

3 DE KORRELS

Beton is een heterogeen materiaal. Het wordt gemaakt uit verschillende grondstoffen die gezamenlijk het materiaal beton worden. In Nederland zijn de gebruikelijke grondstoffen voor beton in afnemende hoeveelheid: grind, zand, cement, en water. Deze grondstoffen zijn essentieel om beton te maken. Er kunnen ook nog andere grondstoffen zoals vulstoffen, hulpstoffen, kleurstoffen en vezels worden toegevoegd. Maar deze grondstoffen zijn, hoewel ze vaak zeer belangrijk zijn om bepaalde eigenschappen van het beton te krijgen, niet essentieel om beton te maken. Ze worden in dit dictaat aangeduid met de verzamelnaam toevoegingen en worden behandeld in hoofdstuk 5.

In hoofdstuk 3 en 4 worden de essentiële grondstoffen en hun eigenschappen behandeld. Niet allemaal afzonderlijk, maar gecombineerd aan de hand van de rol die de verschillende grondstoffen gezamenlijk hebben in het materiaal beton. Om de logica te zien in de indeling tussen hoofdstuk 3 en 4 is het eerst nodig om te kijken wat de samenhang is tussen de verschillende essentiële grondstoffen.

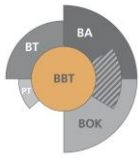
De belangrijkste overeenkomst is dat ze allemaal uit korrels bestaan, op het water na. Van het zand en het grind is dat met het oog direct zichtbaar. Dit zijn relatief grote korrels. Echter ook het cement bestaat uit, weliswaar zeer kleine, korrels. Ook vulstoffen bestaan uit zeer kleine korrels.

Een betonmengsel bestaat dus na het aanmaken uit korrels, variërend van groot tot zeer klein, gescheiden door een laagje water. Het is dus ook niet verwonderlijk dat korrels een belangrijke rol spelen in de indeling van grondstoffen en in de betontechnologie.



Figuur 3.1 De grondstoffen voor beton bestaan op het water, vloeibare hulpstoffen en pigmenten na allemaal uit korrels,.

Al snel na het aanmaken blijkt er echter een belangrijk verschil is tussen de korrels: een gedeelte zal namelijk gaan reageren met het water en een gedeelte niet. Dit onderscheid in het gedrag van korrels met water wordt aangeduid als reactief (reageert) of inert (reageert niet). Dit gedrag vormt de basis voor de drie hoofdgroepen waarin de grondstoffen voor beton worden ingedeeld:



1. Toeslagmateriaal

Dit is een verzamelnaam voor de grondstoffen die uit de grotere korrels bestaan die gewoonlijk niet met water reageren (inert) en aan elkaar gelijmd worden door de korrels die wel reageren. Onder het toeslagmateriaal vallen het zand en grind maar bijvoorbeeld ook kalksteen en gerecycled betongranulaat.

2. Cement

Dit is een verzamelnaam voor grondstoffen die uit zeer fijne korrels bestaan die gewoonlijk reageren met water. Zij vormen de basis van de lijm.

3. Vulstoffen

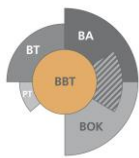
Dit is een verzamelnaam voor grondstoffen die uit zeer fijne korrels bestaan maar niet tot het cement behoren.

Sommige vulstoffen bestaat uit korrels die gewoonlijk niet met water reageren en dus als inert worden beschouwd. Dergelijke vulstoffen worden aangeduid als type 1 vulstoffen. Deze vulstoffen zijn veelal gemaakt uit grondstoffen die ook als toeslagmateriaal worden toegepast. Een voorbeeld is kalksteenmeel dat wordt verkregen uit het malen van kalksteen. Dergelijke vulstoffen worden ook wel aangeduid als toeslagmateriaal-vulstof. Andere vulstoffen bestaan uit korrels die gewoonlijk wel met water reageren en dus als reactief worden beschouwd. Zij worden aangeduid als type 2 vulstoffen. Dergelijke vulstoffen mogen soms beschouwd worden als bindmiddel, omdat ze geheel of gedeeltelijk het cement kunnen vervangen.

NB. Bij het aanmaken van beton is er nog geen verschil tussen de korrels die wel en niet met water reageren. Cement en vulstoffen worden daarom in die fase ook wel aangeduid als 'het poeder'.

In dit hoofdstuk 3 worden de toeslagmaterialen en de toeslagmateriaal-vulstoffen behandeld. Deze grondstoffen blijven ook in het verharde beton als korrels aanwezig en vormen het korrelskelet.

INHOUDSOPGAVE	Pag.
3.1 Toeslagmateriaal	3-5
3.1.1 Indeling naar herkomst.....	3-5
3.1.1.1 Natuurlijk toeslagmateriaal.....	3-5
3.1.1.2 Kunstmatig toeslagmateriaal	3-6
3.1.1.3 Gerecycled toeslagmateriaal.....	3-6
Twee voorbeelden als toelichting van het gebruik van de categorieën volgens tabel	
3.1. Zij zijn ontleend aan de NEN-EN 206 - bijlage E.....	3-7
3.1.2 Overzicht eigenschappen toeslagmateriaal	3-7
3.1.3 Deeltjesdichtheid.....	3-9
3.1.3.1 Invloed mineralogische samenstelling.....	3-9
3.1.3.2 Poriën.....	3-9
3.1.3.3 Bepaling van de deeltjesdichtheid (volumieke massa).....	3-10
3.1.3.4 Licht, normaal en zwaar toeslagmateriaal	3-13
3.1.4 Korrelgrootte(-verdeling).....	3-13
3.1.4.1 Bepalen van de korrelgrootte.....	3-13
3.1.4.2 Zeefopeningen	3-14
3.1.4.3 Korrelgroepen (d/D)	3-15
3.1.4.4 Korrelgrootteverdeling	3-16
3.2 Invloed op eigenschappen beton	3-19
3.2.1 Samenstelling van verhard beton	3-20
3.2.2 Volumieke massa.....	3-20
3.2.2.1 Invloed van de drie componenten.....	3-20
3.2.2.2 Invloed deeltjesdichtheid.....	3-21
3.2.2.3 Beton zonder fijn	3-22
3.2.3 Druksterkte.....	3-23
3.2.3.1 Invloed van de drie componenten.....	3-23
3.2.3.2 Invloed verbrijzelingswaarde	3-23
3.2.3.3 Invloed platte stukken.....	3-25
3.2.3.4 Invloed D_{max}	3-26
3.2.3.5 Aanhechting.....	3-26
3.2.4 Duurzaamheid en uiterlijk.....	3-28
3.2.4.1 Invloed van de drie componenten.....	3-28
3.2.4.2 Chemische reacties	3-28
3.2.4.3 Klimaat	3-29
3.2.4.4 Slijtage.....	3-31
3.2.5 Uiterlijk.....	3-32
3.3 Invloed op de waterbehoefte	3-33
3.3.1 Waterbehoefte	3-33
3.3.2 Invloed korrelgrootte	3-34
3.3.2.1 Invloed korrelgrootteverdeling	3-34
3.3.2.2 Invloed korrelgroep	3-35
3.3.2.3 Invloed zeer fijn materiaal < 0,063.....	3-36
3.3.3 Invloed korrelvorm	3-37
3.4 De verhouding tussen de korrels	3-37
3.4.1 Optimale pakking – minimale waterbehoefte	3-37
3.4.1.1 Gehalte aan holle ruimten en pakking	3-37
3.4.1.2 Dichtste korrelstapeling	3-39
3.4.1.3 'Particle interference'	3-41



	3.4.1.4	Bepalen van het gehalte aan holle ruimten	3-41
	3.4.1.5	Ideale korrelgrootteverdeling: Fuller-kromme	3-41
	3.4.1.6	Stabiliteit van de betonspecie	3-42
	3.4.1.7	Inzetbaarheid Fuller-kromme inclusief poeder.....	3-43
3.4.2		Traditioneel beton	3-43
	3.4.2.1	Invloed van fijne korrels op de verwerkbaarheid	3-44
	3.4.2.2	Invloed poeder en water op de consistentie	3-44
	3.4.2.3	Richtwaarden waterbehoefte	3-45
	3.4.2.4	Ontwerpgebieden.....	3-46
	3.4.2.5	Invloed korrelvorm	3-47
	3.4.2.6	Minimale hoeveelheid fijn < 0,250.....	3-47
	3.4.2.7	Inzetbaarheid methode waterbehoefte en minimale hoeveelheid fijn < 0,250	3-48
3.5		Achtergrondinformatie voor het berekenen van de mengverhoudingen	3-49
	3.5.1	Inleiding	3-49
	3.5.2	Samenstelling van het toeslagmateriaal	3-49
	3.5.3	Verrekenen van het water in het toeslagmateriaal	3-50

3.1 Toeslagmateriaal

De definitie van toeslagmateriaal luidt:

Korrelvormig materiaal, te gebruiken in de bouw. Het toeslagmateriaal kan natuurlijk, kunstmatig, of gerecycled zijn (NEN-EN 12620 en NEN 5905 voor Nederland).

3.1.1 Indeling naar herkomst

De hoofdingeling van toeslagmateriaal is gebaseerd op de herkomst.

1. **Natuurlijk:** afkomstig uit groeves of uit de bodem en alleen mechanisch bewerkt;
2. **Kunstmatig:** afkomstig van een industrieel proces, waarbij een thermische of andere bewerking heeft plaatsgehad;
3. **Gerecycled:** afkomstig van een industriële bewerking van eerder in de bouw toegepast, niet-organisch, materiaal.

3.1.1.1 *Natuurlijk toeslagmateriaal*

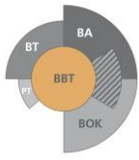
Toeslagmateriaal van natuurlijke herkomst is afkomstig van gesteenten die van nature in de omgeving aanwezig zijn of van afzettingen door rivieren. In Nederland hebben we nauwelijks gesteenten, maar wel korrels die in de loop van de jaren door de Rijn en de Maas zijn afgezet.

Met behulp van zuigers worden de korrels naar boven gehaald en vervolgens op drijvende of vaste verwerkingsinstallaties naar behoefte gescheiden, gewassen en weer samengevoegd. Het aldus verkregen materiaal wordt aangeduid als rivierzand en riviergrind.



Figuur 3.2 Drijvende verwerkingsinstallaties voor de productie van rivierzand en riviergrind.

Een ander natuurlijk toeslagmateriaal afkomstig van afzettingen is het materiaal dat op zee wordt gewonnen. Dit materiaal wordt op soortgelijke wijze verwerkt tot rivierzand en riviergrind.



Dictaat Basiskennis Betontechnologie [bbt]

Andere toeslagmaterialen met natuurlijke herkomst zijn de groevematerialen zoals bijvoorbeeld kalksteen uit België, graniet uit Noorwegen en basalt uit Duitsland. De korrels worden verkregen door massieve rots op te blazen en de brokstukken met behulp van brekers tot de gewenste grootte te verkleinen.

3.1.1.2 *Kunstmatig toeslagmateriaal*

Een belangrijke reden om korrels kunstmatig te vervaardigen is dat er geen natuurlijk gesteente beschikbaar is dat over de gewenste combinatie van eigenschappen beschikt. Een voorbeeld is de productie van lichtgewicht korrels. Deze worden vervaardigd door natuurlijke grondstoffen zoals klei, leem, schalie en/of (een) restproduct(en) zoals vliegias, te mengen, te pelletiseren (tot ronde korrels te verwerken) en vervolgens te verhitten of te sinteren (aansteken van nog onverbrande resten). Doordat bij de hoge temperaturen gassen ontsnappen, ontstaan poreuze lichte korrels. Voorbeelden zijn Argex, Liapor, Lytag, Leca en Fibo.

Korrels kunnen ook kunstmatig worden vervaardigd met als doel verontreinigingen in minerale stoffen te immobiliseren. Een voorbeeld is de productie van slibkorrels uit gereinigd baggerslib. Voor de productie is energie in de vorm van warmte benodigd. Een alternatief voor het verhitten is de zogenoemde koude immobilisatie, waarbij gebruik wordt gemaakt van een bindmiddel om de verontreinigingen vast te leggen.

Onder kunstmatig toeslagmateriaal vallen ook reststromen zoals slakken. Deze ontstaan bij een industrieel proces waar minerale stoffen als reststroom overblijven. Voorbeelden zijn hoogovenslak, staalslak en afval-energie-centrale-slak (AEC-slak), wat overblijft bij de verbranding van huisvuil.

3.1.1.3 *Gerecycled toeslagmateriaal*

Gerecycled toeslagmateriaal is afkomstig van de verwerking van bouw- en sloopafval. Het bestaat in hoofdzaak uit betongranulaat, eventueel in combinatie met ongebonden toeslagmateriaal dat bij het breken weer is vrijgekomen. Het kan echter verontreinigd zijn met allerlei andere uit de bouw afkomstige materialen zoals metselwerk, bitumen, glas, plastic, rubber, metalen, hout, enzovoorts. In welke mate deze bestanddelen aanwezig zijn, hangt af van de samenstelling van het oorspronkelijke materiaal en het reinigingsproces. Om duidelijk te maken waaruit het gerecycled toeslagmateriaal precies bestaat, wordt de samenstelling weergegeven aan de hand van een zestal categorieën, zie tabel 3.1 en bijbehorende tekst.

Een speciale categorie binnen het gerecycled toeslagmateriaal is het zogenoemde teruggewonnen toeslagmateriaal. Het gaat daarbij om toeslagmateriaal dat de betonproducent zelf terugwint uit zijn eigen producten en waarvan hij dus de samenstelling kent. Teruggewonnen toeslagmateriaal kan worden verkregen door het:

1. uitspoelen van resten betonspecie;
2. breken van verhard beton dat is verkregen doordat betonspecie op de betonfabriek/-centrale is verhard;
3. breken van betonproducten, die niet van het fabrieksterrein zijn afgevoerd.

Tabel 3.1 Indeling gerecycled toeslagmateriaal volgens NEN-EN 12620.

Categorie	Bestanddeel	Subcategorieën			
Hoofdbestanddelen		Minimaal aanwezig (% m/m)			
Rc	Betongranulaat	Rc ₉₀	Rc ₈₀	Rc ₇₀	Rc ₅₀
Rcu	Betongranulaat + ongebonden toeslagmateriaal	Rcu ₉₅	Rcu ₉₀	Rcu ₇₀	Rcu ₅₀
Verontreinigingen		Maximaal aanwezig (% m/m)			
Rb	Metselwerk	Rb ₁₀₋	Rb ₃₀₋	Rb ₅₀₋	
Ra	Bitumen	Ra ₁₋	Ra ₅₋	Ra ₁₀₋	
XRg	Slib, metalen, hout, plastic, rubber, gips, glas	XRg _{0,5-}	XRg ₁₋	XRg ₂₋	
FL	Zwevende bestanddelen	Maximaal aanwezig (cm ³ /kg)			
		FL _{0,2-}	FL ₂₋	FL ₅₋	

Twee voorbeelden als toelichting van het gebruik van de categorieën volgens tabel 3.1. Zij zijn ontleend aan de NEN-EN 206 - bijlage E.

Gerecycled toeslagmateriaal Type A (Rc₉₀, Rcu₉₅, Rb₁₀₋, Ra₁₋, FL₂₋, XRg₁₋)

Gerecycled toeslagmateriaal type A bevat minimaal 90% (*m/m*) betongranulaat (Rc₉₀) en minimaal 95% (*m/m*) betongranulaat in combinatie met ongebonden toeslagmateriaal (Rcu₉₅). Verder bevat het maximaal 10% (*m/m*) metselwerkgranulaat (Rb₁₀₋), maximaal 1% (*m/m*) bitumen (Ra₁₋), maximaal 2 cm³/kg opdrijvende delen (FL₂₋) en maximaal 1% (*m/m*) van de combinatie slib, metalen, hout, plastic, rubber, gips, en glas (XRg₁₋).

Gerecycled toeslagmateriaal Type B (Rc₅₀, Rcu₇₀, Rb₃₀₋, Ra₅₋, FL₂₋, XRg₂₋)

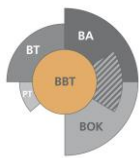
Gerecycled toeslagmateriaal type B bevat minimaal 50% (*m/m*) betongranulaat (Rc₅₀) en minimaal 70% (*m/m*) betongranulaat in combinatie met ongebonden toeslagmateriaal (Rcu₉₅). Verder bevat het maximaal 30% (*m/m*) metselwerkgranulaat (Rb₃₀₋), maximaal 5% (*m/m*) bitumen (Ra₅₋), maximaal 2 cm³/kg opdrijvende delen en maximaal 2% (*m/m*) van de combinatie slib, metalen, hout, plastic, rubber, gips, en glas (XRg₁₋).

3.1.2 Overzicht eigenschappen toeslagmateriaal

De indeling naar de herkomst van het toeslagmateriaal zegt iets over de ontstaanswijze ervan, maar nog niets over de mogelijkheden voor toepassing in beton. Om hierover een uitspraak te kunnen doen is het noodzakelijk inzicht te hebben in de voor beton relevante eigenschappen van het toeslagmateriaal. In tabel 3.2 is een overzicht gegeven van alle eigenschappen van het toeslagmateriaal die door een producent van toeslagmateriaal zouden kunnen worden bepaald en dus op de prestatieverklaring zouden kunnen staan.

In de tabel is een indeling in vier hoofdgroepen aangehouden.

- De eerste hoofdgroep is aangeduid als fysisch en omvat de eigenschappen van het toeslagmateriaal die zijn gerelateerd aan de samenstelling van de korrels. Riviergrind en kalksteen verschillen bijvoorbeeld in samenstelling. Het gevolg is dat de deeltjesdichtheid, een aan de samenstelling gerelateerde eigenschap, verschilt.
- De tweede hoofdgroep omvat de eigenschappen die gerelateerd zijn aan de vorm en afmetingen van de korrels. Met een mooi woord de 'geometrie' van de korrels.



Dictaat Basiskennis Betontechnologie [bbt]

- Riviergrind en rivierzand hebben bijvoorbeeld dezelfde samenstelling, maar de korrels hebben verschillende afmetingen. Gevolg is dat de korrelgrootteverdelingen verschillen.
- De derde hoofdgroep omvat de verontreinigingen. Dit zijn alle bestanddelen die op enig moment in het toeslagmateriaal terecht kunnen zijn gekomen en nadelig kunnen zijn voor de eigenschappen van beton. Zeegrind zal bijvoorbeeld schelpen bevatten terwijl dat bij riviergrind gewoonlijk niet het geval is.
 - De vierde hoofdgroep tot slot omvat twee eigenschappen, die variabel zijn en gewoonlijk niet door de producent van het toeslagmateriaal worden bepaald. Het betreft het watergehalte, en de dichtheid van het onverdichte materiaal. Wanneer zij benodigd zijn, zullen zij door de gebruiker moeten worden bepaald op het moment dat het materiaal wordt toegepast.

N.B. De norm voor toeslagmateriaal spreekt over het watergehalte. In de betontechnologie wordt hiervoor vaak de term vochtgehalte of vochtpercentage gehanteerd.

Tabel 3.2 Overzicht eigenschappen toeslagmateriaal.

Hoofdgroep	Indeling	Eigenschap	Beproevoingsmethode	Aanduiding
Fysisch (Samenstelling) Beïnvloed door: - mineralogische samenstelling - poriëngehalte	Mechanische aantasting	Verbrijzelingswaarde	NEN-EN 1097-2/EN 13055	$LA/C_{a,b}$
		Slijtweerstand	NEN-EN 1097-1	M_{DE}
		Polijsjwaarde	NEN-EN 1097-8	PSV
	Chemische aantasting	ASR gevoelige bestanddelen	CUR-Aanbeveling 89	-
	Fysische aantasting	Vorst/dooi-bestandtheid	NEN-EN 1367-1/NEN-EN 1367-2	F/M
		Volumestabiliteit	NEN-EN 1367-4	-
	Gewicht per volume	Deeltjesdichtheid	NEN-EN 1097-6	$\rho_{a_s}, \rho_{p_s}, \rho_{ssd}$
Waterabsorptie		NEN-EN 1097-6/Annex C	$WA_{2d}/W_F W_I$	
Geometrisch (Vorm en afmeting) Beïnvloed door: - transportproces - breekmethode - scheidingsmethode	Oppervlaktestructuur	Korreltextuur	BS 812 - part 1	-
	Korrelvorm	Vlakheidsindex - Platte stukken	NEN-EN 933-3	FI
		Korrelvormgetal - Lange stukken	NEN-EN 933-4	SI
	Korrelgrootte	Korrelgroep (d/D)	NEN-EN 12620/NEN-EN 13055	G_C, G_F, G_{NG}, G_A
		Korrelgrootteverdeling	NEN-EN 933-1 en 933-10	-
Verontreinigingen (Stoffen) Beïnvloed door: - herkomst - wasproces	Zeer fijn (< 0,063)	Hoeveelheid zeer fijn	NEN-EN 933-1	f
		Slib	NEN-EN 933-8	SE
		Zwellende klei	NEN-EN 933-9	MB
	Schelpen	Schelpen	NEN-EN 933-7	SC
		Carbonaten	NEN-NEN 5922	-
	Organisch materiaal	Licht organisch materiaal	NEN-EN 1744 §14.2	-
		Humuszuur/Fulvozuur	NEN-EN 1744 §15.1/2	-
		Stoffen die de binding en sterkte beïnvloeden	NEN-EN 1744 §15	-
	Mineralogisch afwijkend	Pyriet	NEN-EN 1744 §14.1	-
	Chemisch	Sulfaatgehalte	NEN-EN 1744 §12	AS
		Zwavelgehalte	NEN-EN 1744 §11	S
		Chloridegehalte	NEN-EN 1744 §7	Cl'
		Alkaligehalte	CUR-Aanbeveling 89	Na_2O_{-eq}
Overig	Variabel, met name van belang voor dosering	Watergehalte	NEN-EN 1097-5	W
		Dichtheid onverdicht materiaal	NEN-EN 1097-3	ρ_b

De betontechnoloog kan de eigenschappen gebruiken om het meest geschikte toeslagmateriaal te kunnen selecteren. Hiervoor is het van belang om te weten op welke wijze de eigenschappen uit tabel 3.2 samenhangen met de eigenschappen van beton en betonspecie. Dit wordt in de paragrafen 3.3 en 3.4 behandeld.

Twee eigenschappen zijn altijd van belang omdat zij noodzakelijk zijn bij het vaststellen van de mengverhoudingen en het berekenen van de samenstellingen. Het gaat om de deeltjesdichtheid en om de korrelgrootte(verdeling). Deze worden hier uitvoerig behandeld, inclusief de manier waarop ze worden bepaald. Indien gegevens hierover namelijk ontbreken moet een betontechnoloog deze eigenschappen ook zelf kunnen bepalen.

3.1.3 Deeltjesdichtheid

Met behulp van de deeltjesdichtheid kunnen massa's naar volumes worden omgerekend en andersom.

N.B. De norm voor toeslagmateriaal spreekt over deeltjesdichtheid. In de betontechnologie wordt hiervoor vaak de term dichtheid of volumieke massa gehanteerd.

Zo kan bijvoorbeeld worden berekend dat wanneer de korrels een deeltjesdichtheid hebben van 2650 kg/m^3 er om $0,700 \text{ m}^3$ (= 700 liter) korrels in een mengsel te krijgen $2650 \text{ (kg/m}^3) \times 0,700 \text{ m}^3 = 1855 \text{ kg}$ aan korrels moet worden afgewogen. Andersom volgt dat 1855 kg korrels $1855 \text{ (kg)} / 2650 \text{ (kg/m}^3) = 0,700 \text{ m}^3$ aan volume innemen.

N.B. De deeltjesdichtheid wordt volgens de beproevingsnorm, opgegeven in Mg/m^3 (megagram per kubieke meter), dus $2,65 \text{ Mg/m}^3$ in plaats van 2650 kg/m^3 (kilogram per kubieke meter). We zullen in dit dictaat echter uitgaan van kg/m^3 omdat dit voor beton de gebruikelijke wijze is om een dichtheid uit te drukken.

De deeltjesdichtheden van materialen verschillen.

3.1.3.1 Invloed mineralogische samenstelling

Korrels hebben een verschillende mineralogische samenstelling. Deze mineralogische samenstelling is in eerste instantie bepalend voor de deeltjesdichtheid. Zand, grind, en graniet bestaan bijvoorbeeld hoofdzakelijk uit siliciumdioxide en hebben een vergelijkbare deeltjesdichtheid van rond de 2650 kg/m^3 . Kalksteen en kalksteenmeel bestaan hoofdzakelijk uit calciumcarbonaat en hebben een deeltjesdichtheid van rond de 2700 kg/m^3 .

Een sterk afwijkende deeltjesdichtheid hebben de korrels die metalen bevatten. Een voorbeeld is magnetiet dat hoofdzakelijk bestaat uit ijzeroxide en een dichtheid heeft van ongeveer 4800 kg/m^3 .

Gerecycled toeslagmateriaal, dat in hoofdzaak bestaat uit betongranulaat, heeft een dichtheid die ongeveer gelijk is aan beton, namelijk 2350 kg/m^3 . Wanneer veel metselwerkgranulaat aanwezig is, kan de dichtheid aanzienlijk lager zijn. Kunstmatig vervaardigde lichtgewicht korrels hebben, zoals de naam al zegt, een lage deeltjesdichtheid. De lagere dichtheid van deze materialen wordt echter niet veroorzaakt door de mineralogische samenstelling.

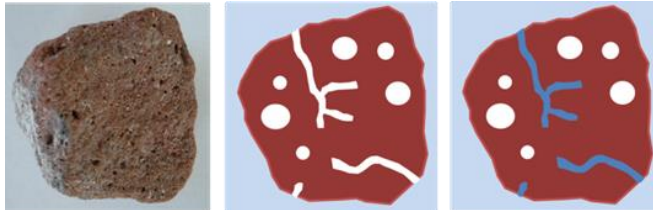
3.1.3.2 Poriën

Korrels zijn bijna nooit massief. Zelfs korrels die op het oog volledig dicht lijken, zoals grindkorrels, blijken poriën te bevatten. Het duidelijkst waarneembaar zijn de poriën in bijvoorbeeld een korrel gemaakt van metselwerkpuin of lichtgewicht korrels.

Dictaat Basiskennis Betontechnologie [bbt]

De poriën in korrels van natuurlijke herkomst zijn ontstaan bij de vorming van het oorspronkelijke gesteente waaruit de korrels zijn vervaardigd. De poriën in kunstmatig vervaardigde korrels zijn ontstaan doordat hete gassen uit de korrels ontsnapt tijdens het verhitten.

De poriën kunnen worden onderverdeeld in twee typen. In de eerste plaats de poriën die niet in verbinding staan met de buitenlucht, de zogenoemde ingesloten poriën. In de tweede plaats de poriën die wel in verbinding staan met de buitenlucht, de zogenoemde voor water toegankelijke poriën.



Figuur 3.3 Korrel metselwerkpuin en schematische doorsnedes met de voor water toegankelijke poriën gevuld met lucht (wit) en water (blauw).

Beide typen poriën zorgen ervoor dat de deeltjesdichtheid van de korrels lager wordt. De voor watertoegeankelijk poriën hebben echter als bijkomend effect dat zij zich kunnen vullen met water. Dit heeft invloed op de wijze waarop de deeltjesdichtheid wordt bepaald en hoe deze wordt aangeduid.

3.1.3.3 *Bepaling van de deeltjesdichtheid (volumieke massa)*

De dichtheid van een stof wordt aangeduid met de Griekse letter ρ (uitgesproken als rho). Het wordt berekend door de massa m van een stof te delen door het volume V dat het inneemt. In formulevorm is dit als volgt weer te geven:

$$\rho = \frac{m}{V} [\text{kg/m}^3]$$

De massa wordt bepaald door een hoeveelheid van de betreffende stof op een weegschaal te wegen. Het volume kan worden berekend door de afmetingen te bepalen van de ruimte die de stof inneemt. Voor een vaste stof is dit geen probleem. Van een blok kunnen eenvoudig de lengte, de breedte en de hoogte worden gemeten en het volume worden berekend uit $V = \text{lengte} \times \text{breedte} \times \text{hoogte}$. Ook voor een vloeistof is dit geen probleem omdat een vloeistof in een bak gebracht kan worden met bekende afmetingen. Toeslagmateriaal bestaat echter uit korrels met een onregelmatige vorm en het is dus lastig om het volume van de korrels te berekenen. Om toch het volume te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van een pyknometer.

Principe van een pyknometer

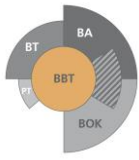
Bij deze methode wordt gebruik gemaakt van een vat of fles met een vast volume (de pyknometer), en een vloeistof waarvan de dichtheid bekend is. Water is hiervoor ideaal omdat het een dichtheid heeft van 1000 kg/m^3 . Dit betekent dat 1000 kg water een volume inneemt van exact 1 kubieke meter, oftewel 1000 liter. Elke kilo water neemt dus een volume in van 1 liter en elke gram water van 1 milliliter. Oftewel $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/liter} = 1 \text{ gram/milliliter}$.

Een fles met een inhoud van exact 2 liter kan dus 2 kg water bevatten. Oftewel een volume van 2000 milliliter water komt overeen met een massa van 2000 gram. Als de fles eerst gedeeltelijk wordt gevuld met een stof met een onbekende dichtheid dan zal er geen 2000 gram water meer bij kunnen omdat een gedeelte van het volume in de fles al door de stof is ingenomen. Er zal bijvoorbeeld nog slechts 1500 gram water bij gaan om de fles helemaal te vullen. Hieruit volgt dat de stof een volume inneemt dat gelijk is aan $2000 - 1500 = 500$ gram = $0,5 \text{ kg}$ water. Dit is een volume van $0,5 / 1000 = 0,0005 \text{ m}^3$.

Een rekenvoorbeeld. Een pyknometer met een inhoud van 2000 milliliter wordt gedeeltelijk gevuld met 1000 gram droge korrels. Vervolgens wordt de pyknometer met 1600 gram water verder volledig gevuld. De korrels nemen in dit geval een volume in van $2000 - 1600 = 400$ gram = $0,400 \text{ kg}$. Dit komt overeen met een volume aan water van $0,400 / 1000 = 0,0004 \text{ m}^3$. De dichtheid van de droge korrels is gelijk aan $1 \text{ kg} / 0,0004 \text{ m}^3 = 2500 \text{ kg/m}^3$.

Er ontstaat echter een probleem wanneer de korrels voor water toegankelijke poriën bevatten. Wanneer de korrels droog in de pyknometer worden gebracht en aangevuld worden met water dan zullen deze poriën zich namelijk gaan vullen met water. Dit verschijnsel wordt aangeduid met de term waterabsorptie. Het gevolg van waterabsorptie is dat er verschillende waarden voor de deeltjesdichtheid zijn, afhankelijk van het feit of de poriën en het daarin aanwezige absorptiewater meegerekend worden of niet.

Er wordt daarom onderscheid gemaakt in drie verschillende deeltjesdichtheden: de waterverzadigde oppervlakte droge deeltjesdichtheid ρ_{ssd} , de ovendroge deeltjesdichtheid ρ_{rd} en de schijnbare deeltjesdichtheid ρ_a (zie het kader voor de bepaling en de berekening).



Principe van de bepaling van de deeltjesdichtheden en de waterabsorptie (NEN-EN 1097-6)

Voorafgaand aan de proef wordt de massa bepaald van de pyknometer gevuld met alleen water (M_3). De korrels worden in de pyknometer gedaan en onder water gezet zodat de voor water toegankelijke poriën zich kunnen verzadigen.

Na 24 uur wordt de pyknometer volledig gevuld met water en wordt de massa bepaald (M_2). Vervolgens worden de korrels uit de pyknometer gehaald en oppervlakte-droog gemaakt. Voor de grove korrels gebeurt dit door de korrels voorzichtig af te deppen met een handdoek, de fijne korrels worden aan een warme luchtstroom blootgesteld totdat ze geen samenhangende kegel meer kunnen vormen. Van deze korrels, die zich nu in de zogenaamde waterverzadigde, oppervlakedroge toestand bevinden (in het Engels saturated surface dry (ssd)), wordt de massa bepaald (M_1). De zogenaamde oppervlakedroge, waterverzadigde deeltjesdichtheid (ρ_{ssd}) kan dan als volgt worden berekend:

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

De hoeveelheid geabsorbeerd water kan worden bepaald door de waterverzadigde, oppervlakte droge korrels te drogen in de oven en vervolgens de massa te bepalen van de droge korrels (M_4). De waterabsorptie (na 24 uur) kan als volgt worden berekend:

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \text{ [% (m/m)]}$$

De massa van de droge korrels kan tevens worden gebruikt om uit te rekenen wat de deeltjesdichtheid van de droge korrels is, de zogenaamde ovendroge deeltjesdichtheid (ρ_{rd}):

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Verder is de hoeveelheid water die geabsorbeerd is door de korrels een maat voor het volume aan poriën. Elke gram water die is geabsorbeerd, is gelijk aan 1 ml aan porievolume. Met behulp van dit gegeven kan nog een derde deeltjesdichtheid worden berekend, namelijk de deeltjesdichtheid die de korrels zouden hebben als er geen voor watertoeegankelijke poriën zouden zijn, de zogenaamde schijnbare deeltjesdichtheid (ρ_a):

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Hoe groter het aandeel voor water toegankelijke poriën, des te hoger de waterabsorptie, des te meer de drie dichtheden onderling zullen verschillen. Een bijzonder geval treedt op als er geen voor water toegankelijke poriën zijn. In dat geval zijn de drie dichtheden aan elkaar gelijk ($\rho_{ssd} = \rho_{rd} = \rho_a$). Hiervan wordt uitgegaan bij poeders waar dus alleen sprake is van de deeltjesdichtheid ρ_a . Voor korrels die water toegankelijke poriën bevatten en dus water absorberen wordt in berekeningen gebruik gemaakt van de ovendroge deeltjesdichtheid ρ_{rd} .

3.1.3.4 *Licht, normaal en zwaar toeslagmateriaal*

Op basis van de ovdroge deeltjesdichtheid ρ_{rd} wordt een onderscheid gemaakt in licht, normaal, en zwaar toeslagmateriaal:

- licht toeslagmateriaal: $\rho_{rd} \leq 2000 \text{ kg/m}^3$
- normaal toeslagmateriaal: $\rho_{rd} > 2000 \text{ kg/m}^3$ en $< 3000 \text{ kg/m}^3$
- zwaar toeslagmateriaal: $\rho_{rd} \geq 3000 \text{ kg/m}^3$



Figuur 3.4 Voorbeelden van licht (Argex), normaal (grind) en zwaar (magnetiet) toeslagmateriaal.

Het onderscheid is van belang in verband met de volumieke massa van beton. Verder is voor lichtgewicht toeslagmateriaal een andere norm van toepassing dan voor normaal en zwaar toeslagmateriaal. Hierdoor verschilt de wijze waarop sommige eigenschappen worden bepaald. Dit komt later in dit hoofdstuk aan bod.

3.1.4 Korrelgrootte(-verdeling)

De korrelgrootte is in de betontechnologie een belangrijke eigenschap. Het is de basis voor de wijze waarop de producent het toeslagmateriaal levert. Het is ook een belangrijke eigenschap bij het samenstellen van mengsels.

3.1.4.1 *Bepalen van de korrelgrootte*

Het lijkt logisch om de korrelgrootte vast te leggen als een diameter. Echter de grootte van een korrel is moeilijk te meten omdat korrels vaak grillig van vorm zijn en de gevonden waarde dus varieert, afhankelijk van de plaats waar gemeten wordt. Verder is het niet te doen om van heel fijne korrels een diameter te bepalen.

Het alternatief is het gebruik van vierkante openingen met een bekende afmeting waar de korrels wel of niet doorheen gaan. Zo heeft een korrel die door een opening van 8 bij 8 mm² gaat een korrelgrootte kleiner dan 8 mm. Wil de korrel niet door de opening dan is de korrelgrootte groter dan 8 mm. Op deze wijze kunnen korrels groter en kleiner dan 8 mm van elkaar worden gescheiden. Door openingen met andere afmetingen te nemen, kunnen ook andere scheidingen worden gemaakt. Strikt genomen wordt dus niet de korrelgrootte zelf bepaald, maar of een korrel door een opening met een afgesproken grootte heen gaat. Het is dus een benadering.



Figuur 3.5 Zeef met openingen van 8 mm. Een korrel die op de zeef blijft liggen is groter dan 8 mm, een korrel die er door valt is kleiner dan 8 mm.

3.1.4.2 Zeefopeningen

Een zeef is een hulpmiddel om veel korrels tegelijk te kunnen scheiden. In theorie is het mogelijk om zeven met elke gewenste grootte van de openingen, de zogenoemde zeefopening, te produceren. Het is echter niet praktisch om heel veel zeven met allemaal verschillende zeefopeningen te gebruiken. In de normen voor toeslagmateriaal is daarom vastgelegd dat in Europa de zeefopeningen uit tabel 3.3 worden gebruikt.

Tabel 3.3 Gebruikte zeefopeningen voor toeslagmateriaal (NEN-EN 12620/NEN-EN 13055-1).

Basisset	Zeefopening (in mm)							
	0	1	2	4	8	16	31,5 (32)	63
Set 1	2,8 (3)	5,6 (5)	11,2 (11)	22,4 (22)	45			
Set 2	3,15 (3)	6,3 (6)	12,5 (12)	14	20	40		
Fijn	0,063	0,125	0,250	0,500				

N.B.: de waarde tussen haakjes mag als verkorte notatie gebruikt worden, dus 32 in plaats van 31,5.

De bovenste serie zeefopeningen duiden we aan als de basisset. Deze wordt in elk land toegepast. Daarnaast mag elk land een aanvullende set zeefopeningen gebruiken waarbij de keus bestaat uit twee series: set 1 of set 2. Deze staan bekend als de tussenzeven. In Nederland is gekozen voor set 1, België maakt bijvoorbeeld gebruik van set 2. Verder wordt voor de kleinere korrels, aangeduid als fijn, gebruik gemaakt van een serie zeer kleine openingen.

3.1.4.3 Korrelgroepen (d/D)

Een producent van toeslagmateriaal gebruikt hele grote zeven met zeefopeningen uit de basisset + set 1 of 2 om daarmee zogenoemde korrelgroepen te produceren. Deze worden aangeduid met d/D , waarbij d staat voor de kleinste zeefopening en D voor de grootste zeefopening. Een voorbeeld is een 4/32. Deze korrelgroep bevat dus korrels tussen 4 en 32. Door verschillende zeefopeningen te gebruiken kan een producent dus een grote hoeveelheid verschillende korrelgroepen produceren. Ze behoren echter allen tot vier hoofdcategorieën.

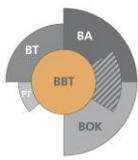
Tabel 3.4 Indeling korrelgroepen in categorieën.

Categorie	Benaming	d	D	Voorbeelden van korrelgroepen (d/D)
G_C	Grof	≥ 2	≤ 63	2/8 4/16 4/32
G_F	Fijn	0	≤ 4	0/1 0/2 0/4
G_{NG}	Natuurlijk gegradeerd 0/8	0	8	0/8
G_A	"All-in"	0	≤ 45	0/12 0/16 0/20 0/32

Een grof toeslagmateriaal kan dus elke korrelgroep zijn waarvoor geldt dat d groter of gelijk is aan 2 en D elke waarde uit de basisset + set 1 kan hebben (voor België set 2). Voor een fijn toeslagmateriaal geldt d gelijk is aan 0 en D gelijk is aan 1, 2 of 4. Een "All-in" toeslagmateriaal bevat zowel fijne als grove korrels en kan worden gezien als een combinatie van fijn- en grof toeslagmateriaal. Natuurlijk gegradeerd 0/8 is een speciale categorie. Deze wordt alleen in Zweden gebruikt.

Doordat het scheiden in een installatie relatief snel gebeurt, kan een korrelgroep korrels bevatten die groter zijn dan D , de zogenoemde bovenmaat, en korrels die kleiner zijn dan d , de zogenoemde ondermaat. Voor de bovenmaat geldt dat minimaal 85% of 90% door zeefopening D moet gaan, afhankelijk van de korrelgroep. De korrels die groter zijn dan D mogen echter nooit groter zijn dan $2 \times D$. In een korrelgroep 4/16 komen dus geen korrels voor die groter zijn dan 32, maar een bepaald gedeelte kan wel groter zijn dan 16. Voor de ondermaat geldt dat maximaal 15% of 20% door zeefopening d mag gaan, afhankelijk van de korrelgroep. De toelaatbare percentages voor de bovenmaat en ondermaat worden weergegeven achter de aanduiding van de categorie, bijvoorbeeld 4/16 G_C 90/15. In tabel 3.5 staan per korrelgroep de eisen die gesteld worden aan het percentage korrels dat door de betreffende zeefopening moet gaan.

Een korrelgroep is dus een tamelijk grove aanduiding waarmee de producent van het toeslagmateriaal aangeeft tussen welke twee zeefopeningen zich het grootste gedeelte van de korrels bevindt. Een meer precieze aanduiding is de korrelgrootteverdeling.



Tabel 3.5 Korrelgroepen en uitwerking van eisen aan de zeefdoorval (% V/V).

korrelgroep	2/8	4/16	4/22	4/32	8/16	16/22	16/32
categorie	$G_{c85/20}$	$G_{c90/15}$	$G_{c90/15}$	$G_{c90/15}$	$G_{c85/20}$	$G_{c85/20}$	$G_{c85/20}$
zeefopening							
63				100			100
45			100	98-100		100	98-100
31,5		100	98-100	90-99	100	98-100	85-99
22,4		98-100	90-99		98-100	85-99	25-70
16	100	90-99		25-70	85-99	0-20	0-20
11,2	98-100		25-70		25-70		
8	85-99	25-70			0-20	0-5	0-5
5,6							
4	25-70	0-15	0-15	0-15	0-5		
2	0-20	0-5	0-5	0-5			
1	0-5						

3.1.4.4 Korrelgrootteverdeling

De korrelgrootteverdeling is een getalsmatige en meestal tegelijk ook grafische weergave van het resultaat van de zeefmethode (zie kader).

Principe van de zeefmethode (NEN-EN 933-1)

De eerste stap is dat een monster droog toeslagmateriaal met een bepaalde massa (M_1) over de zeef 0,063 wordt schoongespoeld met behulp van water. Het doel hiervan is om de zeer fijne deeltjes die aan elkaar kunnen klitten of als stof aan de grovere korrels kunnen hangen, te verwijderen. Vervolgens wordt het gedeelte dat op de zeef is achtergebleven gedroogd en na afkoelen gewogen (M_2).

Daarna volgt de tweede stap. Eerst wordt de zogenaamde zeefstoren samengesteld door de gewenste zeven uit tabel 3.3 achtereenvolgens van de kleinste naar de grootste opening op een zeef met een gesloten onderkant, de pan genaamd, te plaatsen. De zeven zijn voorzien van een rand waardoor ze in elkaar passen.

De zeefstoren wordt op een tril- of schudmachine geplaatst. Vervolgens wordt het droge uitgespoelde monster toeslagmateriaal op de bovenste zeef (met de grootste opening) gebracht. Daarna wordt er een deksel over de zeef gezet en wordt het geheel met klemmen in de machine vastgezet. Na 10 minuten trillen of schudden wordt het deksel verwijderd. De bovenste zeef wordt voorzichtig verwijderd en boven een bak wordt het toeslagmateriaal handmatig nagezeefd tot er geen materiaal meer door de zeef komt. De hoeveelheid materiaal dat op de zeef achterblijft, wordt gewogen (R_1). Het materiaal dat na handmatig zeven toch nog door de zeef is gegaan, wordt op de volgende zeef gebracht. Zo wordt voor elke zeef afzonderlijk bepaald hoeveel monster op de zeef is achtergebleven (R_2, R_3, \dots, R_N). Tot slot wordt de hoeveelheid materiaal gewogen dat in de pan is achtergebleven (P).

Om te voorkomen dat teveel moet worden nagezeefd moet de hoeveelheid monster niet te groot zijn. Tevens wordt hierdoor voorkomen dat er teveel materiaal op een zeef terecht komt (overbelasting).

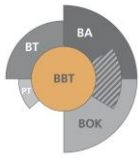
De gegevens van de zeefmethode worden als volgt verwerkt: (zie tabel 3.6).

Eerst wordt berekend hoeveel zeer fijn materiaal ($< 0,063$) verwijderd is bij het wassen ($M_1 - M_2$). Vervolgens worden in een kolom de gebruikte zeefopeningen gezet, beginnend bij de grootste en eindigend bij de pan (1). Achter elke opening wordt in een tweede kolom vermeld hoeveel gram R_i (R_1 tot en met R_N) op de betreffende zeef is achtergebleven (2). Vervolgens wordt voor elke zeefopening berekend hoeveel massaprocent van de korrels op de zeef is blijven liggen. Hiervoor wordt de massa op de betreffende zeef (R_i) gedeeld door de massa van het totale monster voor het wassen (M_1) en vermenigvuldigd met honderd (3). De korrelgrootteverdeling wordt uitgedrukt in het percentage doorval (door de zeef). Om deze te krijgen wordt bij elke zeefopening berekend wat overblijft als van de 100 procent alle percentages op de bovenliggende zeven inclusief de betreffende zeef wordt afgetrokken. Dus bijvoorbeeld bij 0,500: $100 - (0 + 2 + 12 + 16 + 18) = 52\%$ (4).

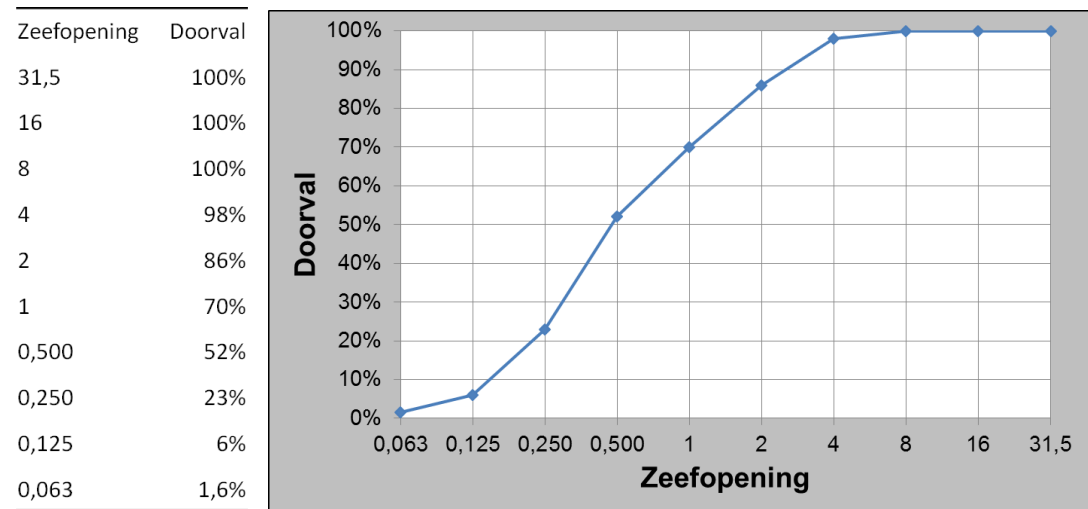
Het percentage kleiner dan 0,063 wordt afzonderlijk berekend omdat hierin ook het zeer fijne materiaal moet worden meegenomen dat bij het wassen is verwijderd. Het resultaat wordt uitgedrukt op 0,1% nauwkeurig. Dit in tegenstelling tot de andere percentages die op hele getallen worden afgerond.

Tabel 3.6 Voorbeeldberekening van een korrelgrootteverdeling.

Massa droge monster voor wassen		$M_1 = 248$ gram	
Massa droge monster na wassen:		$M_2 = 244$ gram	
Massa zeer fijn materiaal verwijderd bij het wassen: $(M_1 - M_2) = 4$ gram			
(1)	(2)	(3)	(4)
Zeefopening	Massa op zeef (R_i) [g]	Percentage op de zeef ($100 \times R_i / M_1$) [% m/m]	Doorval $100 - \Sigma (100 \times R_i / M_1)$ [% m/m]
8	0	0	100
4	5	2	98
2	29	12	86
1	39	16	70
0,500	44	18	52
0,250	71	29	23
0,125	41	17	6
0,063	15	6	
Pan	0		
(5) Percentage zeer fijn $< 0,063$		$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1}$	1,6



Door de zeefopeningen op de x-as uit te zetten tegen de gevonden percentages voor de zeefdoorval op de y-as ontstaat een grafische weergave.



Figuur 3.6 Weergave van de korrelgrootteverdeling in tabelvorm en grafisch.

Het zeven met behulp van een trilmachine geeft problemen bij zeer fijne korrels omdat deze zich niet als afzonderlijke korrels gedragen. Om bijvoorbeeld toeslagmateriaal-vulstof uit te zeven wordt daarom gebruik gemaakt van een speciale methode, het luchtstraalzeven (zie kader).

Principe van luchtstraalzeven (NEN-EN 933-10)

Op de luchtstraalzeef wordt een zeef met een bepaalde opening geplaatst. Hierop wordt een monster met een bekende massa gebracht. De korrels die fijner zijn dan de zeefopening worden vervolgens met behulp van onderdruk door de zeef getrokken. Na afloop kan worden bepaald hoeveel procent van het oorspronkelijke monster door de zeef is verdwenen. Dit is het percentage doorval voor die zeef.

Door achtereenvolgens zeven met verschillende openingen te gebruiken kan een korrelgrootteverdeling worden opgesteld voor de toeslagmateriaal-vulstof.

3.2 Invloed op eigenschappen beton

Na het verharden maakt het toeslagmateriaal deel uit van het beton en de eigenschappen van de korrels en de aanwezige verontreinigingen zullen dus invloed hebben op de eigenschappen van het beton. Door toeslagmaterialen te selecteren met de juiste combinatie van eigenschappen kunnen de gewenste eigenschappen van het beton worden bereikt en ongewenste eigenschappen zoveel mogelijk worden voorkomen.

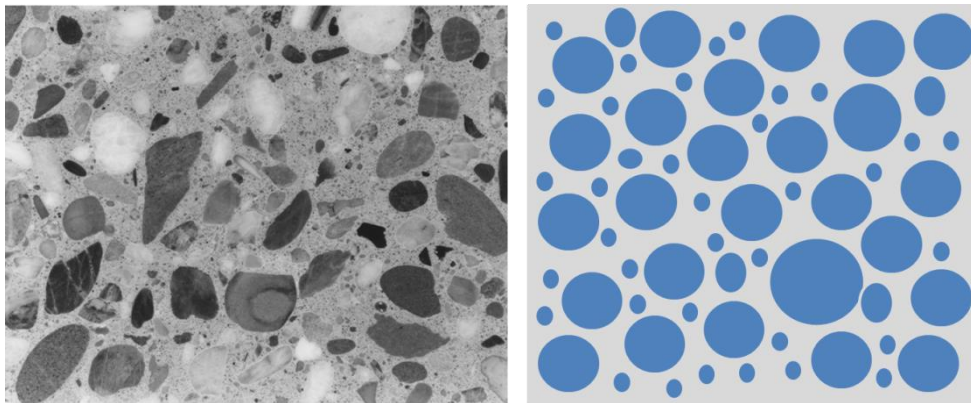
3.2.1 Samenstelling van verhard beton

In verhard beton zijn twee componenten te onderscheiden:

- het korrelskelet dat bestaat uit de korrels die niet aan de reactie hebben deelgenomen.
- de cementsteen die het korrelskelet opvult en bijeenhoudt.

Soms zal een derde component te onderscheiden zijn, namelijk holle ruimten. Deze kunnen zijn veroorzaakt door een slechte verdichting of omdat tijdens het verdichten onvoldoende cementlijm aanwezig was om de ruimten tussen de korrels op te vullen.

In de volgende sub-paragrafen wordt eerst per eigenschap van het beton behandeld wat de invloed van deze drie componenten is. Daarbij wordt er vanuit gegaan dat zand en grind is gebruikt. Vervolgens wordt ingegaan op de invloed die de relevante eigenschappen van het toeslagmateriaal hebben op het korrelskelet en dus op de betreffende betoneigenschap.



Figuur 3.7 Schematische weergave samenstelling beton: blauw is korrelskelet, grijs is cementsteen.

3.2.2 Volumieke massa

De deeltjesdichtheid van het toeslagmateriaal heeft invloed op de volumieke massa van beton. Indien licht of zwaar beton is gespecificeerd, heeft dat dus invloed op de keuze van het toeslagmateriaal.

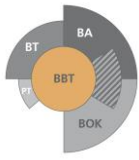
3.2.2.1 Invloed van de drie componenten

De volumieke massa van beton wordt bepaald door de combinatie van:

- de volumieke massa van het korrelskelet;
- de volumieke massa van de cementsteen;
- de eventuele aanwezigheid van holle ruimten.

De volumieke massa van het korrelskelet is gelijk aan de volumieke massa van de korrels. Bij gebruik van zand en grind zal deze ongeveer 2650 kg/m^3 bedragen. De volumieke massa van de cementsteen kan variëren, afhankelijk van de samenstelling. Een redelijk gemiddelde is 1800 kg/m^3 .

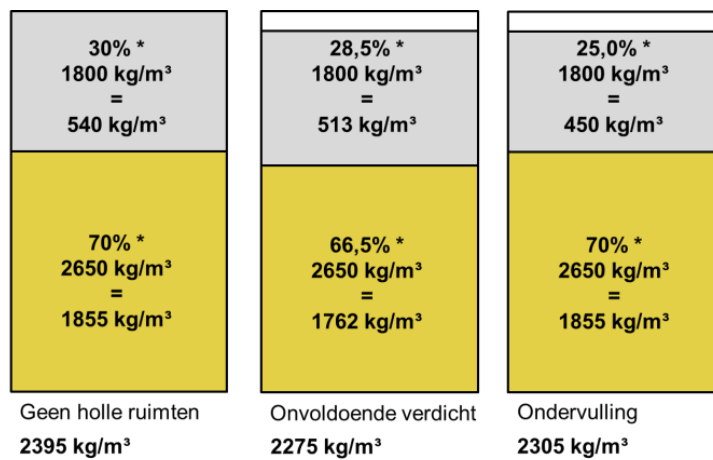
Wanneer we ervan uitgaan, dat de volumeverhouding tussen korrelskelet en cementsteen 70% - 30% bedraagt, kan worden berekend dat het beton een volumieke massa heeft van: $70\% \times 2650 \text{ kg/m}^3 + 30\% \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 2395 \text{ kg/m}^3$. Dit geldt dus als er geen holle ruimten aanwezig zijn, alleen korrels en cementsteen.



Dictaat Basiskennis Betontechnologie [bbt]

Als er wel holle ruimten aanwezig zijn dan zullen deze, afhankelijk van de wijze waarop ze zijn ontstaan, een andere invloed hebben op de volumieke massa.

1. Veroorzaakt door onvoldoende verdichting. Wanneer bijvoorbeeld 5% aan holle ruimten achterblijft na het verdichten dan daalt de volumieke massa van het beton met 5%. In bovenstaand voorbeeld wordt dan de volumieke massa:
 $(100\% - 5\%) \times 2395 \text{ kg/m}^3 = 2275 \text{ kg/m}^3$. In dit geval verminderen zowel de bijdrage van het korrelskelet als van de cementsteen.
2. Veroorzaakt door ondervulling. Er is te weinig cementsteen om de ruimten tussen de korrels te vullen. We gaan wederom uit van 5%. In het voorbeeld wordt dan de volumieke massa: $70\% \times 2650 \text{ kg/m}^3 + 25\% \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 2305 \text{ kg/m}^3$. De daling is minder dan bij onvoldoende verdichting omdat nu alleen de bijdrage van het relatief lichte cementsteen vermindert.



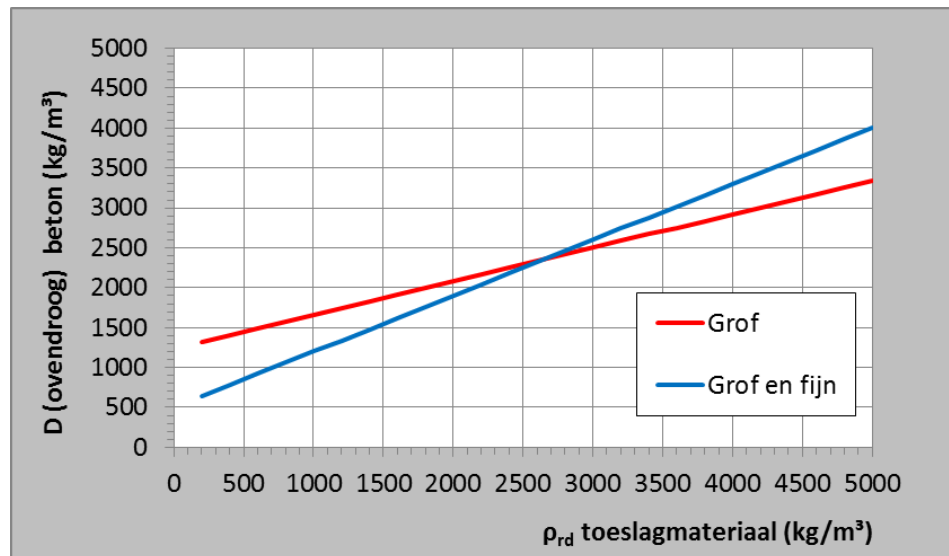
Figuur 3.8 Bijdrage van de componenten in de volumieke massa.

Uit figuur 3.8 blijkt ook dat van de drie componenten het korrelskelet verreweg de grootste bijdrage levert in de volumieke massa van beton. Het is dus logisch om het gewicht hiervan te beïnvloeden als een afwijkende volumieke massa gespecificeerd is.

3.2.2.2 Invloed deeltjesdichtheid

De volumieke massa van het korrelskelet is het gevolg van de deeltjesdichtheid van de gebruikte toeslagmaterialen. Op deze eigenschap zal het toeslagmateriaal dus moeten worden geselecteerd om de gewenste volumieke massa van het beton te krijgen.

Zwaar toeslagmateriaal kan worden ingezet om de volumieke massa te verhogen. In figuur 3.9 kan bijvoorbeeld worden afgelezen dat om een volumieke massa van het beton van 3000 kg/m³ te krijgen al het grind met een deeltjesdichtheid van 2650 kg/m³ vervangen moet worden door een grof zwaar toeslagmateriaal met een deeltjesdichtheid van 4100 kg/m³.



Figuur 3.9 Relatie tussen deeltjesdichtheid van de korrels en volumieke massa van beton voor een verder gelijke betonsamenstelling.

Het is ook mogelijk een toeslagmateriaal met een hogere deeltjesdichtheid in te zetten, bijvoorbeeld 4800 kg/m³. In dat geval kan nog een gedeelte grind worden gebruikt als grof toeslagmateriaal. Het is ook mogelijk een toeslagmateriaal met een lagere deeltjesdichtheid in te zetten, bijvoorbeeld 3500 kg/m³ maar in dat geval dient ook het zand geheel of gedeeltelijk vervangen te worden door een fijn zwaar toeslagmateriaal.

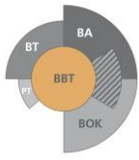
Licht toeslagmateriaal kan op dezelfde wijze worden ingezet om licht beton te krijgen. Belangrijk aandachtspunt bij het gebruik van licht toeslagmateriaal is dat lichte korrels poriën bevatten en dat dus ook de sterkte van het beton wordt beïnvloed. Bij zwaar toeslagmateriaal is dit gewoonlijk niet het geval.

N.B. De waarden in deze paragraaf dienen als een indicatie voor de selectie. De daadwerkelijke volumieke massa van het beton kan pas berekend worden als alle grondstoffen en de mengverhoudingen bekend zijn.

3.2.2.3 Beton zonder fijn

Een andere manier om de volumieke massa te verlagen is om alleen grof toeslagmateriaal toe te passen en geen fijn toeslagmateriaal. Hierdoor ontstaan holle ruimten in het korrelskelet. Dergelijk beton wordt aangeduid als 'beton zonder fijn'.

Uitgaande van een verhouding van 40% fijn- en 60% grof toeslagmateriaal betekent dit dat in het eerdere rekenvoorbeeld $40\% \times 70\% = 28\%$ van het korrelskelet niet wordt ingevuld. De volumieke massa wordt dan: $(70\% - 28\%) \times 2650 \text{ kg/m}^3 + 30\% \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 1653 \text{ kg/m}^3$. Het effect van het weglaten van het fijne toeslagmateriaal is groot omdat een dergelijk beton 28% holle ruimten bevat. Dit heeft grote gevolgen voor de verwerkbaarheid, sterkte, en duurzaamheid. 'Beton zonder fijn' kan dus alleen voor speciale producten worden toegepast.



Aanvullend kan in 'beton zonder fijn' tevens grof licht toeslagmateriaal worden toegepast waardoor de volumieke massa nog lager wordt. Dergelijke mengsels worden bijvoorbeeld gebruikt voor de productie van lichtgewicht blokken.

3.2.3 Druksterkte

De druksterkte van beton wordt bepaald door een groot aantal factoren, waaronder bijvoorbeeld de omstandigheden waaronder het beton is verhard en de wijze van beproeven. In deze paragraaf worden alleen de factoren behandeld die samenhangen met de gekozen grondstoffen.

De eigenschappen van het toeslagmateriaal zijn gewoonlijk niet bepalend voor de druksterkte. Uitzonderingen vormen die gevallen waarin een zeer hoge sterkte benodigd is of wanneer relatief zwakke, vaak poreuze, toeslagmaterialen worden toegepast.

3.2.3.1 *Invloed van de drie componenten*

Wanneer holle ruimten aanwezig zijn in beton, oftewel lucht, dan zal hierdoor de druksterkte dalen. Als vuistregel geldt dat elke procent lucht zorgt voor een daling van de sterkte met 5%. Het is echter niet zo dat er dus met 20% lucht geen sterkte meer is. Het is elke keer 5% van de sterkte die is overgebleven nadat de invloed van 1 procent lucht verrekend is.

Dus bijvoorbeeld bij een druksterkte van beton zonder lucht van $50,0 \text{ N/mm}^2$ neemt bij 1% lucht de sterkte af naar $50,0 \times 0,95^1 = 47,5 \text{ N/mm}^2$.

Bij 2% neemt de sterkte verder af naar $50,0 \times 0,95^2 = 45,1 \text{ N/mm}^2$.

Bij 3% lucht neemt de sterkte verder af naar $50,0 \times 0,95^3 = 42,9 \text{ N/mm}^2$. Enzovoorts.

In formulevorm: druksterkte beton met $y\%$ lucht = druksterkte beton zonder lucht $\times 0,95^y$.

Voor het 'beton zonder fijn' uit het voorbeeld in paragraaf 3.3.2.3 zou de sterkte bij 28% lucht dus bijvoorbeeld kunnen dalen van 50 N/mm^2 naar $50 \times 0,95^{28} = 11,9 \text{ N/mm}^2$!

Wanneer in beton geen holle ruimten aanwezig zijn, dan wordt de druksterkte bepaald door de sterkte van het korrelskelet, de sterkte van de cementsteen en de hechting tussen beide. Wanneer relatief sterke toeslagmaterialen worden gebruikt waarvan de aanhechting goed is, zoals zand en grind, dan zal de sterkte van de cementsteen de zwakste schakel zijn en dus de druksterkte bepalen. Dit is de gebruikelijke situatie voor beton.

Er kunnen zich echter ook situaties voordoen dat de cementsteen sterker is dan het korrelskelet. Dit is bijvoorbeeld het geval als de korrels heel zwak zijn of de cementsteen heel sterk. De sterkte van het korrelskelet is in die gevallen de zwakste schakel en zal de druksterkte gaan bepalen.

Belangrijke eigenschappen van de korrels in verband met de druksterkte zijn dus de sterkte van de korrels en de aanhechting.

3.2.3.2 *Invloed verbrijzelingswaarde*

De sterkte van de korrels wordt bepaald door de korrels te verbrijzelen. Voor normaal en zwaar toeslagmateriaal gebeurt dit met de Los Angeles-proef, voor licht toeslagmateriaal met de verbrijzelingsproef. Het resultaat is in beide gevallen een verbrijzelingswaarde (zie kader).

Los Angeles-waarde

Bij de Los Angeles proef wordt een vaste hoeveelheid toeslagmateriaal, in een vastgelegde korrelgrootte, tezamen met een aantal stalen kogels, rondgedraaid in een stalen trommel. Na afloop wordt het materiaal gespoeld over een zeef 1,6 mm. De Los Angeles-waarde geeft aan hoeveel procent van het oorspronkelijke monster kleiner is geworden dan 1,6 mm. Hoe lager de Los Angeles-waarde, des te groter de weerstand van het materiaal is tegen verbrijzeling. Standaard wordt de volgende indeling in categorieën aangehouden: LA_{15} , LA_{20} , LA_{25} , LA_{30} , LA_{35} , LA_{40} , LA_{50} .

Verbrijzelingswaarde

Bij de verbrijzelingsproef voor lichtgewicht materiaal wordt een cilinder met vastgelegde afmetingen gevuld met een monster van het materiaal en op de triltafel verdicht. Vervolgens wordt met een drukbank beproefd hoeveel kracht benodigd is om met een zuiger het lichtgewicht materiaal in 100 seconden 20 mm in te drukken. Het resultaat is de C_a -waarde, uitgedrukt in N/mm^2 . Hoe hoger de C_a -waarde des te groter de weerstand van het lichtgewicht materiaal tegen verbrijzeling. Voor lichtgewicht materialen met een stortgewicht kleiner dan $150 kg/m^3$ wordt een aangepaste procedure gehanteerd en wordt het materiaal 50 mm ingedrukt. De uitkomst is een C_b -waarde.

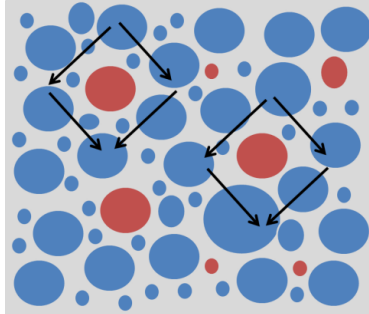
Voor licht toeslagmateriaal wordt de waarde opgegeven als een C_a of C_b -waarde. Er geldt: hoe lager de C_a of C_b waarde van het lichtgewicht materiaal, des te lager de sterkteklasse waaraan het lichtgewicht beton kan voldoen.

Normaal en zwaar toeslagmateriaal worden aan de hand van de gemeten Los Angeles waarde ingedeeld in een LA -categorie. In het algemeen geldt dat lager de LA -waarde van het toeslagmateriaal wordt (en dus de categorie waarin het valt) des te hoger de sterkteklasse waaraan het beton kan voldoen. Indien het beton aan een hoge sterkteklasse moet voldoen, zoals bijvoorbeeld C100/115, dan moet dus een toeslagmateriaal worden geselecteerd dat in een lage categorie valt, bijvoorbeeld LA_{15} .

Maar in constructief beton kunnen ook niet zonder meer de toeslagmaterialen worden toegepast die voldoen aan de hoge LA -categorieën. De reden is dat aan de druksterkte ook constructieve eigenschappen zoals de elasticiteitsmodulus en de treksterkte zijn gerelateerd. De rekenregels voor normaal beton en zwaar beton gaan ervan uit dat zogenoemde harde, dichte toeslagmaterialen worden gebruikt. Hiertoe behoren de toeslagmaterialen in de categorie LA_{30} of lager en met zeer weinig poriën (waterabsorptie $< 1\%$). Voorbeelden van harde, dichte toeslagmaterialen zijn grind, graniet, en kalksteen.

Wanneer in constructief beton korrels worden toegepast die niet tot de harde dichte korrels worden gerekend, dan moet dus naast de invloed op de sterkte ook rekening gehouden worden met de invloed op de aan de druksterkte gerelateerde constructieve eigenschappen. Informatie hierover is terug te vinden in een CUR-Aanbeveling die handelt over het toepassen van het betreffende toeslagmateriaal in beton. Voorbeelden hiervan zijn CUR-Aanbeveling 112 voor betongranulaat en CUR-Aanbeveling 116 voor AEC-granulaat. Indien een dergelijke aanbeveling niet beschikbaar is, moeten in een zogenoemd geschiktheidsonderzoek de constructieve eigenschappen zoals de elasticiteitsmodulus en de treksterkte worden betrokken. Voor lichtbeton is al rekening gehouden met aangepaste constructieve rekenregels.

Er is een uitzondering. In de regel zal het korrelskelet de sterkte (en de overige afgeleide constructieve eigenschappen) van de harde dichte korrels houden als slechts een gedeelte van de korrels vervangen wordt door relatief zwakke korrels. De verklaring is dat het korrelskelet in staat is om de krachten op te vangen en rond de zwakke plekken te leiden.



Figuur 3.10 Schematische weergave omleiding van de kracht rond een zwakke korrel.

In Nederland is het daarom toegestaan een gedeelte van het volume van het harde dichte grove toeslagmateriaal te vervangen door minder sterk toeslagmateriaal zonder dat hiermee rekening gehouden hoeft te worden in de rekenregels. Het betreft gerecycled toeslagmateriaal volgens onderstaande tabel.

Tabel 3.7 Maximum vervangingspercentage van grof toeslagmateriaal in volumepercentage (NEN 8005).

Type gerecycled materiaal	Milieuklasse	
	XO	Overig
Betonggranulaat type A1 met $\rho_{rd} \geq 2200 \text{ kg/m}^3$	50%	30%
Betonggranulaat type A2 met $\rho_{rd} \geq 2000 \text{ kg/m}^3$		20%
Menggranulaat type B met $\rho_{rd} \geq 2000 \text{ kg/m}^3$		20%

N.B. Voor de betekenis van de types zie tabel 3.1

3.2.3.3

Invloed platte stukken

Volledig ronde korrels hebben in alle richtingen dezelfde afmeting, oftewel lengte = breedte = dikte. Een korrel is echter praktisch nooit rond: er zal altijd wel enige afwijking zijn tussen de lengte, de breedte en de dikte. Een bijzonder geval zijn de zogenoemde platte stukken. Dit zijn korrels waarvan de dikte klein is ten opzichte van de lengte en de breedte.

Vlakheidsindex

Het aandeel platte stukken wordt bepaald door een uitgezeefde fractie d/D over een spijlzeef te brengen met een opening tussen de spijlen van $0,56 \times d$ en het gewicht van de korrels die de spijlen passeren uit te drukken als percentage van de totale massa. Hoe lager het percentage des te minder platte stukken aanwezig zijn. Standaard wordt de volgende indeling in categorieën aangehouden: FI_{15} , FI_{20} , FI_{35} , FI_{50} .

In grind kunnen platte stukken voorkomen. De hoeveelheid is gewoonlijk beperkt. Sommige materialen echter leveren bij het breken heel veel platte stukken als gevolg van de kristalstructuur. Een voorbeeld is leisteen.

Het probleem van platte stukken is dat zij in de richting waarin zij plat zijn, minder sterk zijn. Wanneer veel platte stukken aanwezig zijn in beton zal dit dus de druksterkte kunnen beïnvloeden. Voor constructief beton is het aan te raden de geschiktheid van het toeslagmateriaal te beproeven indien het toeslagmateriaal niet voldoet aan categorie FI_{35} (zie kader) of beter.

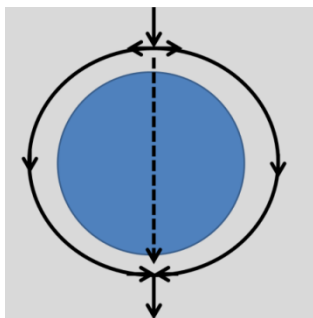
Schelpen kunnen worden beschouwd als een bijzondere categorie platte stukken. Zij hebben naast het feit dat ze plat zijn ook een hele lage sterkte. Voor constructief beton dient het aandeel schelpen in grof toeslagmateriaal beperkt te blijven tot maximaal 10%. Dit betekent dat het toeslagmateriaal moet voldoen aan categorie SC_{10} .

3.2.3.4

Invloed D_{max}

D_{max} is de D van de grofste korrelgroep die in het beton is toegepast. Dus bij een combinatie van de korrelgroepen 0/4 met 4/16 is de D_{max} gelijk aan 16. Wanneer naast 0/4 en 4/16 tevens 16/32 wordt toegepast is D_{max} gelijk aan 32.

Wanneer de cementsteen net zo sterk is als het korrelskelet dan geldt als eerste voor de grootste korrels, dus D_{max} , dat de weg door de korrel veel korter is dan de weg om de korrel heen. Een kracht kiest bij gelijke sterkte de kortste weg en de grootste korrels worden bepalend voor de sterkte.



Figuur 3.11 Weg van de kracht om de korrel (doorgetrokken lijn) en door de korrel (onderbroken lijn).

Door D_{max} te verlagen, bijvoorbeeld van 32 naar 8, kan de druksterkte van beton dus worden verhoogd, mits tegelijk de sterkte van de cementsteen wordt verhoogd. Van dit effect wordt gebruik gemaakt bij het ontwerpen van mengsels met zeer hoge sterktes. Een voorbeeld is het 'ultra-hogesterktebeton' waar de D_{max} gewoonlijk is teruggebracht tot 1.

3.2.3.5

Aanhechting

Om een goede samenwerking te krijgen is het van belang dat de cementsteen zich goed aan het korrelskelet hecht. De mate waarin dit plaats kan hebben, is afhankelijk van de oppervlaktestructuur van de korrels, aangeduid als de korreltextuur.

De korreltextuur is een gevolg van een combinatie van de kristalstructuur van het oorspronkelijke materiaal waaruit de korrel vervaardigd is, de mate van verwerking van het oppervlak van de korrel en de aanwezigheid van poriën. De korrels kunnen worden ingedeeld in zes groepen.

Tabel 3.8 Indeling toeslagmaterialen op basis van korreltextuur (BS 812 – part 1 – 1975).

Groep	Korreltextuur	Omschrijving	Voorbeelden
1	verglaasd		vuursteen, verglaasde slak
2	glad	water-getransporteerd, laagsgewijs-gesteente of zeer fijne kristallen	grind, marmer
3	korrelig	uniforme, ronde korrels	zandsteen
4	ruw	fijne of gemiddelde kristalstructuur met geen zichtbare kristallijne bestanddelen	basalt, kalksteen
5	kristallijn	met gemakkelijk zichtbare kristallijne bestanddelen	graniet, gabbro, gneiss
6	honingraat	met zichtbare poriën en "caviteiten"	puumsteen, metselwerkgranulaat, kleikorrels



Figuur 3.12 Voorbeelden van verschillende korreltexturen: verglaasd – glad – korrelig – ruw – kristallijn - honingraat.

De cementsteen zal slecht hechten aan korrels met een verglaasde structuur zoals vuursteen. Aan poreuze materialen met een duidelijke poriestructuur, zoals metselwerkgranulaat, zal de cementsteen daarentegen zeer goed hechten.

De aanhechting kan verder negatief worden beïnvloed wanneer zich hele fijne korrels hebben vastgezet op het oppervlak van de grote korrels. Een voorbeeld hiervan is slib op het oppervlak van grindkorrels.



Figuur 3.13 Aanwezigheid van slib, zichtbaar als een waas in het water boven het grind

3.2.4 Duurzaamheid en uiterlijk

Toeslagmateriaal is over het algemeen vrij duurzaam. Toch kan toeslagmateriaal, zelfs hard, dicht toeslagmateriaal zoals grind wel degelijk aangetast worden. Bijvoorbeeld door stoffen die zich in het beton bevinden of door stoffen die van buiten af het beton binnendringen. Dit kan invloed hebben op de levensduur van het beton. Het kan ook alleen tot oppervlakteschade leiden. Dit kan een probleem zijn wanneer het ten koste gaat van de dekking op de wapening of wanneer er eisen gesteld worden aan het uiterlijk.

Om dergelijk schade is het verstandig vooraf een afweging te maken over de geschiktheid van het gebruikte toeslagmateriaal voor het beoogde milieu.

3.2.4.1 *Invloed van de drie componenten*

De duurzaamheid en het uiterlijk van beton worden net als de sterkte en de volumieke massa bepaald door een combinatie van het korrelskelet, de cementlijm en de aanwezigheid van holle ruimten.

De aanwezigheid van holle ruimten zal in het algemeen een probleem zijn met betrekking tot de duurzaamheid. De holle ruimten maken het voor stoffen gemakkelijk om het beton binnen te dringen met allerlei ongewenste gevolgen, zoals corrosie van de wapening. Toch wordt een aantal betonproducten gemaakt waarin zich veel holle ruimten bevinden. Dergelijke producten bevatten geen wapening en worden vaak in een droog binnenmilieu toegepast.

In het algemeen echter zal beton in verband met de duurzaamheid geen holle ruimten mogen bevatten. Omdat de cementsteen de korrels volledig omgeeft, zullen de korrels niet in direct contact staan met de omgeving en zal de samenstelling van de cementsteen bepalend zijn voor de duurzaamheid. Er is echter een aantal aantastingen waarbij de eigenschappen van de korrels toch een rol spelen, omdat de korrels of de in het toeslagmateriaal aanwezige verontreinigingen, al dan niet direct, in contact komen met stoffen in het beton, stoffen uit de omgeving of de omgeving zelf.

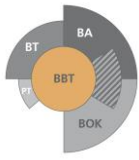
3.2.4.2 *Chemische reacties*

Bepaalde toeslagmaterialen kunnen chemisch reageren met stoffen in het beton of uit de omgeving.

Alkali-silicareactie (ASR)

Een chemische reactie waarbij het toeslagmateriaal een belangrijke rol speelt, is de alkali-silicareactie of kortweg ASR. Reactieve bestanddelen in het toeslagmateriaal reageren hierbij met alkaliën uit het beton of uit de omgeving (dooizouten, zeewater), tot een reactieproduct dat water aantrekt, waardoor beton gaat zwellen en scheuren. Het betreft de mineralen opaal, tridymiet, crystobaliet, chalcedoon of cryptokristallijn kwarts, wat voorkomt in onder meer vuursteen, siliciumhoudende kalksteen en rhyoliet. Gesteenten die op hun beurt weer deel uit kunnen maken van grind.

Zelfs wanneer bekend is hoeveel reactief materiaal in het toeslagmateriaal aanwezig is, is het, vanwege de wisselende combinatie van de plaats waar en de vorm waarin, niet mogelijk een uitspraak te doen over de schadelijke gevolgen. Het is daarom voor de beproeving op ASR noodzakelijk een combinatie van testen uit te voeren (zie kader).



Beproeving op gevoeligheid voor schadelijke ASR (CUR-Aanbeveling 89 – 2^e herziene versie)

In de eerste plaats wordt van het te onderzoeken materiaal een slijpplaatje gemaakt, dat zo dun is dat licht door de korrels heen kan vallen. Met behulp van Polarisation Fluorescence Microscopy (PFM) kan de mineralogie van elke korrel worden bepaald. Afhankelijk van de mineralogische samenstelling van de korrels worden deze als al dan niet potentieel reactief beoordeeld. Valt het resultaat van deze "pointcounting" onder de limiet dan wordt het materiaal vervolgens in een mortel vermengd, waarvan prisma's worden vervaardigd voor de zeer versnelde mortelbalkproef, de Ultra Accelerated Mortar Bar Test (UAMBT). De prisma's worden vervolgens in een alkalische vloeistof en bij verhoogde temperatuur (80 °C) gedurende 14 dagen geëxposeerd. Gemeten wordt in hoeverre de potentieel reactieve korrels swelling teweeg brengen.

Toeslagmateriaal wordt als niet reactief beschouwd wanneer het gehalte potentieel reactieve bestanddelen $\leq 2,0\%$ en de lineaire expansie in de mortelbalktest $\leq 0,1\%$ is. Echter ook reactief toeslagmateriaal kan toepasbaar zijn als het juiste bindmiddel wordt gekozen of als het beton in een droog milieu wordt toegepast.

Sulfaataantasting

Sulfaten in het toeslagmateriaal kunnen reageren met bepaalde bestanddelen uit het cement. Het reactieproduct, ettringiet, kan water aantrekken waardoor het beton gaat zwellen en scheuren. De aanwezigheid van sulfaten in toeslagmateriaal wordt aangegeven in klassen: AS_{0,2}; AS_{0,8}; AS_{1,0} of, indien hoger, AS_{xx}. In beton mogen alleen toeslagmaterialen worden toegepast die voldoen aan de categorieën AS_{0,2} en AS_{0,8}. Het sulfaatgehalte is dan respectievelijk lager dan 0,2% en 0,8%.

Roestvorming

IJzerhoudende korrels in het toeslagmateriaal, bijvoorbeeld in de vorm van pyriet, marcasiet of oer, kunnen in contact met lucht en water gaan roesten. Dit kan leiden tot een oppervlaktebeschadiging wanneer de korrel gaat zwellen en afspat of tot een roestbruine verkleuring aan het oppervlak.

3.2.4.3

Klimaat

Het korrelskelet staat gewoonlijk niet in direct contact met de omgeving maar de invloed van temperatuur en luchtvochtigheid gaat verder dan alleen het oppervlak. Harde, dichte korrels zullen geen invloed ondervinden, of slechts in zo beperkte mate dat dit geen invloed heeft op de duurzaamheid. Wanneer er echter veel poriën aanwezig zijn in de korrels, dan ontstaat er wel een risico. Poreuze, waterverzadigde korrels kunnen volumeveranderingen ondergaan.

Nat/droog-wisselingen

Als gevolg van uitdrogen kunnen waterverzadigde korrels krimpen, met als gevolg krimp-scheuren. De mate waarin een korrel bestand is tegen nat/droogwisselingen kan worden beproefd door betonprisma's aan te maken van het te beproeven toeslagmateriaal en de lengte hiervan te bepalen na onderdompeling in water en na drogen. De uitdrogingskrimp S is het procentuele verschil in lengte ten opzichte van de lengte van de droge prisma. Wanneer het toeslagmateriaal hierop wordt beproefd, mag de uitdrogingskrimp niet meer zijn dan 0,075%.

Vorst/dooi-wisselingen

Als gevolg van vorst kunnen waterverzadigde korrels kapot vriezen. Of dit ook optreedt, is afhankelijk van de poriestructuur in de korrel: de hoeveelheid en de gemiddelde grootte van de poriën. Over het algemeen is de kans klein als de waterabsorptie van het toeslagmateriaal kleiner is dan 1%.

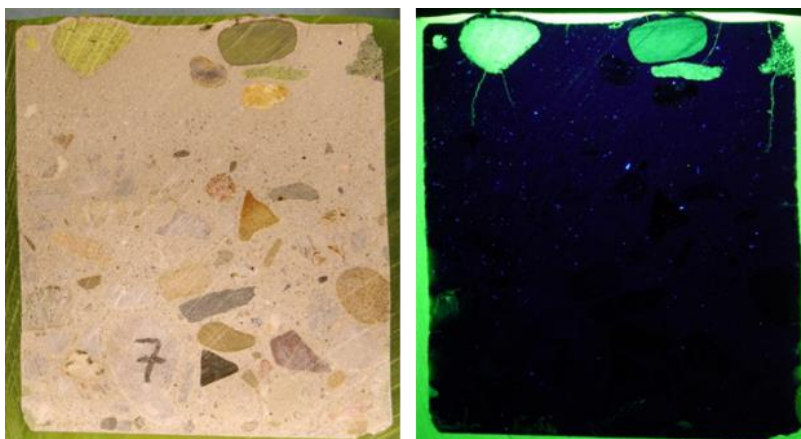
De vorst/dooi-bestandheid van toeslagmateriaal wordt opgegeven in de vorm van een categorie.

Bepalen van de vorst/dooi-bestandheid

De mate waarin een toeslagmateriaal bestand is tegen vorst/dooi-wisselingen kan worden beproefd door het materiaal te verzadigen met water en bloot te stellen aan 10 vries-dooi-cycli. Het percentage massaverlies, zijnde de hoeveelheid materiaal dat kleiner is geworden dan de helft van de kleinste korrels, is een maat voor de vorst/dooi-bestandheid. Standaard worden de volgende klassen gehanteerd: F₁, F₂, F₄. Een lagere waarde betekent minder massaverlies.

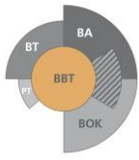
De zwaarste categorie F₁ zou voor alle omstandigheden moeten voldoen. Echter ook de samenstelling van de cementlijm speelt een rol, waardoor ook de andere categorieën kunnen voldoen.

Probleem is echter dat de vorst/dooi-bestandheid het gemiddelde resultaat is van de beproefing van een groot aantal korrels. Sommige individuele korrels kunnen sterk afwijken van het gemiddelde. Voorbeelden zijn: kleikorrels, "omgezette" steenslagkorrels (onstabiele korrels) en andere, waterabsorberende deeltjes. Deze afwijkende poreuze korrels kunnen, wanneer zij zich dicht onder het oppervlak bevinden, incidenteel tot oppervlaktebeschadiging gaan leiden in de vorm van pop-outs.



Figuur 3.14 Voorbeeld van de aanwezigheid van poreuze korrels net onder het oppervlak.

Een pop-out is zichtbaar als een kegelvormig stukje dat uit het beton is gespat. In de krater bevindt zich nog een gedeelte van de kapot gesprongen korrel.



3.2.4.4 *Slijtage*

Slijtage van beton speelt met name een rol bij asbewegingen over vloeren en wegen. Er zijn verschillende eigenschappen van de korrels die van belang zijn, afhankelijk van de eisen die gesteld worden aan het oppervlak. Hoe zwaarder de eisen, hoe gericht voor korrels met specifieke eigenschappen gekozen moet worden.

Zachte bestanddelen

Wanneer geen oppervlaktebeschadiging mag optreden dan is het in de eerste plaats van belang dat er geen zogenoemde zachte bestanddelen aanwezig zijn. Onder de zachte bestanddelen vallen de korrels die gemakkelijk met de hand te verpulveren zijn en de verontreinigingen die zich tussen de korrels kunnen bevinden zoals schelpen, hout en kooldeeltjes.



Figuur 3.15 Voorbeeld van zachte bestanddelen – houtdeeltjes.

Wanneer zachte bestanddelen zich namelijk aan het oppervlak bevinden, zullen ze snel slijten en als gevolg daarvan putten achterlaten.

De van belang zijnde eigenschappen van het toeslagmateriaal zijn de categorie voor schelpen, de aanwezigheid van carbonaten en de aanwezigheid van licht organisch materiaal.

Slijtage van de korrels

Wanneer harde dichte korrels zijn gebruikt dan zal het korrelskelet gewoonlijk niet snel aan slijtage onderhevig zijn. Bij zware mechanische belasting kunnen echter ook de korrels slijten. De mate waarin wordt bepaald met behulp van de micro-Deval test (zie kader).

Micro-Deval

De uitvoering is in grove lijnen vergelijkbaar met de Los Angeles proef, hoewel de hoeveelheden monster en afmetingen van de trommel veel kleiner zijn. De voornaamste afwijking is echter dat tevens water in de trommel wordt toegevoegd waardoor het toeslagmateriaal aan slijtage door schuren wordt blootgesteld. Hoe lager de micro-Deval waarde des te beter het materiaal bestand is tegen slijtage. Standaard wordt de volgende indeling in categorieën aangehouden: M_{DE10} , M_{DE15} , M_{DE20} , M_{DE25} , M_{DE35} .

Een lage categorie betekent een goede bestandheid tegen slijtage. Harde, dichte korrels afkomstig van natuurlijk gesteente zoals porfier, kwartsiet, en graniet vallen in het algemeen in de lage categorieën.

Polijsten van de korrels

Een heel specifieke vorm van slijtage is het polijsten: het glad worden van de korrels als gevolg van contact met rubberbanden. Bij polijsten wordt de korreltextuur veranderd, bijvoorbeeld van ruw naar glad. De mate waarin toeslagmateriaal hiervoor gevoelig is wordt uitgedrukt in een zogenoemde "Polished Stone Value" (PSV).

Polished Stone value

Het bepalen van de PSV gebeurt door korrels van het te beproeven grove toeslagmateriaal in een mal van hars te zetten, zodanig dat elke korrel gedeeltelijk boven de hars uitsteekt. Vervolgens worden de mallen op een wiel geplaatst. Een draaiend rubberen wiel beweegt vervolgens een bepaald aantal omwentelingen over de korrels waardoor deze worden gepolijst. In een afzonderlijk apparaat wordt vervolgens de wrijving van het gepolijste materiaal gemeten door een rubberen voet aan een lange arm over het gepolijste materiaal te laten bewegen. Hoe hoger de polijstwaarde des te beter is het materiaal bestand tegen polijsten. Standaard wordt de volgende indeling in categorieën aangehouden: *PSV₆₈*, *PSV₆₂*, *PSV₅₆*, *PSV₅₀*, *PSV₄₄*.

Een hoge categorie betekent een goede weerstand tegen polijsten. Harde, dichte korrels afkomstig van natuurlijk gesteente zoals porfier, kwartsiet, en graniet vallen in het algemeen in de hoge categorieën.

3.2.5 Uiterlijk

Wanneer het toeslagmateriaal wordt toegepast in schoon beton mogen zich hierin geen, of slechts in zeer geringe mate, verontreinigingen bevinden in de vorm van fijn materiaal < 0,063 mm, lichte organische bestanddelen en bestanddelen met een afwijkende mineralogische samenstelling. Deze kunnen namelijk leiden tot oppervlakte beschadigingen zoals putten, pop-outs, scheuren, vlekken of kleurverschillen.

Een aantal van deze oppervlaktebeschadigingen is reeds behandeld in de vorige paragraaf. Nog niet behandeld zijn de vlekken en de kleurverschillen. De aanwezigheid van ijzerhoudende korrels (pyriet en marcasiet) in het toeslagmateriaal, en/of korrels met een coating in de vorm van ijzeroxides, die in contact staan met de buitenlucht, kan leiden tot roestkleurige vlekken op het oppervlak.

De aanwezigheid van organisch materiaal kan leiden tot lichtbruine vlekken. Verder kunnen er kleurverschillen in het beton ontstaan als de hoeveelheid en de mineralogische samenstelling van het zeer fijn (< 0,063 mm) in het toeslagmateriaal varieert. Ook variaties in de mineralogische samenstelling van het fijne toeslagmateriaal kunnen invloed hebben op de kleur van het beton.



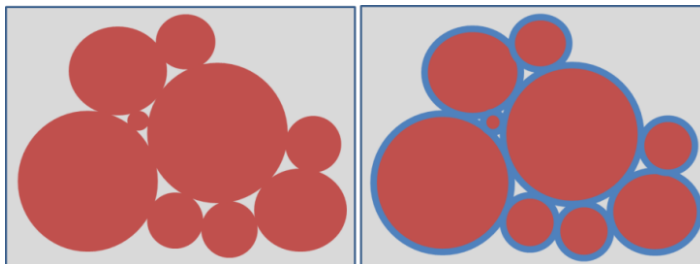
Figuur 3.16 Vlekvorming op een tegel als gevolg van de aanwezigheid van pyriet.

3.3 Invloed op de waterbehoefte

De eigenschappen van het toeslagmateriaal zijn niet alleen van invloed op de eigenschappen van het verharde beton maar ook op de eigenschappen van de betonspecie zoals de consistentie. De invloed verloopt via de hoeveelheid water die aan het mengsel moet worden toegevoegd om een bepaalde consistentie te bereiken.

3.3.1 Waterbehoefte

Uitgangspunt is een mengsel van cement, zand en grind. Door aan dit mengsel water toe te voegen krijgen de korrels bewegingsvrijheid, omdat het onderlinge contact verdwijnt. Hoe meer water wordt toegevoegd, des te groter de afstand en des te meer bewegingsvrijheid de korrels hebben. Hierdoor kan het mengsel zich gemakkelijker verdichten en de overtollige lucht kwijtraken.



Figuur 3.17 Water geeft de korrels bewegingsvrijheid omdat het contact tussen de korrels verdwijnt.

Een mengsel dat verdicht wordt in een stenenpers zal andere eisen stellen aan de bewegingsvrijheid van de korrels dan een mengsel dat op de bouwplaats verdicht wordt met een trilnaald. De verwerker van de betonspecie brengt dit tot uitdrukking in de gespecificeerde consistentie, feitelijk een maat voor de bewegingsvrijheid van de korrels.

Grofweg is de relatie zo dat hoe hoger de consistentie die benodigd is, des te meer water aan het mengsel moet worden toegevoegd. De hoeveelheid water die nodig is om een bepaalde consistentie te bereiken, duiden we aan als de waterbehoefte van het mengsel.

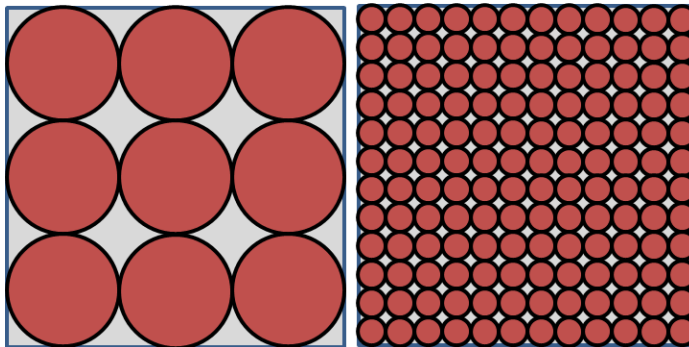
Bij voorkeur moet de waterbehoefte zo laag mogelijk zijn. Dit voorkomt problemen zoals ontmenging.

3.3.2 Invloed korrelgrootte

De korrelgrootte heeft via een aantal eigenschappen van het toeslagmateriaal invloed op de waterbehoefte.

3.3.2.1 Invloed korrelgrootteverdeling

Een bepaald volume wordt gevuld met alleen grote korrels en een zelfde volume met alleen kleine korrels. In het tweede geval zal het totale buitenoppervlak van alle korrels groter zijn. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat kleine korrels relatief een groter buitenoppervlak hebben ten opzichte van het volume dat ze innemen dan grote korrels.



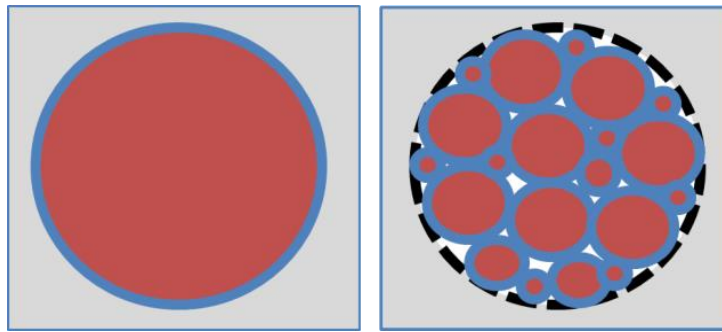
Figuur 3.18 Vulling van een zelfde volume met korrels met een kleinere diameter zorgt voor een groter oppervlak.

Het verschil is eenvoudig af te leiden uit de verhouding tussen het oppervlak en het volume van een bol met diameter d .

$$\text{Oppervlak per volume van een bol} = \frac{\pi \times d^2}{\frac{1}{6} \times \pi \times d^3} = \frac{6}{d}$$

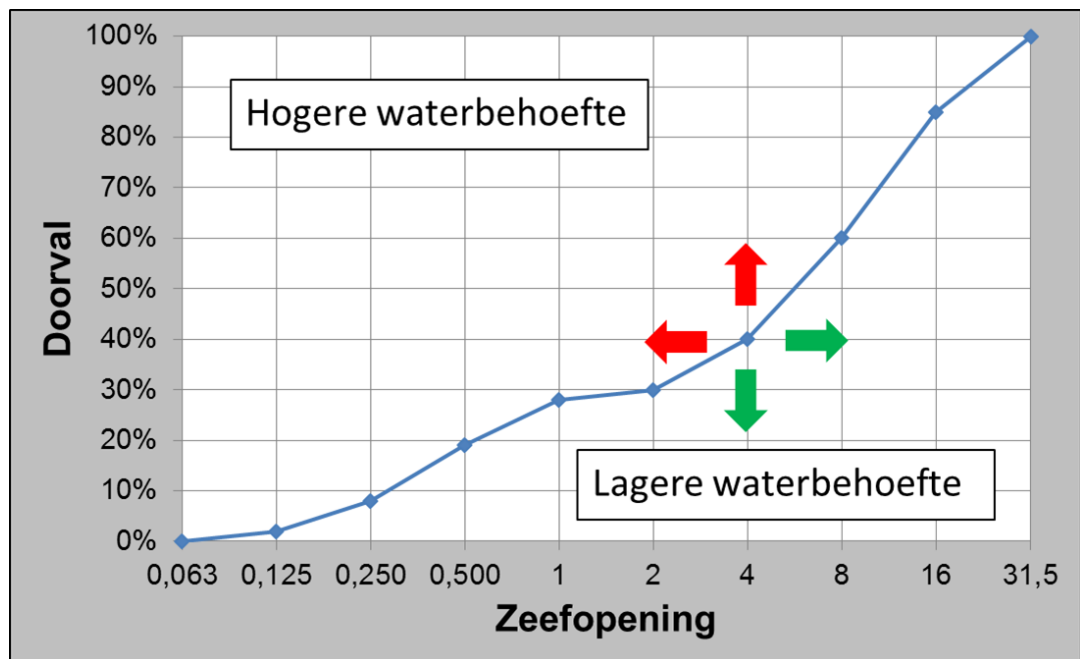
Hoe kleiner de diameter van de korrel d , des te groter het oppervlak per volume wordt en omgekeerd.

Het gevolg is dat wanneer grote korrels vervangen worden door kleine, het oppervlak per volume toeneemt waardoor meer water benodigd is voor het bereiken van dezelfde consistentie, oftewel de waterbehoefte neemt toe. Andersom geldt dat als kleine korrels vervangen worden door grote korrels minder water benodigd is, oftewel de waterbehoefte neemt af.



Figuur 3.19 Het vervangen van een grote korrel door kleine korrels zorgt voor een hogere waterbehoefte.

De verdeling tussen de hoeveelheid grote korrels en kleine korrels komt tot uitdrukking in de korrelgrootteverdeling. In figuur 3.20 is grafisch de korrelgrootteverdeling van een willekeurig mengsel weergegeven. Naarmate de korrelgrootteverdeling omlaag en/of naar rechts beweegt (groene pijlen) neemt het aandeel grotere korrels ten opzichte van fijnere korrels toe en dus wordt de waterbehoefte lager. Omgekeerd wordt de waterbehoefte hoger naarmate de lijn omhoog en/of naar links beweegt (rode pijlen). Dit geldt voor de korrelgrootteverdeling van het mengsel, maar ook voor de korrelgrootteverdelingen van het fijne en grove toeslagmateriaal afzonderlijk.



Figuur 3.20 Invloed van de korrelgrootteverdeling op de waterbehoefte.

3.3.2.2 Invloed korrelgroep

Uit het voorgaande volgt direct ook dat zo grof mogelijke korrelgroepen moeten worden gehanteerd om de laagste waterbehoefte te kunnen krijgen. Een 0/4 heeft een lagere waterbehoefte dan een 0/2 of een 0/1. Een 4/32 heeft een lagere waterbehoefte dan een 4/16 of 2/8.

Van sommige materialen, zoals de lichtgewicht materialen en materialen uit landen die een andere serie tussenzeven (set 2) gebruiken, zijn alleen korrelgroepen met een afwijkende D beschikbaar. Ook in dat geval moet om de laagste waterbehoefte te krijgen gekozen worden voor een korrelgroep met een zo groot mogelijke D .

Wel moet er rekening mee gehouden worden dat er vanuit het oogpunt van de verwerking een D_{\max} gespecificeerd kan zijn. Bijvoorbeeld vanwege de afmetingen van het product of de dichte wapeningsconcentratie in de mal. Daarmee moet dan wel rekening worden gehouden.

3.3.2.3 *Invloed zeer fijn materiaal < 0,063 mm*

Vooral in gebroken toeslagmaterialen kan relatief veel zeer fijn materiaal < 0,063 mm aanwezig zijn. De hoeveelheid die maximaal aanwezig kan zijn wordt door de producent opgegeven in de vorm van een klasse f_x (zie kader).

Hoeveelheid zeer fijn materiaal < 0,063 mm

De aanduiding bestaat uit de letter f en is een opgave van het maximale percentage dat gevonden wordt bij het bepalen van de korrelgrootteverdeling volgens de zeefmethode (doorval bij zeefopening 0,063 mm). De standaard indeling van de klassen is als volgt:

Grof toeslagmateriaal: $f_{1,5}, f_4$

Fijn toeslagmateriaal: $f_3, f_{10}, f_{16}, f_{22}$

Natuurlijk gegradeerd: f_3, f_{10}, f_{16}

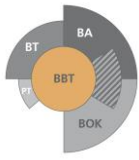
All-in: f_3, f_{11}

Maar het kan ook zijn dat de producent een andere waarde opgeeft, bijvoorbeeld f_{50} . In een dergelijk toeslagmateriaal zou dus tot 50% zeer fijn materiaal < 0,063 mm aanwezig kunnen zijn.

Er is geen beperking in de klassen die mogen worden toegepast in beton. Echter, uit het streven om de waterbehoefte zo laag mogelijk te houden volgt ook direct dat de hoeveelheid korrels kleiner dan 0,063 mm beperkt moet blijven. Deze korrels hebben immers het grootste oppervlak ten opzichte van hun volume. Gebruik van $f_{1,5}$ voor grof toeslagmateriaal en f_3 voor fijn toeslagmateriaal heeft dus vanuit het oogpunt van de waterbehoefte de voorkeur.

Naast de hoeveelheid zeer fijn materiaal is ook de kwaliteit van belang. Deze wordt als twee afzonderlijke eigenschappen bepaald en opgegeven.

1. De zand-equivalent geeft aan hoeveel sedimentair materiaal zich in een monster zand bevindt. Hoe hoger de waarde, uitgedrukt als SE_{xx} , des te meer sedimentair materiaal en des te minder klei, slib en andere zeer fijne deeltjes zich in het zand bevinden. De aanwezigheid van dergelijke deeltjes heeft een grote invloed op de waterbehoefte. In Nederland is daarom een ondergrens SE_{60} van toepassing (NEN 5905).
2. De methyleenblauwwaarde geeft aan hoeveel kleurstofoplossing door een monster toeslagmateriaal wordt geabsorbeerd. Hoe hoger de waarde, uitgedrukt als MB_{xx} , des te meer kleurstof is geabsorbeerd en des te meer zwellende klei in het materiaal aanwezig is. Indien zwellende klei aanwezig is, zal dit water vasthouden. Dit kan de waterbehoefte aanzienlijk verhogen. In plaats van de methyleenblauwwaarde te bepalen, wordt in Nederland gebruik gemaakt van een vaste hoeveelheid methyleenblauw ten opzichte van toeslagmateriaal waarna goedkeur (krans aanwezig) of afkeur (geen krans aanwezig) volgt.



3.3.3 Invloed korrelvorm

De vorm van de korrels heeft invloed op de hoeveelheid oppervlak van de korrels ten opzichte van het volume dat ze innemen en dus op de waterbehoefte. Vaak kan de vorm visueel al redelijk goed worden ingeschat. Grind en kunstmatig vervaardigde korrels zullen over het algemeen ongebroken zijn. Het kan echter zijn dat een gedeelte gebroken korrels is toegevoegd. Dit zijn dan over het algemeen zeer grote korrels die gebroken zijn tot de gewenste korrelgrootte. Groevematerialen en gerecycled toeslagmateriaal zijn gewoonlijk volledig gebroken.

In het algemeen geldt dat hoe hoger het aandeel gebroken korrels, des te hoger de waterbehoefte.

3.4 De verhouding tussen de korrels

Als de toe te passen materialen zijn geselecteerd dan moet de verhouding worden vastgesteld. In deze paragraaf wordt ingegaan op de verhouding tussen de verschillende korrels die benodigd is om een bepaalde consistentie te krijgen. Nadrukkelijk wordt erop gewezen dat het hierbij nog niet om een mengselontwerp gaat. Bij het mengselontwerp wordt rekening gehouden met alle specificaties, dus bijvoorbeeld ook sterkte en duurzaamheid. Hier alleen met de consistentie.

Het is in deze fase niet van belang een onderscheid te maken tussen korrels die wel of niet met water reageren. Ook is het niet van belang of een korrel afkomstig is uit het fijne of uit het grove toeslagmateriaal. Daarom wordt de volgende indeling van de korrels gehanteerd om de verschuiving in de onderlinge verhouding te kunnen weergeven:

- grove korrels: alle korrels die op zeefopening 4 blijven liggen;
- fijne korrels: alle korrels die door zeefopening 4 vallen, maar op zeefopening 0,125 blijven liggen;
- poeder: alle korrels die door zeefopening 0,125 vallen, dus inclusief cement en type II vulstoffen.

3.4.1 Optimale pakking – minimale waterbehoefte

De eerste benadering voor het bepalen van de verhouding is die van de optimale pakking. Deze sluit aan bij het minimaliseren van de waterbehoefte. Uitgangspunt is zoveel mogelijk grove korrels toe te passen. Hieraan worden vervolgens zo min mogelijk fijne korrels en poeder toegevoegd om het oppervlak per volume laag te houden. Voor deze benadering is een nieuwe eigenschap van de korrels nodig: het gehalte aan holle ruimten.

3.4.1.1 *Gehalte aan holle ruimten en pakking*

Wanneer een glazen cilinder wordt gevuld met korrels, dan blijft tussen de korrels een hoeveelheid ruimten achter. Deze ruimten duiden we aan als holle ruimten.



Figuur 3.21 Glazen cilinder gevuld met grind: tussen de korrels bevinden zich holle ruimten.

Het is mogelijk uit te rekenen hoeveel holle ruimten zich tussen de korrels bevinden.

Uitgangspunt hiervoor is een blok materiaal van 1 m^3 met een oven-droge dichtheid ρ_{rd} van 2650 kg/m^3 . Dit blok weegt dus 2650 kg . Met behulp van een breker wordt het blok tot korrels gebroken. Wanneer vervolgens een vat van 1 m^3 gevuld wordt met de korrels dan zal blijken dat niet alle korrels hierin passen. Ook blijkt dat de korrels in het vat geen 2650 kg meer wegen, maar een stuk minder, bijvoorbeeld 1590 kg .

Het verschil in gewicht tussen het massieve blok en de korrels in het vat is een maat voor de hoeveelheid holle ruimten. Immers het lagere gewicht wordt veroorzaakt door de aanwezige lucht. Van het oorspronkelijke blok is $(1590 / 2650) \times 100\% = 60,0\%$ als korrels in het vat gegaan. Dit percentage wordt de pakking genoemd. De rest van het vat is gevuld met lucht. Dit is dus $100\% - 60,0\% = 40,0\%$. Dit percentage staat bekend als het percentage aan holle ruimten. Het kan worden berekend uit de volgende formule:

$$v = \frac{\rho_{rd} - \rho_b}{\rho_{rd}} \times 100\% \quad [\%]$$

waarin:

v = percentage holle ruimten;

ρ_{rd} = dichtheid van het materiaal waaruit de korrels bestaan in kg/m^3 ;

ρ_b = dichtheid van het onverdichte materiaal in kg/m^3 .

In deze formule wordt gebruik gemaakt van een nieuwe eigenschap van het toeslagmateriaal, namelijk de dichtheid van het onverdichte materiaal (zie kader).

Dichtheid van het onverdichte (losgestorte) materiaal (ρ_b)

Het gewicht dat een bepaald volume aan korrels inneemt, inclusief de lucht die zich daartussen bevindt, staat bekend als de dichtheid van het onverdichte materiaal. Het wordt bepaald door een vat met een vast volume volledig te vullen met korrels. Vanwege het wandeffect dient een groter volume te worden gekozen naarmate de korrelgrootte toeneemt. In de norm wordt een vat voorgeschreven met een inhoud van 1 liter voor fijn toeslagmateriaal, een vat van 5 liter voor korrelgroepen met een D_{max} van 16 en een vat van 10 liter voor korrelgroepen met een D_{max} van 32. De dichtheid van het onverdichte materiaal wordt berekend door de massa van de korrels in het vat te delen door het volume van het vat.

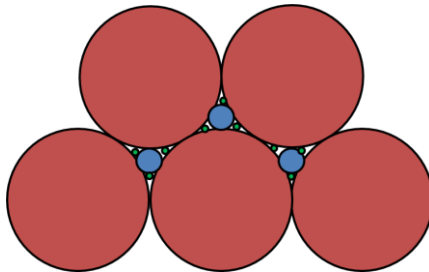
De dichtheid van het onverdichte materiaal ρ_b is geen vaste eigenschap van een materiaal, maar verandert afhankelijk van de korrelgrootteverdeling en de korrelvorm. De dichtheid van het onverdichte materiaal ρ_b bedraagt voor grind met een ovendroge dichtheid ρ_{rd} van 2650 kg/m^3 ongeveer 1700 kg/m^3 . Dit betekent dat zich $(2650 - 1700)/2650 \times 100\% = 35,8\%$ holle ruimten tussen de grindkorrels bevindt.

Er zal een bepaalde hoeveelheid fijne korrels moeten worden toegevoegd om deze holle ruimten tussen de grove korrels op te vullen. De vraag is nu hoeveel dit moet zijn.

3.4.1.2

Dichtste korrelstapeling

Doelstelling van de dichtste korrelstapeling is de holle ruimten tussen de grove korrels zo goed mogelijk op te vullen met steeds fijnere korrels. Hierdoor blijft het oppervlak per volume zo klein mogelijk en is dus de waterbehoefte het laagst.



Figuur 3.22 Fijne korrels passen in de holle ruimten tussen de grove korrels.

Uitgangspunt is dat een bepaald volume, bijvoorbeeld 1 m^3 eerst gevuld wordt met grove korrels. Hiervoor worden korrels in de fractie 16/32 gekozen, omdat deze de kleinste bijdrage leveren in het oppervlak per volume. Vervolgens worden de holle ruimten gevuld met fijnere korrels. Rekenkundig is af te leiden dat de diameter d van deze korrels ongeveer $7x$ zo klein moet zijn. Dit betekent dat aan de fractie 16/32 korrels uit de fractie 2/4 moeten worden toegevoegd. Om vervolgens de ruimten tussen deze korrels op te vullen is een fractie $0,250/0,500$ benodigd. Met zeer fijne korrels kleiner dan $0,063$, oftewel poeder, en het water kunnen vervolgens de overgebleven holle ruimtes worden opgevuld.

De onderlinge verhouding tussen de fracties kan worden berekend als de dichtheid van het onverdichte materiaal (ρ_b) en de ovendroge dichtheid (ρ_{rd}) van de fracties bekend zijn. Zie het rekenvoorbeeld dichtste korrelstapeling.

Rekenvoorbeeld dichtste korrelstapeling

Gegeven: fractie 16/32, fractie 2/4 en fractie 0,250/0,500. Voor alle fracties geldt dat $\rho_b = 1500 \text{ kg/m}^3$ en $\rho_{rd} = 2650 \text{ kg/m}^3$

Hoeveel procent lucht blijft over als een volume van 1 m^3 zo ideaal mogelijk gevuld wordt met de verschillende fracties, ervan uitgaande dat de korrels binnen een fractie allemaal dezelfde grootte hebben.

$1 \text{ m}^3 = 1000$ liter en kan dus 1500 kg van de fractie 16/32 bevatten

Overgebleven holle ruimten: $(2650 - 1500)/2650 \times 100\% = 43,4\% = 0,434 \text{ m}^3$

In deze ruimten past $0,434 \text{ m}^3 \times 1500 \text{ kg/m}^3 = 651 \text{ kg}$ van de fractie 2/4

Overgebleven holle ruimten: $43,4\% - ((651/2650) \times 100\%) = 43,4\% - 24,6\% = 18,8\%$

In deze ruimten past $0,188 \text{ m}^3 \times 1500 \text{ kg/m}^3 = 282 \text{ kg}$ van de fractie 0,250/0,500

Overgebleven holle ruimten: $18,8\% - ((282/2650) \times 100\%) = 18,8\% - 10,6\% = 8,2\%$

Er blijft nog 8,2% lucht, dus 82 liter over om te vullen met poeder en water.

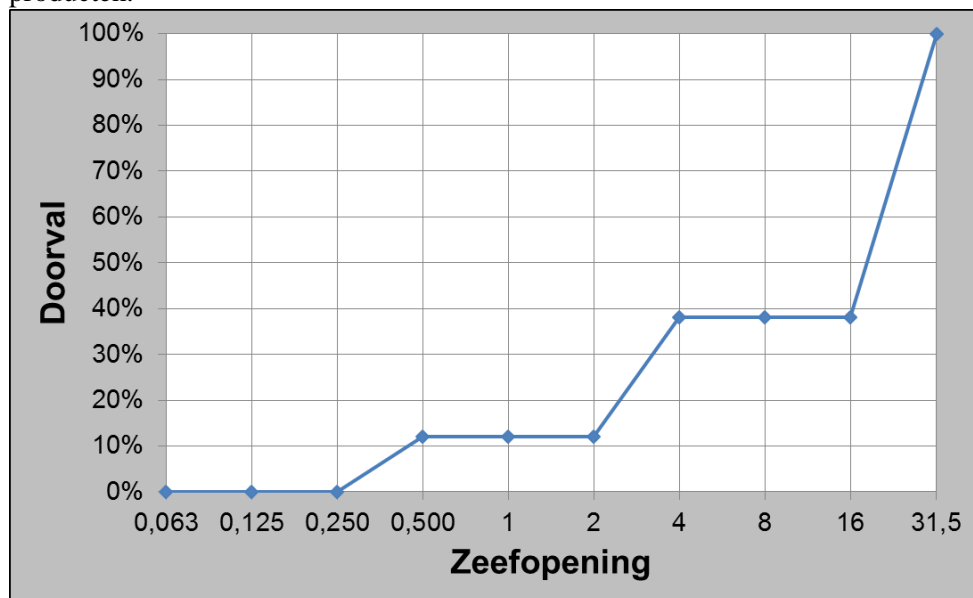
Procentuele verhouding tussen de fracties:

16/32: $1500 / (1500 + 651 + 282) \times 100\% = 62\%$

2/4: $651 / (1500 + 651 + 282) \times 100\% = 27\%$

0,250/0,500: $282 / (1500 + 651 + 282) \times 100\% = 11\%$

Een korrelgrootteverdeling zoals in bovenstaand voorbeeld, waarin niet alle fracties aanwezig zijn (er zijn bijvoorbeeld geen korrels tussen de 4 en 16), wordt aangeduid als een discontinue korrelgrootteverdeling. Voor sommige toepassingen kan het wenselijk zijn een korrelgrootteverdeling op deze wijze samen te stellen. Een voorbeeld zijn uitgewassen producten.



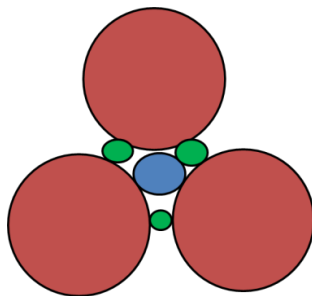
Figuur 3.23 Discontinue korrelgrootteverdeling.

Er is echter een groot praktisch bezwaar tegen het samenstellen van de korrelgrootteverdeling op deze wijze. Korrels worden gewoonlijk niet geleverd in afzonderlijke fracties en zeker niet met een bepaalde grootte, maar als korrelgroepen bestaande uit korrels met verschillende groottes.

3.4.1.3 'Particle interference'

De dichtste korrelstapeling is gebaseerd op het feit dat de fijne korrels 7 keer zo klein zijn als de grove korrels en daardoor precies in de holle ruimten passen. In de praktijk zullen de korrels echter onderling niet allemaal een factor 7 in grootte verschillen. Gevolg is dat de korrels niet allemaal in de openingen passen tussen de andere korrels, maar dat korrels elkaar uit elkaar gaan drukken. Dit verschijnsel staat bekend als 'particle interference' (verstoring van korrels). Hierdoor wordt geen optimale pakking bereikt, maar een lagere waarde. Oftewel: er blijven meer holle ruimtes tussen de korrels achter die gevuld moeten worden.

Het rekenvoorbeeld voor de dichtste korrelstapeling is bij het optreden van 'particle interference' niet meer toepasbaar om het gehalte aan holle ruimten dat overblijft te berekenen.



Figuur 3.24 'Particle interference' – korrels drukken elkaar uiteen.

3.4.1.4 Bepalen van het gehalte aan holle ruimten

De hoeveelheid holle ruimten in een mengsel van fijne en grove korrels kan dus niet zonder meer worden berekend. Wel kan van dit mengsel de dichtheid van het onverdichte materiaal ρ_b worden bepaald. Hieruit kan dan het gehalte aan holle ruimten worden berekend. Door fijne korrels en grove korrels in verschillende verhoudingen met elkaar te mengen kan dan worden afgeleid bij welke verhouding tussen fijne en grove korrels het gehalte aan holle ruimten het laagst is. In het algemeen wordt het laagste gehalte aan holle ruimten bereikt wanneer het mengsel voor 1/3 uit fijne korrels bestaat en voor 2/3 uit grove korrels.

Het aandeel aan fijne korrels dat benodigd is om het laagste gehalte aan holle ruimten te bereiken, kan dus op basis van metingen worden vastgesteld. Er zijn ook verschillende computerprogramma's op de markt die kunnen uitrekenen bij welke combinatie van korrels het gehalte aan holle ruimten het laagst is, oftewel de pakking het hoogst. Dit zijn zogenaamde pakkingsmodellen. Deze maken gebruik van statistische vergelijkingen in combinatie met eerder verzamelde data. Het valt buiten het kader van deze opleiding om deze modellen hier te behandelen.

3.4.1.5 Ideale korrelgrootteverdeling: Fuller-kromme

Het is niet praktisch om voor iedere combinatie van fijne en grove korrels het laagste gehalte aan holle ruimtes te bepalen. Zeker niet omdat het gehalte aan holle ruimtes continu varieert, afhankelijk van de korrelgrootteverdeling en de korrelvorm van de korrels. De vraag kan beter gesteld worden welke korrelgrootteverdeling uiteindelijk het laagste gehalte aan holle ruimten oplevert. Dit is dan de na te streven ideale korrelgrootteverdeling. Hierbij wordt uitgegaan van een continue korrelgrootteverdeling, oftewel korrels uit alle verschillende fracties dienen aanwezig te zijn.

Begin vorige eeuw heeft een Amerikaan genaamd Fuller deze vraag beantwoord en een ideale korrelgrootteverdeling vastgesteld op basis van proeven. Aan de ideale korrelgrootteverdeling wordt voldaan als de korrelgrootteverdeling van alle korrels volgens de uitkomst van de volgende formule wordt samengesteld:

$$p\%(d) = 100\% \times \sqrt{\frac{d}{D_{\max}}}$$

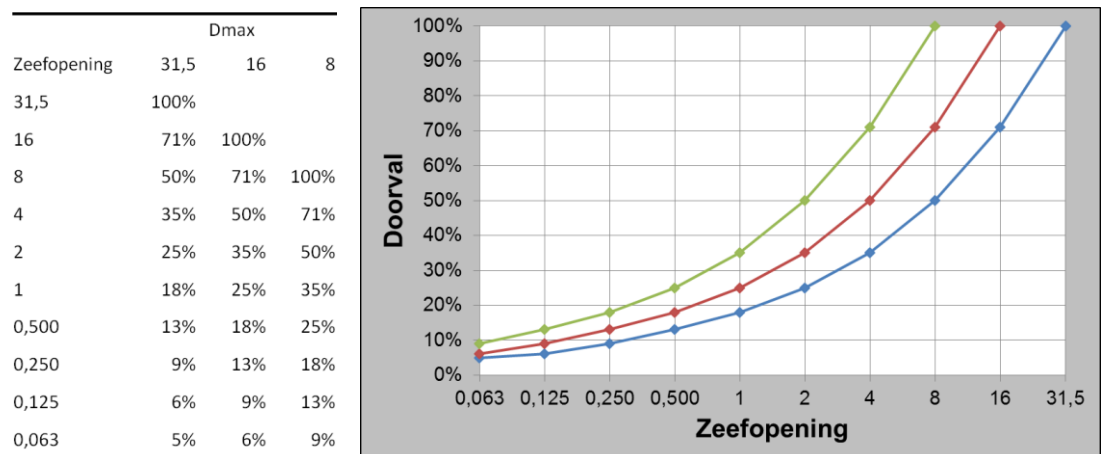
Waarin:

$p\%(d)$ = percentage doorval door zeefopening d ;

d = zeefopening;

D_{\max} = D van grofste korrelgroep.

Een korrelgrootteverdeling volgens deze formule wordt aangeduid als een Fuller-kromme en combineert voor de gekozen D_{\max} het laagste gehalte aan holle ruimten, met het kleinst mogelijke oppervlak per volume. Dit betekent dat zowel de kleinste hoeveelheid poeder als de kleinste hoeveelheid water benodigd is voor het bereiken van een bepaalde consistentie.



Figuur 3.25 Korrelgrootteverdelingen volgens Fuller voor D_{\max} van 31,5 - 16 en 8.

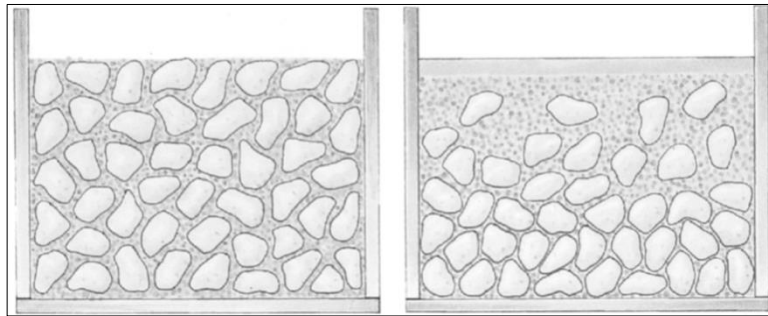
3.4.1.6 Stabiliteit van de betonspecie

De hoeveelheid water die wordt toegevoegd is niet alleen bepalend voor de consistentie, maar bepaalt tevens hoe stabiel de betonspecie blijft na het verdichten. Afhankelijk van de toegevoegde hoeveelheid water zijn er na het verdichten drie mogelijkheden die er met betrekking tot de stabiliteit uitspringen.

1. Als aan de korrels slechts weinig water is toegevoegd en er tijdens het verdichten veel verdichtingsenergie is toegepast, dan zijn de korrels na het verdichten slechts gescheiden door een dun laagje water. De aantrekkingskrachten tussen de korrels die hierdoor ontstaan zijn zo groot dat de betonspecie direct na het trillen al over een zekere sterkte beschikt, de zogenaamde groene sterkte. Als gevolg van de groene sterkte is het mogelijk het product direct na het verdichten reeds te ontkisten. Voorbeelden van toepassingen zijn de productie van stenen, blokken, tegels en banden.
2. Als aan de korrels veel water is toegevoegd dan kan het zijn dat de korrels na het verdichten niet al het water meer aan hun oppervlak kunnen houden. Het relatief lichte

water zal dan langs de korrels naar boven gaan bewegen. Dit verschijnsel staat bekend als "bleeding". Het optreden van bleeding kan gunstig zijn, omdat het uitdroging van betonspecie voorkomt.

3. Als aan de korrels heel veel water is toegevoegd, dan kan het zijn dat de korrels na het verdichten nog bewegingsvrijheid hebben. De relatief zware grote korrels zullen naar beneden bewegen en het lichte water en de fijnste korrels naar boven. Dit verschijnsel staat bekend als segregatie of ontmenging. Het is vooral belangrijk met dit verschijnsel rekening te houden wanneer lichte of zware korrels worden toegepast.



Figuur 3.26 Niet ontmengde en ontmengde betonspecie.

Het optreden van segregatie is een probleem omdat het beton niet homogeen van samenstelling meer is en moet dus te allen tijde worden voorkomen.

3.4.1.7 *Inzetbaarheid Fuller-kromme inclusief poeder*

Het samenstellen van een mengsel op basis van de Fuller-kromme leidt tot mengsels met relatief weinig poeder. Aan een dergelijk mengsel kan slechts weinig water worden toegevoegd vanwege het grote risico op ontmengen. De consistentie is dus laag. Er zal zeer veel verdichtingsenergie moeten worden ingezet om het mengsel te verdichten. Dit is typerend voor het soort mengsel dat gebruikt wordt voor aardvochtige betonproducten, zoals straatstenen, tegels, blokken. Wel geldt voor dergelijke producten vaak dat relatief meer fijne korrels en minder grove korrels worden toegepast dan volgens de Fuller-kromme nodig is vanwege de relatief geringe afmetingen van het product en het uiterlijk.

Wanneer de hoeveelheid poeder en water samen niet voldoende zijn om de holle ruimten te vullen tussen de fijne en grove korrels, dan zullen na het verdichten holle ruimten achterblijven. Deze kans is groter naarmate minder water, dus meer verdichtingsenergie wordt toegepast. Ook neemt de kans op holle ruimten toe door de verschuiving van grove naar fijne korrels. Veel aardvochtige producten bevatten dan ook holle ruimten. De gevolgen zijn behandeld bij de invloed van de korrels op verhard beton.

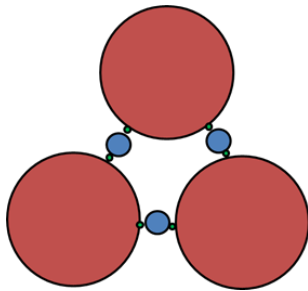
De Fuller-kromme inclusief het poeder is als gevolg van het risico op ontmenging niet toepasbaar voor mengsels met een gemiddelde of hoge consistentie.

3.4.2 Traditioneel beton

Voor betonspecie die alleen met behulp van trillen wordt verdicht, is een betere verwerkbaarheid nodig, in de vorm van een hogere consistentie, terwijl het mengsel stabiel blijft. Dit kan niet worden bereikt door aan een mengsel volgens de Fuller-kromme alleen maar meer water toe te voegen.

3.4.2.1 *Invloed van fijne korrels op de verwerkbaarheid*

Gelukkig kan naast het toevoegen van meer water nog van een ander effect gebruik worden gemaakt om de korrels meer bewegingsvrijheid te geven. Wanneer zich namelijk tussen de grovere korrels, fijnere korrels bevinden dan kunnen de grovere korrels gemakkelijker langs elkaar bewegen. Dit effect wordt in het algemeen aangeduid als het 'kogellagereffect'. Het kan worden benut door de verhouding van de grove korrels, de fijne korrels, en het poeder ten opzichte van elkaar te variëren.



Figuur 3.27 Schematische weergave 'kogellagereffect' fijne korrels.

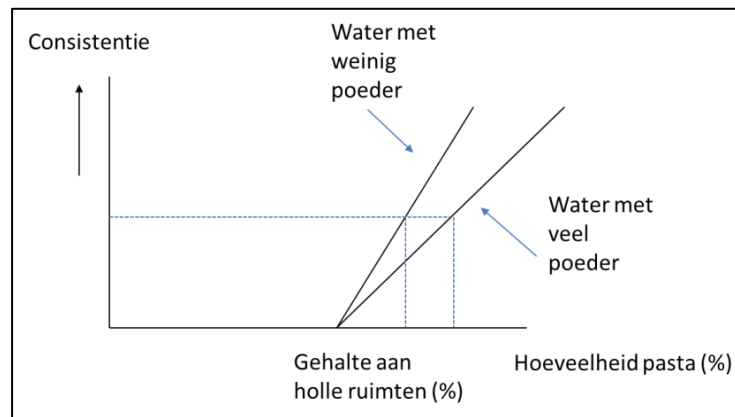
Door het 'kogellagereffect' is relatief minder water benodigd om een bepaalde consistentie te bereiken dan normaal nodig geweest zou zijn. Dit water kan tevens door de grotere hoeveelheid fijne korrels en poeder beter worden vastgehouden. Het voordeel is dus dat zeer hoge consistenties kunnen worden bereikt, terwijl het mengsel niet ontmengt.

N.B. Om het 'kogellagereffect' van poeders volledig te benutten moet gebruik worden gemaakt van een hulpstof, namelijk een plastificeerder of een superplastificeerder. Dit wordt in hoofdstuk 5 behandeld.

Het nadeel is dat niet langer gebruik kan worden gemaakt van de optimale pakking als benaderingswijze. Om de verhouding tussen grove korrels, fijne korrels, poeder en water vast te stellen is dus een nieuwe benaderingswijze nodig.

3.4.2.2 *Invloed poeder en water op de consistentie*

De grove en fijne korrels blijven in eerste instantie onderling verdeeld volgens de Fuller-kromme, omdat dit het laagste oppervlak per volume oplevert. Om de gewenste consistentie te bereiken, terwijl het mengsel stabiel blijft, worden ten opzichte van de hoeveelheid grove en fijne korrels, de hoeveelheid poeder en water tegelijk verhoogd. Voor het gemak worden deze vanaf nu gezamenlijk aangeduid als de pasta. De vraag is nu hoeveel pasta moet worden toegevoegd om een bepaalde consistentie te bereiken.



Figuur 3.218 Relatie tussen hoeveelheid pasta en de consistentie, rekening houdend met het gehalte aan holle ruimten en de hoeveelheid poeder.

De minimale hoeveelheid pasta die moet worden toegevoegd, is gelijk is aan het gehalte aan holle ruimten dat achterblijft tussen de grove en fijne korrels. Hiermee wordt bereikt dat na het verdichten geen holle ruimten achterblijven. Echter er is dan nog lang niet voldoende consistentie om het mengsel door middel van trillen te kunnen verdichten.

Bij een verdere toename in de hoeveelheid pasta zal de consistentie gelijkmatig gaan toenemen. Als immers de hoeveelheid pasta toeneemt, neemt automatisch de hoeveelheid water toe. Dit is geen probleem voor de stabiliteit, omdat tegelijk met het water ook het aandeel aan poeder toeneemt. De juiste hoeveelheid pasta is bereikt als het mengsel de gewenste consistentie heeft. Hoe hoger de gewenste consistentie, des te groter de hoeveelheid pasta die moet worden toegevoegd.

Er speelt echter nog iets. De pasta bestaat namelijk voor een gedeelte uit poeder en het andere gedeelte uit water. Hoe meer water de pasta bevat, des te sneller zal de consistentie toenemen als meer pasta wordt toegevoegd. Er is immers meer water ten opzichte van de korrels aanwezig. Andersom geldt dat des te minder water de pasta bevat, des te trager zal de consistentie toenemen. Er is immers minder water ten opzichte van de korrels aanwezig.

Het voorgaande laat zich als volgt vertalen naar een praktisch systeem. Voor een bepaalde consistentie is een hoeveelheid water nodig, aangeduid als de waterbehoefte. Wanneer hier meer of minder poeder aan wordt toegevoegd dan zal de consistentie min of meer gelijk blijven omdat de afname of toename in poeder zorgt voor de respectievelijke afname of toename in de hoeveelheid pasta. Dit betekent dat de hoeveelheid water de consistentie bepaald en de hoeveelheid poeder daarbij feitelijk niet van belang is. Met dien verstande dat er wel een minimale hoeveelheid poeder nodig is om voldoende pasta te hebben om de holle ruimten te vullen.

3.4.2.3 Richtwaarden waterbehoefte

Uitgangspunt voor de waterbehoefte is een korrelgrootteverdeling volgens de Fuller-kromme zonder het poeder, dus alleen de korrels van 0,125 mm en groter. Uit ervaring blijkt dat bij een D_{\max} van 32 ongeveer 135 liter water per m^3 beton benodigd is om een mengsel te maken in consistentieklasse C0. Om een consistentieklasse hoger te komen is 15 liter water meer nodig: voor consistentieklasse C1 is dus 150 liter water per m^3 beton nodig. Voor elke volgende hogere consistentieklasse is steeds 15 liter water meer nodig.

Wanneer een kleinere D_{\max} wordt gebruikt, bijvoorbeeld 22 in plaats van 32, dan neemt het oppervlak per volume van de korrels toe. Er is dan meer water benodigd voor een gelijke consistentie. De toename blijkt ongeveer 5 liter per korrelgrootteverkleining te bedragen. Gecombineerd levert dit de volgende tabel voor de waterbehoefte, afhankelijk van D_{\max} en de beoogde consistentieklasse.

Tabel 3.9 Richtwaarden waterbehoefte in liters per m^3 betonspecie.

Consistentieklasse	D_{\max}				
	8	11	16	22	31,5
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

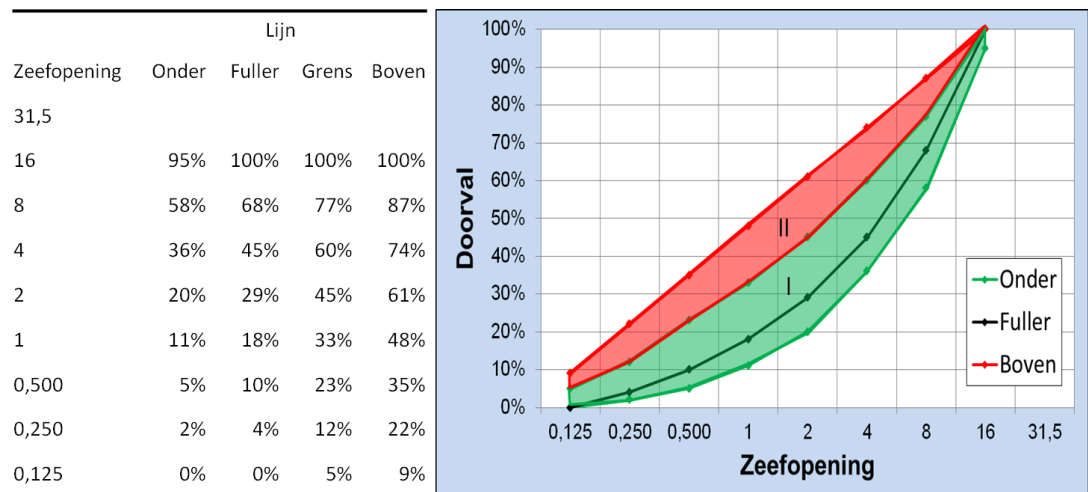
3.4.2.4 Ontwerpgebieden

Wat nu als de korrelgrootteverdeling afwijkt van de Fuller-kromme? Oftewel er heeft een verschuiving plaats tussen de grove korrels en de fijne korrels. Het blijkt dat als de korrelgrootteverdeling niet te ver afwijkt, de waterbehoefte van het mengsel gelijk blijft. Dit kan als volgt worden verklaard.

Als het mengsel meer grove korrels bevat dan uit de Fuller-kromme volgt, dan zal het oppervlak per volume van de korrels afnemen waardoor minder water benodigd is. Door de toename in holle ruimten, er zijn immers relatief te weinig fijne korrels, is echter meer water nodig. Beide effecten compenseren elkaar.

Als het mengsel meer fijne korrels bevat, dan zal het oppervlak per volume toenemen waardoor meer water benodigd is. Ook de holle ruimten zullen toenemen omdat het teveel aan fijne korrels de grove korrels uiteen drukt. Deze beide effecten worden gecompenseerd door het 'kogellager-effect': het teveel aan fijne korrels zorgt dat de grove korrels beter kunnen bewegen.

Dit alles komt tot uitdrukking in de zogenaamde ontwerpgebieden: per D_{\max} opgestelde gebieden voor de korrelgrootteverdeling waarbinnen een gelijke hoeveelheid water nodig is om een bepaalde consistentie te bereiken. Oftewel, waar de waterbehoefte constant blijft. De ontwerpgebieden bestaan uit een gebied I en II. Een korrelgrootteverdeling binnen gebied I betekent een waterbehoefte gelijk aan de richtwaarde. Een korrelgrootteverdeling binnen ontwerp gebied II betekent dat de waterbehoefte met 20 liter toeneemt ten opzichte van de richtwaarde. De oorzaak hiervan zijn het grotere oppervlak per volume en de grotere hoeveelheid holle ruimten. Het 'kogellagereffect' kan dit in ontwerpgebied II niet langer compenseren.



Figuur 3.229 Grenslijnen ontwerpgebied I (groen) en ontwerpgebied II (rood) voor $D_{max} = 16$, inclusief omgerekende Fuller-kromme.

3.4.2.5 *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 is, oftewel geen bol is, en dus zal de waterbehoefte toenemen. Daarnaast zullen de korrels wanneer zij niet rond zijn moeilijker langs elkaar bewegen. Om dit te compenseren is meer water nodig. Vooral indien de fijne korrels niet rond zijn zal dit de waterbehoefte flink verhogen. Hierbij speelt een rol dat het 'kogellager-effect' veel mindereffectief is wanneer de korrels gebroken zijn in plaats van rond.

De richtwaarden voor de waterbehoefte zijn richtwaarden gebaseerd op het gebruik van rond zand en rond grind.

Wanneer gebruik wordt gemaakt van gebroken toeslagmateriaal dan zal de richtwaarde voor de waterbehoefte als volgt stijgen.

- Indien grove korrels gebroken zijn in plaats van rond: + 5 liter.
- Indien fijne korrels gebroken zijn in plaats van rond: + 20 liter.

3.4.2.6 *Minimale hoeveelheid fijn < 0,250 mm*

De hoeveelheid poeder is tot nu toe nog niet aan bod gekomen omdat in deze benadering aangenomen wordt dat dit geen invloed heeft op de waterbehoefte. Het is echter wel belangrijk dat er minimaal zoveel poeder aanwezig is dat er geen holle ruimten overblijven na het verdichten. Dit heeft geleid tot een eis voor de hoeveelheid fijn < 0,250 mm dat minimaal in een mengsel aanwezig moet zijn. Hiertoe behoren het poeder en alle korrels die de zeefopening 0,250 mm passeren, dus ook een gedeelte van de fijne korrels.

Tabel 3.10 Minimale hoeveelheden fijn < 0,250 mm volgens NEN 8005.

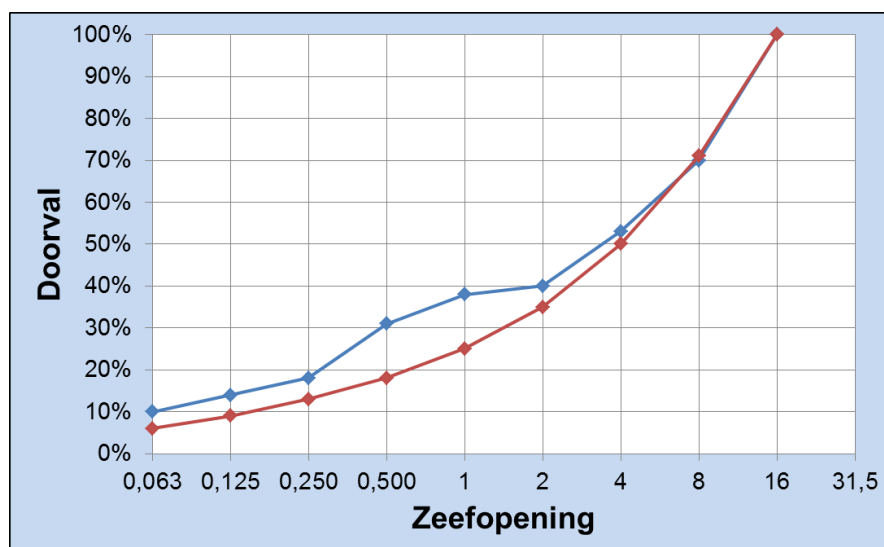
D_{\max}	Minimale hoeveelheid fijn < 0,250 mm (m^3 per m^3)
5,6	In onderling overleg
8	0,140
11,2	0,130
16	0,125
22,4	0,120
31,5	0,115
63	0,110

Aangezien de hoeveelheid holle ruimten tussen de korrels afneemt als D_{\max} groter wordt, neemt ook de benodigde minimale hoeveelheid fijn < 0,250 mm af als D_{\max} groter wordt.

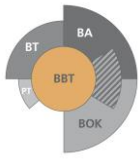
De hoeveelheid fijn < 0,250 mm is belangrijk voor de stabiliteit van het mengsel. Vooral bij het verpompen van betonspecie is dit van belang. Een mengsel dat verpompt wordt moet bij een D_{\max} van 32 mm minimaal 135 liter per m^3 fijn < 0,250 mm bevatten.

3.4.2.7 Inzetbaarheid methode waterbehoefte en minimale hoeveelheid fijn < 0,250 mm

Het samenstellen van mengsels op basis van een richtwaarde voor de waterbehoefte en een minimale hoeveelheid fijn < 0,250 mm leidt tot mengsels die duidelijk afwijken van de mengsels op basis van optimale pakking. Zo zijn er meer fijne korrels aanwezig en meer poeder en water. Gevolg is dat de consistentie hoger is en de kans op ontmenging kleiner. Dit maakt het mogelijk de mengsels middels trillen te verdichten. Tevens is het risico klein dat er na verdichten holle ruimten aanwezig zijn wat van belang is in verband met de duurzaamheid en de sterkte.



Figuur 3.230 Indicatie voor de verschuiving van de korrelgrootteverdeling ten opzichte van de Fuller-kromme wanneer op basis van de ontwerpgebieden en een minimale hoeveelheid fijn < 0,250 mm wordt ontworpen.



Het grote voordeel van het toepassen van deze benadering als ontwerpmethode is dat de verhouding tussen de hoeveelheden grof, fijn, poeder en water al min of meer vastliggen. Wel zal in de praktijk vaak blijken dat de werkelijke waterbehoefte iets afwijkt van de richtwaarde. Hiervoor zijn verschillende oorzaken aan te voeren zoals de invloed van de fijnheid en korrelvorm van het gebruikte poeder, en de exacte korrelgrootteverdeling en korrelvorm van het gebruikte toeslagmateriaal. Het is daarom verstandig van het ontworpen mengsel een proefmengsel aan te maken. Op basis van de gevonden consistentie kan dan de waterbehoefte worden bijgesteld.

Voor mengsels met een hogere consistentie, zoals consistentieklasse F4, loopt de waterbehoefte verder op en dus ook de hoeveelheid poeder die nodig is om het mengsel stabiel te houden. Dit kan worden voorkomen door het kogellager-effect van het poeder optimaal te gaan benutten en een superplastificeerder te gebruiken.

De met deze benadering ontworpen mengsels zijn geschikt voor betonspecie die door middel van trillen wordt verdicht. Voor zelfverdichtend beton is een afwijkende benadering benodigd. Dat wordt verder behandeld in de cursus Betontechnoloog [bte].

3.5 Achtergrondinformatie voor het berekenen van de mengverhoudingen

3.5.1 Inleiding

In de vorige paragraaf is ervan uitgegaan dat er een duidelijke scheiding is tussen grove korrels, fijne korrels, poeder en water. In de praktijk blijkt dit niet zo te zijn. Zo zullen de grove korrels met name afkomstig zijn uit het grove toeslagmateriaal, bijvoorbeeld grind, maar daarin kunnen zich ook fijne korrels en water bevinden. Voor de fijne korrels geldt dat deze met name afkomstig zijn uit het fijne toeslagmateriaal, maar daarin kunnen zich ook grovere korrels en water bevinden.

Om in het mengsel op de gewenste verhoudingen tussen grove korrels, fijne korrels en water uit te komen zullen dus een aantal berekeningen noodzakelijk zijn. Deze worden verder uitgewerkt in hoofdstuk 6 bij de mengselsamenstelling. Hier volgt enige achtergrondinformatie.

3.5.2 Samenstelling van het toeslagmateriaal

Voor het berekenen van de mengverhouding tussen de verschillende toeslagmaterialen, zal eerst vastgesteld moeten worden welke korrelgrootteverdeling wordt beoogd voor het mengsel. Dit kan bijvoorbeeld een korrelgrootteverdeling zijn volgens de Fuller-kromme om de hoogste pakking te krijgen. Dit kan ook de grenslijn zijn van ontwerpgebied I voor de betreffende D_{\max} om de laagste waterbehoefte te combineren met het hoogste gehalte aan fijn toeslagmateriaal. Het kan ook een willekeurige andere korrelgrootteverdeling zijn waarmee goede ervaring is opgebouwd. Over het algemeen voldoet voor traditionele betonmengsels de grenslijn voor ontwerpgebied I.

Gebruik van een "All-in" toeslagmateriaal

Het is mogelijk dat van het toe te passen toeslagmateriaal een zogenoemd "All-in" (categorie G_A) te krijgen is waarvan de korrelgrootteverdeling overeenkomt met de gewenste korrelgrootteverdeling voor het mengsel.

In dat geval hoeft alleen dit toeslagmateriaal in het mengsel te worden toegepast. Echter, vanwege de grote spreidingen in de korrelgrootteverdeling die voor korrelgroepen in deze categorie mogelijk zijn, is het gebruik ervan in constructief beton alleen toegestaan tot en met een sterkteklasse van C12/15. Voor niet-constructief beton is er geen beperking.

Combineren van fijn- en grof toeslagmateriaal

De korrelgrootteverdeling moet dus in de meeste gevallen worden samengesteld door fijn toeslagmateriaal te combineren met grof toeslagmateriaal. Bij voorkeur moeten dit twee aansluitende korrelgroepen zijn, zoals zand 0/4 en grind 4/32, zodat een zogenoemde continue korrelgrootteverdeling ontstaat. De korrelgrootteverdeling van beide korrelgroepen is bepalend voor de verhouding waarin ze aan het mengsel moeten worden toegevoegd. De berekeningen die nodig zijn om de onderlinge verhouding vast te stellen, volgen in hoofdstuk 6.

3.5.3 Verrekenen van het water in het toeslagmateriaal

Toeslagmateriaal wordt over het algemeen niet droog toegepast, maar nat en bevat dus een bepaalde hoeveelheid water. Met dit water moet rekening gehouden worden bij het vaststellen van de mengverhoudingen.

Aanhangend water

Tot nu toe is gesproken over de waterbehoefte van het mengsel. De waterbehoefte geeft aan, hoeveel water in totaal aan een droog mengsel moet worden toegevoegd om een bepaalde consistentie te bereiken. Bij het aanmaken van het mengsel is echter alleen van belang hoeveel water nog aan het mengsel moet worden toegevoegd, het zogenoemde aanmaakwater. Het water dat met het toeslagmateriaal mee wordt gedoseerd moet daarvoor op de waterbehoefte in mindering worden gebracht.

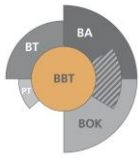
De hoeveelheid water in toeslagmateriaal wordt bepaald door een monster nat materiaal af te wegen (m_{nat}), vervolgens in een geventileerde oven tot een constante massa te drogen, en na afkoelen tot kamertemperatuur de droge massa te bepalen (m_{droog}). De hoeveelheid water ten opzichte van het droge materiaal wordt het watergehalte genoemd en berekend met behulp van de formule:

$$W = \frac{m_{\text{nat}} - m_{\text{droog}}}{m_{\text{droog}}} \times 100\% [\%]$$

Het watergehalte heeft echter betrekking op al het water weer in het toeslagmateriaal, dus ook op het water dat zich in de eventueel aanwezige voor water toegankelijke poriën bevindt. Het in deze poriën aanwezige water zal echter geen invloed hebben op de bewegingsvrijheid van de korrels en moet dus niet verrekend worden in de waterbehoefte. Het is daarom noodzakelijk een onderscheid te maken.

Het in de poriën aanwezige water duiden we aan als het absorptiewater. Het kan worden berekend met behulp van de waterabsorptie (WA_{24} voor normaal en zwaar toeslagmateriaal of W_F voor lichtgewicht toeslagmateriaal). De hoeveelheid absorptiewater is gelijk aan de droge massa van het toeslagmateriaal vermenigvuldigd met de waterabsorptie.

Het overige water duiden we aan als het 'aanhangend water'. Dit bevindt zich als een dun laagje over het oppervlak van de korrels. Het aanhangend water moet verrekend worden met de waterbehoefte.



In hoofdstuk 6 wordt verder uitgewerkt hoe de berekening wordt uitgevoerd.

Absorptie

Een bijzondere situatie, die zich met name voor kan doen bij lichtgewicht toeslagmateriaal, ontstaat indien het watergehalte van het toeslagmateriaal veel lager is dan de waterabsorptie. De voor water toegankelijke poriën zijn in dat geval slechts gedeeltelijk gevuld met water. Gevolg is dat de korrels water gaan absorberen wanneer zij in contact komen met het aanmaakwater.

Hiermee kan rekening worden gehouden door het te absorberen water als extra water aan het mengsel toe te voegen. Toch kan dit in de praktijk een probleem opleveren. Dat komt omdat voor de berekening de waterabsorptie na 24 uur wordt gebruikt. Vaak is beduidend minder tijd beschikbaar voor de absorptie en dus zal minder water worden geabsorbeerd dan berekend. Het kan zelfs voorkomen dat er helemaal geen water door de korrels wordt geabsorbeerd. In dat geval zijn de buitenste poriën gevuld met water en de binnenste (nog) niet. Gevolg is dat te veel water wordt toegevoegd aan het mengsel.

Een mogelijke oplossing is om het toeslagmateriaal uiterlijk 24 uur voor het gebruik te bevochtigen zodat het toeslagmateriaal geen water meer gaat absorberen bij het aanmaken van het mengsel.