

6 MENGSELONTWERP

In dit hoofdstuk wordt een eerste aanzet gegeven tot het berekenen van de samenstelling van beton gebaseerd op de eisen die aan de betonspecie (verwerkbaarheid) en het verharde beton worden gesteld.

Een en ander wordt weergegeven in een stappenplan waarmee elke stap in het berekeningsproces door middel van een voorbeeldberekening wordt ingevuld. De laatste stap bestaat uit de beoordeling van het resultaat van de berekening: voldoen de berekende waarde aan de eisen zoals die in de betonnorm NEN-EN 206 / NEN 8005 worden genoemd.

Uiteraard vormen ook de keuzes van de te gebruiken grondstoffen onderdeel van het stappenplan.

INHOUDSOPGAVE

Pag.

6.1	Eisen aan de betonsamenstelling	6-3
6.2	A. Inventarisatie eisen uit projectspecificatie en uitvoering.....	6-4
6.3	B. Keuze van de materialen.....	6-5
6.3.1	Interacties tussen grondstoffen	6-5
6.4	C. Berekenen van betonsamenstelling: grondslagen	6-5
6.4.1	Stappenplan voor het berekenen van betonsamenstellingen:	6-6
6.4.2	Voorbeeldberekening.....	6-6
6.4.2.1	Stap 1: Berekenen van de benodigde gem. betondruksterkte.....	6-7
6.4.2.2	Stap 2: Bepaling van de normsterkte van het toegepaste cement	6-8
6.4.2.3	Stap 3: Bereken van de ontwerp water-cementfactor.....	6-9
6.4.2.4	Stap 4: Bereken het toeslagmaterialenmengsel ('De korrel') ..	6-10
6.4.2.5	Stap 5: Controle ontwerpgebied.....	6-13
6.4.2.6	Stap 6: Bepaling van de waterbehoefte van het beton.....	6-14
6.4.2.7	Stap 7: Bereken cementgehalte uit waterbehoefte en wcf.....	6-14
6.4.2.8	Stap 8: Uitleveringsberekening (hier voor 1 m ³ beton).....	6-15
6.4.2.9	Stap 9: Opgave mengmeester.....	6-15
6.4.2.10	Stap 10: Controleberekeningen.	6-16

6.1 Eisen aan de betonsamenstelling

Bij het ontwerpen van betonsamenstellingen moet de betontechnoloog zich realiseren dat beton tussen de aanmaak van de betonspecie en de uiteindelijke functie van beton als bouw materiaal aan meerdere, soms moeilijk verenigbare, eisen moet voldoen.

In de eerste plaats zijn er de eisen vanuit regelgeving. Daarnaast stelt de verwerker zijn specifieke eisen en zijn er mogelijk beperkingen door de beschikbare materialen of de productie-unit.

De eisen en regels voor het produceren van beton zijn vastgelegd in de norm NEN-EN 206 'Beton'. In deze norm wordt op meerdere plaatsen verwezen naar lokale regelgeving. In Nederland is daarvoor NEN 8005 beschikbaar.

NEN-EN 206 en NEN 8005 dienen altijd gezamenlijk te worden gebruikt.

Deze normen gelden voor betonspecie die wordt gebruikt voor het vervaardigen van constructiedelen op een bouwplaats of in een fabriek. Voor veel betonnen producten, zoals straatstenen, tegels en rioolbuizen, bestaan specifieke productnormen. Deze productnormen worden in deze opleiding niet behandeld.

In verschillende normen worden eisen gesteld aan de grondstoffen voor beton, randvoorwaarden gegeven voor de betonsamenstelling en controlemethoden beschreven.

Beton(specie) wordt in normen ingedeeld in verschillende klassen:

- Milieuklassen: op basis van mogelijke aantastingsmechanismen bij verschillende omgevingsomstandigheden volgen hieruit randvoorwaarden voor de betonsamenstelling.
- Sterkteklassen: hieruit kiest de ontwerper de betonsterkte die voor de betreffende betonconstructie nodig is en berekent daarmee de verdere dimensionering (afmetingen, wapening, enz).
- Consistentieklassen: de benodigde verwerkbaarheid van betonspecie is afhankelijk van de wijze van verwerken en wordt door de uitvoerende partij bepaald.

Bij het berekenen van een betonsamenstelling voor een specifieke toepassing dient de betontechnoloog de meest optimale betonsamenstelling te ontwerpen die voldoet aan de verschillende eisen vanuit die toepassing en de eisen vanuit regelgeving. De mogelijkheden die hij daarbij heeft, worden mede bepaald door de beschikbare grondstoffen en de productiemogelijkheden.

Veel bedrijven maken gebruik van software voor het beheren van de gegevens van de aanwezige grondstoffen en het daaruit berekenen van een betonsamenstelling die voldoet aan vooraf ingevoerde criteria. In de praktijk komen handmatige berekeningen steeds minder voor. Echter, in bepaalde gevallen kan een handmatige berekening nog steeds nodig zijn, bijvoorbeeld ter controle of bij afwijkende producten.

Het blijft bovendien noodzakelijk dat de betontechnoloog weet wat er gebeurt in de 'black-box' van de software om onverwachte missers te herkennen.

In deze basis cursus behandelen we een globaal stappenplan voor het ontwerpen van betonsamenstellingen.

In de opleiding voor het deelcertificaat Betontechnoloog [*bte*] wordt dieper ingegaan op verschillende aspecten die een rol spelen bij het mengselontwerp en op mogelijkheden voor het ontwerpen van betonsamenstelling voor specifieke toepassingen en betonsamenstellingen met bijzondere eigenschappen.

Het is gebruikelijk de volgende stappen te doorlopen voor het ontwerpen van betonsamenstellingen:

- A. Inventarisatie eisen uit projectspecificatie en uitvoering;
- B. Keuze van de materialen;
- C. Berekening betonsamenstelling;

Hierna worden de verschillende stappen verder uitgewerkt.

6.2 A. Inventarisatie eisen uit projectspecificatie en uitvoering

We beginnen met het inventariseren van de aan betonspecie en beton gestelde eisen. Die eisen zijn te koppelen aan de eigenschappen in drie stadia of 'fasen'. Bij het mengselontwerp moet rekening worden gehouden met de eisen in elke van deze fasen.

Betonspecie: de fase na het mengen waarin transport, storten en verdichten plaatsvinden.

Dit stadium is vooral belangrijk voor de uitvoering. De uitvoering bepaalt ook meestal de consistentie(-klasse). Bij het opstellen van de eisen dient rekening te worden gehouden met bijvoorbeeld het gebruik van transportmiddelen zoals een betonpomp, de stortmethode, de wijze van verdichten, de wapeningsdichtheid, enzovoort.

Verhardend beton: in dit stadium spelen vooral eigenschappen als sterkteontwikkeling en warmteontwikkeling een belangrijke rol.

Verhard beton: met de eigenschappen in deze fase rekent de constructeur. Het gaat vooral om eigenschappen als sterkte en duurzaamheid. Deze eigenschappen zijn vrijwel altijd gekoppeld aan in de betonvoorschriften vastgelegde klassen en daarbij horende randvoorwaarden.

In hoofdstuk 2 is het 'specificeren van beton' behandeld.

Voor de berekening van de betonsamenstelling dienen tenminste de volgende gegevens bekend te zijn:

- de vereiste sterkteklasse;
- grootste korrelafmeting toeslagmateriaal;
- welke milieuklasse(n) is(zijn) van toepassing;
- in welke consistentieklasse ligt de verwerkbaarheid;
- maximaal gehalte aan chloriden

Vaak zijn er meer randvoorwaarden die samenhangen met de wijze van uitvoeren van het werk. Zowel het sterkteniveau als de milieuklasse is gekoppeld aan een grenswaarde voor de w/c-factor. Deze moet dus zowel aan het criterium voor sterkte als aan het criterium voor de milieuklasse voldoen. De basis voor het mengselontwerp ligt dus in de benodigde w/c-factor en de waterbehoefte.

De waterbehoefte van de betonspecie wordt vooral bepaald door de eigenschappen van het toeslagmateriaal (grootste korrelafmeting, korrelgrootteverdeling en korrelvorm) en de gewenste verwerkbaarheid. Daarnaast kunnen andere factoren een rol spelen zoals bijvoorbeeld cementsoort en -fijnheid en specietemperatuur.

6.3 B. Keuze van de materialen

Het mengselontwerp begint bij de selectie van grondstoffen. Daarbij moet rekening worden gehouden met de betonkwaliteiten die we willen gaan maken. Zo worden aan de grondstoffen voor hogesterktebeton andere eisen gesteld dan voor beton in normale sterkteklassen. Afhankelijk van de toepassing kunnen aanvullende eisen gelden aan bijvoorbeeld de ASR-gevoeligheid en het chloridegehalte. In de praktijk verschilt het grondstoffenpakket van productiepunt tot productiepunt waardoor een mengselontwerp voor dezelfde prestatie-eisen een heel andere betonsamenstelling kan opleveren. In veel gevallen blijft de keuze beperkt tot het lokaal aanwezige grondstoffenpakket. Dit kan een beperking betekenen voor de te vervaardigen betonkwaliteiten en/of betonsoorten.

Belangrijk is dat er een goed inzicht is in de eigenschappen van alle beschikbare grondstoffen. De omvang van dat pakket groeit immers nog steeds. Toeslagmateriaal bestaat allang niet meer uitsluitend uit rivierzand en –grind. Steeds vaker wordt een scala aan materialen en gesteenten gebruikt, rond, gebroken, licht of zwaar van diverse herkomst. Daarnaast zien we steeds meer gerecyclede materialen, vaak met specifieke eigenschappen en daarmee een specifiek toepassingsgebied. Het is de taak van de betontechnoloog de verschillende materialen zo effectief mogelijk in te zetten en zo ook het gebruik van schaarse primaire grondstoffen zoveel als mogelijk te beperken.

Op de eigenschappen van grondstoffen en de koppeling met de prestatie is uitgebreid ingegaan in hoofdstuk 3 'De korrel' en hoofdstuk 4 'De lijm'.

6.3.1 Interacties tussen grondstoffen

Naast de eigenschappen/prestaties van de afzonderlijke grondstoffen speelt ook de interactie tussen grondstoffen, anders gezegd de wijze waarop de verschillende grondstoffen samenwerken, een rol. Zo wordt de prestatie van veel hulpstoffen beïnvloed door de eigenschappen van het cement. Voor vertragende hulpstoffen is bijvoorbeeld de vertragende werking in combinatie met hoogovencement vaak langer dan bij portlandcement. De werking van een luchtbelvormer kan door in poederkoolvliegias aanwezig koolstof vrijwel teniet worden gedaan.

Deze interacties laten zich niet in universeel toe te passen regels vatten. De ervaring van de producent met het door hem gebruikte grondstoffenpakket is hier van doorslaggevende betekenis.

6.4 C. Berekenen van betonsamenstelling: grondslagen

Bij het ontwerpen van een betonsamenstelling worden in principe 'de korrel' (het toeslagmateriaal) en 'de lijm' (de cementpasta) gecombineerd. De eigenschappen van 'korrel' en 'lijm' en de manier waarop ze samenwerken, zijn bepalend voor sterkte en duurzaamheid van beton.

In hoofdstuk 3 'De korrel' is uitgebreid ingegaan op de selectie van het toeslagmateriaal en hoe de verschillende eigenschappen invloed hebben op het mengselontwerp en de eigenschappen van betonspecie en beton.

In hoofdstuk 4 'De lijm' is de werking van bindmiddelen en de rol van de verschillende componenten in bindmiddelen beschreven. In dit hoofdstuk is in paragraaf 4.6 nog apart ingegaan op de 'vulstoffen'. Vaak speelt de vulstof een gecombineerde rol omdat aan een deel van de vulstof een bindmiddelfunctie mag worden toegekend.

Toeslagmateriaal, bindmiddel en water zijn de belangrijkste componenten in beton. In de praktijk bestaat beton vrijwel altijd uit meer grondstoffen. In hoofdstuk 5 zijn een aantal 'toevoegingen' behandeld. Een scala aan hulpstoffen, vezels van staal en kunststoffen in allerlei vormen en afmetingen en pigmenten. Hiermee kunnen alle denkbare eigenschappen van betonspecie en verhard beton worden beïnvloed.

In deze basiscursus wordt daar niet in detail op ingegaan.

Wel wordt hierna als voorbeeld een mengselontwerp doorgerekend.

6.4.1 Stappenplan voor het berekenen van betonsamenstellingen:

Stap 1: Bereken de benodigde gemiddelde druksterkte uit de vereiste karakteristieke kubusdruksterkte.

Stap 2: Bepaal de normsterkte van het toegepaste cement

Stap 3: Bereken de ontwerp water-cementfactor

3-a Bepalen van de water-cementfactor op basis van sterkte

3-b Bepalen van de water-cementfactor op basis van duurzaamheid

3-c Bepalen van de maatgevende/ontwerp water-cementfactor.

Stap 4: Bereken de verhouding van het toeslagmaterialenmengsel

Stap 5: Controleer ontwerpgebied i.v.m. waterbehoefte.

Stap 6: Bepaal de waterbehoefte van het beton.

Stap 7: Bereken het cement-/bindmiddelgehalte uit de waterbehoefte en water-cementfactor. En controleer of dit gehalte voldoet aan de eis voor het minimale cement-/bindmiddelgehalte.

Stap 8: Uitleveringsberekening (berekenen van de hoeveelheden te doseren grondstoffen).

Stap 9: Opgave voor de mengmeester maken (berekenen van alle vochtcorrecties in het mengsel).

Stap 10: Controleberekeningen.

6.4.2 Voorbeeldberekening

Aan de hand van een voorbeeldberekening worden de opvolgende stappen doorlopen.

Dit voorbeeld betreft een mengselontwerp voor beton met de volgende specificaties:

- Sterkteklasse: C 30/37;
- Milieuklasse(n): XC4, XD1 en XS1: hieruit volgt de max. water-cementfactor, minimum cementgehalte en soms het minimum luchtgehalte; dit voorbeeld betreft de gevel van een gebouw aan de kust;
- Consistentieklasse S2: in dit voorbeeld passen we een superplastificeerder toe en rekenen met een waterreductie van 15 liter per m³;
- Gewapend beton: hiervoor geldt chlorideklasse: Cl 0,40;
- Beschikbaar cement: CEM III/A 42,5 N;

Toeslagmateriaal: fijn granulaat (zand) 0/4 en grof granulaat (rond grind) 4/16, korrelgrootteverdeling toeslagmaterialenmengsel in ontwerpgebied I.

6.4.2.1 *Stap 1: Berekenen van de benodigde gemiddelde betondruksterkte.*

Bij de berekening van het mengselontwerp wordt uitgegaan van een gemiddelde betondruksterkte. Als de eis een karakteristieke kubusdruksterkte (na 28 dagen verharding) betreft moet deze worden omgerekend naar de gemiddelde sterkte waarmee deze wordt bereikt. In de praktijk kunnen daarvoor statistische rekenmethoden worden gebruikt.

In deze cursus wordt de methode gebruikt, waarbij de bij het mengselontwerp na te streven gemiddelde sterkte wordt berekend door bij de karakteristieke kubusdruksterkte een vaste waarde van 8 N/mm^2 op te tellen.

Deze 'eenvoudige' benadering wordt overigens ook in de ontwerpvoorschriften (Eurocode NEN-EN 1992-1-1: EC2) gebruikt.

Tabel 6.1 *Aan te houden gemiddelde kubusdruksterkte.*

sterkteklasse	vereiste karakteristieke kubusdruksterkte $f_{ck,cube}$ [N/mm ²]	aan te houden gemiddelde kubusdruksterkte $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]
C 12/15	15	23
C 20/25	25	33
C 30/37	37	45

Dezelfde berekening kan ook worden uitgevoerd voor een mengselontwerp gericht op een 'vroeg betonsterkte'. Bijvoorbeeld om te kunnen ontkisten of voorspanning aan te brengen. Afhankelijk van de risico's kan daar in bepaalde gevallen ook weer een vaste waarde als marge bij worden opgeteld.

- *Voorbeeld: voor een sterkteklasse C 30/37 rekenen we met een gemiddelde kubusdruksterkte van 45 N/mm^2 .*

Let op: bij een betonsamenstelling die ingebrachte lucht (luchtpercentage > 2%) bevat moet de rekenwaarde voor de sterkte worden verhoogd om het door de lucht veroorzaakte sterkteverlies te compenseren. Elke % lucht boven de 2% levert een sterkteverlies van ca. 5%. Dit betekent dat bij bijvoorbeeld 3% lucht in het mengsel het sterkteverlies 5% is.

De benodigde gemiddelde sterkte van 45 N/mm^2 is in dat geval 95% van de oorspronkelijke sterkte. Bij een luchtgehalte (L) van 4% (= 2% boven de 2%) krijgen we de rekenwaarde voor de gemiddelde sterkte door de benodigde 45 N/mm^2 te delen door de factor $0,95^{(L-2)} = 0,95^2$.

Deze berekening levert een rekenwaarde voor de sterkte van $\frac{45}{0,95^2} = 49,9 \text{ N/mm}^2$.

6.4.2.2 *Stap 2: Bepaling van de normsterkte van het toegepaste cement*

Van het cement dat we willen toepassen moeten we de normsterkte kennen. We rekenen met de werkelijke, gemiddelde normsterkte.

Deze is hoger dan de waarde die is opgenomen als cementklasse en als minimumeis in de cementnorm EN 197-1 is vermeld. In onze berekening gebruiken we waarden zoals vermeld in tabel 6.2.

De gegevens zijn ontleend aan de productinformatie-bladen met langdurig gemiddelden van de cementleverancier.

Tabel 6.2 *Richtwaarden voor de gemiddelde normsterkte N van in Nederland veel gebruikte cementen.*

cementsoort	codering	normsterkte N (N/mm ²) na (j) dagen			
		1	2	3	28
portlandcement	CEM I 32,5 R	10	17	25	48
	CEM I 42,5 R	19	30	35	58
	CEM I 52,5 R	29	39	44	63
portlandvliegascement	CEM II/B-V 32,5 R	13	22	25	49
hoogoven-cement	CEM III/A 32,5 N	7	14	19	46
	CEM III/A 42,5 N	8	17	22	59
	CEM III/A 52,5 N	18	28	35	74
	CEM III/B 32,5 N	5	10	14	48
	CEM III/B 42,5 N	8	17	25	58

Rekenen met vroege sterkte

Als het mengselontwerp (ook) moet worden afgestemd op een eis voor de vroege sterkte moet men naast de benodigde gemiddelde betondruksterkte voor 28 dagen ook rekenen met de benodigde gemiddelde sterkte op dat moment. Dan moet ook de normsterkte van het cement op dat moment worden gebruikt. De productinformatie van veel cementproducenten vermeldt naast de 28-daagse normsterkte meestal ook de sterkte na 1, 2 en 7 dagen. Door zowel de waarde voor de eindsterkte als de waarde voor de gewenste vroege betonsterkte in de formule (zoals hierna in stap 3b uitgewerkt) in te voeren, kan de benodigde w/c-factor, waarmee aan beide eisen wordt voldaan, worden berekend.

Rekenen met cementmengsels

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

Als cementen worden gemengd mag de prestatie van het mengsel worden berekend naar rato van het aandeel van beide cementen in het mengsel. Indien bijvoorbeeld een cement met een normsterkte van 46 N/mm² na 28 dagen wordt gemengd met een cement met op datzelfde tijdstip een normsterkte van 63 N/mm² in een verhouding 80/20 dan wordt de normsterkte van het mengsel: $0,8 \times 46 + 0,2 \times 63 = 49,4$ N/mm².

Soms wordt ook gerekend met de bindmiddelbijdrage uit vulstoffen (bijv. poederkoolvliegias, gemalen gegraneleerde hoogovenslak, silica fume, enz.). Dit wordt verder uitgediept in de cursus Betontechnoloog [bte].

- In onze voorbeeldberekening is de **normsterkte N (na 28 dagen)** van het beschikbare cement CEM III/A 42,5N volgens de tabel 59 N/mm².

6.4.2.3 Stap 3: Bereken van de ontwerp water-cementfactor

Voor zowel de benodigde gemiddelde sterkte als milieuklasse wordt bekeken met welke water-cementfactor wordt voldaan aan de eisen. Met de laagste van de twee water-cementfactoren moet in het mengselontwerp worden gerekend.

Stap 3a: Bepaling van de water-cementfactor op basis van sterkte

Deze berekening wordt hier uitgevoerd voor een verhardingstijd van 28 dagen. Als er ook een eis voor vroege sterkte is (bijv. na j dagen) doen we dezelfde berekening. In dat geval is voor de sterkte de laagste waarde voor de w/c-factor maatgevend.

De relatie tussen de water-cementfactor, de normsterkte van het cement en de betondruksterkte kan in een formule worden vastgelegd. Voor verschillende cementen en verschillende omstandigheden (mengintensiteit, betonsamenstelling, eigenschappen overige grondstoffen) zal deze formule er anders uitzien. Veel producenten toetsen deze relatie regelmatig.

In deze basiscursus hanteren we de volgende formule:

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

waarin:

$f_{cm,j}$ = gemiddelde kubusdruksterkte in N/mm² na j dagen verharding;

N_j = normsterkte cement in N/mm² na j dagen (zie tabel 6.2)

Nu de benodigde gemiddelde kubusdruksterkte van het beton en de normsterkte van het cement bekend is, kan met deze formule de water-cementfactor worden berekend.

- Voorbeeld: indien het mengselontwerp een gemiddelde kubusdruksterkte van 45 N/mm² moet opleveren en de normsterkte van het gebruikte CEM III/A 42,5N (na 28 dagen) 59 N/mm² is, levert dit de volgende vergelijking:

$$45 = 0,8 \times 59 + \frac{25}{wcf} - 45$$

Hieruit kan de water-cementfactor worden berekend:

$$\text{Immers: } \frac{25}{wcf} = 45 - 0,8 \times 59 + 45 = 42,8 \rightarrow \text{wcf} = 25 / 42,8 = 0,58$$

Indien in hetzelfde voorbeeld (voor een gemiddelde druksterkte 45 N/mm²) een ander cement met lagere normsterkte zou worden toegepast:

bijvoorbeeld CEM II/B-V 32,5 R met normsterkte N = 49 N/mm² na 28 dagen dan zou de vergelijking er als volgt uitzien:

$$45 = 0,8 \times 49 + \frac{25}{wcf} - 45$$

De voor dit cement met lagere normsterkte berekende wcf = 0,47

Stap 3b: Bepaling van de water-cementfactor op basis van duurzaamheid

Welke water-cementfactor nodig is om aan de duurzaamheidseisen te voldoen, volgt uit de van toepassing zijnde milieuklassen. In dit voorbeeld zijn de milieuklassen XC4, XD1 en XS1 van toepassing.

In tabel 2.16 van hoofdstuk 2 kan worden uitlezen dat de maximaal toelaatbare wcf= 0,50 en het minimum cementgehalte 300 kg per m³ is. Voor het berekenen van de betonsamenstelling wordt de rekenwaarde voor de milieuklasse veiligheidshalve met een marge 0,02 verlaagd. (0,50 – 0,02 = 0,48)

Stap 3c: Bepaling van de ontwerp water-cementfactor.

In dit voorbeeld levert de water-cementfactor op basis van duurzaamheid de laagste waarde op (0,48 voor duurzaamheid versus 0,58 voor sterkte)

De laagste waarde wcf = 0,48 aanhouden in het verdere mengselontwerp als ontwerp water-cementfactor.

6.4.2.4

Stap 4: Bereken het toeslagmaterialenmengsel ('De korrel').

In hoofdstuk 3 is behandeld hoe verschillende korrelgroepen kunnen worden gecombineerd tot de gewenste korrelgrootteverdeling. De rekenwaarde (richtwaarde) voor de waterbehoefte in het mengselontwerp wordt afgeleid uit de korrelgrootteverdeling en de gewenste verwerkbaarheid. Zie tabel 6.4.

In figuur 6.1 worden 2 zogenoemde ontwerpgebieden onderscheiden. Dit hangt samen met het feit dat beton met fijner of minder continue gegradeerd toeslagmateriaal vanwege het groter oppervlak per volume van het toeslagmateriaal meer water vraagt voor dezelfde verwerkbaarheid.

Ontwerpgebied I levert de laagste waterbehoefte; ontwerpgebied I + II vraagt meer water. Hierin zijn ook slechter opgebouwde en fijner gegradeerde mengsels mogelijk.

- Hierna wordt een voorbeeld uitgewerkt met een mengsel van zand 0/4 en grind 4/16. Daarvoor moeten we beschikken over de korrelgrootteverdeling van de beide materialen. Deze is gegeven in tabel 6.3.

Het toeslagmaterialenmengsel wordt berekend in het ontwerpgebied I. Hierop is de richtwaarde voor de waterbehoefte in ons voorbeeld gebaseerd. Om het mengsel niet te grof te maken proberen we zoveel mogelijk fijn toeslagmateriaal toe te passen. De zeefdoorval op zeef 1 mm is voor het in Nederland gebruikelijke zand en grind meestal maatgevend. Om voor de zeef 1 mm nog juist op de grens van ontwerpgebied I te blijven moeten we voor een mengsel 0/16 rekenen met een zeefdoorval van 33%. Zie figuur 6.1

- Rekenkundig kunnen we nu bepalen hoeveel % zand met hoeveel % grind moet worden gemengd om in het mengsel precies de zeefdoorval van 33% op de zeef 1 mm te krijgen.

Voor het berekenen van het zand-grindmengsel geldt als uitgangspunt, dat de korrelgrootte-verdeling van het mengsel zodanig moet zijn dat deze de laagste hoeveelheid water vraagt. Dit is te realiseren door de korrelverdeling in ontwerpgebied I te houden. Om er zeker van te zijn dat op alle zeven wordt voldaan aan de eis van ontwerpgebied I moet per zeef het zandpercentage voor het bereiken van de bovengrens en van de ondergrens worden berekend. Zodra van alle zeven de boven- en ondergrenswaarden van het zandpercentage bekend zijn, kan worden vastgesteld met welk percentage het ontwerp wordt voltooid. In de meeste gevallen betreft dit de bovengrens van zeef 1 (dit levert het meeste zand op).

Volgens figuur 6.1 is de bovengrenswaarde van zeef 1 voor korrelgroep 0/16 te vinden: dit bedraagt 33%. Door nu het percentage zand te benoemen als P_z dan is het percentage grind $100 - P_z$ want samen zijn ze 100%. Tabel 6.3 geeft op zeef 1 voor de zeefdoorval van het zand 82% en van het grind 0%.

De formule wordt dan $\frac{P_z}{100} \times 82 + \frac{100 - P_z}{100} \times 0 = 33\%$ Hieruit volgt dat $P_z = 40\%$

Bovenstaande vergelijking is te vereenvoudigen. Daarbij noemen we de zeefdoorval van het zand Z_x (voor zeef x), van het grind G_x en van het mengsel M_x .

Als we deze waarden invullen in bovenstaande vergelijking levert dit op:

$$\frac{P_z}{100} \times Z_x + \frac{100 - P_z}{100} \times G_x = M_x \text{ dit kan worden vereenvoudigd als}$$

$$P_z \times Z_x + (100 - P_z) \times G_x = 100 \times M_x$$

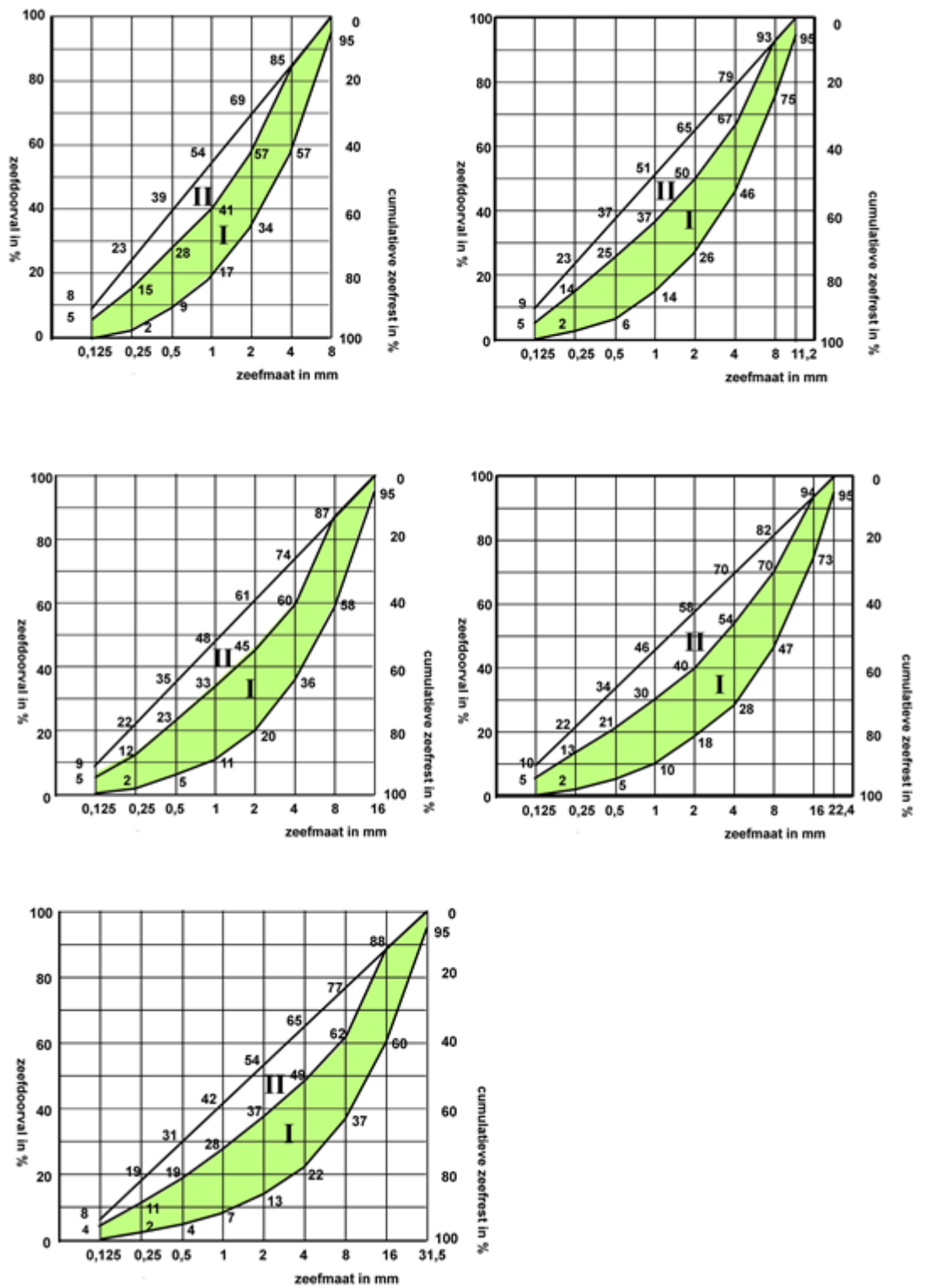
$$P_z \times Z_x + 100 \times G_x - P_z \times G_x = 100 \times M_x$$

$$(Z_x - G_x) \times P_z = (M_x - G_x) \times 100$$

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

Deze formule levert hetzelfde resultaat als de eerstgenoemde formule.

Het gebruik van de laatste formule verplicht de gebruiker om met het op zeef 1 bepaalde zandpercentage te controleren of op de andere zeven ook wordt voldaan aan ontwerpgebied I.



Figuur 6.1 Ontwerpgebieden I en I+II voor 0/8, 0/11, 0/16, 0/22 en 0/32

Tabel 6.3 Korrelgrootteverdeling van fijn en grof toeslagmateriaal.

Zeefopening [mm]	zeefdoorval in %	
	zand 0/4	grind 4/16
31,5	100	100
16	100	98
8	100	50
4	97	10
2	92	1
1	82	0
0,500	43	0
0,250	7	0
0,125	0	0

De zeefdoorval van het zand op de zeef 1 mm bedraagt 82%.

De zeefdoorval van het grind op de zeef 1 mm bedraagt 0%.

Om in (eigenlijk hier: 'op de grens van') ontwerpgebied I te komen moet de zeefdoorval voor het mengsel 33% zijn voor zeef 1 mm. Het percentage zand dat we moeten inzetten is:

$$P_z = \frac{M_1 - G_1}{Z_1 - G_1} \times 100 = \frac{33 - 0}{82 - 0} \cdot 100\%$$

$$P_z = \frac{33}{82} \cdot 100\%$$

- Berekend percentage zand: $P_z = 40\%$
- Het percentage grind is $100\% - 40\% = 60\%$.

6.4.2.5 Stap 5: Controle ontwerpgebied

In deze stap wordt gecontroleerd of het mengsel voor alle zeven in het ontwerpgebied I ligt. Per zeef is de zeefdoorval van 40% zand en 60% grind berekend en deze waarden zijn per zeef opgeteld tot mengsel. (tabel 6.4).

Tabel 6.1 Berekening zand-grindmengsel.

zeef- opening [mm]	Zeefdoorval in %						
	zand	grind	0,40 x zand	0,60 x grind	mengse l	onder grens	boven- grens
16	100	98	40,0	58,8	99	95	100
8	100	50	40,0	30,0	70	58	87
4	97	10	38,8	6,0	45	36	60
2	92	1	36,8	0,6	37	20	45
1	82	0	32,8	0	33	11	33
0,500	43	0	17,2	0	17	5	23
0,250	7	0	2,8	0	3	2	12
0,125	0	0	0	0	0	0	5

Het toeslagmaterialen-mengsel ligt geheel in ontwerpgebied I.

6.4.2.6 *Stap 6: Bepaling van de waterbehoefte van het beton*

In deze fase van de berekening gaan we bepalen hoeveel water er nodig is voor de verwerkbaarheid van het beton. In tabel 6.5 zijn richtwaarden voor de waterbehoefte, afhankelijk van de maximale korrelgrootte D_{max} en de consistentieklasse voor korrelgrootteverdelingen in ontwerpgebied I opgenomen.

Tabel 6.5 Richtwaarden voor de waterbehoefte in kg per m³, afhankelijk van maximale korrelgrootte D_{max} en consistentieklasse voor korrelgrootteverdelingen in ontwerpgebied I.

Consistentieklasse	D_{max}				
	8	11	16	22	32
C0	155	150	145	140	135
C1, S1, F1	170	165	160	155	150
C2, S2, F2	185	180	175	170	165
C3, S3, F3	200	195	190	185	180
Aanpassingen richtwaarden:					
Mengsel in ontwerpgebied II				+ 20 kg	
Grof toeslagmateriaal gebroken				+ 5 kg	
Fijn toeslagmateriaal gebroken				+ 20 kg	

Het spreekt voor zich dat er meer factoren invloed hebben op de waterbehoefte: bijvoorbeeld de korrelvorm en oppervlaktetextuur van het toeslagmateriaal. De waterbehoefte van een gebroken toeslagmateriaal zal gemiddeld 5 – 10 kg per m³ hoger zijn dan voor een rond materiaal. Ook de hoeveelheid platte stukken en de textuur van het oppervlak: ruw of glad hebben invloed op de waterbehoefte. Verder wordt de waterbehoefte beïnvloed door:

- de toepassing van hulpstoffen, zoals luchtbelvormers,
- toevoegingen als vulstoffen, kleurstoffen en vezels,
- het gebruikte cement,
- de specietemperatuur, enzovoort.

Vaak wordt de waterbehoefte verlaagd door gebruik te maken van (super)plastificerende hulpstoffen.

- *Vervolg voorbeeld: Bij het mengselontwerp is uitgegaan van consistentieklasse S2, een grootste korrelafmeting van 16 mm en een korrelgrootteverdeling in ontwerpgebied I. Deze combinatie levert een richtwaarde voor de waterbehoefte van 175 kg. Door gebruik van een superplastificeerder wordt de waterbehoefte met 15 kg gereduceerd: 'effectieve' waterbehoefte: 175 – 15 = 160 kg.*

6.4.2.7 *Stap 7: Bereken cementgehalte uit waterbehoefte en w/c-factor.*

(Let op toets cementgehalte: bijvoorbeeld aan randvoorwaarde milieuklasse).

De w/c-factor wordt berekend door het effectief watergehalte te delen door het cementgehalte. Indien watergehalte en w/c-factor bekend zijn kan het cementgehalte worden berekend door het watergehalte te delen door de water-cementfactor.

In formulevorm:

$$wcf = \frac{m_{water}}{m_{cement}} \quad \uparrow m_{cement} = \frac{m_{water}}{wcf}$$

- Zo berekenen we in ons voorbeeld het cementgehalte:

$$m_{\text{cement}} = \frac{160}{0,48} = 333 \text{ kg cement .}$$

- Dit cementgehalte toetsen we direct aan het minimaal vereiste cementgehalte voor de milieuklasse(n) dit was 300 kg. Dus cementgehalte voldoet.

6.4.2.8 *Stap 8: Uitleveringsberekening (hier voor 1 m³ beton).*

In de voorgaande stappen is de korrelgrootteverdeling en de hoeveelheid cementlijm bepaald (inclusief eventuele vul- en hulpstoffen). Nu kan worden berekend welk volume over blijft om te vullen met toeslagmateriaal.

In ons rekenvoorbeeld bestaat de cementlijm uit:

CEM III/A 42,5 N	C	=	333 kg
water	W	=	160 kg
lucht	L	=	2% (V/V) (<i>aangenomen</i>)

De hoeveelheid superplastificeerder wordt in deze uitleveringsberekening verwaarloosd.

Eerst rekenen we de hoeveelheid cementlijm om naar een volume:

cement C	= 333 kg →	volume: 333 [kg] / 3000 [kg/m ³]	=	0,111 m ³
water W	= 160 kg →	volume: 160 [kg] / 1000 [kg/m ³]	=	0,160 m ³
lucht L (2% V/V)		volume:	=	0,020 m ³
totaal cementlijm			=	0,291 m³

Dit betekent dat de resterende 1,000 – 0,291 m³ = **0,709 m³** moet worden opgevuld met toeslagmateriaal. Dit bestaat uit zand en grind. (het percentage zand is 40% V/V).

het volume zand is	0,40 x 0,709 [m ³]	=	0,284 m ³
het volume grind is	0,60 x 0,709 [m ³]	=	0,425 m ³

Deze volumes worden omgerekend naar massa's door ze te vermenigvuldigen met de volumieke massa (let op: bij werken met verschillende toeslagmaterialen en/of licht toeslagmateriaal kan de volumieke massa per korrelgroep verschillend zijn!).

Omdat het toeslagmateriaal in de meeste centrales buiten wordt bewaard, zijn de korrels nat. Dit water bevindt zich voor dicht toeslagmateriaal vooral aan de buitenzijde van de korrels. Alleen als het toeslagmateriaal poreus is zal een deel van het water in de korrels zijn geabsorbeerd. Voor het gebruikte zand en grind gaan we uit van een absorptie voor het zand van 0,3% en voor het grind van 0,8%. Dit geabsorbeerde water speelt geen rol bij de berekening van de water-cementfactor.

6.4.2.9 *Stap 9: Opgave mengmeester (berekening van de vochtcorrecties)*

Voor de opgave aan de mengmeester moet worden uitgerekend wat de natte massa van het zand en grind zal zijn. Daarnaast moet hij weten hoeveel water aan het mengsel moet worden toegevoegd.

Daarbij wordt het aanhangend water van de korrels in mindering gebracht op de hoeveelheid water. Deze hoeveelheid water moet vervolgens worden gecorrigeerd in verband met de absorptie van de korrels.

De ρ_{rd} van zowel het zand als het grind is 2650 kg/m^3 .

Het (totaal) vochtgehalte van het zand is 4,5% (m/m t.o.v. droog), voor het grind is dit 2,9% (m/m t.o.v. droog). (Bij het drogen van het zand en grind meten we zowel het aanhangende water als het absorptiewater).

droog zand:	$0,284 \text{ [m}^3] \times 2650 \text{ [kg/m}^3]$	=	753 kg
totaal water:	$0,045 \times 753$	=	<u>34 kg</u> +
nat zand:	$753 + 34$	=	787 kg
absorptiewater:	$0,003 \times 753$	=	2 kg
droog grind:	$0,425 \text{ [m}^3] \times 2650 \text{ [kg/m}^3]$	=	1126 kg
totaal water:	$0,029 \times 1126$	=	<u>33 kg</u> +
nat grind:	$1126 + 33$	=	1159 kg
absorptiewater:	$0,008 \times 1126$	=	9 kg
Toe te voegen water:	$160 - 34 - 33 + 2 + 9$	=	104 kg
(Effectief water:	$160 - 34 - 33 =$	=	93 kg)

Voor de mengmeester wordt dan de doseeropgave per m^3 betonspecie:

Cement	=	333 kg
Water	=	104 kg
Nat zand	=	787 kg
Nat grind	=	1159 kg
Superplastificeerder	=	p.m.

6.4.2.10 Stap 10: Controleberekeningen.

We zijn nog niet klaar met het berekenen van de betonsamenstelling. Nu moeten we nog controleren of we aan alle eisen hebben voldaan. We moeten de volgende controle berekeningen uitvoeren:

- a) *Controle minimaal cement-/bindmiddelgehalte*
- b) *Controle op het gehalte aan fijn materiaal ($\leq 0,250 \text{ mm}$)*
- c) *Controle op het chloridegehalte*
- d) *Controle op het alkaligehalte*

a) *Controle minimaal cement-/bindmiddelgehalte*

Deze controle hebben we al uitgevoerd bij stap 6. Daar is al gecontroleerd of de berekende hoeveelheid cement/bindmiddel voldoet aan het minimaal gehalte aan cement/bindmiddel voor de duurzaamheid via de milieuklasse

b) *Controle hoeveelheid fijn materiaal $< 0,250 \text{ mm}$*

Aan fijne delen zijn aanwezig: het cement en het fijn materiaal dat kleiner is dan 0,250 mm. Voor het zand is dat 7% van het volume zand.

volume van 333 kg cement	=	$333 \text{ [kg]} / 3000 \text{ [kg/m}^3]$	=	0,111 m^3
volume fijn uit zand	=	$0,07 \times 0,284 \text{ [m}^3]$	=	0,020 m^3
totaal fijn materiaal $< 0,250 \text{ mm}$			=	<u>0,131 m^3</u>

Deze hoeveelheid voldoet aan de eis voor de minimale hoeveelheid fijn materiaal volgens NEN 8005 (zie Algemene gegevens: minimaal $0,125 \text{ m}^3$ per m^3 beton, bij $D_{\max} = 16 \text{ mm}$).

c) Controle op gehalte aan chloriden

In de praktijk is het noodzakelijk ook controleberekeningen te doen m.b.t. het gehalte aan chloriden. Om corrosie van beton- en vooral voorspanstaal te voorkomen, stelt de NEN-EN 206 eisen aan het maximale chloridegehalte van ongewapend, gewapend en voorgespannen beton. Zie tabel 6.6. Voor beton zonder corrosiegevoelige materialen mogen we uitgaan van het chloridegehalte van ongewapend beton.

Tabel 6.6 Chlorideklassen en maximaal chloridegehalte ten opzichte van het bindmiddelgehalte in % (m/m).

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

Het chloridegehalte wordt berekend uit de beschikbare chloridegehalten van de verschillende materialen waaruit het betonmengsel is samengesteld. Het chloridegehalte wordt berekend ten opzichte van de hoeveelheid bindmiddel.

Berekening chloridegehalte

De betonspecie wordt geleverd voor een gewapend-betonconstructie. Volgens NEN-EN 206 is het maximum chloridegehalte $0,40 \%$ (m/m) ten opzichte van het bindmiddelgehalte. Het chloridegehalte van de samenstellende delen kan mogelijk worden opgevraagd bij de leverancier of moet zelf worden bepaald.

Van onze materialen zijn bijvoorbeeld de volgende chloridegehalten bekend:

CEM III/A 42,5N bevat	0,03 %	m/m Cl^-
nat rivierzand bevat	0,0004 %	m/m Cl^-
nat riviergrind bevat	0,0004 %	m/m Cl^-
aanmaakwater bevat	0,011 %	m/m Cl^-

Let op: de chloridegehalten van het zand en grind moeten worden berekend op de droge massa's.

Berekening gehalte aan chloriden:

333 kg bindmiddel x $0,03/100$ (m/m) Cl^-	= 0,100 kg Cl^-
753 kg zand x $0,0004/100$ (m/m) Cl^-	= 0,003 kg Cl^-
1126 kg grind x $0,0004/100$ (m/m) Cl^-	= 0,004 kg Cl^-
104 kg water x $0,011/100$ (m/m) Cl^-	= <u>0,011 kg Cl^-</u>
totaal	= 0,118 kg Cl^-

Gehalte aan chloriden ten opzichte van het bindmiddelgehalte
 $= 0,118 \text{ [kg]} / 333 \text{ [kg]} \times 100 \% = 0,035 \%$ (m/m) Cl^- .

Dit voldoet ruimschoots aan de gestelde eis in NEN-EN 206.

d) Controle op het alkaligehalte van het beton.

Mogelijk moet ook het gehalte aan alkaliën worden berekend uit de alkaligehaltes van de verschillende grondstoffen. Dit in verband met het toetsen aan het risico op schadelijke ASR conform CUR-Aanbeveling 89. De berekening verloopt analoog aan de berekening van het chloridegehalte. In de cursus Betontechnoloog wordt dit verder behandeld.