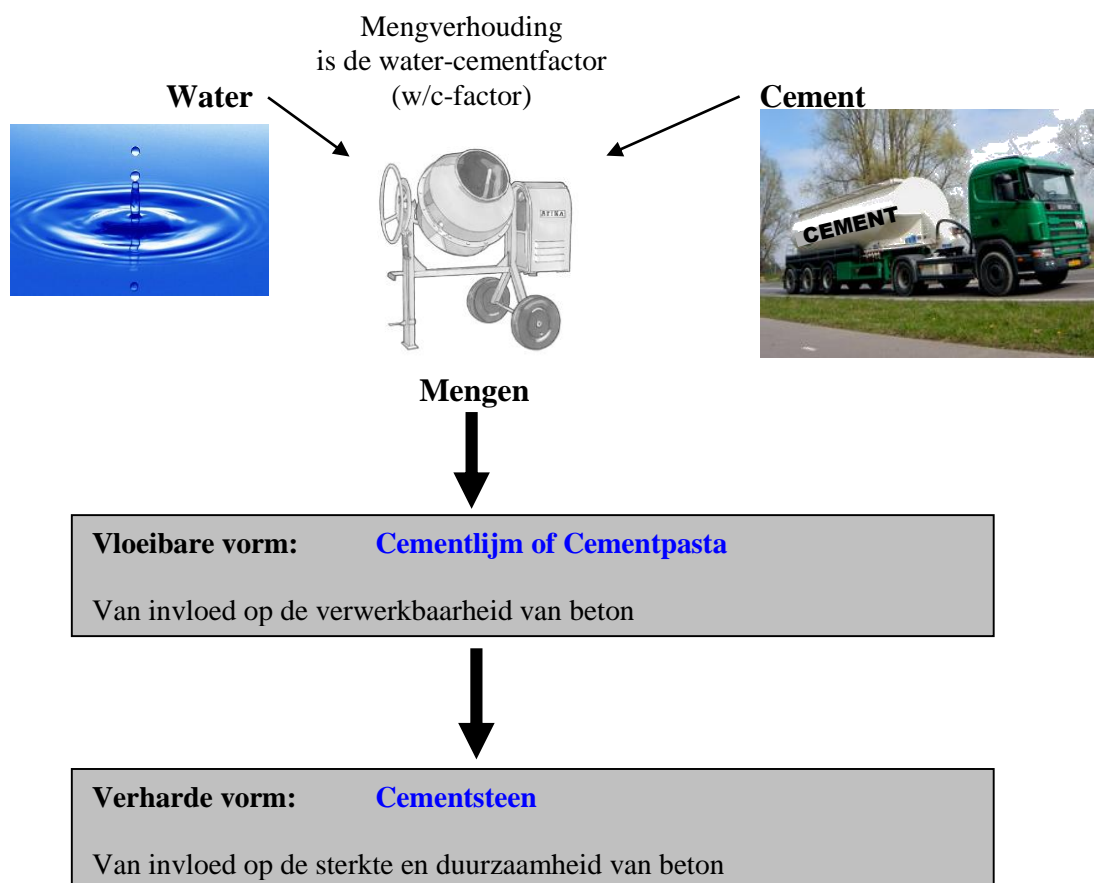


## 4 DE LIJM

Met lijm plakken we dingen aan elkaar. De lijm die we in dit lesboek bespreken is de lijm die de toeslagkorrels aan elkaar plakt en daarmee het materiaal beton eigenschappen geeft die nodig zijn om ermee te kunnen bouwen. In beton bestaat deze lijm uit water en cement. De lijm wordt in de vloeibare fase 'cementlijm' of 'cementpasta' genoemd. De belangrijke eigenschappen van de cementlijm zien we vooral terug in de verwerkbaarheid van de betonspecie.

In de verharde fase wordt de lijm 'cementsteen' genoemd. De eigenschappen van de cementsteen zijn van grote invloed op de sterkte en de duurzaamheid van beton.

Om inzicht te krijgen in de voor beton belangrijke eigenschappen: Sterkte en duurzaamheid is het van groot belang enige kennis van de cementsteen hebben. Daarom gaan we eerst in op de cementsteen en hoe deze wordt gevormd. Daarna kijken we naar de invloed van de verhouding water/cement op de cementlijm en de cementsteen vertaald naar de eigenschappen van beton.



*Figuur 4.1 De Lijm.*

<b>INHOUDSOPGAVE</b>	<b>Pag.</b>
4.1	Cementsteen ..... 4-3
4.1.1	Vorming van cementsteen ..... 4-4
4.1.2	Hydratatiegraad ..... 4-5
4.1.3	Poriën in de cementsteen ..... 4-5
4.1.3.1	Capillaire poriën..... 4-5
4.1.3.2	Gelporiën..... 4-6
4.1.3.3	Luchtbellen..... 4-6
4.1.3.4	Microscheuren..... 4-7
4.1.3.5	Hydratatie krimp ..... 4-7
4.2	Water-cementfactor ..... 4-8
4.2.1	Invloed op de duurzaamheid..... 4-9
4.2.1.1	Permeabiliteit ..... 4-9
4.2.1.2	Relatie water-cementfactor, permeabiliteit en duurzaamheid... 4-10
4.2.2	Invloed op de druksterkte ..... 4-11
4.2.3	Invloed op de verwerkbaarheid ..... 4-11
4.3	Overige invloeden op 'De Lijm'..... 4-12
4.3.1	Invloed van de fijnheid van het cement..... 4-12
4.3.2	Invloed van de temperatuur ..... 4-13
4.3.3	Invloed van de materialen water en cement ..... 4-14
4.4	Water ..... 4-15
4.4.1	Herkomst van water..... 4-15
4.4.2	Bepaling van de geschiktheid van water ..... 4-16
4.4.2.1	Stap 1: Eerste beoordeling ..... 4-17
4.4.2.2	Stap 2: Betononderzoek ..... 4-17
4.4.2.3	Stap 3: Aanvullende chemische analyse ..... 4-19
4.5	Cement en bindmiddel..... 4-21
4.5.1	Bestanddelen voor cement en bindmiddelen ..... 4-21
4.5.1.1	Hydraulisch materiaal ..... 4-21
4.5.1.2	Latent hydraulisch materiaal ..... 4-29
4.5.1.3	Puzzolaan ..... 4-32
4.5.1.4	Inert materiaal. .... 4-35
4.5.1.5	Amorf en kristallijn ..... 4-35
4.5.1.6	Invloed van de belangrijkste bestanddelen op de lijm ..... 4-37
4.5.2	Cement..... 4-39
4.5.2.1	Cementsoorten..... 4-39
4.5.2.2	Sterkteklassen voor cement..... 4-42
4.5.2.3	Cementbenamingen..... 4-43
4.5.2.4	Speciale eigenschappen..... 4-43
4.5.2.5	Toepasbare cementsoorten in beton ..... 4-48
4.5.3	Bindmiddel ..... 4-48
4.5.3.1	Bindmiddelfunctie volgens de betonvoorschriften..... 4-49
4.5.3.2	Bindmiddelfunctie volgens CUR-Aanbeveling 48..... 4-51
4.6	Vulstoffen..... 4-52

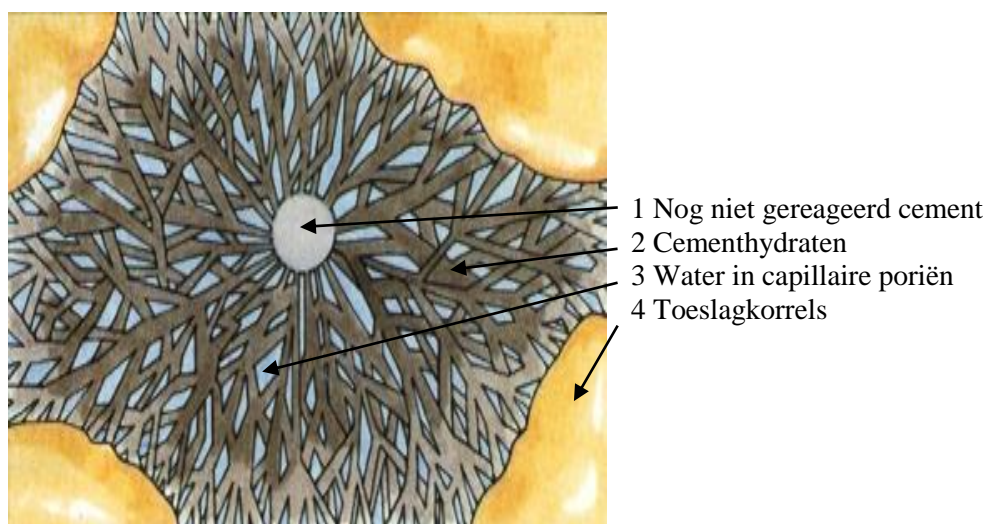
## 4.1 Cementsteen

Cementsteen is de verharde lijn tussen de toeslagkorrels. Dit is meestal het grijze materiaal dat zichtbaar is tussen de grind en zandkorrels in beton zoals weergegeven in figuur 4.2.

Omdat de cementsteen een zeer complex geheel is, moeten we, voor een goed begrip, overstappen naar een eenvoudig visueel model. Modellen zijn nooit de exacte waarheid, maar helpen wel om te begrijpen hoe sommige mechanismen werken. Dit visuele cementsteen model bestaat uit cementsteen die is gevormd uit portlandcement en water, gelegen tussen een aantal toeslagkorrels (zie figuur 4.3).



*Figuur 4.2 Cementsteen in de verharde lijn tussen de toeslagkorrels.*



*Figuur 4.3 Eenvoudige visuele modellering van cementsteen.*

De cementsteen wordt gevormd door de reactie van cement met water. We noemen in dit visuele model (zie figuur 4.3) al het materiaal tussen de vier toeslagkorrels in de hoeken:

de cementsteen. In de cementsteen van dit visuele model zijn de volgende materialen aanwezig:

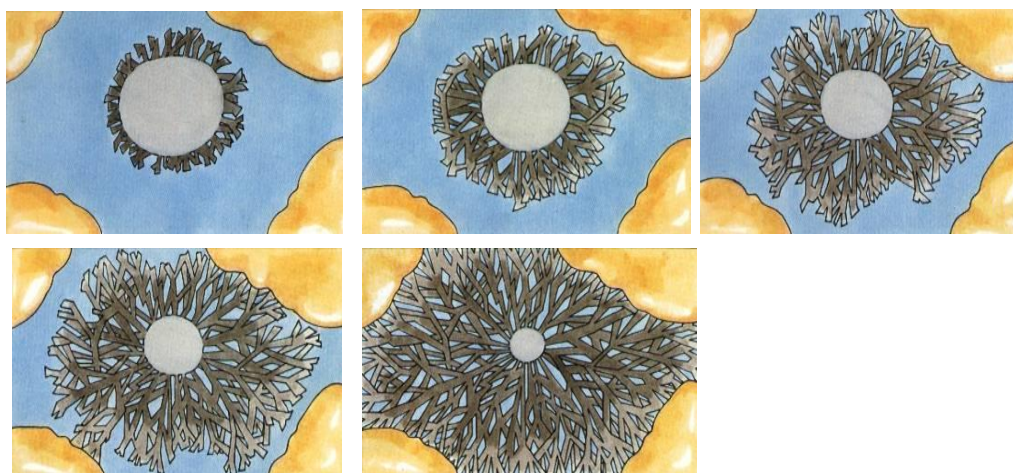
1. Nog niet gereageerde cement  
Cementkorrels reageren van buiten naar binnen. Door de tijd heen zal er steeds meer van de cementkorrel gaan reageren. Het duurt heel lang (jaren) voordat al het cement heeft gereageerd met water. In de cementsteen is dan ook altijd wel niet gereageerd cement te vinden.
2. Cementshydraten  
De cementshydraten zijn het reactieproduct van cement en water. Deze cementshydraten vormen een soort web van kabels tussen de toeslagkorrels. Dit is de werkelijke lijmverbinding die bestaat uit de calciumsilicaathydraten (CSH). Wat opvalt, is dat het geen dichte structuur heeft. Tussen de kabelverbindingen zit ruimte.
3. Water in capillaire poriën  
In de ruimte tussen de cementshydraten zit water. Dit water is het aanmaakwater van het betonmengsel dat nog niet met cement heeft gereageerd. Dit water is nog beschikbaar voor de reactie. Het water vormt een soort kanalenstelsel tussen de cementshydraten door. Deze kanalen noemen we de capillaire poriën.

Als we de cementsteen als geheel beschouwen dan lijkt het een poreus materiaal, waar gemakkelijk water in en uit kan. Er zijn veel poriën aanwezig. Voordat we op deze poriën verder ingaan, kijken we eerst hoe de cementsteen in dit eenvoudige model is ontstaan.

#### 4.1.1 Vorming van cementsteen

De vorming van cementsteen is de overgang van de vloeibare cementlijm naar de verharde cementsteen fase. Het is de fase waarin de werkelijke reactie van cement met water op gang komt. In de tijd gezien begint deze fase een aantal uren na aanmaak van de betonspecie. De eerste uren na aanmaak wordt ook wel de 'dormante' periode genoemd en wil zeggen de slaaperperiode van cement. In deze 'dormante' periode wordt de betonspecie gemengd, getransporteerd, gestort in de mal, verdicht en nabehandeld. Daarna mag de cementsteen gevormd worden en is de 'slaaperperiode' van het cement ten einde. De reactie kan van start.

In figuur 4.4 wordt in het eenvoudige visuele model de vorming van de cementsteen geschematiseerd.



*Figuur 4.4 Vorming van cementsteen in een eenvoudig visueel model.*

Eerst is er alleen cement met water. Als de reactie start komen er kleine cementhydraten uit de cementkorrel die van buiten naar binnen reageert met water.

Bij verdergaande hydratatie (dit is een ander woord voor de reactie van cement met water) worden de cementhydraten steeds langer en grijpen op een gegeven moment de toeslagkorrels vast. De eerste prille lijmverbinding is nu tot stand gebracht.

Nog verdere hydratatie levert een dicht web van cementhydraten op. De cementkorrel wordt tijdens de hydratatie steeds kleiner en de hoeveelheid water neemt af.

#### 4.1.2 Hydratatiegraad

De hydratatiegraad van cement is een aanduiding voor de hoeveelheid cement die reeds heeft gereageerd. Tijdens de vorming van de cementsteen reageert er steeds meer cement en zal de hydratatiegraad langzaam toenemen.

De hydratatiegraad kunnen we berekenen door de hoeveelheid gereageerd cement te delen door de oorspronkelijke hoeveelheid cement. De hydratatiegraad wordt aangeduid met een getal tussen de 0 en de 1.

$$\text{Hydratatiegraad} = \frac{\text{Hoeveelheid gereageerd cement [kg]}}{\text{Oorspronkelijke hoeveelheid cement [kg]}}$$

Als de betonspecie wordt verwerkt is de hydratatiegraad nog 0, als beton 28 dagen is verhard is de hydratatiegraad ongeveer 0,7. Een hydratatiegraad van 1 wordt pas na zeer veel jaren (of soms nooit) bereikt, mits er voldoende water voorhanden is.

#### 4.1.3 Poriën in de cementsteen

Poriën zijn holle ruimten in een vaste stof. Poriën kunnen als afzonderlijke, gesloten ruimten aanwezig zijn dan wel als min of meer doorlopende kanalen. Ze zijn gevuld met gas(lucht) en/of vloeistof. De afmetingen en de *structuur* zijn bepalend voor het gedrag van het poreuze materiaal. Poriën zijn rechtstreeks van invloed op:

- de sterkte van het materiaal,
- de mogelijkheid en de mate van transport van gassen, vloeistoffen en ionen,
- de mogelijkheid van bevriezen van water in de poriën
- de gevoeligheid voor uitdrogen.

Poriën in beton bevinden zich in de cementsteen en bevatten water of lucht. De beweeglijkheid van het water in deze poriën en het gemak waarmee water uit het poriesysteem verdamppt, hebben invloed op de sterkte en de duurzaamheid van beton. Daarom bespreken we de poriën in de cementsteen, ingedeeld naar de wijze waarop zij water vasthouden.

##### 4.1.3.1 *Capillaire poriën*

De belangrijkste poriën in de cementsteen zijn de zogenaamde capillaire poriën. Aanmaakwater dat nog niet voor de reactie met cement is gebruikt, is opgeslagen in de capillaire poriën. Aanvankelijk vormen deze een min of meer doorlopend kanalenstelsel in de cementsteen. Door steeds verdergaande hydratatie zal het volume aan capillaire poriën afnemen.

Aantal en afmetingen van deze poriën zijn sterk afhankelijk van de water-cementfactor en de hydratatiegraad. Met een gemiddelde afmeting van deze poriën, variërend van circa 100 tot 1000 nanometer (nm), zijn ze voldoende groot voor water om te kunnen bevriezen. Tevens zijn dit de poriën waar relatief eenvoudig water uit kan verdampen als ze in contact staan met de buitenlucht.

Water kan vrij bewegen door de capillaire poriën. De mate waarin hangt sterk af van de porieafmetingen. Bij voortgaande hydratatie groeien de capillaire poriën steeds verder dicht en wordt de beweeglijkheid van het water in deze poriën steeds kleiner.

#### 4.1.3.2 *Gelporiën*

In de cementshydraten zitten ook poriën. Dit zijn de zogenoemde gelporiën. De naam gelporiën komt van het feit dat de cementshydraten ook wel cementgel genoemd wordt. Het zijn zeer kleine poriën met een diameter van 0 tot 2 nm (*nanometer*, één miljoenste mm); een afmeting in de orde van grootte van de afmetingen van watermoleculen.

Laten we dit eens vereenvoudigen. Een cementshydraat vergelijken we met een stuk gedraaid touw (figuur 4.5). De kabel zelf is bijvoorbeeld een cementshydraat waarmee we iets aan elkaar vast kunnen maken. In het gedraaide touw zijn heel veel kleine draadjes aanwezig met daartussen kleine holle ruimten. Daarmee zou je de gelporiën kunnen vergelijken.

Vochttransport in deze poriën is vrijwel onmogelijk. Het vriespunt van water is in deze smalle kanaaltjes gedaald tot in ons klimaat onbereikbaar lage waarden. Voor de betonpraktijk kunnen deze poriën als volkomen dicht worden beschouwd. De gelporiën zijn gevuld met water. Het water zit hier fysisch gebonden in vast.



*Figuur 4.5* Cementshydraten kun je voorstellen als grote kabels van touw.

#### 4.1.3.3 *Luchtbellen*

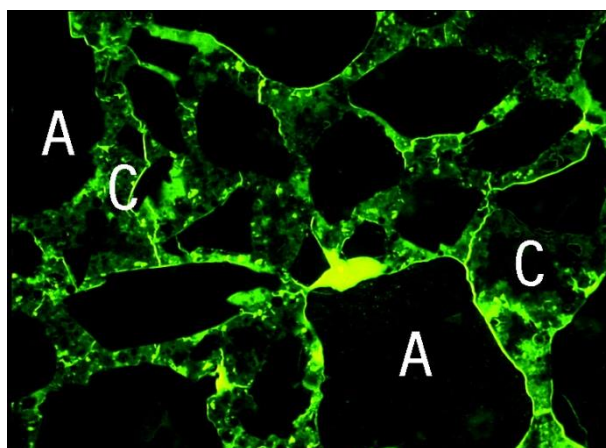
Door het mengen van de grondstoffen komt er lucht in de specie die bij het verdichten grotendeels verdwijnt. Zeer kleine luchtbelletjes hebben echter zo'n grote stabiliteit dat we ze niet door trillen of andere verdichtingsmethoden uit de specie kunnen verdrijven. In vrijwel elk beton zijn deze luchtbelletjes te vinden, die in hoeveelheid variëren van 1 à 2 volumeprocenten. Zowel de hoeveelheid als de grootte is sterk afhankelijk van diverse factoren.

De gemiddelde diameter bedraagt circa 0,1 mm. Kenmerkend voor deze poriën is, dat zij vanaf het begin met lucht zijn gevuld (capillaire poriën zijn aanvankelijk met water gevuld). In tegenstelling tot de capillaire poriën vormen de luchtbelletjes geen doorlopend systeem, ze kunnen zelfs doorlopende, met water gevulde capillaire poriën, onderbreken. Luchtbelletjes die opzettelijk met behulp van een luchtbelvormende hulpstof in betonspecie worden gebracht, vallen eveneens in deze categorie.

#### 4.1.3.4 *Microscheuren*

Hoewel het geen echte poriën zijn, bespreken we hier ook de microscheuren. In de cementsteen komen soms zeer kleine scheurtjes voor zoals weergegeven in figuur 4.6. Microscheuren kunnen in het beton ontstaan doordat de spanning die in het materiaal ontstaat groter is dan de spanning die het beton kan opnemen. Deze spanningen kunnen het gevolg zijn van uitwendige krachten op het beton of inwendige krachten zoals de onderdruk die in capillaire poriën aanwezig is bij autogene krimp.

Microscheuren zijn vaak zo fijn dat ze niet met het blote oog te zien zijn. De afmetingen bedragen 0,001 tot 0,1 mm.



*A = aggregate (toeslagmateriaal),*

*C = cementsteen.*

*Figuur 4.6 Microscheuren.*

Soms komen microscheuren voor in de overgangszone, op de grens van toeslagmateriaal en cementsteen of in de cementsteen zelf. Microscheuren hebben een betekenis omdat ze als scheurinleider kunnen fungeren.

Microscheuren kunnen we ook zien als grote poriën waar watertransport door mogelijk is. Veel microscheurvorming heeft dan ook een negatief effect op de duurzaamheid van beton.

#### 4.1.3.5 *Hydratatie krimp*

Hydratatie krimp wordt ook wel chemische krimp of verhardingskrimp genoemd. Dit is de krimp die optreedt als gevolg van de reactie van portlandcement met water.

De gevormde cementsteen heeft een kleiner volume dan het volume van de hoeveelheid water en cement die met elkaar hebben gereageerd. De volume verkleining levert extra capillair porievolume op. De hydratatiekrimp heeft geen invloed op de afmetingen van de te maken betonconstructie.

De capillaire poriën die door deze hydratatiekrimp ontstaan, vullen zich met lucht of water. Afhankelijk van de omgeving waar ze staan.

Een betonkubus in de waterbak zal bij doorgaande hydratatie steeds zwaarder worden omdat er steeds meer water in het beton wordt opgenomen. Ligt eenzelfde kubus buiten, dan zal dat niet het geval zijn omdat de extra poriën zich dan volzuigen met lucht.

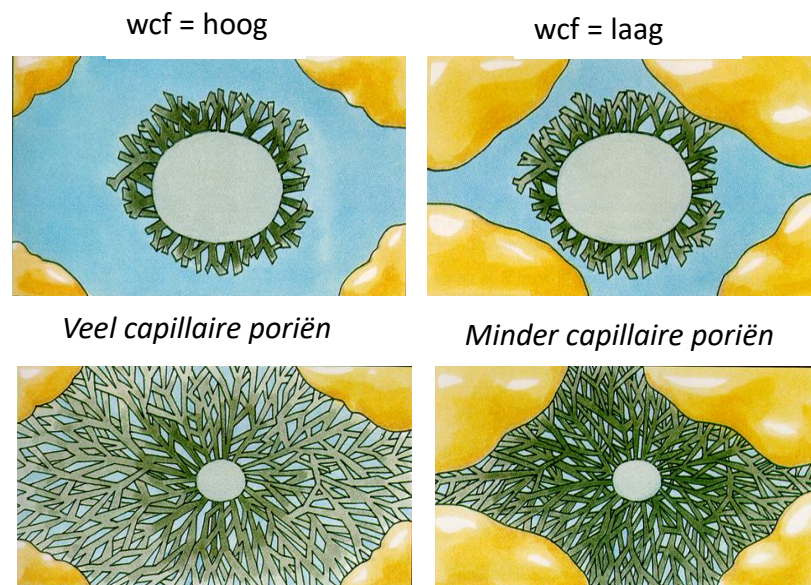
## 4.2 Water-cementfactor

De water-cementfactor (w/c-factor) speelt een sleutelrol in de kwaliteit van beton. Het heeft direct invloed op de sterkte en de duurzaamheid van het verharde beton. Indirect heeft het ook invloed op de verwerkbaarheid van de betonspecie.

De water-cementfactor is een eenheidloos getal dat de massaverhouding weergeeft tussen water (W) en cement(C). De water-cementfactor wordt berekend door de massa aan water te delen door de massa aan cement. De water-cementfactor voor beton ligt meestal ergens tussen de 0,3 en de 0,7. Bij een constant cementgehalte zal er bij een hogere water-cementfactor meer water aanwezig zijn in het beton dan bij een lagere water-cementfactor.

$$\text{w/c-factor} = \frac{W}{C}$$

Om de invloed van de water-cementfactor op beton te ontdekken gaan we terug naar ons eenvoudige model van de cementsteen. In figuur 4.7 is de situatie van een hoge en een lage water-cementfactor weergegeven.



*Figuur 4.7 Invloed van de water-cementfactor op de poriestructuur van de cementsteen bij een constant cementgehalte.*

In de bovenste plaatjes van figuur 4.7 is goed zichtbaar dat bij een lage water-cementfactor de toetslagkorrels dichter bij elkaar zitten. De cementkorrel is in beide gevallen even groot. Er is bij een hoge water-cementfactor meer water aanwezig.

In de onderste plaatjes van figuur 4.7 is het resultaat weergegeven op een moment dat er evenveel cement heeft gereageerd (gelijke hydratatiegraad).



Bij een hoge water-cementfactor veel meer waterkanalen (capillaire poriën) aanwezig zijn dan bij een lagere water-cementfactor.

Dit is logisch, immers de capillaire poriën worden gevormd door nog niet gebruikt water voor de hydratatie. Bij gelijke hydratatiegraad, zoals hier het geval is, is er evenveel water verbruikt. Dan blijft er bij een hoge water-cementfactor dus meer water over dan bij een lage water-cementfactor.

Deze grotere hoeveelheid capillaire poriën (bij de hoge water-cementfactor) vormen een kanalenstelsel waar zich makkelijker water met eventuele schadelijke stoffen in kan verplaatsen dan bij een lager water-cementfactor. Een lagere water-cementfactor geeft een dichtere structuur van de cementsteen. Dit wordt ook wel een lagere permeabiliteit genoemd en levert een duurzamer beton op.

Een ander verschil is de sterkte van de lijmverbinding. Doordat bij een lagere water-cementfactor de toeslagkorrels dichter bij elkaar liggen is er een sterkere lijmverbinding gevormd, wat resulteert in een hogere druksterkte. Hierbij moeten worden opgemerkt dat de mate van hechting van de lijmverbinding aan de toeslagkorrel ook van grote invloed is op de druksterkte.

Dat ook de verwerkbaarheid door de water-cementfactor wordt beïnvloed, kunnen we bij de bovenste plaatjes van figuur 4.7 al zien. Bij een hoge water-cementfactor zal de afstand tussen de toeslagkorrels groter zijn waardoor de verwerkbaarheid wordt beïnvloed. Dit ligt iets complexer en daar gaan we in paragraaf 4.2.3 verder op in.

#### 4.2.1 Invloed op de duurzaamheid

In het voorgaande gedeelte hebben we gezien dat de water-cementfactor invloed heeft op de hoeveelheid capillaire poriën. Om de overstap te maken naar de duurzaamheid van beton dat via de milieuklassen wordt geregeld moeten we eerst iets meer weten over het begrip permeabiliteit.

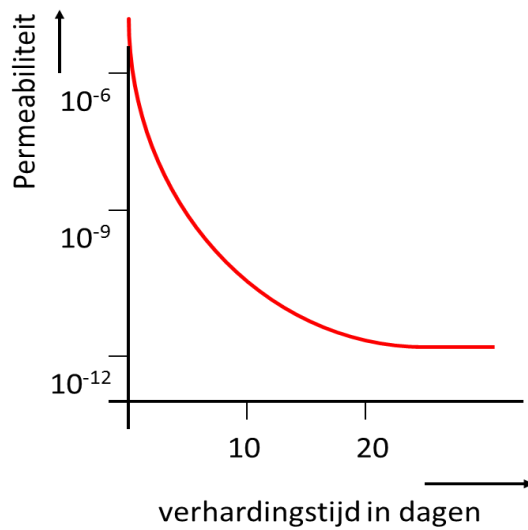
##### 4.2.1.1 *Permeabiliteit*

Het gemak waarmee water zich door een poriënsysteem kan bewegen noemen we de *permeabiliteit*. De permeabiliteit voor water wordt uitgedrukt in de snelheid, in m/s, waarmee een constante waterstroom, onder een druk van 1 m waterkolom, door een laag van 1 m van het te onderzoeken materiaal stroomt. Die snelheid is voor steenachtige materialen uiteraard zeer klein. Voor grindbeton in de orde van  $10^{-10}$  m/s. Voor alleen de cementsteen is dit afhankelijk van de water-cementfactor en de verhardingstijd (hydratatiegraad), en kan variëren van  $10^{-6}$  tot  $10^{-12}$  m/s.

Voor cementsteen bestaat een nauwe samenhang tussen capillair poriënvolume en permeabiliteit. Aangezien het poriënvolume met het voortschrijden van de hydratatie afneemt, neemt ook de permeabiliteit af. Figuur 4.8 geeft een beeld van de afname van de permeabiliteit van cementsteen - met een water-cementfactor van 0,70 - als functie van de verhardingstijd (hydratatiegraad).

De hydratatie verloopt de eerste dagen zeer snel. De permeabiliteit van cementsteen wordt dan per dag circa tienmaal zo klein! Na enkele dagen begint de hydratatie weliswaar geleidelijk aan langzamer te verlopen, maar na een maand is de permeabiliteit toch ruim

een miljoen maal zo klein als bij de start! De cementsteen is ruim een miljoen maal zo dicht geworden.



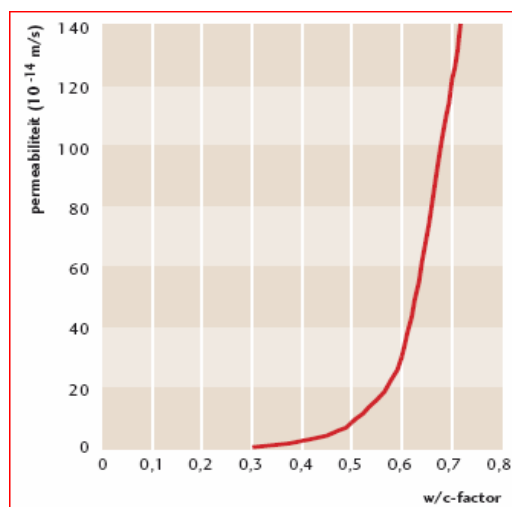
Figuur 4.8 Verband tussen permeabiliteit en verhardingstijd (w/c-factor = 0,70).

#### 4.2.1.2

#### Relatie water-cementfactor, permeabiliteit en duurzaamheid

Permeabiliteit heeft direct te maken met duurzaamheid. Hoe lager de permeabiliteit wordt hoe duurzamer het beton wordt. Hoe dichter het materiaal is (lage permeabiliteit), hoe moeilijker schadelijke stoffen het beton kunnen binnendringen. Voor de duurzaamheid spelen de gelporiën daarom geen rol; ze zijn ondoordringbaar. De hoeveelheid, de afmetingen en het al of niet doorlopen van de capillaire poriën zijn bepalend voor de duurzaamheid. De capillaire poriënstructuur hangt af van de water-cementfactor en de verhardingstijd.

In figuur 4.9 is het verband tussen de water-cementfactor en de permeabiliteit weergegeven bij een gelijke hydratatiegraad.



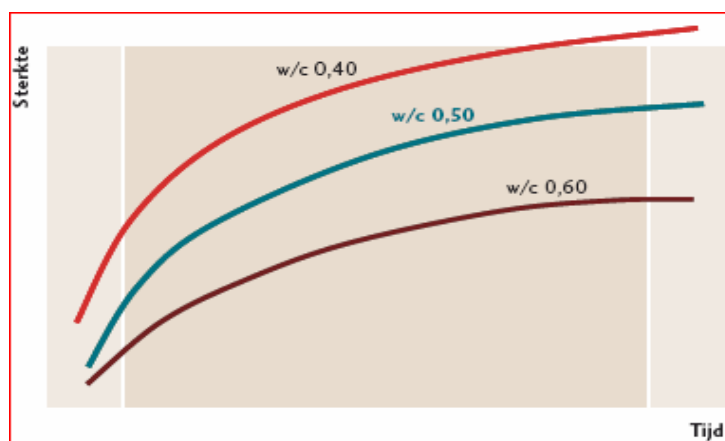
Figuur 4.9 Invloed van de water-cementfactor op de permeabiliteit en daarmee de duurzaamheid van beton.

Hier zien we dat de permeabiliteit extreem toeneemt als we van een water-cementfactor van 0,6 naar 0,7 bewegen. Voor een duurzaam beton willen we een lage permeabiliteit. Een lagere water-cementfactor geeft een duurzamer beton.

Wat ook goed is om vast te stellen is dat we in de praktijk meestal werken met water-cementfactor van 0,40 tot 0,55. Nu is duidelijk waarom we niet hoger gaan dan een water-cementfactor van 0,7 en waarom er via de milieuklassen eisen aan de water-cementfactor gesteld worden t.b.v. de duurzaamheid.

#### 4.2.2 Invloed op de druksterkte

In het model van figuur 4.7, liggen bij een lage water-cementfactor de toeslagkorrels dichter bij elkaar. Er ontstaat dan een dichtere web van cementshydraten en de lijmverbinding is dan sterker. Hieruit is te verklaren dat bij een lagere water-cementfactor de druksterkte van beton hoger wordt, zoals weergegeven in figuur 4.10.

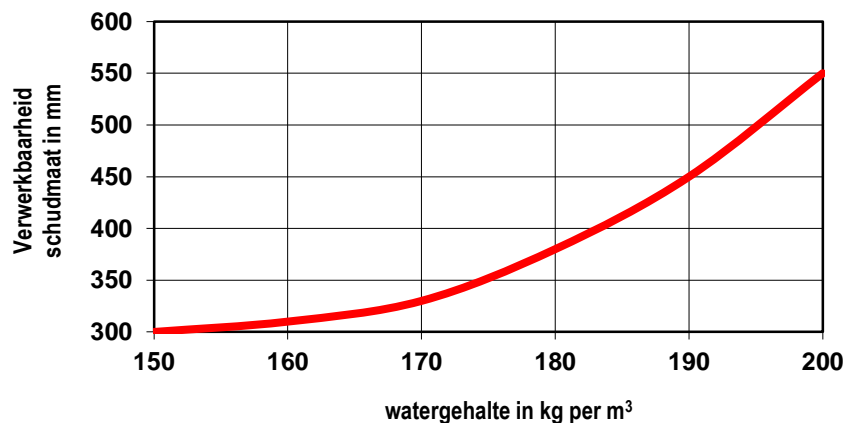


*Figuur 4.10 Invloed van de water-cementfactor op de druksterkte van beton.*

#### 4.2.3 Invloed op de verwerkbaarheid

Bij een hogere water-cementfactor zit er, uitgaande van een constante cementmassa, meer water in het beton. Meer water in beton zorgt ervoor dat de toeslagkorrels verder uit elkaar liggen en makkelijker over elkaar rollen. Dit heeft tot gevolg dat de verwerkbaarheid toeneemt. Dit blijkt ook uit figuur 4.11 waarin de relatie tussen het watergehalte in beton en de verwerkbaarheid, gemeten met de schudmaat is weergegeven.

Er zijn naast de water-cementfactor nog vele andere betontechnologische aspecten die van invloed zijn op de verwerkbaarheid van beton. Denk hierbij naast het watergehalte aan bijvoorbeeld: korrelverdeling van het toeslagmateriaal, gebruik van vulstoffen, gebruik van plastificeerders enz. Verwerkbaarheid komt op vele plaatsen in dit boek voor.



*Figuur 4.11 Voorbeeld van de invloed van het watergehalte van beton op de verwerkbaarheid van beton.*

### 4.3 Overige invloeden op 'De Lijm'

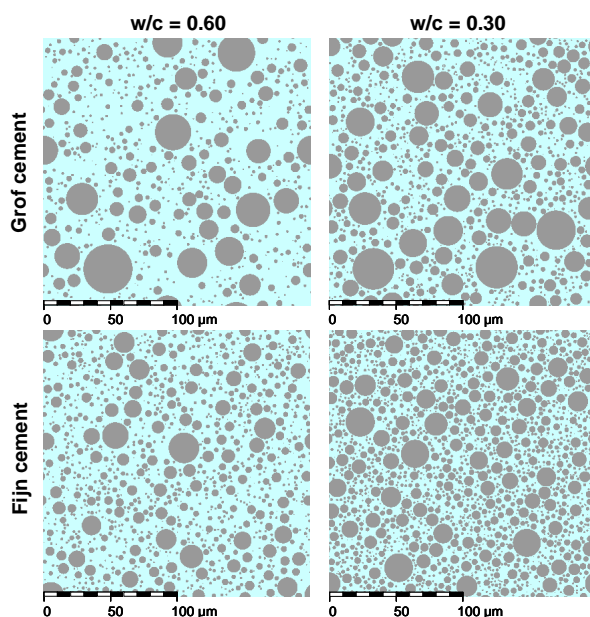
In de vorige paragrafen hebben we een eenvoudig visueel model van de cementsteen beschouwd. In de praktijk is het een enorm complex geheel waar veel factoren op van invloed zijn. Als eerste moeten we ons realiseren dat er tussen toeslagkorrels niet één maar zeer veel cementkorrels in het water aanwezig zijn die allemaal reageren met water tot cementsteen. Dat betekent dat de uiteinden van de cementshydraten (de kabels) niet altijd aan toeslagkorrels vastzitten maar ook aan andere cementshydraten. Naast de reeds besproken mengverhouding tussen water en cement willen we nog bij 3 belangrijke invloedsfactoren stilstaan, te weten:

- de maalfijnheid van het cement;
- de temperatuur;
- de materialen water en cement.

Bij beton moeten we ons altijd afvragen wat er gebeurt in de verschillende fasen van de lijm als we iets aan beton toevoegen. Denk bijvoorbeeld aan hulpstoffen of kleurstoffen (Hoofdstuk 5). Deze zitten ook tussen de cementkorrels in het water en moeten daar hun werk doen. Alles wat we veranderen aan het beton heeft invloed op de eigenschappen van de lijm en dus de eigenschappen van beton. We kijken nu eerst naar de hierboven genoemde 3 invloedsfactoren.

#### 4.3.1 Invloed van de fijnheid van het cement

De fijnheid van het cement is van grote invloed op de lijm. In de vloeibare fase zal een fijner gemalen poeder meer water vragen voor eenzelfde verwerkbaarheid (vloei). Daarnaast heeft de fijnheid ook invloed op de verharde lijm (de cementsteen). Om dit te illustreren bekijken we het volgende model dat is weergegeven in figuur 4.12.



*Figuur 4.12 Invloed van de fijnheid van cement en de water-cementfactor op de lijm.*

In dit model is de situatie weergegeven dat cement is gemengd met water en er nog geen reactie heeft plaats gehad. De hydratatiegraad is in alle figuren 0.

Grof en fijngemalen cement zijn bij verschillende water-cementfactoren weergegeven. Als we de figuren goed bekijken zien we dat bij de hoge water-cementfactor 0,6 de korrels meer uit elkaar liggen dan bij de lage water-cementfactor 0,3. Dat is logisch: er is in verhouding meer water ten opzichte van cement aanwezig dan bij de hoge water-cementfactor.

Ook kunnen we zien dat bij de keuze voor fijner cement, het totale watervolume weliswaar niet veranderd (er is nog steeds evenveel water in verhouding met het cement) maar de afstand tussen de cementkorrels kleiner wordt. Als de hydratatie van cement start zal dit nu resulteren in een poriesysteem met kleinere poriën.

Fijner gemalen cement heeft uiteindelijk twee effecten:

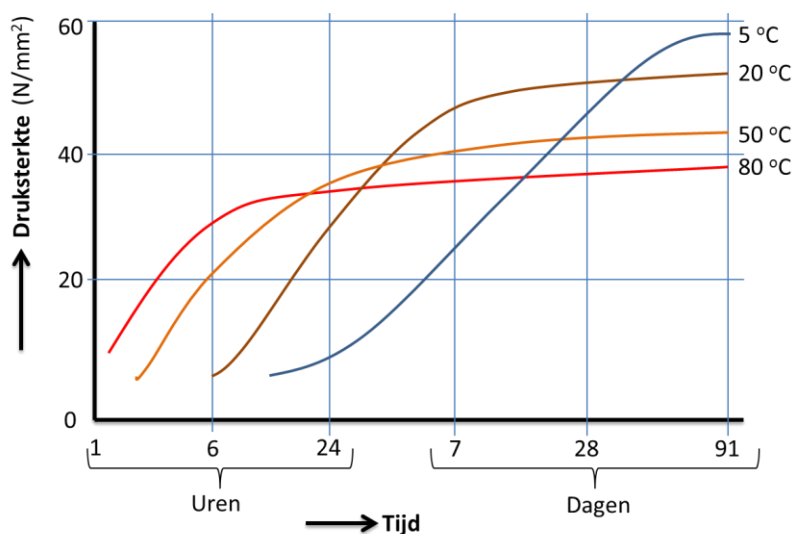
- het oppervlak van de cementkorrels dat in contact is met water is groter. Er is een groter reactieoppervlak. Dit betekent dat de *hydratatiesnelheid hoger* wordt waardoor in beton de beginsterkte ontwikkeling hoger ligt.
- de afstand tussen de fijner gemalen cementkorrels is kleiner. Dit betekent dat er na hydratatie een *capillair poriënsysteem ontstaat met kleinere poriën*.

Deze kennis is de basis voor het ontwerpen van betonsamenstellingen. Immers porievolume en porieverdeling zijn de belangrijkste parameters in relatie tot de twee belangrijkste eigenschappen van verhard beton: sterkte en duurzaamheid.

#### 4.3.2 Invloed van de temperatuur

De temperatuur heeft ook een grote invloed op de lijm en met name de druksterkte van de cementsteen. In figuur 4.13 is deze relatie weergegeven. Het sterkteverloop van een verhardende cementpasta bij 5, 20, 50 en 80 °C door de tijd heen verschilt nogal.

Uit deze figuur blijkt dat een hogere temperatuur een hogere beginsterkte geeft en een iets lagere eindsterkte.



Figuur 4.13 Invloed van de temperatuur op de sterkteontwikkeling van de lijm.

De verklaring hiervoor is dat door de hogere temperatuur de reactiesnelheid hoger wordt. De structuur van de cementsteen wordt sneller gevormd, maar daardoor ook minder geordend.

Dit levert als voordeel op dat er veel eerder sterkteontwikkeling plaatsvindt en als nadeel dat de minder geordende structuur op de langere termijn minder druksterkte heeft dan een meer geordende structuur die ontstaat als de reactie minder heftig verloopt.

Voor de eindsterkte en duurzaamheid zou het dus het beste zijn om de verharding niet bij te hoge temperaturen te laten verlopen.

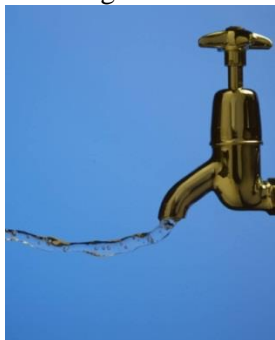
Om economische redenen wordt in de praktijk echter vaak het omgekeerde toegepast. Een zo hoog mogelijke begintemperatuur met een maximale beginsterkte ontwikkeling. Hierdoor kan het beton snel uit de mal worden gehaald en weer een nieuwe worden gestort. De voordelen hiervan moeten wel altijd worden afgewogen tegen de nadelen van een lagere 28-daagse sterkte.

#### 4.3.3 Invloed van de materialen water en cement

De lijm bestaat uit twee verschillende materialen. Inderdaad water en cement. In de volgende paragrafen worden de invloeden van deze materialen op de eigenschappen van de lijm beschreven. Eerst kijken we naar het water. Hierbij gaat het erom welk water wel en niet geschikt is om te gebruiken in beton. Daarna kijken we naar cement. In hoofdstuk 5 staan we uitgebreid stil bij de invloed van de hulpstoffen op het beton en dus ook de cementsteen.

#### 4.4 Water

Water lijkt een eenvoudig onderwerp. Gewoon drinkwater zal toch wel bruikbaar zijn? Dat klopt, maar drinkwater is niet overal beschikbaar waar beton moet worden geproduceerd en bovendien is drinkwater relatief duur. Er kan misschien best met ander water goed beton worden gemaakt.



*Figuur 4.14 Drinkwater.*

In dit hoofdstuk worden daarom eerst de eisen die aan aanmaakwater worden gesteld conform NEN-EN 1008: 2002 besproken. Deze norm beschouwt eerst de herkomst van het water en geeft dan aan welke onderzoeken nodig zijn om de geschiktheid van water voor beton aan te tonen.

##### 4.4.1 Herkomst van water

De herkomst van water bepaalt of er nader onderzoek nodig is. In tabel 4.1 is een overzicht gegeven uit de Europese norm waarin het water naar herkomst is ingedeeld. In de tabel valt op dat indien gekozen wordt voor iets anders dan drinkwater er altijd nader onderzoek naar de geschiktheid van dat water nodig is.

*Tabel 4.1 Verschillende herkomsten van water.*

Herkomst	Beschrijving	Geschikt?	Opmerkingen
Drinkwater	Dit water is altijd onverdacht.	Ja	
Teruggewonnen water op de betonindustrie	Ook wel spoelwater of slibwater geheten.	Ja, mits	Zie paragraaf 4.4.3. voor water met een vol. massa > 1010 kg/m <sup>3</sup>
Bronwater Grondwater Oppervlaktewater	Direct uit de natuur gehaald water	Ja, mits	
Industriewater	Ruw gezuiverd water dat via leidingen wordt aangeleverd	Ja, mits	
Zeewater of brakwater	Vanwege de aanwezigheid van chloride in het water. Chloridengehalte van beton is maatgevend.	Beperkt	Meestal alleen geschikt voor ongewapend beton
afvalwater of rioolwater		Nee	

#### 4.4.2 Bepaling van de geschiktheid van water

Als geen gebruik wordt gemaakt van drinkwater moeten we ons overtuigen van de geschiktheid van het water voor beton. Hiervoor doorlopen we de volgende stappen.

##### **Stap 1: Eerste beoordeling**

Eerste beoordeling bestaande uit twee delen: een zintuigelijke controle en een basis chemische analyse.

###### *Optie 1:*

Als voldaan wordt aan beide controles mag gekozen worden om of stap 2 of stap 3 uit te voeren om het water goedgekeurd te krijgen.

###### *Optie 2:*

Als niet voldaan wordt aan de basis chemische analyse wordt het water afgekeurd.

###### *Optie 3:*

Als wel voldaan wordt aan de basis chemische analyse en niet aan de zintuigelijke controle moet stap 2 worden gevolgd.

##### **Stap 2: Betononderzoek**

Als voldaan wordt aan het betononderzoek wordt het water goedgekeurd.

##### **Stap 3: Aanvullende chemische analyses**

Als voldaan wordt aan de aanvullende chemische analyse wordt het water goedgekeurd.



*Figuur 4.15 – Oppervlaktewater*



#### 4.4.2.1 *Stap 1: Eerste beoordeling*

De eerste beoordeling bestaat uit twee delen:

- A. een zintuigelijke controle
- B. een basis chemische analyse.

##### A. Zintuigelijke beoordeling

De zintuigelijke beoordeling helpt de technoloog om snel te bepalen of het water kansrijk is om door de testen heen te komen. Na deze beoordeling kan worden bepaald of de overige onderzoeken wel of niet zinvol zijn. Bij deze eerste controle wordt getoetst op de volgende aspecten:

Kleur	Het water moet helder zijn, hooguit een beetje gelig.
Geur	Het water moet natuurlijk ruiken en mag niet stinken.
Schuim	Na flink schudden mag er geen schuimkraag blijven staan.
Bezinksel	Slechts een dun laagje sediment mag er na een half uur aanwezig zijn.
Zuurgraad	De pH-waarde moet groter zijn dan 4.
Humuszuren	Natronloogproef uitvoeren. Maximaal lichtbruine kleur na 1 uur.
Olie en vet	Er mogen geen zichtbare sporen zijn.

Als aan deze controle wordt voldaan dan gaan we over tot de basis chemische analyse. Als niet wordt voldaan, dan kan het water nog steeds worden goedgekeurd. Dan moet het water echter voldoen aan zowel de basis chemische analyse als het betononderzoek van stap 2.

##### B. Basis chemische analyse

Hierbij wordt bepaald of er voor beton schadelijke bestanddelen in het water aanwezig zijn. Als basis moeten we voldoen aan de eisen voor Chloridgehalte, sulfaatgehalte en alkaligehalte. De eisen staan in tabel 4.2. Aan deze basis chemische eisen moet altijd worden voldaan anders wordt het water afgekeurd.

#### 4.4.2.2 *Stap 2: Betononderzoek*

Het betononderzoek omvat een beoordeling van de invloed van het water op de bindtijd en op de sterkteontwikkeling van beton.

Hiervoor wordt een vergelijk gemaakt tussen een referentiebeton gemaakt met gedestilleerd of gedemineraliseerd water en het te onderzoeken beton waarbij alleen het water is vervangen door het te onderzoeken water.

##### *Binding onderzoek*

Het tijdstip van begin binding, gemeten aan een mengsel van cement met water, mag van het te onderzoeken water niet minder zijn dan 1 uur en ten hoogste 25% afwijken van de bindtijd van het referentiemengsel. Het tijdstip van einde binding mag de 12 uur niet overschrijden en eveneens ten hoogste 25% afwijken van de bindtijd van het referentiemengsel. Deze bindtijd wordt gemeten met de zogenoemde Vicat-test (zie kader).

##### *Sterkte onderzoek*

De gemiddelde druksterkte van het beton met het te onderzoeken water moet na 7 dagen verharden ten minste 90% zijn van het referentiebeton.

*Vicat-test: Bepaling van de begin en einde binding*

Voor het bepalen van de begin- en einde binding wordt gebruik gemaakt van de zogenoemde Vicat-test (NEN-EN 196-3). Hierbij wordt cement met water gemengd in een mengverhouding die een gestandaardiseerde verwerkbaarheid oplevert. Een kunststofring (40 mm hoog) wordt gevuld met pasta en geplaatst op een glasplaat. Deze opstelling wordt in een waterbak geplaatst, zodat de bovenzijde van de pasta niet kan uitdrogen. De gehele test heeft plaats bij een temperatuur van 20 °C. Het opstijfgedrag van de pasta wordt nu gemeten door elke 10 minuten een dunne naald met daarop een massa van 300 gram in de pasta te laten zakken.

In het begin zal de naald geheel naar de bodem zakken, maar na verloop van tijd begint cement met water te reageren en zal de pasta opstijven en de naald de bodem niet meer bereiken. Begin binding wordt bereikt als de naald op een afstand van 6 ( $\pm$  3) mm van de bodemglasplaat blijft steken. Er komt een moment dat de naald niet meer de pasta zal binnen dringen. Einde binding wordt bereikt als de naald niet verder dan een 0,5 mm indringt in de pasta.

Deze begin en einde binding hebben een zeer complexe relatie met het opstijfgedrag van beton. We kunnen deze relatie dan ook niet één op één leggen.



*Toestel van Vicat.*

4.4.2.3 *Stap 3: Aanvullende chemische analyse*

In de aanvullende chemische analyse van het water wordt getoetst op de aanwezigheid van chemische elementen die de bindtijd of sterkte van het beton negatief kunnen beïnvloeden. De eisen zijn opgenomen in tabel 4.2.

Tabel 4.2 *Eisen aan de chemische samenstelling van aanmaakwater.*

Element	Mogelijk probleem	Maximaal aanwezigheid in mg/liter		
<b>Basis chemische analyse</b>				
Chloridgehalte	Corrosie van wapening	Ongewapend beton	Gewapend beton	Voorgespannen beton
		4500	1000	500
Sulfaatgehalte (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Sulfaat aantasting	2000		
Alkaliën (als Na <sub>2</sub> O-equivalent)	ASR	1500 (anders maatregelen nemen om ASR te voorkomen)		
<b>Aanvullende chemische analyse</b>				
Suiker	Vertraging van de reactie	100		
Fosfaat (als P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Vertraging van de reactie	100		
Nitraat (als NO <sub>3</sub> )	Corrosie van wapening	500		
Lood (als Pb <sup>2+</sup> )		100		
Zink (als Zn <sup>2+</sup> )		100		

## 4.4.3 Hergebruik van cementslib- en spoelwater

Cementslibwater en spoelwater kunnen in de meeste gevallen prima als (deel van het) aanmaakwater worden gebruikt. Het gaat hier om water dan vrijkomt bij het schoonmaken van bijvoorbeeld betonmixers en installaties alsmede restbetonspecie dat is ontstaan van toeslagmateriaal. In het water bevinden zich dan veel fijne delen van onder andere hydraterend cement. Verder zit in het water resten van alle hulpstoffen, vulstoffen en eventueel spoelmiddel die zijn toegepast.

Bij water met een volumieke massa  $\leq 1010 \text{ kg/m}^3$  mag ervan worden uitgegaan dat het een te verwaarlozen hoeveelheid vaste stof bevat. Het slibwater bevat dan minder dan 20 gram vaste stof per liter water.

Water met een volumieke massa  $> 1010 \text{ kg/m}^3$  wordt beschouwd als slibwater. Voor het gebruik van slib- of spoelwater met een hogere volumieke massa zijn in de bijlage van de norm een aantal eisen en nuttige aanwijzingen opgenomen. Zo wordt opgemerkt dat indien aan beton speciale eisen worden gesteld (schoon beton, voorgespannen beton, beton met luchtbelvormer, zelfverdichtend beton, beton in agressieve milieus enzovoort) rekening moet worden gehouden met de mogelijke invloed van het slibwater op bijvoorbeeld de verwerkbaarheid van beton.

Eisen voor de toepassing van slibwater:

- Van cementslibwater moet tenminste éénmaal per dag de volumieke massa worden bepaald om vast te stellen hoeveel vaste stof het water bevat.
- De hoeveelheid slibwater die men per m<sup>3</sup> doseert, mag niet meer dan 1% (m/m) vaste stof ten opzichte van de totale hoeveelheid toeslagmateriaal bevatten.

*Voorbeeld:*

Gemiddeld bevat een m<sup>3</sup> beton circa 1800 kg toeslagmateriaal. Indien de gedoseerde hoeveelheid aanmaakwater bijvoorbeeld 100 kg per m<sup>3</sup> bedraagt, mag deze dus maximaal circa 18 kg vaste stof bevatten.

*Tabel 4.3 Relatie volumieke massa van het water versus de massa vaste stof.*

Volumieke massa water (kg/l)	Massa vaste stof (kg/l)
1,02	0,038
1,03	0,057
1,04	0,076
1,05	0,095
1,06	0,115
1,07	0,134
1,08	0,153
1,09	0,172
1,10	0,191
1,11	0,210
1,12	0,229
1,13	0,248
1,14	0,267
1,15	0,286

Uit tabel 4.3 kan direct de hoeveelheid vaste stof in kilogram per liter worden afgelezen bij een bepaalde volumieke massa van het cementslibwater. Indien we bijvoorbeeld een volumieke massa van 1,12 kg/l vinden voor het slibwater, bevat dit 0,229 kg vaste stof per liter. Van dit water zouden we dus maximaal  $18/0,229 = 78,6$  liter mogen toevoegen als aanmaakwater. Het eventueel resterende deel van het aanmaakwater is dan bijvoorbeeld leidingwater.

## 4.5 Cement en bindmiddel

Naast water bestaat de lijm uit cement. Cement wordt gedefinieerd als: 'Een hydraulisch materiaal in de vorm van een fijngemalen anorganische poeder dat, na mengen met water, cementpasta of cementlijm oplevert die opstijft en verhardt door de reactie met water. De gevormde cementsteen behoudt zijn sterkte en stabiliteit ook onder water'.

Cementen zijn dus poedervormige producten en die kunnen uit verschillende materialen (hier bestanddelen genoemd) zijn samengesteld.

We moeten echter duidelijk onderscheid maken tussen een cement en een bindmiddel.

### *Cement*

Cement is een kant-en-klaar, in de cementfabriek samengesteld poeder dat voldoet aan de eisen in de cementnorm (NEN-EN 197-1). Een cement bestaat altijd uit een portland-cementklinker die eventueel is aangevuld met één van de bestanddelen uit figuur 4.16. Het cement moet voldoen aan een groot aantal eisen t.a.v. sterkte, vormhoudendheid en binding.

### *Bindmiddel*

Bij de productie van beton, in de betonfabriek of -centrale, kan naast cement ook één van deze bestanddelen (figuur 4.16) direct als grondstof voor beton worden gebruikt. Onder bepaalde voorwaarden kan deze grondstof een deel van het gebruikte cement vervangen. Dit noemen we in de praktijk de bindmiddelfunctie. Een bindmiddel is een combinatie van een cement plus één of meer van de bestanddelen uit figuur 4.16 die in de betonfabriek of -centrale met elkaar worden gemengd. Later in dit hoofdstuk komen we hierop terug.

We gaan nu eerst kijken naar de materialen (bestanddelen) waaruit het cement of het bindmiddel kan bestaan.

### 4.5.1 Bestanddelen voor cement en bindmiddelen

De verschillende bestanddelen voor het cement of bindmiddel zijn onder te verdelen in 4 groepen, te weten:

- hydraulische materialen;
- latent hydraulische materialen;
- puzzolanen;
- inerte materialen.

Een overzicht is weergegeven in figuur 4.16. In de volgende paragrafen gaan we elk van deze groepen bespreken en uitleggen hoe deze materialen samenwerken.

#### 4.5.1.1 *Hydraulisch materiaal*

Het belangrijkste bestanddeel voor cement en bindmiddelen is het hydraulische materiaal. Dit is een stof die reageert met water tot een verhard product.

### **Bestanddelen voor cement en bindmiddel:**

#### Hydraulisch

K: portlandcement klinker

#### Latent hydraulisch

S: gegranuleerde hoogovenslak

#### Puzzolaan

D: Microsilica (silica fume)

P: natuurlijke puzzolanen

Q: gebrande natuurlijke puzzolanen

V: silica houdende poederkoolvliegias

W: calcium houdende poederkoolvliegias

T: gebrande leisteen

#### Inert

L: kalksteenmeel (TOC<sup>a</sup> < 0,50%)<sup>a</sup>

LL: kalksteenmeel (TOC < 0,20%)

<sup>a</sup> TOC = Totaalgehalte aan organische bestanddelen

*Figuur 4.16 Bestanddelen voor cement en bindmiddel.*

Bijzonder is dat het gevormde materiaal na verharding niet meer oplost in water. Het enige hydraulische bindmiddel dat we kennen is portlandcementklinker, aangeduid met de letter K in figuur 4.16.

#### *Portlandcementklinker (K)*

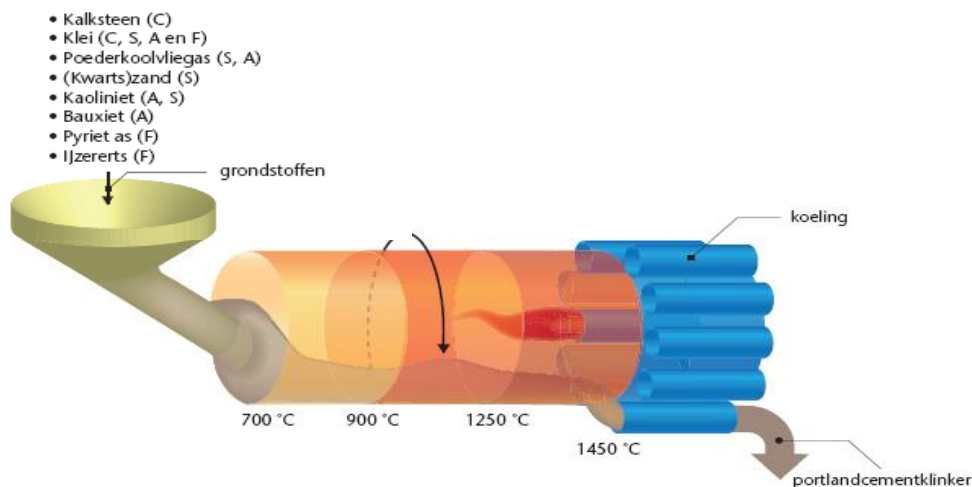
Portlandcementklinker vormt het basismateriaal voor alle cementen en bindmiddel-combinaties. Portlandcementklinker kunnen we het beste beschrijven als harde zwarte bollen, variërend in diameter van een paar mm tot enige centimeters (zie figuur 4.17). Portlandcementklinker wordt bij hoge temperaturen gemaakt in een cementoven.



*Figuur 4.17 Portlandcementklinker.*

Portlandcementklinker bestaat voornamelijk uit kalk(C)/silicium(S) verbindingen. De belangrijkste grondstof voor portlandcementklinker is dan ook kalksteen/mergel (C). Als bron voor de silicium (S) wordt vervolgens zand, klei of poederkoolvliegias toegevoegd. Voor een optimaal productieproces worden nog kleine hoeveelheden aluminium (A) uit bijvoorbeeld bauxiet of klei en ijzer (F) uit bijvoorbeeld ijzererts toegevoegd.

De grondstoffen worden in de juiste verhouding gemengd, gedroogd en gemalen waarna er in de cementoven portlandcementklinker van wordt gemaakt (zie figuur 4.18).



*Figuur 4.18 Schematische weergave van een cementoven.*

Wat opvalt, is dat niet gewerkt wordt met de normale chemieafkorting (waar C koolstof is). We kennen in de cementchemie een andere notatie (zie hiervoor het kader 'Cementchemische notatie').

#### *Cementoven*

Een cementoven is een lange stalen buis die aan de binnenzijde is voorzien van vuurvast materiaal. De grondstoffen worden aan één zijde de oven ingebracht en door de langzaam draaiende oven, die onder een lichte helling staat, steeds dichterbij de vlam gebracht.

Als het materiaal een temperatuur van ongeveer 700 – 900 °C heeft bereikt valt de kalksteen ( $\text{CaCO}_3$ ) uit elkaar in vrije kalk ( $\text{CaO}$ ) en kooldioxide ( $\text{CO}_2$ ). Doordat  $\text{CO}_2$  via de schoorsteen van de oven verdwijnt, treedt er ook een behoorlijke volumeverkleining op van de grondstoffen in de oven. Als de temperatuur verder toeneemt tot 1450 °C worden de juiste kalk(C)/silicium(S) verbindingen gemaakt die nodig zijn voor portlandcementklinker.

Aan het eind van de oven hebben we een lava-achtige brei. Zouden we deze hete brei nu langzaam laten afkoelen, dan zouden de gevormde verbindingen terug reageren naar hun eigen oorspronkelijke vorm. Om dit te voorkomen koelen we de hete brei heel snel af. De gevormde klinkermineralen blijven nu intact. De portlandcementklinker is gevormd.

### 'Cementchemische notatie'

Cementchemie kent zeer lange namen en notaties. Als je een paar keer tetracalciumalumiinaatferriet of  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  hebt opgeschreven, verzin je iets dat korter is, zoals  $\text{C}_4\text{AF}$ . En daar komt de cementchemie notatie vandaan.

Afkorting	Betekent	Naam element
C	CaO	Kalk
S	$\text{SiO}_2$	Siliciumoxide
A	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminiumoxide
F	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	IJzeroxide

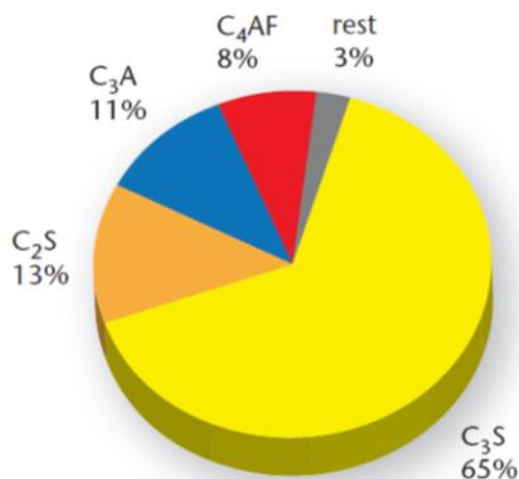
  

Afkorting	Betekent	Naam klinkermineraal
$\text{C}_3\text{S}$	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Tricalciumsilicaat
$\text{C}_2\text{S}$	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Dicalciumsilicaat
$\text{C}_3\text{A}$	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Tricalciumaluminaat
$\text{C}_4\text{AF}$	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Tetracalciumalumiinaatferriet

### Portlandcementklinker mineralen

De portlandcementklinker bestaat uit vier klinkermineralen, te weten:  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  en  $\text{C}_4\text{AF}$ . Deze hoofdbestanddelen zijn alle verbindingen van kalk (C) met afwisselend een Silicium (S), Aluminium (A) of IJzer (F).

De belangrijkste 2 klinkermineralen zijn  $\text{C}_3\text{S}$  en  $\text{C}_2\text{S}$ . Deze zijn verantwoordelijk voor de sterkte ontwikkeling van de lijm. Deze twee klinkermineralen zijn ook het meest vertegenwoordigd in portlandcementklinker. Naast de klinkermineralen zijn er ook nog een aantal andere elementen in de portlandcementklinker aanwezig zoals natrium, kalium en sulfaat (zie figuur 4.19).



Figuur 4.19 Verhouding van klinkermineralen in de portlandcementklinker.



De twee overige mineralen  $C_3A$  en  $C_4AF$  zijn minder vertegenwoordigd. Deze hebben we ook niet meer nodig in beton. Portlandcementklinker kan in principe ook zonder deze stoffen gemaakt worden. IJzer (F) maakt het cement grijs. Zonder ijzer wordt wit cement gemaakt. Nadeel is wel dat hogere oventemperaturen nodig zijn. Grijs cement kan gemaakt worden bij  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ , terwijl een temperatuur van rond de  $1800\text{ }^\circ\text{C}$  nodig is voor wit cement. IJzer maar ook aluminium zijn daarom in de eerste plaats belangrijk als 'smeltpuntverlagers'; ze zorgen ervoor dat we de noodzakelijke C-S-verbindingen bij relatief lagere temperaturen kunnen vormen. Als de portlandcementklinker uiteindelijk gevormd is en het aluminium en ijzer hun werk dus feitelijk hebben gedaan, zijn we nog niet van ze af. Ze zijn niet ineens in de oven verdwenen, maar zitten meegebakken in de klinker ( $C_3A$  en  $C_4AF$ ).

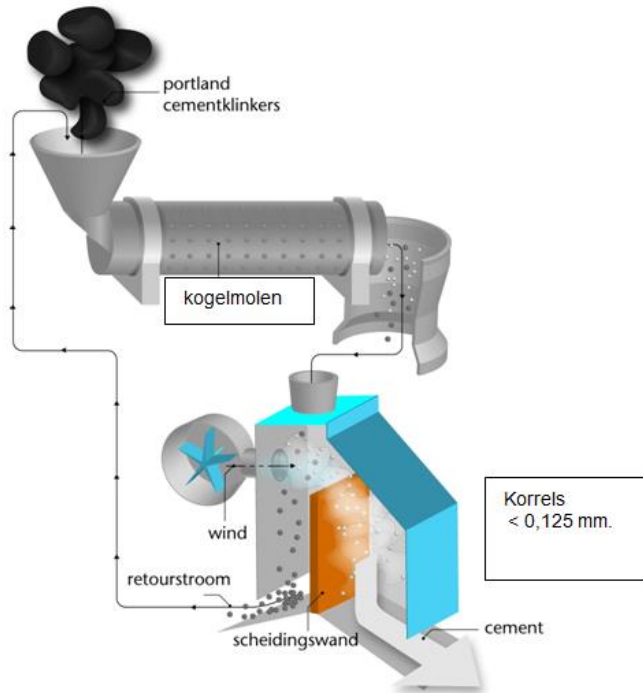


*Figuur 4.20 In een cementoven wordt portlandcementklinker gemaakt. Deze bestaat uit de 4 klinkermineralen  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  en  $C_4AF$ .*

We hebben nu gekeken naar het productieproces van portlandcementklinker. In de volgende paragrafen gaan we in op het malen van de portlandcementklinker en op de reactie van portlandcementklinker met water (hydraulische reactie).

### *Malen van portlandcementklinker*

Portlandcementklinker is met zijn korrel van een paar mm tot enige centimeters, te grof om in beton toe te passen. Daarom wordt het gemalen totdat alle korrels kleiner zijn dan 0,125 mm. Portlandcementklinker wordt gemalen in een kogelmolen. Dit is een ronddraaiende cilinder waarin stalen kogels van verschillende grootte de portlandcementklinker fijnmalen. Na het malen van de portlandcementklinker wordt het product naar een windzeef geleid.



*Figuur 4.21 Principe van malen en zeven van cement.*

In de windzeef valt het gemalen product door een luchtstroom (ingeblazen lucht) van een bepaalde snelheid (kracht). Alle deeltjes die licht, en daarmee klein, genoeg zijn worden over een scheidingwand geblazen. Als de deeltjes te zwaar (en dus te groot) zijn, dan blijven ze in het maalproces om nog een keer gemalen te worden.

Door nu de instellingen van de windsnelheid te veranderen kan deze grover of fijner zeven. Het is goed om te beseffen dat dus niet het malen, maar de windzeef feitelijk de fijnheid van het product bepaalt.

### *Reactie van portlandcementklinker met water*

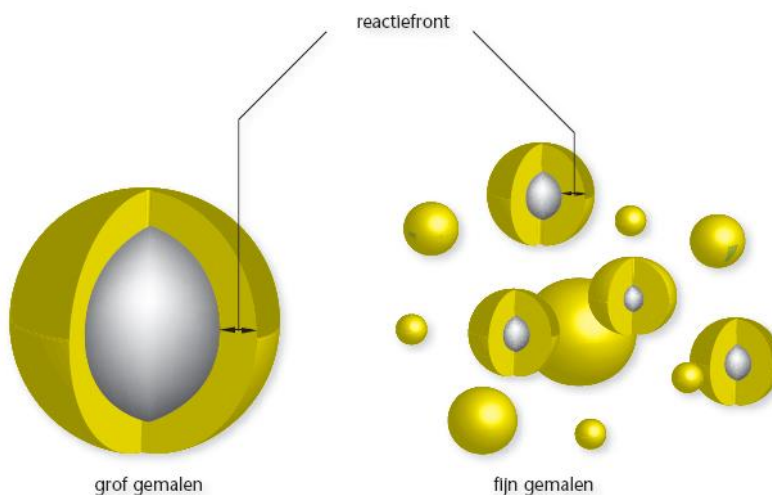
De reactie van portlandcementklinker en water wordt ook wel hydratatie genoemd (reageren met water). Het reactieproduct noemen we cementsteen.

Bij de reactie van portlandcementklinker (CS) en water (H) wordt naast de cementsteen (CSH) ook een kleine hoeveelheid calciumhydroxide(CH) gevormd. Daarnaast zullen er alkaliën uit het cement (Na en K) oplossen vanuit de portlandcementklinker in het poriewater. Dit leidt uiteindelijk tot een hoge pH-waarde van het beton zoals we gezien hebben in hoofdstuk 2.



### *Invloed van de fijnheid op de reactie*

Als portlandcementklinker met water reageert, dan ontstaat er een reactiefront, dat van buiten naar binnen toe de korrel binnendringt. Dit gebeurt zowel bij grof gemalen korrels links als bij het fijner gemalen korrels rechts (zie figuur 4.22). Ook al is de hoeveelheid cement in beide figuren gelijk, toch kan door het grotere reactieoppervlak rechts per tijdseenheid (bijvoorbeeld na 7 dagen) veel meer portlandcementklinker reageren. Als gevolg hiervan zal de sterkteontwikkeling bij het fijnere korrels per tijdseenheid veel sneller opbouwen.

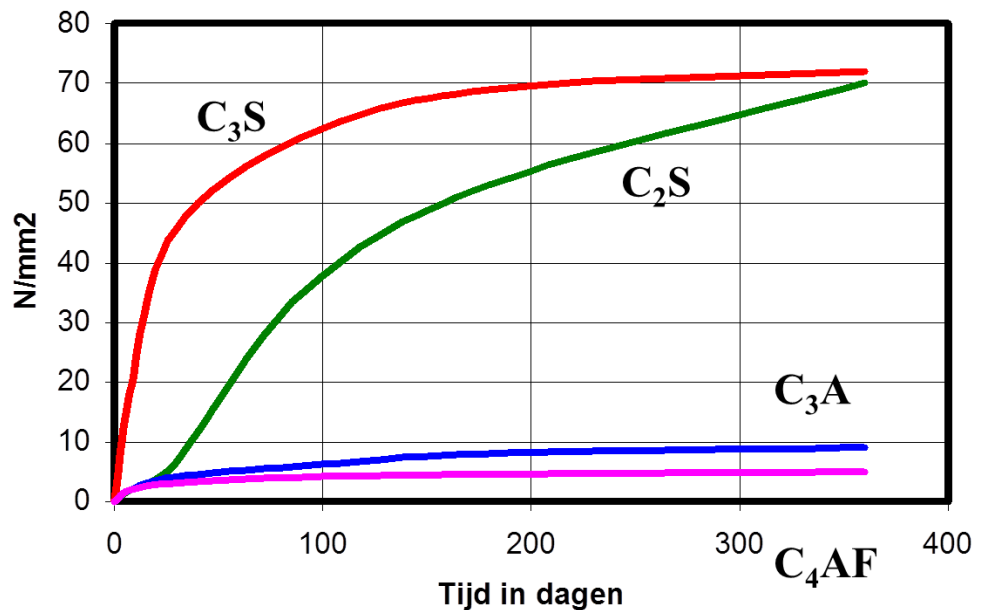


*Figuur 4.22* Verschil in gereageerde hoeveelheid cement op een zeker tijdstip voor een grof gemalen cement (links) en een fijn gemalen cement (rechts).

### *Invloed van de klinkermineralen op de reactie*

Portlandcementklinker bestaat uit 4 klinkermineralen. Deze mineralen hebben allemaal hun eigen rol in de reactie van cement met water. Bekijken we de sterkteontwikkeling van deze afzonderlijke mineralen (zie figuur 4.23), dan blijkt dat  $C_3S$  een zeer belangrijke bijdrage levert, zeker wat betreft de vroege sterkte. Verder zien we dat ook  $C_2S$  behoorlijk meedoet in de sterkteopbouw, zij het veel langzamer.

Het  $C_3A$  en  $C_4AF$  hebben beide weinig invloed op de sterkteontwikkeling. We kunnen echter niet om ze heen.  $C_3A$  en  $C_4AF$  ontstaan tijdens de productie van portlandcementklinker. Omdat  $C_4AF$  zo langzaam reageert, hoeven we bij de verwerking van beton nauwelijks rekening te houden met dit mineraal. Dit ligt heel anders voor de snelle reactie van  $C_3A$  met water; als we dit mineraal niet temmen heeft het nadrukkelijk invloed op de verwerkbaarheid.



Figuur 4.23 Sterkteontwikkeling van afzonderlijke portlandcementklinkermineralen.

#### *C<sub>3</sub>A en bindtijdregelaar*

Als we alleen C<sub>3</sub>A laten reageren met water, dan krijgen we een kortstondige maar heftige reactie waarbij veel warmte vrijkomt. Tijdens deze reactie ontstaan grote plaatvormige kristallen. Als deze reactie optreedt in een betonmengsel, dan stijft het beton in de menger al op en kan het na een paar minuten niet meer worden verwerkt. Dat is lastig als we het beton op de bouwplaats nog in de bekisting willen storten.

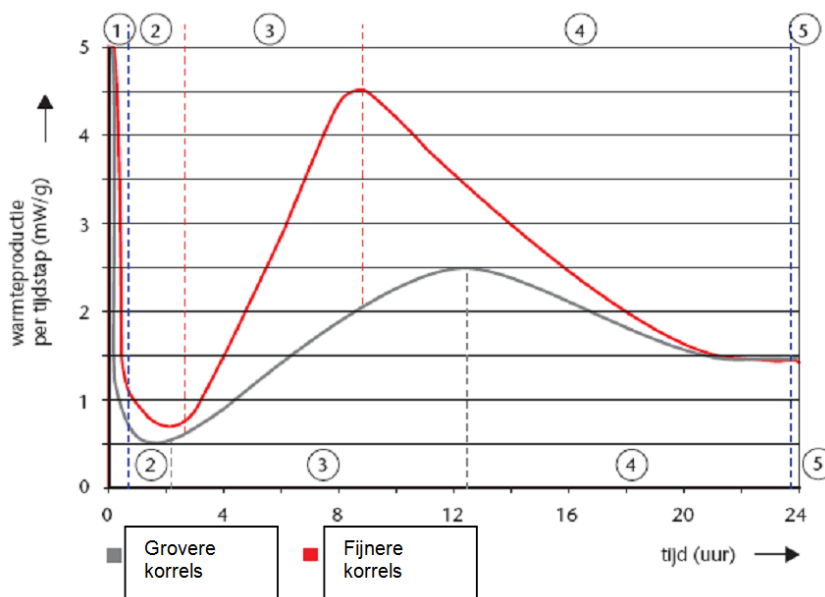
Om deze snelle reactie van C<sub>3</sub>A te voorkomen wordt er een bindtijdregelaar (bijvoorbeeld gips) aan het cement toegevoegd. Het idee is dat de bindtijdregelaar een afsluitende laag vormt om het C<sub>3</sub>A die de verdere reactie van C<sub>3</sub>A tijdelijk belemmert. Pas wanneer het beton echt gaat verharderen, gaat de reactie van het C<sub>3</sub>A verder.

Deze afsluitende laag wordt gevormd door het materiaal ettringiet. De ettringietvorming gaat gepaard met veel wateropname. Dit kunnen we zien als een zwelling van het materiaal. In deze fase van het beton waarin alles nog vloeibaar is, is dit geen probleem. Dit is anders bij de zogenoemde sulfaataantasting van beton. Dan heeft dezelfde reactie plaats maar dan in verhard beton. De zwelling kan dan tot problemen leiden. Dit is reeds beschreven in hoofdstuk 2.

#### *Reactiewarmte*

De reactie tussen water en portlandcementklinker is een exotherme reactie. Bij deze reactie komt energie in de vorm van warmte vrij. Dit heeft tot gevolg dat beton tijdens het verharderen warm wordt. Dit effect is goed te gebruiken om meer te leren over het verloop van deze hydraulische reactie.

Als we een grafiek maken van het reactieproces tussen cement en water, waarbij we elke minuut uitzetten hoeveel warmte er in die minuut door de reactie is geproduceerd dan krijgen we een grafiek zoals weergegeven in figuur 4.24.



Figuur 4.24 Reactiestadia van cement.

In deze figuur zijn verschillende stadia weergegeven die elke korrel in principe doorloopt. In de figuur is verder te zien dat het afhangt van de fijnheid van de portlandcementklinker wanneer de verschillende stadia beginnen en eindigen. De fijnere korrels reageren sneller dan de grovere. De verschillende stadia zijn beschreven in tabel 4.4.

Tabel 4.4

Stadia	Activiteit
1	Er komt veel warmte vrij doordat de bindtijdregelaar het $C_3A$ inkapselt.
2	Periode van rust, dormante periode. In deze uren kan de betonspecie worden verwerkt.
3	De reactie van cement en water komt nu goed opgang. Bij aanvang van dit stadia, wordt gestart met sterkte ontwikkeling. Deze fase is van invloed op mate van aantrekken van de betonspecie. De temperatuur van het beton begint te stijgen.
4	De reactie van cement en water gaat nu steeds langzamer lopen.
5	De cementsteenstructuur is gevormd. Als er nog water en ongereageerd cement aanwezig is, zal de reactie langzaam door blijven lopen. Dit kan jaren duren.

#### 4.5.1.2 Latent hydraulisch materiaal

Latent hydraulisch materiaal heeft de eigenschap om te reageren met water tot cementsteen. Alleen deze reactie is zeer langzaam (latent - verborgen). Het enige latent hydraulisch materiaal dat als bestanddeel in cement en bindmiddel kan worden toegepast is hoogovenslak. Aangeduid met de letter S in figuur 4.16.

##### Opmerking:

In het gedeelte over de portlandcementklinker wordt met de letter S, silicium bedoeld. Dat is alleen van toepassing binnen de cementchemie van de portlandcementklinker. We gaan nu verder met de bestanddelen zoals ze genoemd zijn in figuur 4.16. Met S wordt daar bedoeld hoogovenslak.

### Latent-hydraulische reactie

Een latent-hydraulisch materiaal zoals gemalen hoogovenslak lijkt chemisch gezien erg veel op portlandcementklinker. Het is dan ook niet verwonderlijk dat dit materiaal met water kan reageren tot cementsteen. Er is sprake van een hydraulische reactie. De reactie verloopt echter zo langzaam dat het lijkt alsof deze reactie er wel in potentie is (verborgen), maar niet opgang komt. De voorwaarde om latent-hydraulisch materiaal sneller te laten reageren is de aanwezigheid van een activator.

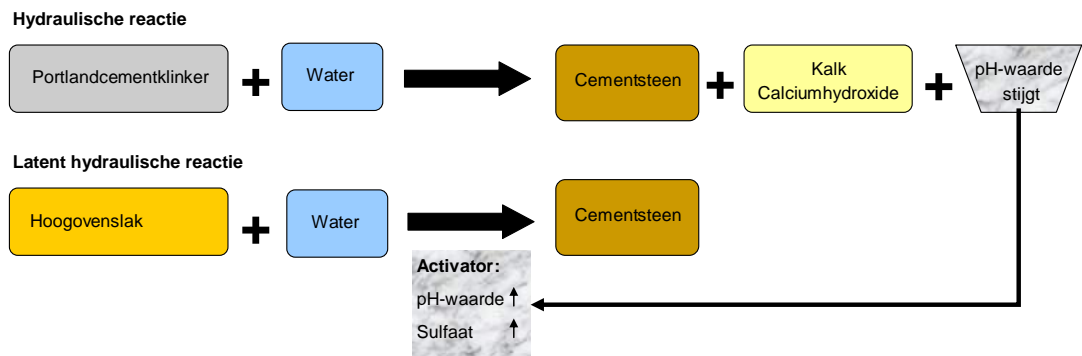
Er zijn twee soorten activators:

- een hoge pH-waarde;
- een hoog sulfaatgehalte.

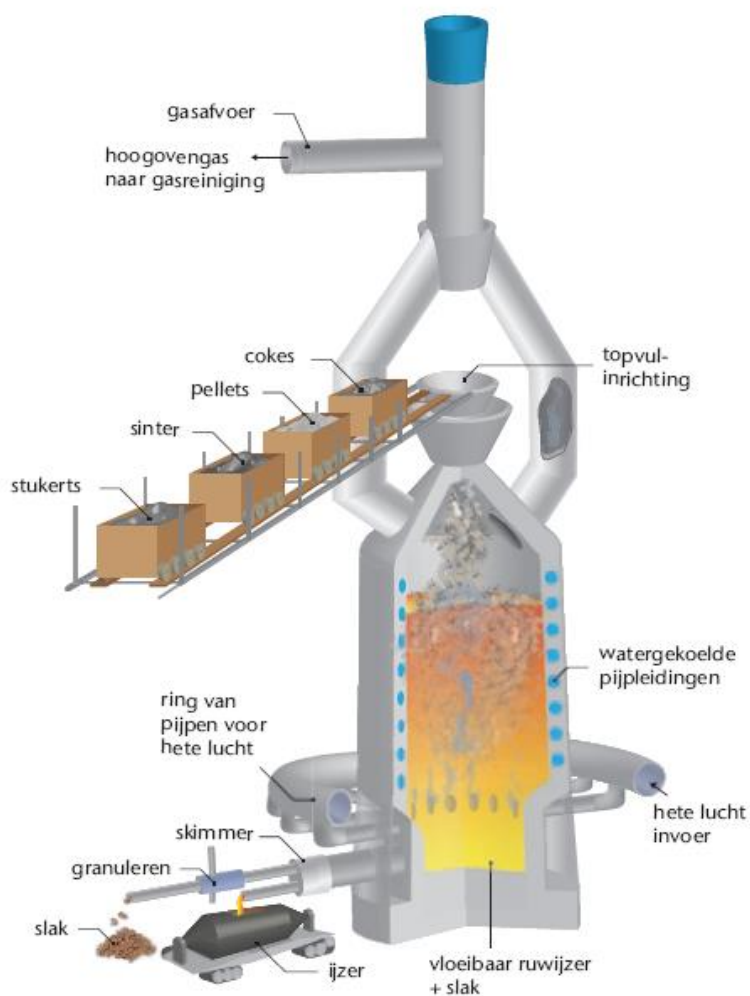


### Samenwerking tussen hoogovenslak en portlandcementklinker

Hoogovenslak kan perfect samenwerken met portlandcementklinker. Bij de reactie van portlandcementklinker en water stijgt de pH-waarde in het poriewater. Deze stijging van de pH-waarde kan als activator voor de hoogovenslak worden gebruikt. Daarnaast kan in een hoogovencement bewust een hoger sulfaatgehalte worden gemaakt door meer bindtijdsregelaar (bv Gips) te doseren. Anhydriet is een calciumsulfaat die hoogovenslak als activator kan werken.



Figuur 4.25 Samenwerking hoogovenslak en portlandcementklinker.



Figuur 4.26 Principe Hoogoven.

#### Hoogovenslak (S)

De hoogovens produceren ruwijzer dat gebruikt wordt om bijvoorbeeld stalen wapeningstaven te maken. Bij dit proces komt als bijproduct hoogovenslak vrij.

Een hoogoven (zie figuur 4.26) is een rechtopstaande oven, die we aan de bovenzijde vullen met afwisselend ijzererts (stukerts, sinter, pellets) steenkool (cokes), kalksteen en bauxiet. Door de hete lucht die van onder in de oven wordt ingebracht ontstaat in de oven een temperatuurprofiel dat naar onder toe steeds verder oploopt, tot wel 2200 °C. Bij deze temperatuur smelt het ijzer (F) en komt deze los van het gesteente, de hoogovenslak.

Onderaan de hoogoven worden de gesmolten grondstoffen afgetapt. Door het verschil in dichtheid van ruwijzer (ongeveer 7200 kg/m<sup>3</sup>) en slak (ongeveer 2700 kg/m<sup>3</sup>), drijft de slak op het ruwijzer. De slak wordt van het ruwijzer gescheiden via een soort schuimspaan ('skimmer' of 'vossenhol' genoemd). Dit is een tunnelvormige constructie waar het zwaardere ijzer doorheen gaat, terwijl de lichtere slak door een dam (het dak van de tunnel) wordt gedwongen af te vloeien via de slakafvoergoot. Deze slak wordt snel afgekoeld (gegranuleerd) met water en er ontstaat een reactieve hoogovenslak.

#### *De fijnheid van hoogovenslak*

Hoogovenslak lijkt op een soort zand 0/4 en wordt om deze reden ook wel slakkenzand genoemd. Het is echter hoekiger en scherper dan rivierzand. In ongemalen vorm kan het niet worden gebruikt in een cement of bindmiddel. Ook dit product moet worden gemalen, net als de portlandcementklinker.



*Figuur 4.27 Gegranuleerde hoogovenslak is nog geen fijn poeder!*

#### 4.5.1.3

#### *Puzzolaan*

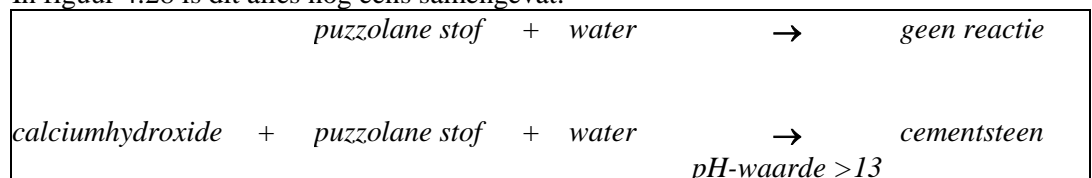
Een puzzolaan is een reactief materiaal dat in combinatie met water en calciumhydroxide reageert tot cementsteen. De puzzolane materialen die als bestanddeel in cement en bindmiddel kunnen worden toegepast zijn poederkoolvliegias (V en W), silicafume (D) en natuurlijk (P) en gebrande natuurlijke (Q) puzzolaan gesteente zoals tras (gemalen tufsteen) en gebrande leisteen (T).

#### *De puzzolane reactie*

Een puzzolaan materiaal heeft in potentie reactief silicium beschikbaar voor een reactie. Wordt een puzzolaan gemengd met alleen water dan gebeurt er echter helemaal niets. Er zijn namelijk drie randvoorwaarden voor een puzzolane reactie, te weten:

1. Ten eerste moet er, om cementsteen te verkrijgen, water aanwezig zijn.
2. Ten tweede moet er, om cementsteen te verkrijgen, kalk aanwezig zijn. Het calcium wordt meestal aangeleverd door de reactie van water met portlandcementklinker waarbij calciumhydroxide ontstaat.
3. Ten derde moet er een hoge pH-waarde (> 13) aanwezig zijn. Dit is nodig om de Silicium vrij te krijgen uit de materiaalstructuur van een puzzolaan.

In figuur 4.28 is dit alles nog eens samengevat.



*Figuur 4.28 Puzzolane reactie.*

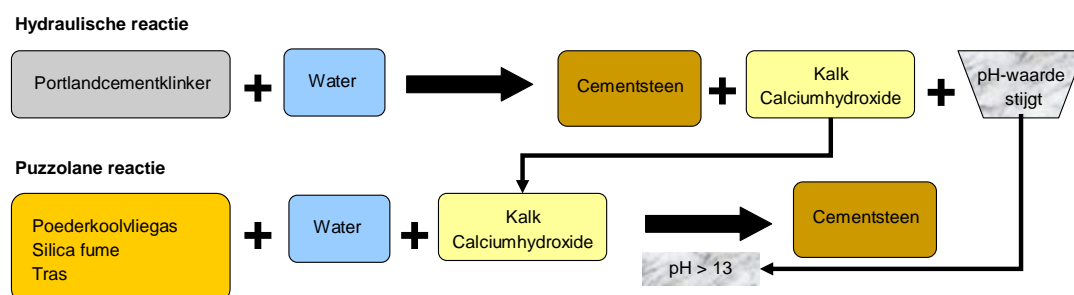


### Samenwerking tussen een puzzolaan en portlandcementklinker

Met de nu opgedane kennis is het begrijpelijk dat er een prima huwelijk mogelijk is tussen een portlandcementklinker en een puzzolaan materiaal.

Bij de reactie van portlandcementklinker met water ontstaat namelijk de noodzakelijk calciumhydroxide die een puzzolaan nodig heeft om te reageren. Hiermee is aan de tweede voorwaarde voldaan.

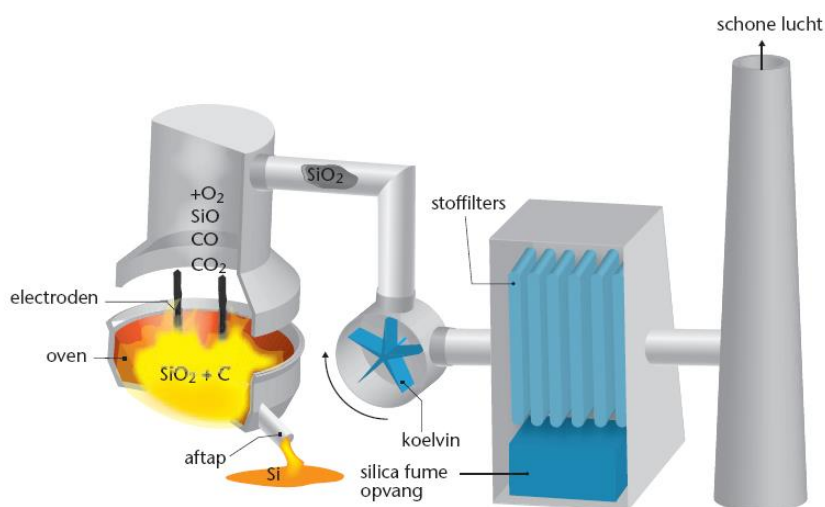
Daarnaast stijgt door dezelfde reactie van portlandcementklinker en water de pH-waarde in beton. Als deze boven de 13 is uitgekomen, is aan de derde voorwaarde voldaan en kan de puzzolane reactie starten met de vorming van cementsteen (zie figuur 4.29). Doordat eerst de pH-waarde moet stijgen en er kalk moet worden geproduceerd, zal de puzzolane reactie altijd later op gang komen. Eerst zal de hydraulische reactie van portlandcementklinker en water moeten starten.



Figuur 4.29 Samenwerking tussen portlandcementklinker en puzzolanen.

### Puzzolaan - Silica fume (D)

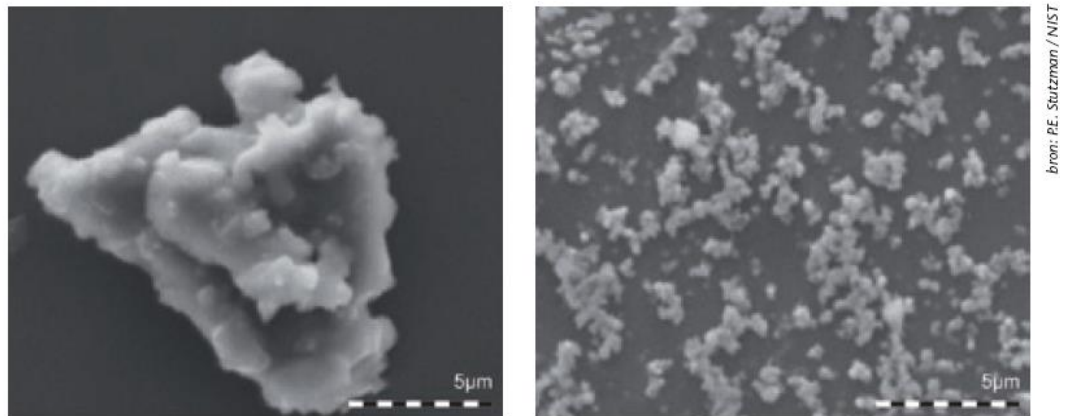
Silica fume komt vrij tijdens de productie van het metaal silicium (nodig voor bijvoorbeeld computerchips). Figuur 4.30 toont een schets van het productieproces. Om zeer zuiver silicium te maken wordt zeer zuiver kwarts ( $\text{SiO}_2$ ) in een elektrische oven verhit tot 2000 °C. Het silicium, waar het allemaal om begonnen is, wordt als metaal afgetapt. De rookgassen vervolgen hun weg door de schoorsteen. In de stoffilters van deze productie worden zeer kleine deeltjes  $\text{SiO}_2$  afgevangen. Dit wordt silica fume of microsilica genoemd.



Figuur 4.30 Proces waarbij silica fume vrijkomt.

### De fijnheid van silica fume

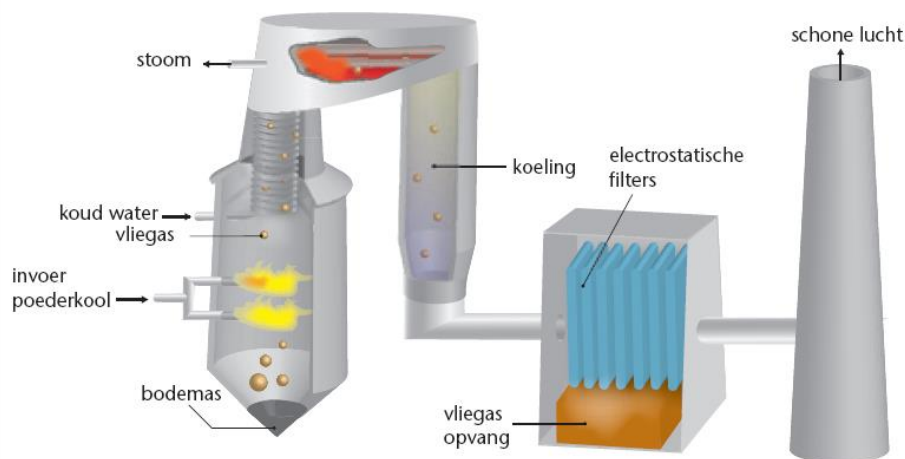
Als we silica fume met portlandcementklinker vergelijken (zie figuur 4.31) dan valt direct op dat silica fume deeltjes veel kleiner zijn. De gemiddelde deeltjesgrootte van silica fume is  $0,15\ \mu\text{m}$ . Dit zorgt per kilo materiaal voor een veel groter specifiek oppervlak dan cement. Waar cement per kilo een oppervlak heeft van ongeveer  $400\ \text{m}^2$  (ongeveer 2 tennisvelden), heeft silica fume per kilo een oppervlak van circa  $20.000\ \text{m}^2$  (ongeveer 3 voetbalvelden). Silica fume is leverbaar als poeder, 'condensed' korrels of als slurry.



Figuur 4.31 Cement (links) in vergelijking met silica fume (rechts).

### Puzzolaan: Poederkoolvliegias(V)

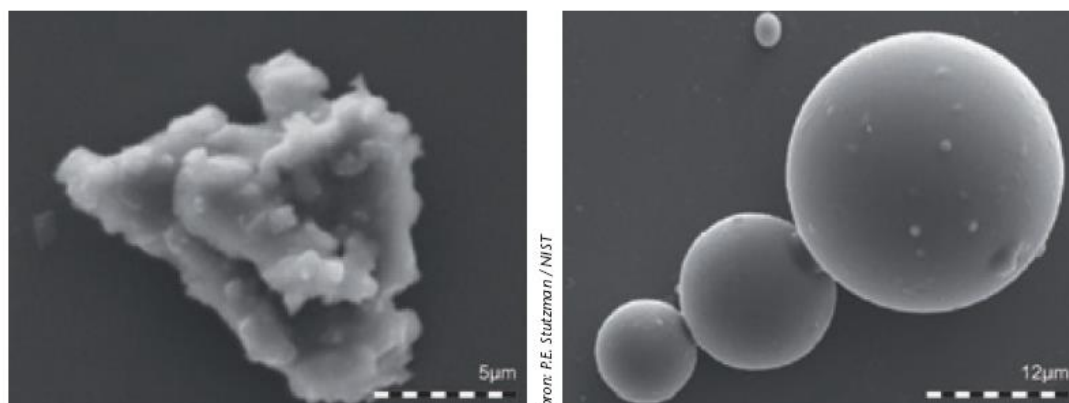
Poederkoolvliegias wordt geproduceerd in poederkoolgestookte elektriciteitscentrales. Poederkoolvliegias bestaat uit kleine vaste deeltjes die met de rookgassen van verbrandingsproces meevliegen en in het stoffilter worden afgevangen. Zie figuur 4.32.



Figuur 4.32 Schematische weg van poederkool tot poederkoolvliegias.

### De fijnheid van poederkoolvliegias

Poederkoolvliegiasdeeltjes zijn meestal van dezelfde grootte als gemalen portlandcementklinker. Poederkoolvliegias wordt tijdens het verbrandingsproces gevormd, snel afgekoeld en afgevangen in de filters van de rookgassen. Het gevolg is dat poederkoolvliegiasdeeltjes een mooie ronde vorm hebben, terwijl cementdeeltjes altijd, door het malen, hoekiger zullen zijn.



Figuur 4.33 Cement (links) in vergelijking met poederkoolvliegias (rechts).

#### Categorie-indeling van poederkoolvliegias

Het is belangrijk om te weten dat er drie categorieën zijn voor poederkoolvliegias. Deze wordt bepaald aan de hand van het % gloeiverlies. Dit is het verlies aan massa na het gloeien van de poederkoolvliegias en is een maat voor de hoeveelheid onverbrande koolstof in de poederkoolvliegias.

- Categorie A: Gloeiverlies van niet meer dan 5% (*m/m*)
- Categorie B: Gloeiverlies tussen de 2,0 en de 7,0% (*m/m*)
- Categorie C: Gloeiverlies tussen de 4,0 en de 9,0% (*m/m*)

In beton mogen we alleen categorie A toepassen. Het koolstofgehalte heeft invloed op het gedrag van de luchtbelvormer en de vorstbestandheid van beton. Indien geschiktheid is aangetoond en het gebruik is overeengekomen, kan er ook Categorie B of C worden toegepast in beton.

#### 4.5.1.4 *Inert materiaal.*

Inerte bestanddelen in cement en bindmiddelen, zijn die bestanddelen die geen reactie aangaan met water. Ze kunnen werken als een vulstof die verwerkbaarheid beïnvloedt of de reactie van portlandcementklinker met water op één of andere manier beïnvloedt. Het enige inerte materiaal dat als bestanddeel in cement of bindmiddel kan worden toegepast, is kalksteenmeel en wordt afhankelijk van het gehalte aan organische stoffen (TOC) aangeduid met de letter L of LL.

#### 4.5.1.5 *Amorf en kristallijn*

De begrippen amorf en kristallijn zeggen iets over de structuur van de moleculen waaruit een materiaal is opgebouwd.

##### *Kristallijn:*

Is een materiaal kristallijn, dan zijn alle elementen netjes gerangschikt. De elementen zitten ook allemaal goed aan elkaar vast. Er zijn geen losse eindjes. Een kristallijne structuur is een gesloten structuur en hoort bij materialen die niet-reactief oftewel inert zijn.

Voorbeelden hiervan zijn: zand, grind, graniet.

*Amorf:*

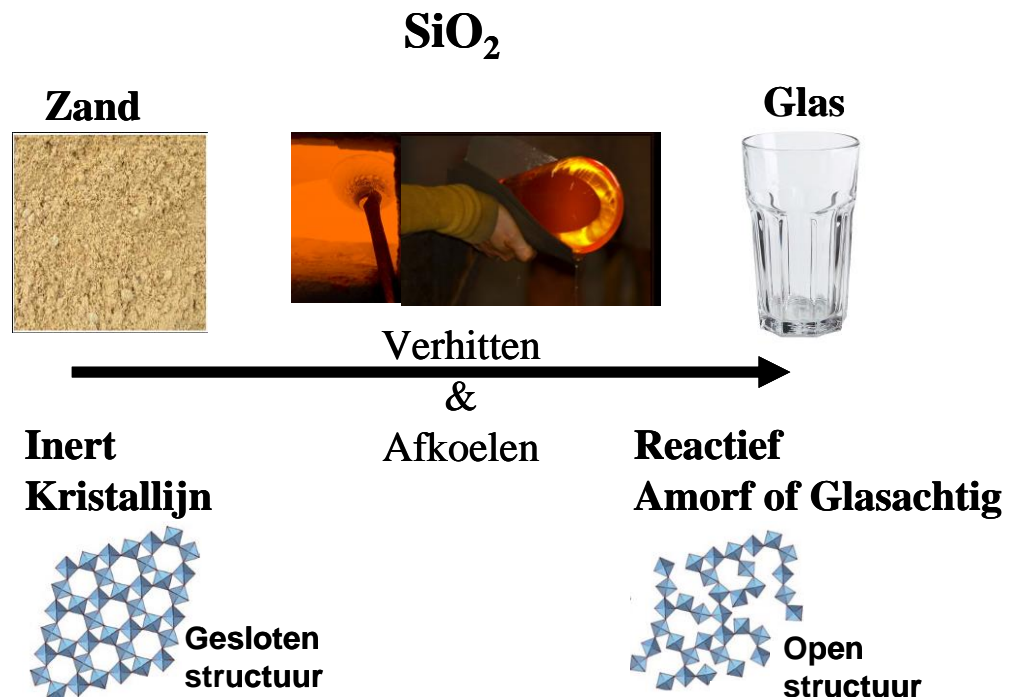
Is een materiaal amorf, dan liggen de elementen in een wanordelijke structuur. De elementen zitten niet allemaal goed aan elkaar vast en er zijn wel losse eindjes. Een amorfe structuur is een open structuur en hoort bij materialen die reactief zijn. Amorf wordt ook wel aangeduid met de term glasachtig.

Voorbeelden hiervan zijn: hoogovenslak, poederkoolvliegias, silica fume en tras.

*Van kristallijn naar amorf.*

Eenzelfde chemische element kan zowel in een amorfe- als een kristallijne vorm verschijnen. We kennen bijvoorbeeld allemaal zand ( $\text{SiO}_2$ ) als een inert en niet-reactief materiaal. Zand heeft dan ook een kristallijne geordende structuur. Als we dit zand gaan verhitten tot hoge temperaturen, ontstaat een open structuur. We hebben dan een reactief zand gemaakt. Koelen we dit relatief snel af, dan blijft de open/amorfe/reactieve structuur van hetzelfde product ( $\text{SiO}_2$ ). We kennen dit product als het materiaal glas, waar we doorheen kunnen kijken.

In algemene zin zijn alle reactieve producten in cement ooit warm geworden en dan relatief snel afgekoeld. Poederkoolvliegias in de elektriciteitscentrale. Hoogovenslak is verhit in de hoogovens en Tras is ooit verhit door een vulkanische uitbarsting. Belangrijk is wel dat het product relatief snel afkoelt. Laten we bijvoorbeeld het gesmolten zand weer heel langzaam afkoelen, dan krijgt de structuur de kans zich weer netjes geordend op te bouwen en komen we weer bij inert zand uit.



Figuur 4.34 Voorbeeld van kristallijn zand naar amorf glas.

#### 4.5.1.6 *Invloed van de belangrijkste bestanddelen op de lijm*

Om te bepalen welke materialen het beste kunnen worden toegepast als cement of bindmiddel, moeten we weten welke invloed de materialen hebben op de eigenschappen van de lijm in zowel de vloeibare als de verharde fase.

##### *Portlandcementklinker*

We kiezen altijd voor portlandcementklinker, omdat dit het basisbestanddeel is van elk cement. Het aandeel portlandklinker kan worden vergroot als:

1. Er meer beginsterkte-ontwikkeling nodig is
  - *Portlandklinker is het eerste materiaal dat start met de reactie voor sterkte ontwikkeling. Dit levert beginsterkte. De andere materialen worden daarna geactiveerd om ook te reageren.*
2. Er meer warmteontwikkeling nodig is
  - *Portlandklinker is de kachel van het beton. Meer portlandklinker betekent dan ook meer warmteontwikkeling.*
3. Het mengsel minder temperatuurgevoelig moet worden
  - *Reacties verlopen sneller als het warmer wordt en anders om. Portlandcementklinker is van de materialen in een cement het minst gevoelig voor temperatuurwisselingen.*
4. De vorstbestandheid van beton vanuit het cement moet worden verbeterd.
  - *Portlandcementklinker levert vanuit het cement de meeste bijdrage aan de vorstbestandheid van een beton. Natuurlijk is vorstbestandheid van beton een betoneigenschap die ook met andere maatregelen kan worden verbeterd (wcf; luchtbelvormer; nabehandeling).*

##### *Hoogovenslak*

Het toepassen van hoogovenslak brengt ons:

1. Een dichtere poriestructuur in de cementsteen, een duurzamer beton
  - *De cementsteen die is gevormd uit hoogovenslak heeft een dichtere poriestructuur dan die van portlandcementklinker en biedt meer weerstand tegen het binnendringen van voor beton gevaarlijke stoffen. Dit levert een duurzamer beton op (in de zin van levensduur).*
2. Een lagere beginsterkte-ontwikkeling
  - *De hoogovenslak reactie komt langzaam op gang. Eerst moet de pH-waarde gaan stijgen door de reactie van portlandcementklinker en water. Hoe meer hoogovenslak we toepassen hoe lager de beginsterkte ontwikkeling.*
3. Meer weerstand tegen chloride-indringing
  - *De cementsteen afkomstig uit hoogovenslak geeft meer weerstand tegen chloride indringing door zijn dichtere poriestructuur en het feit dat chloride aan de wanden van de poriën blijft plakken.*
4. Een lagere vorstbestandheid vanuit het cement
  - *Cementsteen uit hoogovenslak blijkt minder vorstbestand te zijn. Natuurlijk is vorstbestandheid van beton een betoneigenschap die ook met andere maatregelen kan worden verbeterd (wcf; luchtbelvormer; nabehandeling).*
5. Meer temperatuurgevoeligheid
  - *De reactie van water en hoogovenslak is in vergelijking met de andere materialen in cement erg afhankelijk van de temperatuur.*
6. Een lichtere kleur
  - *Hoogovenslak is lichter van kleur dan portlandcementklinker, poederkoolvliegias of silica fume. Dat zie je, afhankelijk van de hoeveelheid, terug in de kleur van het beton.*

### *Poederkoolvliegias*

Het toepassen van poederkoolvliegias brengt ons:

1. Een lagere beginsterkte
  - *De poederkoolvliegias reactie komt langzaam op gang. Eerst moet de pH-waarde gaan stijgen door de reactie van portlandcementklinker en water. Hoe meer poederkoolvliegias we toepassen hoe lager de beginsterkte ontwikkeling.*
2. Doorgroei van sterkte na 28 dagen
  - *Door het toepassen van poederkoolvliegias is de beginsterkte dan wel lager, maar de reactie van poederkoolvliegias loopt lang door en er is dan ook sprake van een sterke doorgroei in druksterkte na 28 dagen.*
3. Verbetering van de verwerkbaarheid
  - *Poederkoolvliegias zijn over het algemeen ronde bolletjes die als een kogellager werken en de verwerkbaarheid van beton kunnen verbeteren.*
4. Dichtere poriestructuur van de cementsteen op de lange termijn.
  - *Omdat bij de reactie van een puzzolaan ook de calciumhydroxide wordt betrokken ontstaat er uiteindelijk een dichtere poriestructuur van de cementsteen op een langere termijn. Dit is goed voor de duurzaamheid in de zin van levensduur.*
5. Donkerdere kleur.
  - *Door de aanwezigheid van koolstof in de poederkoolvliegias is het materiaal donker van kleur. Dit heeft een duidelijk effect op de kleur van het beton.*
6. Mogelijke negatieve invloed op de werking van de luchtbelvormer.
  - *Door de aanwezigheid van koolstof in de poederkoolvliegias wordt de werking van een luchtbelvormer negatief beïnvloed.*

### *Silicafume*

Het toepassen van silica fume brengt ons:

1. Verhoging van de begin- en eindsterkte (HSB)
  - *Silica fume is uiterst reactief en draagt zowel bij aan een hogere begin als eindsterkte.*
2. Een zeer hoge stabiliteit in het beton
  - *Door de extreem hoge fijnheid is het beton uitermate stabiel.*
3. Een lage verwerkbaarheid
  - *De verwerkbaarheid is om dezelfde reden van een hoge fijnheid laag. Dit moet worden gecompenseerd met het toepassen van hulpstoffen.*
4. Een dichtere poriestructuur in de cementsteen
  - a. *Omdat bij de reactie van een puzzolaan ook de calciumhydroxide wordt betrokken ontstaat er uiteindelijk een dichtere poriestructuur van de cementsteen op een langere termijn. Dit is goed voor de duurzaamheid in de zin van levensduur.*
5. Een donkerdere kleur.
  - a. *Door de aanwezigheid van koolstof in de silica fume is het materiaal donker van kleur. Dit heeft een duidelijk effect op de kleur van het beton.*
6. Mogelijke negatieve invloed op de werking van de luchtbelvormer.
  - a. *Door de aanwezigheid van koolstof in de poederkoolvliegias wordt de werking van een luchtbelvormer negatief beïnvloed.*

In de tabel 4.5 proberen we al deze aspecten inzichtelijk te maken.

Tabel 4.5 *Belangrijkste invloeden van de verschillende bestanddelen voor cement op de lijm.*

Materiaal	Portlandcementklinker	Hoogovenslak	Poederkoolvliegias	Silica fume
Eigenschap	(K)	(S)	(V)	(D)
<b>Cementlijm – Vloeibare fase</b>				
Verwerkbaarheid	-	-	Verbetering van de verwerkbaarheid door de ronde vorm van de poederkoolvliegias	Door extreem hoge fijnheid daalt de verwerkbaarheid. Meestal alleen op te vangen met een superplastificeerder.
Stabiliteit	Afhankelijk van de hoeveelheid en fijnheid.	Afhankelijk van de hoeveelheid en fijnheid.	Afhankelijk van de hoeveelheid.	Zeer hoge stabiliteit.
Luchtbelvormer	-	-	Daling van het luchtgehalte door de aanwezigheid van koolstof.	Daling van het luchtgehalte door de aanwezigheid van koolstof.
<b>Cementsteen - Verharde fase</b>				
Poriestructuur	-	Geeft een dichtere poriestructuur.	Geeft een dichtere poriestructuur.	Geeft een dichtere poriestructuur.
<i>Sterkte</i>				
Sterkteontwikkeling	Onmisbare component in de sterkteontwikkeling.	Wordt geactiveerd door de hoge pH-waarde vanuit de portlandcementklinker.	Reageert met kalk die vrijkomt bij de reactie van portlandcementklinker en water bij een hoge pH-waarde.	Reageert met kalk die vrijkomt bij de reactie van portlandcementklinker en water bij een hoge pH-waarde.
Beginsterkte	Afhankelijk van de fijnheid.	Verlaging van de beginsterkte.	Verlaging van de beginsterkte. Reactie komt later op gang.	Verhoging van de beginsterkte door hoge fijnheid.
Eindsterkte	Afhankelijk van de sterkteklasse.	-	Verhoging van de doorgroei in sterkte na maanden	Verhoging van de windsterkte door hoge fijnheid en vuleffect.
Temperatuurgevoeligheid	Minder temperatuurgevoelig.	Meer temperatuurgevoelig.	-	-
<i>Duurzaamheid</i>				
Vorstbestandheid (incl. doozouten)	Goed	Minder goed. - Let op Afhankelijk van het gehalte aan portlandcementklinker	Afhankelijk van het gehalte aan portlandcementklinker	Afhankelijk van het gehalte aan portlandcementklinker
Chloride indringing	-	Beter bestand tegen chloride indringing door dichtere poriestructuur.	Beter bestand tegen chloride indringing door dichtere poriestructuur na maanden.	Beter bestand tegen chloride indringing door dichtere poriestructuur.
<i>Esthetisch</i>				
Kleur	Grijs.	Lichter grijs.	Donker grijs.	Zeer donkergrijs

#### 4.5.2 Cement

Op pagina 4-20 is al uitgelegd wat cement is. Na het bespreken van de bestanddelen is het nu tijd om in te gaan op de verschillende cementsoorten. Daarna komt in 4.5.3 het bindmiddel aan bod.

##### 4.5.2.1 Cementsoorten

De Europese cementnorm kent 27 verschillende cementsoorten, elk in verschillende sterkteklassen. Om dit overzichtelijk te houden is in de cementnorm een indeling gemaakt in vijf hoofdgroepen (zie tabel 4.6). Een hoofdgroep wordt aangeduid met de letters CEM van cement en een Romeins cijfer I tot en met V.

Tabel 4.6 Hoofdgroepen voor cement

Hoofdgroep	Naam
CEM I	Portlandcement
CEM II	Samengesteld Portlandcement
CEM III	Hoogovencement
CEM IV	Puzzolaancement
CEM V	Composietcement

Alle cementsoorten hebben portlandcementklinker (K) als basismateriaal waaraan een ander bestanddeel voor cement is toegevoegd. Deze toevoeging wordt meestal ook in de naam van het cement verwerkt. De puur gemalen portlandcementklinker is een CEM I. Wordt hier hoogovenslak aan toegevoegd, dan komen we al snel terecht in de CEM III, hoogovencement.

Elk bestanddeel voor cement heeft zijn eigen letteraanduiding (zie figuur 4.16), die we ook terug zien in de uiteindelijke aanduiding voor de cementsoort. In het overzicht 'Cementsoorten en Samenstelling' zijn de 27 cementsoorten opgenomen en is te zien hoeveel van welk bestanddeel voor dit cement nodig is.

In de kolom portlandcementklinker (K) is zichtbaar dat in elk cement portlandcementklinker aanwezig is. De hoeveelheid portlandcementklinker wordt in de code voor de cementbenaming in aflopende hoeveelheid weergegeven door de letter A, B of C.

*Voorbeeld 1:*

Portlandvliegascement is een samengesteld portlandcement (CEM II). Stel het cement bestaat uit 65% tot 79% portlandcementklinker (K) en tussen de 21% en de 35% poederkoolvlieg (V), dan noemen we het een CEM II/B-V. Heeft het CEM II/B-V tussen de 80 en de 94% portlandcementklinker dan wordt het een CEM II/A-V genoemd.

*Voorbeeld 2:*

Hoogovencement wordt aangeduid met CEM III. In deze cementsoort mag alleen portlandcementklinker worden gemengd met de hoogovenslak (S). Deze S komt niet meer in de naam van het cement terug omdat deze al uit de hoofdgroep CEM III blijkt. Er wordt nu alleen nog gewerkt met de letter A, B of C om aan te geven hoeveel portlandcementklinker er in het cement aanwezig is.



Tabel 4.7 Samenstelling (geen examenstof).

Hoofdgroepen	Cementsoort	Cement aanduiding	Hoofd bestanddeel											Neven bestanddeel		
			hydraulisch	Latent Hydraulisch	Puzzolaan					Vliegas		Gebrande Leisteen			Inert	
					Klinker	Hoogoven- slak	Microsilica	Puzzolane		Silicium houdend [V]	Calcium houdend [W]	Gebrande Leisteen	Kalksteen			
								Natuurlijke [P]	Gebrande natuurlijke [Q]				[T]		[LL]	
[K]	[S]	[D]	[P]	[Q]	[V]	[W]	[T]	[L]	[LL]							
CEM I	Portlandcement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandslakcement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandmicrosilicacement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandpuzzolaacement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandvliegasement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandleisteement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandkalksteement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	Portlandcompositieement	CEM II/A-M	80-94	↙	↘	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	0-5
		CEM II/B-M	65-79	↘	↙	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	0-5
CEM III	Hoogovencement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Puzzolaacement	CEM IV/A	65-89	-	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	0-5
CEM V	Compositieement	CEM V/A	40-64	18-30	-	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	0-5

#### 4.5.2.2 Sterkteklassen voor cement

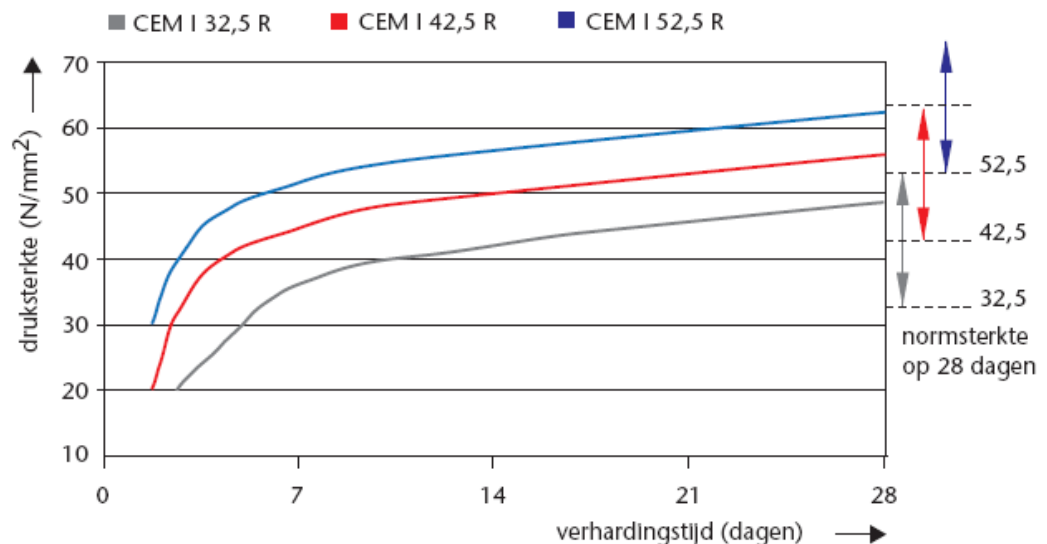
Er bestaan 3 sterkteklassen voor cement, te weten: 32,5, 42,5 en 52,5. Deze getallen zijn een verwijzing naar de minimale normsterkte op 28 dagen van het betreffende cement. Met de normsterkte van een cement wordt de druksterkte bedoeld. Deze wordt gemeten aan mortelbalkjes van 40 mm x 40 mm x 160 mm, die zijn vervaardigd uit cement en gestandaardiseerd zand met een vaste water-cementfactor van 0,50.

Om het begrip sterkteklassen voor cement uit te leggen gaan we even terug naar de CEM I, het portlandcement. Dit cement bestaat alleen uit portlandcementklinker en wordt geleverd in drie verschillende sterkteklassen. Hoe dat mogelijk is? Het geheim hiervan zit in de maalfijnheid van het cement.

Als de portlandcementklinker fijner wordt gemalen is er per kg gedoseerd cement een groter specifiek oppervlak aanwezig van de cementkorrels. Dit betekent dat als dit cement met water in contact komt, een groter deel van cement direct met water kan reageren. (zie figuur 4.12 op pagina 4.13). Dit heeft nadrukkelijk invloed op de sterkteontwikkeling van het cement zoals weergegeven figuur 4.35. Om een idee te krijgen van de verschillen in fijnheden van portlandcement kunnen we in tabel 4.8 zien dat een 52,5 cement per kg, 1,5 tennisveld meer oppervlak heeft dan een portlandcement in de 32,5 klasse.

Tabel 4.8 Enige voorbeelden van cement fijnheden.

Cement	Fijnheid (Blainewaarde in m <sup>2</sup> /kg)	Oppervlakte per kg (in tennisvelden)
CEM I 32,5 R	300	Circa 1,5
CEM I 42,5 R	420	Circa 2
CEM I 52,5 R	550	Circa 3



Figuur 4.35 Normsterkte opbouw voor CEM I in drie verschillende sterkteklassen.

Bij de sterkteklasse hoort ook nog een letteraanduiding voor de begin-sterkteontwikkeling. Dit kunnen zijn de letters L (voor Low), N (voor Normal) of R (voor Rapid). Hierbij hoort de opmerking dat de aanduiding L (Low) alleen van toepassing is bij een hoogovencement. Alle sterkteklassen met hun bijbehorende eisen zijn weergegeven in tabel 4.9.

Tabel 4.9 Grenswaarden voor normsterkte.

Sterkte- klasse	normsterkte [N/mm <sup>2</sup> ]			
	beginsterkte		sterkte	
	na 2 dagen	na 7 dagen	na 28 dagen	
32,5 L <sup>1)</sup>		≥12	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 N	-	≥16		
32,5 R	≥ 10	-		
42,5 L <sup>1)</sup>		≥16	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 N	≥ 10	-		
42,5 R	≥ 20	-		
52,5 L <sup>1)</sup>	≥ 10	-	≥ 52,5	-
52,5 N	≥ 20	-		
52,5 R	≥ 30	-		

<sup>1)</sup> Alleen van toepassing voor hoogovencement met lage beginsterkte.

#### 4.5.2.3 Cementbenamingen

Cementbenamingen zijn veelal lange codes met letters en getallen. In de benaming wordt geprobeerd zoveel mogelijk informatie te stoppen over het product. De benaming bestaat uit aanduidingen voor: de cementsoort, de sterkteklasse en eventuele speciale eigenschappen.

Als voorbeeld kijken we naar een CEM III/B 42,5 N LH SR. Deze naam bestaat uit drie delen.

Het **eerste deel** van de code is CEM III/B. Dit deel zegt iets over de samenstelling van het cement. Het is een hoogovencement met tussen 66 en 80% hoogovenslak.

Het **tweede deel** van de code is 42,5 N. Dit is de sterkteklasse van het cement. De normsterkte op 28 dagen zal liggen tussen de 42,5 en 62,5 N/mm<sup>2</sup>. Daarnaast geeft de N een 'Normale' beginsterkte ontwikkeling aan.

Het **derde deel** van deze code is LH en SR. Deze codes geven speciale eigenschappen van het cement aan. LH staat voor 'Low Heat', lage warmteontwikkeling, en SR staat voor 'Sulphate Resistance', hoge sulfaatbestandheid. Niet alle cementen hebben deze aanduiding en zijn dan ook niet altijd in de naamgeving aanwezig. In de volgende paragrafen gaan we wat dieper in op speciale eigenschappen.

#### 4.5.2.4 Speciale eigenschappen

Voor bepaalde situaties kan er gebruik gemaakt worden van speciale eigenschappen van een cement. In deze paragraaf komen we de belangrijkste tegen, te weten:

1. SR – Sulfaat bestand
2. LH – Lage warmteontwikkeling
3. VLH – Zeer lage warmteontwikkeling
4. Wit cement
5. Aluminiumcement

### SR - criteria

Er zijn situaties denkbaar dat het uiteindelijke beton wordt geplaatst in een omgeving waar veel sulfaten aanwezig zijn (denk bijv. aan milieuklasse XA3). Deze sulfaten kunnen leiden tot schade aan het beton. Deze schade kan worden voorkomen door gebruik te maken van een cement met de aanduiding SR dat staat voor 'Sulphate Resistance' (vroeger was dit HS 'Hoog Sulfaatbestand').

Er bestaan zeven cementsoorten die in de Europese cementnorm als sulfaatbestand worden aangeduid. Aan deze cementen worden verschillende eisen gesteld. Deze zijn weergegeven in tabel 4.10.

Tabel 4.10 De eisen aan de zeven cementsoorten voor sulfaatbestandheid.

Sulfaatbestand cement	C <sub>3</sub> A gehalte van de gebruikte portlandcementklinker	Samenstelling (in massa procenten <sup>a</sup> )				Nevenbestanddelen
		Hoofdbestanddelen (in massa %)				
		Portlandklinker (K)	Hoogoven slak (S)	Natuurlijk puzzolaan (P)	Silicium Houdende vliegas (V)	
<i>Sulfaatbestand portlandcement</i>						
CEM I – SR 0	= 0%	95-100	-	-	-	0-5
CEM I – SR 3	≤ 3%	95-100	-	-	-	0-5
CEM I – SR 5	≤ 5%	95-100	-	-	-	0-5
<i>Sulfaatbestand hoogovencement</i>						
CEM III/B – SR	Geen eis	20-34	66-80	-	-	0-5
CEM III/C – SR	Geen eis	5-19	81-95	-	-	0-5
<i>Sulfaatbestand Puzzolaancement <sup>b</sup></i>						
CEM IV/A – SR	≤ 9%	65-79	-	< 21 – 35 >		0-5
CEM IV/B – SR	≤ 9%	45-64	-	< 36 – 55 >		0-5

<sup>a</sup> 100% wordt gevormd door het totaal van de hoofd en neven bestanddelen.  
<sup>b</sup> Bij sulfaatbestand Puzzolaancement moet het puzzolane hoofdbestanddeel worden aangegeven in de naam. Bijvoorbeeld CEM IV/B (V) 32,5 N – SR. Hier is poederkoolvliegas gebruikt als puzzolaan hoofdbestanddeel.

### Eisen aan SR-cementen

De SR-cementen zijn onderverdeeld in 3 groepen.

#### Groep 1 – Sulfaatbestand portlandcement

Voor sulfaatbestand portlandcement kennen we 3 niveaus. Het is de SR-0, SR-3 en SR-5. Deze 0, 3 en 5 staan voor het maximale percentage C<sub>3</sub>A dat in de portlandcementklinker aanwezig mag zijn.

Om dit te begrijpen moeten we even terug naar het schademechanisme 'sulfaataantasting'. Sulfaataantasting is het reageren van sulfaat met C<sub>3</sub>A tot ettringiet, dat onder opname van water gaat zwellen en beton van binnenuit kapot kan drukken. Deze schade kan worden voorkomen als er geen of weinig C<sub>3</sub>A aanwezig is. Een sulfaatbestand portlandcement SR-3 bevat minder C<sub>3</sub>A dan een portlandcement SR-5 en zal minder kans op sulfaataantasting hebben.

#### Groep 2 – Sulfaatbestand hoogovencement

Bij sulfaatbestand hoogovencement is geen eis gesteld aan C<sub>3</sub>A. Door alleen de CEM III/B en de CEM III/C te definiëren als SR-cementen, is er een dusdanig klein portlandcementklinkeraandeel dat er weinig C<sub>3</sub>A aanwezig is. Daarnaast is de cementsteenstructuur van CEM III/B en CEM III/C veel dichter dan die van een CEM I. Hierdoor is het transport van water, dat nodig is voor de sulfaataantasting, veel kleiner dan bij een CEM I.

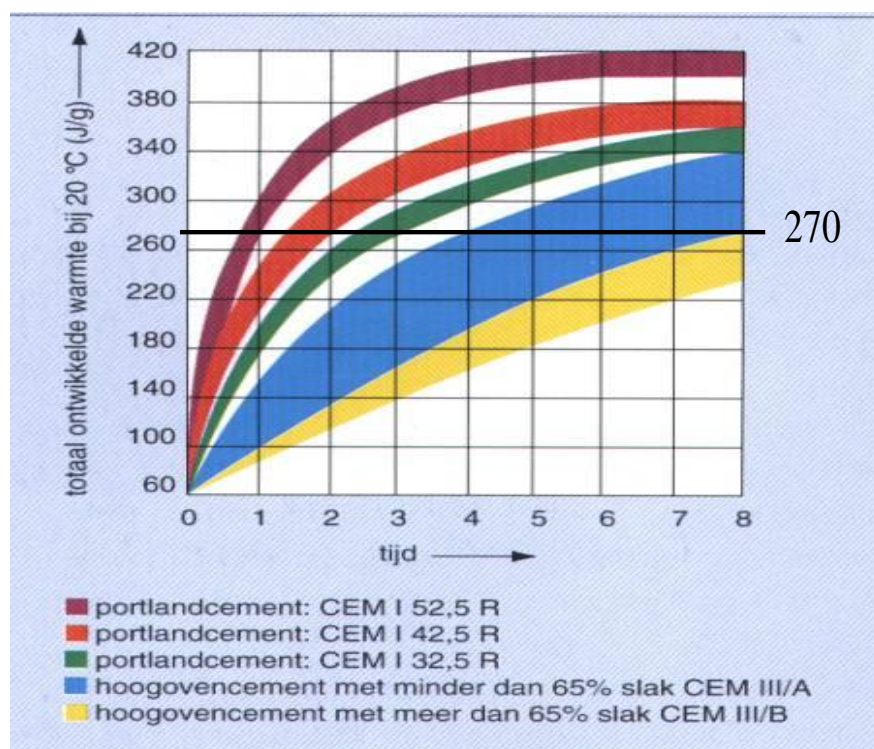
### Groep 3 – Sulfaatbestand puzzolaancement

Bij sulfaatbestand puzzolaancement valt op dat het cement niet meer elke puzzolaan mag bevatten, zoals weergegeven in de tabel 4.10. We mogen alleen gebruik maken van de poederkoolvliegias (V) en de natuurlijke puzzolanen (P). Daarnaast moet de gebruikte portlandcementklinker een  $C_3A$ -gehalte hebben dat kleiner is dan 9%.

#### LH - criteria

Bij de reactie van portlandcementklinker en water komt warmte vrij. Deze energiebron zorgt voor verhoging van de temperatuur van het beton. Bij massabetonconstructies kan de temperatuur behoorlijk hoog oplopen. Als de constructie echter afkoelt kan dit leiden tot temperatuurkrimp en scheuren. Om dit te voorkomen moet de maximale warmteontwikkeling van beton worden beperkt. Dit kan door gebruik te maken van een cement met een LH-predicaat.

Een cement ontvangt een LH-predicaat als blijkt dat 1 gram cement minder dan 270 J hydratatiewarmte produceert gedurende een periode van 7 dagen. In de praktijk komen we geen LH-cementen tegen die gemaakt zijn van 100% portlandcementklinker (CEM I). Een bekend voorbeeld van een LH-cement is het hoogovencement CEM III/B 42,5 N LH SR.



Figuur 4.36 Overzicht van de warmteontwikkeling van cementsoorten.

#### VLH-cement

Heeft een cement nog minder warmteontwikkeling en kan het voldoen aan een maximale hydratatiewarmte van minder dan 220 J/g in 7 dagen, dan mag het ook een VLH-cement genoemd worden. VLH staat voor Very Low Heat, zeer lage warmteontwikkeling.

Als indicatie moet voor een VLH-cement het portlandcementklinker (K) aandeel dalen tot onder de 25%. De VLH-criteria worden in aanvulling op NEN-EN 197-1 beschreven in NEN-EN 14216.

Omdat deze cementen een laag portlandcementklinker aandeel hebben, kunnen we ons voorstellen dat de sterkteontwikkeling van het cement minder snel is. Daarom geldt voor een VLH-cement een afwijkende lage sterkteklasse van 22,5. De normsterkte na 28 dagen zal liggen tussen de 22,5 en de 42,5 N/mm<sup>2</sup>. Deze cementen worden niet aangeduid met CEM, maar met VLH zoals weergegeven in tabel 4.11. De samenstellingseisen voor deze cementen zijn gelijk aan de CEM III, IV en V, zoals weergegeven in tabel 4.7.

Tabel 4.11

Hoofdgroep	Naam	
VLH III	Hoogovencement	VLH III/B
		VLH III/C
VLH IV	Puzzolaan cement	VLH IV/A
		VLH IV/B
VLH V	Composietcement	VLH V/A
		VLH V/B

#### *Wit cement*

Onder wit cement worden cementen verstaan die gemaakt zijn van speciaal vervaardigde witte portlandcementklinker. In deze portlandcementklinker is de ijzerhoudende toeslag verdwenen die het cement grijs kleurt. Het maken van witte portlandcementklinker geschiedt bij veel hogere oventemperaturen. De codes voor de cementbenamingen van wit cement werken op dezelfde manier als voor grijs cement. Wit cement wordt vooral gebruikt voor schoon en esthetisch beton.



Figuur4.37 Station in Luik, ontwerper: Calatrava. Wit beton van wit cement, geprefabriceerd en ter plaatse gestort.

### *Aluminiumcement*

Aluminiumcement bestaat uit dezelfde chemische elementen als portlandcement: kalk, silicium, aluminium en ijzer. Alleen de verhoudingen en vooral het aluminiumgehalte wijken sterk af. Aluminiumcement wordt gemaakt van bauxiet en kalksteen. Daarmee behoort aluminiumcement tot een andere groep dan portlandcement. De norm voor aluminiumcement is NEN-EN 14647.

Het aluminiumgehalte ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) is beduidend hoger dan in portlandcement. Aluminiumcement is een hydraulisch bindmiddel. Het reageert bijna stormachtig met water en ontwikkelt zijn maximale sterkte binnen een dag. Dit gaat gepaard met veel warmteontwikkeling.

### *Vuurvastheid*

Aluminiumcement is een cement dat veelvuldig wordt gebruikt voor vuurvaste constructies. De uit aluminiumcement gevormde cementsteen valt bij hoge temperaturen (bijv. 1000 °C) niet uit elkaar, maar vormt zich om tot een soort keramisch product en behoudt daarmee sterkte. Bij een hoger aluminiumgehalte is de vuurbestandheid hoger. Meestal wordt in de aanduiding voor het cement dan ook het aluminiumgehalte benoemd (bijv.: Alc 40, Alc 50 of Alc 70).

Niet toepassen in constructief beton.

Aluminiumcement mag niet worden toegepast in constructief beton. Het blijkt dat er situaties zijn waarbij de sterkte door de tijd heen kan afnemen. Dit is uit het oogpunt van veiligheid onacceptabel. Dit is jammer want de snelle sterkteontwikkeling kan in bepaalde situaties goed van pas komen.



*Figuur 4.38 Kunstenaars werken met aluminiumcement voor mallen of de beelden zelf. Dit beeld van aluminiumbeton is gemaakt door Atelier Meulenberg.*

### *Snelcement*

Als we portlandcement en aluminiumcement mengen, dan leidt dat in bepaalde gevallen tot een opstijving binnen een paar minuten. Dit is zeer onhandig voor beton. Deze combinatie wordt wel gebruikt voor het zogenoemde snelcement. Het is onverstandig zelf aluminiumcement te mengen met portlandcement. Kleine verschillen in mengverhouding kunnen onvoorspelbare gevolgen hebben. Snelcement wordt veel gebruikt in reparatiemortels bij noodsituaties voor bijvoorbeeld rioleringen, drinkwatervoorzieningen of kelders. Ook kunstenaars gebruiken aluminiumcement voor het maken van mallen of kunstwerken.

#### 4.5.2.5 *Toepasbare cementsoorten in beton*

In NEN 8005, de Nederlandse aanvulling op de Europese betonnorm NEN-EN 206, staat dat we niet elke cementsoort uit de cementnorm direct mogen toepassen in beton. Eerst moeten cementsoorten zich bewezen hebben voordat ze worden opgenomen in tabel 4.12 van toegelaten cement in beton in Nederland.

*Tabel 4.12 Toegelaten cement in beton volgens NEN 8005.*

Aanduiding volgens NEN-EN 197-1	Benaming cementsoort
CEM I	portlandcement
CEM II/A-S en CEM II/B-S	portlandslakcement
CEM II/A-V en CEM II/B-V	portlandvliegascement
CEM II/B-T	portlandleisteencement
CEM III/A en CEM III/B	hoogovencement

### Toelaten nieuwe cementsoorten

Om een andere cementsoort toe te passen in beton moet eerst worden aangetoond dat deze gelijkwaardig presteert met reeds toegelaten cementen. De procedure hiervoor is beschreven in CUR-Aanbeveling 48.

Voor het vaststellen van de geschiktheid van een nieuw cement voor toepassing in beton moeten vijf duurzaamheidsaspecten worden getoetst:

1. weerstand tegen carbonatatie (XC);
2. weerstand tegen chloride-indringing (XD);
3. vorst-/dooizoutbestandheid (XF);
4. bestandheid tegen zeewater (XS);
5. bestandheid tegen sulfaten (XA).

Het zijn duurzaamheidsaspecten die overeenkomen met de milieuklassen zoals opgenomen in NEN-EN 206. De toetsing heeft plaats op basis van een vergelijking met een referentiebeton, vervaardigd met een referentiecement. Als referentiecement zijn cementsoorten toegelaten die zijn genoemd in NEN 8005. Een nieuw cement wordt toegelaten als op alle vijf duurzaamheidsaspecten gelijkwaardig wordt gescoord.

Deze toelating wordt door een certificerende instantie afgegeven door middel van een attest met productcertificaat.

#### 4.5.3 Bindmiddel

Bij de productie van beton kan naast een cement ook één van de materialen uit de tabel 'Bestanddelen voor cement en bindmiddelen' (figuur 4.16) direct als grondstof voor beton worden toegepast. Onder bepaalde voorwaarden kan dit materiaal een deel van het



gebruikte cement vervangen. Dit wordt de bindmiddelfunctie genoemd. De combinatie van het cement en dit materiaal noemen we een bindmiddel.

Het voordeel van het maken van een bindmiddel is dat we de eigenschappen van beton helemaal zelf kunnen sturen. Bijvoorbeeld: de stabiliteit van het beton kan worden vergroot door poederkoolvliegias of kalksteenmeel bij te doseren; krimp kan worden beperkt door het gehalte aan portlandcementklinker in het mengsel te verlagen.

Het nadeel van deze werkwijze is dat er voor alle materialen wel siloruimte beschikbaar moet zijn. Gebruik je alleen cement dan is dit een gecontroleerd product waarbij een bepaalde sterkte wordt gegarandeerd. Bij het mengen op de centrale moeten we rekening houden met de spreiding in kwaliteit van de afzonderlijke materialen. Combineren van 'bekende' stoffen is niet per definitie een garantie voor de prestatie van het 'mengsel'.



*Figuur 4.39*

In de betonvoorschriften (NEN 8005) is ook een minimaal 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, kunnen onder bepaalde voorwaarden delen van het cement worden vervangen. Het bindmiddelgehalte is nu het aandeel cement plus een deel van bijvoorbeeld het gedoseerde poederkoolvliegias, afhankelijk van de bindmiddelfunctie van dit materiaal. Deze bindmiddelfunctie is geregeld in de betonvoorschriften en gaan we nu nader bekijken.

#### *4.5.3.1 Bindmiddelfunctie volgens de betonvoorschriften*

De betonvoorschriften (NEN-EN 206 en NEN 8005) geven regels voor de manier waarop een bindmiddelfunctie van een materiaal kan worden toegepast. De betonvoorschriften kennen alleen regels voor de materialen poederkoolvliegias en silica fume. Willen we gebruik maken van de bindmiddelfunctie van andere materialen, dan moeten we de regels van CUR-Aanbeveling 48 toepassen. Dit staat in de volgende paragraaf beschreven.

#### Bindmiddelfunctie van poederkoolvliegas

Het bindmiddelgedrag van poederkoolvliegas wordt voornamelijk bepaald door de eigenschappen van het cement waarmee deze puzzolaan wordt gecombineerd. Dit is logisch omdat er voldoende calciumhydroxide (CH) moet worden geproduceerd om daadwerkelijk de puzzolane reactie te krijgen. Er moet dus in het bindmiddelmengsel voldoende portlandcementklinker aanwezig zijn. De eerste vereiste is dat het cement moet voldoen aan NEN-EN 197-1 en de poederkoolvliegas aan NEN-EN 450. De bindmiddelfactor, ook wel *k*-factor genoemd, voor de poederkoolvliegas kunnen we vervolgens aflezen uit tabel 4.13.

Deze bindmiddelfactor is van toepassing in alle milieuklassen.

Door de puzzolane reactie van de poederkoolvliegas zal de bindmiddelfunctie pas na verloop van tijd merkbaar zijn. Gedurende de eerste dagen gebeurt er nog niets; na 28 dagen verharding is de bindmiddelfunctie geheel van toepassing.

*Tabel 4.13 k-factor voor poederkoolvliegas in beton zoals van toepassing in Nederland.*

Cementsoort	<i>k</i> -factor	Poederkoolvliegas/Cement [massa]	Beschreven in de
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

Bij de toepassing van de bindmiddelfactor van poederkoolvliegas moeten we aan de volgende randvoorwaarden voldoen:

- Bij het mengen van 2 in de tabel voorkomende cementen, mag de *k*-factor rechtlijnig worden geïnterpoleerd.
- De poederkoolvliegas-/cementverhouding bepaalt hoeveel vliegas mag worden meegenomen in de berekening van het bindmiddelgehalte (B) en de water-bindmiddelfactor (w/b-factor).
- Extra poederkoolvliegas in het mengsel wordt beschouwd als vulstof en mag niet meegenomen worden in de berekening van het bindmiddelgehalte (B) en de w/b-factor.
- Het bindmiddelgehalte (B) wordt berekend uit: het cementgehalte (C) plus een gedeelte (*k*-factor) van de poederkoolvliegas (V). In formule vorm:  $B = C + (k \cdot V)$ .

#### Bindmiddelfunctie van silica fume

Silica fume is ook een puzzolaan dat we vergelijkbaar benaderen. Door de grote fijnheid van de silica fume zal de sterktebijdrage hoger zijn, hetgeen tot uiting komt in veel hogere bindmiddelfactoren (zie tabel 4.14) die met name afhankelijk zijn van de water-cementfactor. Maar net als bij de poederkoolvliegas moet de bindmiddelfunctie 'groeien': in het begin van de verharding gebeurt er nog niets, na 28 dagen is hij volledig aanwezig.

*Tabel 4.14 k-factor voor silica fume in beton met portlandcement.*

Cementsoort	w/c-factor en milieuklasse	<i>k</i> -factor	Silica fume/Cement [massa]
CEM I of CEM II/A*	w/c-factor ≤ 0,45	2,0	≤ 0,11
	w/c-factor > 0,45	2,0	≤ 0,11
	behalve in milieuklasse XC of XF	1,0	≤ 0,11

\* Behalve voor cement waaraan silica fume is toegevoegd

Bij de toepassing van de bindmiddelfactor van silica fume moeten we aan de volgende randvoorwaarden voldoen:

- Een  $k$ -factor is alleen van toepassing in combinatie met een CEM I of CEM II/A.
- De silica fume-/cementverhouding bepaalt hoeveel silica fume mag worden meegenomen in de berekening van het bindmiddelgehalte (B) en de water-bindmiddelfactor (w/b-factor).
- Het bindmiddelgehalte (B) wordt berekend uit: het cementgehalte (C) plus een gedeelte ( $k$ -factor) van de silica fume (S). In formulevorm:  $B = C + (k \cdot S)$ .

#### 4.5.3.2 Bindmiddelfunctie volgens CUR-Aanbeveling 48

De betonvoorschriften willen niet innovatief beperkend zijn en stellen zich op het standpunt dat als gelijkwaardigheid wordt aangetoond van bindmiddelen t.o.v. cement volgens NEN-EN 197-1 deze kunnen worden toegepast.

Net als voor het toelaten van nieuwe cementsoorten in beton, kan nu ook gebruik gemaakt worden van CUR-Aanbeveling 48. Hierin is een beoordeling opgenomen voor de gelijkwaardigheid van bindmiddelen met cement. Laten we eerst de eisen aan het bindmiddel en het daarmee vervaardigde beton bespreken en daarna ingaan op de beoordeling en de toepassing.

Eisen aan het bindmiddel

Het bindmiddel moet aan de volgende eisen voldoen:

- De materialen die met cement worden gemengd moeten staan in de tabel 'Bestanddelen voor cement en bindmiddel (zie figuur 4.16);
- Van elk materiaal dat wordt toegepast moet een regelgevend document beschikbaar zijn in de vorm van bijvoorbeeld een Europese productnorm, een Nederlandse productnorm, een CUR-Aanbeveling of een nationale beoordelingsrichtlijn (zie tabel 4.15);
- 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 4.15 Overzicht van beschikbare productnormen.

Materiaal	Beschikbare productnorm
Gemalen Hoogovenslak	NEN-EN 15167-1
Silica fume	NEN-EN 13263-1
Poederkoolvliegias	NEN-EN 450-1
Kalksteenmeel	NEN-EN 12620 + BRL 1804

Eisen aan het met bindmiddel vervaardigde beton

- het bindmiddelgehalte moet ten minste gelijk zijn aan het minimale cementgehalte voor de desbetreffende milieuklasse conform NEN 8005;
- de water-bindmiddelfactor (w/b-factor) mag niet hoger zijn dan de maximale water-cementfactor voor de desbetreffende milieuklasse conform NEN 8005.

#### Beoordeling van het met bindmiddel vervaardigde beton

In tegenstelling tot de beoordeling van de geschiktheid van een nieuw cement kan de beoordeling van de gelijkwaardigheid van beton met een bindmiddel beperkt blijven tot de toetsing voor die milieuklassen waarin de aanvrager het bindmiddel wil toepassen.

Een toepassing in een andere milieuklasse dan waarvoor de gelijkwaardigheid is aangetoond, is dan niet toegestaan.

De toetsing heeft als eerste plaats op druksterkte. Voor de geschiktheid van een nieuw cement is een dergelijke eis niet relevant, want cement moet te allen tijde voldoen aan een sterkteklasse volgens NEN-EN 197-1. Voor het beoogde bindmiddel is het echter wel verstandig eerst te toetsen op sterkteontwikkeling, voordat begonnen wordt met een kostbaar en langdurig onderzoek naar duurzaamheidsaspecten voor toepassing in bepaalde milieuklassen. Het heeft immers weinig zin een bindmiddel toe te passen wanneer er amper sprake is van sterkteontwikkeling, toch één van de belangrijkste eigenschappen van beton.

Na de druksterktoets wordt de prestatie in de verschillende milieuklassen bepaald op basis van een vergelijking met een referentiebeton, vervaardigd met een per milieuklasse vastgesteld referentiecement. Als het bindmiddel door de testen heenkomt, wordt de toelating door een certificerende instantie afgegeven voor toepassing in bepaalde milieuklassen door middel van een attest. Dit staat bekend als attestbeton.

## **4.6 Vulstoffen**

Naast de bestanddelen voor een cement of bindmiddel, bestaan er ook nog vulstoffen. Dit zijn voor het overgrote deel dezelfde poedervormige materialen, alleen op een andere wijze ingedeeld. Vulstoffen zijn poeders die bij de betonfabriek of –centrale worden toegevoegd aan het beton. De betonnorm hanteert de volgende definitie:

#### Definitie vulstoffen

Vulstoffen zijn alle poedervormige materialen (< 0,063 mm) die naast cement als grondstof voor beton kunnen worden gedoseerd. De betonvoorschriften delen de vulstoffen in twee categorieën in, te weten type I en type II:

#### *Type 1: inerte vulstoffen*

Dit zijn materialen die geen reactie aangaan met water.

Gangbaar zijn: kalksteenmeel, kwartsmeel.

Deze materialen worden in beton gebruikt als aanvulling van de hoeveelheid fijn materiaal ter verhoging van de stabiliteit. Kleurstoffen worden ook hieronder geschaard.

#### *Type 2: vulstoffen met een bindmiddelfunctie.*

Dit zijn puzzolane of latent-hydraulische materialen die in combinatie met een geschikte cementsoort cementsteen kunnen vormen. Gangbaar zijn: poederkoolvliegias, silica fume, tras en gemalen hoogovenslak.

Er zijn meer vulstoffen dan de materialen weergegeven in Figuur 4.16 'Bestanddelen voor cement en bindmiddel'. Een voorbeeld hiervan is gemalen zand (kwartsmeel) of brekerstof van steenbrekerijen. Bij de toepassing van type 2 vulstoffen in beton met een bindmiddelfunctie wordt de werkwijze gehanteerd zoals in de vorige paragraaf is beschreven.