

Chemische Feitelijkheden

editie 55 | nr 243 | maart 2008

DE CONTEXT Kunstwerken van beton

DE BASIS Spelen met ingrediënten

DE DIEPTE Speuren naar verbeteringen

AUTEUR: BASTIENNE WENTZEL

BETON

Daar kun je op bouwen

Binnenkort staat in Dubai het hoogste gebouw ter wereld. Een kolos van zo'n achthonderd meter hoog, grotendeels gemaakt van beton. Zonder dit materiaal was het een onmogelijk project geweest, en datzelfde geldt bijvoorbeeld voor het aanleggen van de HSL. Ook het Colosseum in Rome had er vandaag niet meer gestaan als de oude Romeinen het niet uit beton hadden opgetrokken. Wat maakt dit mengsel van cement, zand, grind en water zo'n ideaal bouw materiaal? Voornamelijk de sterkte: sommige betonsoorten zijn zó sterk dat een kubus van amper 15x15x15 cm het gewicht van 450 personenauto's kan dragen. Een tweede belangrijke eigenschap is de duurzaamheid. Beton gaat, mits goed geproduceerd, eeuwenlang mee.

Het maken van goed beton blijft een kunst. Het is geen kwestie van zomaar wat mengen: beton is een composiet

die zorgvuldig moet worden samengesteld. De keuze van materialen, hoeveelheden en productiemethoden luistert zeer nauw, want die bepaalt uiteindelijk de eigenschappen. Dankzij onderzoek wordt beton steeds sterker en lichter en geschikt voor nóg meer verschillende toepassingen. Er bestaat zelfs al beton dat zichzelf repareert.

In deze Chemische Feitelijkheid

- De Context: Hoe lang kennen we beton al en waar kun je het allemaal voor gebruiken?
- De Basis: Welke kennis is nodig om beton te maken? Hoe beïnvloed je de eigenschappen ervan?
- De Diepte: Wetenschappers proberen meer grip te krijgen op de sterkte, duurzaamheid en verwerkbaarheid van beton. Nieuwe toepassingen liggen in het verschiet.

Er bestaat een **groot misverstand** over beton. Het zou een saai, grijs materiaal zijn waar geen eer aan te behalen valt. Maar schijn bedriegt.

Kunstwerken van beton

In november 2007 werd in ons land de vijftigste Betondag gehouden, een manifestatie van de inmiddels tachtigjarige Betonvereniging. Het bezoekersaantal van ruim 3.500 illustreert de grote belangstelling voor beton in de bouwwereld. Beton behoort er tot de favoriete bouwmaterialen. Het is duurzaam, flexibel en goedkoper dan staal of baksteen. Bouwkundigen en materiaalonderzoekers proberen beton voortdurend verder te verbeteren. Nieuwe ontwikkelingen zijn dan ook in volle gang.

Zo maakt men beton steeds sterker, waardoor constructies dunner en lichter kunnen worden. De brandwerendheid neemt toe – wel zo veilig – en er zijn technieken in opmars voor warmteopslag in beton. Dat is gunstig voor het energieverbruik, want warmte die er op het ene moment in overvloed is wordt dan in de muren opgeslagen. Als het kouder wordt, verwarm je daarmee je huis of gebouw. Verder kennen we tegenwoordig lichtdoorlatend beton met glasvezels erin en zogeheten ‘architectuur’-beton met grote stukken glas. Dit materiaal wordt gebruikt om binnenshuis fraaie wandjes te bouwen. Er is wit beton ontwikkeld voor mooie gevels en er bestaat inmiddels zelfs zelfherstellend beton. Handig



In Nederland wordt jaarlijks 16 miljoen kuub beton verwerkt. De wereldconsumptie van cement bedroeg in 2006 2,283 miljard ton, waarvan liefst 1,2 miljard ton ofwel 45 procent in China.

voor dat drukke viaduct van de A1: bij scheuren hoeft de weg niet afgesloten te worden voor het verkeer, maar repareert de scheur zichzelf.

Beton laat zich bovendien steeds makkelijker verwerken. Een huis bouwen met prefab betonplaten gaat snel, maar beton kan ook in vloeibare vorm (de specie) naar de bouwplaats worden gebracht. Daar kan het in iedere gewenste vorm worden gegoten. Tegenwoordig kan men vloeibare betonspecie over grote afstanden verpompen, waardoor muren ter plekke gegoten kunnen worden – ook op de bovenste verdiepingen van hoge gebouwen.

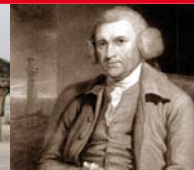
VERGETEN MATERIAAL

Beton is een mengsel van zand en grind dat aaneen wordt gehecht met een bindmiddel, meestal cement. Na toevoeging van water hardt het uit tot een steenachtig materiaal. De oude Romeinen kenden al beton. Sommige van hun gebouwen en constructies staan 2.000 jaar later nog fier overeind, zoals het Colosseum in Rome. Het Romeinse beton was weliswaar niet zo sterk als ons hedendaagse beton, maar bevatte veel kalk als bindmiddel en dat blijkt zelfherstellend te werken. Gebouwen uit die tijd scheuren dus wel, maar storten niet in.

Lang voor de Romeinen gebruikten de oude Egyptenaren een voorloper van beton: zand met gips als bindmiddel. Bewijzen daarvan zijn onder andere gevonden in de beroemde piramide van Cheops. Nadeel van gips als bindmiddel is echter dat het, in tegenstelling tot cement, na verharden nog steeds oplost in water. De Egyptische betonnen bouwwerken zijn dus vrijwel allemaal weggespoeld.

Vreemd genoeg is beton na de Romeinse tijd eeuwenlang vergeten als bouw-materiaal. Pas in 1756 maakte de Brit John Smeaton een kalkmengsel met klei voor het herbouwen van een vuurtoren.

Beton door de eeuwen heen

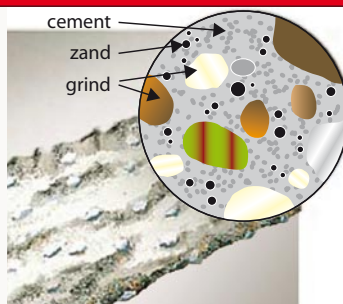
3.000 vC	300 vC	Vanaf 118 nC	Na 400	1756	1824	1825
						
De Egyptenaren gebruikten modder met stro en later gips en kalk om gedroogde bakstenen te binden.	De Romeinen gebruikten een vulkanisch as dat puzzolaan heet als cementachtig materiaal en maken er beton van met zand.	De Romeinen bouwen het Pantheon met een licht soort beton. De insparingen maken de constructie nog lichter. Tot 1434 is dit de grootste koepel ter wereld.	De kunst van beton maken gaat verloren na de val van het Romeinse Rijk.	De Brit John Smeaton herontdekt hydraulisch cement door het mengen van mortar met zoet en zout water.	Joseph Aspdin, metselaar in Leeds, Engeland, patenteert portlandcement, genoemd naar het type steen van het eiland Portland aan de Britse kust.	Het Erie Canal is een van de eerste grote constructies van beton in de Verenigde Staten. Er is onder andere beton gebruikt dat uithardt onder water.

DE BOUWSTENEN

Beton bestaat uit een mix van een bindmiddel met een of meerdere zogeheten toeslagmaterialen, meestal zand en grind. Door toevoeging van water verhardt dit mengsel en ontstaat een composiet van grindsteen en zandkorrels die door het bindmiddel aaneen worden gehecht. Het bindmiddel is meestal cement, dat door toevoeging van water verhardt.

Betonspecie is de nog onverharde pasta van cement, water en toeslagmaterialen.

Cement bestaat voornamelijk uit calciumsilicaten en calciumaluminaten. Andere bindmiddelen zijn bijvoorbeeld kalk (calciumcarbonaat, CaCO_3) of gips (calciumsulfaat, CaSO_4).



Andere belangrijke bouwmaterialen zijn **bakstenen** die worden gebakken van klei, een natuurlijk gesteente dat bestaat uit een groot aantal verschillende mineralen. Bakstenen worden tijdens de bouw aaneen gemetseld met **mortel of specie**. Dit is in feite een fijn type beton, dat bestaat uit cement, zand en water. Soms wordt wat kalk toegevoegd om de mortel smeugiger te maken waardoor het materiaal gemakkelijker is te verwerken. Specie/mortel wordt ook gebruikt bij het voegen en stuken van wanden.



Ingenieurs stortten zich vervolgens op het verbeteren van dit bouw materiaal en in 1824 kreeg Smeatons landgenoot Joseph Aspdin het patent voor portlandcement, wereldwijd het meest gebruikte cement voor beton.

SNEL, STERK EN FLEXIBEL

Jaarlijks verbruiken de geïndustrialiseerde landen bijna een kubieke meter beton per persoon. Alleen al in Nederland komt dat neer op een betonmeer van vier bij vier kilometer en een meter diep. Al dit beton zit in gebouwen, bruggen en wegen. De voordelen zijn duidelijk: met (prefab) beton kun je veel sneller bouwen dan met bakstenen en bovendien is het een sterk bouw materiaal. De meeste soorten hebben een zogeheten kubusdruksterkte van 5-55 N/mm², wat betekent dat een kubus van 15x15x15 cm puur beton het gewicht van zo'n 450 personenauto's kan dragen. Daar staat tegenover dat de trekkracht ongeveer een factor 10 lager ligt, omdat het materiaal bros en korrelig is. Daardoor rekt beton onder invloed van

trekkrachten relatief gemakkelijk uit. In de praktijk betekent het dat er scheuren ontstaan.

Maar het belangrijkste voordeel van beton is de flexibiliteit. Het bouw materiaal is, voordat het uithardt, in alle mogelijke vormen te gieten. Illustratief zijn bijvoorbeeld de mooie ronde vormen in het appartementencomplex Eekenhof in Enschede. Bijna geen hoek in dit uit gietbeton opgetrokken gebouw is puntig.

Ook voor minder voor de hand liggende constructies is beton geschikt. Zo is in een scheepsdok in Rozenburg een betonnen schip in aanbouw. Deze zogenaamde *Heavy Lifter* van het Noorse bedrijf MPU Heavy Lift ASA gaat dienen als drijflichaam voor offshore platforms. Meestal zijn die van staal gemaakt, maar na berekeningen bleek dat beton in dit geval langer meegaat en kosteneffectiever is.

VAKWERK

Een nadeel van beton is dat je veel kennis nodig hebt om met het materiaal te bouwen. Beton maken is en blijft werk

WAT GING ER MIS BIJ...

De balkons in Maastricht

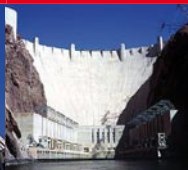
In april 2003 stortten in Maastricht vijf balkons in van een appartementengebouw. Twee mensen werden bedolven onder vijftig ton beton en overleden. Later werd bekend dat de ontwerpen tijdens de bouw werden gewijzigd, waardoor uiteindelijk een ondersteuningskolom van de balkons niet meer op de fundering rustte. De aannemer had het ontbrekende deel opgevuld met mortel, dat niet sterk genoeg is om de last te dragen.

De parkeergarage in Amsterdam

In 2006 moesten aan het Amsterdamse Bos en Lommerplein 190 mensen uit negentig woningen ruim een half jaar hun huis uit. Het bleek dat de betonnen constructie in het dak van de parkeergarage bij een onderzoek niet in orde was. Er zat een scheur in van tien meter lang. Uit onderzoek van TNO bleek dat er fouten waren gemaakt bij het ontwerp en de bouw van de parkeergarage en dat er onvoldoende wapening zat in de betonnen nokken van de pilaren die het parkeerdek moesten dragen.

voor specialisten. De eigenschappen van betonnen bouwwerken worden bepaald door de keuze van de hoeveelheden en soorten zand en grind (de toeslagmaterialen), de hoeveelheid en soort cement, de hoeveelheid water en de temperatuur waarbij het uithardt. Fouten bij de betonbereiding kunnen leiden tot onvoldoende sterkte, scheuren of betonrot.

In de Voorschriften Beton Technologie (VBT) zijn de kwaliteitscriteria voor fabrikanten officieel vastgelegd. Het document bevat wettelijk verplichte NEN-normen voor de mengverhouding tussen cement, zand en grind. Verder staat beschreven hoe beton gemaakt moet worden en welke kwaliteitscontroles hierbij nodig zijn.

1891	1903	1936	1955	1956	1990	1996	2009
							
George Bartholomew legt de eerste betonnen straat aan in Bellefontaine (VS). De straat bestaat nog steeds.	Het Ingalls gebouw in het Amerikaanse Cincinnati (Ohio) is de eerste betonnen wolkenkrabber ter wereld.	De eerste grote betonnen dammen, de Hoover Dam en de Grand Coulee Dam, worden gebouwd.	La Chapelle de Ronchamp, ontworpen door de architect Le Corbusier die graag bouwde met beton. Het gebruik van gewapend beton maakte een vrijere indeling van ruimte mogelijk.	Het Guggenheim museum in New York werd gebouwd van gewapend beton.	Deze folly bij het gerenoveerde sanatorium Zonnestraal in Hilversum is een goed voorbeeld van de toepassing van lichtgewicht beton.	Toen de Petronas Twin Towers in Kuala Lumpur werden gebouwd, vormden ze het hoogste gebouw ter wereld met 452 meter. Er zit 160.000 m ³ beton in verwerkt.	De Burj Dubai wolkenkrabber wordt een technisch hoogstandje. De toren wordt ruim 800 meter hoog. Het beton voor de hoogste verdiepingen kan omhoog worden gepompt.

Beton is niets anders dan een **mengsel** van cement, zand, grind en water. De eigenschappen worden bepaald door de karakteristieken en de verhouding van die componenten, en de keuze van hulpstoffen.

Spelen met ingrediënten

Het belangrijkste bestanddeel van beton is cement, het bindmiddel dat letterlijk keihard wordt door een reactie met water. Betonspecie is het vloeibare en nog niet uitgeharde materiaal dat bestaat uit cementpasta (water en cement) en zogeheten toeslagmaterialen, meestal zand en grind. De cementpasta omhult de grindkorrels, die na verharding aan elkaar kleven. Het (fijnere) zand is bedoeld om de holtes tussen de korrels zo volledig mogelijk te vullen. Dankzij het grind en zand is beton wat duurzaamheid en hardheid betreft vergelijkbaar met natuurlijk steen.

CEMENTCHEMIE

De bekende ENCI-groeve in Maastricht levert de belangrijkste grondstof voor cement: mergel ofwel kalksteen. Deze steensoort bestaat voornamelijk uit calciumcarbonaat (CaCO_3). De grote brokken kalksteen worden gedroogd, vermalen en gezeefd. Om de gewenste samenstel-

ling te krijgen mengt men het materiaal met silicium-, aluminium en ijzeroxides, waarna het wordt verhit tot 1450°C . Bij deze hoge temperatuur valt calciumcarbonaat uiteen in koolstofdioxide (CO_2) en vrije of ongebluste kalk (CaO) dat met de oxides reageert tot calciumsilicaten, calciumaluminaat en calciumaluminaatferriet. Door het verhittingsproces – de sintering – ontstaan korrels, ongeveer zo groot als knikkers. Dit materiaal heet portlandcementklinker of kortweg klinker en vormt de basis voor alle cementsoorten. Door het te vermalen tot uiterst fijne deeltjes ($0,5 - 80\ \mu\text{m}$) ontstaat portlandcement. De combinatie van klinker met hoogovenslakken, een bijproduct van de ijzerproductie, leidt na mengen en malen tot hoogovencement.

Portlandcement is een snelbindend cement en wordt veel toegepast bij de productie van prefab beton. Omdat dit cement vooral in het begin vrij snel uithardt kunnen betonnen delen soms al bin-

nen een dag ontkist worden. Een andere eigenschap van portlandcement is dat bij de reactie met water relatief veel warmte vrijkomt. Daardoor heeft het 's winters bij gebruik buiten voordelen boven hoogovencement, dat bij lage temperaturen (te) langzaam uithardt.

In Nederland gebruiken we overigens veel hoogovencement. Beton met hoogovencement verschilt qua sterkte niet van beton met portlandcement; wel reageert hoogovencement trager, maar bij de reactie met water wordt ook minder warmte gevormd. Dat is soms een voordeel, want het voorkomt dat tijdens het uitharden te grote temperatuurverschillen ontstaan die later tot scheuren kunnen leiden. Voor dikke lagen beton, waaruit de warmte moeilijk weg kan, kiest men daarom vaak voor hoogovencement. Bovendien kan deze soort beter tegen aantasting door chemicaliën zoals sulfaten en chloriden uit zeewater.

WATER-CEMENTFACTOR

Er zijn weliswaar verschillende soorten cement, maar de werking ervan als snelhardend bindmiddel berust op hetzelfde principe. Cement behoort tot de zogeheten zouthydraten. Dat zijn zouten die water kunnen opnemen in hun kristalrooster, hetgeen leidt tot roosters met een grotere hardheid.

Bij het aanmaken van beton reageren de zouten uit het cement met water tot gehydrateerde zouten, een chemische reactie die uiteindelijk zorgt voor de hardheid van beton. Eerst zal het fijn gemalen cement na mengen met water een min of meer plastische massa vormen, waardoor het materiaal prettig verwerkbaar is. Vervolgens vindt een reactie met water plaats, waarbij cement verhardt en de toe-

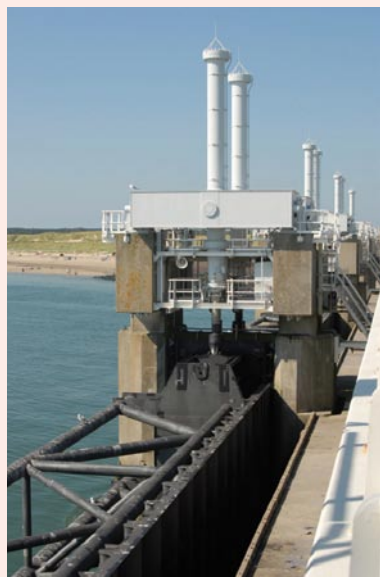
PORTLANDCEMENTKLINKER



Foto: Cement&Beton Centrum

De knikkergrote portlandcementkorrels (klinker) vormen de basis voor alle cementsoorten. Het materiaal bestaat uit ca. 65% alite (tricalcium silicaat, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$); ca. 15% belite (dicalcium silicaat, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$); ca. 7% aluminaat (tricalcium aluminaat ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$); ca. 8% ferriet (tetracalcium ferriet, $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$); ca. 5% kleine onzuiverheden (sulfaten, titanium, mangaan, fosfor en chroom). De sterkte van beton ontstaat door de reactie van de silicaten met water. In wit beton is het ferriet eruit gehaald.

HOE LANG GAAT EEN CONSTRUCTIE MEE?



In Nederland moeten constructeurs vooraf berekenen hoe lang een betonnen constructie minimaal kan blijven staan. Tijdens gebruik wordt de status van het beton regelmatig gecontroleerd. Hierbij meet men hoe diep het zogeheten carbonatatiefront (CO_2) of het chloridefront (Cl^-) is doorgedrongen in de betonlaag die de wapening afsluit van de buitenlucht. Hebben de chloride-ionen of het carbonatatiefront de wapening bereikt, dan is dat het begin van het einde. De constructie moet vanaf dat moment goed in de gaten worden gehouden. Voor de Oosterscheldekering is berekend dat dit minimaal 250 jaar zal duren. Normaal bedraagt de ontwerptermijn van een betonnen bouwwerk 25 tot 50 jaar. Bestaat er twijfel over de sterkte van een constructie, dan zullen ingenieurs de tekeningen raadplegen, het bouwsel inspecteren en eventueel een betonmonster analyseren. Op basis daarvan schat men de resterende levensduur van het beton in.

slagmaterialen (zand en grind) stevig aan een worden gekit tot een stabiele massa.

Cruciaal voor allerlei betoneigenschappen is de water-cementfactor: de gewichtsverhouding tussen de hoeveelheid water en cement in de betonspecie. Die moet minimaal 1 op 3 bedragen om alle poeder nat te kunnen maken. De precieze verhouding hangt af van de soort cement, maar te veel water geeft problemen. Dichtheid, sterkte en duurzaamheid gaan merkbaar achteruit als een te waterige specie wordt gebruikt. Door de juiste soort cement te kiezen en te variëren met de verhoudingen tussen water, cement en zand en grind kunnen gespecialiseerde betonproducenten nauwkeurig de eigenschappen van het beton regelen.

HULPSTOFFEN

Behalve de aard en de verdeling van de basisgrondstoffen worden ook hulpstoffen gebruikt om de gewenste eigenschappen verder te sturen. Het gaat om verbindingen die bijvoorbeeld de verwerkbaarheid, krimp, waterdichtheid en chemische weerstand beïnvloeden. Fabrikanten voegen ze in kleine hoeveelheden toe tijdens het mengen van de specie.

Zo worden bijvoorbeeld metaalchloriden, soda en kaliumhydroxide gebruikt om het verhardingsproces te versnellen. Stoffen als fosforzuur, nitraten, koolhydraten en zinkoxide worden in massabeton toegepast om te grote warmteontwikkeling bij het uitharden tegen te gaan. Verdichtingsmiddelen, bijvoorbeeld zeer fijngemalen zand, moeten ervoor zorgen dat er minder poriën ontstaan – waardoor

de druksterkte van het beton toeneemt. Uitdrogingswerende middelen worden gebruikt om verdamping van aanmaakwater tegen te gaan. Vaak gaat het om hars- of paraffinehoudende preparaten die men als een dunne laag op vers gestort beton spuit.

Om de verwerkbaarheid van betonspecie te verbeteren voegt men plastificeermiddelen toe, die ervoor zorgen dat het beton vloeibaarder wordt zonder dat meer water nodig is. Daardoor vloeit het beter in alle hoeken van de bekisting en kan men het makkelijker verpompen, zodat ook op hogere verdiepingen van gebouwen beton kan worden gestort. Een klassiek plastificeermiddel is het polymeer lignosulfonaat, dat vrijkomt bij de papierproductie. Maar inmiddels zijn veel effectievere ‘superplastificeerders’ ontwikkeld, waaronder polymeren van naftaleen- en melamineformaldehyd. Een bijkomend voordeel van plastificeerders is dat ze de vorming van luchtbelletjes in het beton voorkomen. Luchtbelletjes verlagen de dichtheid en maken zo de constructie minder stevig. De gangbare methode om beton luchtbelvrij te maken is trillen nadat het gegoten is.

Overigens ontwikkelden Japanse onderzoekers onlangs een *idiot proof* betonsoort. Voor dit zelfverdichtende beton gebruikten ze een nieuwe generatie plastificeerders, de polyacrylaat-copolymeren. Deze zorgen voor een goede dispersie (menging), waardoor een stabiele specie ontstaat die niet ontmengt. Het mengen van zand en grind met cement luistert daardoor minder kritisch.

SPANNEN EN WAPENEN

De treksterkte van beton ligt circa tien keer lager dan de druksterkte. Door beton te wapenen met staal wordt het sterker. Gewapend beton maakt men door het beton te gieten over een netwerk van gevlochten stalen staven.

Een andere manier om de treksterkte te verbeteren is voorgespannen beton. Dit is ook een soort gewapend beton, maar vóór het gieten van het beton worden dan de stalen staven gespannen. Nadat het beton is verhard laat men de staven weer los. De staven willen dan korter worden, maar omdat ze vastzitten in het beton komt de constructie onder druk te staan. Deze drukspanning kan later eventuele trekspanning van buitenaf, bijvoorbeeld een gewicht op een betonnen balk, als het ware neutraliseren. Daardoor is voorgespannen beton nog sterker dan gewapend beton.

BETON IN SOORTEN EN MATEN

gewapend beton	Binnenin versterkt met stalen staven.
voorgespannen beton	Gewapend beton waarbij de stalen staven gespannen worden voordat de specie wordt gegoten.
zelfverdichtend beton	Vloeibaarder dan gewoon beton; trillen om na het gieten luchtbelletjes te verwijderen is niet nodig.
hogesterkte beton	Extreem sterk door een lage water-cementverhouding; soms toevoeging van silicafume.
vezelbeton	Versterkt met 1,5-2% staalvezels van enkele centimeters lang; buigzamer dan gewoon beton.
onderwaterbeton	Kan onder water worden gestort zonder dat cement, zand of grind uitspoelen.
zwaar beton	Zwaardere toeslagmaterialen zoals hematiet (ijzeroxide).
lichtbeton/cellenbeton	Lichtgewicht toeslagmaterialen zoals klei of kurk.
schuimbeton	Beton waar lucht is ingebracht tijdens het mengen.
polymeerbeton	Polymeer fungeert als bindmiddel. Deze soort is sterk maar duur.
asfalt	Bindmiddel bitumen (een plakkerige vloeistof uit aardoliedestillaat).

Beton is niet alleen het belangrijkste materiaal bij het bouwen, er is ook heel veel geld gemoeid met betonreparaties. Geen wonder dus dat onderzoekers graag **sterkere en duurzamere** varianten ontwikkelen.

Speuren naar verbeteringen

Bijna de helft van de zeker 70 miljard euro die in de bouw omgaat is bestemd voor reparaties en onderhoud van onder andere de betonnen constructies. Kleine verbeteringen in beton waardoor een bouwwerk langer meegaat of minder reparaties vergt, kunnen leiden tot forse besparingen – zeker bij constructies op moeilijk bereikbare plekken. Alle reden dus om veel onderzoek te doen naar het verbeteren van beton.

Voor wetenschappers is beton interessant omdat het om een composiet gaat. Je kunt er bij wijze van spreken alles in stoppen om de eigenschappen te veranderen. Maar het is wel een complex materiaal: het vergt veel onderzoek om precies de juiste ingrediënten in de juiste

hoeveelheden toe te voegen. De universiteiten van Delft en Twente concentreren hun research naar betere betonsoorten op het maken van sterkere en duurzamere varianten.

TAAIE VEZELS

Beton wordt sterker door er vezels aan toe te voegen. Vaak zijn dat staalvezels. Deze verbeteren de treksterkte, taaiheid en schokbestendigheid. Ook vindt onderzoek plaats naar het toevoegen van houtvezels of zelfs koolstof nanobuisjes, de sterkste vezels die tot nu toe bekend zijn. Dit zou het materiaal niet alleen sterker maken, maar vooral ook taai-er. Probleem is dat die nanobuisjes qua grootte lijken op de reactieproducten van

cement met water, waardoor het lastig is om ze netjes georiënteerd in te bouwen in de microstructuur van cement. Men zoekt nog naar technieken om deze oriëntatie te manipuleren. Overigens zijn nanovezels van koolstof op dit moment ook nog veel te duur om ze grootschalig toe te passen in bouwmaterialen.

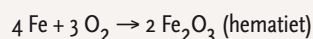
Ondanks extra versterking kan beton op den duur toch gaan scheuren. Normaal gesproken repareert men dit met cement, lijm (bijvoorbeeld van acryl of latex) of een epoxycement. Bovendien is beton enigszins zelfherstellend. Scheurtjes van minder dan een micrometer vullen zich met overgebleven ongereageerd cement en dankzij restvocht wordt dat vervolgens hard. Onderzoekers willen dit proces

ROESTEND IJZER IN GEWAPEND BETON

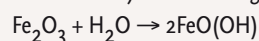
In de jaren zeventig was er zoveel behoefte aan prefab betonelementen, dat fabrikanten de vraag naar complete wanden en vloeren nauwelijks konden bijbenen. Om beton sneller te laten uitharden voegden zij calciumchloride (CaCl_2) toe, waardoor ze tweemaal zo snel konden produceren.

Dat hadden ze beter niet kunnen doen, zo bleek later. Op zich is calciumchloride voor het beton zelf niet schadelijk, maar voor de wapening is het funest. Chloride-ionen werken als een katalysator bij aantasting van de wapening onder invloed van water en CO_2 . Dit heet wapeningscorrosie, in de volksmond beter bekend als betonrot. Het proces is een aaneenschakeling van chemische reacties.

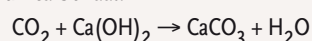
- 1 Op de stalen wapening vormt zich onder normale omstandigheden een beschermende laag, de zogeheten passiveringslaag. Het is een laag ijzeroxide die het onderliggende staal beschermt tegen verder roesten:



- 2 Water dat de betonlaag binnendringt tast de beschermende laag aan, doordat ijzeroxide reageert met water. Bijvoorbeeld volgens:



- 3 Koolstofdioxide dat de betonlaag binnendringt reageert met calciumhydroxide in het beton tot calciumcarbonaat:



De pH van het beton daalt door afname van de concentratie OH^- -ionen van 12,5 à 13,5 naar 8,0 à 9,0.



Als het ijzer in het staal niet meer is beschermd door ferriet (reactie 2) en als ook de pH daalt (reactie 3) ontstaat corrosiegevaar door een complexe serie redoxreacties van hematiet en ijzerionen en water, waarbij chloride-ionen een katalyserende werking hebben.

VERSTERKENDE VEZELS



Foto: Betonvereniging

Staalvezels versterken ultra-hogesterkte beton, dat is bedoeld voor constructies die slank gebouwd moeten worden of bestand moeten zijn tegen extreme belastingen zoals in waterkeringen.

verbeteren en sturen, zodat ook grotere scheuren zichzelf kunnen repareren.

De houtvezels die voor het versterken van beton worden toegevoegd, zijn wellicht prima geschikt voor het maken van zelfhelend beton. Deze vezels zijn hol, waardoor er een verbinding in kan worden opgenomen die scheuren kan dichtplakken. Hars bijvoorbeeld, of gewoon weer achtergebleven cement dat niet gereageerd heeft met water. De kalk die de Romeinen vroeger als bindmiddel gebruikten, blijkt achteraf uitgerekend op deze manier zelfherstellend te hebben gewerkt. In plaats van in vezels wordt zo'n 'betonmedicijn' ook wel in bolletjes verpakt en aan het betonmengsel toegevoegd. Nadeel van deze methoden is dat onbekend is wat er met de vezels en de bolletjes gebeurt bij het mengen en verwerken van het beton. De bolletjes kunnen bijvoorbeeld makkelijk kapot gaan.

BACTERIËN

In Delft onderzoekt men een heel nieuwe methode voor het zelfherstel van beton. Bacteriën moeten daarbij voor doertje gaan spelen. Bepaalde bacteriesoorten scheiden tijdens hun groei kalk af, dat zou kunnen worden gebruikt om scheuren te dichten in beton. Deze aanpak kent twee hordes.

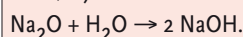
Ten eerste moeten de bacteriën natuurlijk niet continu kalk uitscheiden, maar alleen wanneer er een scheur ontstaat. Daarom worden ze als sporen aan het beton toegevoegd – in een soort slapende toestand. Ze worden pas 'wakker' als er water in een scheur loopt. Vervolgens moeten ze gaan groeien om kalk (calciet) uit te scheiden en daarvoor hebben ze voedsel nodig. De onderzoekers losten dit op door het vereiste voedsel te mengen met het beton. Deze aanpak blijkt een betonsoort op te leveren die zo'n 20 procent sterker is dan gewoon beton. Hoe dat komt is nog de vraag.

DE ALKALI-SILICAREACTIE

Onderzoekers aan de TU Delft bestuderen de mogelijkheid om gerecycled glas te mengen met beton. Men hoopt daarbij twee vliegen in één klap te slaan: het mooier en goedkoper maken van beton én het bergen van glasafval. Mooi wordt het beton zeker en het materiaal is ook sterk genoeg om mee te bouwen. Maar voor gebruik buitenshuis blijkt het helaas ongeschikt, doordat het bijzonder gevoelig is voor de zogeheten alkali-silicareactie.

Deze reactie treedt altijd enigszins op in beton. Silica (siliciumoxide, SiO_2) is onontbeerlijk voor sterk beton. Glas dat voornamelijk uit silica bestaat lijkt dan ook een logische keuze als toevoeging. Maar het basische karakter van beton gooit roet in het eten. De reactie tussen sommige vormen van silica en hydroxyl-ionen levert een gel op die water absorbeert en is daardoor desastreus voor de sterkte.

Eerst vindt een reactie plaats van alkalioxiden met water, bijvoorbeeld:



Vervolgens reageert het gevormde natriumhydroxide met reactief silica tot natriumsilicaathydraat: $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + 2 \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot (n+1)\text{H}_2\text{O}$

Deze reactie verloopt zeer langzaam, maar heeft wel het vermogen veel water te binden en daardoor een grote swelling te vertonen. Scheuren zijn het resultaat.

De Delftse onderzoekers vermoeden dat silicaat-anionen van het silica-aggregaat (het brokje glas) losraken door OH^- -ionen in het vocht van de betonporiën. Natrium- en kaliumionen compenseren de



Foto: TU Delft

negatieve lading, waarbij de alkali-silicagel wordt gevormd. De alkali-silicareactie kan niet geheel worden voorkomen, maar wel tegengewerkt. Allereerst verloopt de reactie niet zonder water. Bovendien is de gel instabiel in aanwezigheid van vrij calcium (zoals in jong beton, waar het nog niet volledig heeft gereageerd) en calcium-silicahydraat. Verder kan puzzolaan worden toegevoegd. Dat is een fijn poeder van vulkanische oorsprong dat in een reactie met water verhardt en niet meer in water oplost. Puzzolaan verlaagt tevens de basiciteit van het beton, waardoor de alkali-silicareactie wordt vertraagd.

Tweede probleem is dat de meeste bacteriën van een zure omgeving houden. In een basisch milieu, zoals in beton, sterven ze. Vandaar dat men speurt naar bacteriën die wél bij een pH van 12 tot 13 kunnen overleven. Onder andere de stammen *Bacillus cohnii*, *Bacillus pseudofirmus* en *Sporosarcina pasteurii* blijken tegen zo'n hoge zuurgraad bestand. De Delftse onderzoekers bekijken momenteel of deze opzet daadwerkelijk haalbaar is in de praktijk. Dergelijk beton zou sowieso relatief duur zijn, en daarom alleen worden toegepast op plaatsen waar reparatie van scheuren zeer kostbaar is.

MILIEUVRIENDELIJK

Maar hoe sterk ook, uiteindelijk zullen zelfs constructies van deze hoogwaardige betonsoorten onder de slopershamer komen. Daarbij moet het bouw materiaal zoveel mogelijk worden hergebruikt. Belangrijk bij alle innovaties

is dus de mogelijkheid om de grondstoffen van het beton te recyclen. Er mogen geen giftige of milieuvontreinigende verbindingen in voorkomen. Met houtvezels en bacteriën zitten de onderzoekers wel goed qua milieuvriendelijkheid, en verder bestaat beton op zichzelf uit natuurlijke materialen.

Wel komt er bij de productie van cement behoorlijk veel van het broeikasgas CO_2 vrij: per ton cement ongeveer een ton. Het gebruik van beton draagt hierdoor wereldwijd bij aan 5 tot 8 procent van de uitstoot van koolstofdioxide. Om de CO_2 -emissie van de cementindustrie te beperken, wordt portlandcementklinker gemengd met vliegashoudend (vliegascement) of hoogovenslakken (hoogovencement). In Nederland maakt het hoogovencement zo'n 60 procent van de markt uit, waardoor de productie van cement in ons land iets milieuvriendelijker is dan gemiddeld.

Meer weten

AANBEVOLEN LITERATUUR

- vaktijdschrift Cement (constructie)
- vaktijdschrift Betoniek (betontechnologie)
- brochure 'Thermische massa' en 'Energiek beton' van het Cement & BetonCentrum

AANBEVOLEN WEBSITES

- www.understanding-cement.com: veel info (Engels) over cement en de chemie ervan.
- www.worldwidebase.com/peoplesociety/beton.shtml: uitgebreide uitleg (Nederlands) over beton.
- www.cementenbeton.nl: website Cement & BetonCentrum.
- www.perfectbouw.nl/Kennisbank: database met veel artikelen over beton.
- www.concretenetwork.com/concrete-history: Engelse website met o.a. een tijdlijn van de ontwikkeling van beton.
- www.kb-beton.nl/het_elektrochemische_proces.php: de chemie van de corrosie van betonwapening.
- www.bouwvademecum.nl/html/body_enci.html: over grondstoffen en productiemethoden voor cement en beton.

VOOR OP SCHOOL

1. De uitdrukking: 'cement droogt' klopt chemisch gezien niet. Ook onder water wordt cement hard. Leg uit wat met 'drogen' wordt bedoeld?
2. Portlandcement komt onder meer uit de streek rond Portland in Zuid-Engeland. Je vindt daar de krijtrotsen met een grijze cementkleur. Waaruit bestaan die krijtrotsen? Waaruit bestaat schoolbordkrijt? Hoe maak je onderscheid?
3. De cementindustrie kent een afwijkende notatie voor de samenstelling van cement. Calciumoxide wordt aangegeven met een C. Hoe worden de overige ingrediënten aangegeven? Wat is het nut van deze notatie? (Gebruik de links).
4. Hoeveel gram koolstofdioxide ontstaat theoretisch bij het branden van 1000 ton kalksteen? Waardoor is de hoeveelheid in de praktijk meer dan het dubbele?



Grind, zand, cement en water worden in een betonmolen gemengd tot metselspecie of betonspecie.

5. De druksterkte van beton is ruim tienmaal groter dan de treksterkte. Verklaar het verschil?
6. De harding van cement is een exotherm proces. Zoek het verloop van de temperatuur van verse specie met de tijd. Hoe lang is specie verwerkbaar?
7. Een chemische tuin is een goed model voor de uitharding van cement. Maak een chemische tuin en licht de uitharding van cement toe met dit model.
8. Water in beton reageert basisch door aanwezigheid van $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en CaO in het beton. Reactie met CO_2 uit de atmosfeer zorgt voor verdere verharding en daling van de zuurgraad. Geef de reactievergelijking van de optredende reacties. Wat is een nadeel van de daling van de pH bij gewapend beton?
9. In Binas staan standaardelektrodepotentialen vermeld bij standaardomstandigheden. Geef de halfreacties van het roesten van ijzer naar FeO in zuurstofrijk waterig milieu.
10. Zoek een ijzer-water-pH diagram met elektrodepotentialen (iron Pourbaix diagram). Geef aan waar beton in het diagram past. Wat is de elektrodepotentiaal van ijzer bij $\text{pH} = 12$ in zuurstofvrij milieu?

COLOFON

Chemische Feitelikheden: actuele encyclopedie over moleculen, mensen, materialen en milieu. Losbladige uitgave van de KNCV, verschijnt drie maal per jaar met in totaal tien onderwerpen.

Redactie:
Alexander Duyndam (C2W)
Marian van Opstal (Bèta Communicaties)
Arthur van Zuylen (Bèta Communicaties)
Gerard Stout (Noordelijke Hogeschool Leeuwarden)

Basisontwerp: Menno Landstra

Redactie en realisatie:
Bèta Communicaties
tel. 070-306 07 26
betacom@planet.nl

Fotoverantwoording:
Foto's zonder bronvermelding zijn afkomstig van www.istockphoto.com

Uitgever:
Roeland Dobbelaer
Bèta Publishers
Postbus 249, 2260 AE Leidschendam
tel. 070-444 06 00
fax 070-337 87 99
info@betapublishers.nl

Abonnementen opgeven:
Abonnementenland
Antwoordnummer 1822
1910 VB Uitgeest
tel. 0900-226 52 63 (€ 0,10/minuut)
aboservice@aboland.nl

Abonnementen:
• papieren editie en toegang tot digitaal archief op internet: (inclusief verzamelmap): € 75,-
KNCV- en KVCV-leden: € 65,-

• alleen toegang tot digitaal archief op internet: € 60,-
KNCV- en KVCV-leden: € 50,-

Abonnementen kunnen elk moment ingaan. Abonnementen worden automatisch verlengd tenzij vóór 1 november van het lopende jaar een schriftelijke opzegging is ontvangen.

BETON

editie 55
nummer 243
maart 2008

Met dank aan:

- Prof. dr. Klaas van Breugel, TU Delft, k.vanbreugel@tudelft.nl
- Ir. Dick Stoelhorst, Betonvereniging, dick@betonvereniging.nl
- Drs. Rutger de Jong (redactie C2W)