

**SAMENSTELLEN VAN BETON**

In de Basis cursus Beton Technologie [BBT] is aan de hand van een stappenplan behandeld hoe relatief eenvoudige traditionele betonsamenstellingen kunnen worden ontworpen. Van betontechnologen wordt echter verwacht dat zij in staat zijn om ook complexere betonsamenstellingen te kunnen ontwerpen. Om dat te kunnen wordt het stappenplan zoals gegeven in BBT in dit hoofdstuk aangepast of aangevuld.

De grootste aanpassingen op het stappenplan zijn nodig wanneer geen sprake meer is van traditioneel beton, maar van beton met een sterk afwijkende verwerkbaarheid. In dit hoofdstuk worden dus afzonderlijke stappenplannen gegeven voor het ontwerpen van traditioneel beton, zelfverdichtend beton en beton voor geperste producten zoals stenen, tegels en banden. Daarbij wordt waar mogelijk wel van dezelfde systematiek uitgegaan.

In de eerste plaats komt het ontwerpen van traditioneel beton aan de orde. Hier wordt het reeds bekende stappenplan uit de BBT gebruikt. Deze wordt aangevuld met extra informatie om mengsels met afwijkende specificaties, zoals een hoge beginsterkte of lichtbeton te kunnen ontwerpen. Daarnaast wordt het aangevuld met informatie om mengsel met afwijkende grondstoffen te kunnen ontwerpen zoals bijvoorbeeld vliegias, luchtbelvormer of meerdere fracties grof toeslagmateriaal. In de bijlage bij dit hoofdstuk zijn zeven voorbeeldberekeningen opgenomen waarin een en ander verder is uitgewerkt en toegelicht.

Het ontwerpen van zelfverdichtend beton vraagt een geheel eigen methodiek. Dit is het gevolg van de andere verhouding tussen de grondstoffen die nodig is om aan de specificaties voor zelfverdichtend beton te kunnen voldoen. Gevolg is dat gedeeltelijk afgeweken wordt van het stappenplan voor traditioneel beton. Met name waar het gaat om het bepalen van de waterbehoefte. Dit wordt uitgebreid toegelicht en ook hiervan is in de bijlage een voorbeeldberekening te vinden.

Het hoofdstuk wordt afgesloten met het ontwerpen van aardvochtige betonsamenstellingen die gebruikt worden voor de productie van stenen, tegels en banden. Dit vraagt een geheel eigen methodiek. Hiervoor wordt daarom een afwijkend stappenplan gegeven.

Van de betontechnoloog wordt verwacht dat hij de samenstellingen zoals die hier worden besproken, zonder problemen kan ontwerpen. Voor de cursisten vraagt dit (veel) oefening om zich de daarvoor benodigde ontwerpmethodieken eigen te maken.

## INHOUDSOPGAVE

Pag.

2.1	Traditioneel beton.....	2-3
2.1.1	Algemeen stappenplan.....	2-3
2.1.2	Invloed van lucht op de sterkte.....	2-6
2.1.3	Rekenen met vroege sterkte.....	2-6
2.1.4	Rekenen met cementmengsels.....	2-6
2.1.5	Mengsels van toeslagmaterialen: de grafische methode.....	2-7
2.1.6	Afwijkende waterbehoefte.....	2-11
2.1.7	Rekenen met (water reducerende) hulpstoffen.....	2-12
2.1.8	Minimum hoeveelheid fijn materiaal .....	2-12
2.1.9	Chloridegehalte.....	2-14
2.1.10	Alkaligehalte.....	2-15
2.2	Zelfverdichtend beton.....	2-17
2.2.1	Stappenplan .....	2-17
2.2.2	Stap 4: Vaststellen waterbehoefte van de poeders.....	2-18
2.2.2.1	Waterbehoefte afzonderlijk poeder .....	2-18
2.2.2.2	Waterbehoefte van een combinatie van poeders .....	2-21
2.2.3	Stap 5: Vaststellen samenstelling van de mortel .....	2-21
2.2.3.1	Percentage fijn toeslagmateriaal.....	2-21
2.2.3.2	Percentage hulpstof .....	2-23
2.2.3.3	Het begrip $\kappa_p$ .....	2-24
2.2.4	Stap 6: Vaststellen samenstelling van de betonspecie.....	2-25
2.2.4.1	Percentage grof toeslagmateriaal .....	2-25
2.2.4.2	Percentage lucht .....	2-28
2.2.5	Stap 7: Berekening mengselsamenstelling .....	2-28
2.2.6	Stap 8: Uitleveringsberekening .....	2-30
2.2.7	Stap 9: Controleberekeningen .....	2-32
2.3	Aardvochtig beton voor geperste betonproducten.....	2-35
2.3.1	Inleiding.....	2-35
2.3.2	A: Inventarisatie eisen uit project- of productspecificatie .....	2-36
2.3.3	B: Keuze van de materialen.....	2-36
2.3.4	C: Berekenen van de betonsamenstelling .....	2-37
2.3.4.1	Stap 1: Berekenen van de hoeveelheden toeslagmateriaal .....	2-37
2.3.4.2	Stap 2: Berekenen van de hoeveelheden poeder .....	2-39
2.3.4.3	Stap 3: Berekenen van de hoeveelheid water.....	2-39
2.3.4.4	Stap 4: Berekenen van de sterkte .....	2-40
2.3.4.5	Stap 5: Uitleveringsberekening .....	2-40
2.3.4.6	Stap 6: Correctie op basis van volumieke massa na verdichten .....	2-41
2.3.4.7	Stap 7: controleberekeningen .....	2-42

Bijlage: Voorbeeldberekeningen

## 2.1 Traditioneel beton

Onder traditioneel beton vallen alle mengsamenstellingen waarvoor geldt dat

- (1) ze na het storten worden verdicht met behulp van bijvoorbeeld trilmotoren, trilnaalden of trilbalken (dus niet zelfverdichtend);
- (2) na het verdichten geen holle ruimten meer overblijven anders dan maximaal 2% ingesloten lucht (dus geen mengsamenstellingen voor betonproducten zoals stenen, tegels, banden).

Hieronder volgt eerst het stappenplan voor traditioneel beton zoals opgenomen in de BBT. Per stap is waar nodig aangegeven welke aanvulling er is voor de betontechnoloog. Deze aanvullingen zijn vervolgens na het stappenplan afzonderlijk verder uitgewerkt.

### 2.1.1 Algemeen stappenplan

Het algemene stappenplan voor het ontwerpen van een betonsamenstelling voor traditioneel beton is als volgt:

*Stap 1: Bereken de benodigde gemiddelde kubusdruksterkte ( $f_{cm,28}$ ) uit de vereiste karakteristieke kubusdruksterkte ( $f_{ck}$ ).*

In deze stap wordt er rekening mee gehouden dat een betonsamenstelling weliswaar op een karakteristieke sterkte wordt gespecificeerd en gekeurd, maar op een gemiddelde sterkte wordt ontworpen. De algemene regel voor deze stap is dat bij de karakteristieke kubusdruksterkte 8 N/mm<sup>2</sup> wordt opgeteld om aan het gemiddelde te komen. Dus  $f_{cm,28} = f_{ck} + 8$  in N/mm<sup>2</sup>.

*Let op: indien een bepaalde 'vroege druksterkte' is gespecificeerd, bijvoorbeeld in verband met ontkisten of het aanbrengen van voorspanning, kan deze ook maatgevend zijn voor het mengselontwerp. Een dergelijke sterkte wordt echter als een benodigde gemiddelde kubusdruksterkte ( $f_{cm,j}$ ) opgegeven en deze hoeft dus niet gecorrigeerd te worden maar kan direct worden gebruikt voor stap 3.*

*Aanvulling:*

*Indien een luchtbelvormer wordt toegepast moet de benodigde gemiddelde druksterkte vervolgens nog worden gecorrigeerd voor het sterkteverlies door de extra ingebrachte lucht.*

*Stap 2: Leg vast wat de rekenwaarde is voor de normsterkte van het cement.*

De normsterkte van het cement geeft aan welke sterkte na 28 dagen bereikt wordt wanneer het betreffende cement wordt toegepast in een standaardmortel met een wcf van 0,50. De producent van cement kan de rekenwaardes opgeven. Voor een aantal cementen zijn rekenwaardes opgenomen in de algemene gegevens.

*Let op: indien een bepaalde 'vroege druksterkte' is gespecificeerd, bijvoorbeeld na 1 dag, dan dient naast de rekenwaarde na 28 dagen, ook een rekenwaarde na 1 dag te worden vastgelegd.*

*Aanvulling:*

*Indien een combinatie van cementen wordt gebruikt dienen de rekenwaardes voor de combinatie te worden berekend.*

*Stap 3: Stel de wcf voor het mengselontwerp vast.*

- > 1. *Bereken de wcf, nodig voor het bereiken van de vereiste sterkte.*  
Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de formule:

$$f_{cm,j} = 0,8 \times N_j + \frac{25}{wcf} - 45$$

*Let op: indien een 'vroegedruksterkte' is gespecificeerd is het noodzakelijk hiervoor afzonderlijk de wcf uit te rekenen met de bijbehorende benodigde gemiddelde druksterkte en normsterkte (bijvoorbeeld na 1 dag,  $j = 1$ ).*

- > 2. *Bepaal de maximaal toelaatbare wcf op basis van duurzaamheid.*  
Deze volgt uit de tabel met de per milieuklasse maximaal toelaatbare wcf.

*Let op: door wisselingen in vocht uit het toeslagmateriaal kunnen er schommelingen optreden in de hoeveelheid water in een mengsel. Om te voorkomen dat hierdoor de maximaal toelaatbare wcf wordt overschreden wordt de voor de mengselsamenstelling aan te houden wcf met 0,02 verlaagd. Dus  $wcf_{\text{voor ontwerp}} = \text{maximaal toelaatbare wcf} - 0,02$ .*

- > 3. *Bepaal de maatgevende wcf voor het berekenen van de betonsamenstelling.*  
Dit is de laagste wcf die volgt uit de combinatie van de berekeningen voor de sterkte (1) en uit hetgeen vanuit de duurzaamheid toelaatbaar is (2).

*Stap 4: Bereken de korrelgrootteverdeling van het toeslagmaterialenmengsel.*

Bij gebruik van één fractie zand en één fractie grind wordt gebruik gemaakt van de formule:

$$P_z = \frac{M_x - G_x}{Z_x - G_x} \times 100\%$$

Met behulp van de korrelgrootteverdelingen van de toeslagmaterialen en het gewenste ontwerpgebied kan met deze formule het percentage fijn- (zand) en het percentage grof toeslagmateriaal worden berekend.

*Aanvulling:*

*Wanneer meerdere fracties fijn en/of grof toeslagmateriaal beschikbaar zijn is het met bovenstaande formule niet mogelijk om de verhouding tussen deze fracties uit te rekenen. In dat geval kan gebruik worden gemaakt van de grafische methode.*

*Stap 5 Controle ontwerpgebied.*

Met behulp van de berekende of afgelezen percentages, en de korrelgrootteverdelingen van de afzonderlijke toeslagmaterialen, kan de korrelgrootteverdeling van het toeslagmaterialenmengsel worden berekend.

Van deze korrelgrootteverdeling dient vastgesteld te worden of deze in ontwerpgebied I of ontwerpgebied I+II ligt.

*Let op: in verband met de waterbehoefte is het raadzaam dat de korrelgrootteverdeling binnen ontwerpgebied I ligt.*

*Indien vastgesteld wordt dat dit niet het geval is, maar het wordt wel gevraagd, dan dienen de percentages toeslagmaterialen opnieuw te worden berekend.*

*Stap 6: Bepaal de waterbehoefte.*

De waterbehoefte volgt voor traditioneel beton uit de eigenschappen van het toeslagmaterialenmengsel (maximale korrel en ontwerpgebied) en de gespecificeerde consistentieklasse.

*Aanvulling:*

*Er zijn veel meer factoren die de waterbehoefte bepalen zoals korrelvorm van het toeslagmateriaal. Daarnaast kan de waterbehoefte worden gereduceerd door waterreducerende hulpstoffen toe te passen.*

*Bij het gebruik van hulpstofcombinaties kunnen de individuele hulpstoffen invloed hebben op elkaars werking (interactie). Indien de producent niet bekend is met werking van een bepaalde hulpstofcombinatie, moet hij geschiktheidsproeven doen met deze combinatie.*

*Stap 7: Bereken het cement-/bindmiddelgehalte.*

Het gehalte aan cement/bindmiddel wordt berekend door de waterbehoefte te delen door de maatgevende wcf.

*Let op: controleer altijd of dit gehalte voldoet aan de eis voor het minimale cement-/bindmiddelgehalte voor de van toepassing zijnde milieuklassen.*

*Aanvulling:*

*Het gehalte aan cement kan worden vervangen door een gehalte aan bindmiddel. In dat geval kan een gedeelte van vlieg-as of silica-fume mee worden gerekend in de wcf cq. wbf.*

*Stap 8: Bereken de hoeveelheden van alle te doseren grondstoffen .*

Uitleveringsberekening.

*Stap 9: Maak een afweegstaat/opgave voor de mengmeester.*

Bereken de hoeveelheden te doseren grondstoffen, inclusief alle correcties voor vocht. Deze stap kan worden gecombineerd met stap 8 bij het gebruik van het spreadsheet voor de uitleveringsberekening.

*Let op: hierbij dient rekening gehouden te worden met de waterabsorptie van het toeslagmateriaal.*

*Stap 10: Voer de controleberekeningen uit. Pas eventueel de betonsamenstelling aan.*

*Aanvulling:*

*Gecontroleerd dient te worden of*

- 1. de hoeveelheid fijn materiaal < 0,250 mm voldoet;*
- 2. het chloridegehalte voldoet;*
- 3. het alkaligehalte voldoet.*

### 2.1.2 Invloed van lucht op de sterkte

In betonspecie kan om verschillende redenen een zeker percentage lucht worden ingebracht. Bijvoorbeeld ter verbetering van de speciestabiliteit en/of aanvulling van het gehalte fijne delen. Lucht wordt ook toegepast om de vorstbestandheid van beton te verbeteren.

Bij het mengselontwerp moet hiermee rekening worden gehouden. Het is niet alleen belangrijk om het luchtgehalte "mee te nemen" in de uitleveringsberekening, maar elk % lucht boven de 2% levert ook een sterkteverlies van circa 5%.

Dit betekent dat bij bijvoorbeeld 3% lucht in het mengsel het sterkteverlies 5% is. De benodigde gemiddelde sterkte van 45 N/mm<sup>2</sup> is in dat geval 95% van de oorspronkelijke sterkte. Voor elk % meer lucht is de rekenwaarde voor het sterkteverlies steeds 5%.

Bij een luchtgehalte (L) van 6% (= 4% boven de 2%) kan de rekenwaarde voor de benodigde gemiddelde sterkte worden aangepast door deze te delen door de factor 0,95<sup>(L-2)</sup>. Indien bijvoorbeeld (zonder lucht) de rekenwaarde voor de gemiddelde sterkte 45 N/mm<sup>2</sup> zou zijn, levert dit een aangepaste rekenwaarde voor de sterkte van

$$\frac{45}{0,95^4} = 55,2 \text{ N/mm}^2.$$

### 2.1.3 Rekenen met vroege sterkte

Als het mengselontwerp (ook) moet worden afgestemd op een eis voor de vroege sterkte, moet naast de benodigde gemiddelde druksterkte voor 28 dagen ook gerekend worden met de benodigde gemiddelde druksterkte op dat moment. Dan moet ook de normsterkte van het cement op dat moment worden gebruikt. De productinformatie van veel cementproducenten vermeldt naast de 28-daagse normsterkte meestal ook de sterkte na 1, 2 en 7 dagen. Door zowel de waarde voor de eindsterkte als de waarde voor de gewenste vroege sterkte in de formule in te voeren, kan de benodigde water-cementfactor, waarmee aan beide eisen wordt voldaan, worden berekend.

### 2.1.4 Rekenen met cementmengsels

Er kunnen verschillende redenen zijn om te werken met een mengsel van cementen. Vaak wordt omwille van de vroege sterkte in koudere perioden een deel van het cement vervangen door een snel verhardend en/of minder temperatuurgevoelig cement. Ook kunnen cementen worden gemengd om de prestaties in relatie tot sterkteontwikkeling te optimaliseren en toch de warmteontwikkeling beperkt te houden of een bepaald minimum percentage slak toe te passen (van belang voor duurzaamheid).

Als cementen worden gemengd mag de prestatie van het mengsel worden berekend naar rato van het aandeel van beide cementen in het mengsel. Indien bijvoorbeeld een cement met een normsterkte van 46 N/mm<sup>2</sup> na 28 dagen wordt gemengd met een cement met op datzelfde tijdstip een normsterkte van 63 N/mm<sup>2</sup> in een verhouding 80/20, dan wordt de normsterkte van het mengsel: 0,8 x 46 + 0,2 x 63 = 49 N/mm<sup>2</sup>.

2.1.5 Mengsels van toeslagmaterialen: de grafische methode

De grafische methode wordt gebruikt om de mengverhouding te berekenen als twee of meer grove korrelgroepen worden toegepast naast één of meer fijne korrelgroepen. Ook bij deze methode gaan we uit van een gekozen, 'ideale' lijn voor het mengsel. In dit geval bepalen we grafisch in plaats van rekenkundig met welke mengverhouding we deze ideale lijn zo goed mogelijk kunnen benaderen.

Uitgangspunt bij de grafische methode is dat de ideale lijn als een rechte lijn wordt getekend in de grafiek met het zeefdiagram.

Die ideale lijn kan zijn een theoretische ideale lijn, zoals de Fullerkromme, maar kan ook een korrelgrootteverdeling zijn waarmee in de praktijk goede ervaring is opgedaan.

Om duidelijk te maken hoe we van een ideale lijn op bijvoorbeeld een logaritmische schaal naar een ideale rechte lijn kunnen komen, is in figuur 2.1 een willekeurige ideale lijn getekend op een logaritmeschaal. Op deze schaal is dit gewoonlijk een kromme lijn. Deze kromme lijn moeten we gaan uitzetten als een rechte lijn.

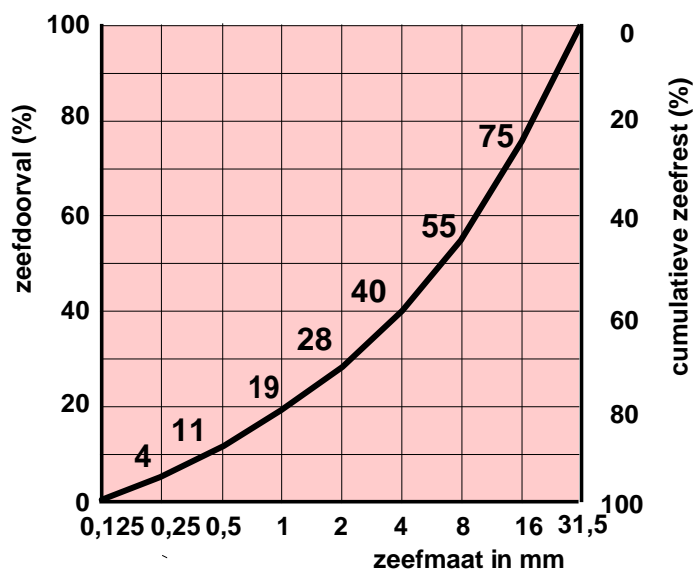
Door de plaats van de zeefopeningen op de x-as te veranderen, is het mogelijk die kromme lijn om te vormen tot een rechte lijn. Daarbij zijn de onderlinge afstanden tussen de verschillende zeefopeningen in deze grafiek niet meer aan elkaar gelijk.

We gaan vervolgens uit van een rechte lijn tussen de kleinste zeefopening van de fijnste korrelgroep en de grootste zeefopening van de grofste korrelgroep, waarbij de tussenliggende zeefopeningen nog niet zijn ingetekend. In figuur 2.2 zijn deze kleinste zeefopening ( $d$ ) en grootste zeefopening ( $D$ ) aangegeven.

*Voorbeeld*

In figuur 2.2 is de rechte lijn getekend tussen de zeefopening  $d$  en  $D$ . Vervolgens moeten we in deze figuur de positie van de tussenliggende zeefopeningen op de x-as vaststellen.

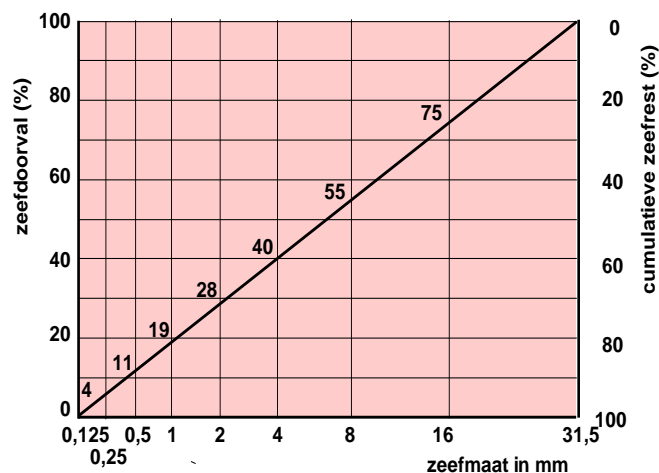
Dat doen we door de zeefdoorval van figuur 2.1 uit te zetten op de verticale as van figuur 2.2. Vanuit die waarden wordt een horizontale lijn getekend. Het snijpunt van die lijn met de rechte lijn markeert de bijbehorende positie van de desbetreffende zeefopening. Als we alle zeefopeningen hebben ingetekend, kunnen we de zeefanalyses van de gekozen materialen intekenen. Dat is uitgewerkt aan de hand van het volgende voorbeeld.



Figuur 2.1 Zeefdiagram met aangenomen 'ideale' korrelgrootteverdeling.

De methode werkt op dezelfde manier bij andere gewenste korrelgrootteverdelingen. Ook die waarden worden uitgezet op de verticale as. Vanuit de waarden wordt een horizontale lijn getekend, waarbij het snijpunt van die lijn met de rechte lijn de bijbehorende positie van de zeefopening markeert.

Hierna wordt een rekenvoorbeeld uitgewerkt, waarbij de mengverhouding van drie materialen wordt berekend om daarmee een "willekeurige" gewenste korrelgrootteverdeling te krijgen. Op dezelfde manier kunnen met de grafische methode mengsels worden gemaakt met 4 of meer materialen.



Figuur 2.2 Zeefdiagram met 'ideale' rechte lijn en aangepaste x-as.

*Voorbeeld van de grafische methode*

In het volgende voorbeeld moet een mengsel worden samengesteld op basis van de materialen zand, grind en basalt. De zeefanalyses van de verschillende materialen en de gewenste korrelgrootteverdeling zijn gegeven in tabel 2.1. De tussenzeven moeten worden gebruikt om voor de grove korrelgroepen een indruk te krijgen van het verloop van de zeeflijnen.

Tabel 2.1 Zeefanalyses beschikbare materialen en gewenste korrelgrootteverdeling.

zeven [mm]	doorval in %			
	zand	grind	basalt	gewenste korrelverdeling
63	100	100	99	100
45	100	100	80	90
31,5	100	100	60	80
22,4	100	100	35	70
16	100	98	10	60
11,2	100	78	2	50
8	100	52	0	40
4	98	19	0	30
2	90	3	0	20
1	78	0	0	15
0,500	25	0	0	10
0,250	15	0	0	5
0,125	0	0	0	0



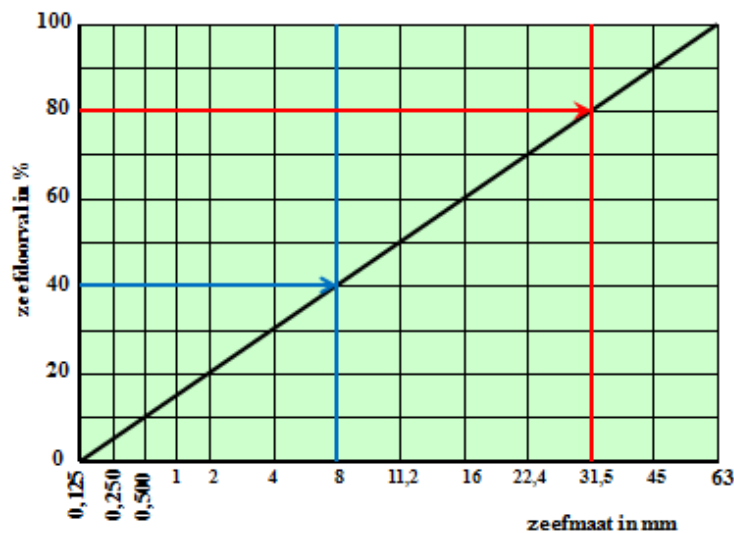
*Uitwerking van het voorbeeld.*

We starten met een grafiek met op de verticale as de percentages 0 tot 100. Op de horizontale as geven we de kleinste zeefopening 0,125 en de grootste zeefopening 63 aan. Zoals ook in het vorig voorbeeld trekken we een rechte lijn tussen de kleinste zeefopening van de fijnste korrelgroep en de grootste zeefopening van de grofste korrelgroep (de tussenliggende zeefopeningen zijn nog niet ingetekend).

In dit geval is de kleinste zeefopening ( $d$ ) 0,125 (gewenste zeefdoorval 0%) en de grootste zeefopening ( $D$ ) 63 (gewenste zeefdoorval 100%).

Vervolgens moeten we in de grafiek de positie van de tussenliggende zeefopeningen op de x-as vaststellen. Dat doen we door de gewenste zeefdoorval voor het toeslagmaterialenmengsel uit te zetten op de verticale as. Vanuit die waarden wordt een horizontale lijn getekend. Het snijpunt van die lijn met de rechte lijn markeert de bijbehorende positie van de zeefopening.

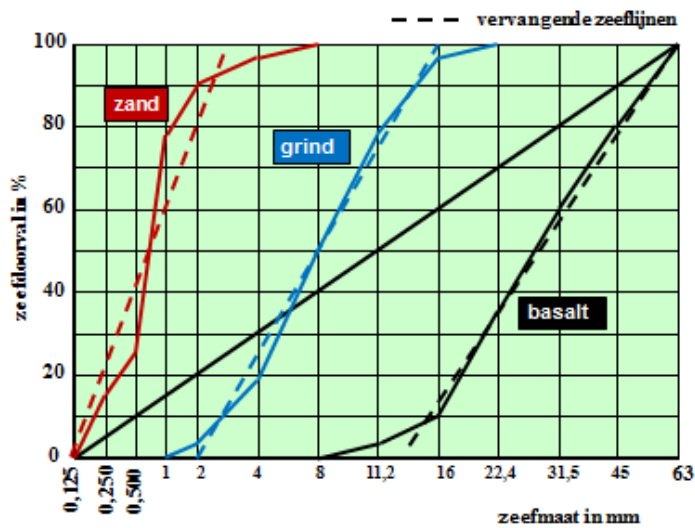
Als voorbeeld is in figuur 2.3 de lijn voor zeefopening 31,5 (gewenste doorval 80%) en zeefopening 8 (gewenste doorval 40%) ingetekend. Dezelfde werkwijze hanteren we om alle zeven uit te zetten op de horizontale as.



*Figuur 2.3 Gewenste korrelverdeling als rechte lijn.*

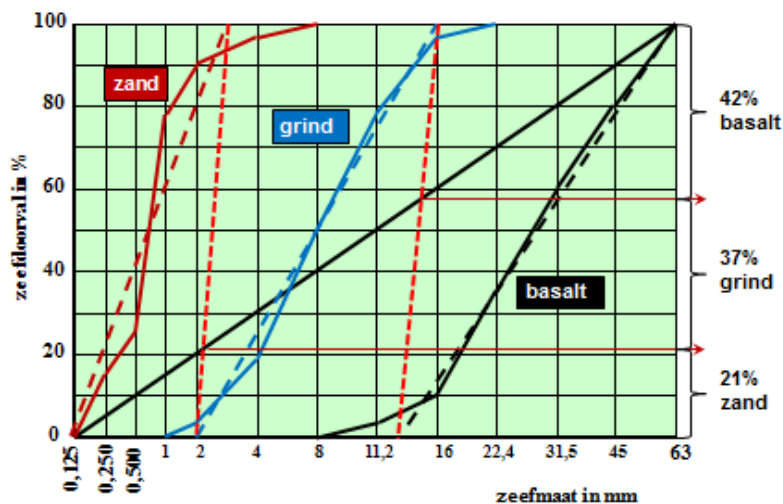
Als zo op de x-as alle zeefopeningen zijn ingetekend, wordt voor elk materiaal de zeeflijn in het diagram ingetekend.

Vervolgens wordt voor elk materiaal een vervangende rechte lijn getekend, zodanig dat de oppervlakken links en rechts van de vervangende lijn zo klein mogelijk en ongeveer gelijk zijn. De eerste vervangende lijn begint bij  $d$  en de laatste eindigt bij  $D_{max}$ . Zie figuur 2.4.



Figuur 2.4 Ingetekende zeeflijnen en vervangende zeeflijnen.

De onder- en bovineinden van de drie vervangende lijnen zijn onderling verbonden. Deze verbindingslijnen snijden de 'ideale' lijn. De snijpunten worden overgebracht naar de verticale as, waar dan de mengverhouding van de materialen in procenten is af te lezen. De volgorde van de snijpunten van links naar rechts komt overeen met de materialen van links naar rechts. Dus: van het begin van de rechte lijn tot het snijpunt met de eerste verbindingslijn vertegenwoordigt de hoeveelheid zand.



Figuur 2.5 Overbrengen snijpunten naar de verticale as (bron: Betoniek 15/28).

De grafische methode levert voor het gekozen voorbeeld de volgende mengverhouding:  
 21 % zand;  
 37 % grind;  
 42 % basalt.

Let op: deze percentages zijn volumeprocenten (%V/V); na het omrekenen in massa-procenten kan door verschillen in volumieke massa's van de materialen de verhouding in de af te wegen massa's hiervan verschillen!

## 2.1.6 Afwijkende waterbehoefte

*Invloed korrelgrootteverdeling*

In dit hoofdstuk is al eerder opgemerkt dat in de praktijk de waterbehoefte afhangt van veel factoren. Zo hangt de waterbehoefte in de eerste plaats af van de korrelgrootteverdeling van het toeslagmateriaal. Gemakshalve hebben we de korrelgrootteverdeling van mengsels van toeslagmaterialen opgedeeld in twee zogenoemde ontwerpgebieden.

In tabel 2.2 zijn richtwaarden opgenomen voor deze beide gebieden voor een verschillende grootste korrelafmeting.

*Invloed korrelvorm*

De vorm van de korrels heeft op twee manieren invloed op de waterbehoefte. In de eerste plaats is het oppervlak per volume groter als een korrel niet rond (geen bol) is waardoor meer water aan het oppervlak van de korrel wordt geabsorbeerd. De waterbehoefte neemt daardoor toe. In de tweede plaats zullen de korrels wanneer zij niet rond of glad zijn, moeilijker langs elkaar kunnen bewegen. Vooral indien de fijne korrels niet rond zijn zal dat de waterbehoefte flink verhogen.

Tabel 2.2 Richtwaarden voor de waterbehoefte in kg, afhankelijk van maximale korrelgrootte  $D_{max}$  en consistentieklasse voor korrelgrootteverdelingen in ontwerpgebied I.

consistentieklasse	$D_{max}$				
	8	11	16	22	32
C0	155	150	145	140	135
C1, S1, F1	170	165	160	155	150
C2, S2, F2	185	180	175	170	165
C3, S3, F3	200	195	190	185	180
<b>aanpassingen richtwaarden:</b>					
mengsel in ontwerpgebied II				+ 20 kg	
gebroken grof toeslagmateriaal				+ 5 kg	
gebroken fijn toeslagmateriaal				+ 20 kg	

Met de korrelgrootte van het toeslagmateriaal en de korrelvorm zijn nog niet alle factoren die invloed hebben op de waterbehoefte besproken. De waterbehoefte wordt ook beïnvloed door:

- de toepassing van hulpstoffen, zoals plastificeerders en luchtbelvormers;
- toevoegingen als vulstoffen, kleurstoffen en vezels;
- het gebruikte cement;
- de specietemperatuur;
- de textuur van de verschillende korrels.

Deze opsomming is niet compleet. In de praktijk zijn er veel meer factoren. Denk hierbij aan mengprocedure, de mengenergie, enzovoort.

Alleen door middel van een geschiktheidsonderzoek (zie hoofdstuk 6) kan de exacte waterbehoefte worden vastgesteld. Voor een eerste mengselberekening is het echter voldoende uit te gaan van een richtwaarde.

### 2.1.7 Rekenen met (water reducerende) hulpstoffen.

Indien bij vloeibare hulpstoffen de totaal te doseren hoeveelheid hulpstof meer is dan 3 liter per m<sup>3</sup> moet het watergehalte van de hulpstof worden meegeteld bij de berekening van de water-cementfactor. Indien bijvoorbeeld in een betonmengsel 6,25 l hulpstof met een vaste stofgehalte van 20% wordt verwerkt, moet  $0,8 \times 6,25 = 5$  liter water worden opgeteld bij het totaal effectief watergehalte. De water-cementfactor wordt daarmee hoger dan was voorzien. Om de water-cementfactor constant te houden, zal daarom het water in de hulpstof in mindering moeten worden gebracht op het aanmaakwater. In het laatste gedeelte van hoofdstuk 1.8 is hierop reeds gewezen.

### 2.1.8 Minimum hoeveelheid fijn materiaal

Bij het storten en verwerken kan aan het oppervlak waterafscheiding optreden. Dit noemen we ook wel bleeding. Dit kan gunstig zijn omdat het voorkomt dat het oppervlak uitdroogt en mogelijk scheurt. Wanneer het echter teveel wordt, kan de betonspecie instabiel worden. In minder stabiele betonspecie kunnen uitzakkende grindkorrels op horizontale wapeningsstaven blijven hangen, terwijl tussen de staven de kleinere korrels verder bewegen. In vloeren en balken kunnen boven de wapening hierdoor scheuren ontstaan in jong beton. Aan de onderzijde van wapeningsstaven kan door plaatselijke uitzakking en wateruitstoting een waterlens ontstaan die na verharden en drogen achterblijft als holle ruimte. De ontbrekende hechting tussen beton en wapening is constructief ontoelaatbaar, en bovendien is het staal ter plaatse onvoldoende tegen corrosie beschermd.

Ontmenging door excessieve bleeding kunnen we voorkomen door:

1. een zo droog mogelijke specie aan te maken;
2. een zeer fijn gemalen cement te gebruiken;
3. het totale specifieke oppervlak van het mengsel te vergroten door meer cement, poederkoolvliegias of een andere minerale vulstof toe te passen;
4. een goede, continue korrelgrootteverdeling te gebruiken. Dit vergt immers een minimale hoeveelheid water voor een bepaalde verwerkbaarheid;
5. een hulpstof zoals een versneller, een superplastificeerder of een luchtbelvormer te gebruiken:
  - een versneller bevordert de binding, waardoor de bleeding eerder stopt;
  - met een (super)plastificeerder wordt eenzelfde verwerkbaarheid verkregen met minder water;
  - een luchtbelvormer werkt niet alleen plastificerend, maar het zeer grote aantal kleine luchtbelletjes verbetert ook de samenhang van het mengsel. De luchtbelletjes vervullen als het ware dezelfde functie als fijne zandkorrels. Ze vergroten het totale specifieke oppervlak.

De meest effectieve maatregel tegen waterafscheiding (bleeding) is betonspecie samenstellen met voldoende fijn materiaal. In NEN 8005 zijn daarom eisen vastgelegd voor de minimale hoeveelheid fijn materiaal in beton. Deze eisen zijn afhankelijk van de grootste korrelafmeting D (zie tabel 2.3). Tot fijn materiaal rekenen we cement, fijn zand (< 0,250 mm) en andere fijne bestanddelen, zoals vulstoffen (poederkoolvliegias, tras en kleurstof).

Tabel 2.3 *Minimum hoeveelheid fijn materiaal < 0,250 mm.*

grootste korrelafmeting $D$ [mm]	minimumhoeveelheid fijn materiaal (< 0,250 mm) per $m^3$ beton [ in $m^3$ ]
< 8	in onderling overleg
8	0,140
11	0,130
16	0,125
22	0,120
32	0,115

Fijn verdeelde luchtbellens die met een luchtbelvormer worden ingebracht, mogen we als fijn materiaal in rekening brengen. NEN 8005 geeft hiervoor de aanwijzing volgens tabel 2.4.

Tabel 2.4 *Luchtgehalte, te rekenen als fijn materiaal.*

gemeten luchtgehalte van de specie % (V/V)	effectief luchtgehalte per $m^3$ beton, te rekenen als fijn materiaal [ in $m^3$ ]
2,0	-
3,0	0,010
4,0	0,020
5,0	0,030
6,0	0,040

Voor een aantal verwerkingsmethoden, zoals het verpompen van betonspecie, gelden hogere waarden. Deze moeten we proefondervindelijk vaststellen. Bij het in het werk brengen van betonspecie met een kubel, kunnen we volstaan met de in de NEN 8005 genoemde hoeveelheid fijn materiaal. Als we de betonspecie met een pomp verwerken, vraagt dit vaak meer 'smeermiddel' in de specie. De praktijk heeft geleerd dat we dan bij een grootste korrelafmeting van 32 een minimale hoeveelheid fijn materiaal van circa  $0,135 m^3$  per  $m^3$  beton moeten aanhouden.

Vooraf in vloeibare species speelt de hoeveelheid fijn materiaal (< 0,250 mm) een belangrijke rol om voldoende stabiliteit te behouden. Zo zal bij de toepassing van een superplastificeerder net als bij pompbeton de hoeveelheid fijn materiaal moeten worden verhoogd. Tabel 2.5 geeft een indicatie van de benodigde hoeveelheid fijn materiaal, afhankelijk van de grootste korrelafmeting zoals die in vloeibare species in combinatie met een superplastificeerder aangehouden kan worden. De betontechnoloog bepaalt de keuze van het type superplastificeerder, afhankelijk van de verwerkingsomstandigheden.

Tabel 2.5 Richtlijn voor de hoeveelheid fijn materiaal voor betonspecies in consistentieklasse F4.

grootste korrelafmeting D [ in mm]	aanbevolen hoeveelheid fijn materiaal per m <sup>3</sup> [in m <sup>3</sup> ]
8	0,165 – 0,180
11	0,150 – 0,165
16	0,135 – 0,150
22	0,135 – 0,145
32	0,130 – 0,140

De hoeveelheid fijn materiaal kunnen we niet onbeperkt variëren. Een te kleine hoeveelheid leidt tot moeilijk verwerkbaar mengsels; een te grote hoeveelheid tot een grote toename van het specifieke oppervlak, waardoor een grotere waterbehoefte ontstaat.

De hoeveelheid fijn materiaal kunnen we verhogen door cement, poederkoolvliegias, fijn zand of extra lucht toe te voegen. Dit laatste moeten we afraden bij het verpompen van betonspecies over grote afstanden (honderden meters). In de praktijk is gebleken dat de extra lucht in dergelijke leidingen het pompen kan bemoeilijken.

De richtlijnen moeten we met enig voorbehoud hanteren. Niet alleen is discutabel welke hoeveelheid lucht we moeten meetellen, ook wordt niets gezegd over de werkelijke korrelgrootten van alle 'fijne' delen. Zo kan bij vervanging van cement door een gelijke hoeveelheid tras, poederkoolvliegias of een andere vulstof het karakter van de species merkbaar veranderen. Dat geldt ook voor het gebruik van een andere cementsoort (of -klasse) met een geheel andere fijnheid.

Uit tabel 2.3 blijkt dat, wanneer we de grootste korrelafmeting van de betonspecies verkleinen van 30 mm naar bijvoorbeeld 10 mm, de hoeveelheid fijn materiaal moet worden verhoogd. Dit kan door het cementgehalte te verhogen. Dat vraagt overleg met de afnemer. Meer cement verhoogt de hydratatiewarmte, waardoor de kans op scheurvorming door thermische krimp toeneemt. Een goed alternatief is het verhogen van de hoeveelheid fijn materiaal door toevoegen van kalksteenmeel of poederkoolvliegias.

## 2.1.9

### Chloridegehalte

Een andere eigenschap die gecontroleerd moet worden, is het chloridegehalte.

Omdat bij te hoge percentages chloride de wapening kan worden aangetast, is het chloridegehalte in beton aan een maximum gebonden. Chloriden kunnen aanwezig zijn in vrijwel alle grondstoffen voor beton: cement, vulstoffen, toeslagmaterialen, hulpstoffen en aanmaakwater. Voor veel grondstoffen is geen grenswaarde voor het chloridegehalte in de betreffende productnorm opgenomen. Er wordt alleen aangegeven dat deze moet worden vastgesteld volgens een bepaalde testmethode. Om het chloridegehalte van beton te toetsen aan de grenswaarde voor de van toepassing zijnde chlorideklasse, moet de som van de bijdragen van de grondstoffen in het mengsel worden berekend. Calciumchloride en chloridehoudende hulpstoffen (dat zijn hulpstoffen met meer dan 0,1% (m/m) chloride) mogen niet worden toegevoegd aan beton dat wapening, voorspanstaal of andere ingesloten metalen bevat.

Het gehalte aan chloriden in beton, weergegeven als het percentage chloorionen per massa bindmiddel, mag niet hoger zijn dan de waarden voor de gekozen klasse zoals vermeld in tabel 2.6.

Tabel 2.6 Chlorideklassen en maximaal chloridegehalte ten opzichte van het bindmiddelgehalte in % (m/m).

aard van de constructie	chlorideklasse	maximaal chloridegehalte in % (m/m) <sup>a)</sup>
ongewapend beton	Cl 1,0	1,0
gewapend beton en voorgespannen beton met nagerekt voorspanstaal	Cl 0,40	0,40
voorgespannen beton met voorgerekt voorspanstaal	Cl 0,20	0,20

<sup>a)</sup> Indien type II vulstoffen worden gebruikt en in rekening worden gebracht als bindmiddel, geldt dat het chloridegehalte wordt uitgedrukt als het percentage chloride-ionen ten opzichte van de massa cement plus de massa vulstof die als bindmiddel in rekening wordt gebracht.

*Rekenvoorbeeld controle chloridegehalte*

In dit voorbeeld is de betonspecie bestemd voor een gewapend-betonconstructie. Volgens de tabel (NEN-EN 206) is het maximum chloridegehalte 0,40 % (m/m) ten opzichte van het bindmiddelgehalte. Het chloridegehalte van de samenstellende delen kan soms worden opgevraagd bij de leverancier of moet zelf worden bepaald.

Van onze materialen zijn de volgende chloridegehaltes bekend:

	chloridehalte (Cl <sup>-</sup> ) in % (m/m)	
CEM III/A 42,5N bevat	0,03	
rivierzand bevat	0,0004	ten opzichte van droog materiaal
riviergrind bevat	0,0004	ten opzichte van droog materiaal
aanmaakwater bevat	0,011	

Berekening gehalte aan chloriden:

333 kg	cement x 0,03/100 (m/m) Cl <sup>-</sup>	= 0,100 kg Cl <sup>-</sup>
784 kg	zand x 0,0004/100 (m/m) Cl <sup>-</sup>	= 0,003 kg Cl <sup>-</sup>
1157 kg	grind x 0,0004/100 (m/m) Cl <sup>-</sup>	= 0,005 kg Cl <sup>-</sup>
86 kg	aanmaakwater x 0,011/100 (m/m) Cl <sup>-</sup>	= 0,009 kg Cl <sup>-</sup>
<b>Totaal</b>		<b>= 0,117 kg Cl<sup>-</sup></b>

*Gehalte aan chloriden ten opzichte van het bindmiddelgehalte:*

$$= 0,117 \text{ [kg]} / 333 \text{ [kg]} \times 100 \% = 0,035 \% \text{ (m/m) Cl}^- \text{. Dit voldoet ruimschoots.}$$

Opmerking: het chloridegehalte van het toeslagmateriaal geeft aan hoeveel chlorides zich in het droge toeslagmateriaal bevinden. De berekening dient dus ook plaats te vinden met de hoeveelheden droog toeslagmateriaal.

2.1.10

Alkaligehalte

Om het risico van de alkali-silicareactie uit te sluiten kan het in sommige betonsamenstellingen nodig zijn het alkaligehalte te beperken. Zie hoofdstuk 1.7 voor verdere informatie.

De alkaligehaltes van de verschillende grondstoffen kunnen bij de diverse leveranciers worden opgevraagd:

Hieronder een rekenvoorbeeld voor de berekening van het totaal gehalte aan alkaliën (uitgedrukt in de Na<sub>2</sub>O-equivalent) in beton:

	alkaligehalte (Na <sub>2</sub> O-eq) in % (m/m)
CEM III/A 42,5 N	0,6 %
zand	0,010 % ten opzichte van droog materiaal
grind	0,012 % ten opzichte van droog materiaal
aanmaakwater	0,001 %

Berekening gehalte aan alkaliën:

333 kg CEM III/A 42,5N	x 0,6/100	= 1,998 kg per m <sup>3</sup>
780 kg zand	x 0,010/100	= 0,078 kg per m <sup>3</sup>
1157 kg grind	x 0,012/100	= 0,139 kg per m <sup>3</sup>
86 kg aanmaakwater	x 0,001/100	= <u>0,001 kg per m<sup>3</sup></u>
<b>Totaal :</b>		<b>= 2,216 kg per m<sup>3</sup></b>

Opmerking: het alkaligehalte van het toeslagmateriaal geeft aan hoeveel alkaliën zich in het droge toeslagmateriaal bevinden. De berekening dient dus ook plaats te vinden met de hoeveelheden droog toeslagmateriaal.



## 2.2 Zelfverdichtend beton

Om zelfverdichtend te zijn moet betonspecie over verschillende verwerkbaarheidseigenschappen tegelijk beschikken. Zo moet het:

- plastisch genoeg zijn om met weinig energie te vloeien;
- over veel samenhang beschikken om niet te ontmengen;
- ook niet te veel samenhang hebben zodat de specie niet goed verdicht;
- gemakkelijk tussen obstakels zoals wapeningsstaven door kunnen vloeien.

In welke mate het mengsel deze eigenschappen heeft, komt tot uitdrukking in de gespecificeerde klassen voor de vloeimaat (plasticiteit), de trechtertijd (viscositeit), de J-ring (blokkeringsmaat) en de zeef-segregatie test (ontmenging). Om een betonspecie te ontwerpen die rekening houdt met al deze eigenschappen moeten we een andere werkwijze volgen als voor traditioneel beton.

### 2.2.1 Stappenplan

Zelfverdichtend beton is constructief beton en dus zijn er ook eisen aan de sterkte en de duurzaamheid. Net als bij traditioneel beton moeten deze eisen eerst vertaald worden naar een maatgevende wcf. De eerste drie stappen in het mengselontwerp van zelfverdichtend beton zijn daarom gelijk aan die van traditioneel beton.

*Stap 1: Berekenen van de benodigde gemiddelde druksterkte uit de vereiste karakteristieke kubusdruksterkte.*

*Stap 2: Stel vast wat de rekenwaarde is voor de normsterkte van het cement of de gebruikte bindmiddelcombinatie.*

*Stap 3: Bepaal de maatgevende water-cementfactor.*

Bij traditioneel beton wordt vervolgens in stap 4 de verhouding tussen fijne en grove toeslagmaterialen vastgesteld aan de hand van de korrelgrootteverdelingen en de ontwerpgebieden. In stap 5 wordt een richtwaarde voor de waterbehoefte vastgesteld. In combinatie met de maatgevende water-cementfactor kan hiermee vervolgens in stap 6 de benodigde hoeveelheid cement/bindmiddel worden berekend.

Bij zelfverdichtend beton kunnen stap 4, 5 en 6 niet afzonderlijk worden gebruikt. Om tegelijk aan alle eisen voor de verwerkbaarheid te voldoen, is het niet meer voldoende om een richtwaarde voor de waterbehoefte vast te stellen, maar is het bijvoorbeeld ook van belang dat de juiste hoeveelheden poeder, hulpstof en toeslagmaterialen worden gebruikt. De hoeveelheid poeder in zelfverdichtende betonspecie speelt een belangrijke rol om ontmenging te voorkomen.

Het ontwerpen van mengsels voor zelfverdichtend beton vereist daarom een bijzondere methodiek. In dit dictaat behandelen we een daarvoor in Japan ontwikkelde methode. Bij deze methode worden proefondervindelijk, dat wil zeggen met laboratoriumproeven, de volumeverhoudingen tussen de gebruikte grondstoffen vastgesteld. Hiermee kan uiteindelijk een mengselsamenstelling worden berekend.

In het mengselontwerp voor zelfverdichtend beton volgens de Japanse methode wordt het mengsel stap voor stap opgebouwd. Om te beginnen wordt een pasta samengesteld bestaande uit poeder en water.

Vervolgens wordt deze pasta uitgebouwd tot een mortel door fijn toeslagmateriaal en hulpstof toe te voegen. Door aan deze mortel tot slotte grof toeslagmateriaal toe te voegen en rekening te houden met de hoeveel lucht in de specie eindigen we bij de betonspecie.

Voor zelfverdichtend beton worden dus de volgende aangepaste stappen gehanteerd:

*Stap 4: Vaststellen waterbehoefte van de poeders*

*Stap 5: Vaststellen samenstelling mortel*

*Stap 6: Vaststellen samenstelling betonspecie*

*Stap 7: Berekening van de samenstelling*

En daarna weer volgens het stappenplan voor traditioneel beton:

*Stap 8: Maak een afweegstaat/opgave voor de mengmeester*

*Stap 9: Voer de controleberekeningen uit.*

## 2.2.2

### Stap 4: Vaststellen waterbehoefte van de poeders

In het laboratorium begint het samenstellen van een mengsamenstelling voor zelfverdichtend beton met het vaststellen van de waterbehoefte van de poeders, zijnde cement en vulstof.

De waterbehoefte van de poeders geeft een eerste indicatie hoeveel water ten opzichte van poeder in een zelfverdichtend beton mengsel gebruikt moet gaan worden. Bij het vaststellen van de mortelsamenstelling wordt de waterbehoefte echter pas daadwerkelijk bepaald. Hierbij dient de waterbehoefte van de poeders wel als een belangrijk hulpmiddel.

### 2.2.2.1

#### *Waterbehoefte afzonderlijk poeder*

We beginnen met het vaststellen van de waterbehoefte van een afzonderlijk poeder. Dit kan het te gebruiken cement zijn of een vulstof zoals vlieg-as of kalksteenmeel. Dit poeder heeft een waterbehoefte die wordt aangeduid met het symbool  $\beta_p$  (Dit wordt uitgesproken als "beta p"). Veel producenten van poeders vermelden de waarde voor  $\beta_p$  in hun productinformatie. Als de  $\beta_p$  van een poeder dat we willen gebruiken niet bekend is, dan moet deze eerst worden bepaald.

#### **Bepalen van de waterbehoefte $\beta_p$ van een poeder**

$\beta_p$  is die hoeveelheid water waarmee een pasta (gemaakt van het poeder en water) nog net niet vloeit. De vloeit van zo'n pasta is dus eigenlijk niet meetbaar. Daarom wordt de vloeit gemeten van een pasta waar wat meer water aan toe is gevoegd en uit de verkregen meetwaarden wordt dan de hoeveelheid water berekend waarbij nog net geen vloeit optreedt.

De meting wordt met 4 verschillende watergehaltes als volgt uitgevoerd:

Van het betreffende poeder een liter pasta aangemaakt door een bepaalde hoeveelheid poeder te mengen met een bepaalde hoeveelheid water. De gehanteerde verhouding tussen het poeder en het water is van belang. Die wordt uitgedrukt als het volume water ten opzichte van het volume poeder en aangeduid als  $V_w/V_p$ . Wanneer bijvoorbeeld een pasta wordt aangemaakt die bestaat uit 0,50 liter water en 0,50 liter poeder (tezamen 1,00 liter) dan is de  $V_w/V_p$  dus  $0,50/0,50 = 1,00$ . Voor het aanmaken is  $0,50 \times 1000$  gram/liter = 500 gram water en bijvoorbeeld  $0,50 \times 2700$  gram/liter = 1350 gram kalksteenmeel nodig.

De pasta wordt aangemaakt door het poeder en water 4 keer 60 seconden te mengen. Na elke minuut wordt de wand van de mengkom schoon geschraapt.

Direct na het aanmaken wordt de pasta in een kegeltje gegoten met een onderste diameter van 100 mm ( $d_0$ ). Na het omhoogtrekken van de kegel vloeit de pasta cirkelvormig uit.



Figuur 2.6 Meten van de vloeimaat van een pasta.

*N.B. Bij sommige 'poeders' ontstaat geen homogene pasta, maar loopt een deel van het water weg van het 'poeder'. Dit komt bijvoorbeeld voor bij fijne stoffen die ontstaan tijdens het breekproces van toeslagmaterialen (breekstof). Er kan dan geen  $\beta_p$  worden bepaald. De betreffende fijne stof is toch nog te grof en moet dan niet als poeder worden beschouwd maar als fijn toeslagmateriaal.*

Als de pasta tot stilstand is gekomen, wordt in twee loodrechte richtingen de diameter bepaald ( $d_1$  en  $d_2$ ). Het resterende deel van de pasta wordt gebruikt om de proef een tweede keer op gelijke wijze uit te voeren ( $d_3$  en  $d_4$ ). Uit de vier gemeten waarden wordt een gemiddelde vloeimaat berekend ( $d$ ).

De gemiddelde vloeimaat  $d$  wordt vloeimaat omgerekend naar een  $\tau_p$ -waarde. Dit is een aanduiding voor de verhouding van het oppervlak van de uitgestroomde pasta ten opzichte van het oppervlak voorafgaand aan het uitstromen.

De  $\tau_p$  wordt als volgt berekend:

$$\tau_p = \frac{\frac{1}{4} \times \pi \times d^2}{\frac{1}{4} \times \pi \times d_0^2} - 1 = \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - 1 \tag{2.1}$$

waarbij:

- $d$  = gemiddelde vloeimaat en
- $d_0$  = diameter van het gebruikte kegeltje = 100 mm.

Uit de formule blijkt dat in het geval  $d_0$  gelijk is aan  $d$  (dus net geen vloeit) de waarde van  $\tau_p$  gelijk is aan 0.

De meting wordt 3 keer herhaald met een ander watergehalte. Dit levert 4 resultaten op van  $\tau_p$  de met bijbehorende waarde van  $V_w/V_p$ .

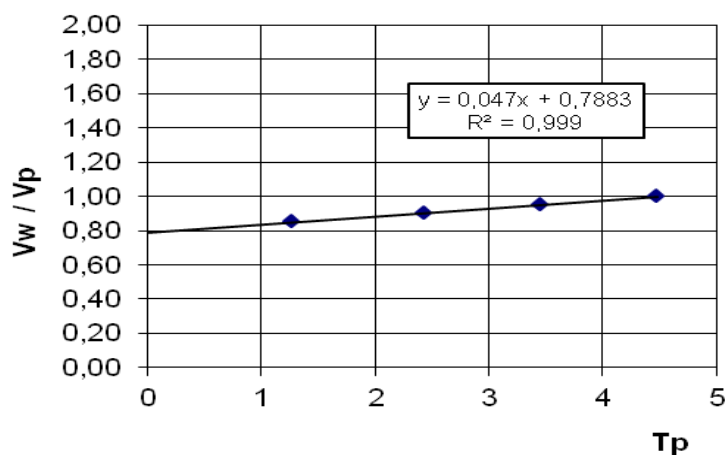
Er blijkt een lineaire relatie te bestaan tussen  $\tau_p$  en  $V_w/V_p$  bij de watergehalten waarmee de meting wordt uitgevoerd. Dat maakt het eenvoudig om de  $V_w/V_p$  te bepalen waarbij geen vloeit meer optreedt ( dus  $d_0$  gelijk is aan  $d$ ).

Voorbeeld van een berekening van  $\beta_p$  voor kalksteenmeel.

Tabel 2.7 Resultaten voor de bepaling van de waterbehoefte  $\beta_p$  van een kalksteenmeel.

mengverhoudingen					meetwaarden					
$V_w/V_p$	volume water [l]	volume poeder [l]	massa water [g]	massa poeder [g]	vloeimaat					$\tau_p$
					$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]	$d_3$ [mm]	$d_4$ [mm]	$d$ [mm]	
<b>0,85</b>	0,459	0,541	459	1460	148	150	154	151	151	<b>1,3</b>
<b>0,90</b>	0,474	0,526	474	1421	179	184	188	190	185	<b>2,4</b>
<b>0,95</b>	0,487	0,513	487	1385	208	209	214	213	211	<b>3,5</b>
<b>1,00</b>	0,500	0,500	500	1350	231	232	238	235	234	<b>4,5</b>

In een grafiek is vervolgens de  $\tau_p$  uitgezet tegen de bijbehorende  $V_w/V_p$ . (figuur 2.7)



Figuur 2.7 Grafische weergave van de relatie tussen  $\tau_p$  en  $V_w/V_p$ .

In de grafiek moeten ten minste 4 meetwaarden zijn uitgezet waarvoor geldt dat  $\tau_p$  tussen 1 en 5 ligt. In dat geval mag er een rechte lijn door de punten worden getrokken. In figuur 2.8 is door de computer een lineaire regressielijn getrokken, maar deze kan ook handmatig worden getekend.

De  $\beta_p$  van het betreffende poeder is de  $V_w/V_p$  waarvoor geldt dat  $\tau_p$  gelijk is aan 0. Dat is dus het snijpunt van de getrokken rechte lijn met de y-as. Uit figuur 2.8 volgt dat de  $\beta_p$  gelijk is aan 0,79. Dit is ook af te leiden uit de vergelijking van de regressielijn, namelijk de waarde die y heeft als x gelijk is aan nul:  $y = 0,047 \times 0 + 0,7883 = 0,7883 = 0,79$ .

Over het algemeen geldt dat cementen een grotere waterbehoefte  $\beta_p$  hebben dan vulstoffen. Daarnaast hebben fijne poeders een grotere waterbehoefte  $\beta_p$  dan grove poeders.

Enkele voorbeelden:

Tabel 2.8 Gebruikelijke waarden voor  $\beta_p$  voor verschillende poeders.

poeder	bereik $\beta_p$
CEM I 32,5	1,00 – 1,10
CEM I 52,5	1,10 – 1,35
kalksteenmeel	0,70 – 0,90
poederkoolvliegias	0,60 – 0,80

### 2.2.2.2

#### Waterbehoefte van een combinatie van poeders

In zelfverdichtend beton wordt gewoonlijk niet één poeder, maar een combinatie van twee poeders gebruikt: een cement en een vulstof, met name om de hoeveelheid cement te beperken. De vulstof kan inert zijn, zoals kalksteenmeel, of gedeeltelijk een bindmiddelfunctie hebben, zoals poederkoolvliegias.

Wanneer van beide poeders de  $\beta_p$  bekend is, kan door lineair te interpoleren de waterbehoefte van de combinatie, de  $\beta_{p,combi}$  worden berekend.

Hiervoor wordt de  $\beta_p$  van het cement vermenigvuldigd met het volumeaandeel cement ten opzichte van poeder ( $\%V_c$ ) en de  $\beta_p$  van de vulstof met het volumeaandeel vulstof ten opzichte van poeder ( $\%V_v$ ). Let op:  $\%V_v$  is dus een fractie en geen percentage. Deze schrijfwijze wordt elders in dit hoofdstuk ook op deze manier gebruikt.

In formulevorm:

$$\beta_{p,combi} = \%V_c \times \beta_{p,cement} + \%V_v \times \beta_{p,vulstof} \quad (2.2)$$

Voorbeeld - waterbehoefte van een combinatie van twee poeders

- CEM I 52,5 R       $\beta_p = 1,23$
- Kalksteenmeel       $\beta_p = 0,79$

Voor een mengsel van 75% cement en 25% kalksteenmeel (op volumebasis) geldt dat de  $\beta_{p,combi}$  gelijk is aan  $0,75 \times 1,23 + 0,25 \times 0,79 = 1,12$ .

Als 50% cement wordt gebruikt, is de  $\beta_{p,combi}$  gelijk aan  $0,50 \times 1,23 + 0,50 \times 0,79 = 1,01$ .

### 2.2.3

#### Stap 5: Vaststellen samenstelling van de mortel

Nu we de waterbehoefte van de poeders hebben vastgelegd, is de volgende stap het vaststellen van de mortelsamenstelling. Hiervoor wordt aan een pasta achtereenvolgens fijn toeslagmateriaal en hulpstof toegevoegd.

#### 2.2.3.1

##### Percentage fijn toeslagmateriaal

Het percentage fijn toeslagmateriaal in een mengsel ( $\%V_f$ ) drukken we in de Japanse methode uit als het volume van het fijne toeslagmateriaal ( $V_f$ ) ten opzichte van het volume van de mortel ( $V_m$ ). Ook hier is dus weer sprake van een fractie en niet van het percentage. Het volume aan mortel is op zijn beurt de som van het volume fijn toeslagmateriaal ( $V_f$ ) en het volume pasta ( $V_{pasta}$ ).

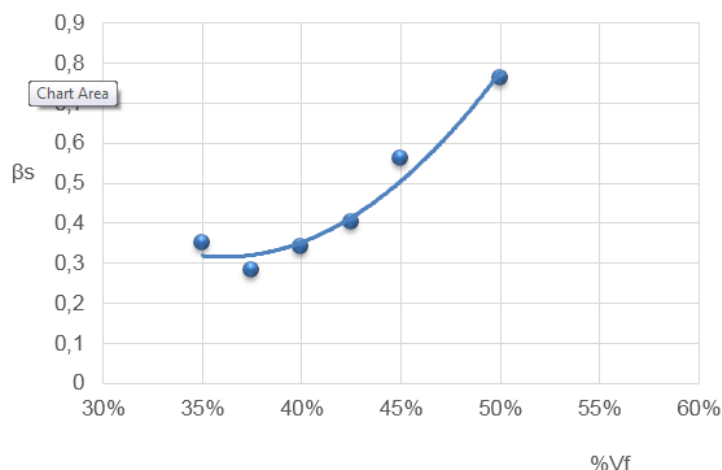
In formulevorm:

$$\%V_f = \frac{V_f}{V_f + V_{pasta}} = \frac{V_f}{V_m}$$

*Opmerking: Dit is anders dan we gewend zijn bij traditioneel beton. Daar wordt het percentage fijn toeslagmateriaal uitgedrukt ten opzichte van het totale volume aan toeslagmateriaal. Bij zelfverdichtend beton is het ten opzichte van het volume aan mortel.*

Om vast te stellen welk volumeaandeel fijn toeslagmateriaal in zelfverdichtend beton kan worden toegepast is in Japan onderzoek gedaan naar de relatie tussen de hoeveelheid fijn toeslagmateriaal in de mortel ( $\%V_f$ ) en de toename in de waterbehoefte die hierdoor ontstaat. Hiervoor zijn proeven uitgevoerd die overeenkomen met de hiervoor behandelde pastaproeven voor het bepalen van de  $\beta_p$ .

Bij de mortel wordt de waterbehoefte aangeduid met het symbool  $\beta_m$ . Uit de  $\beta_p$  van de pasta (zonder fijn toeslagmateriaal) en de  $\beta_m$  van de mortel (pasta + fijn toeslagmateriaal) kan de invloed van het fijne toeslagmateriaal op de waterbehoefte, aangeduid als  $\beta_s$ , worden berekend. Door het volumeaandeel fijn toeslagmateriaal uit te zetten tegen de bijbehorende waarde van  $\beta_s$  ontstaat een beeld zoals weergegeven in figuur 2.8.



*Figuur 2.8 Voorbeeld relatie  $\%V_f$  versus  $\beta_s$ .*

Tot  $\%V_f = 0,40$  (= 40%) blijkt er gewoonlijk geen toename te zijn in de  $\beta_s$ . Dit betekent dat het vervangen van de pasta door een zelfde volume aan fijn toeslagmateriaal niet zorgt voor een toename in de waterbehoefte. De samenstelling van de pasta blijft in dit gebied dus gelijk, alleen het volumeaandeel aan pasta in de mortel neemt af omdat dit vervangen wordt door fijn toeslagmateriaal. Tussen 40% en 50% fijn toeslagmateriaal blijkt zich vaak wel een stijging voor te doen in de  $\beta_s$ . Dit betekent dat er bij een toenemende hoeveelheid fijn toeslagmateriaal, steeds meer water nodig is ten opzichte van het poeder voor een gelijke vloeimaat. Omdat de mortel slechts bestaat uit fijn toeslagmateriaal, water en poeder betekent een toename van het watergehalte automatisch dat de hoeveelheid poeder steeds minder wordt. Er is dus steeds minder poeder beschikbaar om steeds meer water vast te houden. Dit leidt uiteindelijk tot ontmenging.

Niet voor elk fijn toeslagmateriaal heeft de stijging in de waterbehoefte vanaf hetzelfde volumeaandeel fijn toeslagmateriaal plaats. Voor het ene materiaal kan dit al bij 40% zijn, maar bij een ander bijvoorbeeld pas bij 45% of een nog hoger percentage. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in korrelgrootteverdeling en korrelvorm van het fijne toeslagmateriaal. Deze twee eigenschappen bepalen het gehalte aan holle ruimten en het gemak waarmee de korrels langs elkaar kunnen bewegen. Vooral dit laatste blijkt bij het fijne toeslagmateriaal een belangrijke factor.

40% is een voor elk willekeurig fijn toeslagmateriaal "veilig" volumeaandeel fijn toeslagmateriaal. Dat wil zeggen een volumeaandeel waarbij geen stijging optreedt in de waterbehoefte en dus geen verandering in de pastasamenstelling. In de Japanse methode wordt dit percentage dan ook als uitgangspunt genomen voor de berekening van de hoeveelheid fijn toeslagmateriaal in het mengsel. Wanneer echter rond rivierzand wordt gebruikt, zoals in Nederland vaak het geval is, kan een hoger percentage worden toegepast, tot ongeveer 45%. Bij gebruik van een hoger percentage dan 45% is het belangrijk rekening te houden met de invloed die dit kan hebben op de kans op ontmenging. Bij percentages hoger dan 50% treedt praktisch altijd ontmenging op.

Voor de mengselberekening volgt het volume aan fijn toeslagmateriaal in een mortel uit:

$$V_f = \%V_f \times V_m$$

### 2.2.3.2

#### *Percentage hulpstof*

Voor de volumeverhouding tussen het water en het poeder is vooralsnog uitgegaan van de waterbehoefte  $\beta_{p,combi}$  van de poeders. De  $\beta_p$  en de  $\beta_{p,combi}$  zijn echter die verhoudingen tussen het water en het poeder waarbij net nog geen vloeï optreedt (zie pasta-proef). Er zal dus een hulpstof, in de vorm van een superplastificeerder, moeten worden toegevoegd om de gewenste vloeïmaat te bereiken.

De hoeveelheid hulpstof wordt uitgedrukt als de massaverhouding ( $\%M_h$ ) tussen de hulpstof en het poeder. Verkort weergegeven:

$$\%M_h = \frac{\text{massa hulpstof}}{\text{massa poeder}} = \frac{M_h}{M_p}$$

Het benodigde percentage hulpstof is onder meer afhankelijk van:

- de gebruikte hulpstof
- het gebruikte cement
- de gebruikte vulstof
- het gebruikte fijne toeslagmateriaal
- de gewenste verwerkbaarheid
- de temperatuur van de omgeving

Het benodigde percentage hulpstof kan alleen proefondervindelijk worden vastgesteld. Hiervoor wordt aan een mortel met de toe te passen materialen en met de berekende samenstelling, een toenemende hoeveelheid hulpstof toegevoegd en de vloeïmaat bepaald. De bepaling van de vloeïmaat gebeurt op dezelfde wijze als bij een pasta-proef. De Japanse methode houdt voor de vloeïmaat van de mortel een richtwaarde aan van 250 +/- 5 mm voor een vloeïmaat van de betonspecie van 650 mm. Voor een hogere vloeïmaat kunnen de volgende richtwaarden worden aangehouden.

Tabel 2.9 Richtwaarden voor de vloeimaat van de mortel

beoogde vloeimaat betonspecie	richtwaarde vloeimaat mortel
650	250
750	300
850	350

De benodigde hoeveelheid hulpstof om de gewenste vloeimaat te bereiken moet altijd proefondervindelijk worden bepaald.

De hoeveelheid hulpstof voor de mengselberekening volgt uit:

$$M_h = \%M_h \times M_p$$

Hierin is  $M_p$  de totale massa aan poeder, dus cement(en) + vulstof(fen).

### 2.2.3.3

#### Het begrip $\kappa_p$

Wanneer aan een mortel een superplastificeerder wordt toegevoegd, neemt de vloeimaat toe. De mortel blijkt echter tegelijk ook minder stabiel te worden en daardoor gevoeliger voor ontmenging. Dit komt doordat de korrels relatief meer bewegingsvrijheid krijgen: het mengsel wordt minder viskeus (minder stroperig).

De viscositeit van een mortel kan worden bepaald door de trechtertijd te meten. Zie figuur 2.9. Dit is de tijd in seconden die een mortel nodig heeft om uit een trechter met bepaalde afmetingen te stromen. Hoe sneller de mortel uitstroomt, des te minder viskeus de mortel is en andersom, hoe langzamer de mortel uitstroomt, des te viskeuzer de mortel is.



Figuur 2.9 Bepalen van de vloeimaat en trechtertijd van een mortel.

Wanneer voor zelfverdichtend beton een klasse voor de viscositeit wordt gespecificeerd, ligt daarmee de benodigde trechtertijd vast. Dit is weliswaar de trechtertijd voor de betonspecie, maar wanneer de hoeveelheid grof toeslagmateriaal beperkt blijft blijkt dat de trechtertijd van de mortel ongeveer overeenkomt met die van de betonspecie. Dus als voor de betonspecie een trechtertijd wordt beoogd van 10 seconden, kan dit voor de mortel ook worden aangehouden.

De trechtertijd wordt enigszins beïnvloed door de hoeveelheid superplastificeerder die wordt toegevoegd. De hoeveelheid water heeft echter een veel grotere invloed. Bepalend



voor de viscositeit is dus met name de verhouding tussen het volume aan water in de mortel en het volume aan poeder. Dit wordt aangeduid als  $V_w/V_p$ .

De uiteindelijke invloed van de superplastificeerder op de hoeveelheid water die nodig is om de gewenste viscositeit te krijgen, komt tot uitdrukking in een verhoudingsgetal dat aangeduid wordt als  $\kappa_p$ . Het is de verhouding tussen de  $V_w/V_p$  van de mortel met de gewenste vloeimaat en trechertijd (en met superplastificeerder) en de waterbehoefte  $\beta_{p,combi}$  van de poeders (dus zonder superplastificeerder). In formulevorm:

$$\kappa_p = \frac{\frac{V_w}{V_p}}{\beta_{p,combi}}$$

We moeten dus proeven met mortels doen met verschillende waarden van  $V_w/V_p$  en  $\%M_h$  waarbij we de vloeimaat en trechertijd meten. Daarbij moet het in de hulpstof aanwezige water worden meegerekend in de waarde van  $V_w/V_p$ .

De samenstelling met de gewenste trechertijd en vloeimaat levert de waarde voor  $\kappa_p$ . Deze ligt gewoonlijk tussen 0,70 en 0,90. Voor viskeuze mengsels en/of zeer effectieve superplastificeerders (veel waterreductie) zal de waarde meer richting de 0,70 gaan en voor de minder viskeuze mengsels en/of minder effectieve superplastificeerders (weinig waterreductie) richting de 0,90. Een goede aanname is een waarde van 0,80 of 0,85.

#### ***Invloed van $\kappa_p$ op de mengselsamenstelling***

Als  $\kappa_p$  bekend is, kan daarmee worden berekend hoe de samenstelling van de mortel moet worden aangepast voor de gebruikte superplastificeerder en de gewenste combinatie vloeimaat/trechertijd. Voor de verhouding tussen water en poeder geldt:

$$\frac{V_w}{V_p} = \kappa_p \times \beta_{p,combi}$$

### 2.2.4      Step 6: Vaststellen samenstelling van de betonspecie

Nu de samenstelling van de mortel die het gewenste vloeigedrag en de gewenste viscositeit oplevert bekend is, zijn we toe aan het samenstellen van de betonspecie. Daarvoor gaan we grof toeslagmateriaal toevoegen. Vervolgens wordt het in de specie aanwezige lucht verrekend.

#### 2.2.4.1      *Percentage grof toeslagmateriaal*

In deze laatste stap proberen we zoveel mogelijk van de mortel en daarmee dus indirect ook de pasta, te vervangen door grof toeslagmateriaal met behoud van de eigenschappen (vloeigedrag en viscositeit) van de mortel.

De hoeveelheid grof toeslagmateriaal in een mengsel ( $\%V_g$ ) drukken we in de Japanse methode uit als het volume van het grove toeslagmateriaal ( $V_g$ ) ten opzichte van het volume van de betonspecie ( $V_b$ ). Het volume aan betonspecie is de som van het volume grof toeslagmateriaal ( $V_g$ ) en het volume aan mortel ( $V_m$ ). Oftewel:

$$\%V_g = \frac{V_g}{V_g + V_m} = \frac{V_g}{V_b}$$

*Opmerking: Dit is duidelijk anders dan bij traditioneel beton, waar het volumeaandeel grof toeslagmateriaal wordt uitgedrukt ten opzichte van het totale volume aan toeslagmateriaal.*

In Japan is onderzoek gedaan naar de vraag welk percentage grof toeslagmateriaal maximaal kan worden toegepast in een mengsel. Bij een toenemend percentage grof toeslagmateriaal in de betonspecie blijken de vloeimaat en de trechtertijd van de betonspecie aanvankelijk gelijk te blijven. Daarna neemt de vloeimaat snel af en neemt de trechtertijd snel toe. Hetzelfde verschijnsel zagen we voor de vloeimaat bij een toenemend percentage fijn toeslagmateriaal in de mortelspecie.

De wijze waarop dit gecompenseerd kan worden is echter anders. Bij het fijne toeslagmateriaal is het mogelijk het verlies aan vloeimaat te compenseren door meer water en minder poeder toe te voegen, dus een hogere  $V_w/V_p$ . Bij het grove toeslagmateriaal blijkt het verhogen van de  $V_w/V_p$  geen effect te hebben.

*N.B. Als dit wel het geval is, komt dit doordat zich nog veel fijne korrels 0 tot 4 mm in het grove toeslagmateriaal bevinden. Dit fijne gedeelte uit het grove toeslagmateriaal moet dan eerst als een onderdeel van het volumeaandeel fijn worden meegenomen in het mortelonderzoek.*

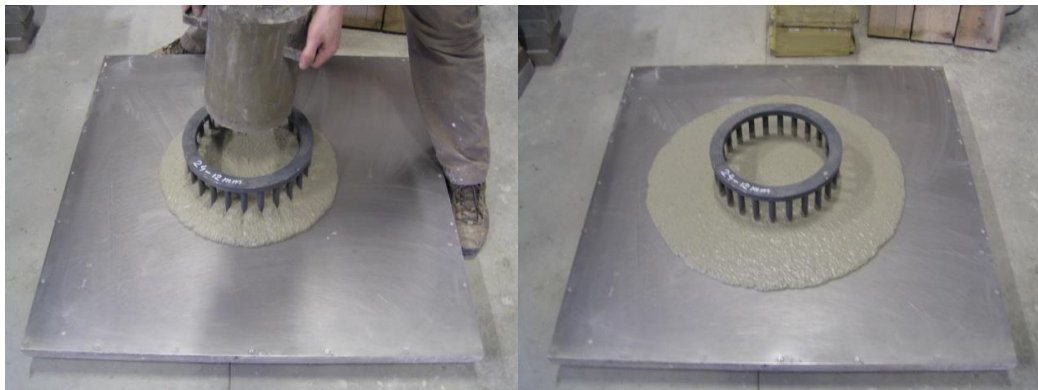


*Figuur 2.10 Bepalen van de vloeimaat en trechtertijd van betonspecie.*

Voor de grove korrels geldt dat wanneer er teveel zijn zij elkaar belemmeren bij het vloeien en bij het uitstromen uit de trechter. Dit is niet te voorkomen met meer water.

Er komt echter nog iets bij. Zelfverdichtend beton moet ook in staat zijn tussen obstakels door te stromen. Dit kunnen bijvoorbeeld wapeningsstaven zijn. Bij het passeren van vernauwingen moeten de grove korrels iets dichter naar elkaar toe. Als ze elkaar dan teveel hinderen, vormen ze een brug. Om dit te voorkomen wordt daarom soms aanvullend, naast een eis voor de vloeimaat en de trechtertijd, ook een eis gesteld aan de zogenoemde blokkeringsmaat.

De blokkeringsmaat kan op verschillende manieren worden gespecificeerd en beproefd. De standaardmethode voor Nederland is dat, bij het bepalen van de vloeimaat, een ring van staven rond de kegel wordt geplaatst, de zogenoemde J-ring. De kegel wordt opgetild en als de betonspecie is uitgevloeid wordt de hoogte in het midden en net achter de J-ring bepaald. Het verschil is een maat voor de blokkering.



*Figuur 2.6 Bepalen van de blokkeringsmaat van betonspecie met de J-ring.*

De blokkeringsmaat is een beperkende factor voor de hoeveelheid grof toeslagmateriaal dat kan worden toegepast. Maar hoe bepalen we dit aandeel dan?

Het is belangrijk te realiseren dat het bij blokkering gaat om de afstand tussen de grove korrels en de afmeting ( $D_{\max}$ ) van die korrels ten opzichte van de afstand tussen de staven van de J-ring.

$D_{\max}$  is eenvoudig te beperken door ander toeslagmateriaal te gebruiken.

De afstand tussen de grove korrels wordt bepaald door de hoeveelheid mortel die er tussen de korrels zit. Dit is wat beïnvloed moet kunnen worden. Echter, wanneer een bepaald volume mortel gecombineerd wordt met verschillende soorten grof toeslagmateriaal (bijvoorbeeld verschillende korrelgroepen), zal blijken dat deze afstand elke keer anders is. Dit komt door het verschil in het gehalte aan holle ruimten tussen de grove korrels, waardoor meer of minder mortel benodigd is om de holle ruimten op te vullen. Hierdoor blijft er ook een verschillende hoeveelheid mortel over om het laagje tussen de korrels te vormen. Om toch elke keer dezelfde hoeveelheid mortel tussen de korrels te krijgen, onafhankelijk van de hoeveelheid holle ruimtes tussen de korrels, wordt daarom voor het grove toeslagmateriaal niet het volume grof toeslagmateriaal gebruikt als parameter, maar het volume aan los gestort grof toeslagmateriaal, dus inclusief de holle ruimtes. Dit wordt uitgedrukt als verhouding ten opzichte van het beton.

De eerder genoemde formule voor de hoeveelheid grof toeslagmateriaal in de betonspecie wordt daarvoor als volgt aangepast:

$$\%V_{g, \text{losgestort}} = \frac{V_g}{\left(\frac{\rho_b}{\rho_{rd}}\right) V_b}$$

De verhouding tussen de dichtheid van het onverdichte materiaal  $\rho_b$  en de ovedroge dichtheid  $\rho_{rd}$  staat bekend als de pakking.

Voor de hoeveelheid los gestort grof toeslagmateriaal is uit Japanse proeven gebleken dat 0,50 (50%) een veilige waarde is om blokkering te voorkomen. Dit betekent dat 50% van het volume van de betonspecie beschikbaar is voor het laagje mortel tussen de grove korrels. Blokkering treedt dan in normale omstandigheden niet op, zeker als ook  $D_{\max}$  van het grof toeslagmateriaal beperkt blijft tot bijvoorbeeld 16mm. Wanneer rond zand en grind wordt toegepast, zoals in Nederland vaak het geval is, blijkt een waarde tussen 55 en 58% vaak ook nog toepasbaar. Er is dan weliswaar maar 42-45% mortel beschikbaar tussen de

korrels, maar dit wordt gecompenseerd door het grotere gemak waarmee de ronde korrels langs elkaar kunnen bewegen.

Ter illustratie: in traditionele betonspecie bedraagt het volume aan grind gewoonlijk ongeveer 60% van 0,700 m<sup>3</sup> toeslagmateriaal, is dus 0,420 m<sup>3</sup>. Als het grind een  $\rho_b$  heeft van 1630 kg/m<sup>3</sup> en een  $\rho_{rd}$  heeft van 2650 kg/m<sup>3</sup>, is het volumeaandeel los gestort grof toeslagmateriaal in een traditioneel betonmengsel gelijk aan:  $0,420 \text{ m}^3 / (1630/2650) / 1 \text{ m}^3 = 68\%$ . Dit is duidelijk te hoog (> 58%) en traditioneel beton zal dus gaan blokkeren, ongeacht hoe het mengsel verder is samengesteld.

Het volume aan grof toeslagmateriaal in een mengsel kan worden berekend uit:

$$V_g = \%V_{g, \text{losgestort}} \times \left( \frac{\rho_b}{\rho_{rd}} \right) \times V_b \quad (2.3)$$

Met 0,50 voor  $\%V_{g, \text{losgestort}}$  en bovenstaande waarden voor de volumieke massa wordt het volume grof toeslagmateriaal dus:

$V_g = 0,50 \times (1630 / 2650) \times 1 = 0,311 \text{ m}^3$  in 1 m<sup>3</sup> betonspecie. We hebben dan nog geen rekening gehouden met de mogelijk aanwezige hoeveelheid lucht in de specie.

#### 2.2.4.2

##### *Percentage lucht*

Het gaat hier om de hoeveelheid lucht die achterblijft na verdichting, en dus niet om bewust ingebrachte lucht met behulp van een luchtbelvormer. Lucht die achterblijft na verdichting heeft geen invloed op de verwerkbaarheid van de betonspecie. De enige invloed is dat het een zeker volume inneemt, waardoor de volumes van de andere bestanddelen wat gecorrigeerd moeten worden om uiteindelijk op 1,000 m<sup>3</sup> uit te komen.

De hoeveelheid lucht ( $\%V_l$ ) wordt uitgedrukt ten opzichte van de hoeveelheid betonspecie inclusief lucht ( $V_{b,l}$ ). Dit kan als volgt verkort worden weergegeven:

$$\%V_l = \frac{V_l}{V_b \text{ (met lucht)}}$$

Gewoonlijk bedraagt het volumeaandeel lucht ongeveer 1 tot 2%. Dit is vergelijkbaar met traditioneel beton. Het volume aan lucht kan worden berekend uit:

$$V_l = \%V_l \times V_b \text{ (met lucht)}$$

#### 2.2.5

##### Stap 7: Berekening mengselsamenstelling

Door middel van de hiervoor beschreven stappen zijn de volgende gegevens bepaald voor het berekenen van een mengselsamenstelling:

– stap 3: berekend uit sterkte en duurzaamheid	wcf	0,53		
– stap 4: resultaat pastaproef CEM I 52,5 R	$\beta_{p, \text{cement}}$	1,23		
– stap 4: resultaat pastaproef kalksteenmeel	$\beta_{p, \text{vulstof}}$	0,79		
– stap 5: vastgesteld en beproefd in mortels	$\%V_f$	0,40	=	40% (v/v)
– stap 5: resultaat vloeimaat/trechtertijd mortels	$\%M_h$	0,005	=	0,5% (m/m)
– stap 5: berekend uit resultaten	$\kappa_p$	0,80		
– stap 6: resultaat blokkeringsmaat betonspecie	$\%V_g$	0,50	=	50% (v/v)
– stap 6: gemeten met luchtgehaltemeter	$\%V_l$	0,02	=	2,0% (v/v)

– Aanvullend is bekend:		
– Totale hoeveelheid mengsel	$V_b$ (met lucht)	1,000 m <sup>3</sup>
– Los stortgewicht grind 4/16	$\rho_b$	1630 kg/m <sup>3</sup>
– Ovendroge dichtheid grind 4/16	$\rho_{rd}$	2650 kg/m <sup>3</sup>
– Dichtheid hulpstof	$\rho_a$	1100 kg/m <sup>3</sup>
– Droge-stofgehalte hulpstof		26 %
– Dichtheid CEM I 52,5 R	$\rho_a$	3150 kg/m <sup>3</sup>
– Dichtheid kalksteenmeel	$\rho_a$	2700 kg/m <sup>3</sup>

Met deze gegevens kan de mengselsamenstelling als volgt worden berekend:

a. *Volume lucht*

$$V_l = \% V_l \times V_b \text{ (met lucht)} = 0,02 \times 1,000 \text{ m}^3 = 0,020 \text{ m}^3$$

b. *Volume beton zonder lucht*

$$V_b = V_b \text{ (met lucht)} - V_l = 1,000 - 0,020 \text{ m}^3 = 0,980 \text{ m}^3$$

c. *Volume grof toeslagmateriaal*

$$V_g = \% V_{g, \text{losgestort}} \times (\rho_b / \rho_{rd}) \times V_b = 0,50 \times (1630 / 2650) \times 0,980 \text{ m}^3 = 0,301 \text{ m}^3$$

d. *Volume mortel*

$$V_m = V_b - V_g = 0,980 - 0,301 \text{ m}^3 = 0,679 \text{ m}^3$$

e. *Volume fijn toeslagmateriaal*

$$V_f = \% V_f \times V_m = 0,40 \times 0,679 \text{ m}^3 = 0,272 \text{ m}^3$$

f. *Volume pasta*

$$V_{\text{pasta}} = V_m - V_f = 0,679 - 0,272 = 0,407 \text{ m}^3$$

Hiermee ligt de verdeling tussen lucht, grof toeslagmateriaal, fijn toeslagmateriaal en pasta vast. Vervolgens zijn er een aantal formules nodig om de samenstelling van de pasta te berekenen, dat wil zeggen de verhouding tussen cement, vulstof, water en hulpstof.

g. *Percentage cement*

Het percentage cement volgt uit onderstaande formule waarvan de afleiding in een kader aan het eind van hoofdstuk 2.2.7 is weergegeven:

$$\% V_c = \frac{\kappa_p \times \beta_{p, \text{vulstof}}}{(wcf \times \rho_{a, \text{cement}} + \kappa_p \times \beta_{p, \text{vulstof}} - \kappa_p \times \beta_{p, \text{cement}})} \quad (2.4)$$

$$= (0,80 \times 0,79) / (0,53 \times 3,15 + 0,80 \times 0,79 - 0,80 \times 1,23) = 0,48 \text{ of } 48\%$$

h. *Percentage vulstof*

$$\% V_v = 100\% - \% V_c = 100\% - 48\% = 52\% \text{ of } 52\%$$

i. *Waterbehoefte van de poeders*

$$\beta_{p, \text{combi}} = \% V_c \times \beta_{p, \text{cement}} + \% V_v \times \beta_{p, \text{vulstof}} = 0,48 \times 1,23 + 0,52 \times 0,79 = 1,00$$

j. *Water/poeder verhouding*

$$V_w / V_p = \kappa \times \beta_{p, \text{combi}} = 0,80 \times 1,00 = 0,80$$

k. *Volume poeder*

Het volume aan poeder volgt uit onderstaande formule waarvan de afleiding in een kader aan het eind van hoofdstuk 2.2.7 is weergegeven:

$$V_p = \frac{V_{pasta}}{\left(1 + \left(\frac{V_w}{V_p}\right)\right)} \quad (2.5)$$

$$\text{Volume poeder} = 0,407 / (1 + 0,80) = 0,226 \text{ m}^3$$

l. *Volume cement*

$$V_c = \%V_c \times V_p = 0,48 \times 0,226 = 0,108 \text{ m}^3$$

m. *Volume vulstof*

$$V_v = \%V_v \times V_p = 0,52 \times 0,226 = 0,118 \text{ m}^3$$

n. *Massa hulpstof*

$$M_h = \%M_h \times M_p = 0,005 \times (0,108 \times 3150 + 0,118 \times 2700) = 3,3 \text{ kg}$$

o. *Volume hulpstof*

$$V_h = M_h / \rho_a = 3,3 / 1100 = 0,003 \text{ m}^3$$

p. *Volume water*

$$V_w = V_{pasta} - V_c - V_v - V_h = 0,407 - 0,108 - 0,118 - 0,003 = 0,178 \text{ m}^3$$

Hiermee liggen alle volumeverhoudingen tussen de grondstoffen vast.

## 2.2.6

### Stap 8: Uitleveringsberekening

Voor de uitleveringsberekening van een samenstelling voor zelfverdichtend beton wordt gebruik gemaakt van dezelfde tabel als bij traditioneel beton.

In de eerste plaats worden in de tabel de volumes overgenomen uit stap 6. Met behulp van de volumieke massa's worden alle volumes omgerekend naar droge massa's.

Verder moet voor de uitleveringsberekening net als bij traditioneel beton het water uit het toeslagmateriaal en de hulpstoffen worden verrekend met het aanmaakwater. Voor de toeslagmaterialen worden de berekende droge massa's toeslagmateriaal omgerekend naar massa inclusief vocht en wordt het aanmaakwater gecorrigeerd met het vocht uit het toeslagmateriaal. Deze berekening verloopt op dezelfde manier als bij traditioneel beton.

De hoeveelheid water in de hulpstof wordt berekend met behulp van het gehalte aan droge stof in de hulpstof. Bij een gehalte aan droge stof van 26% bevat de hulpstof dus 74% water. 3,3 kg hulpstof bevat dus  $0,74 \times 3,3 = 2,44$  kg water. Ook dit wordt, net als het adsorptiewater in het toeslagmateriaal van het aanmaakwater afgetrokken.

Van het bovenstaande voorbeeld van een samenstellingsberekening is in onderstaande tabel 2.10 de uitlevering weergegeven. Hierbij is uitgegaan van 0,4% (m/m t.o.v. droge massa) geabsorbeerd vocht in het zand en 0,8% (m/m t.o.v. droge massa) geabsorbeerd vocht in het grind. De vochtpercentages bedragen respectievelijk 4,5% en 2,9%.

Doordat het watergehalte van de hulpstof is meegenomen in de  $V_w/V_p$  verhouding bij de bepaling van  $\kappa_p$  zullen we bij zelfverdichtend beton het watergehalte van de hulpstof ook in de uitleveringsberekening moeten meenemen en dus een correctie op het aanmaakwater

uitvoeren zoals we dat doen voor het water in het toeslagmateriaal. Dus onafhankelijk of er meer of minder van 3 liter hulpstof is gebruikt.

Tabel 2.10 Overzicht uitlevering.

grondstof		volume	volumieke massa	massa	water		mengsel meng- meester
					[m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	
cement	CEM I 52,5R	0,108	3150	340			340
kalksteenmeel		0,118	2700	319			319
water	wcf = 0,53	0,180	1000	180		- 55 + 9 - 2	132
hulpstof	superplast	0,003	1100	3,3			3,3
water in hulpstof	= 0,74 x 3,3	<b>- 0,002</b>					
lucht	2 %	0,020					
<b>subtotaal</b>		0,427		842			794
				<i>droog</i>			<i>Nat</i>
zand 0/4	uit berekening	0,272	2650	721	4,5	32	753
grind 4/16	uit berekening	0,301	2650	798	2,9	23	821
<b>totaal</b>		1,000		2361		<b>55</b>	2368
<b>absorptiewater:</b>							
zand				721	0,4	3	
grind				798	0,8	6	
<b>totaal</b>						<b>9</b>	

De volumes van de samenstellende delen komen in deze uitlevering uit op totaal 1,000 m<sup>3</sup>. Zouden we echter nog meer hulpstof hebben toegepast dan zou het volume van de droge stof in de hulpstof er toe hebben geleid dat we meer dan 1,000 m<sup>3</sup> specie krijgen.

Voorbeeld: bij 2% in plaats van 0,5 % hulpstof moeten we 13,2 hulpstof afwegen. Dat komt overeen met 12 liter. Die 13,2 kg hulpstof bevat 0,74 x 13,2 = 10 liter water.

We voegen dus 12 liter hulpstof toe en trekken vervolgens 10 liter water van het volume af. Het totaal volume van de specie neemt dan met 2 liter toe. In bovenstaand voorbeeld komen we dan niet meer op 1000 liter maar op 1001 liter uit.

Als we dat willen terugbrengen tot 1000 liter moeten alle hoeveelheden worden vermenigvuldigd met 1000 / 1001 = 0,999.

Deze kleine afwijking valt ruim binnen de doseernauwkeurigheid bij de productie van de betonspecie. Indien de hulpstof echter grotere hoeveelheden droge stof bevat, zal de afwijking groter zijn en is de correctie wel zinvol.

## 2.2.7

### Stap 9: Controleberekeningen

Gecontroleerd dient te worden of

1. de hoeveelheid fijn materiaal  $< 0,250$  mm voldoet (gezien de hoeveelheid vulstof zal dit geen probleem zijn voor zelfverdichtend beton);
2. het chloridegehalte voldoet;
3. het alkaligehalte voldoet.

De berekeningen zijn gelijk als voor traditioneel beton.



**Afleiding formule voor %V<sub>c</sub>**

Op pagina 2-25 leidden we af dat voor κ<sub>p</sub> geldt:

$$\kappa_p = \frac{\frac{V_w}{V_p}}{\beta_{p,combi}} \quad (A)$$

We zullen de termen β<sub>p,combi</sub> en  $\frac{V_w}{V_p}$  nader uitschrijven, waarna we formule 2.4 afleiden.

Voor β<sub>p,combi</sub> kunnen we schrijven:

$$\beta_{p,combi} = \%V_c \times \beta_{p,cement} + \%V_v \times \beta_{p,vulstof} \quad (\text{formule 2.2})$$

Het poedermengsel bestaat uit cement en vulstof met als cementaandeel %V<sub>c</sub>. Hieruit volgt dat het vulstofaandeel gelijk is aan 1 - %V<sub>c</sub>.

We kunnen nu dus voor β<sub>p,combi</sub> schrijven:

$$\begin{aligned} \beta_{p,combi} &= \%V_c \times \beta_{p,cement} + (1 - \%V_c) \times \beta_{p,vulstof} \text{ en hieruit volgt:} \\ \beta_{p,combi} &= \%V_c \times \beta_{p,cement} + \beta_{p,vulstof} - \%V_c \times \beta_{p,vulstof} \end{aligned} \quad (B)$$

$$\text{Voor de relatie tussen het volume en massa geldt: } \rho = m/V \quad (C)$$

1 kg water heeft een volume van 1 liter.

Daaruit volgt dat m<sub>w</sub> gelijk is aan V<sub>w</sub>.

We kunnen met dit laatste gegeven de verhouding  $\frac{V_w}{V_p}$  dus ook schrijven als  $\frac{m_w}{V_p}$

$$\text{Voor de water-cementfactor geldt: } wcf = m_w / m_c, \text{ dus } m_w = wcf \times m_c \quad (D)$$

$$\text{M.b.v. formule (C) kunnen we ook schrijven als } m_c = \rho_{a,c} \times V_c \quad (E)$$

Uit formules (D) en (E) volgt nu: m<sub>w</sub> = wcf x ρ<sub>a,c</sub> x V<sub>c</sub>

We kunnen nu  $\frac{V_w}{V_p}$  als volgt schrijven:

$$\frac{V_w}{V_p} = \frac{m_w}{V_p} = wcf \times \rho \times \frac{V_c}{V_p} = wcf \times \rho \times \%V_c$$

Met behulp van deze laatste formule en (B) kunnen we (A) nu als volgt schrijven:

$$\kappa_p = \frac{\frac{V_w}{V_p}}{\beta_{p,combi}} = \frac{\rho \times wcf \times \%V_c}{(\%V_c \times \beta_{p,cement} + \beta_{p,vulstof} - \%V_c \times \beta_{p,vulstof})}$$

Door middel van kruislings vermenigvuldigen en vereenvoudigen krijgen we:

$$\%V_c = \frac{\kappa_p \times \beta_{p,vulstof}}{(wcf \times \rho_{a,cement} + \kappa_p \times \beta_{p,vulstof} - \kappa_p \times \beta_{p,cement})} \quad (2.4)$$

### Afleiding formule voor $V_p$

De pasta bestaat gewoonlijk uit cement, vulstof en water. Het volume aan pasta is dus gelijk aan de som van de volumes aan cement, vulstof en water. De eerste twee vormen gezamenlijk het poeder en dus is dit tevens gelijk aan de som van het volume aan poeder en water. Verkort weergegeven geldt dus dat:

$$V_{pasta} = V_{c(ement)} + V_{v(ulstof)} + V_{w(ater)} = V_{poeder} + V_{water} = V_p + V_w$$

Om te berekenen hoeveel poeder nodig is om een bepaald volume aan pasta te maken, moet dus het volume aan water van het volume aan pasta afgetrokken worden.

$$V_p = V_{pasta} - V_w$$

De onbekende hierbij is het volume aan water. Deze kan als volgt worden afgeleid.

$$\frac{V_w}{V_p} = \frac{V_w}{V_p} \rightarrow V_w = V_p \times \left( \frac{V_w}{V_p} \right)$$

Ingevuld levert dit voor het volume aan poeder.

$$V_p = V_{pasta} - V_p \times \left( \frac{V_w}{V_p} \right) \rightarrow V_p + V_p \times \left( \frac{V_w}{V_p} \right) = V_{pasta} \rightarrow V_p \times \left( 1 + \left( \frac{V_w}{V_p} \right) \right) = V_{pasta}$$

$$\rightarrow V_p = \frac{V_{pasta}}{\left( 1 + \left( \frac{V_w}{V_p} \right) \right)} \quad (2.5)$$

## 2.3 Aardvochtig beton voor geperste betonproducten

### 2.3.1 Inleiding

Deze paragraaf behandelt het ontwerp van betonsamenstellingen voor betonproducten die:

1. direct na het verdichten worden ontkist en waarvan
2. de holle ruimten in het korrelskelet niet volledig worden gevuld met cementlijm.

#### Ad 1. *Groene sterkte*

Met 'groene sterkte' wordt bedoeld dat betonspecie een zodanige samenhang heeft dat het gemaakte product direct na verdichten zonder mal kan blijven staan en/of kan worden getransporteerd.

Betonspecie met groene sterkte wordt bijvoorbeeld gebruikt bij de productie van kanaalplaatvloeren en rioolbuizen. Echter ook voor wegebouwbeton kan "groene sterkte" tijdens de productie een belangrijke eigenschap zijn. Een ander toepassingsgebied betreft ongewapende betonproducten zoals stenen, tegels, en banden.



Figuur 2.7 Productie van betonstenen gebruikmakend van de "groene sterkte".

Bij de "groene sterkte" speelt de chemische verharding van cement geen rol. Dezelfde samenhang of groene sterkte zou worden verkregen indien het cement wordt vervangen door een fijne inerte stof met dezelfde korrelopbouw.

Groene sterkte ontstaat als gevolg van de aantrekkingskracht tussen watermoleculen onderling (cohesie) en tussen watermoleculen en een vast oppervlak (adhesie). Naast de aantrekkingskracht van de watermoleculen zijn de korrelopbouw en korrelvorm van belang. Een mengsel van deeltjes van verschillende grootte zal bij de juiste korrelgrootteverdeling méér samenhang vertonen dan een éénkorrelig mengsel.

Groene sterkte wordt dus bereikt door:

- een goede korrelgrootteverdeling van het toeslagmateriaal;
- voldoende fijne delen in het mengsel;
- een juiste hoeveelheid water ten opzichte van de fijne delen (niet te weinig - en zeker niet te veel!);
- gebruik van veel verdichtingsenergie in de vorm van trillen, eventueel in combinatie met persen.

#### Ad 2. Onvolledige vulling

Betonspecie met 'groene sterkte' waarin na verharden minder dan 2% holle ruimten overblijven in de vorm van luchtinsluitingen, kan worden beschouwd als traditioneel beton met consistentieklasse C0 of C1. Een dergelijk beton kan worden gestuurd op sterkte en duurzaamheid met de wcf volgens het stappenplan voor traditioneel beton.

Wanneer na het verdichten meer dan 2% holle ruimten achterblijven is het niet meer mogelijk om de sterkte en de duurzaamheid te sturen met de wcf. Producten waarvoor dit geldt zijn stenen, tegels en banden. Producten die op een pers met heel veel verdichtingsenergie worden geproduceerd.

Voor het ontwerp van de betonsamenstellingen voor deze producten wordt een afwijkend stappenplan gehanteerd.

*Stap 1: Berekenen van de hoeveelheden toeslagmateriaal*

*Stap 2: Berekenen van de hoeveelheden poeder*

*Stap 3: Berekenen van de hoeveelheid water*

*Stap 4: Berekenen van de sterkte*

*Stap 5: Uitleveringsberekening*

*Stap 6: Correctie op basis van gemeten volumieke massa na verdichten*

*Stap 7: Controleberekeningen*

Voordat we het stappenplan doorlopen worden eerst de specificaties voor dergelijke pr.

### 2.3.2

#### A: Inventarisatie eisen uit project- of productspecificatie

Betonstraatstenen en -tegels vallen niet onder de NEN-EN 206 omdat het geen constructief beton betreft. De eisen voor deze producten zijn vastgelegd in afzonderlijke productnormen: NEN-EN 1338 voor betonstraatstenen en NEN-EN 1339 voor betontegels.

De controle op de eigenschappen gebeurt niet aan de hand van kubussen, maar aan het gerede product (de betonstraatsteen, -tegel of -band). Voor deze producten worden geen eisen gesteld aan de druksterkte, maar is de slijttreksterkte of de buigtreksterkte maatgevend. Er gelden bovendien extra prestatie-eisen met betrekking tot de slijtvastheid en vorstbestandheid.

Voor de verwerkbaarheid geldt dat de groene sterkte van belang is. De eisen met betrekking tot de groene sterkte komen vooral voort uit de manier van produceren van deze producten, namelijk de wijze van verdichten en de verdichtingsenergie, en de eisen aan de maat- en vormvastheid. De machine en de wijze van produceren zijn hiervoor bepalend.

Vaak hanteert de producent zelf ook eisen met betrekking tot het uiterlijk.

### 2.3.3

#### B: Keuze van de materialen

De keuze van toeslagmaterialen en bindmiddelen hangt sterk af van de hiervoor genoemde eisen aan de betreffende producten. Indien bijvoorbeeld hoge eisen worden gesteld aan de slijtvastheid en het product "monoliet" (dus uit één geheel en uit één betonsamenstelling) wordt gemaakt, moet hier bij de selectie van het toeslagmateriaal rekening mee worden

gehouden. Er moet dan bijvoorbeeld gekozen worden voor toeslagmateriaal met een hoge slijtvastheid (Micro-Deval-waarde).

Ook kan sprake zijn van eisen aan de kleur. Dit kan leiden tot de keuze voor toeslagmaterialen met een bepaalde kleur zoals wit marmer of zwart porfier.

Omdat het om relatief kleine of slanke betonproducten gaat, wordt vaak een kleine maximale korrel gehanteerd voor het grove toeslagmateriaal. Mogelijke combinaties zijn zand 0/2 of zand 0/4 met grind 2/8, bijvoorbeeld voor stenen en blokken, of grind 4/12, bijvoorbeeld voor tegels en banden. Als grof toeslagmateriaal kan ook gebroken materiaal zoals graniet 2/8 of kalksteen 2/7 worden ingezet.

Het ontwerpen op "groene sterkte" stelt geen specifieke eisen aan het soort bindmiddel of de bindmiddelcombinatie. In principe kan "groene sterkte" ook worden verkregen indien geen cement maar een inerte vulstof wordt toegepast. De bindmiddelkeuze wordt dus uitsluitend bepaald door eisen met betrekking tot sterkte, kleur of duurzaamheid.

#### 2.3.4 C: Berekenen van de betonsamenstelling

Gespecificeerde eigenschappen voor stenen en tegels, zoals slijttreksterkte, slijtvastheid, en vorst/dooibestandheid, zijn helaas niet via algemeen geldende empirische formules aan de samenstelling verbonden, zoals bij traditioneel beton de druksterkte is verbonden aan de water/cement-factor. Door dit gebrek aan empirische formules is het niet mogelijk naar de eigenschappen toe te rekenen en moeten veel verhoudingen tussen materialen worden aangenomen en proefondervindelijk worden vastgesteld.

De verdichtingsenergie speelt bij de productie verder een essentiële rol en deze kan van machine tot machine verschillen. Het hier gegeven stappenplan is dus een systematiek om proefondervindelijk tot een geschikt mengsel te komen.

De hierna uitgewerkte methode om tot een mengselsamenstelling te komen, is uitgewerkt voor kleine betonproducten zoals betonstenen en tegels. Uitgangspunt is een volume van 1,000 m<sup>3</sup> betonspecie na verdichten.

##### 2.3.4.1 *Stap 1: Berekenen van de hoeveelheden toeslagmateriaal*

De eerste stap is om te berekenen hoeveel toeslagmateriaal in het mengsel gaat. Hiervoor maken we gebruik van de dichtheid van het onverdichte materiaal  $\rho_b$ , ook wel bekend als het storgewicht. De  $\rho_b$  geeft immers aan hoeveel ruimte van een bepaald volume gevuld wordt met toeslagmateriaal en hoeveel met lucht.

De hoeveelheid ruimte in een bepaald volume die ingenomen wordt door het toeslagmateriaal staat bekend als de pakking en volgt uit de formule:  $\rho_b / \rho_{rd}$ . De hoeveelheid ruimte die wordt ingenomen door lucht staat bekend als het gehalte aan holle ruimten en volgt uit de formule:  $(\rho_{rd} - \rho_b) / \rho_{rd}$  of 100% - pakking.

Stel dat we grof toeslagmateriaal toepassen met een  $\rho_b$  van 1630 kg/m<sup>3</sup> en een  $\rho_{rd}$  van 2650 kg/m<sup>3</sup>. De pakking is dan  $\rho_b / \rho_{rd} = 1630/2650 = 61,5\%$ .

De hoeveelheid grof toeslagmateriaal die in 1,000 m<sup>3</sup> kan is dan:

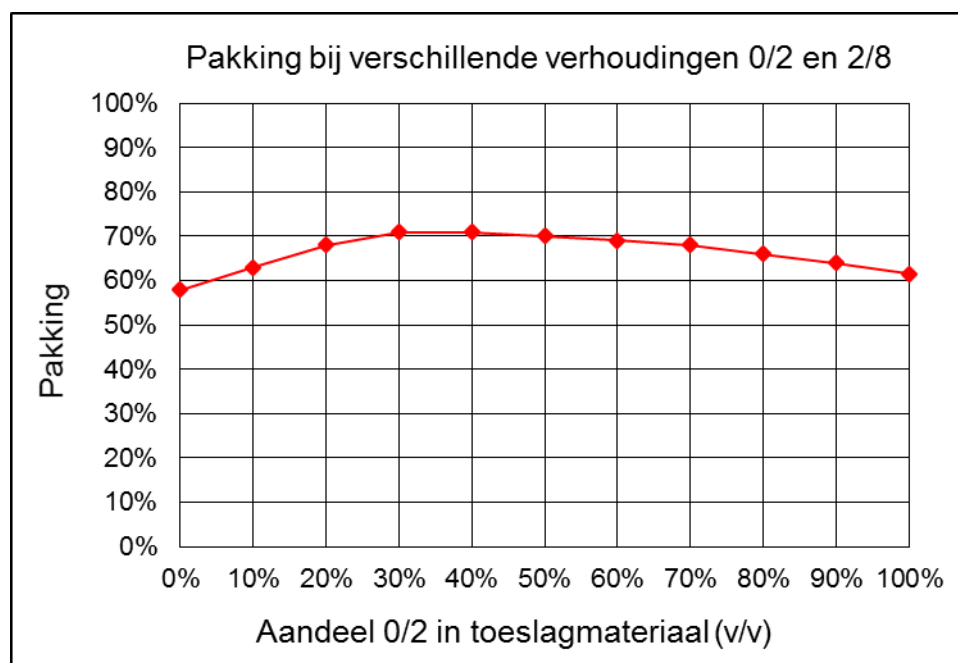
Volume grof toeslagmateriaal = pakking x 1,000 m<sup>3</sup> = 61,5% x 1,000 m<sup>3</sup> = 0,615 m<sup>3</sup>

Massa grof toeslagmateriaal = Volume x  $\rho_{rd}$  = 0,615 x 2650 kg/m<sup>3</sup> = 1630 kg

Het overgebleven volume van 1,000 m<sup>3</sup> - 0,615 m<sup>3</sup> = 0,385 m<sup>3</sup> zijn holle ruimten.

We hebben echter niet alleen te maken met grof toeslagmateriaal, maar met een combinatie van fijn en grof toeslagmateriaal. We zullen dus moeten vaststellen wat de pakking is van de combinatie om de totale hoeveelheid toeslagmateriaal te kunnen uitrekenen. Dit kan door fijn en grof toeslagmateriaal in verschillende bekende verhoudingen te mengen en vervolgens de  $\rho_b$  te bepalen volgens de daarvoor geldende proefmethode (NEN-EN 1097-3).

Als voorbeeld is dit gedaan voor zand 0/2 in combinatie met grind 2/8. De resultaten staan weergegeven in onderstaande grafiek.



Figuur 2.8 Pakking ( $\rho_b / \rho_{rd}$ ) bij verschillende verhoudingen zand 0/2 en grind 2/8.

Uit figuur 2.13 blijkt dat de hoogste pakking van 71% bereikt wordt wanneer 30% zand 0/2 gemengd wordt met 70% grind 2/8. Dezelfde pakking wordt ook bereikt wanneer 40% zand 0/2 gemengd wordt met 60% grind 2/8. Gewoonlijk ligt de hoogste pakking bij een verhouding 1/3 fijn en 2/3 grof.

Om zoveel mogelijk toeslagmateriaal te kunnen toepassen zou dus een verhouding van 34% zand 0/2 en 68% grind 2/8 moeten worden toegepast. Bij deze verhouding hebben de producten echter een hele grove oppervlaktestructuur: er zijn veel grove korrels zichtbaar aan het oppervlak. Om een beter uiterlijk te krijgen is een fijnere oppervlaktestructuur nodig. Dit betekent dat in de praktijk vaak voor een grotere hoeveelheid fijn wordt gekozen dan nodig is voor optimale pakking.

We kiezen hier voor een volumeverhouding van 50% zand 0/2 en 50% grind 2/8. Daarbij hoort een pakking van 70%.

Aan de hand van de pakking en de volumeverhouding van het toeslagmateriaal kunnen vervolgens de hoeveelheden worden berekend:

- volume toeslagmateriaal:  $1,000 \times 0,70$  (pakking) =  $0,700 \text{ m}^3$
- droog zand 0/2:  $0,700 \times 0,50 = 0,350 \text{ m}^3 \times 2650 = 928 \text{ kg}$
- droog grind 2/8:  $0,700 \times 0,50 = 0,350 \text{ m}^3 \times 2650 = 928 \text{ kg}$

## 2.3.4.2

*Stap 2: Berekenen van de hoeveelheden poeder*

De hoeveelheid poeder, dus het cement en eventueel vulstoffen, wordt uitgedrukt en berekend als een bepaalde hoeveelheid ten opzichte van het totale toeslagmateriaal. Dus bijvoorbeeld 1 deel cement op 7 delen toeslagmateriaal. Als hiervoor gewichten gebruikt worden, dan ontstaat het probleem dat poeders met een verschillende dichtheid een ander volume zullen innemen. Omdat we uiteindelijk geïnteresseerd zijn in het volume holle ruimten dat overblijft, maken we hier gebruik van volume-verhoudingen.

De hoeveelheid poeder wordt dus uitgedrukt als een volumeverhouding ten opzichte van het totale volume aan toeslagmateriaal. Zo wordt bijvoorbeeld bij een verhouding van 1:7 dus  $0,700 \text{ m}^3 / 7 = 0,100 \text{ m}^3$  poeder toegepast. Bij een verhouding van 1:5 is dit dus  $0,700 \text{ m}^3 / 5 = 0,140 \text{ m}^3$  en bij een verhouding van 1:10 is dit dus  $0,700 / 10 = 0,070 \text{ m}^3$ .

De aan te houden volumeverhouding voor de hoeveelheid poeder wordt zowel naar boven als naar beneden begrensd. Als een te lage verhouding, zoals 1:10, wordt gekozen, bestaat het risico dat het mengsel te weinig poeder bevat en na het verdichten uiteenvalt. Tevens is de kans groot dat de sterkte te laag wordt, omdat teveel holle ruimten overblijven. Als een te hoge verhouding wordt gekozen, zoals 1:4, bestaat het risico dat het mengsel tijdens het verdichten blijft plakken aan de stempel of dat het na het verdichten uitzakt. Gebruikelijk zijn verhoudingen van 1:8 tot 1:6.

In dit voorbeeld wordt gekozen voor 1:7. Dit komt overeen met  $0,100 \text{ m}^3$  poeder op  $0,700 \text{ m}^3$  toeslagmateriaal.

Voor de groene sterkte van het mengsel zou elk poeder kunnen voldoen. Voor de eigenschappen van het verharde product, zoals splijttreksterkte, vorst/dooi-bestandheid en slijtvastheid, is het echter noodzakelijk dat geheel of gedeeltelijk bindmiddel wordt toegepast.

In dit voorbeeld wordt gekozen voor gebruik van CEM I 42,5 R. Benodigd aan cement is  $0,100 \times 3150 \text{ kg/m}^3 = 315 \text{ kg}$ .

Wanneer naast cement tevens een inert poeder wordt toegepast, zoals bijvoorbeeld een volumeaandeel van 20% kalksteenmeel, kan dit als volgt worden berekend:

- CEM I 42,5 R:  $0,80 \times 0,100 \times 3150 = 252 \text{ kg}$
- kalksteenmeel:  $0,20 \times 0,100 \times 2700 = 54 \text{ kg}$

## 2.3.4.3

*Stap 3: Berekenen van de hoeveelheid water*

De hoeveelheid water om een goed verwerkbaar mengsel te krijgen is erg kritisch bij aardvochtig beton voor geperste producten. Wanneer te weinig water aanwezig is, kan het mengsel niet goed worden verdicht en zal het mengsel bij het lossen uit de vorm kapot gaan. Wanneer teveel water aanwezig is, gaat het product na het lossen onder zijn gewicht vervormen. Het tussenliggende gebied is slechts zeer klein. Het gaat om enkele liters.

De hoeveelheid water wordt uitgedrukt ten opzichte van de hoeveelheid poeder. Wanneer alleen cement wordt toegepast, ligt de wcf die moet worden toegepast om een mengsel met een goede stabiliteit te krijgen in de buurt van de 0,34. Dit verschilt echter per machine als gevolg van het verschil in verdichtingsenergie. Het gebied is ongeveer 0,32 tot 0,40.

Een wcf van 0,34 vertaalt zich in een volume water / volume poeder-verhouding van  $0,34 \times 3,15 = 1,07$ , wanneer CEM I wordt gebruikt. Er moet dus voor een goede stabiliteit een net iets groter volume aan water aanwezig zijn dan het volume dat aan poeder aanwezig is.

In het rekenvoorbeeld komt de hoeveelheid water uit op  $1,07 \times 0,100 = 0,107 \text{ m}^3$ .

#### 2.3.4.4

##### Stap 4: Berekenen van de sterkte

De samenstelling van het mengsel wordt als volgt:

Tabel 2.11 Samenstelling mengsel.

	kg	m <sup>3</sup>
grind 2/8	928	0,350
zand 0/2	928	0,350
CEM I 42,5 R	315	0,100
water	107	0,107
totaal	2278	0,907

De resterende liters die benodigd zijn om 1,000 m<sup>3</sup> te krijgen, zijn de liters die na het verdichten als holle ruimten achterblijven in het beton. In dit geval dus  $1,000 - 0,907 = 0,093$  m<sup>3</sup>. Oftewel  $0,093$  m<sup>3</sup> /  $1,000$  m<sup>3</sup> = 9,3%.

Van dit mengsel kan de te verwachten sterkte worden berekend. Deze is afhankelijk van de gehanteerde wcf in combinatie met de overgebleven holle ruimten na het verdichten.

- normsterkte CEM I 42,5 R:  $N_{28} = 58$  N/mm<sup>2</sup>
- wcf =  $107 / 315 = 0,34$
- $f_{cm}$  (zonder holle ruimten) =  $0,8 \times 58 + (25 / 0,34) - 45 = 75$  N/mm<sup>2</sup>
  - Verrekening holle ruimten:
- $f_{cm}$  (met holle ruimten) =  $75 \times (0,95)^{(9,3-2,0)} = 52$  N/mm<sup>2</sup>

Om de sterkte te verhogen wordt bij traditioneel beton de wcf verlaagd. In dit mengselontwerp leidt dat tot het probleem dat dan onvoldoende water aanwezig is. Dit levert problemen met de verdichting en/of onvoldoende groene sterkte. Daarnaast leidt een vermindering van de hoeveelheid water tot een toename van de holle ruimten na verdichten. Dit leidt tot een verlies aan sterkte in plaats van de beoogde toename.

De oplossing is meer cement en water toevoegen in dezelfde onderlinge verhouding. Dit kan door het volume cement ten opzichte van toeslagmateriaal te verhogen.

Om de sterkte van het voorbeeldmengsel te verhogen wordt bijvoorbeeld gekozen voor een verhouding van 1:6 in plaats van 1:7. Het volume aan cement gaat daardoor omhoog van  $0,700$  m<sup>3</sup> /  $7 = 0,100$  m<sup>3</sup> naar  $0,700$  m<sup>3</sup> /  $6 = 0,117$  m<sup>3</sup>.

Dit komt overeen met  $0,117$  m<sup>3</sup> x  $3150 = 369$  kg CEM I 42,5 R

De hoeveelheid water komt dan uit op  $0,34 \times 369 = 126$  kg met volume  $0,126$  m<sup>3</sup>

Door de toename van de hoeveelheid cement en water neemt de hoeveelheid holle ruimte af naar:  $1,000 - 0,350 - 0,350 - 0,117 - 0,126 = 0,057$  dit is 5,7%.

De nieuwe sterkte wordt dan:  $f_{cm}$  (met holle ruimten) =  $75 \times (0,95)^{(5,7-2,0)} = 62$  N/mm<sup>2</sup>

Een toename dus met  $10$  N/mm<sup>2</sup>.

Verdere verhoging van de sterkte kan worden bereikt door de volumeverhouding cement – toeslagmateriaal nog verder te verhogen. De sterkte van het mengsel kan echter nooit hoger worden dan hetgeen uit de formule voor de wcf volgt.

#### 2.3.4.5

##### Stap 5: Uitleveringsberekening

Net als bij traditioneel beton moet het water uit het toeslagmateriaal worden verrekend met de waterbehoefte.

In het voorbeeld wordt grind 2/8 gebruikt met een vochtpercentage van 2,2% en een waterabsorptie van 1,0%. Het zand 0/2 heeft een vochtpercentage van 4,5% en een waterabsorptie van 0,3%.



Tabel 2.12 Overzicht opbouw betonsamenstelling (incl. opgaaf mengmeester).

grondstof		volume	volumieke massa	massa	water		mengsel mengmeester
		[m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg]	[%]	[kg]	[kg]
cement	CEM I 42,5 R	0,100	3150	315			315
water	w/c = 0,34	0,107	1000	107		- 62 +12	57
<b>subtotaal</b>		0,207					
toeslag		0,700		<i>droog</i>			<i>nat</i>
zand 0/2	50 %	0,350	2650	928	4,5	42	970
grind 2/8	50 %	0,350	2650	928	2,2	20	948
<b>subtotaal</b>		0,907		2278		<b>62</b>	2290
<b>holle ruimte (geschat)</b>	9,3%	0,093					
<b>totaal</b>		1,000					2290
<b>absorptiewater:</b>							
<b>zand</b>				928	0,3	3	
<b>grind</b>				928	1,0	9	
totaal absorptiewater:						<b>12</b>	

2.3.4.6

Stap 6: Correctie op basis van volumieke massa na verdichten

In de praktijk kan de volumieke massa van de geproduceerde betonstraatstenen of -tegels afwijken van hetgeen in tabel 2.12 is berekend. Dit is het gevolg van het feit dat de pakking van het toeslagmateriaal zoals bepaald op basis van  $\rho_b$  slechts een benadering is. De exacte wijze van verdichten en de invloed van de gebruikte grondstoffen (eigenschappen cement, toeslagmaterialen) hebben invloed op de uiteindelijke pakking en dus op de volumieke massa van het gereede product.

Aan de hand van de gemeten volumieke massa na verdichten kan wel de samenstelling per kubieke meter worden gecorrigeerd.

Als de stenen in dit voorbeeld na het verdichten een volumieke massa blijken te hebben van 2320 kg/m<sup>3</sup> dan kan als volgt de werkelijke samenstelling per m<sup>3</sup> worden berekend:

CEM I 42,5 R	volume = 2320/2290 x 0,100 m <sup>3</sup>	= 0,101 m <sup>3</sup>
water	volume = 2320/2290 x 0,107 m <sup>3</sup>	= 0,108 m <sup>3</sup>
zand 0/2	volume = 2320/2290 x 0,350 m <sup>3</sup>	= 0,355 m <sup>3</sup>
grind 2/8	volume = 2320/2290 x 0,350 m <sup>3</sup>	= 0,355 m <sup>3</sup>

De aangepaste mengstaaf is verder uitgewerkt in de volgende tabel.

Tabel 2.13 Samenstelling gecorrigeerd mengsel.

grondstof		volume	volumieke massa	massa	water		mengsel meng- meester
		[m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg]	[%]	[kg]	[kg]
cement	CEM I 42,5 R	0,101	3150	318			318
water	w/c = 0,34	0,108	1000	108		- 63 +12	57
<b>subtotaal</b>		0,209					
toeslag		0,710		<i>droog</i>			<i>nat</i>
zand 0/2	50 %	0,355	2650	941	4,5	42	983
grind 2/8	50 %	0,355	2650	941	2,2	21	962
<b>subtotaal</b>		0,919		2308		<b>63</b>	2320
<b>holle ruimte</b>	8,1%	0,081					
<b>totaal</b>		1,000					2320
<b>absorptiewater:</b>							
<b>zand</b>				941	0,3	3	
<b>grind</b>				941	1,0	9	
totaal absorptiewater:						<b>12</b>	

Het gehalte aan holle ruimten blijkt in werkelijkheid dus iets lager te zijn (8,1%) dan geschat (9,3%).

#### 2.3.4.7

##### *Stap 7: controleberekeningen*

Er zijn geen controleberekeningen nodig. Het mengsel hoeft niet te voldoen aan de eisen uit de NEN-EN 206 / NEN 8005 omdat het geen constructief beton betreft. Wel dient het eindproduct te worden beproefd volgens NEN-EN 1338 voor betonstraatstenen of NEN-EN 1339 voor betontegels.