

## Beton Schade en analyse

De jongste generatie monumenten, uit de periode 1850-1940, kent veel nieuwe materiaal-toepassingen. Eén van de meest karakteristieke nieuw toegepaste materialen is beton. Maar niet alleen jonge monumenten bevatten beton, ook een aantal oudere monumenten is in de twintigste eeuw voorzien van betonnen elementen, zoals vloeren of draagconstructies. Via deze brochure geeft de Rijksdienst voor de Monumentenzorg informatie over het materiaal, mogelijke schademechanismen en onderzoeksmethoden. Een volgende brochure zal ingaan op herstelmethoden en onderhoud.

### INLEIDING

Beton heeft zich in de afgelopen eeuwen bewezen als functioneel en duurzaam materiaal. Desondanks kennen we allemaal ook roestende wapening die schollen uit het betonoppervlak drukt. Beton is een zeer divers materiaal en kent veel verschillen in samenstellingen, kwaliteiten en verschijningsvormen. Naast roestende wapening bestaan er ook bedreigingen en schademechanismen die zich minder makkelijk laten herkennen. De kwaliteit van het beton en mogelijk optredende schademechanismen zijn bepalend voor de wijze waarop het materiaal moet worden geconserveerd of hersteld.

Beton is een verzamelnaam voor alle kunstmatig vervaardigde, steenachtige materialen die zijn opgebouwd uit samengekitte stukken steen. In de eenvoudigste vorm worden stukken natuursteen bijeengehouden door leem of klei. Het meeste beton ontstaat echter door het verharden van een mengsel van hydraulisch bindmiddel, zoals kalk met tras (fijngemalen tufsteen) of cement, met water en fijne en grove toeslagstoffen, zoals zand, grind en stukken steen. Zo werd in de negentiende eeuw zogenaamd brikkenbeton toegepast, onder andere bij verdedigingswerken. Brikkenbeton is een ongewapend traskalkbeton, dat bestaat uit tras, kalk en brokken baksteen. Raadpleeg voor informatie over kalkmortel onze brochure *Het gebruik van kalkmortel*, *Info Restauratie en beheer 37*.

Déze brochure richt zich met name op beton waarin cement als bindmiddel is gebruikt, ook wel cementbeton genoemd. De problematiek en aanpak van vroege 'betonconstructies', die bestaan uit cementmortel en ijzer, zijn vergelijkbaar met die van gewapend beton.



*De dunne toplaag van cementmortel op het beton van Fort bij Spaarndam is deels losgelaten en lokaal zijn afzettingen van calciumcarbonaat te zien. Het fort is gebouwd rond 1900 als onderdeel van de Stelling van Amsterdam (foto Gert Jan Luijendijk)*



*Beton van het oudste deel van het forteiland bij IJmuiden, dat is gebouwd omstreeks 1890. De doorsnede toont verschillende soorten beton, met bovenop een laag gewoon beton en daaronder brikkenbeton (foto Gert Jan Luijendijk)*





*Cementrusterij priefel, uit circa 1892, dat onderdeel uitmaakt van de tuin van het Snouck van Loosenhuis te Enkhuizen. Het is opgebouwd uit een stalen frame en cementmortel. Wat materiaalproblematiek betreft, vertoont dit type constructie veel overeenkomsten met gewapend beton*



*De Spoelery van de Tricot-fabriek in Winterswijk, die is gebouwd tussen 1912 en 1922. Het is een vroeg voorbeeld van een gebouw met betonskelet. Karakteristiek zijn de consoles in de vorm van een afschuining bij de aansluitingen van balken*



## HISTORISCHE ONTWIKKELING

Vanaf het moment dat in 1824 het hydraulische bindmiddel portlandcement werd ontwikkeld, nam het gebruik ervan in hoog tempo toe. De metselaar Joseph Aspdin uit Leeds maakte portlandcement door een mengsel van gebluste kalk en kleihoudende grondstoffen tot sinterens toe te branden, dus tot het een begin van smelting vertoonde en daardoor aaneenkitte, en vervolgens te malen.

Beton werd in de negentiende eeuw voornamelijk gebruikt als ongewapend materiaal. Op een aantal experimenten na werd het in Nederland in die vorm toegepast in waterbouwkundige werken, verdedigingswerken, bruggen, riolen, vloeren en tegels. Men maakte gebruik van het zogenaamde stampbeton, een droge betonspecie die in dunne lagen werd aangebracht en met stampers werd verdicht.

Rond 1860 kwam de cementwarenindustrie op, waarin cementmortel werd gebruikt voor *prefab* bouwelementen zoals pinakels, lijsten en ornamenten, die eerder vooral van natuursteen werden gemaakt. Belangrijke stappen in de ontwikkeling van het gebruik van gewapend beton zijn de patenten vanaf 1867 van de Fransman J. Monier, op toepassingen van ijzeren netwerken in betonnen onderdelen en het in 1892 door zijn landgenoot F. Hennebique verkregen patent op een bouwwijze waarbij gewapende kolommen, balken en vloerplaten tot één monolithisch geheel werden gevormd.

Met de komst van gewapend beton, in Nederland rond 1880, werd het materiaal geleidelijk aan steeds meer voor constructies gebruikt. Vanaf 1900 gebeurde dat in toenemende mate in bruggen, fabrieken, hallen, silo's, koeltorens en watertorens. Om de kwaliteit van betonconstructies te verhogen, werden in 1912 de eerste *Gewapend beton voorschriften* uitgegeven door het Koninklijk Instituut Van Ingenieurs. De tweede *Voorschriften*, van 1918, stelden bijvoorbeeld eisen aan de betondekking. Voor balken werd minimaal 25 millimeter voorgeschreven en voor kolommen 35 millimeter. De latere *Voorschriften beton* worden uitgegeven door het Nederlands Normalisatie-instituut.

Na 1900 waren er in Nederland ook steeds meer geprefabriceerde constructieve betonelementen verkrijgbaar. Zo kwamen er verschillende typen vloersystemen en dakplaten op de markt. Het gebruik ervan echter bleef tot 1940 beperkt. De elementen waren meestal niet rendabel, doordat de loonkosten in de bouw nog laag waren in verhouding tot de materiaalprijzen. Bovendien waren de mogelijkheden van transport en montage van grote elementen beperkt. Daarnaast zag men het monoliete karakter van in het werk gestorte constructies juist als voordeel.

In het begin van de twintigste eeuw verschenen de eerste betonnen verdiepingsgebouwen in Nederland. In eerste instantie werd het materiaal gebruikt zoals men hout en ijzer gewend was toe te passen, namelijk in de vorm van een balkenconstructie. Pas in tweede instantie werden nieuwe, materiaalspecifieke constructies ontworpen, waarbij bijvoorbeeld in meer dan één richting werd overspannen, zoals bij de paddestoelvloer. De paddestoelvloer is in Nederland waarschijnlijk voor het eerst toegepast in 1914 en was aanvankelijk bedoeld voor zwaar belaste pakhuizen. Rond 1930 werd hij ook gebruikt voor fabrieken en warenhuizen, met als bekendste voorbeeld de Van Nelle-fabriek in Rotterdam. Toch kregen de meeste gebouwen tot 1940 een betonskelet met balkenvloeren, waarbij de balken bij aansluitingen een console in de vorm van een afschuining hadden. Ook werden tot die tijd de meeste betonconstructies in het werk gestort, zodat de verschillende onderdelen, zoals balken, platen, gewelven, spanten en kolommen, een monoliet geheel vormden. Omstreeks 1940 stapte men over op vlakke vloerplaten en rechte kolommen.

In de woningbouw vonden in de jaren twintig de eerste experimenten plaats met beton. Een bekend voorbeeld is het Amsterdamse Betondorp. Ook systeembouw en hoogbouw deden toen hun intrede. De architectonische uitstraling van beton werd steeds meer gewaardeerd

*Paddestoelkolommen in de Van Nelle-fabriek in Rotterdam, ontworpen in 1926 door Jan Brinkman en Leen van der Vlugt en opgeleverd in 1929*

en benut. Na Berlage waren het vooral de architecten van het Functionalisme, zoals Bijvoet, Brinkman, Duiker en Van der Vlugt die gebruikmaakten van gewapend beton.

Na 1945 nam de kwaliteit van *prefab* betonelementen toe door nieuwe technieken om beton te verdichten via trillen en schokken. De firma Schokbeton kreeg in 1931 een octrooi op het schok-procédé. Door het gebruik van voorgespannen beton, dat werd ontwikkeld vanaf 1930, konden grotere en lichtere elementen worden gemaakt. Om het sterker te maken wordt in dit beton de wapening onder trekspanning gebracht voordat de constructie belast wordt. Daarbij wordt gebruikgemaakt van snelhardend beton met een hoge dichtheid en druksterkte en een geringe krimp. Ook het gebruik van plastificeerders, stoffen die betonspecie met minder water goed verwerkbaar maken, draagt bij aan de kwaliteitsverbetering.

## HET MATERIAAL BETON

Cementbeton, of kortweg beton, bestaat uit cementsteen met fijn en grof toeslagmateriaal, zoals zand en grind. Cementsteen is het reactieproduct van cement en water. Beton bevat toeslagmateriaal groter dan 4 millimeter. Wanneer het toeslagmateriaal kleiner is dan 4 millimeter spreken we niet van beton, maar van cementmortel. Beton bestaat in het algemeen voor 75% uit toeslagstoffen die zorgen voor de draagsterkte van het materiaal. Modern beton bevat veelal ook een geringe dosis hulpstoffen, zoals plastificeerders om de verwerkbaarheid te verbeteren, versnellers of vertragers om de uitharding te beïnvloeden, of luchtbelvormers om de vorstbestendigheid en verwerkbaarheid te verbeteren.

Beton kan net als andere steenachtige materialen in principe alleen drukkrachten opnemen. Alleen in combinatie met wapeningsstaal, ook wel betonijzer of kortweg wapening genoemd, is het in staat ook trekkrachten op te nemen. Beton en staal vormen een sterk duo: beton hecht goed aan staal, ze hebben vergelijkbare thermische uitzettingscoëfficiënten en het basische milieu in het cementgebonden materiaal beschermt het staal tegen roesten. In een optimale situatie ligt de wapening enkele centimeters onder het betonoppervlak. De betonlaag tussen de wapening en het betonoppervlak noemt men de dekking.

De voor beton belangrijkste cementsoorten zijn portlandcement, hoogovencement en – in mindere mate voor monumenten – portlandvliegascement. Elk type cement heeft specifieke eigenschappen, die in een bepaalde situatie van belang kunnen zijn.

De dichtheid – en daarmee ook de duurzaamheid – van beton hangt nauw samen met de structuur ervan. De cementsteen van het beton bevat, net zoals alle steenachtige materialen, poriën, die een doorlopend kanalenstelsel vormen. Van belang zijn zowel de porositeit (de volumefractie aan holle ruimte), als de permeabiliteit (de doordringbaarheid voor gassen en vloeistoffen). Het transport van stoffen, zoals water en kooldioxide, wordt in belangrijke mate bepaald door de permeabiliteit. Poriën in cementsteen ontstaan vooral door het aanmaakwater van de cementspecie, het nog niet verharde mengsel. De hoeveelheid water in de specie, uitgedrukt in de water-cementfactor, bepaalt het aantal en de afmetingen van deze poriën. De water-cementfactor is de massaverhouding tussen water en cement en is een van de meest cruciale parameters voor de uiteindelijke eigenschappen en kwaliteit van het beton. In het algemeen geldt dat een lagere water-cementfactor leidt tot een hogere dichtheid en hogere sterkte. Maar een te lage water-cementfactor leidt tot slechte verwerkbaarheid en een te hoge water-cementfactor tot een hoge porositeit.

In het algemeen zijn ook de sterkte en het vervormingsgedrag van het beton van belang. Het vervormingsgedrag wordt beïnvloed door de mechanische belasting, het vochtverlies en de temperatuurverandering. Door een mechanische belasting kan beton vervormen, zowel elastisch, dus tijdelijk, als plastisch, dus blijvend. Uit de druksterkte van het beton kunnen de parameters worden herleid, de elasticiteitsmodulus en de kruipcoëfficiënt, die bepalend zijn voor het vervormingsgedrag. Door uitdroging van de cementsteen krimpt beton.

*Hoge porositeit is het gevolg van een te hoge water-cementfactor van de specie tijdens de productie (foto R.G.J. Ackerstaff)*



*Het betonnen seinhuis Post T bij het station in Maastricht, naar ontwerp van architect Sybold van Ravesteyn, gebouwd in 1933 en gerestaureerd in 2003*



*Schade door roestende wapening aan een prefab lijstelement van gewassen grindbeton. Het beton is relatief gevoelig voor aantasting, doordat het poreus is en plaatselijk een geringe dekking heeft*





*Schade die het gevolg is van een onzorgvuldige uitvoering. De dekking is te gering en plaatselijk is de betonspecie niet goed gemengd en verdicht, waardoor om de wapening te weinig cementsteen en te veel grind zit. Dergelijke grindrijke plekken worden wel 'grindnesten' genoemd*



*Door vocht en dooizouten ernstig aangetaste draagconstructie van de doorlaatbrug bij Arnhem, die omstreeks 1930 is gebouwd. Er spoelt kalk uit door watervoerende scheuren en die vormt stalactieten van calciumcarbonaat*



*De dunne wanden van het Dresselhuyspaviljoen van Jan Duiker uit 1931, onderdeel van het sanatorium Zonnestraal bij Hilversum, zijn kwetsbaar gebleken. Roestende wapening heeft geleid tot sterke aantasting van het beton*

## SCHADEMECHANISMEN

De levensduur van beton kan door verschillende schademechanismen worden verkort.

Schade kan ontstaan door roestende wapening, chemische aantasting van de cementsteen, fysische en mechanische aantasting van het beton, en calamiteiten. Calamiteiten zullen hier verder buiten beschouwing blijven.

Veel schadeprocessen treden pas op als stoffen, zoals water, kooldioxide, zuurstof en zouten, het beton binnendringen. De snelheid waarmee ze binnendringen, heeft vaak direct invloed op de ontwikkeling van de schade en de levensduur van het beton. Zo is de indringsnelheid van gassen in beton sterk afhankelijk van de mate waarin het beton is verzadigd met water. Gassen bewegen zich namelijk tenminste 10.000 maal sneller door lucht dan door water. Beton wordt in het algemeen naar binnen toe vochtiger doordat het aan het oppervlak droogt. De indringing van gassen neemt daardoor geleidelijk af.

Het milieu rondom het beton, zoals de klimatologische omstandigheden, in combinatie met de eigenschappen van het beton, zoals de porositeit en de permeabiliteit, zijn heel bepalend voor het risico op schade en de snelheid waarmee die zich kan ontwikkelen.

### Roestende wapening

Het belangrijkste schademechanisme voor gewapend beton is het roesten van de wapening, in de praktijk vaak 'betonrot' genoemd. In gezond beton roest staal niet. Dat komt doordat beton basisch is met een pH-waarde hoger dan 12. In dat milieu is staal gepassiveerd: het staal wordt tegen doorgaande roestvorming beschermd door een stabiel oxidelaagje. De voor staal gunstige omgeving kan echter veranderen door carbonatatie van het beton en door een te hoge concentratie chloride in het beton. Beide kunnen leiden tot aantasting van het wapeningsstaal, maar geven wezenlijk van elkaar verschillende schadeverschijnselen en problemen.

**Schade door carbonatatie** Carbonatatieschade is goed herkenbaar aan scheuren in het betonoppervlak in combinatie met afgedrukte schollen beton, waarbij de roestende wapening bloot komt te liggen. Lichtbruine roestvlekken kunnen zichtbaar zijn, maar in het algemeen vloeien de corrosieproducten weinig uit. Meestal geldt dat op het moment dat de schade zichtbaar wordt, de vermindering van de doorsnede van de wapening nog niet van invloed is op de stabiliteit van de constructie. Op dat moment is de aantasting van het betonoppervlak een ernstiger probleem dan de aantasting van de wapening. Echter, wanneer niet wordt ingegrepen roest de wapening versneld verder en kunnen er ook constructieve problemen ontstaan. De schade aan het beton ontstaat doordat de corrosieproducten veel volumineuzer zijn dan het wapeningsstaal. Door de inwendige drukopbouw worden de trekspanningen in het beton te hoog en ontstaan er scheuren.

Carbonatatie is het proces waarin de pH-waarde van de cementsteen daalt als gevolg van een reactie van beton met kooldioxide uit de lucht. Tijdens het carbonatatieproces reageert kooldioxide met in de poriën van de cementsteen aanwezige hydroxiden. Die worden omgezet in carbonaten, waardoor de pH-waarde afneemt en de cementsteen verzuurt. Bij pH-waarden lager dan 10 wordt staal gevoelig voor roestvorming, doordat het beschermende oxidelaagje wordt afgebroken.

Carbonatatie is een natuurlijk proces, dat bijna altijd in meer of mindere mate optreedt. De snelheid waarmee het proces plaatsvindt, is sterk afhankelijk van de situatie en kan soms, bijvoorbeeld onder water, verwaarloosbaar klein zijn. Het proces begint aan het betonoppervlak en dringt geleidelijk het beton in. Het grensvlak tussen wel- en niet-gecarbonateerd beton noemt men wel het carbonatatiefront. Dit front komt geleidelijk dieper in het beton te liggen. Wanneer het beton om de wapening is gecarbonateerd, kan het gaan roesten. Of het staal ook daadwerkelijk roest, hangt af van de omstandigheden: de hoeveelheid vocht en de toegankelijkheid van het staal voor zuurstof. Als beton kan carbonateren is overigens meestal ook voldoende zuurstof aanwezig om staal te laten roesten.

Het risico op carbonatatieschade wordt bepaald door de dekking en kwaliteit van het beton. Hoe groter de dekking en hoe lager de permeabiliteit van het beton, des te langer het duurt voordat het carbonatatiefront de wapening bereikt. Daarbij zijn de klimatologische omstandigheden bepalend. Het risico dat roestende wapening tot problemen leidt, is klein bij beton dat altijd volledig is verzadigd met water en bij beton dat altijd droog is, zoals in een verwarmd binnenklimaat. Dat komt doordat in die omstandigheden het beton niet kan carbonateren omdat er geen lucht bij kan, respectievelijk de wapening niet kan roesten omdat er geen vocht aanwezig is. Het risico is het grootst bij beton dat afwisselend nat en droog is. Ook het type cement dat is gebruikt is van invloed. Zo heeft hoogovencement een lager kalkgehalte dan portlandcement en zal in het algemeen sneller carbonateren.

**Schade door chloride** Chlorideschade is herkenbaar aan donkerbruine roestvlekken op het oppervlak van het beton. De roestproducten vloeien uit via poriën of scheuren. Schade aan het beton in de vorm van scheuren en afgedrukte schollen treedt niet of veel minder op. In een verder gevorderd stadium raakt ook het beton beschadigd en kunnen roestputten in de wapening zichtbaar zijn. De schade aan de wapening vormt vaak, zeker in het beginstadium, een groter probleem dan de schade aan het beton. De schade ontstaat doordat de wapening roest door te hoge concentraties chloriden in het beton. Chloride kan ondanks de hoge pH-waarde van het omringende beton de passiveringslaag op de wapening zeer plaatselijk afbreken. Hierdoor ontstaat zogenaamde putcorrosie.

Deze corrosievorm is zeer verraderlijk en constructief gezien gevaarlijk, omdat het staal plaatselijk diep wordt aangevreten, waardoor de trekcapaciteit afneemt. De geringe hoeveelheid corrosieproducten in combinatie met de door chloride veroorzaakte mobiliteit ervan, leiden vaak tot het lokaal uitspoelen van corrosieproducten. De inwendige drukopbouw en daaruit voortvloeiende schade treedt niet of veel minder op. Doordat het waarschuwend effect veel minder is dan bij carbonatatieschade, wordt de ernst van de situatie vaak niet goed ingeschat. Chloride kan in het beton voorkomen als gevolg van indringing, waarbij de chloride afkomstig kan zijn van dooizouten, zeelucht of zeewater. Maar het kan er ook in voorkomen door verontreinigingen in de toeslagstoffen en toevoegingen in de vorm van calciumchloride om de verharding te versnellen, met name bij bouw uit de tweede helft van de twintigste eeuw. Tegenwoordig is die toevoeging van chloriden niet meer toegestaan.

Voor nieuw te storten beton schrijven de *Voorschriften betontechnologie* uit 1995 en NEN 8005 voor dat het chloridengehalte in gewapend beton maximaal 0,4 massaprocent van de hoeveelheid cement mag zijn. Deze waarde bevat een aanzienlijke veiligheidsmarge. Hogere waarden, tot 0,8 massaprocent, geven in bestaand kwalitatief goed en niet-gecarbonateerd beton, met voldoende dekking, niet direct schade. Het kritische chloridengehalte in beton is afhankelijk van de pH-waarde; hoe lager de pH-waarde, des te lager het kritische chloridengehalte.

**Schade door een combinatie van carbonatatie en chloride** Chloride die in beton aanwezig is, is voor een belangrijk deel gebonden aan de cementsteen. Bij carbonatatie van het beton komt gebonden chloride vrij, zodat de concentratie aan vrije chloride, die zorgt voor aantasting van de wapening, toeneemt.

De combinatie van carbonatatie en chloride is gevaarlijk, omdat chloridengehalten die in eerste instantie geen corrosie tot gevolg hebben, in tweede instantie door carbonatatie wel tot aantasting kunnen leiden.

### **Chemische aantasting**

Schade aan beton kan ook worden veroorzaakt door chemische reacties tussen stoffen die aanwezig zijn in de cementsteen en de toeslagstoffen. Een hoge vochtigheid is daarbij een voorwaarde. De schade kenmerkt zich door de vorming van reactieproducten die poriewater absorberen en daardoor zwellen en druk uitoefenen in het beton. De aantasting leidt onder andere tot uitzetting, scheurvorming en uitspoeling van reactieproducten. De twee belangrijkste vormen van chemische aantasting zijn ettringietvorming en alkali-silicareactie. Deze kunnen



*De betondekking is eraf gedrukt door het roesten van de wapening. Typend beeld van carbonatatieschade als gevolg van onvoldoende betondekking*



*Console van een woongebouw met schadeverschijnselen die wijzen op aantasting door chloride. De chloriden zijn in dit geval ingemengd in het beton en tasten de hoofdwapening aan (foto R. Polder, TNO Bouw, Delft)*



*Schade aan een console onder een brugdek, dat is gebouwd omstreeks 1930. Het beschadigde beton is weggehakt. Carbonatatie en chloride hebben geleid tot aantasting van het beton en de wapening (foto R. Polder, TNO Bouw, Delft)*

*Een van de kazematten van de stelling Kornwerderzand, gebouwd tussen 1932 en 1936, aan de oostzijde van de Afsluitdijk. De schadekenmerken – het scheurpatroon en de witte reactieproducten – wijzen op chemische aantasting door alkali-silicareactie, al dan niet in combinatie met vorming van ettringiet*



*Dichtgezette scheuren in het middenpad van zwembad de Houtvaart in Haarlem, geopend in 1927. Baden en paden vormen een monolithisch geheel. Door het ontbreken van dilataties leiden thermische spanningen tot schade*



ook gelijktijdig optreden. De belangrijkste en vrijwel enige maatregel om schade aan bestaande bouwwerken te beperken is sterke vermindering van de vochttoetreding.

**Schade door vorming van ettringiet** Ettringietschade is herkenbaar aan microscheuren in de cementsteen en aan het verlies van samenhang. De cementsteen krijgt een wittig uiterlijk en verpulvert, waarbij er grindkorrels los komen te liggen. Ook kunnen grotere scheuren ontstaan, die het beton een gelaagd uiterlijk geven. Vanuit de scheuren ontstaan vaak kalkafzettingen aan het oppervlak.

De aantasting ontstaat door reacties van sulfaat met in de cementsteen aanwezige stoffen, zoals aluminaat en calcium, waardoor naaldvormige ettringietkristallen ontstaan. Sulfaten kunnen in de toeslagstoffen aanwezig zijn of van buitenaf indringen.

**Schade door alkali-silicareactie** Ook bij aantasting door alkali-silicareactie, vaak ASR genoemd, treedt er verlies van samenhang op. De aantasting begint aan het grensvlak van bepaalde toeslagkorrels, waardoor er gescheurde korrels zichtbaar worden. Door de expansie van het beton ontstaat een karakteristiek scheurpatroon, een craquelé, van min of meer evenwijdig lopende scheuren, die onderling zijn verbonden via dwarscheuren. Vanuit de scheuren vindt vaak uitscheiding van witachtige gel plaats.

Bij een alkali-silicareactie reageert reactief toeslagmateriaal, bestaande uit niet of slecht kristallijn silica, met in de poriën van het beton aanwezige alkaliën tot een alkali-silicagel, die zwelt door wateropname. Reactief toeslagmateriaal kan echter alleen leiden tot destructieve expansie onder de specifieke omstandigheden van een hoog vochtgehalte, een hoge alkaliteit, de aanwezigheid van portlandcement en een kritische hoeveelheid reactief toeslagmateriaal. Een alkali-silicareactie hoeft overigens niet altijd catastrofale gevolgen te hebben. Soms vindt de gelvorming sterk verspreid plaats en reageert de gel met aanwezig calcium verder tot calciumsilicaathydraten, waardoor de cementsteen verdicht en de reacties worden vertraagd.

### **Fysische en mechanische aantasting**

Scheuren in beton kunnen verschillende oorzaken hebben en zijn daarom vaak niet eenvoudig te verklaren. Zoals in veel materialen kunnen er scheuren ontstaan door thermische werking als er vervormingen worden verhinderd, bijvoorbeeld door het ontbreken van dilataties, uitzetvoegen. Zeker bij oudere betonconstructies is de kans hierop relatief groot, omdat ze vaak een monoliet geheel vormen. Problemen worden versterkt door grote dikteverschillen en een combinatie van oud en nieuw beton. De thermische uitzetting van beton is circa 0,01 millimeter per meter per graad Celsius.

Scheuren kunnen ook ontstaan door uitdrogingskrimp, kort na de bouw, en kruip. Kruip is het verschijnsel waarbij een langdurige belasting, die aanzienlijk lager kan zijn dan de maximaal toelaatbare, leidt tot een blijvende vervorming. Bij zeer zware betonconstructies, zoals bij forten en bunkers, kunnen in de eerste weken na de bouw scheuren zijn ontstaan door te snelle verharding en oververhitting. Bij de verharding van beton ontstaat namelijk warmte en als die niet voldoende kan worden afgevoerd door het materiaal worden de thermische spanningen te hoog en ontstaan er scheuren.

Ook (mechanische) overbelasting kan een oorzaak zijn, evenals ongelijkmatige zettingen en de combinatie met andere materialen, zoals stalen delen, bevestigingsmiddelen en metselwerk. De thermische uitzettingscoëfficiënt van beton is ongeveer twee keer zo groot als die van metselwerk.

Afgesprongen betonschilfers en scheuren kunnen wijzen op vorstschade en dooizoutschade. Vorst kan tot aantasting leiden wanneer beton tijdens vorstperioden volledig of bijna volledig is verzadigd met water. Water zet bij bevriezing met ongeveer 9% uit. Schade ontstaat wanneer in de poriën onvoldoende lucht aanwezig is om de expansie van het bevrorende water op te vangen. Een goede kwaliteit beton is bestand tegen vorst. Beton dat dateert uit het begin van de twintigste eeuw varieert sterk in kwaliteit. Met name wanneer een hoge water-cementfactor heeft geleid tot een hoge porositeit kan de vorstbestendigheid onvoldoende zijn. De gevoeligheid

voor vorstschade wordt enorm versterkt door de aanwezigheid van dooizouten. Het schadebeeld dat dan ontstaat, is anders dan bij zuivere vorstschade. Vorst-dooizoutschade treedt met name op in horizontale vlakken en leidt tot afschilfering en verbrijzeling van het oppervlak.

## BEOORDELEN VAN BETON

Voordat een herstel- en conserveringsadvies voor een bestaande betonconstructie kan worden opgesteld, moet een goed en volledig beeld bestaan van de kwaliteit en de huidige toestand van het beton. Het in kaart brengen van de toestand begint altijd met een visuele inspectie. In veel gevallen echter is dat niet voldoende. Voor het stellen van een goede diagnose, die zowel de schadeoorzaak omvat, als de omvang van de zichtbare en de niet-zichtbare schade, en het stellen van een prognose van de schadeontwikkeling, is meestal aanvullend technisch onderzoek vereist. De meest gebruikelijke onderzoeken vinden in situ plaats. In een aantal gevallen is aanvullend onderzoek nodig en moeten er monsters worden genomen, die vervolgens in een laboratorium worden onderzocht.

Daarnaast kan een bouwhistorisch onderzoek nodig zijn, waarin gegevens worden verzameld over het bouwproces, zoals het bestek, en eerdere onderhoudsmaatregelen. Ook een gesprek met de beheerder kan het inzicht vergroten in de voortgang van het degradatieproces.

### Inspectie en onderzoekstechnieken

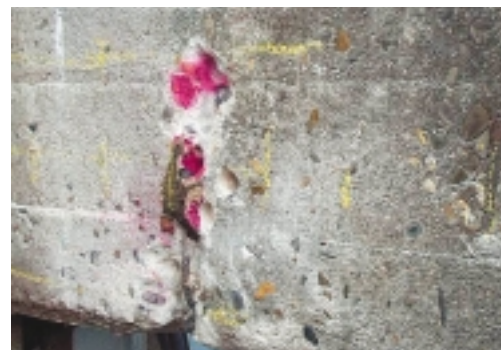
Er bestaat een groot aantal technieken waarmee de toestand van de betonconstructie gedetailleerd in beeld kan worden gebracht. Afhankelijk van de complexiteit van de problematiek en de cultuurhistorische waarden van het object, kan een spectrum van technieken worden ingezet. Welke onderzoekstechnieken we moeten inzetten, hangt af van ten eerste de zichtbare schadeverschijnselen, zoals scheuren, losse schollen, verkleuringen of uitloging van reactieproducten, ten tweede de omstandigheden waaraan het beton is blootgesteld, zoals regen, zon, dooizouten, zeewater of mechanische belastingen, ten derde de toekomstige fysische en mechanische belasting in een eventuele nieuwe functie, en ten vierde de vereiste betrouwbaarheid van de schadeprognose. Verschillende methoden om de oorzaken, de omvang en de ontwikkeling van schade vast te stellen, zijn:

- Visuele inspectie.
- Bekloppen van het betonoppervlak met een hamer. Door verschil in klank en met de hand voelbare trillingen kunnen we gebreken als delaminaties (laagvormige onthechting parallel aan het buitenoppervlak), holten, grindnesten en losse schollen opsporen.
- Aanstoten met een terugslaghamer, ook wel Schmidthamer genoemd. Deze geeft informatie over de druksterkte in de oppervlaktelaag.
- Met ultrasoonmetingen, uitgevoerd met een zogenaamde betontester, kunnen we informatie verkrijgen over de sterkte, de elasticiteit en de homogeniteit van het beton, over de diepte van scheuren en over de laagdikte.
- Met een elektromagnetische veldsterktemeter, ook wel dekkingsmeter genoemd, worden door de wapening opgewekte inductiespanningen gemeten. Deze methode geeft informatie over de ligging van de wapening en over de betondekking.
- Met indicatorvloeistof kan de carbonatatie diepte worden vastgesteld. Wanneer een fenolftaleïne-oplossing op een vers breukvlak of in een boorgat wordt aangebracht, zal niet-gecarbonateerd beton paars kleuren en gecarbonateerd beton kleurloos blijven.
- Met potentiaalmetingen, dus van de elektrische spanning, kan de corrosieactiviteit van het wapeningsstaal worden gemeten en kan wapeningscorrosie worden gelokaliseerd.
- Door het nemen van monsters en die in het laboratorium te onderzoeken, kunnen de mechanische, fysische en chemische eigenschappen van het beton worden bepaald. Relevante eigenschappen om te bepalen kunnen zijn: druksterkte, treksterkte, buigtreksterkte, hechtsterkte, permeabiliteit, porositeit en waterdoorlaatbaarheid. Ook kunnen het chloridengehalte en het sulfaatgehalte worden bepaald.



*Afschilfering van dit donker gekleurde betondek wordt veroorzaakt door inwerking van vorst, in combinatie met dooizouten (foto C. van der Steen, Technoconsult, Heeswijk)*

*Resultaten van onderzoek in situ naar de dekking en carbonatatie diepte. Wanneer een vers breukvlak wordt bespoten met fenolftaleïne-oplossing kleurt niet-gecarbonateerd beton paars en blijft gecarbonateerd beton kleurloos. De kleurscheiding geeft de diepte van het carbonatatiefront aan (foto C. van der Steen, Technoconsult, Heeswijk)*



*Een van de betonnen Art Nouveau-beelden op het Rooms Catholieke Vereenigingsgebouw te Franeker uit 1909, van architect Nicolaas Adema. Het oppervlak is verweerd en hier en daar is de wapening bloot komen te liggen (foto Adema Architecten, Dokkum)*

## INFORMATIE

Voor informatie en advies over dit onderwerp kunt u contact opnemen met de Rijksdienst voor de Monumentenzorg: M. van Hunen, 030 - 69 83 285, m.vanhunen@monumentenzorg.nl

## NUTTIGE ADRESSEN

### Civiltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR)

Postbus 420, 2800 AK Gouda  
0182 - 54 06 00, fax 0182 - 54 06 01  
cur@cur.nl  
www.cur.nl

### Betonvereniging (opgericht in 1927)

Postbus 411, 2800 AK Gouda  
0182 - 53 92 33, fax 0182 - 53 75 10  
info@betonvereniging.nl  
www.betonvereniging.nl

### Vereniging Adviseurs BetonOnderhoud en Reparatie (VABOR)

Postbus 267, 4100 AG Culemborg  
0345 - 57 01 79, fax 0345 - 58 51 71  
info@vabor.nl  
www.vabor.nl

## LITERATUUR

- Bijen J., *Beton, RVbijdrage 26*, Zeist/Den Haag 1992
- CUR, *Duurzaamheid en onderhoud van betonconstructies*, CUR-Publicatie 172, Gouda 1998
- CUR, *Inspectie en onderzoek van betonconstructies*, CUR-Aanbeveling 72, Gouda 2000
- Kuipers M.C., *Bouwen in beton, Experimenten in de volkshuisvesting voor 1940*, Zeist/Amsterdam 1987
- Oosterhoff J., Arend G.J. e.a., *Bouwtechniek in Nederland, Constructies van ijzer en beton*, Delft/Zeist 1988
- VNC, *Schoon beton*, 's-Hertogenbosch 1990

- Met petrografie, gesteentenbeschrijving, kunnen monsters worden onderzocht en verkrijgen we informatie over diverse materiaaleigenschappen van de samenstellende delen cementsteen en toeslagmateriaal, over de scheurwijdte, de scheuroriëntatie en het scheurpatroon en over de aanwezigheid van schadelijke reactieproducten, zoals ettringiet en alkali-silicagel. Wanneer chemische aantasting een rol speelt, is petrografisch onderzoek vereist.

In de meerderheid van de gevallen is het de wapening die de schade heeft veroorzaakt. Een groot deel van de schade is visueel en met behulp van bekloppen vrij eenvoudig in kaart te brengen. Echter, de vraag daarbij is altijd: op welke plaatsen is nu nog geen schade zichtbaar, maar is wel op korte termijn nieuwe schade te verwachten? Het antwoord bepaalt namelijk of naast lokaal herstel ook conserverende maatregelen nodig zijn, zoals het aanbrengen van een verlaag, een laag spuitbeton of kathodische bescherming. Zeker wanneer ook het oorspronkelijke betonoppervlak door kleur en textuur cultuurhistorisch waardevol is en dus behouden moet blijven, is het belangrijk vroegtijdig een goede inschatting te maken van de vereiste maatregelen.

Bij schade door roestende wapening is tenminste onderzoek vereist naar de carbonatatie diepte en de betondekking. Afhankelijk van de situatie – aanwezigheid van zoutbronnen, zoals zee- of doozouten, en uiterlijke verschijnselen – kan daarbij ook onderzoek nodig zijn naar het chloridgehalte en de kwaliteit van het beton.

Voor het waarborgen van de kwaliteit van inspectie en onderzoek en voor een eenduidige formulering van de onderzoeksopdracht kan gebruik worden gemaakt van CUR-Aanbeveling 72 *Inspectie en onderzoek van betonconstructies*, verkrijgbaar bij het CUR.

## RESTAURATIE EN BEHEER

De vervolgbrochure *Beton, Onderhoud en herstel* behandelt hoe de verschillende soorten schade te herstellen zijn en welke preventieve maatregelen mogelijk zijn.

## VERGUNNING EN SUBSIDIE

Inspectie, onderzoek en analyse van beton ter voorbereiding van het herstel of de conservering van een rijksmonument, zijn in beginsel subsidiabel.



*Cementrustieke brug op het landgoed van kasteel De Haar bij Utrecht*

RDMZ info Restauratie en beheer nr. 40, september 2004, meegezonden met Nieuwsbrief 5, september 2004  
Redactie Klaas Boeder, Mieke Bus, Ries van Hemert, Taco Hermans, Michiel van Hunen, Mariël Kok, Cor van Kooten en Dirk Snoodijk Tekst Michiel van Hunen met medewerking van Anthony van den Hondel Foto's Michiel van Hunen, tenzij anders vermeld  
Vormgeving B@seline, Utrecht Druk Hoonte Bosch & Keuning, Utrecht  
Voor bestelling van meerdere exemplaren: InfoDesk 030 - 69 83 456  
Aan deze uitgave kunnen geen rechten worden ontleend. ISSN 1566-7057

### RIJKSDIENST VOOR DE MONUMENTENZORG

Broederplein 41 - 3703 CD Zeist  
Postbus 1001 - 3700 BA Zeist

☎ | 030 - 69 83 211  
| 030 - 69 83 456 *InfoDesk*  
☎ | 030 - 69 16 189  
🌐 | www.monumentenzorg.nl  
| www.monumenten.nl  
@ | info@monumentenzorg.nl