

## 5 DE TOEVOEGINGEN

In dit hoofdstuk worden de overige bestanddelen die aan het beton kunnen worden toegevoegd, aan de orde gesteld. Vandaar de naam: “toevoegingen”.

Aan de orde komen:

1. hulpstoffen
2. pigmenten
3. vezels

Uiteraard wordt besproken wat het zijn, waarom ze worden toegevoegd en waarmee rekening moet worden gehouden bij het gebruik van deze toevoegingen.

## INHOUDSOPGAVE

Pag.

5.1	Hulpstoffen.....	5-3
5.1.1	Hulpstoffen die de verwerkbaarheid van betonspecie wijzigen .....	5-5
5.1.1.1	Waterreducerende/plastificerende hulpstoffen.....	5-5
5.1.1.2	Sterk waterreducerende/superplastificerende hulpstoffen.....	5-8
5.1.1.3	Waterretentiemiddelen .....	5-10
5.1.2	Hulpstoffen die het luchtgehalte wijzigen .....	5-11
5.1.2.1	Luchtbelvormers .....	5-11
5.1.2.2	Gasvormende toevoegingen .....	5-14
5.1.2.3	Schuimvormende hulpstoffen .....	5-15
5.1.3	Hulpstoffen die de binding en verharding beïnvloeden.....	5-15
5.1.3.1	Versnellers.....	5-15
5.1.3.2	Bindtijdversnellers .....	5-16
5.1.3.3	Verhardingsversnellers.....	5-16
5.1.3.4	Vertragende hulpstoffen.....	5-16
5.1.4	Hulpstoffen ter verhoging van de weerstand tegen waterindringing .....	5-18
5.1.5	Indeling hulpstoffen.....	5-19
5.2	Pigmenten.....	5-21
5.3	Vezels .....	5-23
5.3.1	Inleiding.....	5-23
5.3.2	Verschillende materialen .....	5-23
5.3.3	Invloed van staalvezels.....	5-23
5.3.4	Kunststof vezels.....	5-27
5.3.5	Glasvezels.....	5-28
5.4	Verwerken van vezels.....	5-28

## 5.1 Hulpstoffen

Definitie:

*Een hulpstof is een stof die tijdens het mengen van betonspecie wordt toegevoegd in hoeveelheden kleiner dan 5% t.o.v. de cementmassa met het doel één of meer eigenschappen van de specie en/of het verharde beton te beïnvloeden.*

Hulpstoffen behoren inmiddels tot het standaard grondstoffenpakket voor beton. Meest bekend en toegepast zijn hulpstoffen die de waterbehoefte (de benodigde hoeveelheid water voor een bepaalde verwerkbaarheid) verlagen of de verwerkbaarheid verbeteren. Ook hulpstoffen die het luchtgehalte verhogen, worden regelmatig toegepast. Daarnaast zien we een groep hulpstoffen die de binding en verharding beïnvloeden. Andere hulpstoffen zijn bedoeld voor heel specifieke toepassingen, bijvoorbeeld colloïdaal beton, metselmortels en injectiemortels.

*Indeling van hulpstoffen*

Hulpstoffen worden naar hun hoofdwering in de volgende groepen ingedeeld:

- Hulpstoffen die de verwerkbaarheid van betonspecie wijzigen:
  - Waterreducerende/plastificerende hulpstoffen;
  - Sterk waterreducerende/plastificerende hulpstoffen;
  - Waterretentiemiddelen.
- Hulpstoffen die het luchtgehalte wijzigen:
  - Luchtbelvormers.
- Hulpstoffen die de binding en verharding beïnvloeden:
  - Bindtijdversnellers;
  - Verhardingsversnellers;
  - Vertragende hulpstoffen.
- Hulpstoffen ter verhoging van de weerstand tegen waterindringing.

Naast de hoofdwering kan een hulpstof ook een *bij- of nevenwerking* uitoefenen, waardoor een combinatie van eigenschappen wordt verkregen. Voorbeelden daarvan zijn:

- (super)plastificeerder met verhardingsvertragende of -versnellende bijwerking.
- plastificeerder met (geringe) luchtbelvorming als bijwerking.

De verschillende (bij)werkingen kunnen op een verschillende manier worden beïnvloed. Bij een lagere specietemperatuur zal bijvoorbeeld de vertragende werking van een 'vertragende plastificeerder' toenemen. De plastificerende werking blijft echter ongeveer gelijk. Een moeilijke keuze: een langere vertragingstijd accepteren of de dosering verlagen en genoeg nemen met geringe plastificerende werking. Of natuurlijk een andere hulpstof gebruiken.

In de praktijk wordt daarom vaak gekozen voor het combineren van hulpstoffen met verschillende hoofdweringen. In dat geval kunnen deze hulpstoffen elkaars werking beïnvloeden (interacties tussen de hulpstoffen).

Het effect van een hulpstof in betonspecie is uiteraard gekoppeld aan de dosering van de hulpstof. De benodigde dosering voor een bepaalde prestatie zal echter kunnen veranderen als eigenschappen van de samenstellende delen van de betonspecie veranderen.

*Aandachtspunten bij het werken met hulpstoffen*

Bij het werken met hulpstoffen moeten we ons er steeds van bewust zijn dat de prestatie van een hulpstof wordt bepaald door een groot aantal factoren, een en ander zoals hieronder opgesomd:

1. **De hulpstof.** De gebruikte grondstoffen, het gehalte en de constantheid van het aandeel werkzame stof in de hulpstof en de wijze van vervaardigen kunnen per hulpstofproducent variëren en kunnen de effectiviteit sterk beïnvloeden.
2. **De betonsamenstelling en de gebruikte grondstoffen.** Vooral de eigenschappen van het gebruikte cement spelen een belangrijke rol. De bij de cementproductie gebruikte grondstoffen, de chemische samenstelling en de fijnheid van het cement hebben grote invloed op de werking van bijna alle hulpstoffen. Deze invloed kan zo groot zijn dat een bepaalde hulpstof, gecombineerd met een bepaald cement helemaal niet werkt of juist extreem presteert! Ook vulstoffen kunnen de prestatie van hulpstoffen sterk beïnvloeden. Zelfs de korrelgrootteverdeling en eigenschappen van het gebruikte toeslagmateriaal hebben invloed.
3. **Het mengproces en de menger.** Het tijdstip waarop de hulpstof tijdens de mengprocedure wordt toegevoegd heeft vrijwel altijd invloed op de prestatie. Sommige hulpstoffen zijn hiervoor heel gevoelig. Naast het tijdstip van toevoegen speelt ook de mengintensiteit een rol.
4. **De temperatuur.** Zoals bij vrijwel alle chemische en fysieke processen heeft ook de temperatuur een grote invloed op de werking van hulpstoffen. De prestatie kan zowel negatief als positief worden beïnvloed bij verandering van de temperatuur.

De prestatie van een hulpstof moet daarom altijd vooraf in een geschiktheidsonderzoek worden vastgesteld. Herhaal dit bij veranderingen in het grondstoffenpakket en controleer bij het werken met hulpstoffen veel frequenter dan gebruikelijk de betoneigenschappen. De prestatie die de hulpstofproducent toeschrijft aan de hulpstof is in het algemeen bepaald overeenkomstig de hulpstofnorm aan een gestandaardiseerde betonsamenstelling en bij een temperatuur van 20 °C. Het is daarom zinvol de werking van de hulpstof ook bij een andere temperatuur (afwijking meer dan 10°C) te beoordelen als het betreffende beton bij veel hogere dan wel lagere temperaturen wordt toegepast.

#### *Algemene eisen voor hulpstoffen*

Voor alle hulpstoffen gelden algemene eisen voor eigenschappen als pH, (hoeveelheid) werkzame stof(fen), vastestof gehalte, chloride- en alkaligehalte. Daarnaast dient een hulpstof voldoende stabiel te zijn (hij mag niet ontmengen) en mag ze niet corrosief zijn voor wapeningsstaal. Deze eisen voor de verschillende eigenschappen zijn vastgelegd in NEN-EN 934-1. Bij veel van deze eisen is ook de toegestane afwijking van door de hulpstofproducent opgegeven waarden opgegeven. Zie tabel 5.1.

Tabel 5.1 Algemene eisen volgens NEN-EN 934-1.

Eigenschap	Eis
Homogeniteit	Homogeen tijdens gebruik. De ontmenging mag niet de door de producent opgegeven grenswaarden overschrijden
Kleur	Uniform en overeenkomend met opgave producent
Werkzaam bestanddeel	Geen significante verschillen IR-spectrum met door producent verschaft referentie
Volumieke massa (alleen vloeibare hulpstoffen)	$D = \pm 0,03$ als $D \geq 1,1$ $D = \pm 0,02$ als $D \leq 1,1$ $D =$ door producent opgegeven waarde
Gehalte aan droge stof	$0,95T \leq X \leq 1,05 T$ voor $T = \geq 20\%$ $0,90T \leq X \leq 1,10 T$ voor $T = < 20\%$ $T$ is door producent opgegeven waarde in % (m/m) $X$ is testresultaat in % (m/m)
pH	Door producent opgegeven waarde $\pm 1$ of binnen de door producent opgegeven grenzen
Effect op bindtijd	Resultaten rapportage: zie ook bij specifieke eisen per hulpstoftype
Totaal aan chloriden	$\leq 0,10\%$ (m/m) of niet hoger dan opgaaf producent
Wateroplosbaar chloride	$\leq 0,10\%$ (m/m) of niet hoger dan opgaaf producent
Alkaligehalte (Na <sub>2</sub> O-equivalent)	Niet hoger dan opgaaf producent
Corrosief gedrag	Geen corrosiebevorderende effecten op wapeningsstaal

#### *Specifieke eisen voor de verschillende hulpstoffen*

Per hoofdgroep worden, afhankelijk van de beoogde werking van de hulpstof, ook specifieke eisen gesteld. Bijvoorbeeld aan het vermogen om te 'plastificeren' of binding te vertragen. In de volgende paragrafen worden de verschillende hoofdgroepen behandeld. Per hoofdgroep wordt steeds ingegaan op de specifieke prestaties en mogelijke toepassingen, het werkingsprincipe en specifieke aandachtspunten bij het werken met de betreffende hulpstoffen.

### 5.1.1 Hulpstoffen die de verwerkbaarheid van betonspecie wijzigen

#### 5.1.1.1 *Waterreducerende/plastificerende hulpstoffen*

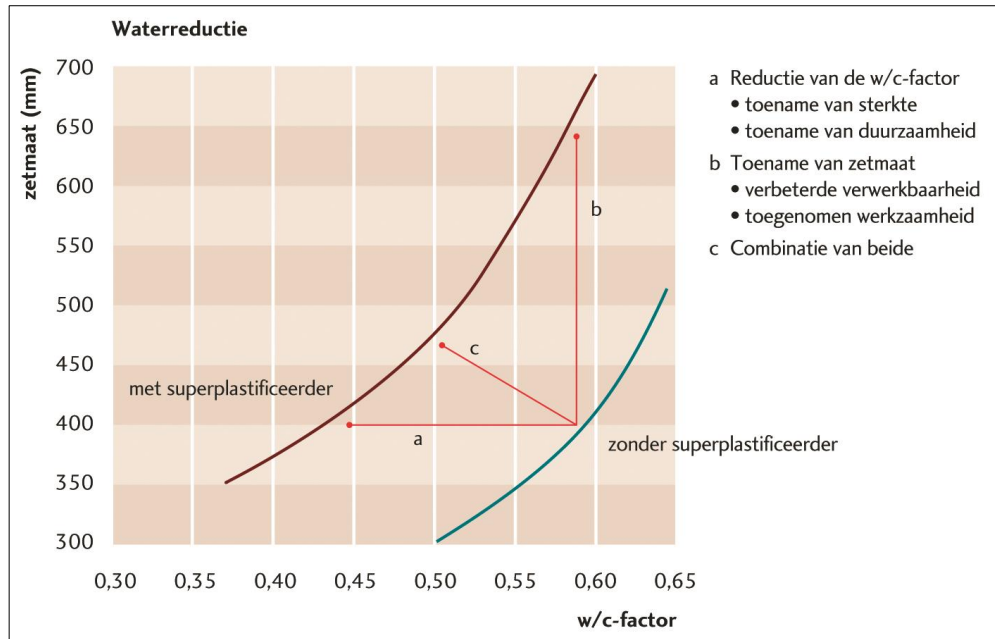
##### *Hoofdwerking*

Een waterreducerende/plastificerende hulpstof is een hulpstof waarmee:

- de consistentie kan worden verhoogd zonder de waterbehoefte te wijzigen;
- de waterbehoefte kan worden verlaagd zonder de consistentie te beïnvloeden;
- of een combinatie van beide effecten.

Een hogere consistentie en daardoor een betere verwerkbaarheid van betonspecie (zonder daarbij het watergehalte te verhogen) is dikwijls vereist in constructiedelen met een geringe doorsnede of op plaatsen waar zich een groot aantal, dicht op elkaar gelegen, wapeningsstaven bevindt. Het toepassen van een plastificerende hulpstof kan in dat geval de verwerkbaarheid van de specie zodanig verbeteren, dat minder intensief verdicht behoef te worden. Als gevolg daarvan zal ook de geluidsoverlast bij het verdichten afnemen.

Naast een betere verwerkbaarheid bij het gebruik van plastificeerders, kan ook een vermindering van de hoeveelheid water bij een gelijkblijvende consistentie worden bereikt. Op deze wijze wordt de water-cementfactor verlaagd of kan bij gelijke water-cementfactor minder cement worden gebruikt. In figuur 5.1 is zichtbaar hoe een (super)plastificeerder kan worden gebruikt: voor waterreductie (verlagen water-cementfactor) en/of door het verbeteren van de consistentie. De prestatie die we van een plastificeerder mogen verwachten, kan worden afgeleid uit de eisen die de hulpstofnorm hieraan stelt.



*Figuur 5.1 Gebruik van superplastificeerder voor waterreductie (verlagen water-cementfactor en/of verbeteren van de verwerkbaarheid). Een vergelijkbare figuur geldt ook voor plastificeerder. Het effect van de plastificeerder is echter geringer*

*Tabel 5.2 Eisen aan water-reducerende/plastificerende hulpstoffen) volgens NEN-EN 934-2. (Deze eisen gelden bij gelijkblijvende consistentie en betreffen een referentiemengsel conform NEN-EN 480-1).*

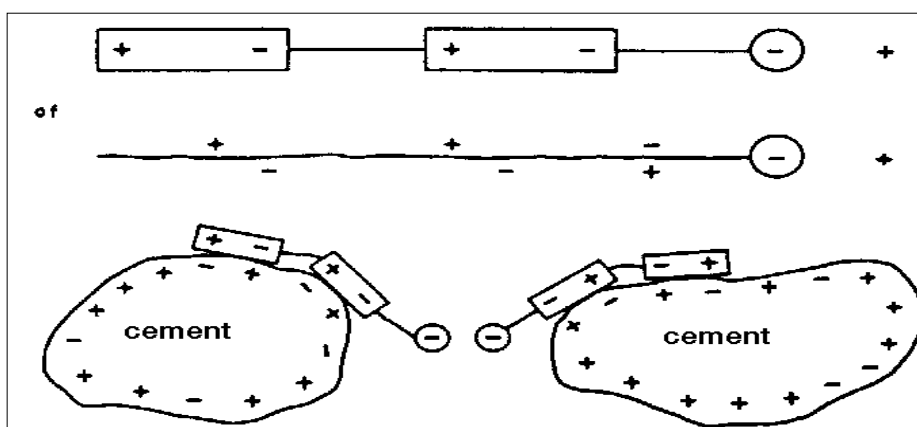
Eigenschap	Beproevingmethode	Eis(en)
Waterreductie	Zetmaat NEN-EN 12350-2, of Schudmaat NEN-EN 12350-5	In testmengsel $\geq 5\%$ vergeleken met referentiemengsel
Druksterkte	NEN-EN 12390-3	Na 7 en 28 dagen: testmengsel $\geq 110\%$ van referentiemengsel
Luchtgehalte in betonspecie	NEN-EN 12350-7	In testmengsel max. 2% hoger dan in referentiemengsel, tenzij anders opgegeven door producent.

*Werkingsprincipe*

Plastificeerders zijn meestal zeepachtige stoffen, waarvan de moleculen zich hechten aan de deeltjes in de betonspecie. Deze stoffen verminderen de inwendige wrijving in de specie door:

- verlaging van de oppervlaktespanning van het aanwezige water. De capillaire trek zal afnemen en het water zal in de kleine poriën de vaste deeltjes minder bijhouden;
- onderlinge afstoting van de cementdeeltjes, veroorzaakt door de elektrische lading van de eraan geadsorbeerde hulpstofmoleculen (meer water tussen de korrels).

Een en ander wordt vaak door middel van het plaatje in figuur 5.2 in beeld gebracht.



*Figuur 5.2* Voorstelling van de werking van (super)plastificeerders. De hulpstof wordt daarin weergegeven als een lange ketting van moleculen met daarin elektrische ladingen.

Door deze mechanismen wordt de plasticiteit van de specie verhoogd: de specie vloeit beter en laat zich gemakkelijker vervormen.

*Werkzame stof*

Een veel toegepaste grondstof voor plastificeerders is lignosulfonaat, een polymeer dat vrijkomt bij de productie van papier. De samenstelling is sterk afhankelijk van de procesvoering en het kan afhankelijk van de mate waarin het gezuiverd is, meer of minder verontreinigd zijn met nevenproducten zoals suikers. Steeds vaker worden ook synthetisch vervaardigde plastificeerders gebruikt.

*Nevenwerking*

Ten gevolge van de verlaging van de oppervlaktespanning kan bij de menging ook extra lucht in de betonspecie worden gebracht. Indien verschillende partijen plastificeerder worden gebruikt is, vanwege de mogelijke neveneffecten, regelmatige controle van de specie- en betoneigenschappen nodig. Bij hogere doseringen [ $> 0,5$  à  $1,0\%$  ( $m/m$ )] kunnen plastificeerders op basis van lignosulfonaat mede als gevolg van de aanwezige verontreinigingen ook een vertragende bijwerking hebben.

*Specifieke aandachtspunten: doseren, doormengen, belangrijke interacties*

Veel plastificeerders bevatten nog componenten die als nevenwerking verhoging van het luchtgehalte en/of vertraging van de binding en verharding veroorzaken. Daarom moet de dosering van plastificeerders beperkt blijven (doorgaans tot ca.  $0,6\%$   $m/m$  t.o.v. de cementmassa). Bedenk dat ook de mengprocedure invloed kan hebben op de prestatie van

een plastificeerder. Indien de plastificeerder op een laat moment in het mengproces aan de reeds voorgemengde specie wordt toegevoegd is het effect het grootst.

### 5.1.1.2 *Sterk waterreducerende/superplastificerende hulpstoffen*

#### *Hoofdwerving*

Een sterk waterreducerende/superplastificerende hulpstof is een hulpstof waarmee:

- de consistentie aanmerkelijk kan worden verbeterd zonder de waterbehoefte te wijzigen,
- de waterbehoefte sterk kan worden verlaagd zonder de verwerkbaarheid te beïnvloeden
- of een combinatie van beide effecten.

Superplastificeerders onderscheiden zich van plastificeerders door de grootte van het effect dat zij op betonspecie hebben.

De prestatie die van een superplastificeerder ten minste mag worden verwacht, kan worden afgeleid uit de eisen die de hulpstofnorm hieraan stelt.

*Tabel 5.3 Eisen aan superplastificeerders volgens NEN-EN 934-2.*

Eigenschap	Beproevingmethode	Eis(en)
Waterreductie	Zetmaat NEN-EN 12350-2, of Schudmaat NEN-EN 12350-5	In testmengsel $\geq 12\%$ vergeleken met referentiemengsel
Druksterkte	NEN-EN 12390-3 1999	Na 1 dag: testmengsel $\geq 140\%$ van referentiemengsel Na 28 dagen: testmengsel $\geq 115\%$ van referentiemengsel
Luchtgehalte in betonspecie	NEN-EN 12350-7	In testmengsel max. 2% hoger dan in referentiemengsel, tenzij anders opgegeven door producent.

#### *Werkingsprincipe*

Bij de meeste superplastificeerders is het mechanisme achter de plastificerende werking anders dan bij de plastificeerders. Het berust voornamelijk op afstotende krachten tussen de ladingen die de superplastificeerder op het oppervlak van de deeltjes in de betonspecie aanbrengt. Door de slechts geringe oppervlakteactiviteit op het grensvlak vloeistof-lucht zijn in het algemeen veel hogere doseringen mogelijk zonder dat daardoor veel lucht wordt ingebracht.

#### *Werkzame stof*

De belangrijkste grondstoffen voor superplastificeerders zijn:

- gezuiverde lignosulfonaten;
- gesulfoneerde naftaleen-formaldehydecondensaten;
- gesulfoneerde melamine-formaldehydecondensaten;
- polycarboxylaatethers.



De volgorde in bovenstaand overzicht komt overeen met de tijd waarop deze grondstoffen op de markt kwamen. Als eerste waren dat de gezuiverde lignosulfonaten. De meest recente zijn de polycarboxylaatethers, kortweg carboxylaten of PCE's genoemd.

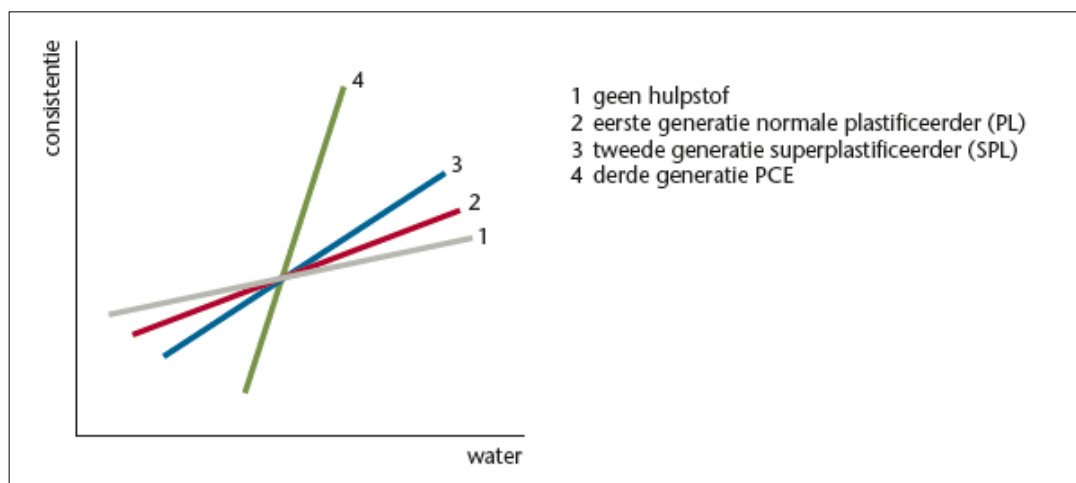
In de praktijk zien we veel gemodificeerde producten en producten waarin meerdere werkzame stoffen zijn gemengd. Hierdoor kunnen de prestaties van producten sterk uiteenlopen. Hieronder wat algemene uitspraken over het gedrag van de verschillende werkzame stoffen.

*Lignosulfonaten* worden ook gebruikt als plastificeerder. Alleen vrij zuivere producten die ook bij een hogere dosering nog geen ongewenste bijverschijnselen als vertraging of luchtinbreng vertonen, worden toegepast als superplastificeerder.

*Naftaleen-formaldehyde condensaten* zijn veel gebruikte superplastificeerders. Ze hebben een beter plastificerend effect dan de lignosulfonaten en kunnen in hogere doseringen worden toegepast zonder storende nevenwerkingen.

*Melamine-formaldehyde condensaten* staan bekend om het vrijwel ontbreken van bijwerkingen. Ze kunnen tot relatief hoge doseringen worden toegepast. Echter de werkingsduur is bij veel van dit type superplastificeerder beperkt.

*Polycarboxylaatethers* (PCE's) zijn recent ontwikkelde en uiterst effectieve plastificeerders. Figuur 5.3 geeft daarvan een globale indruk.



Figuur 5.3 Globale weergave van de invloed van de verschillende soorten plastificeerders op de consistentie in relatie tot het watergehalte.

De PCE's hebben in korte tijd een belangrijke plaats op de markt ingenomen. Door het grote aantal varianten is het moeilijk algemene uitspraken te doen. Door hun effectiviteit is de gevoeligheid voor verschillen in watergehalte/consistentie van het uitgangsmengsel groot. Ook variaties in de korrelgradering (met name de hoeveelheid fijne delen) en de stabiliteit van het betonmengsel zullen sneller dan bij de overige superplastificeerders tot afwijkend gedrag leiden. Vaak is een (veel) hogere dan de in de norm voorgeschreven minimale hoeveelheid fijn materiaal in de betonsamenstelling nodig om een stabiele betonspecie te verkrijgen. Sommige producten kunnen het luchtgehalte verhogen. In de cursus voor Betontechnoloog wordt daarom dieper op deze materie ingegaan.

*Specifieke aandachtspunten: doseren, doormengen, belangrijke interacties*

De prestatie van superplastificeerders varieert sterk, mede afhankelijk van de verschillende werkzame stoffen. Ook de mengintensiteit en de mengprocedure zijn belangrijk.

Intensievere menging geeft over het algemeen een hogere consistentie. Bij superplastificeerders is eveneens het moment waarop ze tijdens het mengproces worden gedoseerd belangrijk. Meestal is het effect van een bepaalde dosering superplastificeerder (veel) groter indien de hulpstof wat later in het mengproces, aan in de al voorgemengde specie, wordt toegevoegd. Omdat het gebruikelijk was om de hulpstoffen met het aanmaakwater te doseren (wat een gemakkelijke manier is om de hulpstof te doseren) is/wordt dit effect van het doseertijdstip vaak niet opgemerkt.

Superplastificeerders op basis van polycarboxylaten zijn heel effectief en presteren al bij relatief lage doseringen. Dit betekent tegelijk dat het risico groot is dat de prestatie al bij kleine verschillen in de samenstelling van de betonspecie sterk varieert. Bovendien zijn deze hulpstoffen erg gevoelig voor de stabiliteit van de specie. Dit vergt meer aandacht voor voldoende fijn (cement/vulstof) in de betonspecie om ontmenging te voorkomen. Bovendien kan de verwerkbaarheid soms onverwacht snel teruglopen. Een reden te meer om bij het toepassen van superplastificeerders door middel van vooronderzoek en intensieve controles tijdens de productie van de betonspecie snel maatregelen te kunnen nemen.

Het aanbod van deze hulpstoffen, met diverse varianten voor specifieke toepassingen, blijft groeien.

#### 5.1.1.3 *Waterretentiemiddelen*

*Hoofdwerking*

Een waterretentiemiddel vermindert de waterafscheiding / bleeding

Met een waterretentiemiddel wordt de samenhang van beton verbeterd. Het waterretentiemiddel zorgt ervoor dat het mengsel van cementlijm en fijn zand niet uitzakt, maar aan de grove korrels blijft hangen. Met bepaalde retentiemiddelen en bij verder daarop afgestemde betonsamenstellingen is het mogelijk betonspecie vrij door water te laten vallen zonder dat daarbij ernstige ontmenging optreedt. Ook is het mogelijk beton met een open structuur te maken door het weglaten van het grove gedeelte van het zand en het fijne deel van het grove toeslagmateriaal. Een bekende toepassing van betonspecie met daarin een waterretentiemiddel is bekend onder de naam *colloïdaal beton*.

Daarnaast worden waterretentiemiddelen steeds vaker gebruikt om zeer vloeibare betonspecies voldoende stabiliteit te geven om zo ontmenging te voorkomen.

Een belangrijk ander toepassingsgebied van waterretentiemiddelen betreft mortelspecies en droge mortelspecies. De samenhang van de specie (ook bij toevoeging van meer water en daardoor hoog vloeibare species) en hechting van de mortelspecies aan reeds aanwezige oppervlakken kunnen hiermee positief worden beïnvloed.

De prestatie die we van een waterretentiemiddel mogen verwachten, kan worden afgeleid uit de eisen die de hulpstofnorm hieraan stelt.

Tabel 5.4 Waterretentiemiddelen volgens NEN-EN 934-2.

Eigenschap	Beproevingmethode	Eis(en)
Bleeding	NEN-EN 480-4	In testmengsel $\leq 50\%$ vergeleken met referentiemengsel
Druksterkte	NEN- EN 12390-3	Na 28 dagen: testmengsel $\geq 80\%$ van referentiemengsel
Luchtgehalte betonspecie	NEN-EN 12350-7	In testmengsel max. 2% hoger dan in referentiemengsel, tenzij anders opgegeven door producent.

Waterretentiemiddelen zijn gemodificeerde, natuurlijke polymeren, afgeleid van bijvoorbeeld cellulose, die in water colloïdale eigenschappen bezitten. Ze 'verdikken' als het ware het water waardoor de beweeglijkheid van vooral de fijne deeltjes aanmerkelijk afneemt. Daardoor wordt de samenhang van een specie zodanig sterk verhoogd dat ontmenging, ook in water, wordt tegengegaan.

*Specifieke aandachtspunten: doseren, doormengen, belangrijke interacties*

Veel waterretentiemiddelen worden in droge vorm geleverd. Gezien ook het effect dat deze hulpstoffen op species hebben (versterken samenhang) is het vaak lastig de hulpstoffen goed door te mengen.

Waterretentiemiddelen kunnen de stabiliteit van betonspecie extreem verbeteren. Soms wordt het risico van plastische scheurvorming daardoor groter.

## 5.1.2 Hulpstoffen die het luchtgehalte wijzigen

### 5.1.2.1 *Luchtbelvormers*

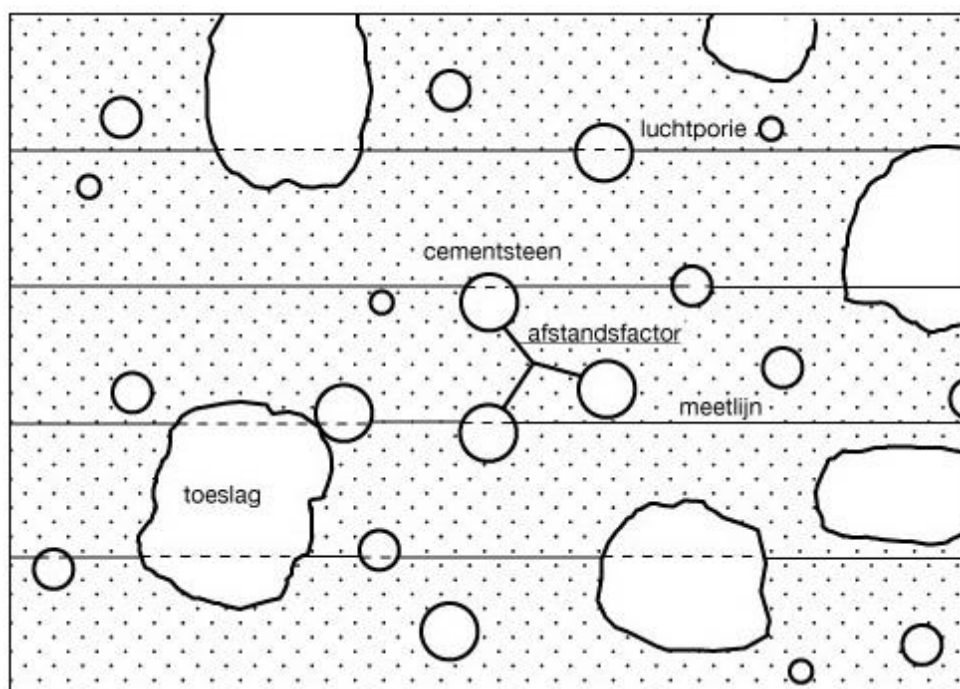
#### *Hoofdwerving*

Een luchtbelvormer is een hulpstof waarmee een gecontroleerde hoeveelheid stabiele, kleine en uniform fijn verdeelde luchtbelletjes tijdens het mengproces in de specie worden gebracht. Na verharden blijven deze achter.

Afhankelijk van de eisen aan de betonsamenstelling wordt doorgaans een zodanige dosering luchtbelvormer toegepast dat een luchtgehalte tussen ca. 3% en 6% wordt verkregen.

Naast het totale luchtgehalte en de luchtbelgrootte is vooral ook de zogenoemde afstandsfactor van belang voor de werking van de luchtbelvormer. De afstandsfactor wordt gedefinieerd als de grootste gemiddelde afstand tussen een punt in de matrix naar de naastgelegen luchtbel. Zie figuur 5.4. Voor beton dat tegen vorst/dooi-belasting bestand moet zijn, moet de afstandsfactor  $\leq 0,20$  mm zijn.

Het toepassen van een luchtbelvormer heeft een negatief effect op de druksterkte. Bij het mengselontwerp wordt in het algemeen rekening gehouden met een sterkteverlies van 5% per % dat het luchtgehalte toeneemt. Deze berekening wordt toegepast vanaf een luchtpercentage van 2%. In het hoofdstuk 'Mengselontwerp' komen we hier op terug.



Figuur 5.4 Afstandsfactor.

Luchtbelvormers kunnen om zeer uiteenlopende redenen aan betonspecie worden toegevoegd. De verbetering van de vorst- en dooibestendigheid van beton is de bekendste. De fijn verdeelde luchtbelletjes hebben ook nog andere effecten. Feitelijk wordt hiermee de hoeveelheid fijne delen in het mengsel vergroot waardoor de samenhang van de betonspecie toeneemt.

Dit is in NEN 8005 vertaald naar een bijdrage aan de hoeveelheid fijn materiaal (tabel 5.5).

Tabel 5.5 Bijdrage van ingebrachte lucht aan de hoeveelheid fijn materiaal

Gemeten luchtgehalte van de betonspecie %	Bijdrage aan de hoeveelheid fijn materiaal per m <sup>3</sup> beton m <sup>3</sup>
0,0 tot en met 2,0	0
3,0	0,010
4,0	0,020
5,0	0,030
6,0	0,040

Ook werken ze als fijn verdeelde kogeltjes waardoor de verwerkbaarheid van de betonspecie wordt verbeterd. Het stabiliserende en plastificerende effect van een luchtbelvormer is een positieve bijwerking. Daarom worden luchtbelvormers ook gebruikt voor het verbeteren van de samenhang en de verwerkbaarheid van een specie. Zelfs de waterdichtheid van beton kan worden verbeterd doordat de luchtbelletjes het capillair systeem onderbreken, waardoor de wateropzuigende (capillaire) werking vermindert. (zie figuur 5.5). De extra lucht zorgt echter wel voor een afname van de sterkte.



Figuur 5.5 Luchtbelletje en onderbroken capillair.

Tabel 5.6 Eisen aan luchtbelvormers volgens NEN-EN 934-2.

Eigenschap	Beproevingmethode	Eis(en)
Luchtgehalte betonspecie	NEN-EN 12350-7	In testmengsel $\geq 2,5\%$ (V/V) vergeleken met referentiemengsel. Totaal luchtgehalte 4 - 6% (V/V)
Luchtbilverdeling in verhard beton	NEN-EN 480-11	Afstandsfactor in testmengsel $\leq 0,20$ mm
Druksterkte	NEN-EN 12390-3	Na 28 dagen: testmengsel $\geq 75\%$ van referentiemengsel
Alle eisen hebben betrekking op hetzelfde testmengsel		

#### Werkzame stoffen

Luchtbelvormers zijn oppervlakte-actieve stoffen, met name werkzaam op het grensvlak lucht/water, die een zeer groot aantal, zeer kleine luchtbelletjes in de betonspecie brengen. De diameter van deze belletjes varieert van 0,02 tot 0,5 mm. Belletjes van deze afmeting bezitten een grote stabiliteit en worden bijvoorbeeld door trillen van de specie niet verdreven.

De werkzame stof in luchtbelvormers bestaat vaak uit gemodificeerde, natuurlijke harsen. In luchtbelvormers worden ook wel synthetische oppervlakte-actieve stoffen verwerkt.

Een heel bijzondere groep van luchtbelvormers vormen de zogenoemde 'holle microbolletjes'. Hierbij is feitelijk geen sprake van een hulpstof. De vooraf vervaardigde microbolletjes zijn feitelijk luchtbelletjes met een elastisch kunststof omhulsel.

De diameter is zeer klein: van ca. 0,02 – 0,08 mm. Ze worden 'kant en klaar' aan de betonspecie toegevoegd. Hierdoor kan voor een bepaalde afstandsfactor (en prestatie) het 'luchtgehalte' lager zijn waardoor ook de invloed op de sterkte geringer is. Ze kunnen ook worden toegepast in species waarin het normaliter lastig is een gecontroleerd en beheerst luchtgehalte te creëren (zoals bijv. zelfverdichtendbeton).

#### Specifieke aandachtspunten: doseren, doormengen, belangrijke interacties

Om het gewenste effect te verkrijgen is de benodigde hoeveelheid luchtbelvormer over het algemeen gering: ca. 0,1 tot 0,2% van de cementmassa, een en ander uiteraard afhankelijk van de hoeveel actieve stof in de luchtvormer. Dat is aanmerkelijk minder dan bij plastificeerders of superplastificeerders het geval is. Om de doseernauwkeurigheid te

vergroten, wordt vaak dezelfde luchtbelvormer in een lagere concentratie, dus met minder actieve stof, geleverd.

Bij gelijkblijvende dosering van de luchtbelvormer blijkt dat de ingebrachte hoeveelheid lucht in een betonspecie aanmerkelijk kan variëren. Er zijn namelijk veel factoren van invloed op de effectiviteit van de luchtbelvormer:

1. De korrelgrootteverdeling van het toeslagmateriaal. Bij gelijke dosering van de luchtbelvormer neemt het luchtgehalte af bij een toenemende hoeveelheid fijn materiaal in het mengsel.
2. De fijnheid van het cement. Bij gelijke dosering luchtbelvormer neemt het luchtgehalte af, wanneer:
  - de fijnheid van het gebruikte cement toeneemt en
  - de hoeveelheid cement toeneemt.
3. Consistentie. Bij gelijke dosering luchtbelvormer neemt het luchtgehalte af bij een lagere consistentie.
4. Specietemperatuur. Bij gelijke dosering luchtbelvormer neemt het luchtgehalte af bij toename van de specietemperatuur.
5. Toevoeging van poederkoolvliegias. Bij gelijke dosering luchtbelvormer neemt het luchtgehalte af bij toevoegen van poederkoolvliegias. Enerzijds als gevolg van de toename van de hoeveelheid fijn materiaal (vergelijkbaar met punt 1 en 2), anderzijds door adsorptie van de luchtbelvormer aan restdeeltjes kool uit vliegias. Door dat laatste neemt de effectieve hoeveelheid luchtbelvormer in het mengsel sterk af. Indien het koolstofgehalte in de vliegias varieert, zal ook het effect van de luchtbelvormer daardoor worden beïnvloed.
6. Ook bij gebruik van portlandvliegiascement kan het effect van de luchtbelvormer om dezelfde reden (de aanwezigheid van koolstof) negatief worden beïnvloed.
7. De mengenergie. Het mengen in een andere menger, gebruik van een andere mengprocedure of verschillende mengtijden kunnen een ander luchtgehalte opleveren.

In verband met deze invloedsfactoren dient bij gebruik van luchtbelvormers het luchtgehalte regelmatig te worden gecontroleerd, bij voorkeur ook zo kort mogelijk na het in gebruik nemen van andere grondstoffen of aanvoer van nieuwe partijen grondstof waarvan bekend is dat de eigenschappen daarvan kunnen variëren.

#### 5.1.2.2 *Gasvormende toevoegingen*

Voor de volledigheid noemen we hier ook de gasvormende toevoegingen. Bij gebruik van deze stoffen in specie ontstaat er gas kort na het doormengen als gevolg van een chemische reactie. Door bijvoorbeeld aluminiumpoeder in het mengsel te mengen wordt waterstof gas ontwikkeld. Op deze manier wordt bijvoorbeeld cellenbeton (eigenlijk 'cellenmortel' omdat het als toeslagmateriaal uitsluitend fijne toeslagmaterialen bevat) vervaardigd. Zie figuur 5.6.

Andere toepassingen (waarbij relatief weinig gas wordt gevormd) zijn injectie- of ondersabelingspecies die als gevolg van het ontstaan van gasbelletjes na het aanbrengen een geringe expansie vertonen.



*Figuur 5.6 Cellenbeton.*

#### 5.1.2.3 *Schuimvormende hulpstoffen*

Schuimvormende hulpstoffen maken het mogelijk dat door menging van schuim gemaakt met behulp van de schuimvormende hulpstof grote hoeveelheden lucht in een specie worden gebracht. In de praktijk wordt meestal uit schuimvormende hulpstof, voorgemengd met water in een schuimgenerator een stabiel schuim gemaakt dat vervolgens door de specie wordt gemengd. Een bekende toepassing is schuimbeton, dat eigenlijk schuimmortel zou moeten heten omdat het als toeslagmateriaal uitsluitend fijne toeslagmaterialen (en het schuim in de vorm van luchtbelletjes) bevat.

#### 5.1.3 Hulpstoffen die de binding en verharding beïnvloeden

Hulpstoffen kunnen de reactie van cement en water beïnvloeden. Dat kan zowel in negatieve als in positieve zin. De reactie kan vertraagd, maar ook versneld worden. Deze hulpstoffen worden daarom respectievelijk vertragers en versnellers genoemd.

##### 5.1.3.1 *Versnellers*

De meeste stoffen die als versnellers bruikbaar zijn hebben slechts een geringe werkzaamheid. Feitelijk de enige effectieve versneller van de beginsterkte, die bovendien nauwelijks invloed heeft op de sterkte na langere tijd, is calciumchloride ( $\text{CaCl}_2$ ) dat bovendien goedkoop is. Als nadelige bijverschijnselen van calciumchloride gelden een verhoogde krimp, een grotere neiging tot *kalkuitslag*, maar vooral de verminderde bescherming tegen corrosie van staal in beton. Het mag daarom niet worden toegepast in beton waarin één of andere vorm van stalen wapening voorkomt zoals voorgespannen of gewapend beton.

Versnellende hulpstoffen worden op de Nederlandse markt nauwelijks toegepast. In de praktijk wordt gekozen voor een sneller verhardend cement, verlaging van de water-cementfactor en/of verhogen van de temperatuur (hogere specietemperatuur of achteraf verwarmen van het beton in de bekisting).

Volledigheidshalve worden hier de versnellende hulpstoffen volgens de indeling van hulpstofnorm NEN-EN 934-2 behandeld.

*Tabel 5.7 Eisen aan bindtijdversnellers volgens NEN-EN 934-2.*

Eigenschap	Beproevingmethode	Eis(en)
Begin binding	NEN-EN 480-2	Bij 20°C: testmengsel $\geq$ 30 min. Bij 5°C: testmengsel $\leq$ 60% van referentiemengsel
Druksterkte	NEN-EN 12390-3	Na 28 dagen: testmengsel $\geq$ 80% van referentiemengsel Na 90 dagen: testmengsel $\geq$ referentiemengsel
Luchtgehalte betonspecie	NEN-EN 12350-7	In testmengsel $\leq$ 2% (V/V) boven referentiemengsel. Tenzij door producent anders opgegeven

### 5.1.3.2 Bindtijdversnellers

#### *Hoofdwering*

Een bindtijdversneller verkort de tijd tussen het aanmaken van een (plastisch)mengsel en het opstijven daarvan zonder dat de vroege sterkteontwikkeling in positieve zin wordt beïnvloed.

### 5.1.3.3 Verhardingsversnellers

#### *Hoofdwering*

Een verhardingsversneller versnelt de vroege sterkteontwikkeling van beton en al dan niet het bindinggedrag.

*Tabel 5.8 Eisen aan verhardingsversnellers volgens NEN-EN 934-2.*

Eigenschap	Beproevingmethode	Eis(en)
Druksterkte	NEN-EN 12390-3	Bij 20°C en na 24 uur: testmengsel $\geq$ 120% van referentiemengsel Bij 20°C en na 28 dagen: testmengsel $\geq$ 90% van referentiemengsel Bij 5°C en na 48 uur: testmengsel $\geq$ 130% van referentiemengsel
Luchtgehalte betonspecie	NEN-EN 12350-7	In testmengsel $\leq$ 2% (V/V) boven referentiemengsel. Tenzij door producent anders opgegeven

### 5.1.3.4 Vertragende hulpstoffen

#### *Hoofdwering*

Een vertragter verlengt de tijd tussen het aanmaken van een (plastische)mengsel en het opstijven daarvan.



Tabel 5.9 Eisen aan verhardingsvertragers volgens NEN-EN 934-2.

Eigenschap	Beproevingmethode	Eis(en)
Begin binding	NEN-EN 480-2	Testmengsel $\geq$ referentiemengsel + 90 min.
Einde binding	NEN-EN 480-2	Testmengsel $\geq$ referentiemengsel + 360 min.
Druksterkte	NEN-EN 12390-3	Na 7 dagen: testmengsel $\geq$ 80% van referentiemengsel Na 28 dagen: testmengsel $\geq$ 90% referentiemengsel
Luchtgehalte betonspecie	NEN-EN 12350-7	In testmengsel $\leq$ 2% (V/V) boven referentiemengsel. Tenzij door producent anders opgegeven

Hulpstoffen die de binding en beginverharding van betonspecie vertragen, worden om de volgende redenen toegepast:

1. Ter verlenging van de verwerkingstijd of om de beoogde verwerkingstijd te handhaven bij hogere temperaturen. Verlenging van de verwerkingstijd kan bijvoorbeeld dienen om stortnaden te voorkomen. Indien de eerder gestorte laag betonspecie nog verdichtbaar is (nat in nat storten), zullen geen stortnaden ontstaan.
2. Ter voorkoming van scheurvorming in jong beton.  
Wanneer men in reeds gestorte specie nog beweging verwacht als gevolg van het bewegen of zetten van de bekisting, bijvoorbeeld door het later storten van specie, kan een vertraagde en daardoor nog niet opgestijfde specie deze beweging opnemen zonder dat daardoor scheurvorming optreedt.

Er zijn vertragende hulpstoffen op basis van heel verschillende werkzame stoffen. De meest toegepaste vertragers bevatten één of meer van de volgende stoffen:

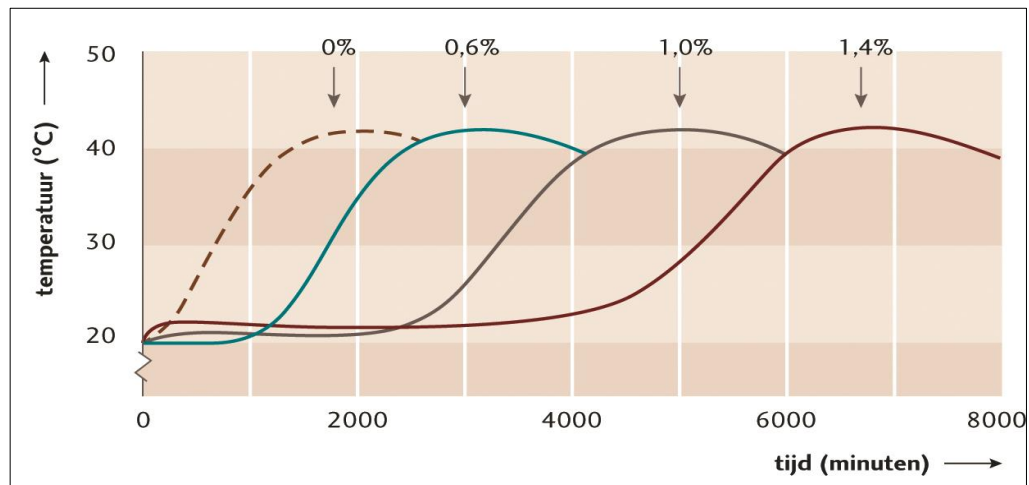
- suikers;
- lignosulfonaten;
- fosfaten;
- zouten van hydroxycarbonzuur;
- boraten.

Vooralsuikers zijn erg effectief. Hoge suikergehalten kunnen ertoe leiden dat de binding en de verharding over zeer lange tijd verstoord worden. Het vertragend (neven-)effect van plastificeerders op basis van lignosulfonaten wordt veroorzaakt door de daarin aanwezige suikers.

Vertragers zijn werkzaam doordat ze zich op het oppervlak van de deeltjes afzetten en daar als het ware een hindernis vormen voor de hydratatie. Na verloop van tijd zal toch sprake zijn van het vormen van hydratatieproducten van cement en water. Ook aan het oppervlak daarvan zal de vertrager zich hechten. De verhindering van de hydratatie zal daardoor verminderen en na verloop van tijd zal de reactie weer op normale snelheid plaatshebben.

Een veel gehoorde mening is dat ook de hoogte van de maximumtemperatuur van het beton ten gevolge van de hydratatiewarmte kan worden beïnvloed met een vertrager, omdat de

totale hoeveelheid vrijkomende warmte verminderd zou worden. Dat laatste is niet juist. Echter, in de praktijk blijkt vaak dat de maximumtemperatuur wel lager is bij gebruik van een vertrager. De oorzaak moet dan niet gezocht worden in een kleinere hoeveelheid hydratatie-warmte, maar in een langere periode waarin deze vrijkomt en dus ook een langere periode waarin warmte aan de omgeving wordt afgestaan. Als er geen warmte aan de omgeving zou worden afgestaan (zogenoemde *adiabatische* omstandigheden), zou toch dezelfde maximumtemperatuur worden bereikt (figuur 5.7). Uiteraard spelen het betonvolume en de isolerende eigenschappen van de bekisting of het al dan niet koelen van het beton een grote rol.



Figuur 5.7 Invloed van een vertrager op de temperatuurstijging van een massabeton onder adiabatische omstandigheden.

Ten slotte is ook de eventuele invloed van de vertrager op de eindsterkte van het beton van belang. Ervaring heeft geleerd dat een vertraging in de beginperiode van de hydratatie doorgaans een gunstige invloed heeft op de uiteindelijk bereikbare eindsterkte.

*Specifieke aandachtspunten: doseren, doormengen, belangrijke interacties*

Het is duidelijk dat de vertragende werking voor een belangrijk deel wordt bepaald door de cementeigenschappen. Voor een hoogovencement kunnen in het algemeen voor dezelfde prestatie, aanmerkelijk lagere doseringen worden gebruikt. Kleine verschillen in de samenstelling en de fijnheid van het cement en/of de vulstof, kunnen relatief grote verschillen in de vertragingsstijd veroorzaken.

De specietemperatuur speelt eveneens een belangrijke rol. Naarmate deze hoger is, zullen over het algemeen grotere doseringen nodig zijn om het gewenste effect te verkrijgen.

Bij vertragers moet de juiste dosering altijd door middel van geschiktheidsproeven worden vastgesteld. Blijf ook tijdens de uitvoering van het betonwerk voortdurend alert op een eventueel afwijkend gedrag van de betonspecie, zoals veranderingen in de consistentie en het gedrag tijdens verdichten. Ook als andere grondstoffen worden gebruikt, moet opnieuw worden nagegaan of de beoogde vertragende werking nog steeds aanwezig is.

5.1.4 Hulpstoffen ter verhoging van de weerstand tegen waterindringing

De weerstand van beton tegen waterindringing (ook wel de dichtheid genoemd) kan op verschillende manieren worden verbeterd. De dichtheid van beton wordt vooral bepaald door cementkeuze en de water-cementfactor. De mate van de nabewerking en

nabehandeling speelt hierbij een grote rol. Ook grindnesten, grove luchtinsluitingen en scheuren zijn natuurlijk funest voor de waterdichtheid van beton.

Zoals eerder vermeld bij de luchtbelvormers kunnen kleine luchtbelletjes met een luchtbelvormer worden ingebracht die de capillaire poriën onderbreken en daarmee capillaire opzuiging tegengaan.

Er zijn ook specifieke hulpstoffen die een dichtend effect hebben door op verschillende manieren het poriesysteem te verstoppen.

Zo kunnen aan het betonoppervlak waterwerende middelen, zoals siliconen, worden toegepast. Hiermee wordt het beton waterafstotend gemaakt. We noemen dit ook wel: “hydrofoberen”.

In Nederland worden hulpstoffen die de capillaire absorptie van verhard beton verminderen weinig gebruikt. Vaak wordt gekozen voor een lagere water-cementfactor om de vloeistofdichtheid van beton te verbeteren.

#### 5.1.5 Indeling hulpstoffen

Hulpstoffen worden ingedeeld naar het effect dat het gebruik ervan in betonspecie en/of verhard beton veroorzaakt. NEN-EN 934-2, de norm voor hulpstoffen voor beton, mortel en injectiemortel, geeft de volgende indeling en eisen van de hoofdwering. De effectiviteit van de hoofdwering wordt beoordeeld ten opzichte van een referentiebeton.

De tabel 5.10 bevat een samenvatting van de hoofdwering van de verschillende hulpstoffen.

Naast de genoemde typen hulpstoffen en hun hoofdweringen kent NEN 934-2 nog een aantal hulpstoffen waarbij combinaties kunnen worden gemaakt van de hier genoemde hoofdweringen. De eisen die aan de hoofdwering worden gesteld, kunnen enigszins afwijken van de eisen uit de tabel.

Hulpstoffen worden zowel in poedervorm als vloeibaar verwerkt. In betonspecie meestal vloeibare hulpstoffen. Poedervormige hulpstoffen zien we vooral in droog voorgemengde mortelspecies en bij specifieke producten zoals colloïdale hulpstoffen (voor het maken van ‘uitspoelvrij’ beton. Zie 5.1.1.3).

Tabel 5.10 Indeling hulpstoffen voor beton.

Type hulpstof	Hoofdwering	Eis aan de hoofdwering in relatie tot een referentiebeton/-mortel (NEN-EN 480-1 / NEN-EN 934-2)
Waterreducerende/ plastificerende hulpstof	- verlaging van watergehalte bij gelijkblijvende verwerkbaarheid - verhoging van de verwerkbaarheid bij gelijkblijvend watergehalte	waterreductie $\geq 5\%$ druksterkte $\geq 110\%$ (na 7 en 28 dagen)
Sterk waterreducerende/super- plastificerende hulpstof	- sterke verlaging van watergehalte bij gelijkblijvende verwerkbaarheid - sterke verhoging van de verwerkbaarheid bij gelijkblijvend watergehalte	waterreductie $\geq 12\%$ druksterkte $\geq 140\%$ ( 1 dag) $\geq 115\%$ ( 28 dagen) toename zetmaat $\geq 120$ mm toename schudmaat $\geq 160$ mm
Waterretentiemiddel	beperving van het waterverlies als gevolg van bleeding	Bleeding $\leq 50\%$
Luchtbelvormer	vorming van een gecontroleerde hoeveelheid fijn verdeelde luchtbelletjes tijdens het mengproces	$\geq 2,5\%$ (V/V) afstandsfactor in referentiebeton $\leq 0,20$ mm
Bindtijdversneller	verkorting van de overgang tussen de plastische en vaste fase van een beton (mortel)specie	bij $5^{\circ}\text{C} \leq 60\%$ Ondergrens bij $20^{\circ}\text{C}$ is 30 min.
Verhardingsversneller	versnelt de sterkteontwikkeling van het verhardende beton	bij $20^{\circ}\text{C}$ $\geq 120\%$ (na 24 uur) $\geq 90\%$ (na 28 dagen) bij $5^{\circ}\text{C}$ $\geq 130\%$ (na 48 uur)
Vertragende hulpstof	verlenging van de overgang tussen de plastische en vaste fase van een beton- of mortelspecie	begin binding: referentie + 90 min. einde binding: referentie + 360 min.
Hulpstof ter verhoging van de weerstand tegen waterindringing	bepert de capillaire absorptie van verhard beton	capillaire absorptie: $\leq 50\%$ (na 7 dagen testen en 7 dagen nabehandelen) $\leq 60\%$ (na 28 dagen testen en 90 dagen nabehandelen)

## 5.2 Pigmenten

De benamingen kleurstof en pigment worden vaak door elkaar gebruikt. In feite is dit niet juist. In tegenstelling tot kleurstoffen zijn pigmenten onoplosbaar in water. Een in water oplosbare kleurstof zou aan het betonoppervlak snel uitgewassen kunnen worden. Zowel kleurstoffen als pigmenten zijn er van organische als anorganische aard.

In bouwproducten en verven worden vooral pigmenten gebruikt. Kleurstoffen worden bijvoorbeeld gebruikt in voedingsmiddelen en cosmetica.

Pigmenten kunnen worden geproduceerd met een vooraf bepaalde chemische samenstelling en korrelverdeling. Pigmenten voor gebruik in beton moeten bestand zijn tegen het alkalisch milieu in beton, onoplosbaar zijn in water en lichtecht en weerbestand zijn. Diverse metaaloxiden voldoen aan deze eisen.

IJzeroxide is het meest gebruikte pigment in beton. Hiermee zijn veel kleurnuances te maken in de tinten zwart, bruin, rood en geel.

Chroomoxide geeft een groene kleur, kobaltoxide een blauwe.

Pigmenten in beton worden gerekend tot de vulstoffen. Pigmenten voor toepassing in gewapend of ongewapend beton moet voldoen aan de eisen, beschreven in NEN-EN 12878.



*Figuur 5.8 Pigmenten.*

De doseringsgrootte van pigmenten is uiteraard veel kleiner dan voor vulstoffen: doorgaans ligt deze tussen 2 en 5% van de cementmassa. In massa tussen 5 en 15 kg per m<sup>3</sup> beton.

Pigmenten zijn uiterst fijn gemalen. De deeltjesgrootte is aanzienlijk kleiner dan die van cement. Doorgaans kleiner dan 0,001 mm. Door de deeltjesgrootte en de veel grotere kleurintensiteit ten opzichte van cement is de pigmentkleur overheersend ten opzichte van de cementkleur.

Door deze fijnheid kan de toevoeging van kleurstoffen, ondanks de relatief geringe doseringsgrootte, grote invloed hebben op de eigenschappen van de betonspecie. De waterbehoefte kan sterk toenemen. Ook kan de werking van vertragende, plastificerende en lucht inbrengende hulpstoffen sterk worden beïnvloed. Daarom is vooronderzoek in alle gevallen noodzakelijk.

Uiteraard zijn de eigenschappen en de kleur van de overige grondstoffen: cement, vulstoffen en toeslagmaterialen van grote invloed op de uiteindelijk te bereiken kleur.

In veel gevallen wordt gekleurd beton vervaardigd op basis van wit cement, om zo het kleurend effect te versterken en een homogener resultaat te bereiken.

Gekleurd beton is een bijzondere variant van 'Schoonbeton'. Voor de productie en de verwerking van kleurbeton gelden dezelfde aandachtspunten als voor schoonbeton. Zie hoofdstuk 7 'Vervaardigen van betonspecie' en hoofdstuk 8 'Verwerken van betonspecie'. Het samenstellen, mengen en verwerken van betonspecie met kleur vergt bijzondere aandacht, omdat bij gebruik van pigmenten naast de gebruikelijke eigenschappen van betonspecie en beton ook een overeengekomen en gelijkmatig kleureffect moet worden gerealiseerd.

Bij twijfel óf indien er onvoldoende ervaring aanwezig is met het maken van de betreffende bouwdelen in gekleurd beton, kan veel teleurstelling worden voorkomen door vooraf een proefvak of proefstort te maken. In de praktijk wordt voordat het schoonbetonwerk gemaakt moet worden, al veel betonwerk gemaakt (funderingen, kelderwanden) waaraan geen specifieke eisen zoals aan schoonbeton worden gesteld. Deze bouwdelen kunnen wel prima als proefvak worden gebruikt!

*Tabel 5.11 Aandachtspunten bij kleurbeton.*

Invloed op kleur	Opmerkingen
Cementsoort	Hoogovencement maar vooral wit cement geven het betonoppervlak een lichte, homogene kleur. Wit cement in combinatie met pigmenten leidt tot meer heldere kleuren dan de combinatie grijs cement en pigment.
Pigment	Anorganische pigmenten (metaaloxiden) geven het beste resultaat voor kleurintensiteit en kleurvastheid. Het kleureffect van pigmenten is sterk afhankelijk van de andere grondstoffen en van de betonsamenstelling. Een gebruikelijke dosering is 2 tot 5% van de cementmassa. Pigmenten moeten voldoen aan NEN-EN 12878.
Zwart of bijna zwart beton	Werkelijk zwart beton is niet te maken. Het donkerste beton is eerder antraciet dan zwart. Zeer donker beton laat zich het beste vervaardigen op basis van wit (!) cement met antraciet metaaloxide in combinatie met roet (roet is echter niet duurzaam). Na het ontkisten direct hydrofoberen om vochttransport in de betonhuid te blokkeren.
Vulstoffen	Effect van vulstoffen op kleur vooraf testen.
Waterreducerende hulpstoffen	Verlaging van de water-cementfactor geeft het beton een donkerder kleur.
Stralen of uitwassen van het betonoppervlak	Kies de kleur van het toeslagmateriaal overeenkomstig de gewenste betonkleur.
Menger en transportmiddel vooraf schoonmaken	De eerste lading betonspecie uit een menger die of transportmiddel dat niet brandschoon is, is vaak niet helemaal op kleur.
Menger en transportmiddel naderhand schoonmaken.	Na overgang terug op grijs beton kan de eerste lading een kleurafwijking te zien geven.

## 5.3 Vezels

### 5.3.1 Inleiding

Met vezels kunnen heel specifieke eigenschappen van betonspecie en verhard beton worden beïnvloed. Meestal worden vezels aan beton toegevoegd om het scheurgedrag en het gedrag van het beton na het scheuren te beïnvloeden. Met vezels kunnen echter ook heel andere betoneigenschappen beïnvloed worden, zoals de stootvastheid en de kans op afspatten bij brand.

Om de gewenste eigenschappen te bereiken is het van belang dat de juiste soort en type vezels worden toegepast, in de juiste hoeveelheid, en dat de mengselsamenstelling en wijze van verwerken hierop worden aangepast.

### 5.3.2 Verschillende materialen

Vezels kunnen worden vervaardigd uit verschillende materialen. De materiaalkeuze is heel bepalend voor de prestatie van de vezel. De verschillen in eigenschappen als (trek-)sterkte, smeltpunt en E-modulus zorgen ervoor dat de verschillende vezels kunnen worden toegepast om heel specifieke eigenschappen van beton te beïnvloeden. Soms worden verschillende vezeltypen gecombineerd (bijvoorbeeld een mengsel van polypropyleen vezels en staalvezels).

Tabel 5.12 Overzicht met waarden voor de voor toepassing in beton relevante eigenschappen van vezels.

Materiaal	Materiaaleigenschappen				Gebruikelijke afmetingen	
	Dichtheid (kg/m <sup>3</sup> )	E-modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Treksterkte (N/mm <sup>2</sup> )	Smeltpunt (°C)	Lengte (l) (mm)	Diameter (d) (mm)
Polypropyleen	900	3.500	560 – 770	170	5 - 20	0,02– 0,20
Glas	2.700	70.000	600 – 2.500	> 2.000	10 - 50	0,0125
Staal – kort	7.860	200.000	500 – 3.000	1.350	3 - 30	0,08– 0,40
Staal – lang					30 - 60	0,4– 1,0

Staalvezels en polypropyleenvezels worden het meest toegepast.

Bij de keuze van een vezel is het belangrijk rekening te houden met het milieu waarin de vezel wordt gebracht. Zo zijn glasvezels niet altijd bestand tegen het alkalische milieu in beton. Wanneer de staalvezels blootgesteld kunnen worden aan een chloride houdend of agressief milieu kan overwogen worden om roestvrij stalen vezels toe te passen.

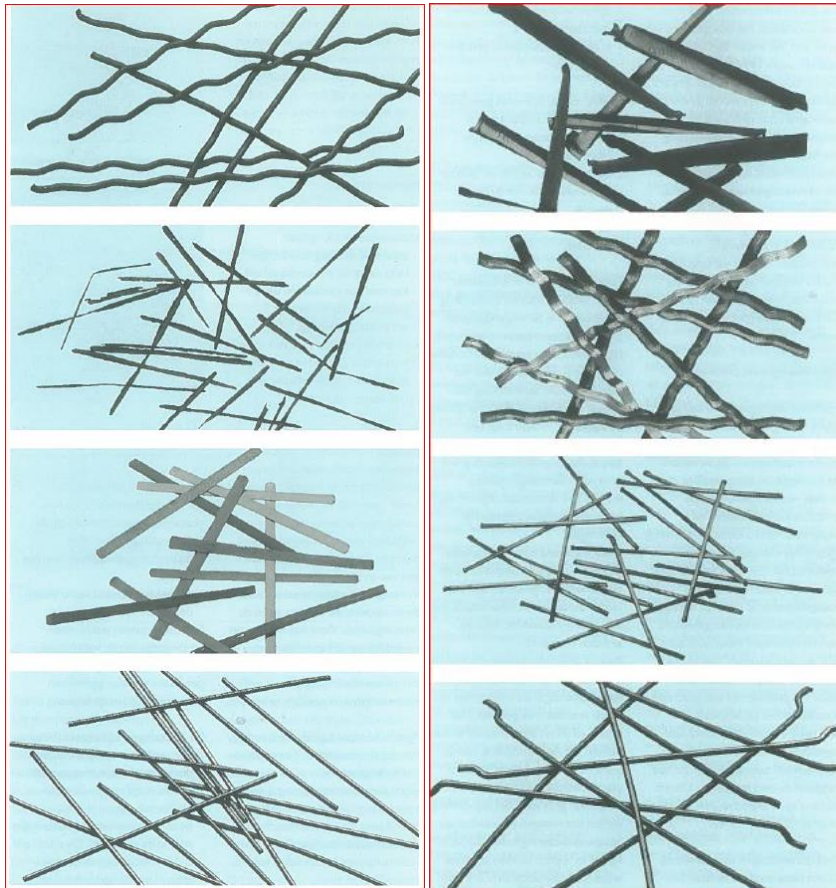
### 5.3.3 Invloed van staalvezels

Over het algemeen zijn vezels recht en rond waardoor de afmetingen uitgedrukt kunnen worden in een lengte en een diameter (van de doorsnede). De verhouding tussen de lengte en de diameter, een maat voor de slankheid wordt aangeduid als de 'aspect-ratio' ( $\lambda = l/d$ ); een vezel met een lengte van 60 mm en een diameter van 0,7 mm heeft een aspect ratio van  $60 / 0,7 = 86$ .



Staalvezels hebben echter soms een afwijkende vorm als gevolg van de wijze van produceren: gefreesd, geschaard, geplet, gekopt, gegolfd, enzovoorts. Zie figuur 5.9

De vezel wordt in dat geval plat geslagen om een zogenaamde equivalente lengte te bepalen. Bij een niet-ronde doorsnede wordt een equivalente diameter berekend als de diameter van de cirkel die een even groot oppervlak heeft als de niet-ronde doorsnede. De vorm heeft invloed op de prestaties van de vezel.



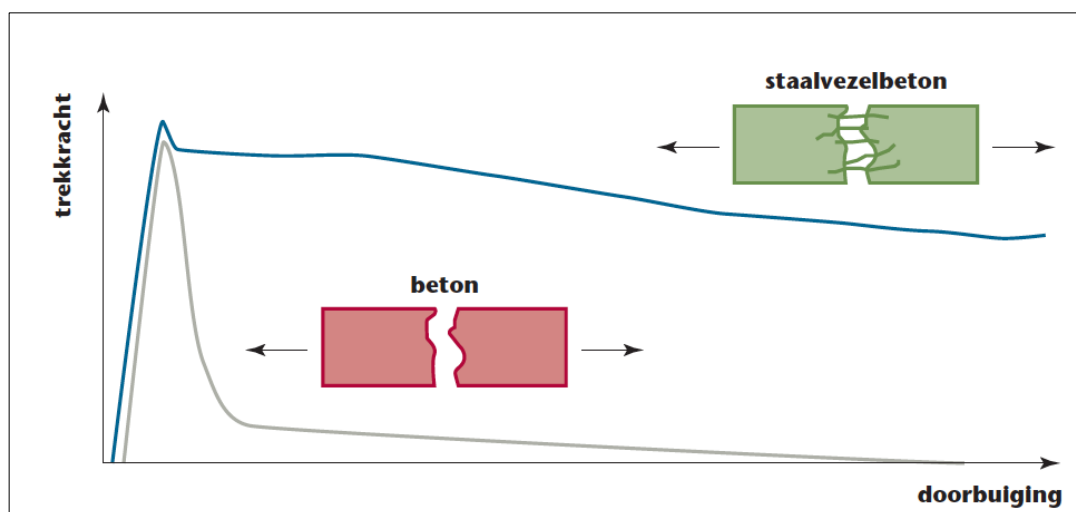
*Figuur 5.9 Diverse soorten staalvezels*

*Opname (buig)trekspanning (na het scheuren van het beton)*

Door het toevoegen van staalvezels aan beton ontstaat er een materiaal dat trekvaster en buigbaarder is. Het staalvezelbeton kan trekkrachten opnemen en breekt niet meer op een onverwacht moment. Met andere woorden: beton wordt van een bros materiaal een taai materiaal. In figuur 5.10 is dit visueel weergegeven in een zogenoemd kracht-ervormingsdiagram. Als de kracht toeneemt, zal het ongewapende beton (grijze lijn) en het staalvezelbeton (blauwe lijn) langzaam gaan vervormen. Op het hoogste punt van de lijn (de zogenaamde piekbelasting) scheurt het beton. Het ongewapende beton is nu kapot en de kracht kan niet meer worden opgevangen. De grijze lijn daalt.

In het staalvezelbeton ontstaan ook scheuren. De staalvezels gaan vanaf dit punt hun werk doen en nemen de trekspanning op. Dit wordt ook wel de nascheurcapaciteit genoemd.





Figuur 5.10 *Verskil in vervormingscapaciteit tussen ongewapend beton en staalvezelbeton (weergegeven in een spanning-rekdiagram)*

De hoeveelheid trekkracht die kan worden opgenomen bij een bepaalde scheurwijdte (vervorming) is afhankelijk van een aantal factoren.

#### 1. (Staal)kwaliteit

Voor de productie van staalvezels kunnen heel verschillende staalsoorten worden gebruikt. Vooral de rekstijfheid (de weerstand tegen verlengen) en de treksterkte kan door de gebruikte staalkwaliteit en de productiewijze grote verschillen vertonen.

#### 2. Hoeveelheid vezels

Hoe groter de in beton aanwezige hoeveelheid staalvezels, des te groter de spanning die kan worden opgenomen. Er is echter een beperking aan de hoeveelheid vezels die kan worden toegepast in beton vanwege de invloed op de verwerkbaarheid. Hoeveelheden tot ca. 0,75% van het volume (60 kg per m<sup>3</sup>) zijn in de regel toepasbaar mits de mengsamenstelling hierop wordt aangepast. Zo dient de maximale korrel beperkt te blijven tot 16 mm en het percentage fijn toeslagmateriaal met ongeveer 5% te worden verhoogd ten opzichte van het mengselontwerp zonder vezels, om de interactie tussen vezels en de grotere korrels te verminderen. Daarnaast dient rekening gehouden te worden met een extra waterbehoefte van ongeveer 1 liter per kg staalvezel, een en ander afhankelijk van het vezeltype. Deze extra waterbehoefte dient bij voorkeur gecompenseerd te worden door het gebruik van superplastificeerders.

Bij een gelijke hoeveelheid vezels per m<sup>3</sup> geeft een hogere aspect ratio (l/d) betere prestaties omdat er dan meer vezels in het beton aanwezig zijn.

N.B. Grotere hoeveelheden tot een absoluut maximum van 2,0% van het volume (160 kg per m<sup>3</sup>) zijn mogelijk indien gekozen wordt voor de juiste typen vezels en het mengselontwerp (minder grof toeslagmateriaal), het productieproces en de verwerking hierop worden aangepast. Dit valt echter buiten het kader van deze cursus.

#### 3. Afmetingen van de vezels

Hoe langer de vezels in combinatie met een lagere aspect-ratio (lengte-/diameterverhouding), des te groter de spanning die door de vezels kan worden opgenomen. Een vezel van 60 mm, met een diameter van 1 mm is daarmee het meest effectief. Echter dergelijke vezels hebben ook de grootste invloed op de verwerkbaarheid. Het compromis is om te kiezen voor een vezel met een lengte tussen 20 en 60 mm, en een aspect-ratio tussen 40 en 80.

Indien gekozen wordt voor een kortere vezel dient de maximale korrel hierop bij voorkeur aangepast te worden, zodanig dat deze kleiner is dan de vezellengte.

Een combinatie van korte en lange vezels (hybride) blijkt tot betere resultaten te leiden dan gebruik van korte en lange vezels afzonderlijk.

#### 4. Vorm van de vezels

Om zo effectief mogelijk gebruik te maken van de treksterkte van de vezels dienen deze zo goed mogelijk verankerd te zijn. Door gebruik te maken van vezels met vervormde uiteinden of een vervormde schacht kan de aanhechting sterk worden verbeterd. Dit heeft echter ook gevolgen voor de verwerkbaarheid, mede als gevolg van de toename van de kans op zogenaamde 'egelvorming' waarbij de vezels ballen vormen in de betonspecie.

Vezels met een l/d-verhouding van boven de 50 hebben enige hulp nodig om goed homogeen verspreid te worden in het beton. 'Ballen' of 'egels' ontstaan door het in elkaar haken en grijpen van de vezels. Korte dikke vezels die uit een zak worden geschud, rollen nog breed weg. Bij lange dunne staalvezels bestaat de kans dat een 'vezelberg' ontstaat.

Een oplossing voor dit probleem is om de losse, lange vezels te verlijmen tot samenklevende plaatjes. Deze plaatjes hebben weer een l/d-verhouding van  $\ll 50$  en kunnen zich dus goed in het beton verspreiden.

#### 5. Oriëntatie van de vezels

Vergelijkbaar met wapeningstaal zijn vezels het meest effectief wanneer zij aanwezig zijn op de plaats waar de trekspanningen aanwezig zijn en wanneer zij evenwijdig staan met de richting van de kracht. Veel vezels zullen echter niet evenwijdig met de kracht staan waardoor de bijdrage in het opnemen van de spanningen wordt beperkt. Dit is een belangrijke reden waarom vezels niet zonder meer als een alternatief voor traditionele wapening kunnen worden toegepast.

Om te zorgen dat voldoende vezels met de juiste oriëntatie aanwezig zijn ter plaatse van de trekspanningen, wordt aangeraden om minimaal een hoeveelheid van 0,38% (30 kg per m<sup>3</sup>) aan staalvezels toe te passen.

#### *Stootvastheid*

De stootvastheid van beton, oftewel het vermogen om energie te absorberen, is gerelateerd aan het oppervlak onder het spanning-rek diagram. In figuur 5. wordt het oppervlak onder de grafiek beduidend groter wanneer tevens het gedeelte wordt meegenomen dat zich onder de curve bevindt, rechts van het punt waarop de hoogste door het beton op te nemen spanning wordt bereikt. Om de stootvastheid te verhogen geldt hetzelfde als voor het verhogen van de op te nemen trekspanningen.

#### *Staalvezels als vervanging van traditionele wapening?*

Onder strikte voorwaarden kunnen bepaalde typen vezels, meestal pas bij hogere doseringen, in staat zijn om de treksterkte of buigtreksterkte van het beton te verhogen en eventueel ingezet worden als mogelijk, gedeeltelijk, alternatief voor traditionele wapening. Het rekenen met staalvezelbeton valt uiteraard buiten de lesstof van deze cursus.

### 5.3.4 Kunststof vezels

De prestaties van kunststofvezels zijn uiteraard heel verschillend van die van staalvezels. Om in gescheurd beton (buig)trekspanningen van enige betekenis te kunnen opnemen, zou een zo grote hoeveelheid kunststofvezels moeten worden toegevoegd dat deze niet meer is door te mengen en waarbij de betonspecie bovendien onverwerkbaar zou worden.

Kunststofvezels zijn er in talloze varianten. Ze worden vervaardigd uit heel uiteenlopende materialen en in alle denkbare lengtes en diameters. Sommige benaderen de eigenschappen van staalvezels. De ontwikkeling van kunststofvezels gaat nog steeds door.

Meest gebruikelijk is de toepassing van polypropyleenvezels. Deze vezels hebben een diameter tussen 0,018 en 0,032 mm en een lengte tussen 12 en 20 mm. De doseringsgrootte ligt in het algemeen tussen 600 en 1000 gram per m<sup>3</sup> beton. Polypropyleenvezels worden als losse vezels (monofilament) of in een netjesvorm (gefibrilleerd) verwerkt.

In de nog plastische specie verbeteren deze vezels de samenhang van de specie. Hiermee kan betonspecie voor bijvoorbeeld in de grond gevormde palen een grotere stabiliteit verkrijgen. De verbeterde samenhang van betonspecie door deze vezels maakt betonspecie minder gevoelig voor scheurvorming door plastische krimp.

#### *Beperken scheurvorming als gevolg plastische krimp*

Polypropyleenvezels zijn in de fase waarin de betonspecie opstijft, wat gewoonlijk binnen 6 uur na het storten gebeurt, zowel stijver als sterker dan de matrix waarin zij zich bevinden. Hierdoor blijken zij in staat om eventueel optredende scheurvorming als gevolg van plastische krimp te verminderen en veelal te beperken tot nauwelijks zichtbare microscheuren. Hiervoor hoeft slechts een relatief kleine hoeveelheid van 0,1% van het volume (0,9 kg per m<sup>3</sup>), aan het mengsel te worden toegevoegd. Bij een dergelijke hoeveelheid hoeven normaal gesproken geen wijzigingen te worden aangebracht in het mengselontwerp. Wel moeten natuurlijk gewoon alle gebruikelijke betontechnologische maatregelen zoals een goede mengselsamenstelling en nabehandeling in acht worden genomen.

#### *Beperken afspatten als gevolg van brand*

Beton is een onbrandbaar materiaal. De hoge temperaturen kunnen het beton echter wel beschadigen. Veel belangrijker is echter de invloed van de hoge temperaturen op de eigenschappen van de in het beton aanwezige wapening. In betonconstructies onder brand vormt het wapeningsstaal de zwakke schakel want boven 300 °C verliest staal zijn sterkte en bij 750 °C is deze zelfs nihil. Daardoor kan die wapening de aanwezige trekkrachten niet meer kan opvangen. In hoofdstuk 2 §2.5.4.9 is dit al aan de orde gesteld.

Zodra de temperatuur van beton boven 100 °C komt, zal het daarin nog aanwezige (al dan niet gebonden water) gaan verdampen en wel sneller naarmate de temperatuur (veel) hoger wordt. Bij verhitting van beton boven 200 °C neemt de sterkte af. De bij verhitting vrijkomende waterdamp (stoom) staat onder hoge druk waardoor uiteindelijk delen van het betonoppervlak worden afgedrukt. We noemen dit 'afspatten'. Door dit afspatten vermindert de betondekking op de wapening of verdwijnt die in het geheel met als gevolg dat de wapening aan hoge temperaturen wordt blootgesteld.

Polypropyleenvezels smelten relatief snel bij brand waardoor ruimte ontstaat voor de stoom om te ontsnappen met als gevolg een verlaagde kans op afspatten. Hiervoor dient een hoeveelheid van minimaal 0,22% van het volume (2,0 kg per m<sup>3</sup>) aan het mengsel te worden toegevoegd.

Bij een dergelijke hoeveelheid verhoogt de waterbehoefte aanzienlijk waardoor wel wijzigingen in het mengselontwerp aangebracht moeten worden, bijvoorbeeld het gebruik van (super-) plastificeerders om de gewenste verwerkbaarheid te bereiken bij een laag watergehalte.

#### 5.3.5 Glasvezels

Glasvezels kunnen vanuit kosten oogpunt alleen in kleine hoeveelheden worden toegepast als alternatief voor polypropyleenvezels. Vergelijkbare resultaten worden bereikt bij hoeveelheden van 0,03% van het volume (0,8 kg per m<sup>3</sup>). Belangrijk aandachtspunt is de bestandheid van de glasvezels tegen het alkalisch milieu van beton.

### 5.4 Verwerken van vezels

De vezels dienen zodanig aan de betonspecie te worden toegevoegd dat zij homogeen verdeeld worden door het mengsel. Hiervoor zijn een aantal hulpmiddelen beschikbaar. Zo zijn er verschillende doseerunits waarbij de vezels in de truckmixer worden geblazen of tijdens het beladen van truckmixers in de speciestroom worden gedoseerd. Ook de toepassing van verlijmde vezels, waarbij de lijm tijdens het mengproces oplost kan de dosering vereenvoudigen en een homogeenere verdeling opleveren. Na het doormengen in de betonspecie dient vastgesteld te worden of de vezels in voldoende mate aanwezig zijn en homogeen zijn verdeeld. Hiertoe worden monsters op verschillende plaatsen genomen, uitgespoeld en vervolgens wordt de hoeveelheid vezels en de verschillen in de gemeten hoeveelheid vezels tussen de monsters bepaald.