

## 1 UITBREIDING EN VERDIEPING VAN BETONTECHNOLOGISCHE INFORMATIE

Verschillende toepassingen van beton stellen heel verschillende eisen aan de betreffende betonspecie en/of het beton. Dat kunnen eisen zijn aan de mechanische eigenschappen van het beton, aan de duurzaamheid, aan de esthetische eigenschappen of een combinatie daarvan.

Daarbij heeft de betontechnoloog te maken met een snel groeiend grondstoffenpakket. Ook de druk om selectief om te gaan met de toepassing van primaire materialen groeit. Het aanbod aan gerecyclede materialen en secundaire grondstoffen wordt steeds groter.

Kortom, aan de betontechnoloog worden steeds hogere eisen gesteld.

Deze opleiding voor betontechnoloog (BTe) is onlosmakelijk gekoppeld aan de opleiding "Basiscursus Betontechnologie (BBT)" en sluit daarop aan.

Zo is er in de basiscursus veel aandacht voor de eigenschappen van beton "als bouw-materiaal" en levert de cursus uitgebreid inzicht in de eigenschappen van grondstoffen voor beton, het mechanisme achter hun prestaties en de manier waarop de verschillende grondstoffen in beton samenwerken. De opleiding BTe bouwt verder op deze kennis.

In dit eerste hoofdstuk van de cursusbeschrijving BTe wordt de informatie over een aantal onderwerpen die reeds in BBT aan de orde zijn gesteld verder uitgebreid en uitgediept. Dat is noodzakelijk om met behulp van deze aanvullende informatie andere dan de in BBT besproken betonsamenstellingen te kunnen maken.

Aan de orde komen:

- bindmiddelcombinaties en de bindmiddelfunctie van vliegas en silicafume en de toepassing daarvan als reactieve vulstof in beton;
- de achtergrond van het samenstellen van wat inmiddels "attestbeton" is gaan heten;
- de alkali-silica reactie (ASR) en de wijze waarop de technoloog daarmee om kan gaan;
- het toepassen van sterk waterreducerende hulpstoffen.

## INHOUDSOPGAVE

Pag.

|         |  |      |
|---------|--|------|
| 1.1     | Taak van een betontechnoloog .....   | 1-3  |
| 1.2     | Inventarisatie eisen .....   | 1-3  |
| 1.2.1   | Constructief beton .....   | 1-4  |
| 1.2.1.1 | Eisen vanuit constructieve toepassing.....   | 1-4  |
| 1.2.1.2 | Eisen vanuit uitvoering .....  | 1-4  |
| 1.2.1.3 | Aanvullende eisen .....  | 1-5  |
| 1.2.2   | Niet-constructief beton .....  | 1-5  |
| 1.3     | Keuze van de grondstoffen.....   | 1-5  |
| 1.4     | Bindmiddelcombinaties .....  | 1-5  |
| 1.5     | Bindmiddelfunctie volgens de betonvoorschriften op basis van<br>de k-waarde methode..... | 1-6  |
| 1.5.1   | Bindmiddelfunctie van poederkoolvliegass .....   | 1-7  |
| 1.5.2   | Bindmiddelfunctie van silica fume .....  | 1-8  |
| 1.6     | Bindmiddelfunctie volgens het gelijkwaardigheidsbeginsel .....                           | 1-10 |
| 1.7     | Preventieve maatregelen ter voorkoming van betonschade door ASR .....                    | 1-12 |
| 1.8     | Rekenen met sterk waterreducerende hulpstoffen.....                                      | 1-17 |

## 1.1 Taak van een betontechnoloog

De taak van een betontechnoloog is om een betonsamenstelling te ontwerpen (en vervolgens voortdurend aan te passen) zodanig, dat aan alle gespecificeerde eisen en relevante aanvullende behoeften wordt voldaan.

De mogelijkheden die de betontechnoloog daarbij in de samenstelling tot zijn beschikking heeft zijn:

- (1) de keuze in de grondstoffen;
- (2) de verhouding tussen de gekozen grondstoffen.

Dit is geen gemakkelijke taak. In de eerste plaats omdat gespecificeerde eisen, zoals sterkteklasse, milieuklassen en consistentieklasse, tegenstrijdigheden kunnen opleveren voor de samenstelling. Denk bijvoorbeeld aan de sterkte en de duurzaamheid die verschillende eisen kunnen stellen aan de te hanteren water-cementfactor.

Naast de gespecificeerde eisen zijn er echter ook bijna altijd aanvullende behoeften. Relevante behoeften bijvoorbeeld in de vorm van een korte mengtijd, het snel kunnen afwerken van het beton, een zo goedkoop mogelijk mengsel, geen onvolkomenheden in het oppervlak zoals scheuren of vlekken. Vaak leveren deze behoeften extra randvoorwaarden op voor de samenstelling in de productie. Dit kan leiden tot aanpassingen in de samenstelling.

Daarnaast kan de vrijheid in de te gebruiken grondstoffen beperkt zijn om technische of economische redenen. Een technische beperking is bijvoorbeeld het gebrek aan silo's of opslagvakken. Een economische reden is bijvoorbeeld de prijs van een grondstof, bijvoorbeeld als gevolg van de grote transportafstand.

Tot slot moeten soms ook juist grondstoffen worden gebruikt die niet direct voor de hand liggen zoals bijvoorbeeld bij het voorgeschreven gebruik van recyclematerialen.

Allemaal redenen om het ontwerp van een betonsamenstelling en het eventueel aanpassen ervan systematisch aan te pakken. Als hulpmiddel hiervoor is bij de BBT een stappenplan aangereikt.

- A: Inventarisatie van de eisen uit projectspecificatie en uitvoering
- B: Keuze van de materialen
- C: Berekenen van betonsamenstelling: grondslagen

Dit stappenplan wordt met aanvullingen ook in de BTe gehanteerd. Eerst gaan we in dit hoofdstuk in op fase A, inventarisatie van de eisen. Daarna gaan we in op fase B, de keuze van de grondstoffen. In hoofdstuk 2 wordt middels stappenplannen vervolgens aangegeven hoe op basis van de gespecificeerde eisen en de gekozen grondstoffen de verhouding kan worden berekend en uiteindelijk de mengsamenstelling (fase C).

## 1.2 Inventarisatie eisen

Om een inventarisatie van de eisen te maken is het belangrijk om een onderscheid te maken tussen constructief beton en niet-constructief beton.

## 1.2.1 Constructief beton

De eisen voor constructief beton vallen uiteen in eisen vanuit:

- 1 Constructieve toepassing
- 2 Uitvoering
- 3 Aanvullende eisen

### 1.2.1.1 *Eisen vanuit constructieve toepassing*

Voor constructief beton wordt een berekening gemaakt door een constructeur waarbij gebruik wordt gemaakt van de rekenregels uit de NEN-EN 1992, ook wel bekend als de Eurocode 2. Op basis van de belastingen die de constructie moet kunnen opnemen, de vervormingen en scheurwijdtes die daarbij toelaatbaar zijn, en de gewenste levensduur volgen hieruit onder meer de:

- sterkteklasse voor het beton,
- soort en hoeveelheid van de wapening,
- dichtheidsklasse (lichtbeton) of volumieke massa (zwaar beton) indien relevant,
- milieuklassen die relevant zijn in verband met aantasting van de wapening (XC, XD, XS),
- dekking op de wapening,
- milieuklassen die relevant zijn in verband met aantasting van het beton (XF, XA).

Constructief beton kan ter plaatse worden gestort op de bouwplaats. In dat geval is de NEN-EN 206 direct van toepassing voor de specificatie van de eisen vanuit de constructieve toepassing en voor de betonsamenstelling. Constructief beton kan echter ook als constructieve elementen worden geprefabriceerd in een fabriek. Voor geprefabriceerde elementen zijn er in de meeste gevallen productnormen, bijvoorbeeld voor heipalen, rioolbuizen, bouwelementen, enz. Deze productnormen kunnen aanvullende eisen stellen aan het product, zoals bijvoorbeeld de splijttreksterkte of de waterdoorlatendheid. Deze eisen komen als aanvulling op, of soms in de plaats van, de eisen uit de Eurocode 2. Het is belangrijk de relevante eisen mee te nemen. In bijna alle gevallen verwijzen de productnormen voor geprefabriceerde elementen voor de betonsamenstelling, uiteindelijk door naar de NEN-EN 206.

### 1.2.1.2 *Eisen vanuit uitvoering*

Ongeacht of het beton op de bouwplaats of in de fabriek wordt verwerkt zijn er een aantal eisen die voortkomen uit de wijze van uitvoering. Bepalend hiervoor zijn onder meer de tijd tussen aanmaken en verwerken, de wijze van verwerken van het beton, de afmetingen van de mal en de wapening, hoeveelheid verdichtingsenergie die beschikbaar is, het moment van afwerken, het risico op scheurvorming, de stortcyclus. Dit vertaalt zich in eisen aan:

- "open tijd",
- eventueel verpompbaar,
- maximale korreldiameter,
- consistentieklasse,
- eventueel aanvullende eigenschappen bij zelfverdichtend beton,
- maximale warmteontwikkeling,
- de sterkte na een bepaalde tijd.

### 1.2.1.3 *Aanvullende eisen*

Er is een grote hoeveelheid aanvullende eisen te stellen aan beton. Hier wordt alleen een korte opsomming gegeven. Sommige van deze eisen zullen verderop in dit dictaat worden uitgewerkt.

- verhoogde levensduur (CUR-Leidraad 1),
- bestandheid tegen ASR (CUR-aanbeveling 89 – 2<sup>e</sup> versie),
- uiterlijk: schoon beton (CUR-aanbeveling 100 – 2<sup>e</sup> versie),
- toepassing van betongranulaat (NEN 8005 + CUR-Aanbeveling 112),
- lage CO<sub>2</sub>-footprint,
- kostprijs.

### 1.2.2 Niet-constructief beton

Het grote verschil met constructief beton is dat voor niet-constructief beton de Eurocode en de NEN-EN 206 niet van toepassing zijn. In plaats daarvan zijn er productnormen. Bijvoorbeeld de NEN-EN 1338 voor betonstraatstenen en de NEN-EN 1339 voor tegels. Deze productnormen bevatten alle eisen waar het product aan moet voldoen. Voor betonstraatstenen bijvoorbeeld:

- toleranties op de afmetingen,
- slijttreksterkte,
- vorst/dooi-bestandheid,
- slijtweerstand,
- uiterlijk.

Ook de eisen aan de mengselsamenstelling staan in deze normen. De keuze voor de grondstoffen en de verhoudingen is relatief vrij ten opzichte van de NEN-EN 206 voor constructief beton. Deze worden echter wel sterk beperkt door het productieproces en de vereiste prestaties.

## 1.3 **Keuze van de grondstoffen**

Een aantal van de gespecificeerde eisen zijn direct van invloed zijn op de te gebruiken grondstoffen, met name op de keuze voor het bindmiddel:

- Sulfaatbestandheid (XA2 en XA3 bij hoge concentratie sulfaten),
- Maximale warmteontwikkeling,
- Vroege sterkte,
- Verhoogde levensduur,
- ASR,
- Lage CO<sub>2</sub>-footprint,
- Kostprijs.

In deze paragraaf wordt daarom met name ingegaan op de keuze van het bindmiddel.

## 1.4 **Bindmiddelcombinaties**

Bij de selectie van de grondstoffen voor beton kan als bindmiddel voor een cement, geleverd af fabriek worden gekozen. De prestaties van deze cementen liggen binnen een in de norm vastgelegde bandbreedte.

We kunnen, binnen zekere grenzen, ook kiezen voor een bindmiddelcombinatie. Daarbij worden stoffen gebruikt die, mits op de juiste wijze geproduceerd, een bindmiddelfunctie hebben. De tabel 'Bestanddelen voor cement en bindmiddelen' (zie tabel 1.1) bevat een overzicht van zulke stoffen. Deze tabel is gebaseerd op de eisen aan stoffen die worden gebruikt als grondstof voor cement zoals opgenomen in de norm voor cement NEN-EN 197-1. In de cursus BBT zijn de eigenschappen en herkomst van deze stoffen uitgebreid beschreven.

*Tabel 1.1 Bestanddelen voor cement en bindmiddelen.*

|  |
|--|
| <p><u>hydraulisch</u><br/> K: portlandcementklinker</p> <p><u>latent hydraulisch</u><br/> S: gegranuleerde hoogovenslak</p> <p><u>puzzolaan</u><br/> D: microsilica (silica fume)<br/> P: natuurlijke puzzolanen<br/> Q: gebrande natuurlijke puzzolanen<br/> V: silicahoudende poederkoolvliegias<br/> W: calciumhoudende poederkoolvliegias<br/> T: gebrande leisteen</p> <p><u>inert</u><br/> L: kalksteenmeel (TOC &lt; 0,50%)<sup>a)</sup><br/> LL: kalksteenmeel (TOC &lt; 0,20%)</p> <p><small><sup>a)</sup>TOC = Totaalgehalte aan organische bestanddelen</small></p> |
|--|

Het voordeel van het zelf samenstellen van het bindmiddel is dat we de eigenschappen van het bindmiddel en daarmee sommige eigenschappen van het beton dat we willen maken, zelf kunnen sturen. Het nadeel van deze werkwijze is dat er voor alle materialen silorruimte beschikbaar moet zijn. Bovendien is de prestatie van de bindmiddelcombinatie niet zonder meer gegarandeerd. Gebruiken we alleen cement, dan is dit een gecontroleerd product waarbij een bepaalde sterkte wordt gegarandeerd. Bij het mengen van componenten op de centrale moeten we rekening houden met de spreiding in kwaliteit van de afzonderlijke materialen en de interactie tussen die materialen. Combineren van 'bekende' stoffen is niet per definitie een garantie voor de prestatie van het 'mengsel'.

De betonvoorschriften (NEN-EN 206 / NEN 8005) geven twee mogelijkheden om op verantwoorde wijze de bestanddelen voor cement op een betoncentrale met elkaar te mengen tot een bindmiddel:

1. het toekennen van een bindmiddelfunctie via de k-waarde methode;
2. het gebruik van het gelijkwaardigheidsbeginsel.

## **1.5 Bindmiddelfunctie volgens de betonvoorschriften op basis van de k-waarde methode**

Door de betonvoorschriften (NEN-EN 206 / NEN 8005) wordt een minimum cement- of bindmiddelgehalte vereist om aan de duurzaamheidseisen van beton, via de milieuklassen, te voldoen. Door zelf materialen uit de tabel 'Bestanddelen voor cement en bindmiddelen' te doseren, kan onder bepaalde voorwaarden een deel van het cement worden vervangen door deze materialen. Het bindmiddelgehalte is dan het aandeel cement plus een deel van bijvoorbeeld het gedoseerde poederkoolvliegias, afhankelijk van de bindmiddelfunctie van dit materiaal.

De betonvoorschriften geven regels voor de manier waarop met de bindmiddelfunctie van een materiaal kan worden gerekend en regels voor de combinaties van cementen met poederkoolvliegias en silica fume. Voor de overige materialen van tabel 1.1 zijn deze waarden (nog) niet vastgelegd.

### 1.5.1 Bindmiddelfunctie van poederkoolvliegias

Het bindmiddelgedrag van poederkoolvliegias wordt voornamelijk bepaald door de eigenschappen van het cement waarmee deze puzzolaan wordt gecombineerd. Dit omdat er voldoende calciumhydroxide moet worden geproduceerd om daadwerkelijk de puzzolane reactie te krijgen. Er moet dus in het mengsel voldoende portlandcementklinker aanwezig zijn. De voorschriften eisen dat het cement moet voldoen aan NEN-EN 197-1 en de poederkoolvliegias aan NEN-EN 450. De bindmiddelfactor (ook wel de *k*-factor genoemd) voor de poederkoolvliegias kunnen we vervolgens aflezen uit tabel 1.2. Deze bindmiddelfactor is van toepassing in alle milieuklassen.

Tabel 1.2 *k*-factor voor poederkoolvliegias in beton afhankelijk van het toegepaste cement, zoals van toepassing in Nederland.

| <b>cementsoort</b> | <b><i>k</i>-factor</b> | <b><i>poederkoolvliegias / cementverhouding</i></b> | <b><i>beschreven in de</i></b> |
|--------------------|------------------------|---|--------------------------------|
| CEM I              | 0,4                    | ≤ 0,33  | NEN-EN 206                     |
| CEM II/A           | 0,4                    | ≤ 0,25  | NEN-EN 206                     |
| CEM III/A          | 0,2                    | ≤ 0,33  | NEN 8005                       |
| CEM III/B          | 0,2                    | ≤ 0,33  | NEN 8005                       |

De genoemde normen bevatten de betreffende eisen.

Bij de toepassing van de *k*-factor van poederkoolvliegias moeten we aan de volgende randvoorwaarden voldoen:

- Bij het mengen van twee in de tabel voorkomende cementen, mag de *k*-factor rechtlijnig worden geïnterpoleerd;
- Het poederkoolvliegiasgehalte (*V*) waarover de bindmiddelfunctie mag worden uitgerekend is maximaal 1/3 van het cementgehalte (*C*) ofwel  $V \leq 1/3 C$ , met uitzondering van het CEM II/A. Voor dat cement geldt een waarde van maximaal 1/4 van het cementgehalte (*C*) ofwel  $V \leq 1/4 C$ ;
- Het bindmiddelgehalte (*B*) is gelijk aan het cementgehalte (*C*) plus een gedeelte van de poederkoolvliegias ( $k \times V$ ) ofwel  $B = C + (k \times V)$  of  $B = C + k \times 1/3 \times C$ , omdat  $V = 1/3 \times C$  bij maximaal in rekening te brengen poederkoolvliegias.

**Let op:** de toepassing van de *k*-factor van poederkoolvliegias is alleen mogelijk voor de berekening van de 28-daagse sterkte. Voor de vroege sterkte levert vliegias nauwelijks (tot ca. 3 dagen) of een veel lagere (voor tussenliggende tijdstippen) sterktebijdrage.

*Rekenvoorbeeld:*

- Gevraagd wordt een beton te ontwerpen voor milieuklasse XC4;
- Om voldoende fijne delen in de betonspecie te hebben en vanuit economische motieven wordt poederkoolvliegias toegepast.  
Omdat we een gedeelte hiervan mee mogen rekenen als bindmiddel, gaan we uit van het bindmiddelgehalte in plaats van het cementgehalte en dus ook van de water-bindmiddelfactor;
- De maximum water-bindmiddelfactor voor deze milieuklasse is 0,50;
- Het minimum bindmiddelgehalte bedraagt 300 kg per m<sup>3</sup>;
- De waterbehoefte van het betonmengsel bedraagt 300 x 0,50 = 160 kg;
- In verband met de sterkteontwikkeling wordt gekozen voor CEM I 42,5 R.

Om te kunnen voldoen aan de eis van de water-bindmiddelfactor voor de milieuklasse moet de maximale waarde vanuit de milieuklasse veiligheidshalve worden verlaagd met 0,02. De rekenwaarde voor de water-bindmiddelfactor wordt dan 0,50 – 0,02 = 0,48. Dit betekent dat in het mengsel minimaal 160 / 0,48 = 333 kg bindmiddel per m<sup>3</sup> zit. Voor de combinatie CEM I 42,5 R en poederkoolvliegias mag een *k*-factor  $k = 0,4$  worden aangehouden. Dit mag berekend worden over 1/3 van de aanwezige hoeveelheid cement. We weten de hoeveelheid bindmiddel (333 kg). De hoeveelheid cement (C) kunnen we dan berekenen met:  $333 = C + 0,4 \times 1/3 \times C \rightarrow C = 294$  kg.

De totale hoeveelheid poederkoolvliegias is:

$1/3 \times C = 1/3 \times 294 = 98$  kg. De eventueel meer toegevoegde vliegias mag niet meer als bindmiddel worden meegerekend.

De hoeveelheid poederkoolvliegias dat als bindmiddel mag worden gerekend is:

$0,4 \times 1/3 \times C = 0,4 \times 1/3 \times 294 = 39$  kg.

Het vereiste minimum bindmiddelgehalte is daarmee nog steeds  $294 + 39 = 333$  kg en het mengsel voldoet dus aan de eis voor het minimum bindmiddelgehalte.

## 1.5.2 Bindmiddelfunctie van silica fume

Silica fume is ook een puzzolaan dat we op een vergelijkbare manier als poederkoolvliegias benaderen. Onder meer door de grote fijnheid van de silica fume is de sterktebijdrage hoger, hetgeen tot uiting komt in veel hogere bindmiddelfactoren dan bij poederkoolvliegias (zie tabel 1.3) die bij silica fume wel afhankelijk zijn van de water-cementfactor en de milieuklasse(n).

*Tabel 1.3 k-factor voor silica fume in beton met portlandcement.*

| <b>cementsoort</b>       | <b>wcf en milieuklasse</b>                        | <b>k-factor</b> | <b>silica fume /<br/>cementverhouding</b> |
|--------------------------|---|-----------------|---|
| CEM I<br>of<br>CEM II/A* | wcf ≤ 0,45  | 2,0             | ≤ 0,11                                    |
|                          | wcf > 0,45<br>behalve in milieuklasse<br>XC of XF | 2,0<br>1,0      | ≤ 0,11<br>≤ 0,11                          |

\* Behalve voor cement waaraan silica fume is toegevoegd.



Bij de toepassing van de bindmiddelfactor van silica fume moet aan de volgende randvoorwaarden worden voldaan:

- De  $k$ -factor is alleen van toepassing in combinatie met een CEM I;
- Het gehalte aan silica fume ( $S$ ) waarover de bindmiddelfunctie mag worden uitgerekend, is maximaal 11% van het cementgehalte ( $C$ ) ofwel  $S \leq 0,11 C$ ;
- Het bindmiddelgehalte ( $B$ ) is gelijk aan het cementgehalte ( $C$ ) plus een gedeelte van de silica fume ( $k \times S$ ), ofwel  $B = C + (k \times S)$ ;
- Het cementgehalte van het beton mag niet lager worden dan de grenswaarde voor de betreffende milieuklasse verminderd met 30 kg.

**Let op:** zoals ook bij het rekenen met de  $k$ -factor van poederkoolvliegias is ook de  $k$ -factor van silica fume gebaseerd op de prestatie voor de berekening van de 28-daagse sterkte. Voor de vroege sterkte zal de sterktebijdrage lager zijn.

*Rekenvoorbeeld:*

- Gevraagd wordt een betonsamenstelling bestemd voor milieuklasse XD3;
- De maximum water-bindmiddelfactor bedraagt 0,45;
- Het minimum bindmiddelgehalte bedraagt 300 kg per m<sup>3</sup>;
- De waterbehoefte van het betonmengsel bedraagt 172 kg;
- Om silica fume mee te mogen rekenen als bindmiddel, mag dit alleen in combinatie met een portlandcement CEM I;
- Om te kunnen voldoen aan de eis van de water-bindmiddelfactor voor de milieuklasse moet de maximale waarde vanuit de milieuklasse veiligheidshalve worden verlaagd met 0,02;
- De rekenwaarde voor de water-bindmiddelfactor wordt dan  $0,45 - 0,02 = 0,43$ . Dit betekent dat in het mengsel minimaal  $172 / 0,43 = 400$  kg cement of bindmiddel per m<sup>3</sup> zit.

In de combinatie met portlandcement en bij een wcf  $\leq 0,45$  en voor milieuklasse XD geldt  $k = 2,0$ . De bindmiddelbijdrage van silica fume mag over maximaal 11% van de cementhoeveelheid in rekening gebracht worden. We weten hoeveel bindmiddel we moeten toepassen.

De hoeveelheid cement ( $C$ ) kunnen we als volgt berekenen:

$$400 = C + 2,0 \times 0,11 \times C \rightarrow C = 328 \text{ kg}$$

Het gehalte silica fume is:  $(400 - 328) / 2,0 = 36$  kg (of  $0,11 \times 328 = 36$  kg).

Het bindmiddelgehalte is dus:  $328 + 2,0 \times 36 = 400$  kg per m<sup>3</sup>.

De wcf bedraagt  $172 / 328 = 0,52$ . Deze is hoger dan 0,45, maar voor milieuklasse XD mag ook in dat geval met een  $k$ -factor van 2,0 worden gerekend.

Het bindmiddelgehalte (cement +  $k \times$  silica fume) mag niet minder zijn dan het minimum bindmiddelgehalte dat vereist is voor de gevraagde milieuklasse.

Het minimum bindmiddelgehalte voor XD3 is 300 kg/m<sup>3</sup>. Hieraan wordt met 400 kg voldaan.

De hoeveelheid cement mag niet lager zijn dan de grenswaarde voor de betreffende milieuklasse (300 kg) verminderd met 30 kg, dus groter dan 270 kg per m<sup>3</sup>. Ook aan die eis wordt met een cementgehalte van 328 kg ruim voldaan.

## 1.6 Bindmiddelfunctie volgens het gelijkwaardigheidsbeginsel

De in de betonvoorschriften gehanteerde  $k$ -factoren zijn bedoeld voor "algemeen gebruik" en aan de veilige (lage) kant. Onderzoek heeft uitgewezen dat in bepaalde gevallen met een grotere bijdrage van de poederkoolvliegias als bindmiddel gerekend zou kunnen worden.

Naast de hiervoor beschreven regels voor het rekenen met de bindmiddelbijdrage van poederkoolvliegias en silica fume bevatten de betonvoorschriften daarom ook nog een algemene formulering waarin meer ruimte wordt gegeven via het zogenoemde "gelijkwaardigheidsbeginsel".

Dit betekent dat als de gelijkwaardigheid wordt aangetoond van beton waarin bindmiddelcombinaties zijn toegepast gebruikmakend van de grondstoffen genoemd in NEN-EN 197-1, het beton met deze bindmiddelcombinatie mag worden toegepast.

In Nederland is in CUR-Aanbeveling 48 de werkwijze vastgelegd. Deze CUR-Aanbeveling bevat naast de procedure voor het toelaten van nieuwe cementsoorten ook de beoordeling voor de gelijkwaardigheid van beton met bindmiddelcombinaties in vergelijking met beton waarin volgens NEN 8005 zondermeer toegelaten cementen zijn toegepast.

Daarbij gelden de volgende eisen aan de bindmiddelcombinatie:

- De materialen die met cement worden gemengd moeten staan in de tabel 'Bestanddelen voor cement en bindmiddel' (zie tabel 1.1);
- Van elk materiaal dat wordt toegepast moet een regelgevend document beschikbaar zijn in de vorm van bijvoorbeeld een Europese productnorm, een Nederlandse productnorm, een Europese technische goedkeuring (ETA), een CUR-Aanbeveling of een beoordelingsrichtlijn (zie tabel 1.4);
- Het gehalte portlandcementklinker van de combinatie van portlandcement met gemalen hoogovenslak als vulstof moet ten minste gelijk zijn aan 20% ( $m/m$ );
- Voor de overige bindmiddelen geldt een minimaal gehalte portlandcementklinker van 25% ( $m/m$ );
- Bij de toepassing van kalksteenmeel mag het gehalte kalksteenmeel niet hoger zijn dan 35% ( $m/m$ ).

Tabel 1.4 Overzicht van beschikbare Europese productnormen en relevante Nederlandse beoordelingsrichtlijnen (BRL).

| materiaal                          | productnorm / BRL               |
|------------------------------------|---------------------------------|
| gemalen gegranuleerde hoogovenslak | NEN-EN 15167-1 / BRL 1802       |
| silica fume                        | NEN-EN 13263-1                  |
| poederkoolvliegias                 | NEN-EN 450-1 / BRL 1802         |
| kalksteenmeel                      | NEN-EN 12620 / BRL 1802 en 1804 |

Om er voor te zorgen dat het onderzoek op basis van het gelijkwaardigheidsbeginsel op eenduidige wijze wordt uitgevoerd, is op basis van CUR-Aanbeveling 48 de beoordelingsrichtlijn BRL 1802 opgesteld. Daarin wordt in detail beschreven op welke wijze het onderzoek moet worden uitgevoerd en bovendien hoe het resultaat van het onderzoek in een attest wordt vastgelegd. Een attest is een kwaliteitsverklaring waarmee een certificatie-instelling verklaart dat een product in zijn toepassing voldoet aan bepaalde eisen en welke toepassingsvoorwaarden hierbij eventueel gelden.

Degene die het onderzoek heeft laten uitvoeren, kan op basis van het attest niet alleen zelf

het betreffende beton produceren, maar kan ook anderen het recht geven van het attest gebruik te maken. Daarmee wordt veel dubbel onderzoek voorkomen.

In Nederland is voor poederkoolvliegias, gemalen gegraneerde hoogovenslak en kalksteenmeel dergelijk onderzoek uitgevoerd.

Het attest is slechts geldig voor het cement (soort en herkomst) en bijvoorbeeld de poederkoolvliegias (soort en herkomst) die eenduidig in het attest zijn vastgelegd, inclusief de grenswaarden voor de mengverhouding. Beton met een dergelijke bindmiddelcombinatie is in de markt beter bekend onder de naam "attestbeton".

Eisen aan het met een bindmiddelcombinatie vervaardigde beton;

- het bindmiddelgehalte (waarbij dus al het cement en alle in het attest genoemde stoffen worden gerekend, rekening houdend met de limieten die hieraan in het attest worden gesteld) moet ten minste gelijk zijn aan het minimum bindmiddelgehalte voor de desbetreffende milieuklasse conform NEN 8005;
- de water-bindmiddelfactor (wbf) mag niet hoger zijn dan de maximum water-bindmiddelfactor voor de desbetreffende milieuklasse conform NEN 8005. (Dit betekent dat de rekenwaarde bij een mengselberekening met 0,02 moet worden verlaagd). Het kan echter voorkomen dat het attest ook een beperking van de water-bindmiddelfactor noemt;
- toepassing in een andere milieuklasse dan waarvoor de gelijkwaardigheid is aangetoond, is niet toegestaan.

Tabel 1.5 geeft als voorbeeld de samenstellingseisen voor verschillende combinaties van portlandcement, poederkoolvliegias en gemalen hoogovenslak zoals die in het attest (met nummer "nnnn") voor de desbetreffende combinaties zijn opgenomen.

*Tabel 1.5 Voorbeeld van samenstellingseisen aan bindmiddelcombinaties in een attest.*

|   |   |  |   |   |
|---|---|--|---|---|
| <b>Attestnummer</b><br>nnnn   | Producten: cement: CEM I 42,5 R, producent aaa te bbb<br>slak: producent ccc te ddd<br>vliegias: producent eee te fff |  |   |   |
| <b>milieuklasse</b>   | <b>slakgehalte</b><br>(min. - max.)<br>[% m/m]  | <b>vliegiasgehalte</b><br>(min. - max.)<br>[% m/m] | <b>minimum cementgehalte</b><br>[% m/m] | <b>minimum luchtgehalte</b><br>[mm] [% V/V] |
| X0, XC1, XC2, XC3, XC4  | 0 - 70  | 0 - 15   | 30                                      | - -   |
| XF1, XF3  | 0 - 70  | 0 - 15   | 30                                      | - -   |
| XA1, XA2, XA3   | 0 - 70  | 0 - 15   | 30                                      | - -   |
| XA2(s), XA3(s)  | 50 - 70   | 0 - 15   | 30 - 50                                 | - -   |
| Milieuklasse XA2(s) of XA3(s) is van toepassing indien er sprake is van sulfaataantasting |   |  |   |   |

*Toelichting:*

Het bindmiddel (de combinatie van portlandcement, poederkoolvliegias en gemalen hoogovenslak) moet, afhankelijk van de toe te passen milieuklasse, volgens de tabel zijn samengesteld. Voorbeeld: In de milieuklassen XA2(s) of XA3(s) moet het slakgehalte van het mengsel zich tussen de 50 en 70% bevinden. Er mag tussen 0 en 15% vliegias worden gebruikt en het mengsel moet ten minste 30 en ten hoogste 50% portlandcement bevatten.

Bij toepassing van 30% portlandcement en 65% slak mag niet meer dan 5% vliegas als bindmiddel worden meegerekend. Het eventueel meer toe te voegen poederkoolvliegas kan niet meer als bindmiddel worden beschouwd maar als inerte vulstof.

Indien een betoncentrale of betonproductenproducent gebruik wil maken van een geattesteerde bindmiddelcombinatie kan eigenlijk nauwelijks op basis van de gebruikelijke methode voor het mengselontwerp het benodigde bindmiddelgehalte worden berekend. Deze methode gaat er vanuit dat de normsterkte van het bindmiddel bekend is. Dat is in geval van het geattesteerde mengsel niet het geval. Op basis van het uitgevoerde gelijkwaardigheidsonderzoek waarbij een vergelijking met een hoogovencement of portland(vliegas)cement in de sterkteklasse 32,5 heeft plaatsgevonden, zou een normsterkte van dat cement kunnen worden aangehouden. Voor de samenstelling genoemd in bovenstaande toelichting (die overeenkomt met die van een CEM III/B) zou dus de normsterkte van een CEM III/B 32,5 N kunnen worden aangehouden voor het berekenen van de water-bindmiddelfactor voor het verkrijgen van de gewenste betonsterkte.

In de praktijk zal op basis van de uitgevoerde berekening beton worden samengesteld dat eerst op laboratoriumschaal moet worden uitgetest om na te gaan of de beoogde sterkte ook daadwerkelijk wordt verwezenlijkt. Uiteraard geldt dat ook voor een betonsamenstelling die is berekend voor een normaal cement. Voor de attestsamenstelling mag worden verwacht dat de gevonden afwijkingen van de beoogde sterkte groter zijn dan bij gebruik van cement.

Naast de eigenschappen/prestaties van de afzonderlijke grondstoffen speelt ook de interactie tussen grondstoffen een rol. Dit geldt niet alleen voor bindmiddelen. Zo wordt ook de prestatie van hulpstoffen sterk beïnvloed door het gebruikte cement of de bindmiddelcombinatie. Op hun beurt kunnen de samenstelling en de eigenschappen van vulstoffen en kleurstoffen de werking van hulpstoffen sterk beïnvloeden. Bij verschillende mogelijke grondstofcombinaties hebben de grondstoffen soms grote invloed op elkaars prestatie in de betonsamenstelling.

Deze interacties laten zich niet in universeel toe te passen regels vatten. Met de resultaten van onderzoek moet steeds worden beoordeeld of de gewenste eigenschappen van betonspecie en beton worden verkregen. De ervaring van de producent met het door hem gebruikte grondstoffenpakket is hier dus van doorslaggevende betekenis.

## **1.7 Preventieve maatregelen ter voorkoming van betonschade door ASR**

Sommige aspecten met betrekking tot de duurzaamheid van beton zijn (nog) niet in NEN-EN 206 geregeld. Dit geldt bijvoorbeeld voor het risico op de alkali-silicareactie (ASR).

Bij de alkali-silicareactie reageren reactieve bestanddelen (reactief silica) uit het toeslagmateriaal met alkaliën (natrium- en kaliumverbindingen) in het beton of uit de omgeving (dooizouten, zeewater) tot een reactieproduct dat water aantrekt waardoor dat gaat zwellen en het beton gaat scheuren. We spreken dan van een schadelijke alkali-silicareactie.

Deze reactieve bestanddelen zijn bijvoorbeeld opaal, tridymiet, chalcedoon, kriptokristallijne kwarts en vuursteen. Deze bestanddelen kunnen in meer of mindere mate voorkomen in toeslagmaterialen, afkomstig van heel verschillende winplaatsen.

De reactie bij de vorming van alkalisilicaathydraat verloopt als volgt:



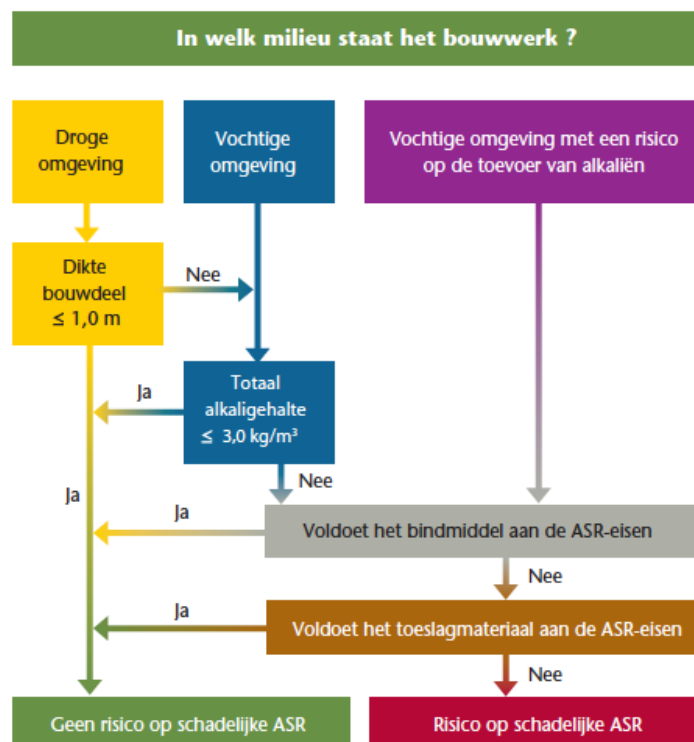
In beton is voldoende OH- aanwezig om deze reactie uit te voeren.

Het is op basis van uitsluitend de (mineralogische) eigenschappen van het toeslagmateriaal niet mogelijk een uitspraak te doen over het risico van het optreden van schadelijke ASR bij gebruik van een bepaald toeslagmateriaal. Daarvoor is uitgebreid onderzoek nodig.



*Figuur 1.1* Schadelijke ASR in een viaduct.

Het risico op schadelijke ASR in een betonconstructie is bovendien afhankelijk van een groot aantal factoren, waaronder de milieuklasse, het alkaligehalte, de gebruikte cementsoort. Daarom is voor de beoordeling van het risico op schadelijke ASR in CUR-Aanbeveling 89 (let op: gebruik de 2<sup>e</sup> herziene uitgave) een stroomschema opgenomen. In Betoniek 15-02 is een en ander verder uitgewerkt en toegelicht. Onderstaande schema's (figuur 1.2 en 1.3), afkomstig uit die aflevering van Betoniek, geven aan in welke situatie schadelijke ASR mogelijk is.

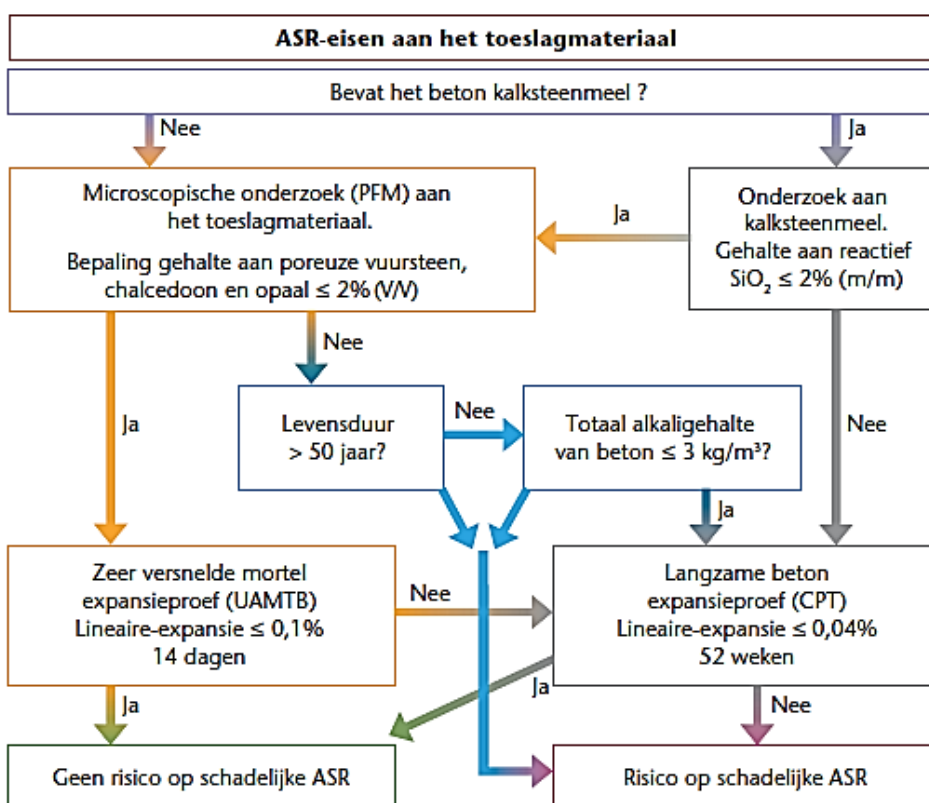


*Figuur 1.2* Invloedsfactoren op schadelijke ASR.

In figuur 1.2 wordt een overzicht gegeven waarin de invloedsfactoren milieu, afmeting van het bouwdeel en de eigenschappen van cement en toeslagmateriaal zijn weergegeven. Op de eigenschappen van het bindmiddel gaan we straks wat verder in.

Uit het stroomschema blijkt dat bijvoorbeeld in een droog milieu, bij het toepassen van specifieke cementen en beperking van het alkaligehalte, het risico op schadelijke ASR mag worden uitgesloten, ongeacht de potentiële reactiviteit van het toeslagmateriaal.

Figuur 1.3 geeft aan hoe het toeslagmateriaal in combinatie met de betonsamenstelling moet worden beoordeeld om na te gaan of sprake kan zijn van schadelijke ASR. Duidelijk is dat het onderzoek dat uiteindelijk uitsluitsel moet geven op de kans op schadelijke ASR (indien meer dan 3,0 kg/m<sup>3</sup> alkaliën aanwezig zijn en het toeslagmateriaal poreuze vuursteen, chalcedoon of opaal bevat) erg lang gaat duren. Het in dat geval uit te voeren onderzoek is een "langzame beton expansieproef" met een looptijd van een jaar.



Figuur 1.3 Beoordeling van het toeslagmateriaal.

#### Keuze van het bindmiddel

Het is volgens de CUR-Aanbeveling mogelijk om met het juiste bindmiddel risico op schadelijke ASR te voorkomen. De CUR-Aanbeveling beschrijft vijf mogelijke bindmiddelen en geeft de eisen waaraan ze moeten voldoen. Deze bindmiddelen zijn:

1. een cement volgens NEN-EN 197-1;
2. mengsels van CEM I en CEM III/B;
3. mengsels van CEM I en poederkoolvliegias;
4. mengsels van CEM III en poederkoolvliegias;
5. mengsels van CEM I, CEM III en poederkoolvliegias.

Bij het gebruik van hoogovencement en portlandvliegascement is bekend dat het risico op schadelijke ASR minder wordt. Enerzijds komt dit door de op termijn verkregen dichtere structuur van de cementsteen, anderzijds door het neutraliserende effect. Onderzoek heeft uitgewezen dat bij de reactie van hoogovenslak en poederkoolvliegascement in beton, alkaliën in de buitenranden van het reactieproduct worden vastgelegd. Hierdoor daalt de hoeveelheid alkaliën die beschikbaar is voor de ASR-reactie.

Dit vastleggen van alkaliën wordt het neutraliserend effect genoemd. De ASR-eisen aan het bindmiddel zijn dan ook in de eerste plaats gericht op het toepassen van poederkoolvliegascement of hoogovenslak.

Bij de juiste keuze van het bindmiddel of de bindmiddelcombinatie (in combinatie met een beperking van het alkaligehalte) kan het risico van schadelijke ASR daarom tot een minimum worden beperkt. Zo is schadelijke ASR vrijwel uitgesloten in beton gemaakt met hoogovencement met een slakgehalte > 50%. (Zie verder tabel 1.6 die is afgeleid van tabel 5.3 uit CUR-Aanbeveling 89 en van tabel 2 van Betoniek 15/02).

Cementen die voldoen aan de eisen zoals weergegeven in tabel 1.6 worden geacht het risico op schadelijke ASR tot een minimum te beperken. Let op dat in deze tabel het alkaligehalte van het te gebruiken cement afhankelijk is van het totaal alkaligehalte van de overige bestanddelen van het beton. Een en ander is gebaseerd op de eis dat het totaal alkaligehalte in het beton niet hoger mag zijn als 3,0 kg/m<sup>3</sup>.

Indien bij gebruik van CEM II/B-V het alkaligehalte van het hierin toegepaste vliegascement niet bekend is, moet van een Na<sub>2</sub>O-equivalent tussen de 1,0 en 2,0 % (m/m) worden uitgegaan.

Voorbeeld:

We beschikken over een CEM II/B-V waarin meer dan 30% poederkoolvliegascement is toegepast met een Na<sub>2</sub>O-equivalent van 3,4% .

Indien de overige bestanddelen minder dan 0,6% Na<sub>2</sub>O-equivalent bevatten, mag (volgens tabel 1.6) de poederkoolvliegascement niet meer dan 1,6% Na<sub>2</sub>O-equivalent bevatten om nog uit te kunnen gaan van de preventieve werking van het cement ten aanzien van ASR.

#### *Berekening van het alkaligehalte van beton*

Het alkaligehalte van beton wordt berekend uit de alkaligehaltes van cement, toeslagmateriaal, hulp- en vulstoffen en het aanmaakwater, alsmede uit het alkaligehalte van eventuele andere bestanddelen. Het alkaligehalte van beton moet worden uitgedrukt in het Na<sub>2</sub>O-equivalent in kg per m<sup>3</sup> beton. Het Na<sub>2</sub>O-equivalent is een maat voor het alkaligehalte, uitgedrukt als het gehalte aan natriumoxide (Na<sub>2</sub>O) + 0,658 maal het gehalte aan kaliumoxide (K<sub>2</sub>O) in % (m/m) of in kg per m<sup>3</sup>.

CUR-Aanbeveling 89 "Maatregelen ter voorkoming van alkali-silicareactie" bevat een uitgebreide toelichting op de verschillende maatregelen. Ook Betoniek 15-02 kan worden geraadpleegd voor verdere informatie over dit onderwerp.

Tabel 1.6 Eisen aan cementen met preventieve werking ten aanzien van ASR. (conform artikel 5.3 van CUR-Aanbeveling 89-2<sup>e</sup> herziene uitgave en Betoniek 15/02).

| Type bindmiddel   | Cementen volgens NEN-EN 197                                  |               |               |                  |                  | Mengsel CEM I en CEM III/B                          | Mengsel CEM I en poederkoolvlieg <sup>4)</sup> |                    | Mengsel CEM III/A of CEM III/B en poederkoolvlieg <sup>4)</sup> |                  |
|---|--|---------------|---------------|------------------|------------------|---|--|--------------------|---|------------------|
| Eigenschappen van het bindmiddel                                | Eigenschappen van het cement                                 |               |               |                  |                  | Eigenschappen van het cementmengsel                 | Eigenschappen van de poederkoolvlieg           |                    | Eigenschappen van het CEM III cement                            |                  |
|   | CEM II/B-V   |               |               | CEM III/A        | CEM III/B        | CEM I + CEM III/B                                   | poederkoolvlieg                                |                    | CEM III/A   | CEM III/B        |
| hoogovenslakgehalte in %  | n.v.t.   |               | n.v.t.        | ≥ 50             | ≥ 66             | ≥ 50  | n.v.t.   | n.v.t.             | ≥ 50  | ≥ 66             |
| poederkoolvlieg <sup>5)</sup> gehalte in %                      | ≥ 25   |               | ≥ 30          | n.v.t.           | n.v.t.           | n.v.t.  | ≥ 25 <sup>5)</sup>                             | ≥ 30 <sup>5)</sup> | n.v.t.  | n.v.t.           |
| Na-eq (x) van het toegepaste poederkoolvlieg <sup>5)</sup> in % | x ≤ 2,0  | 2,0 ≤ x ≤ 3,0 | 3,0 ≤ x ≤ 4,5 | n.v.t.           | n.v.t.           | n.v.t.  | x ≤ 3,0  | 3,0 ≤ x ≤ 4,5      | n.v.t.  | n.v.t.           |
| <b>Maximaal toegestaan alkaligehalte</b>                        | <b>Maximaal toegestaan alkaligehalte van de cementen (%)</b> |               |               |                  |                  | <b>Max. alkaligehalte van het cementmengsel (%)</b> | <b>Max. alkaligehalte van CEM I (%)</b>        |                    | <b>Max. alkaligehalte van CEM III (%)</b>                       |                  |
| <b>Alkalibijdrage (y) overige bestanddelen<sup>1)</sup></b>     | <b>CEM II/B-V</b>  |               |               | <b>CEM III/A</b> | <b>CEM III/B</b> | <b>CEM I + CEM III/B<sup>6)</sup></b>               | <b>CEM I</b>                                   |                    | <b>CEM III/A</b>  | <b>CEM III/B</b> |
| y ≤ 0,6   | 1,1  | 1,3           | 1,6           | 1,1              | 1,5              | 1,1   | 0,9  |                    | 1,1   | 1,5              |
| 0,6 < y ≤ 1,2 <sup>2)</sup>                                     | 0,9  | 1,1           | 1,5           | 0,9              | 1,3              | 0,9   | 0,7  |                    | 0,9   | 1,3              |
| 1,2 < y ≤ 1,6 <sup>3)</sup>                                     | 0,8  | 1,0           | 1,4           | 0,8              | 1,2              | 0,8   | 0,6  |                    | 0,8   | 1,2              |

<sup>1)</sup> Onder "overige bestanddelen" wordt verstaan alle grondstoffen in het beton, behalve cement en poederkoolvlieg.

<sup>2)</sup> Als wordt aangetoond dat de alkalibijdrage van de hulp- en vulstoffen, anders dan vlieg, < 0,1 kg per m<sup>3</sup> is, mag voor de alkalibijdrage van de overige bestanddelen worden uitgegaan van maximaal 1,2 kg per m<sup>3</sup>.

<sup>3)</sup> Indien niet wordt voldaan aan de eis "alkalibijdrage overige bestanddelen ≤ 1,6 kg per m<sup>3</sup>, dan moet het alkaligehalte worden berekend volgens bijlage G van CUR-Aanbeveling 89 (2e herziene uitgave).

<sup>4)</sup> Poederkoolvlieg moet voldoen aan CUR-Aanbeveling 94.

<sup>5)</sup> Poederkoolvlieg<sup>5)</sup>gehalte t.o.v. de massa van CEM I + poederkoolvlieg.

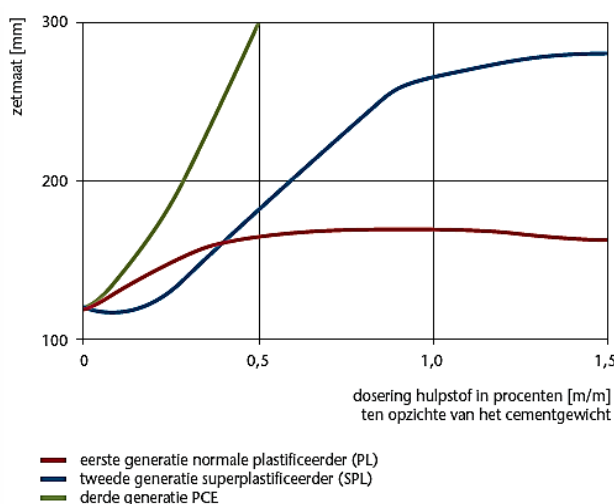
<sup>6)</sup> Het alkaligehalte van het mengsel van cementen moet worden uitgerekend door de afzonderlijke Na-eq van de cementen rechtlijnig te interpoleren.



## 1.8 Rekenen met sterk waterreducerende hulpstoffen

In betonspecie worden steeds vaker superplastificeerders toegepast om de waterbehoefte te verlagen. Zo kan de verwerkbaarheid worden verbeterd zonder ongewenst hoge bindmiddelgehalten toe te passen. De dosering van de hulpstof in relatie tot de reductie van de waterbehoefte is afhankelijk van het beoogde effect en wordt in de praktijk vaak bepaald door praktische afwegingen.

Belangrijk is dat in het algemeen bij hogere doseringen van plastificerende hulpstoffen de snelheid waarmee de verwerkbaarheid terugloopt, ook toeneemt. Bovendien neemt het effect bij toenemende dosering bij de meeste producten af, met uitzondering van de 3e generatie superplastificeerders, beter bekend onder de groepsnaam polycarboxylaatethers (de PCE's). Deze zijn zeer effectief (zie figuur 1.4) maar kennen veel variaties in eigenschappen als gevolg van de door de hulpstofproducent in de molecuulketen van de PCE aangebrachte aanpassingen.



Figuur 1.4 Relatie dosering plastificeerder en het effect op de consistentie.

Het gebruik van PCE's beïnvloedt meer eigenschappen van het beton dan alleen de consistentie. Hieronder een overzicht waarin we daarop wat dieper zullen ingaan.

### a. Plasticiteit / Vloeibaarheid

Het begint natuurlijk met de eigenschap plasticiteit / vloeibaarheid. Het beïnvloeden daarvan is de hoofdreden om te gaan werken met een PCE. De vloeibaarheid van beton is te meten door middel van de zet- en schudmaat. Voor zelfverdichtend beton kan gebruik worden gemaakt van de vloeimaat.

Het verhogen van de plasticiteit van de betonspecie wordt in eerste instantie gestuurd door de hoeveelheid PCE aan te passen.

### b. Stabiliteit

Met de stabiliteit van het betonmengsel bedoelen we dat de specie niet ontmengt (en dus homogeen blijft). Een PCE heeft hier nadrukkelijk invloed op. Hogere doseringen PCE geven meer vloeï, maar ook meer kans op ontmenging. Als dit optreedt, kan het worden bijgestuurd door meer fijne delen, zoals kalksteenmeel of vliegias in het betonmengsel toe te passen. Ook het gebruik van een fijner gemalen cement of een lager watergehalte kan effectief zijn.

#### *c. Viscositeit*

Met de viscositeit wordt bedoeld de stroperigheid van de specie. Hiermee wordt een beeld gegeven van het vloeigedrag van de betonspecie. De juiste viscositeit van bijvoorbeeld zelfverdichtend beton zorgt ervoor dat de wapeningsstaven goed worden omsloten en het beton toch niet ontmengt noch op de lange weg van de plek waar het wordt samengesteld naar de locatie waar het moet komen, noch bij het vullen van de bekisting.

Door het verhogen of verlagen van de hoeveelheid water in het beton kan de viscositeit worden ingesteld op de gewenste waarde. Gangbare meetmethoden voor de viscositeit zijn de trechtertijd en de t500-waarde. Bij deze laatste meten we de tijd die de zelfverdichtende specie nodig heeft om tijdens de vloeimaatbepaling 500 mm te bereiken. Als de specie minder viskeus is, is deze tijd korter.

Uiteraard heeft een aanpassing van het watergehalte ook invloed op de consistentie. Dat moet dan weer met de hoeveelheid PCE worden aangepast.

#### *d. Terugloop van de consistentie en de verwerkingstijd*

De terugloop van de consistentie, ook wel met het behoud van verwerkbaarheid aangeduid, wordt beïnvloed door de PCE. Het gaat in feite om de tijd dat een specie nog verwerkbaar is.

In alle gevallen loopt de verwerkbaarheid terug in de tijd. Dat wordt door allerlei factoren beïnvloed. Denk daarbij aan het gebruikte cement en de temperatuur. Door het gebruik van vertragende hulpstoffen kan hierop grote invloed worden uitgeoefend. Het is belangrijk te weten hoeveel de verwerkbaarheid mag teruglopen in de tijd om daar de specie-eigenschappen op af te kunnen stellen. We meten die terugloop door op verschillende momenten na aanmaak van de specie de consistentie te bepalen met bijvoorbeeld de zetmaat of de vloeimaat. De terugloop van de verwerkbaarheid is bij te sturen door het watergehalte te verhogen, het kiezen van een andere PCE of het toepassen van een vertragende hulpstof.

#### *e. Waterreductie*

Met het reduceren van de hoeveelheid water in de betonspecie wordt de ook water-cementfactor (wcf) verlaagd. Die reductie heeft een lagere consistentie tot gevolg die op peil kan worden gehouden met behulp van een plastificerende hulpstof. Door de sterk waterreducerende werking van PCE's is het verleidelijk om de wcf sterk te reduceren. Maar een lage wcf heeft ook andere effecten. Zo zal de viscositeit van de specie sterk toenemen en de vloeï (van een zelfverdichtende betonspecie) ogenschijnlijk afnemen.

#### *f. Sterkteontwikkeling*

Sterkteontwikkeling van beton is van groot belang voor de te behalen eindsterkte maar ook voor het ontkisten van bijvoorbeeld een betonelement. Bijna altijd moet een bepaalde minimale ontkistingssterkte worden gehaald om de productieprocessen in fabrieken niet te verstoren. Een langere verwerkingstijd die door een PCE wordt verkregen, leidt veelal tot een verdere vertraging van de reactie van het cement met water. Daardoor zal de sterkteontwikkeling in de eerste uren beduidend lager zijn. Toch kan door het toepassen van een veel lagere water-cementfactor zo'n vertraging uiteindelijk niet merkbaar zijn. Door de plastificerende werking van de PCE kan de water-cementfactor lager worden gehouden en daardoor de sterkteontwikkeling positief worden beïnvloed. Daardoor kan de ontkistingssterkte toch binnen de gewenste tijd worden bereikt.

De benodigde ontkistingssterkte wordt vaak door de constructeur bepaald. Door middel van het drukken van betonkubussen (verhardingsproef) kan de sterkte(ontwikkeling) van het beton worden bepaald. Op basis daarvan kan worden nagegaan of de gewenste ontkistingssterkte is bereikt. Andere mogelijkheden zijn het gebruik van een

terugslaghermer en methoden gebaseerd op gewogen rijpheid. Deze laatste heeft het voordeel dat op de sterkte-ontwikkeling in elk deel van een constructie continu kan worden gevolgd. Hoofdstuk 4 van deze lesstof geeft daarover meer informatie.

*g. Ontluchting van de specie*

Betonspecie moet na het storten worden verdicht. Daarmee wordt de lucht uit de specie verdreven. Bij zelfverdichtend beton willen we niet verdichten. De in de specie ingesloten lucht moet dus uit zichzelf verdwijnen. We noemen dat het vermogen van de zelfverdichtende specie om te "ontluchten".

Met het vermogen tot ontluchten kan ook een luchtbelvrij betonoppervlak worden verkregen. Dit kan uit esthetische overwegingen van belang zijn, met name bij het vervaardigen van 'schoon beton'.

Zelfverdichtend beton moet dus zo worden samengesteld dat de specie gedurende de gehele verwerkingstijd blijft ontluchten. Daarnaast moet de bekisting in ogenschouw worden genomen en dient te worden vastgesteld dat de vrijkomende lucht uit de bekisting kan ontwijken als de specie in de bekisting wordt gestort. Als dat niet mogelijk is, ontstaan grote luchtballen tussen bekisting en specie.

De ontluchting kan worden bijgestuurd door de specie vloeibaarder te maken door meer PCE toe te voegen (zie a). Om te voorkomen dat de specie instabiel wordt zal mogelijk ook de hoeveelheid fijn materiaal in de specie moeten worden verhoogt (zie b).

Ook specie die goed ontlucht, kan in het oppervlak luchtinsluitingen laten zien. Dit is vaak gevangen lucht tussen de betonspecie en de ontkistingsolie aan de binnenzijde van de kist.

Een mogelijkheid is het toevoegen van een ontschuimende hulpstof. De totale hoeveelheid lucht in het mengsel zal hierdoor worden verminderd. Soms wordt deze toevoeging al gedaan door de producent van de hulpstof. Tijdens het storten zal het ontluchten makkelijker gaan, waardoor ook het aantal luchtballen in het zichtvlak afneemt. Indien de lucht heftig uit het mengsel borrelt, gaat het niet om normaal ontluchten, maar is er sprake van instabiliteit van de specie.

Samenvattend heeft de betontechnoloog de volgende instrumenten in handen om het gewenste effect in de specie en het beton te verkrijgen:

- **Aanpassen watergehalte:**  
Beïnvloedt de consistentie en de viscositeit
- **Aanpassen hoeveelheid hulpstof:**  
Beïnvloedt de consistentie en mogelijk de verwerkingstijd
- **Aanpassen soort en hoeveelheid fijn materiaal:**  
Beïnvloedt de stabiliteit van de specie
- **Aanpassen hulpstof (in nauw overleg met de hulpstof leverancier):**  
Beïnvloedt de consistentie en de mogelijk de verwerkingstijd
- **Aanpassen cement:**  
Beïnvloedt de sterkte-ontwikkeling, de verwerkingstijd en de stabiliteit. Voor alle duidelijkheid: dezelfde PCE met een ander cement kan grote verschillen geven in de eigenschappen van de specie en/of het beton. Hier is sprake van grote interactie tussen deze twee materialen.

Op basis van bovenstaande aspecten en de ervaring die met specifieke hulpstoffen of hulpstofcombinaties wordt opgedaan, kan uiteindelijk een optimale keuze worden gemaakt. Het ligt voor de hand dat hierbij ook de kosten van de hulpstof in relatie tot het beoogde effect een rol spelen.

Het combineren van PCE's met bijvoorbeeld superplastificeerders op basis van melamine-naftaleensulphonaat kan tot ongewenste effecten leiden. De combinatie moet daarom altijd vooraf worden beoordeeld.

NEN-EN 206 geeft in artikel 5.2.6 aan dat indien bij vloeibare hulpstoffen de totaal te doseren hoeveelheid hulpstof meer is dan 3 liter per m<sup>3</sup> het watergehalte van de hulpstof moet worden meegeteld bij de berekening van de water-cementfactor. Dit houdt logischerwijs ook in dat het in mindering moet worden gebracht op de hoeveelheid aanmaakwater om de gewenste wcf te realiseren.

Indien bijvoorbeeld in een betonmengsel 6,25 l hulpstof met een vaste stofgehalte van 20% wordt verwerkt, moet  $0,8 \times 6,25 = 5$  liter water worden opgeteld bij het totaal effectief watergehalte. Om er voor te zorgen dat de beoogde water-cementfactor gelijk blijft, zal de hoeveelheid aanmaakwater met deze 5 liter moeten worden verminderd.

Indien bij het vaststellen van de benodigde hoeveelheid plastificeerder geen rekening is gehouden met de correctie op het watergehalte, zal het effect van de toepassing van de plastificeerder daardoor wat kleiner zijn.