

## 9 MEER EIGENSCHAPPEN VAN BETON

In hoofdstuk 2 van dit dictaat is bij de behandeling van 'Beton als bouw materiaal' een aantal eigenschappen van beton besproken. Deze waren gekoppeld aan drie 'fasen' tijdens de totstandkoming van beton:

- de plastische fase;
- de fase van het verhardend beton en ten slotte;
- het verharde beton in de constructie.

Beton heeft echter nog veel meer eigenschappen dan in hoofdstuk 2 aan bod zijn gekomen. Hoewel de betontechnoloog hiermee niet dagelijks te maken heeft, kunnen deze voor bepaalde toepassingen juist heel belangrijk zijn.

Beton is een complex materiaal. Veel factoren van buitenaf, zoals belastingen of vocht, hebben invloed op eigenschappen van beton.

In dit hoofdstuk proberen we meer inzicht te geven in de complexiteit en de interactie tussen de verschillende, misschien 'minder bekende', eigenschappen.

## INHOUDSOPGAVE

Pag.

9.1	Verhard beton: meer mechanische eigenschappen.....	9-3
9.1.1	Elasticiteitsmodulus.....	9-3
9.1.2	Vervormingen.....	9-3
9.1.3	Dwarscontractiecoëfficiënt $\nu$ (Poissonverhouding).....	9-5
9.1.4	Krimp en kruip .....	9-5
9.1.5	Relaxatie .....	9-6
9.2	Thermische eigenschappen.....	9-6
9.2.1	Thermische uitzettingscoëfficiënt.....	9-7
9.2.2	Warmtegeleidingscoëfficiënt ( $\lambda$ ) .....	9-7
9.2.3	Soortelijke warmtecapaciteit ( $c$ ) (ook: soortelijke warmte / specifieke warmtecapaciteit) .....	9-7
9.3	Hygrische eigenschappen/vochthuishouding .....	9-7
9.3.1	Krimp.....	9-7
9.3.1.1	Plastische krimp .....	9-8
9.3.1.2	Verhardings-, hydratatie of chemische krimp .....	9-8
9.3.1.3	Autogene krimp.....	9-8
9.3.1.4	Uitdrogingskrimp .....	9-9
9.3.2	Vochttransport .....	9-9
9.3.3	Vloeistofdichtheid (van constructies).....	9-10
9.3.4	Waterindringing.....	9-11
9.3.5	Waterdichtheid .....	9-11
9.3.6	Waterabsorptie.....	9-12
9.3.7	Waterdampdiffusie .....	9-12
9.3.8	Waterdampabsorptie – evenwichtsvochtgehalte.....	9-13
9.4	Beton in relatie tot duurzaamheid.....	9-14
9.4.1	Algemeen.....	9-14
9.4.2	Duurzaamheid en andere aspecten .....	9-14
9.4.3	Beton en invloed op milieu.....	9-16
9.4.3.1	Aanpassen samenstelling van het bindmiddel.....	9-17
9.4.3.2	Verlagen van het bindmiddelgehalte.....	9-18
9.4.3.3	Vervanging primair door secundair toeslagmateriaal. ....	9-18
9.4.3.4	Optimaliseren nabehandeling.....	9-19
9.4.3.5	Verlengen ontkistingstijden. ....	9-19
9.4.3.6	Toepassen rekenwaarde sterkte na 56-91 dagen. ....	9-19
9.4.4	Rekenen aan de duurzaamheid van beton.....	9-20

## 9.1 Verhard beton: meer mechanische eigenschappen.

In het gebruiksstadium van betonconstructies zijn de mechanische eigenschappen en de duurzaamheid van beton de belangrijkste eigenschappen. De bekendste mechanische eigenschap van verhard beton is de druksterkte. Beton wordt in de betonvoorschriften dan ook in de eerste plaats aangeduid met de (karakteristieke) druksterkte. Andere mechanische eigenschappen zoals treksterkte en het vervormingsgedrag die ook belangrijk zijn voor de constructeur zijn gerelateerd aan de druksterkte.

In tabel 2.11 in hoofdstuk 2 is een relatie is gegeven voor de (reken-)waarden van enkele mechanische eigenschappen waaronder de gemiddelde (axiale) treksterkte en de elasticiteitsmodulus. In dit hoofdstuk 9 worden, in aanvulling op hoofdstuk 2, nog enkele andere eigenschappen behandeld.

### 9.1.1 Elasticiteitsmodulus

In hoofdstuk 2 “Beton als bouw materiaal” is de elasticiteitsmodulus al besproken. Omdat deze eigenschap naast de druk- en treksterkte van beton een (voor de betontechnoloog) relatief onbekende, maar wel degelijk belangrijke eigenschap is komt hij hier in het rijtje mechanische eigenschappen nog terug. We weten nu dat beton vervormt onder invloed van druk- of trekkrachten. De mate waarin deze vervorming optreedt, gekoppeld aan de kracht die daarvoor nodig is, is vastgelegd in de elasticiteitsmodulus. De elasticiteitsmodulus heeft een duidelijke relatie met de druksterkte. Hoe sterker beton is, hoe kleiner de vervorming is bij een bepaalde spanning. De constructeur heeft de elasticiteitsmodulus nodig in zijn berekeningen om te bepalen hoeveel een bouwdeel zal vervormen onder belasting. De vormverandering van beton is gedeeltelijk omkeerbaar (elastische vervorming) en gedeeltelijk onomkeerbaar (plastische vervorming).

Beton is een heterogeen materiaal. De E-modulus van beton wordt vooral bepaald door de soort én het gehalte toeslagmaterialen, mits het gebruikte toeslagmateriaal een hogere E-modulus heeft dan de cementsteen

Er is een relatie tussen elasticiteitsmodulus  $E_{cm}$  en karakteristieke kubusdruksterkte van beton. Hoe hoger de druksterkte hoe hoger de E-modulus. In tabel 9.1 is aangegeven hoe de elasticiteitsmodulus kan worden berekend uit de  $f_{ck,cube}$ . Tevens is een aantal richtwaarden voor de E-modulus afhankelijk van de druksterkte gegeven.

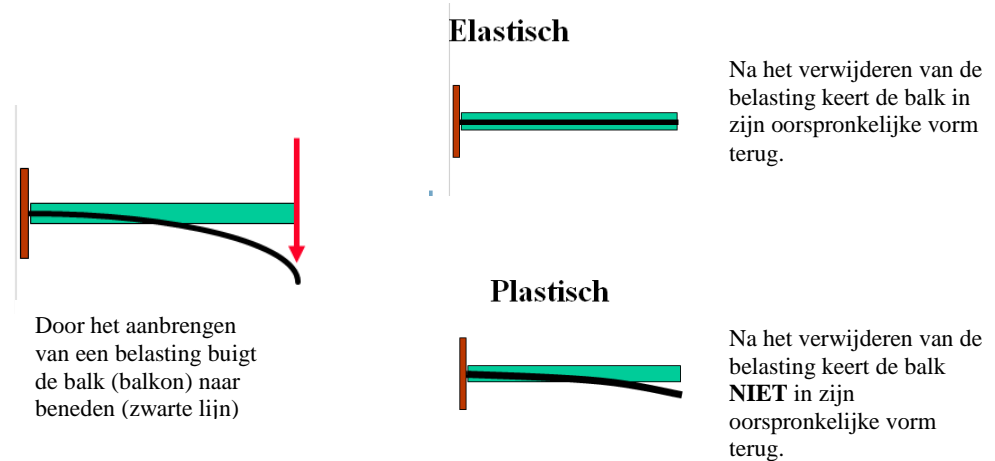
Tabel 9.1 Elasticiteitsmodulus als functie van de druksterkte

karakteristieke kubusdruksterkte in $N/mm^2$	elasticiteitsmodulus in $N/mm^2$	volgens
$15 \leq f_{ck,cube} \leq 67$	$E_{cm} = 22000 \times \{1 + f_{cm} / 10\}$	EC 2
$67 < f_{ck,cube} \leq 105$	$E_{cm} = 35900 + 40 f_{ck,cube}$	CUR-Aanbeveling 97
C90/105	43.600	

### 9.1.2 Vervormingen

We kennen elastische en plastische vervormingen (figuur 9.1).

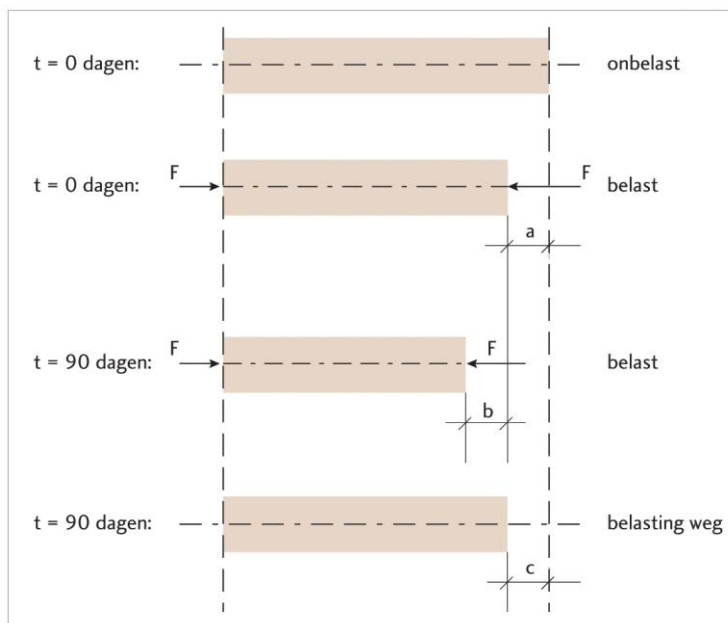
Bij een elastische vervorming door een bepaalde belasting zal bij het ontlasten het voorwerp weer in de oorspronkelijke positie terugkeren alsof er niets is gebeurd. Bij een plastische vervorming zal na het ontlasten nog altijd een vervorming zichtbaar zijn.



*Figuur 9.1 Elastische en plastische vervormingen.*

*Voorbeeld (figuur 9.2)*

Bij het op belasten van een betonconstructie treedt een verkorting  $a$  op. Bij langduriger belasten neemt na verloop van tijd de vervorming langzaam toe met een waarde  $b$  door kruip, relaxatie en eventueel krimp. Na ontlasten neemt het beton niet meer zijn oorspronkelijke vorm aan. Er is een blijvende vervorming  $c$  opgetreden.



*Figuur 9.2 Blijvende vervorming na ontlasten.*

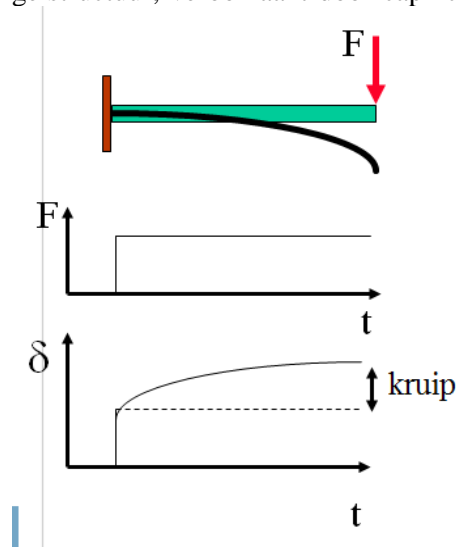
### 9.1.3 Dwarscontractiecoëfficiënt $\nu$ (Poissonverhouding)

Deze dwarscontractiecoëfficiënt bepaalt de rek in richtingen loodrecht op de vervormingsrichting. Hiermee bedoelen we dat als beton in één richting wordt samengedrukt het de neiging heeft in de andere twee richtingen te gaan uitzetten. Dat betekent dat de vervormingen van beton afhankelijk van de richting en grootte van de belasting in verschillende richtingen plaatshebben. Het beton ondergaat niet een eenvoudige krimp, uitzetting of doorbuiging in één richting. Vervormingen zijn complex.

### 9.1.4 Krimp en kruip

Krimp is de vormverandering (verkorting) van beton ten gevolge van uitdroging, cementhydratatie en/of afkoeling. Krimp ten gevolge van vochtverlies is één van de belangrijkste oorzaken van scheurvorming en daarmee van schade aan betonconstructies. Krimp treedt vooral op in de nog plastische fase door voortijdige uitdroging (plastische krimp) en in jong beton door uitdroging. De verschillende vormen en stadia van krimp worden hierna uitgebreid behandeld in paragraaf 9.3.1. Krimp en kruip worden door de ontwerper vaak in een adem genoemd, omdat ze beide gekoppeld zijn aan vochtbewegingen in het beton.

Kruip van beton is een toenemende en grotendeels blijvende vormverandering van beton onder invloed van constant aanwezige externe krachten, dit in tegenstelling tot de elastische vervorming van beton. Het mechanisme hierachter is de vervorming van de gelstructuur, veroorzaakt door capillaire spanning van het niet-chemisch gebonden water.



*Figuur 9.3 Kruip is een toenemende vervorming in de tijd bij een constante belasting..*

De grootte van de kruip van beton is afhankelijk van:

- de relatieve vochtigheid;
- de ouderdom  $t_c$  op het tijdstip van belasten;
- de sterkteklasse van het cement;
- de sterkteklasse van het beton;
- de geometrie van de betondoorsnede;
- de duur  $t$  van de belasting.

Algemeen gesproken is de kruip van invloed op:

- de vervorming van de betonconstructie (bijvoorbeeld doorbuiging van vrijdragende vloeren en balken);
- de herverdeling van de krachtswerking in de constructie (bijvoorbeeld als gevolg van de bouwwijze, optredende zetting, enz.).

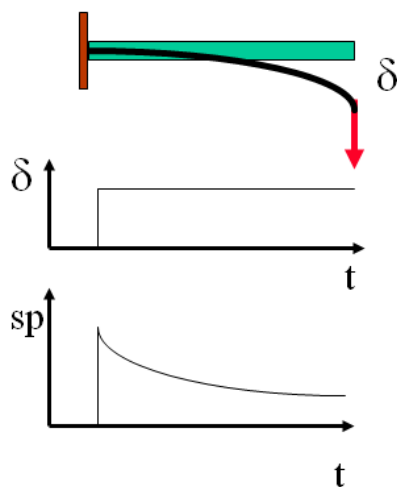
### 9.1.5 Relaxatie

Relaxatie wordt gedefinieerd als de afname van de in het beton voorkomende spanning bij constante vervorming. Relaxatie berust op hetzelfde mechanisme als kruip. In verband met het optreden van spanningen in vooral jong beton en het risico van scheurvorming, is relaxatie een belangrijk én gunstig mechanisme.

In geval van opgelegde vervorming door bijvoorbeeld zettingsverschillen in de fundering, zullen de in de constructie optredende spanningen geleidelijk afnemen waardoor de scheurvorming wordt beperkt.

De door kruip veroorzaakte relaxatie van spanningen is soms een gunstige eigenschap, omdat optredende spanningen door diverse belastingen hierdoor geleidelijk afnemen.

In voorgespannen beton kan door kruip de voorspanning verminderen, wat dan weer een ongunstige eigenschap betekent.



*Figuur 9.4 Relaxatie is een dalende spanning (sp) in de tijd als gevolg van een constante vervorming.*

## 9.2 Thermische eigenschappen

In het gebruiksstadium van beton zijn de thermische en hygrische eigenschappen belangrijk. Ze zijn verantwoordelijk voor krimpen en uitzetten (verlenging en verkorting) door temperatuur- en vochtveranderingen, warmtetransport, vochthuishouding, enzovoort. We kijken eerst naar enkele thermische eigenschappen.

### 9.2.1 Thermische uitzettingscoëfficiënt

De thermische uitzettingscoëfficiënt is de mate waarin een materiaal uitzet of krimpt bij temperatuurveranderingen.

De thermische uitzettingscoëfficiënt wordt uitgedrukt in  $m/m$  per  $^{\circ}C$ .

Zoals de meeste materialen zet beton uit als het warmer wordt en krimpt het als het afkoelt. Voor de thermische uitzettingscoëfficiënt van beton is de thermische uitzettingscoëfficiënt van het toeslagmateriaal van grote invloed.

### 9.2.2 Warmtegeleidingscoëfficiënt ( $\lambda$ )

De warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$  bepaalt hoe snel warmte door een materiaal stroomt en wordt uitgedrukt in  $W/mK$ . De warmtegeleidingscoëfficiënt hangt vooral af van de dichtheid (volumieke massa) van een materiaal, het vochtgehalte en de temperatuur.

Bij verhardend beton is deze eigenschap van invloed wanneer temperatuurgradiënten de oorzaak zijn van temperatuurspanningen, die een zeker scheurrisico meebrengen. Bij beton is de eigenschap afhankelijk van de toegepaste grondstoffen, het luchtgehalte en de hoeveelheid water in het materiaal. Een materiaal met veel poriën gevuld met lucht heeft een lage warmtegeleiding. Als de poriën echter gevuld zijn met water is de geleiding hoger.

### 9.2.3 Soortelijke warmtecapaciteit ( $c$ ) (ook: soortelijke warmte / specifieke warmtecapaciteit)

De soortelijke warmtecapaciteit ( $c$ ) geeft de hoeveelheid energie (in J) aan die nodig is om 1 kg van een materiaal 1 graad (K) in temperatuur te laten stijgen. De eenheid is Joule/kg.Kelvin.

De soortelijke warmtecapaciteit is ook een maat voor de hoeveelheid energie in de vorm van warmte die een bepaald materiaal kan vasthouden/opslaan.

Deze eigenschap bepaalt in welke mate de temperatuur stijgt bij een bepaalde warmteproductie of stroming en is daarom van belang als temperatuurveranderingen een rol spelen. De relatief hoge warmtecapaciteit en de massa van beton maken het uitermate geschikt om te fungeren als een warmte-accu, dus voor de opslag van warmte en kou. Beton warmt dan ook langzaam op en koelt langzaam af.

Door in het ontwerp van een betonconstructie slim gebruik te maken van deze eigenschap van beton, ontstaat in gebouwen een thermisch stabiel klimaat. Dit zorgt voor een comfortabeler binnenklimaat en bespaart energie.

## 9.3 Hygrische eigenschappen/vochthuishouding

### 9.3.1 Krimp

Onder de eigenschappen van beton is krimp een apart fenomeen. Krimp kan al optreden in de plastische fase en daarna in alle fasen van het verhardingsproces. Bovendien kan beton lengteveranderingen ondergaan door temperatuurveranderingen en wisselingen in het vochtgehalte. Krimp ten gevolge van vochtverlies is een van de belangrijkste oorzaken van scheurvorming en dus schade aan betonconstructies. De vorm waarin de krimp optreedt is afhankelijk van het stadium van de verharding van het beton.

In de eerste uren na verwerken treedt vooral plastische krimp op. Daarna, in verhardend beton, kunnen meer 'vormen' van krimp optreden, zoals autogene krimp en uitdrogingskrimp.

#### 9.3.1.1 *Plastische krimp*

In de eerste uren na het storten kan door het verdampen van aanmaakwater plastische krimp optreden. Wanneer de verdamping van water aan het oppervlak groter is dan de (interne) watertoevoer, kan de nog plastische betonspecie gaan krimpen. Dit verschijnsel heet plastische krimp en kan ernstige scheurvorming veroorzaken.

Plastische krimp ontstaat vaak door externe factoren zoals een lage luchtvochtigheid, temperatuurverschillen tussen betonspecie en omringende lucht en wind. Kortom, voortijdige uitdroging van het nog verse beton. Plastische krimp kan gemakkelijk worden voorkomen door een goede en tijdige nabehandeling.

Vaak wordt niet onderkend dat ook de betonsamenstelling grote invloed kan hebben op het risico van plastische krimp. Dit risico is het grootst bij zeer stabiele mengsels. Dit zijn mengsels waarin veel poeders zijn toegepast met een groot oppervlak per volume, dus met een groot watervasthoudend vermogen. Voorbeelden zijn hogesterktebeton (met veel cement en silica fume), zelfverdichtend beton (met een hoog aandeel fijne vulstof) en colloïdaal beton met speciale colloïdale hulpstoffen.

In deze species is nauwelijks intern vochtransport mogelijk waardoor ze aan het oppervlak zeer gevoelig zijn voor uitdroging.

#### 9.3.1.2 *Verhardings-, hydratatie of chemische krimp*

De som van het volume aan cement en water is groter dan het volume van de daaruit gevormde hydratatieproducten. Deze volumevermindering staat bekend als de chemische krimp (ook wel: verhardingskrimp). Chemische krimp manifesteert zich voornamelijk in de vorm van capillaire poriën in de cementsteen en nauwelijks als uitwendige vormverandering. De chemische krimp komt qua grootte overeen met ca. 25% van het volume van het bij de hydratatie chemisch gebonden water. Dit chemisch gebonden water is ongeveer 25% van de massa van het gereageerde cement. Indien geen watertoevoer vanuit de omgeving plaatsheeft, zullen de door volumevermindering ontstane capillairen met waterdamp en lucht zijn gevuld. Bij een normale betonsamenstelling is de verhardingskrimp niet merkbaar als een uitwendige vervorming. Deze vorm van krimp veroorzaakt microscheurvorming in de cementsteen. De microscheuren worden gezien als de inleiders bij het bezwijken van beton onder een (te hoge) belasting.

#### 9.3.1.3 *Autogene krimp*

Autogene krimp van beton is een meetbare uitwendige verkorting van beton die optreedt zonder:

- vochtverlies aan de omgeving door bijvoorbeeld verdamping;
- temperatuur vervormingen;
- mechanische belastingen.

Over het precieze mechanisme dat autogene krimp veroorzaakt is nog geen wetenschappelijke overstemming.

Eén van de theorieën, en die volgen we in deze cursus, is dat autogene krimp ontstaat als het gevolg van het samentrekken van capillaire poriën.



Dit samentrekken wordt veroorzaakt door een onderdruk die in de capillaire poriën ontstaat door:

1. het onttrekken van water uit de capillaire poriën voor de reactie met cement;
2. het ontstaan van meer capillaire poriën door de hydratatie krimp.

Autogene krimp komt bij elke betonsamenstelling in een bepaalde mate voor. Bekend is dat de autogene krimp toeneemt bij een lagere water-cementfactor. Een voorbeeld hiervan is hogesterktebeton. Autogene krimp kan leiden tot interne of externe (micro)scheuren.

#### 9.3.1.4 *Uitdrogingskrimp*

Uitdrogingskrimp is het gevolg van het verdampen van het niet-gebonden water in het beton via de capillaire poriën. Door dit waterverlies trekken de poriën samen.

Hiertegenover staat echter dat door wateropname de poriën zwellen en het beton kan uitzetten. Het fenomeen uitdrogingskrimp is onlosmakelijk met de toepassing van cement verbonden. In de praktijk is uitdrogingskrimp bij beton met 'normale' sterkte

( $f_{ck} \leq 65 \text{ N/mm}^2$ ) op langere termijn vaak de oorzaak van ongewenste scheurvorming in constructies die niet vrij kunnen vervormen. Voldoende dilatatie kan ongewenste scheurvorming voorkomen.

Bij beton in sterkteklassen tussen C20/25 en C55/67 bedraagt de uitdrogingskrimp gemiddeld 0,4 mm/m.

Vaak worden de begrippen uitdrogingskrimp en autogene krimp door elkaar gebruikt. In tabel 9.1 wordt aangegeven wat de specifieke verschillen zijn.

*Tabel 9.1      Uitdrogingskrimp versus autogene krimp*

	<b>uitdrogingskrimp</b>	<b>autogene krimp</b>
locatie krimp	buitenzijde	door en door
massa materiaal	daalt	blijft gelijk

#### 9.3.2 Vochttransport

Vocht wordt door beton getransporteerd via dampdiffusie of capillair watertransport. De snelheid waarmee dit gaat, kan worden beschreven met een diffusiecoëfficiënt die afhankelijk is van de vochtigheid (potentiaal) in het materiaal. Beton bezit veel verschillende porieafmetingen. Bij droog beton heeft damptransport voornamelijk door de poriën plaats, wat langzaam gaat. Bij nat materiaal is er voornamelijk capillair transport. Deze eigenschap is belangrijk als er vochtbewegingen in het materiaal plaatsvinden die bijdragen aan een schademechanisme. De eigenschap wordt bepaald door de porieafmetingen en poriestructuur, die op hun beurt worden beïnvloed door de korrelpakking en de hoeveelheid water.

#### *Permeabiliteit / vloeistofdichtheid*

De permeabiliteit is de mate waarin een stof doorlaatbaar is voor vloeistoffen en/of gassen. De permeabiliteit van cementsteen of van beton is van grote invloed op de duurzaamheid.

Dit bepaalt immers de toegankelijkheid voor (schadelijke) stoffen. Een poreus beton hoeft niet per definitie ook permeabel te zijn. De poriën kunnen immers onderbroken zijn.

Anderzijds kan een beton met weinig, maar zeer grove, doorgaande poriën zeer permeabel zijn. Vooral de capillaire poriën in cementsteen spelen een belangrijke rol in de mate van permeabiliteit. Het capillaire porievolume wordt vooral bepaald door de water-cementfactor.

De transportsnelheid van vloeistoffen en/of gassen in deze poriën wordt niet alleen door de diameter bepaald, maar vooral door het feit of de poriën zijn uitgedroogd of niet. In droge poriën kunnen gassen of andere stoffen gemakkelijk binnendringen.

Continue vochtwisselingen waarbij beton beurtelings uitdroogt en nat wordt kunnen een negatieve rol spelen. Onderzoek heeft overigens uitgewezen dat deze vochtwisselingen beperkt blijven tot de buitenste 15 mm.

De permeabiliteit van beton is afhankelijk van:

- water-cementfactor;
- type cement;
- soort en hoeveelheid toeslagmateriaal;
- aard van eventueel verwerkte vulstoffen;
- aanhechting tussen toeslag en cementsteen;
- hydratatiegraad (ouderdom);
- mate van verdichting;
- nabehandeling.



*Figuur 9.5 Porositeit en permeabiliteit*

Omdat permeabiliteit moeilijk meetbaar is, is in de Betonvoorschriften een vereenvoudigde proef beschreven waarmee de “vloeistofdichtheid” van beton wordt bepaald. Deze proef is vastgelegd in NEN-EN 12390-8 (zie ook 9.3.4). Volgens de beoordelingsrichtlijn BRL 1801 'Betonmortel' is beton 'vloeistofdicht' als de gemeten maximale vloeistofindringing, (bepaald volgens de proef in NEN-EN 12390-8) niet meer is dan 50 mm (individuele waarde) en de gemiddelde indringing van drie opeenvolgende waarnemingen niet meer is dan 25 mm.

### 9.3.3 Vloeistofdichtheid (van constructies)

In vrijwel alle toepassingen kan beton worden beschouwd als vloeistofdicht. Voor gevallen waar de vloeistofdichtheid van constructies ertoe doet, om bijvoorbeeld bodemverontreiniging door schadelijke stoffen te voorkomen, is regelgeving beschikbaar. Deze regelgeving is opgenomen in het Plan Bodembeschermende Voorzieningen (PBV).

Het spreekt voor zich dat het hier gaat om een *constructie* die vloeistofdicht moet zijn en niet over vloeistofdicht beton. Dat is een wezenlijk verschil.

Binnen de regelgeving onder de paraplu van het PBV wordt gesteld dat een constructie als vloeistofdicht mag worden beschouwd zolang de verontreinigende vloeistof gedurende de levensduur van de constructie de niet door die vloeistof belaste zijde van de constructie niet bereikt. Oftewel, de vloeistof mag wel de constructie indringen, maar mag er aan de andere kant niet als vloeistof uitkomen.

Voor de betontechnologische regelgeving voor het ontwerpen van een vloeistofdichte betonconstructie, zijn twee CUR/PBV-Aanbevelingen opgesteld.

#### *CUR/PBV-Aanbeveling 65*

Deze bevat regels en eisen voor het ontwerp, de materialen en de aanleg en herstel van vloeistofdichte betonvloeren en -verhardingen, alsmede voor beschermlagen op constructies met een draagvloer of verharding van beton met als doel deze vloeistofdicht te maken.

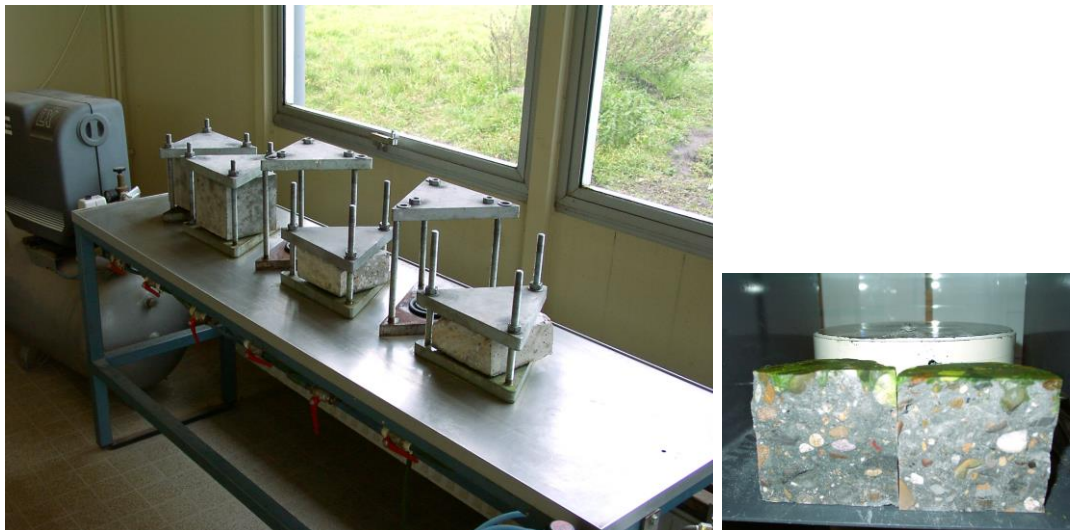
#### *CUR/PBV-Aanbeveling 63*

Deze aanbeveling beschrijft de bepaling van de vloeistofindringing in beton met behulp van de capillaire absorptieproef

### 9.3.4 Waterindringing

Bij de procescontrole van beton, bestemd voor vloeistofdichte constructies, wordt meestal gebruikgemaakt van NEN-EN 12390-8 'Beproeving van verhard beton – Deel 8 'Indringdiepte van water onder druk'. In deze norm is de methode voor de bepaling van de waterindringing in beton beschreven. De proef wordt uitgevoerd op kubussen met een riblengte van 150 mm na ten minste 28 dagen verharden. Op het te beproeven oppervlak wordt gedurende 72 uur een waterdruk aangebracht van  $500 \pm 50$  kPa (ongeveer 5 bar). De waterindringing wordt bepaald door het proefstuk te splijten en de indringing van het water op het breukvlak te meten. Hierbij geldt de volgende eis:

- elke individueel gemeten indringdiepte moet kleiner zijn dan 50 mm;
- het gemiddelde van drie opeenvolgend gemeten indringdiepten moet kleiner zijn dan 25 mm.



*Figuur 9.6 Opstelling proef waterindringing NEN-EN 12390-8.*

### 9.3.5 Waterdichtheid

Naast het begrip 'Vloeistofdicht' lijkt een aparte vermelding van 'Waterdichtheid' overbodig.

Toch leert de praktijk hier anders: in de praktijk wordt met 'waterdicht beton' een waterdichte constructie of constructiedeel (bijvoorbeeld een kelderwand) bedoeld, waarbij gegeven een bepaalde vloeistofdruk aan een zijde, de andere zijde niet nat wordt. Dit betekent niet dat er absoluut geen water door de constructie dringt, maar het tempo waarmee het water aan het oppervlak verdampt is groter dan de snelheid waarmee vocht door de constructie wordt getransporteerd.

### 9.3.6 Waterabsorptie

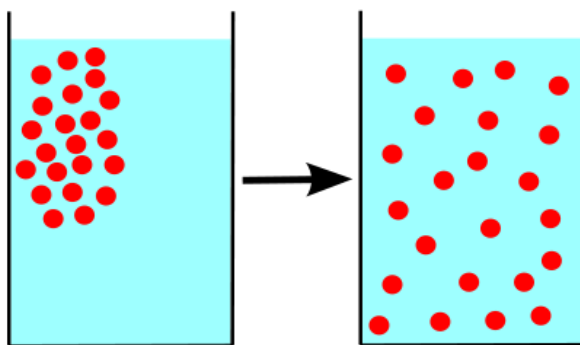
Wanneer beton in contact is met water, wordt in meer of mindere mate water opgezogen. Dit verschijnsel doet zich voor zonder dat sprake is van overdruk. Men spreekt dan van vrijwillige wateropname of absorptie of capillaire opzuiging. De vrijwillige wateropname van de meeste betonsoorten is gering.

De structuur van beton en vooral de poriegrootte en poriënverdeling zijn bepalend bij wateropzuiging. Dicht, constructief beton wordt in voorkomende gevallen vaak beoordeeld op waterindringing onder overdruk of met de capillaire absorptieproef (zie hiervoor onder vloeistofdichtheid en waterindringing).

Zelfs schuimbeton blijkt door zijn belletjesstructuur (géén doorgaande poriën) nauwelijks capillaire opzuiging te vertonen.

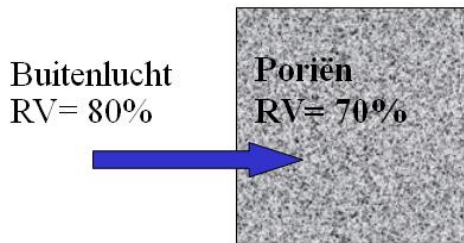
### 9.3.7 Waterdampdiffusie

Diffusie is het verschijnsel dat als een stof in verschillende concentraties in een ruimte voorkomt, dit concentratieverschil genivelleerd wordt doordat de moleculen zich van de hoogste naar de lagere concentratie verplaatsen.



*Figuur 9.7 Diffusie.*

Bij waterdampdiffusie verplaatst zich waterdamp van zones met een hoge waterdamp concentraties naar lage waterdampconcentraties. Voor beton betekent dit dat als de relatieve vochtigheid buiten het beton hoger is dan binnen in het beton, waterdamp het beton in zal trekken (figuur 9.8)



*Figuur 9.8 Waterdampdiffusie en beton.*

De snelheid waarmee diffusie plaatsheeft, is afhankelijk van de weerstand van het materiaal tegen deze diffusie. Dit wordt aangeduid met het diffusieweerstandgetal  $\mu$ . Hiermee wordt aangegeven hoeveel de weerstand die een materiaal tegen diffusie biedt groter is dan die van een stilstaande luchtlaag van gelijke dikte. De  $\mu$ -waarde van lucht is dus per definitie 1.

### 9.3.8 Waterdampabsorptie – evenwichtsvochtgehalte

Het kan gewenst zijn om het vochtgehalte te kennen van een materiaal dat wordt toegepast onder een bepaalde (vocht)conditie. Bijvoorbeeld omdat dit invloed heeft op de isolatiewaarde of de volumieke massa. Dit geldt met name voor lichtbeton en schuimbeton.

Het evenwichtsvochtgehalte geeft dan aan welk vochtgehalte zich uiteindelijk zal instellen bij een bepaalde gemiddelde relatieve vochtigheid. Tabel 9.2 geeft richtwaarden voor het evenwichtsvochtgehalte van schuimbeton, lichtbeton en grindbeton bij relatieve vochtigheden van resp. 40, 65, 80 en 95%. In de praktijk kunnen grote afwijkingen van deze waarden voorkomen door verschillen in samenstelling en de eigenschappen van de grondstoffen.

*Tabel 9.2 Evenwichtsvochtgehalte van schuim-, licht- en grindbeton bij verschillende relatieve vochtigheden.*

Relatieve vochtigheid	Evenwichtsvochtgehalte in % (V/V)		
	Schuimbeton 500 – 1000 kg/m <sup>3</sup>	Lichtbeton 1200 - 2000 kg/m <sup>3</sup>	Grindbeton 2200 - 2400 kg/m <sup>3</sup>
40%	6 – 2	0,5 – 1	2 – 4
65%	12 – 4	1 – 5	3 – 5
80%	15 – 5	1 – 5	4 – 8
95%	25 – 10	2 - 5	8 – 10

## 9.4 Beton in relatie tot duurzaamheid

### 9.4.1 Algemeen

In veel beleidsdoelstellingen van overheden, maatschappelijke organisaties en bedrijfsleven staat duurzaamheid hoog op de agenda. Tot ongeveer twintig jaar geleden verstond men in de bouw onder duurzaamheid nog vooral degelijkheid en levensduur. Tegenwoordig verwijst duurzaamheid veeleer naar duurzame ontwikkeling en milieu. Het Engels heeft er twee woorden voor (durability, sustainability), waar het Nederlands het met één moet doen (duurzaamheid). De bouw en de civiele techniek hebben als grootverbruikers van delfstoffen en energie rekening te houden met duurzaamheidsaspecten. In toenemende mate telt duurzaamheid ook als gunningscriterium bij aanbestedingen en opdrachten (bekende voorbeelden zijn de CO<sub>2</sub>-prestatieladder, GreenCalc+ en DuBoCalc). Daarnaast wordt een aanzienlijke hoeveelheid energie gebruikt in de gebouwde omgeving zelf bij de verwarming en koeling in de gebruiksfase. Het architectonisch en bouwfysisch ontwerp speelt hier een belangrijke rol. Bij infrastructurele werken is het afhankelijk van de functie van het werk of in de gebruiksfase veel energie verbruikt wordt.

### 9.4.2 Duurzaamheid en andere aspecten

Het begrip duurzaamheid kan worden teruggevoerd op ‘duurzame ontwikkeling’. Dit begrip is in het Brundlandt-rapport ‘Our common future’ van de Verenigde Naties gedefinieerd als ‘voorzien in de behoeften van de huidige generatie zonder daarmee voor toekomstige generaties de mogelijkheid in gevaar te brengen ook in hun behoeften te voorzien’. Het begrip duurzaamheid is relatief abstract en gaat verder dan alleen de milieuaspecten. Ook aspecten als veiligheid, economie, welbevinden (gezond binnenklimaat), beheersbaarheid en beleving spelen een rol in duurzame ontwikkeling. Klimaatverandering staat als milieuthema maatschappelijk gezien het meest in de belangstelling.

Onder milieu worden diverse thema’s geschaard. In de milieukundige levenscyclus-analysmethode (LCA) zijn deze gegroepeerd in de zogenoemde effectcategorieën. Bekende effectcategorieën zijn klimaatverandering, verzuring, vermisting en aantasting van de ozonlaag. Daarnaast zijn er nog andere milieu-aspecten zoals geluidoverlast, lichthinder en verlies aan biodiversiteit die in het ene model wel en in het andere niet zijn meegenomen (zie ook figuur 9.9). Voor gebouwen speelt ook het aspect van een gezond binnenklimaat.

Per effectcategorie is een afgeleide eenheid, de equivalentiefactor, ontwikkeld waarnaar alle ingrepen voor elke effectcategorie worden omgerekend. De omrekening naar equivalentiefactoren maakt dat bijvoorbeeld de uitstoot van methaan kan worden omgerekend naar CO<sub>2</sub> op basis van de bijdrage aan het broeikaseffect per kg geëmitteerde stof. Methaan (CH<sub>4</sub>) is een gas met een aanzienlijk hogere bijdrage per mol gasmoleculen aan het broeikaseffect dan CO<sub>2</sub>. De equivalentiefactor lijkt soms een obscure eenheid, maar het biedt de mogelijkheid om ingrepen of stoffen met eenzelfde effect te sommeren op basis van afspraak.

Het is bij LCA's van belang dat de gehele keten in beschouwing genomen wordt met de juiste systeemgrenzen. In het geval van beton betekent dit, dat de keten start met de winning van de grondstoffen en dat de keten eindigt met de eindverwijdering (hoewel vanuit de C2C benadering er geen eindverwijdering optreedt, maar een eeuwigdurende cyclus bestaat). De systeemgrenzen geven (in de lengte en breedte) aan wat tot de beschouwde keten toebehoort en wat niet.

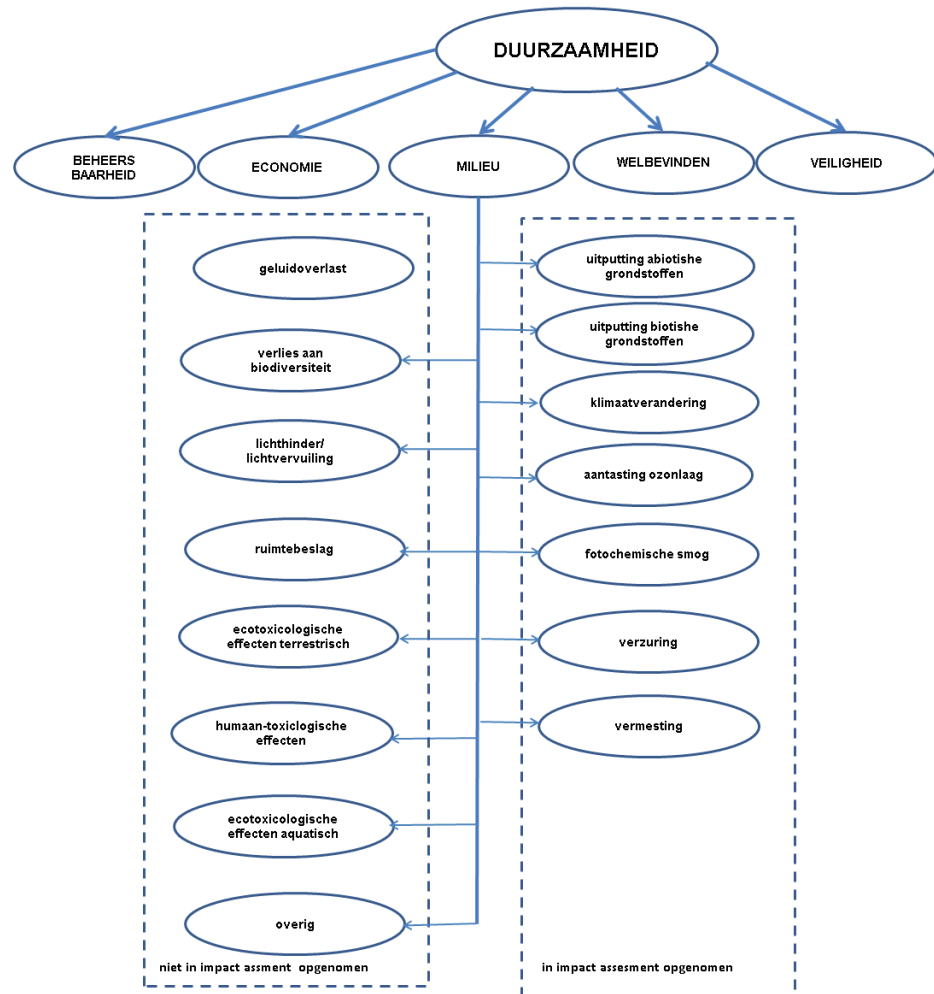
De functionele eenheid geeft aan welke eenheid als uitgangspunt genomen wordt, die zoals de term al stelt op basis van functie is. Voorbeelden zijn:

- 1 strekkende meter wegverharding in een ontsluitingsweg met verkeerscapaciteit van 13.000 voertuigen per dag en een levensduur van 30 jaar.
- 1<sup>e</sup> verdiepingvloer voor een standaard tussenwoning, die voldoet aan het Bouwbesluit, met een levensduur van 50 jaar.

In het geval dat een bouw materiaal, bouwproduct of bouwelement zelf een onderwerp vormt van een LCA, zonder de context van de specifieke toepassing, kan ook worden uitgegaan van een producteenheid (zoals beschreven in NEN-EN 15804). Denk aan 1 m<sup>3</sup> beton (met bepaalde eigenschappen).

In figuur 9.9 is getracht een overzicht te geven van thema's (of in LCA-jargon: de effectcategoriën) die tezamen het milieuaspect vormen binnen het begrip duurzaamheid. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen aspecten die wel en niet in de milieupactassessment van NEN-EN15804 zijn opgenomen.

Het moge duidelijk zijn dat de relatie tussen de productie en het gebruik van een materiaal en de invloed daarvan op het milieu een complexe zaak is! Belangrijk is ook aandacht te hebben voor afwenteling. Bij afwenteling wordt een effect verplaatst van het ene milieucompartiment naar het andere (bodem↔lucht↔water) of van de ene effectcategorie naar de andere.



Figuur 9.9 Van duurzaamheid naar klimaatverandering

### 9.4.3 Beton en invloed op milieu

Beton is zeker een duurzaam materiaal in de zin van durability. Een lange levensduur is meestal ook positief in de zin van sustainability: de milieu-impact van de productie wordt daardoor over meer jaren uitgesmeerd. De vraag is echter hoe andere aspecten als transport en cementproductie hieraan bijdragen. Als we dergelijke vragen goed willen beantwoorden zal dit vanuit een ketengerichte benadering moeten geschieden.

In deze cursus zullen we ons beperken tot die basisopties die door de betontechnoloog beïnvloed kunnen worden of waar de betontechnoloog mee te maken kan krijgen. Dit zijn met name:

- het aanpassen van de samenstelling van het bindmiddel;
- het verlagen van het bindmiddelgehalte;
- het vervangen van primair door secundair toeslagmateriaal;
- het optimaliseren van de nabehandeling;
- het verlengen van de ontkistingstijden;
- het toepassen van de rekenwaardesterkte na 56-91 dagen.



#### 9.4.3.1 *Aanpassen samenstelling van het bindmiddel.*

Voordat een constructie kan worden opgetrokken uit beton is deze eerst door een constructeur ontworpen en getoetst. De constructeur stelt aan de hand van de optredende belastingen vast welke sterkteklassen nodig zijn om die belastingen te kunnen dragen. Het is tevens de taak van de constructeur om vast te stellen welke aantastingmechanismen, zoals vorst, carbonatatie, chloriden enz., de levensduur van de betonnen constructie kunnen bedreigen. De constructeur zal uiteindelijk aan de verschillende bouwonderdelen een sterkteklasse en een of meer milieuklassen koppelen. Hierbij refereert hij aan de NEN-EN 206 en de NEN 8005. In het algemeen genomen zal bij een hogere sterkteklasse, milieuklasse en hoger klinkergehalte de CO<sub>2</sub>-emissie toenemen. Binnen NEN-EN 206 en de NEN 8005 is het mogelijk om voor de gevraagde technische prestatie verschillende bindmiddelen te kiezen conform de NEN-EN 197-1.

In de NEN-EN 197-1 staan de zogenoemde ‘common cements’ beschreven. Vaak wordt daarbij hoofdonderscheid gemaakt tussen portlandcement en niet-portlandcement, ofwel tussen klinkerrijke en klinkerarme cementen. In Nederland worden klinkerarme cementen conform de NEN-EN 197-1 reeds lang op grote schaal in de betonsector gebruikt. Met name zijn dit cementen op basis van hoogovenslak en poederkoolvliegias. Het klinkergehalte kan daardoor gereduceerd worden van 95% naar aanzienlijk lagere waarden. Zie navolgende tabel 9.3.

*Tabel 9.3 Klinkergehalte en gehalte hoogovenslak en poederkoolvliegias (toegepast als zogenoemde main constituent) conform NEN-EN 197-1 en klinkergehalte in de praktijk*

	<b>Volgens de norm NEN-EN 197-1</b>		
<b>cement</b>	<b>klinker</b>	<b>hoogovenslak</b>	<b>poederkoolvliegias</b>
CEM I	95-100%	-	-
CEM II/A-V	80-94%	-	6-20%
CEM II/B-V	65-79%	-	21-35%
CEM III/A	35-64%	36-65%	-
CEM III/B	20-34%	66-80%	-

Er bestaat ook de mogelijkheid om op basis van de BRL 1802 als betonproducent zelf een bindmiddel samen te stellen op basis van de combinatie van een cement met een vulstof. De meeste attesten zijn gebaseerd op een CEM I cement met poederkoolvliegias en/of hoogovenslak. Dit betreft combinaties die zijn toegelaten op basis van het ‘equivalent performance concept’. We spreken dan van “Attestbeton”. Bij attestbeton is aangetoond dat een bepaalde cement-vulstofverhouding, afkomstig van bepaalde producenten, gelijkwaardige prestaties levert in beton ten aanzien van bepaalde sterkte-/milieuklassecombinaties als een vergelijkbaar cement op basis van de NEN-EN 197-1.

De meeste attesten op basis van CEM I met poederkoolvliegias komen uit op ongeveer 65% klinker, terwijl de meeste attesten op basis van CEM I met hoogovenslak uitkomen op ongeveer 20% klinker. De attesten op basis van CEM I met hoogovenslak en poederkoolvliegias komen uit op ongeveer 30% klinker.

*Opmerking 1:*

Buiten de NEN-EN 197-1 is een aantal niet-genormeerde cementachtige bindmiddelen op de markt. Meestal bevatten die minder en soms zelfs helemaal geen klinker. Sommige hebben zich min of meer in de praktijk bewezen, andere zijn alleen op laboratoriumschaal of voor specifieke toepassingen getest. Het stadium van kwaliteitsborging en certificatie is veelal nog niet bereikt.

*Opmerking 2:*

Onder aanpassing bindmiddel kan ook worden verstaan het verbeteren van de korrelstapeling, waardoor het watergehalte (en daarmee de water-bindmiddelfactor) verlaagd kan worden.

9.4.3.2 *Verlagen van het bindmiddelgehalte.*

Hulpstoffen en dan met name (super)plastificeerders maken het mogelijk minder aanmaakwater te gebruiken en daarmee de water-bindmiddelfactor en/of het bindmiddelgehalte te reduceren. Tegenover een geringe dosering van plastificeerders kan een substantiële reductie van het bindmiddelaandeel staan. Kostentechnisch komt dat steeds vaker uit en ook milieutechnisch kunnen hiervoor redelijk betrouwbare berekeningen worden gemaakt, die eveneens aantonen dat inzet van hulpstoffen lonend is.

9.4.3.3 *Vervanging primair door secundair toeslagmateriaal.*

Vanuit het oogpunt van duurzaamheid zitten er verschillende kanten aan de toepassing van secundair toeslagmateriaal. Het verminderd gebruik van oppervlakedelfstoffen is op zich positief vanwege een verminderd gebruik van eindige grondstoffen. Schaarste en beschikbaarheid wordt daarbij in verband gebracht met deze eindigheid. Kwantificering van beide begrippen is moeilijk.

De winning en transport van primair zand en grind gaat gepaard met de nodige invloeden op het landschap en het milieu als gevolg van de inzet van allerlei materieel voor winning, classificatie en transport. Denk met name aan uitstoot van CO<sub>2</sub>, fijn stof en NO<sub>x</sub>. Bij de inzet van secundaire toeslagmaterialen, zoals betongranulaat gaat het om slopen, het opwerkingsproces (breken, zeven) en transport. Men kan stellen dat de milieueffecten van het slopen en het opwerkingsproces niet toegerekend mogen worden aan het toeslagmateriaal en dat de systeemgrens ligt vanaf het transporteren van het granulaat naar de betoncentrale of betonfabriek. Bij het transport moet bedacht worden dat zand en grind veelal per schip worden vervoerd terwijl betongranulaat meer per vrachtwagen wordt getransporteerd.

Het secundair toeslagmateriaal is veelal gebroken en heeft dus een hoekige korrelvorm en zal daardoor ten opzichte van het meer ronde riviergrind meer water vragen (naast meer absorptiewater), waardoor ook meer cement of meer hulpstof noodzakelijk is. Het moge duidelijk zijn dat een vergelijking op LCA-basis van primair en secundair toeslagmateriaal (betongranulaat) niet eenvoudig is en ook afhankelijk is van locatie-specifieke omstandigheden.

De heersende opinie is dat recycling van betongranulaat in beton de voorkeur heeft aangezien het recycling op productniveau betreft, waarbij de cirkel gesloten wordt.

#### 9.4.3.4 *Optimaliseren nabehandeling.*

De sterkteontwikkeling is niet alleen van belang voor de 28-daagse sterkte, maar veelal ook voor het tijdstip van ontkisten. In die gevallen dat dit tijdstip vastligt, kunnen de samenstelling van het bindmiddel en de nabehandeling (verhoging temperatuur) op elkaar afgestemd worden om een verduurzaming van het beton te bewerkstelligen. Dit speelt voornamelijk in de prefab industrie en de woningbouw (warme en koude gietbouw).

Het beton heeft bij gietbouw in een dagcyclus ca. 14 tot 16 uur tijd om te verharden. In die tijd moet voldoende druksterkte (voor woningbouw vaak 14 N/mm<sup>2</sup>) bereikt zijn om de andere ochtend vroeg te kunnen ontkisten. De door de constructeur vastgestelde sterkteklasse zal dit niet zonder meer mogelijk maken. Vaak wordt het beton daarom door gasverwarming (met propaan of aardgas) onder de stalen vloerbekisting verwarmd tot ca. 60 °C betontemperatuur. Het verbranden van deze fossiele brandstof levert een bijdrage aan de totale CO<sub>2</sub>-belasting die gemoeid is met de realisatie van het bouwwerk. Soms is het niet mogelijk beton te verwarmen. Bij binnenstedelijk bouwen kan de afgegeven Hinderwetvergunning dit uitsluiten op grond van geluidshinder en veiligheid. Wil men dan toch met gietbouw in een dagcyclus werken, dan zal de betonsamenstelling op eigen kracht onder alle omstandigheden (zomer/winter) binnen 14 tot 16 uur de vereiste ontkistingsterkte moeten realiseren. Hiertoe moet de oorspronkelijke betonsamenstelling fors worden aangepast. Er zal meer (klinkerrijke) cement moeten worden toegepast. De CO<sub>2</sub>-belasting als gevolg van verwarmen komt dan weliswaar te vervallen, maar de CO<sub>2</sub>-belasting door het toepassen van meer (klinkerrijke) cement gaat omhoog. De keuze voor koude gietbouw is, paradoxaal genoeg, uiteindelijk CO<sub>2</sub>-ongunstig.

#### 9.4.3.5 *Verlengen ontkistingstijden.*

Aansluitend op de afweging tussen koude of warme gietbouw ligt de vraag voor of het milieu baat heeft bij langere ontkistingstijden. Deze vraag kan in algemene termen met 'ja' worden beantwoord.

"Slow concrete" (weinig bindmiddel en/of klinker) heeft de voorkeur boven "fast concrete". Tegenover dit voordeel staat misschien toch een paar praktische nadelen:

- de totale doorlooptijd van een werk kan onbedoeld groter worden;
- de bekisting is langer in gebruik en wordt daardoor economisch gezien niet optimaal gebruikt;
- door de trage verharding is wel een langere nabehandeling nodig.

#### 9.4.3.6 *Toepassen rekenwaarde sterkte na 56-91 dagen.*

De huidige regelgeving is gebaseerd op de sterkte na 28 dagen. Het is bekend dat de sterkteontwikkeling na deze periode doorgaat, met name voor bindmiddelen die puzzolane stoffen (zoals poederkoolvliegias) en/of hoogovenslak bevatten. Deze in rekening te brengen extra sterkte kan zich vertalen naar lagere bindmiddelgehalten. Het heeft wel gevolgen voor de bouwsnelheid. Het moet echter wel binnen de randvoorwaarden passen van de regelgeving. Zo zal de constructieve veiligheid een aparte evaluatie verdienen.

Het optimaliseren van betonmengsels, of dat nu op sterkte-, kosten- en/of milieueigenschappen is, houdt het risico in dat mengsels complexer en daarmee kritischer voor verstoringen in de samenstelling en uitvoering worden. Optimale mengsels vereisen vakmanschap in het hele bouwproces.

#### 9.4.4 Rekenen aan de duurzaamheid van beton

Vanaf 1 januari 2013 is de milieuparagraaf van het nieuwe Bouwbesluit van kracht en moet voor nieuwbouw en renovatieprojecten aan uitputting van grondstoffen en uitstoot van broeikasgassen (carbon foot print), te bepalen volgens de Bepalingsmethode Milieuprestaties Gebouwen en GWW-werken. In Nederland is daarom de SBSCUR rekentool Groen Beton ontwikkeld, waarmee op relatief eenvoudige wijze de milieuaspecten en dus ook de carbon foot print van beton en de verwerking daarvan te berekenen zijn. Hierbij wordt rekening gehouden met: grondstoffen, het transport van deze grondstoffen naar de fabriek, de processen in de fabriek, het transport van het beton of de betonelementen naar de bouwplaats, de constructiefase, de sloop en de finale afwerking.