telefoon- en faxnummers en emailadres, en een samenvatting van 200 tot 300 woorden voor 15 augustus aanstaande. De complete papers moeten uiterlijk 31 oktober bij de organisatie binnen zijn. Bij voorkeur dienen bijdragen elektronisch via een downloadbaar formulier op de website of per email te worden verstuurd. www.scc2005-csu.com of scc2005@mail.csu.edu.cn

Het postadres is:

Dr. Guangcheng Long of dr. Xiaojie Liu
School of Civil Engineering and Architecture
Central South University
22 Shaoshan South Road
Changsha, Hunan, China 410075