Nederland – Vlaanderen

BETON BEHOUDEN – THEORIE IN DE PRAKTIJK GEZET

Leuven 2008

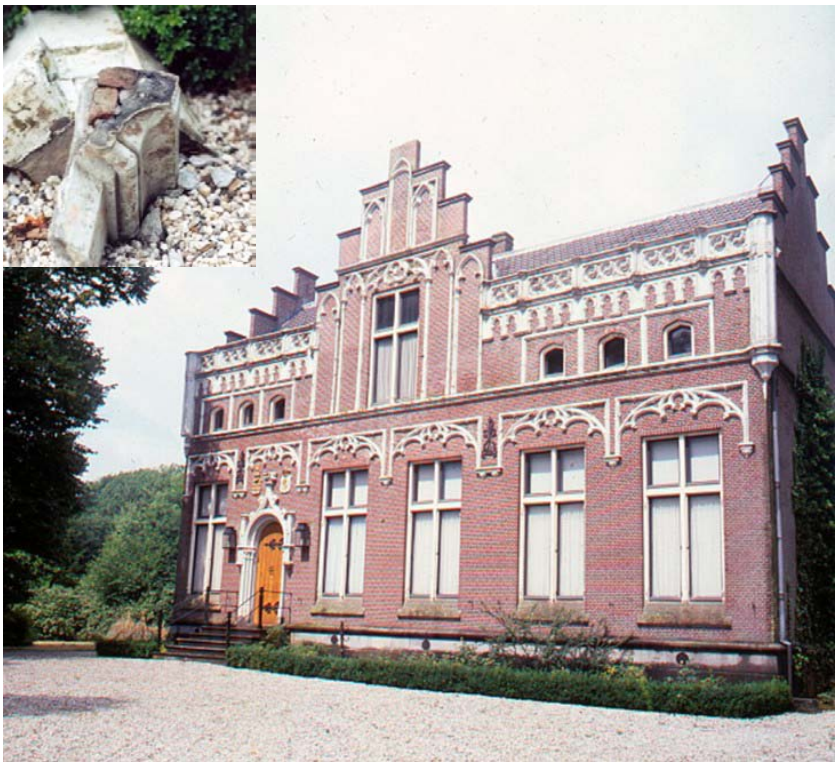
WETENSCHAPPELIJK-TECHNISCHE GROEP VOOR AANBEVELINGEN INZAKE BOUWRENOVATIE EN MONUMENTENZORG

NEDERLAND - **VLAANDEREN**

A. Bloemaerthoek 11
NL - 4907 RD OOSTERHOUT
T +31 (0) 162 471 840
F +31 (0) 162 471 841
E info@wta-nl-vl.org
ABN-AMRO Best rnr.: 42.77.26.158
KvK: H.R. Delft nr. 40398619
www.wta-nl-vl.org

K.U.Leuven p/a Mevr. Kristine Loonbeek
Kasteelpark Arenberg 40 bus 2448
B - 3001 HEVERLEE
T +32 (0) 16 - 321654
F +32 (0) 16 - 321976
E Kristine.Loonbeek@bwk.kuleuven.be
ABN-AMRO Antwerpen rnr 721-5406377-73

BETON BEHOUDEN – THEORIE IN DE PRAKTIJK GEZET



Leuven 14 november 2008

Editor:
Luc Schueremans
Koen Van Balen
Lucie Vandewalle
Hilde De Clercq
Rob van Hees
Ton Bunnik

PROGRAMMA

09.30 Ontvangst en registratie van de deelnemers

10.00 Welkom door Luc Schueremans namens bestuur WTA Nl-Vl

10.05 Welkom door Hans-Peter Leimer, dagvoorzitter

10.15 Beton, een materiaal in evolutie
Lucie Vandewalle (K.U.Leuven)

10.55 Beton, cement en protocement: Erfgoedmateriaalgeschiedenis in Nederland en Vlaanderen
Timo Nijland (TNO-Bouw) + Jan Elsen (K.U.Leuven)

11.35 Uitdaging voor de betonrestauratie: het behoud van waarden
Herdis Heinemann (TU Delft)

12.15 Gezamenlijke lunch (Museumzaal)

13.20 Monitoring en preventieve conservatie – raakpunten met betonnen monumenten
Koenraad Van Balen (K.U.Leuven, RLICC)

14.00 Huis ter Horst: 19de eeuwse neogotische geprefabriceerde sierbetonelementen
Wijnand Freling (Freling advies, adviseurs in stucwerkrestauraties)

14.40 Koffie

15.00 Kaaimuur te Zeebrugge - impact van monitoring en preventieve ingrepen op het behoud
Luc Schueremans (K.U.Leuven)

15.40 Discussie en afsluiting

16.00 Koffie + ontvangst gasten academische zitting (Museumzaal)

16.30 Academische zitting “Emeritaatviering Dionys Van Gemert” (Promotiezaal)

18.00 Receptie ter gelegenheid van het emeritaat van Dionys Van Gemert, voorzitter WTA-Nl-Vl

VOORWOORD

Deze studiedag ‘Beton behouden - theorie in de praktijk gezet’ valt samen met het emeritaat van Prof. dr. ir. D. (Dionys) Van Gemert, voorzitter van de WTA Nederland-Vlaanderen (WTA Nl-Vl). De WTA heeft zich tot doel gesteld onderzoek en de praktische toepassing ervan op het gebied van het behoud van monumenten en bestaande gebouwen, te bevorderen. Een belangrijke opgave daarbij is te komen tot kennisuitwisseling tussen de praktijk enerzijds en de wetenschap anderzijds en zo de toepassing van nieuw ontwikkelde kennis en moderne technologie te versnellen. Om deze doelstelling te verwezenlijken, streeft de WTA naar een intensieve dialoog tussen wetenschap en praktijk.
Binnen de WTA Nl-Vl wordt dit bevorderd door jaarlijks een tweetal studiedagen, afwisselend in Nederland en Vlaanderen, over een actueel onderwerp te organiseren. Deze studiedagen zijn opgebouwd vanuit enerzijds ook voor niet wetenschappers toegankelijke toelichting op onderzoek en technologische ontwikkelingen, anderzijds door aan de hand van enkele cases, de problematiek in beeld te brengen of juist praktische oplossingen te tonen. Daarbij is, naast uitwisseling van gedachten en ideeën, voldoende ruimte om de onderlinge banden te versterken en nieuwe contacten te leggen met anderen die het behoud van ons cultuur historisch erfgoed, in de vorm van gebouwen, constructies en ook sculpturen eveneens een warm hart toedragen.

De WTA Nl-Vl is sinds 1992, als regionale groep van de WTA-International (WTA-Int) actief en officieel in 1995 als vereniging opgericht.
Dionys Van Gemert, sinds 1996 lid van de WTA, is vrijwel direct nadat hij lid werd, bestuurlijk actief geworden binnen de WTA. Van 1997 tot 2001 als voorzitter van de WTA-Int, waar hij in belangrijke mate heeft bijgedragen aan de internationalisering van de soms zeer op het land van oorsprong (Duitsland) georiënteerde WTA. Vanaf 2001 is hij voorzitter van de WTA Nl-Vl en daarnaast vice-voorzitter van de WTA-Int. Als voorzitter van de WTA Nl-Vl heeft hij in belangrijke mate bijgedragen aan de professionalisering van de studiedagen. Dionys is degene die waakt over de kwaliteit van de bijdragen. Als voorzitter van het bestuur is hij een plezierige collega die op soepele wijze vergaderingen leidt en mee de richting voor de toekomst bepaalt.
Dionys gaat vandaag met emeritaat en zal als bijzonder emeritus zijn academische activiteiten aan K.U.Leuven gestalte blijven geven. Wij verheugen ons erop dat Dionys de komende jaren zich zal blijven inzetten als bestuurslid van de WTA Nl-Vl.

Namens het bestuur van de WTA Nederland-Vlaanderen,

Leuven, 14 november 2008-11-06

Ton Bunnik
Secretaris WTA Nederland/Vlaanderen

Laudatio voor Prof. dr. ir. D. Van Gemert aan de K.U.Leuven

Wanneer Prof. D. Van Gemert op 1 oktober 2008 afscheid nam van de K.U.Leuven, was hij

> Gewoon hoogleraar aan het departement Burgerlijke Bouwkunde; hoofd van de Afdeling Bouwmaterialen en Bouwtechnieken en hoofd van de Divisie Bouwkunde van "Leuven Research and Development".

Zijn loopbaan aan de Universiteit begon in 1971 nadat hij afstudeerde als Burgerlijk Bouwkundig ingenieur.
Van 1971 tot 1976 was hij verbonden aan het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek terwijl hij zijn onderzoek verrichtte aan de K.U.Leuven. Hij vervolgde zijn loopbaan binnen het departement als eerstaanwezend assistent, als lektor en van 1978 af, in het kader van het zelfstandig academisch personeel. Gedurende een korte tijd was hij ook verbonden aan de Hogeschool voor Wetenschap en Kunst, De Nayer Instituut
Als academicus bouwde hij zijn loopbaan uit op de drie domeinen: onderwijs, onderzoek en (maatschappelijke) dienstverlening. Dat laatste in zeer belangrijk mate ook via de divisie bouwkunde van Leuven Research and Development waar industrie, overheid, het gerecht en soms ook particulieren terecht konden voor wetenschappelijk gefundeerd advies. Deze activiteiten genereerden tevens middelen die konden ingezet worden ter ondersteuning van het onderzoek maar genereerden ook de vele casestudies die als illustraties werden aangewend in het onderwijs. De vele studenten die hij onderwees zullen hem wellicht dankbaar zijn voor de manier hoe hij theorie en praktijk wist te verbinden in zijn lessen.

Zijn onderwijs spitste zich toe op Numerische methoden in bouwmechanica, sterkteleer en bouwmechanica, bouwmaterialen, structurele restauratie- en renovatietechnieken en het ontwerpen in staal en hout

De omvang en de reikwijdte van zijn onderzoek worden wellicht onderschat indien we het samenvatten met de omschrijving die hij er zelf aan geeft: Ontwikkeling van nieuwe bouwmaterialen op basis van cement-polymeer composieten, Ontwikkeling van restauratie- en versterkingstechnieken voor structuren in beton, metselwerk, hout en het Niet-destructief onderzoek
In samenwerking met de vele medewerkers, die kwamen en waarvan de meeste ook gingen, werd een uitgebreide bibliotheek bijeengeschreven van meer dan 750 publicaties in internationale en nationale tijdschriften, conferenties, workshops.

Dienstverlening aan de samenleving: We hadden het al over de dienstverlening die via de divisie Bouwkunde van Leuven Research and Development verliep. Dat leverde de afdeling slagkracht in de vorm van middelen en uitrusting, maar ook een hele resem uitdagende problemen die om creatieve en wetenschappelijk onderbouwde oplossingen vragen.
Zo zag ook het ingenieurs- en studiebureau Triconsult NV het licht begin jaren '90, ontstaan als spin-off bedrijf van K.U.Leuven Research and Development. In het begin opgestart met een halftijdse medewerker, momenteel een volwaardig uitgebouwd zelfstandig studiebureel met 3 voltijdse medewerkers, ondermeer gespecialiseerd in de renovatie en restauratiesector.
Al gaat een deel van de dienstverlening langs de meer commerciële vorm daarvan, er bleef steeds plaats voor de belangeloze inzet voor organisaties zoals voordrachten voor de "Stuurgroep Restauratie Maagdentoren Zichem" en "Red de Maagdentoren vzw" bij wijze van voorbeeld. Vele nationale en internationale organisaties konden op zijn bijdrage rekenen, hij werd er ofwel werkend lid van, soms secretaris, ondervoorzitter of voorzitter.
Zo was hij lang secretaris van de Belgian Association for Testing of Materials; lid of secretaris van verschillende commissies van RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages) betreffende cementpolymeren, omgevingsvriendelijke materialen en hersteltechnieken.

Hij is lid van ICPIC (International Congress on Polymers in Concrete) en sinds 1997 erg betrokken bij de activiteiten van de WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalphlege) als voorzitter en vervolgens als vice-voorzitter en daarna als voorzitter van WTA-Nederland/Vlaanderen.

Samengevat kunnen we zeggen dat Dionys Van Gemert in onderwijs, onderzoek en dienstverlening bijgedragen heeft aan de actuele thema's van de bouw in zijn technische en maatschappelijke dimensies. Als afdelingsverantwoordelijke en verantwoordelijke van de divisie bouwkunde is hij erin geslaagd ook veel jonge mensen een kans te geven in het onderwijs en in het onderzoek te stappen. Hij heeft ertoe bijgedragen dat het onderzoek binnen de afdeling en in de divisie evolueerde van een empirische en routinematige activiteit naar een meer wetenschappelijk onderbouwd onderzoek, daarbij ondersteuning zoekend bij nationale en internationale netwerken en samenwerkingsverbanden. Zo nam zijn belangstelling en die van de afdeling toe voor moderne thema's zoals duurzaamheid en conservatie.

INHOUDSOPGAVE

Dagvoorzitter: Hans-Peter Leimer

Lucie Vandewalle	Beton, een materiaal in evolutie
Timo Nijland+ Jan Elsen	Beton, cement en protocement: Erfgoedmateriaalgeschiedenis in Nederland en Vlaanderen
Herdis Heinemann	Uitdaging voor de betonrestauratie: het behoud van waarden
Koenraad Van Balen	Monitoring en preventieve conservatie – raakpunten met betonnen monumenten
Wijnand Freling	Huis ter Horst: 19de eeuwse neogotische geprefabriceerde sierbetonelementen
Luc Schueremans	Kaaimuur te Zeebrugge - impact van monitoring en preventieve ingrepen op het behoud

BETON, EEN MATERIAAL IN EVOLUTIE

Lucie Vandewalle
K.U.Leuven, Departement Burgerlijke Bouwkunde

1. Inleiding

Wat is beton eigenlijk? De “Van Dale Online” geeft de volgende definitie “mengsel van cement, zand, water met kiezel enz. : zeer harde en duurzame bouwstof”.
Velen denken dat beton een materiaal van onze tijd is en dat het in de negentiende eeuw is ontdekt. Het is echter veel ouder en werd toen juist hérontdekt. Het bindmiddel dat sinds de twintigste eeuw gebruikt wordt, is cement. Kalk, één van de belangrijkste grondstoffen voor cement, heeft als bindmiddel een veel langere historie en mag daarom als belangrijke voorloper van het huidige cement gezien worden.
Om de ontwikkelingen, die het bouwmateriaal beton in de loop der eeuwen heeft doorgemaakt, te bespreken, wordt er onderscheid gemaakt tussen 3 tijdsperioden:

- vóór de 19de eeuw
- 19de eeuw
- Na de 19de eeuw.

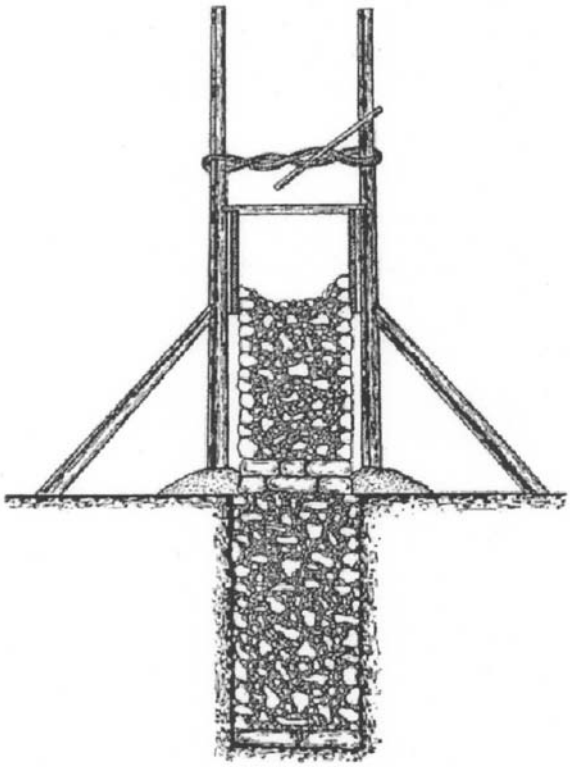
Vóór de 19de eeuw

De eerste sporen van kalk als bindmiddel dateren uit circa 7000 jaar vóór Christus, dus nog voor de eerste piramides werden gebouwd. In Yiftah El (Noord-Israël nabij de grens met Libanon) is een vloerconstructie gevonden met een laagsgewijze opbouw, waarbij een drukvaste kalkmortel is toegepast. Toch was de toepassing van kalk in mortel in die tijd nog lang geen gemeengoed.
Rond 3000 vóór Christus begon de mensheid zijn activiteiten op schrift te stellen. In de daaropvolgende eeuwen, ook wel bekend als bronstijd, maakte het Midden-Oosten een stormachtige ontwikkeling mee op het gebied van cultuur, kunst, wetenschap en techniek.
Kalk kan pas als bindmiddel gebruikt worden nadat het eerst tot een hoge temperatuur verhit wordt (= branden).
De oude Egyptenaren maakten bij de bouw van de piramides gebruik van mortels op basis van gips. Het principe bij deze mortels is identiek als bij kalkmortels maar het materiaal kan bij veel lagere temperaturen gebrand worden.
De techniek van het branden van kalk is vermoedelijk ontdekt door de Phoeniciërs. In Libanon, het woongebied van de Phoeniciërs, was kalksteen ruim voorhanden. Voor het branden van de kalksteen is veel brandstof nodig. Ook dit was onder de vorm van cederhout in ruime mate aanwezig. De Phoeniciërs staan tevens bekend als metselaars en ambachtslieden. Zij worden in het Oude Testament zelfs genoemd als de ambachtslieden die in opdracht van Koning David, en later koning Salomo, betrokken zijn bij de bouw van Jeruzalem.
Van 1000 jaar vóór Christus dateren de gemetselde onderaardse waterputten waarbij gebruik gemaakt werd van watervaste kalkmortels vermengd met gemalen baksteen.
Waarschijnlijk zijn het ook de Phoeniciërs die hebben ontdekt dat een mengsel van kalk met vulkanische as (puzzolaanaarde) reeds een zeer bruikbare, goed verhardende en waterdichte mortel oplevert.
Vlak voor het begin van onze jaartelling zijn het de Grieken die de techniek van het branden van kalk hebben overgenomen en verder toegepast.
De Romeinse bouwmeesters hebben vervolgens een revolutionaire bijdrage geleverd aan de geschiedenis van de bouwkunst. Zij slaagden erin oude technieken te verbeteren en aan te wenden voor grote en functionele constructies.

Het “opus caementicium” was een bouwwijze waarbij muren gemaakt werden door steenslag en mortel in lagen over elkaar aan te brengen tussen een houten of een gemetselde bekisting en vervolgens aan te stampen (zie figuur 1). Voor de mortel gebruikte men reeds verschillende samenstellingen:

- 1 deel kalk op 3 delen zand
- 1 deel kalk en 1 deel puzzolaanaarde op 3 delen (grof) rivierzand
- 1 deel kalk op 3 delen grof rivierzand en 1 deel gezeefd steenmeel. (afkomstig van misbaksels uit de pannenbakkerijen).

Mortel en steenslag werden daarbij gebruikt als vulmiddel voor dikke muren. Deze techniek werd ook wel gietwerk genoemd en is in zekere mate een voorloper van onze moderne betontechnieken. Na verharding ontstond een zware, massieve muur die de grote zijwaartse druk van bogen of gewelven kon opvangen.
Een tweede verbetering betrof de constructie van bogen waarmee grote overspanningen konden gemaakt worden. Denken we maar aan gewelven, bruggen, .. Die overspanningen waren ook nodig bij de bouw van aquaducten die de watervoorziening naar de steden moesten garanderen.



Figuur 1: Vervaardiging van Romeins beton (opus caementicium) tussen houten bekistingen [2]

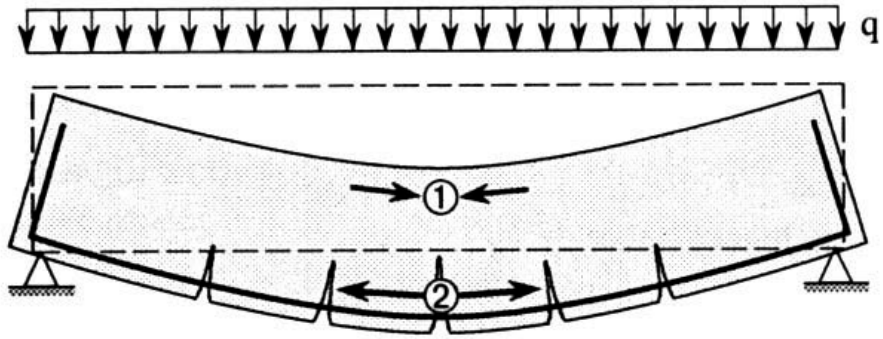
Veel bouwwerken of delen daarvan uit de Romeinse tijd zijn bewaard gebleven. Denk hierbij aan het Pantheon, het Forum Romanum, het Colosseum en de vele aquaducten. De Pont du Gard, het beroemde aquaduct bij Nîmes in Frankrijk, is vandaag een toeristische trekpleister. De reden dat sommige van deze bouwwerken nog bestaan, wordt gezocht in de eigenschappen van de destijds gebruikte mortel. Zo hebben kalkmortels een relatief hoge elasticiteit en vervormingscapaciteit. Verder wordt het Romeins beton zelfherstellende eigenschappen toegeschreven. Als er scheuren in het bouwwerk ontstaan, kan hierin kalk worden afgezet dat niet gereageerd heeft. Daar reageert het met CO_2 uit de lucht en verhardt het tot kalksteen dat de scheur dicht.

Uit de Romeinse tijd zijn niet alleen fysieke voorbeelden bewaard gebleven, ook over de toegepaste bouwtechnieken staat veel op schrift. Dit is te danken aan de Romeinse bouwmeester Vitruvius die, als architect in dienst van het leger van Julius Ceasar, belast was met de bouw van verdedigingswerken. Vitruvius was - voor zover wij weten - de eerste die een compleet handboek schreef over architectuur. Daarin beschreef hij naast veel bouwkundige aspecten ook de toegepaste bouwmaterialen. Ook de kwaliteit van de materialen werd niet uit het oog verloren. Het handboek van Vitruvius zou het enige bewaard gebleven boek op dit gebied zijn.
Na de ondergang van het West-Romeinse Rijk vertoont de bouwnijverheid een inzinking en verdween beton als constructiemateriaal. Het verscheen slechts terug aan het begin van de 19de eeuw.
In de tweede helft van de 18de eeuw komt meer fundamenteel onderzoek op gang naar het hoe en waarom van bindmiddelen voor steen en steenachtige materialen. Door de gebrekkige communicatiemogelijkheden in deze tijd begonnen verscheidene onderzoekers onafhankelijk van elkaar inzicht te krijgen in de invloed van verontreinigingen, zoals zand (SiO_2) en klei (voornamelijk Al_2O_3) die in de grondstoffen van de kalkbranderijen aanwezig waren, op de verhardingseigenschappen van de gebrande kalk. Dit inzicht vormde de basis van de uiteindelijke industriële ontwikkeling van portlandcement. Deze ontdekking werd bekend gemaakt door Smeaton in 1756, maar werd minstens 6 maal herontdekt.
Het is nu algemeen geweten dat door de aanwezigheid van aluminium, silicium- en ijzeroxide tijdens het branden van kalk zogenoemde hydraulische verbindingen ontstaan, waardoor de sterkte van de kalkmortel aanzienlijk toeneemt. “Hydraulische verbindingen” zijn stoffen die met water kunnen reageren tot een niet meer in water oplosbare substantie en zo een verhard eindproduct vormt. De reactie van de hydraulische verbindingen met water noemen we “hydratatie” en de ontstane producten “hydratatieproducten”.
Naast materialen met hydraulische eigenschappen kende men reeds lang stoffen van vulkanische oorsprong zoals tras, die als bindmiddel konden gebruikt worden. In aanwezigheid van gebrande kalk laten deze een zekere verharding zien. Ze werden daarom gebruikt als bindmiddel in mortel, en zelfs in de vroegste vormen van beton in die landen waar het materiaal voorkwam. Deze vorm van verharden is nu gekend onder de naam “puzzolane verharding”.

19de eeuw

Vanuit de cementhistorie is de ware uitvinder van het portlandcement moeilijk aan te wijzen maar de Duitser Prof.dr. J.F. John (1782-1847), hoogleraar in de chemie te Berlijn en de Fransman L.J. Vicat (1786-1861) ingenieur du Corps Royal des Ponts et Chaussées hebben er zonder twijfel een belangrijke bijdrage aan geleverd. Zij verrichtten ongeveer gelijktijdig, maar onafhankelijk van elkaar, onderzoek naar het kunstmatig samenstellen van cement uit een mengsel van klei en fijngemalen kalk dat daarna gebrand werd.
Voortbordurend op de bestaande kennis was het Joseph Aspdin uit Leeds die er in 1824 in slaagde een zeer goed hydraulisch bindmiddel te maken, dat hij de naam portlandcement gaf. Hij nam een octrooi op zijn uitvinding, die berust op de verhouding tussen siliciumdioxide, aluminiumoxide en kalk en de verhitting van dat mengsel bij hoge temperatuur. De evenwaardigheid, zowel in sterkte als in duurzaamheid van Aspdin’s product met de natuursteen uit de groeven op het schiereiland Portland leidde tot de naam Portlandcement.
Maar ook Aspdin is slechts één uit de reeks van tijdgenoten, die allen een aandeel hadden in de ontwikkeling van de kennis die de grondslag vormt voor de hedendaagse cementchemie en cementfabricage.
In de periode tussen 1825 en 1880 ontstaan de eerste fabrieken voor Portlandcement in Engeland en op het continent. In België dateert de eerste fabriek uit 1872, in Nederland uit 1870.

Hoewel er in de 19de eeuw een ruim, veelzijdig en steeds toenemend gebruik van beton kan waargenomen worden, blijft de toepassing van het materiaal beperkt tot constructiedelen waarop enkel drukkrachten werken en dit omwille van de geringe treksterkte van beton.
Beton is bijgevolg niet geschikt voor balken en platen, die, rustend op kolommen, wanden of muren, alleen verticale reacties overbrengen op de ondersteunende elementen. Zij veroorzaken geen horizontale spatkrachten zoals dit bij bogen het geval is. Die balken en platen werken op buiging, dat wil zeggen dat het materiaal in het bovenste deel gedrukt wordt en het onderste deel getrokken (zie figuur 2).



1. gedrukte zone
2. getrokken zone

Figuur 2: Gewapend beton.

Staal kan evengoed trek als druk opnemen. Beton daarentegen kan trek niet opnemen, maar dat kan wel opgelost worden door staal, dat in de latere getrokken zone geplaatst wordt, vooraleer het beton gestort wordt.
Joseph Lambot in 1854 en Joseph Monier in 1867 verkregen octrooien voor het gemengd gebruik van ijzer en beton. Maar het was de Amerikaan Thaddeus Hyatt, die in 1877 als één van de conclusies van zijn experimenten publiceerde dat ijzer geschikt is om de trekspanningen op te nemen in een betonconstructie, op voorwaarde dat het op de juiste plaats wordt aangebracht. Hij duidde zo de weg aan voor de berekeningsmethoden van “gewapend beton”, een materiaal dat een ongekend snelle evolutie heeft doorgemaakt tot circa 1900 en waaraan namen zijn verbonden zoals Koenen, Hennebique, Coignet, Waysz, Bauschinger en Considère (zie tabel 1).
De zeer goede samenwerking tussen beton en staal (wapening) in gewapend beton is te danken aan :

- staal heeft een goede aanhechting aan beton;
- de thermische uitzettingscoëfficiënt van beide materialen is practisch dezelfde;
- staal omhuld door beton bevindt zich in een alkalisch milieu, en dat is een uitstekende bescherming tegen roestvorming.

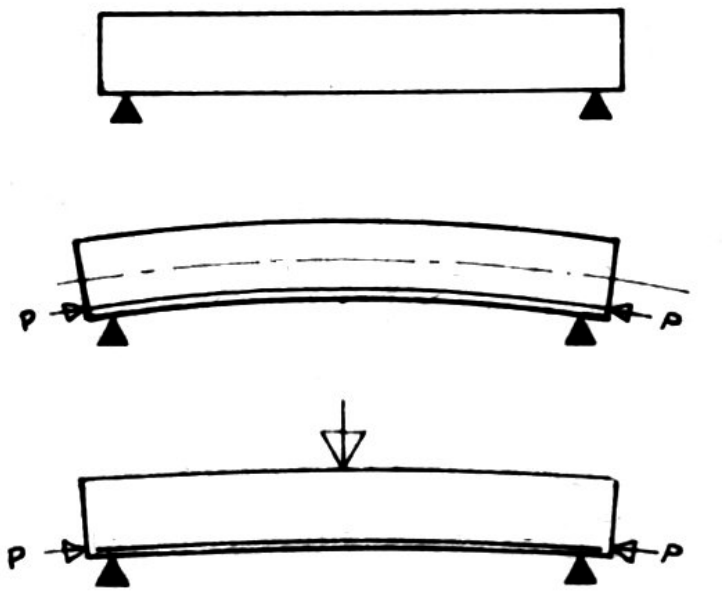
1854	Op de Wereldtentoonstelling te Parijs een bootje van met beton omkleed ijzer, vervaardigd door Joseph Lambot
1855	Patent Lambot op de vereniging van beton en ijzer
1867	Pattent Joseph Monier op het maken van bloembakken van beton, versterkt met ijzer
1867	François Coignet brengt op de Wereldtentoonstelling te Parijs constructies van met ijzer versterkt beton
1878	Pattent Thaddeus Hyatt in Amerika voor de wapening van beton met ijzer
1877-1881	Nieuwe patenten Monier (balken, brugliggers, vloeren, enz.)
1884 en volgende jaren	De patenten van Monier overgenomen in Oostenrijk en Duitsland en door Gustav Adolph Waysz en Johann Bauschinger verder ontwikkeld
1886	Matthias Koenen geeft de eerste grondslagen voor de statische berekening
1892	Patent Hennebique voor monolithische vloeren en balken met beugels
1894-1906	Verspreiding van het systeem Hennebique over de gehele wereld
1900	Uitvinding van omwikkeld beton door Louis Considère

Tabel 1: Gewapend beton – Historisch overzicht [3]

Na de 19de eeuw

Gewapend betonelementen op buiging belast, zoals balken en platen, vertonen echter een fundamenteel nadeel : de getrokken betonzone zal scheuren vooraleer de wapening zijn functie vervult om de trek op te nemen. De scheuropeningen kunnen binnen aanvaardbare grenzen gehouden worden door de juiste plaatsing en verdeling van de wapening en door de beperking van de trekspanning in de wapening. Maar scheurtjes, zelfs met kleine opening, kunnen nadelig zijn voor het uitzicht en de duurzaamheid van de constructie. Dit probleem kan echter verholpen worden door “voorspanning” toe te passen: door het beton vooraf samen te drukken en er aldus drukspanningen in op te wekken, zullen onder normale belasting (eigengewicht + nuttige lasten) in geen enkel punt van de doorsnede trekspanningen optreden. Aldus wordt scheurvorming vermeden. De samendrukking van het beton wordt verwezenlijkt door wapeningsstaal onder trek te brengen en op de één of andere manier te verankeren in het beton (figuur 3).
Hoe eenvoudig het principe van spanbeton ook is, toch is er heel wat onderzoekswerk nodig geweest om tot praktische resultaten te komen en dit zowel op het gebied van kennis en verbetering van de materialen, als op het gebied van berekeningsmethoden en praktische toepassingen.
De eerste ernstige proeven werden in Duitsland uitgevoerd door Dohring. Hij kwam echter tot geen praktische resultaten, hoofdzakelijk omdat de fysische eigenschappen van het beton nog niet voldoende gekend waren.
In 1907 kwam Koenen tot het besluit dat de invloed van kruip en krimp van het beton te groot was om zacht staal (kwaliteit 220) te kunnen aanwenden bij het opspannen van

elementen in spanbeton. In 1920 publiceerde Mörsch de resultaten van het onderzoek van Koenen in “Der Eisenbetonbau”.
De baanbrekers, die het spanbeton tot een volwaardig konstruktiemateriaal hebben ontwikkeld, zijn Freyssinet in Frankrijk, Magnel in België, Dischinger in Duitsland, Hoyer in Oostenrijk en Torroja in Spanje. Deze navorsers hebben in de korte periode van 1925 tot 1945 praktisch gelijktijdig het grootste aandeel gehad in de opgang van het spanbeton. Verscheidene van hen hebben een eigen ankersysteem op punt gezet dat heden nog, zij het soms in gewijzigde vorm, wordt toegepast. Door het gebruik van hoogwaardig beton en hoogwaardig staal werden de grenzen verlegd van de mogelijkheden : prefabricage, steeds grotere overspanningen …. De inzet van moderne hulpmiddelen leidde tot meesterlijke realisaties zoals bruggen, koeltorens, watertorens, ….



Figuur 3: Spanbeton.

De geschetste ontwikkeling naar grote, slanke en gedurfde betonconstructies was slechts mogelijk dankzij parallelle ontwikkelingen in de betontechnologie. Dit was mogelijk door het onderzoek in gespecialiseerde laboratoria, die in de periode 1920-1930 opgericht werden.
Rond het einde van de 19de eeuw formuleerde de Fransman Feret zijn basiswet die zegt dat de druksterkte van beton enkel afhangt van de kwaliteit van het cement en van de concentratie ervan in de ledige ruimten van het inerte skelet. Deze wet drukt het belang uit van een lage “water-cementfactor” voor een hoge betondruksterkte. Een lage water-cementfactor resulteert echter in droge en stroeve, dus moeilijk te verwerken en te verdichten betonspecie. Dit stelt geen problemen voor het vervaardigen van betonproducten zoals tegels, buizen, boordstenen, .. van eenvoudige vorm. Maar voor grotere betonmassa’s en voor meer ingewikkelde vormen komt men in een situatie die aanzet tot het gebruik van een grotere hoeveelheid aanmaakwater om de energie nodig voor het verdichten van het beton, te verminderen. Dit resulteert uiteraard in een lagere betondruksterkte terwijl bovendien de krimp toeneemt.
Aangezien de druksterkte het kwaliteitscriterium was en verwerkbaarheid een belangrijk element was bij de uitvoering, werd veel onderzoek verricht naar de optimale oplossing tussen die twee tegenpolen.
Veel inspanningen werden gericht op het zoeken naar de beste mengverhouding van de granulaten – steenslag, grind, zand – de zogenaamde “ideale zeefkromme”. We denken hierbij ondermeer aan Füller en Bolomey. Hun bedoeling was een zo compact mogelijke

stapeling te bekomen van de gebruikte granulaten. Het gevolg hiervan was een hoge druksterkte.
Sedert de tweede wereldoorlog maakte men ook gebruik van hulpstoffen in beton. Oorspronkelijk waren er enkel de luchtbelvormers, die eigenlijk de sterkte niet verhogen maar eerder een gunstige invloed hebben op de vorstbestendigheid. Nu heeft men echter tal van verschillende hulpstoffen. De meest ingeburgerde heden ten dage zijn de sterk water-reducerende middelen, beter gekend onder naam plastificeerders, respectievelijk superplastificeerders, bindingsversnellers, bindingsvertragers, kleurpigmenten, … Ook toevoegsels (vulstoffen, fillers) – dit zijn zeer fijne inerte, puzzolane of latent hydraulische stoffen – worden voor sommige toepassingen in het beton gebruikt.
Beton wordt verondersteld onverwoestbaar te zijn, namelijk hard, sterk en duurzaam dankzij tot de verbeelding sprekende projecten uit het verleden. De laatste 30 jaar kreeg dit imago echter een behoorlijke deuk. Oorzaak : “de bouw-hausse in de Golden Sixties” waarbij in een razend tempo gepoogd werd te voorzien in de behoefte aan nieuwe wegen, bruggen, woningen, …Snel en goedkoop was het devies waardoor de kwantiteit het soms won van de kwaliteit. Begin jaren tachtig werden de gevolgen hiervan zichtbaar. Beton haalde in die jaren regelmatig de pers vanwege betonrot, ontploffen van beton, zwaar beschadigde wegen na de winter, … Niet-deskundigen wekten de indruk dat het hier om een nieuw fenomeen ging en dat leidde natuurlijk tot vragen zoals: “Wat is betonrot dan precies? Hoe ontstaat het? Heeft zure regen er iets mee te maken? …
“Betonrot”, zoals het in de volksmond genoemd werd en wordt, is een term die algemeen gebruikt wordt voor schade aan beton. Meestal bedoelt men echter de schade die ontstaat tengevolge van het roesten van de wapening in de constructie. Dit is een expansieve reactie. Als gevolg hiervan wordt de betondekking afgedrukt. Nochtans was het al lang bekend dat het wapeningsstaal in beton goed beschermd wordt. Dat het dan in sommige gevallen toch verkeerd is gegaan, is te wijten aan het verwaarlozen van de “regels van de kunst”. Het voorzien van te weinig betondekking, het overmatig gebruik van chloridehoudende versnellers, het overdreven gebruik van de waterslang bij de verwerking van de betonspecie en een slechte nabehandeling kunnen gezien worden als de belangrijkste oorzaken.
Toch hadden deze fouten ook een positieve kant : ze waren een enorme stimulans voor de kennisontwikkeling op het gebied van schademechanismen in gewapend en spanbeton. Zo werd er uitvoerig onderzoek gedaan naar de rol van carbonatatie, invloed van chloriden, porositeit van het beton, alkali-silica-reactie, … De schade aan de betonconstructies was bovendien de aanleiding voor het ontstaan van een nieuw vakgebied: de betonreparatie.
Omdat een goede slogan is “voorkomen is beter (en goedkoper) dan genezen” ondergingen de betonvoorschriften eind de jaren tachtig een belangrijke wijziging. Tot dan toe hadden normen hoofdzakelijk een constructief karakter. Maar dankzij de bovengenoemde kennis werd de betontechnologie meer en meer een “wetenschap”. Bovendien werd niet langer enkel en alleen aandacht besteed aan de druksterkte. Veel aandacht begint vanaf dan ook te gaan naar de duurzaamheid van het beton. Dit is het vermogen van beton om weerstand te bieden aan chemische en fysische invloeden zoals weer en wind (=> wisselende temperatuur en vochtigheid), vorst- en dooizouten, zeewater, sulfaten, erosie, hoge temperaturen (brand), … Cruciaal daarin is het gedrag van beton ten aanzien van water, gassen en andere stoffen. Dat gedrag wordt grotendeels bepaald door de kenmerken van de poriënstructuur en de transportmechanismen die daarin voorkomen.
Dit alles heeft ertoe geleid dat in 1992 een aparte norm werd geïntroduceerd betreffende de betontechnologische aspecten, i.e. NBN B15-001 (1992) “Beton – Prestaties, productie, verwerking en conformiteitscriteria”. Deze norm werd in 2004 vervangen door de Europese norm NBN EN 206-1 : 2001 en de aanvullende norm NBN B15-001:2004. Zij dragen beiden dezelfde titel: “Beton – Deel 1: Specificaties, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit” en bevatten duidelijke eisen betreffende de bestanddelen, samenstelling, duurzaamheid, vers en verhard beton. Zij geven tevens richtlijnen om beton voor te schrijven en te leveren. Ze bevatten ook voorschriften aangaande de productiecontrole en de criteria en evaluatie van de conformiteit.

Om te vermijden dat afzonderlijke leveringen van producten steeds moeten beproefd worden op hun overeenkomstigheid met de van toepassing zijnde norm, is er in de meeste landen een mogelijkheid tot certificatie van de producten. In België is dit het Benor-merk, respectievelijk in Nederland het KOMO-merk. Producten met een kwaliteitsmerk bieden de verschillende bouwpartners alleen maar voordelen:

- de bouwheer heeft een betere kwaliteitsgarantie op het vlak van de aangewende producten;
- de ontwerper kan zijn aandacht toespitsen op de kwaliteit van de uitvoering van de bouwwerken;
- de aannemer vermijdt risico's te wijten aan de uitvoering van de bouwwerken met minderwaardige producten.

De betontechnologie ontwikkelde zich steeds verder ondermeer dankzij het beschikbaar zijn van heel wat nieuwe onderzoekstechnieken. Het onderzoek van beton gebeurde niet alleen meer op macro- en mesoschaal maar ook nu ook op micro- en zelfs soms nanoschaal. Ook computermodellen om aantastingsfenomenen te beschrijven en te voorspellen, deden hun intrede. Dit alles resulteerde niet alleen in een beter inzicht betreffende de duurzaamheid van het beton maar ook in de ontwikkeling van heel wat nieuwe betonsoorten: hogesterktebeton, lichtbeton, schuimbeton, zwaar beton, onderwaterbeton, vuurvast beton, staalvezelbeton, spuitbeton, polymeerbeton, …Elk van deze betonsoorten heeft zijn typische toepassingen.
Beton moet de jongste jaren ook voldoen aan alsmaar strengere eisen op het vlak van mechanische prestaties, duurzaamheid, verwerkbaarheid, milieu, uitzicht, recycleerbaarheid, …De betontechnologie wordt bijgevolg steeds complexer.
De jongste ontwikkelingen betreffen zelfverdichtend beton, zeer hogesterktebeton, zicht- en sierbeton, luchtzuiverend beton, lichtdoorlatend beton, kringloopbeton, … Al deze nieuwe betonsoorten vereisen niet alleen een aangepaste betonsamenstelling maak ook dikwijls een aanpassing van de fabricage- en uitvoeringsmethoden.

Besluit

Niettegenstaande beton reeds een lange weg heeft afgelegd, blijft het materiaal evolueren. De betonwereld is immers steeds op zoek naar de grens.
Het maken van goed beton blijft echter een kunst. Het is geen kwestie van zomaar wat mengen : beton is een composiet die zorgvuldig moet samengesteld worden. De keuze van materialen, hoeveelheden en productiemethoden dient zeer nauwkeurig te gebeuren want dat bepaalt uiteindelijk de eigenschappen.
Beton is en blijft één van de belangrijkste bouwmaterialen en dit dankzij verschillende eigenschappen zoals lage kostprijs, duurzaamheid, recycleerbaarheid en uitgebreide toepassingsmogelijkheden. Het biedt bijgevolg een economische en elegante oplossing voor tal van bouwproblemen en is geschikt voor alle soorten van vormen en toepassingen, gaande van de eenvoudige betonstraatstenen tot de meest ingewikkelde architectonische gevelelementen en de grootste werken van civiele techniek.
Wanneer teruggeblikt wordt op de geschiedenis van het beton en wanneer gebruik gemaakt wordt van alle ervaring die met het ontwerpen en verwerken van beton is opgedaan, zijn er geen computermodellen nodig om te voorspellen dat onze huidige en nieuw te bouwen betonconstructies met glans het einde van deze eeuw zullen meemaken.

Referentielijst

[1] B. Wentzel, Beton, *Chemische feitelijkheden*, editie 55, nr.243, maart 2008.
[2] *Betoniek* 11/20, 2000 jaar Beton, november/december 1999.
[3] Betontechnologie, Belgische Betongroepering, 2006.
[4] C. Souwerbren, Betontechnologie, Cement en Beton, 1998.
[5] F. Mortelmans, Berekening van konstrukties, deel 6: Spanbeton, Acco, 1983.
[6] K. Van Balen, B. van Bommel, R. van Hees, M. van Hunen, J; van Rhijn, Kalkboek - het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden, K.U.Leuven, Departement Burgerlijke Bouwkunde, Afdeling Bouwmaterialen en -technieken, 2005.

BETON, CEMENT EN PROTOCEMENT: ERFGOEDMATERIALEN IN NEDERLAND EN VLAANDEREN

Timo G. Nijland[1] & Jan Elsen[2]
[1] TNO Bouw en Ondergrond
[2] K.U.Leuven, Geo-Instituut

Inleiding

Beton is het materiaal bij uitstek in de Jonge Bouwkunst van de 20e eeuw, al komen ongewapende betonconstructies al in het 1e kwart van de 19e eeuw voor[1]. Beton wordt vaak gezien als een materiaal dat sterk is, geschikt voor een vernieuwend, vaak slank, architectonisch ontwerp, maar verder als grijs en monotoon. Monumentenzorgers waarderen een betonnen object vaak vanuit het perspectief van ontwerp of constructiemethode[2]. Toch is ook beton een materiaal dat bij nadere beschouwing een aanzienlijke variatie toont, die een bepaalde periode in de betontechnologie weerspiegelt of de visie van de architect. Mengselsamenstelling, gebruikte toeslagen (granulaten) en bindmiddelen kunnen zeer kenmerkend en karakteristiek zijn. Ze zijn medebepalend voor de cultuurhistorische waarde, en mede de grondslag voor het bepalen van de aard en noodzaak van een eventuele interventie, waarbij het perspectief vanuit de monumentenzorg (behoud van historisch materiaal, compatibiliteit, etc.) nadrukkelijk een andere is dan van de conventionele betonreparatiepraktijk.[3]

Beton: Toeslagen en afwerking als karakter en expressie

Bij een materiaalbeschouwing van monumentaal beton is het in eerste instantie niet het bindmiddel maar de toeslag die opvalt, bij historisch beton vaak samen met de oppervlakafwerking, die voor de Tweede Wereldoorlog zeker bij betonbouwelementen vaak op die van natuursteen geïnspireerd was.[4] Te denken valt hierbij aan het zandsteenkleurig verven van beton en het boucharderen of frijnen van het oppervlak. Het bewust in zicht brengen van de toeslag is een andere methode om oppervlak en object expressie te verlenen. In Nederland perfectioneerde de architect H.G.J. Schelling dit in een serie na-oorlogse spoorwegstations[5] gebouwd uit een in het werk gestort skelet bekleed met geprefabriceerde betonelementen. Eén daarvan, het station van Zutphen (Fig. 1), is recent genomineerd als monument van de Wederopbouw. Schelling was geïnspireerd door het werk van Honegger en in het bijzonder diens leerling Perret, verantwoordelijk voor het betonnen werelderfgoed van Le Havre. Het werk in vlakverdelingen zoals claustra ontleende Schelling aan hem, evenals zijn afkeer van voorzetmetselwerk, verf, pleisterwerk etc. Zandstralen en schuren bevielen hem wel, om de toeslag in zicht te brengen. Zo gebruikte hij voor station Enschede gebroken grès (afval van ijzeraarden buizen), rood en geel baksteenpuin en blauw dakpannengruis (Fig. 2), gebroken wit Brunssums grind met Rijngrind met korrelsamenstelling van verschillende kleur, en gestampt geel en blauw glas met gefolied spiegelglas[6]. Aan station Zutphen gebruikte hij blauwzwarte vuursteen,

[1] Zo zijn in Nederland in de Zuid-Willemsvaart al ongewapende betonfunderingen uit 1822-1826 aanwezig (Oosterhoff et al. 1998).
[2] B.v. Kuiper (2006), Van de Voorde et al. (2007).
[3] Heinemann et al. (2008).
[4] Zie b.v. een praktijkhandboek van vlak na de oorlog (ENCI-CEMIJ 1946).
[5] Enschede 1950, Hengelo 1951, Zutphen 1952, Leiden 1953 (gesloopt 1993) en Arnhem 1954 (recent deels gesloopt). In Nijland & Heinemann (2008) wordt uitgebreid ingegaan op het werk van Schelling.
[6] Schelling (1950ab).

gecombineerd met dunne banden met gebroken grès als toeslag.[7] Een interessant aspect is dat, waar al vroeg geëxperimenteerd werd met de inzet van secundaire reststoffen als toeslagmateriaal in beton, - te denken valt aan het gebruik van vuilverbrandingsslakken in Den Haag begin jaren '20[8] of sintels en slakken in Betondorp[9]-, Schelling dit duidelijk als mogelijkheid tot expressie zag.
Behalve als bewust middel tot expressie, kan de zichtbare toeslag ook een cultuurhistorische waarde aan het beton geven, omdat het de stand van de betontechnologie van een bepaalde periode weerspiegelt. Te denken valt hierbij aan het gebruik van 'gap-graded' korrelverdelingen, - het concept van een ideale korrelverdeling doet pas rond 1930 haar intrede-, of van toeslag met een maximum diameter die veel groter is dan thans gangbaar (Fig. 3).[10]

Figuur 1: Station Zutphen, in 1952 gebouwd door H.G.J. Schelling.

Figuur 2: Claustra met beton met metselwerkgranulaat als grove toeslag in de velden, en beton met alleen fijn rivierzand daartussen, station Enschede (H.G.J. Schelling, 1950).

[7] Schelling (1952).
[8] Van der Kloes (1924).
[9] Nijland & Heinemann (2008).
[10] De eerste Nederlandse Gewapend Beton Voorschriften uit 1918 lieten een D_{max} van 60 mm toe (GBV 1918).

Figuur 3: Toeslag aan de bovenzijde van de onvoltooid gebleven fundering van het Groot Museum in Nationaal Park De Hoge Veluwe (H. van de Velde, 1921 – 1922).

Cement in historisch beton: hetzelfde als nu?

Net als toeslag kan het gebruikte bindmiddel een bepaalde periode reflecteren. In tegenstelling tot de toeslag is de aard van het gebruikte bindmiddel vaak pas door een microscoop vast te stellen. Modern beton, de Romeinse *opus caementitium* buiten beschouwing gelaten, is een mengsel van toeslag, bindmiddel en water. Hoewel ook kalk-trasbeton voorkomt[11], is dat bindmiddel veelal cement. Cement is te definiëren als een bindmiddel dat geheel of gedeeltelijk uit z.g. portlandklinker bestaat. De uitvinding van die laatste door Joseph Aspdin, geoctrooieerd in Leeds in 1824, wordt veelal als het begin van het moderne beton te gezien. De werkelijkheid is gevarieerder: Gedurende de 19e eeuw wordt op grote schaal met portlandcementachtige bindmiddelen geëxperimenteerd. Dergelijke cementen zijn, vanuit het huidige perspectief, als protocement te beschouwen en worden hieronder in de volgende paragraaf behandeld.
In de 2e helft van de 19e eeuw worden de eerste systematische beproevingen van portlandcement gepubliceerd door John Grant (1866, 1871) en in 1878 volgt het eerste normvoorschrift, het Duitse[12]. Intussen was het gebruik van (uit Engeland geïmporteerd) portlandcement voor de havenwerken van Cherbourg rond 1850 het eerste grootschalige gebruik van dit nieuwe bindmiddel.[13] Bij het begin van de 20e eeuw was portlandcement een redelijk standaardproduct geworden. De samenstelling van cement bleef echter geenszins constant. Al snel werden andere basisgrondstoffen gebruikt, - b.v. voor het in 1908 door de S.A. des Chaux de Lafarge et du Teil geoctrooieerde calciumaluminaatcement (*ciment fondu*) -, en werden klinkervervangende materialen geïntroduceerd. Een deel is allang weer in onbruik geraakt, zoals het ertscement (niet te verwarren met ijzerportlandcement of hoogovencement !), een cement waarin alle Al_2O_3 door Fe_2O_3 vervangen is, of silicio-cement, een mengsel van portlandklinker en fijn kwartszand.[14] Bestendig, vanwege het gunstige effect op de technische duurzaamheid, is de vervanging van portlandklinker door gemalen hoogovenslak waar men reeds begin 20e eeuw mee experimenteerde. Het gebruik van gemalen hoogovenslak voor ijzerportland- en hoogovencement is eigenlijk *het* succesverhaal van de inzet van secundaire reststoffen in de bouw. Aanvankelijk werd het echter zeer gewantrouwd: De Nederlandse Gewapend Beton Voorschriften uit 1918

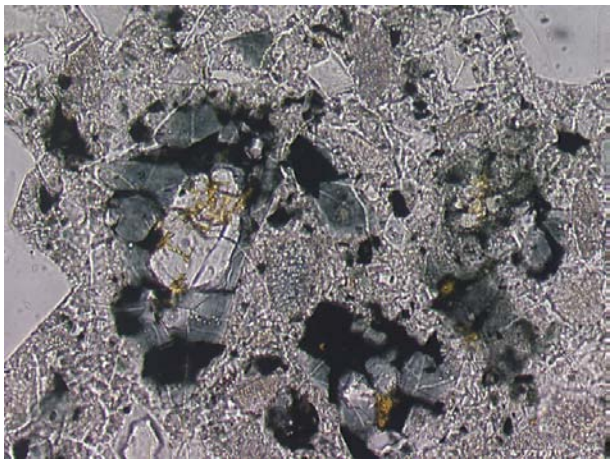
[11] B.v. voor het onderwaterbeton voor de oude IJsselbrug bij het Kateveer in Zwolle, gebouwd in 1929 (Tubag 1934).
[12] Skempton (2001).
[13] Bonin (1857).
[14] Van der Kloes (1924).

verboden het gebruik expliciet[15]. In Duitsland werd hoogovencement echter al voor 1914 gebruikt voor (militaire) maritieme constructies[16], en in 1917 werd het gelijkgesteld aan portlandcement. Waterstaatingenieurs, waaronder hoofdingenieur J.A. Ringers, trokken zich het verbod niet aan en herkenden de mogelijkheden[17]. Hoogovencement werd dan ook al snel in Nederland gebruikt, bijvoorbeeld bij de bouw van de Noordersluis te IJmuiden[18]. De samenstelling van hoogovencement was door de tijd heen overigens evenmin constant. Het slakgehalte varieerde met de tijd.[19] Echter, ook de slak zelf varieerde; waar deze nu vooral glasachtig is, zijn in de oude slak duidelijk talrijke (relatief) grof kristallijne fasen herkenbaar (Fig. 4), een weerspiegeling van de toenmalige technologie op de schaal van enkele micron. Het gebruik van verschillende bindmiddelen heeft een duidelijke invloed op de eigenschappen van het materiaal beton. Niet voor niets wordt hoogovencement in veel situaties toegepast vanwege het gunstig effect op de duurzaamheid. Ook historische bindmiddelen hadden hun specifieke effect op duurzaamheid of mechanische eigenschappen. Zo werd in Nederland ook het aloude tras als toevoeging in cementbeton gebruikt, tenminste tot in de jaren '70 van de vorige eeuw[20]. Microscopisch is dit moeilijk herkenbaar, maar de sterkteontwikkeling van tras-cementbeton wijkt duidelijk af van portland cement beton zonder tras(Fig. 5).
Hoewel macroscopisch niet direct zichtbaar, kan een specifiek bindmiddel of cement dus zowel een cultuurhistorische waarde vertegenwoordigen als technische eigenschappen bepalen waarbij interventie rekening mee gehouden moet worden. Dat geldt voor de 20e eeuw, maar ook voor de 19e, waarvan veel minder bekend is. Hieronder zal daarom een overzicht gegeven worden van de ontwikkeling van verschillende bindmiddelen.

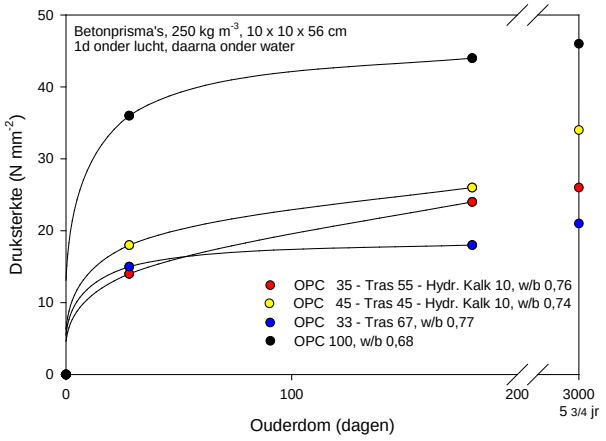
Ontwikkeling van hydraulische bindmiddelen

Dit hoofdstuk behandelt de materiaalkundige aspecten van diverse hydraulische bindmiddelen doorheen de 19e eeuw. Op het einde van de 18e eeuw werd de hydrauliciteit van kalk voor het eerst wetenschappelijk onderzocht en ongeveer tijdens dezelfde periode ontdekte Parker dat het branden (calcinatie) van septaria gevonden in kleiafzettingen op het eiland Sheppey (UK), een hydraulisch bindmiddel opleverde. Hij benoemde dit bindmiddel '*Roman Cement*' en bekwam er een patent voor in 1796. Dit was het begin van een explosieve ontwikkeling van nieuwe types van cementproducten tijdens de eerste helft van de 19e eeuw. We zullen ons verder in deze tekst enkel richten op hydraulische bindmiddelen, deze onderscheiden zich van de niet-hydraulische doordat ze de capaciteit hebben om uit te harden onder water. Initieel werden deze hydraulische bindmiddelen aangemaakt door kalk te mengen met pozzolana[21], deze praktijk werd door de Grieken geïntroduceerd, ze gebruikten hiervoor de vulkanische tuf van het eiland Thera (nu Santorini) als pozzolaan[22].

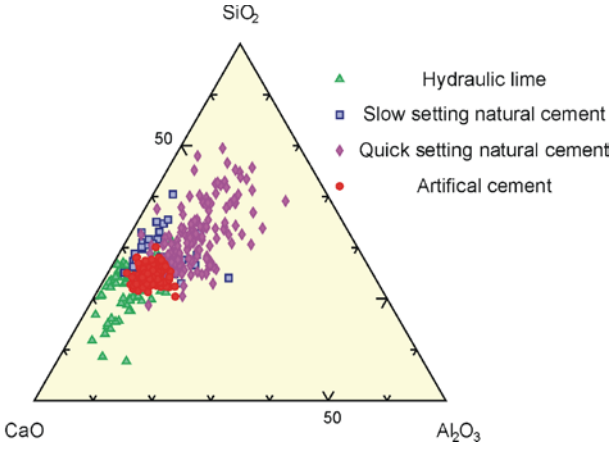
[15] GBV (1918).
[16] B.v. Passow (1913).
[17] Heerding (1971).
[18] Ringers et al. (1923-1925).
[19] Nijland & Heinemann (2008).
[20] Nijland et al. (2007).
[21] Candlot (1906).
[22] Blézard (1998).



Figuur 4: Microfoto van hoogovencementbeton uit de jaren ’20 van de Noordersluis in IJmuiden, met slak met daarin duidelijk grof kristallijne fasen (J. Ringers c.s., 1923-1925).



Figuur 5: Druksterkte-ontwikkeling van betonmengsels waarvan het bindmiddel behalve uit portlandcement ook bestaat uit een deel tras ± kalk, naar data uit Waltz (1951). OPC – portlandcement, Hydr. Kalk – hydraulische kalk, w/b – water/bindmiddelfactor.



Figuur 6: Deze figuur geeft grafisch de resultaten weer van de chemische samenstelling, wat het systeem CaO - SiO_2 - Al_2O_3 betreft, van de verschillende hydraulische bindmiddelen uit de literatuur (merk op dat slechts een gedeelte van het diagram is weergegeven waarbij elk teken 10 % voorstelt).

De Romeinen gebruikten een gelijkaardig material afkomstig van de nabijheid van de Vesuvius en later ook andere materialen ontdekt op andere plaatsen in het Romeinse rijk. Deze pozzolana werden later gedeeltelijk vervangen door gebroken en verpoederd keramisch materiaal. Hydraulische bindmiddelen kunnen echter ook vervaardigd worden door de calcinatie (branden) van onzuivere kalksteen. Als deze kalksteen gebrand wordt zonder toevoeging van andere additieven, spreken we van natuurlijke hydraulische bindmiddelen. Indien de kalksteen echter gemengd werd met andere componenten vóór de calcinatie, dan spreken we van een artificieel bindmiddel. De eerste belangrijke onderzoeksactiviteiten op hydraulische bindmiddelen werden uitgevoerd door John Smeaton en in 1756 leidde dit onderzoek tot de ontdekking dat mortels gemaakt met kalk gebrand met onzuivere kalksteen de beste resultaten opleverden. Door deze kalkstenen op te lossen in salpeterzuur (HNO_3) bekwam hij een onoplosbaar residu van kwarts en kleimateriaal aan dewelke hij de hydrauliciteit toeschreef.

Natuurlijk cement

Snelhardend natuurlijk cement

Het eerste '*Natuurlijk Cement'* ook '*Parker's cement'* genoemd, werd zoals reeds vermeld, in 1796 gepatenteerd. De benaming '*Roman Cement'* is echter wel misleidend en werd gebruikt om de zogenaamde herontdekking van de antieke Romeinse geheimen van kalkproductie te claimen[23]. De septaria werden gecalcineerd met *'a heat nearly sufficient to vitrify them'* en *'then reduced to powder by any mechanical means*'.
In 1802, vrij snel na deze ontdekking werden ook septaria gevonden nabij het Franse Boulogne-sur-mer[23]. Deze werden gebruikt voor de productie van '*Plâtre-ciment'* ook '*Ciment de Boulogne-sur-mer'* genoemd of '*Ciment romain nouveau de Boulogne'*. Op andere plaatsen in Frankrijk werden analoge hydraulische bindmiddelen geproduceerd zoals '*Ciment de Pouilly'* (Pouilly-en-Auxois) vanaf 1827 en '*Ciment de Vassy*' (Vassy-les-Avallon) in de Bourgogne streek vanaf 1835. Kort nadien werden andere productiesites opgericht zoals in de regio rond Grenoble waar een natuurlijk cement werd geproduceerd gebruik makende van een zeer homogene geologische formatie bestaande uit een kleiïge kalksteen '*Filon de Porte de France'* genoemd. Deze was ontdekt in 1842 en werd vanaf 1846 gebruikt om '*Ciment Prompt Naturel (CPN)*' of simpelweg '*Ciment Prompt*' te produceren. Dit is een natuurlijk cement waarbij '*Prompt*' refereert naar het snelhardend karakter van het bindmiddel, namelijk 5-10 minuten. Eén van de enige Europese natuurlijke cementen wordt hier nog steeds geproduceerd als '*Ciment Prompt Naturel'* door de maatschappij '*Vicat*'. In België werden snelhardende natuurlijke cementen geproduceerd in de streek van Doornik, verkocht als '*Ciment Romain'* of '*Ciment Pouzzolaniques'*[24] en in de streek van Niel aan de Rupel-Schelde bij Antwerpen, verkocht als *'Ciment d'Anvers'* en '*Ciment Romain'*[25].

Traaghardend natuurlijk cement

Net zoals snelhardend natuurlijk cement wordt dit traag- of halftraag uithardend bindmiddel vervaardigd door de calcinatie van een natuurlijk voorkomende klei- en silicarijke kalksteen die achteraf tot een fijn poeder vermalen wordt. Het verschil is dat deze laatste op een hogere temperatuur gebrand wordt. De traaghardende natuurlijke cementen worden uit het volledig gesinterd materiaal vervaardigd, terwijl de snelhardende natuurlijke cementen resulteren uit het vermalen van niet-gesinterd maar wel volledig gecalcineerd materiaal.

[23] Royer (2004).
[24] Henrotte (1899).
[25] Van den Broeck (1887).

Meermaals werden de overgebrande, verglaasde lumps, '*grappiers*' genoemd, met de hand verwijderd om een apart traaghardend cement te maken, ook '*grappier*' cement genoemd. Deze overgebrande lumps kunnen echter ook voorkomen in ovens die voor de productie van hydraulische kalk gebruikt worden. Dit cementtype werd in het Franse Teil ontdekt in 1869 [26]. Dit betekent dat men met eenzelfde gesteente of mengeling van gesteenten zowel een snel, traag of halftraag hardend cement kan produceren. Een traaghardend cement kan namelijk ook vervaardigd worden door simpelweg een kalksteen met een welbepaalde chemische samenstelling op een hogere temperatuur te branden. Mineralogisch verschillen deze bindmiddelen doordat ze minder C_2S en meer C_3S bevatten en hun samenstelling leunt daardoor dichter aan bij de artificiële Portland cementen. Het was Saylor in 1871 in de US die voor het eerst een patent nam op een traaghardend natuurlijk cement. De productie was initieel niet echt een succes, vermoedelijk omdat het gesteente dat voor de productie gebruikt werd niet homogeen was qua samenstelling[27]. Algemeen genomen waren er veel minder bedrijven die dit cementtype produceerden vergeleken met de snelhardende natuurlijke cementen. In Frankrijk verkochten enkele bedrijven in de streek van Grenoble dit product als '*ciment Portland naturel'*. Ook een aantal Oostenrijkse en Russische bedrijven produceerden dit cementtype, in België was de productie in de buurt van Doornik geconcentreerd, waarbij een belangrijk volume naar de US werd geëxporteerd[21].

Hydraulische kalk

Hydraulische kalk bevat net voldoende vrije kalk om met een bepaalde hoeveelheid water geblust te worden zodat de gehele massa tot een poeder omgezet wordt. De combinatie van vrije kalk met water induceert namelijk een volume-expansie die leidt tot een desintegratie van de vers gebrande kalksteen. Het was Vicat die voor het eerst het proces van het branden van een artificiële mengeling van de juiste verhouding van klei en kalk beschreef[28]. De productie van hydraulische kalk werd algemeen ingezet op het eind van de 18^{e} eeuw, in Doornik (België) wordt bijvoorbeeld hydraulische kalk geproduceerd tenminste sinds 1815 en deze werd tijdens de 19^{e} eeuw in grote hoeveelheden geëxporteerd naar de US. Het voordeel van een lagere kostprijs ten opzichte van Portland cement woog echter niet op tegen een tragere uitharding en een lagere sterkte zodat de productiehoeveelheden steeds verminderden. Deze hydraulische kalken zijn traaghardend vergeleken met de natuurlijke en artificiële cementen, 1 à 2 dagen voor '*eminently hydraulic limes'* tot één maand ongeveer voor *'feebly hydraulic limes'.*

Artificieel cement

De volgende stap in de evolutie van de hydraulische bindmiddelen in de 19^{e} eeuw was het vermalen van een gecalcineerd mengsel van kalksteen en klei, wat door het patent van Joseph Aspdin in 1824 beschreven wordt. Hij benoemde dit product '*Portland Cement'*. De productie bestond uit een '*double kilning'* en werd door Vicat als eerste beschreven, waarbij de tot kalk gecalcineerde kalksteen met klei vermengd wordt en een tweede maal gebrand wordt. Vermits een lagere temperatuur gebruikt wordt dan bij de productie van het huidige Portland cement komt dit product eerder overeen met een snelhardend natuurlijk cement dan met een modern Portland cement, we noemen dit cement dan ook een proto-Portland cement. De artificiële cement industrie werd eerst ontwikkeld in het Verenigd Koninkrijk, in 1850 waren er echter nog maar 4 productie-eenheden in werking omwille van het succes van het '*Roman cement'*. In Frankrijk werd dit artificiële cement voor het eerst geproduceerd

[26] Boero (1925).
[27] Klemm (2004).
[28] Vicat (1818).

nabij Boulogne-sur-mer rond 1850, in Duitsland startte de productie omstreeks dezelfde tijd, in Rusland in 1857 en in de US in 1873.

Besluit

Uit het hierboven gepresenteerde overzicht blijkt duidelijk dat historisch beton op het eerste gezicht weliswaar een materiaal is vergelijkbaar met het hedendaagse, maar bij nadere beschouwing toch talrijke meer of minder subtiele verschillen toont die de ontwikkeling van de betontechnologie laten zien of gevolg zijn van de wens tot expressie van een architect. Dat geldt voor zowel toeslagen, bindmiddelen als afwerking. Ook de bindmiddelen tonen duidelijk ontwikkeling. Niet alleen het architectonische, maar ook het materiaalkundige aspect maakt van beton een specifiek erfgoedmateriaal in zowel Nederland als Vlaanderen. De her- en erkenning van de verschillen is wezenlijk voor de restauratie-aanpak van betonnen erfgoed, zowel qua historische aspecten als fysisch – mechanische eigenschappen.

Literatuur

Blezard, R.G., 1998. The history of calcareous cements. In: Hewlett, P.C., red., Lea's chemistry of cement and concrete. 4e druk, Heinemann, Butterworth, 1-23.

Boero, J., 1925. Fabrication et emploi des chaux hydrauliques et ciments. Le matériel des cimenteries. 2e druk, Ed. Ch. Béranger, Librairie polytechnique, Paris/Liège.

Bonin, J., 1857. Travaux d'Achèvement de la Digue de Cherbourg de 1830 à 1853. Paris.

Candlot, E., 1906. Ciments et chaux hydrauliques: Fabrication - Propriétés – Emploi. 3e druk, Ed. Ch. Béranger, Librairie polytechnique, Paris/Liège.

ENCI-CEMIJ, 1946. Cement en beton. Verkoopassociatie ENCI-CEMIJ, Amsterdam.

GBV 1918. Gewapend Beton Voorschriften, voorzien van toelichtingen en tekstfiguren door A.A. van der Vooren. 2e druk, L.J. Veen, Amsterdam.

Heerding, A., 1971. Cement in Nederland. CEMIJ, IJmuiden.

Heinemann, H.A., Hees, R.P.J. van & Nijland, T.G., 2008. Concrete: too young for conservation ? In: D'Ayala, D. & Fodde, E., red., Structural analysis of historic construction: Preserving safety and significance. Taylor & Francis, London, 151-159.

Henrotte, 1899. L'industrie du ciment Portland. Annales des Mines de Belgique 4 :781-814.

Klemm, W.A., 2004. Cement Manufacturing – A historical perspective. In: Batthy, J.I., Miller, F.M. & Kosmatka, S.H., red., Innovations in Portland cement manufacturing. Portland Cement Association, Skokie, IL, 1-35.

Kloes, J.A. van der, 1924. Onze bouwmaterialen. Deel III. Mortels en beton. L.J. Veen, Amsterdam.

Kuipers, M., 2006. Betonontwikkeling: de historische ontwikkeling van het gebruik van beton in de bouw. In: Hermans, T., Hunen, M. van & Ven, H. van de, red., Monumenten in beton. RACM, Zeist, 7-24.

Nijland, T.G. & Heinemann, H.A., 2008. Beton: een materiaalgeschiedenis vanuit de componenten. Praktrijkreeks Cultureel Erfgroed 4(12).

Nijland, T.G., Larbi, J.A., Rooij, M.A. de & Polder, R., 2007. Use of Rhenish trass in marine concrete: A microscopic and durability perspective. Heron 52:269-288.

Oosterhoff, J., Arends, G.J., Eldik, C.H. van & Nieuwmeijer, G.G., 1988. Bouwtechniek in Nederland. Constructies van ijzer en beton. Gebouwen 1800 – 1940, overzicht en typologie. Delft Universitaire Pers, Delft/Rijksdienst voor de Monumentenzorg, Zeist.

Passow, H., 1913. Hochofenzement, kurzer Leitfaden für die Erzeugung und Verwendung von Hochofenzement. Verlag der Tonindustrie-Zeitung, Berlijn.

Ringers, J.A., Tellegen, Josephus Jitta & Mulder, 1924-1925. De bouw van de nieuwe schutsluis c.a. te IJmuiden, 1924-1925. Archiefstuk NS.IJM.01.01 van de Afdeling Constructieve Waterbouw, Rijkswaterstaat. Geciteerd in: Rooijen, W. van, 1994.

Stand van zaken. Kolkwanden, binnenhoofd en remmingwerk. Bouwdienst Rijkswaterstaat rapport RN-NS-94-007.
Royer, A., 2004. Le ciment romain. Etude d'un matériau et son utilisation dans les restaurations de monuments historiques au XIXe siècle: les cathédrales d'amiens et de Bourges. Mémoire de muséologie à l'Ecole du Louvre.
Schelling, H.G.J., 1950a. Enschede's nieuwe station. Bouw 5(44):726-727.
Schelling, H.G.J., 1950a. Het nieuwe stationsgebouw te Enschede. Bouwkundig Weekblad 68(47):725-745.
Schelling, H.G.J., 1952. Het nieuwe stationsgebouw te Zutphen. Bouwkundig Weekblad 70(43-44):329-335.
Skempton, A.W., 2001. Portland cements, 1843- 1887. In: Newby, F., red., Early reinforced concrete. Ashgate, Aldershot, Studies in the History of Civil Engineering 11:61-95.
Tubag, 1934. Der rheinische Trass. Seine eigenschaften und Anwendung im Bauwesen. Tubag, Kruft (productfolder).
Van Den Broeck, 1887. L'argile de Boom. Causerie Géologique faite à l'occasion de l'Excursion à la fabrique de ciment de la société de Niel-on-Rupel, Imprimerie des Travaux Publics, Bruxelles.
Vicat, L.J., 1818. Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires. Goujon, Paris.
Voorde, S. van de, Meyer, R. de & Taerwe, L., 2007. Rijke erfenis van de Belgische betonarchitectuur. Het Ingenieursblad (1): 2-9.
Waltz, K., 1951. Bindemittel für Massenbeton. Untersuchungen über hydraulische Bindemittel aus Zement, Kalk und Trass. Schriftreihe der Deutsches Auschuss für Stahlbeton 104.

UITDAGING VOOR DE BETONRESTAURATIE: HET BEHOUD VAN WAARDEN

H. A. Heinemann
®MIT, Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Delft

Samenvatting

De monumentenzorg wordt steeds vaker geconfronteerd met de restauratie van betonnen monumenten. In het algemeen wordt in de gangbare betonreparatiepraktijk geen rekening gehouden met de uitgangspunten van de monumentenzorg waarbij deze waarden worden betrokken in het besluitvormingsproces. Dit heeft tot gevolg dat de waarden op het spel worden gezet. Voorbeelden van typische extra voorwaarden voor betonnen monumenten die niet benaderd konden worden via de standaard betonreparatiepraktijk laten zien dat er een specifieke restauratiebenadering van beton ontwikkeld moet worden.

Het verschil tussen betonreparatie en betonrestauratie

De wereld van de monumentenzorg ziet zich in de afgelopen jaren voor een extra taak gesteld die alleen nog maar zal groeien: de restauratie van betonnen monumenten. De meeste gebouwen uit de periode van de Wederopbouw, en enkele van de jongere Monumenten, zijn gebouwd in beton. Met de aanwijzing van deze gebouwen als monumenten zal er speciale aandacht moeten uitgaan naar het behoud van de constructies en hun waarden. Interventies zijn nodig omdat materialen achteruitgaan, functies veranderen en zich (kleine) rampen (kunnen) voordoen. In dit betrekkelijk jonge vakgebied is het gebruikelijk dat de benadering van betonreparatie wordt gekozen wanneer een interventie in een historisch betongebouw nodig is. Wat we dan vaak tegenkomen is dat de waarden niet op de best mogelijke manier worden gerespecteerd. Hier stelt zich de vraag welke invloed de gevolgde herstelbenadering heeft, aangezien er meestal niet wordt stilgestaan bij de fundamentele verschillen tussen restauratie en reparatie.
Betonreparaties hebben als doel het functioneren van een constructie te garanderen of de levensduur te verlengen, recentelijk ook uit overwegingen van duurzaamheid. Deze opvatting blijft gedurende het hele proces overeind. Een opname ten behoeve van het herstel richt zich op mechanische en fysieke eigenschappen van het beton, om de gebreken op te sporen en de mogelijkheden van hun herstel te bepalen. Dit heeft tot gevolg dat reparatiemethoden worden gekozen op basis van hun mechanische en fysieke aspecten. Behalve de structurele resultaten zijn andere criteria voor keuzes de levensduur, economische aspecten en de mogelijkheden van onderhoud zoals in de standaard NVN EVN 1504-9:1997: *Producten en systemen voor de bescherming en reparatie van betonconstructies*.
Restauratie heeft echter een andere achtergrond. Het belangrijkste doel is om het gebouw te behouden omdat het kan worden gezien als een waardevol historisch artefact. De waarden van gebouwen kunnen zeer verschillen. Algemeen geaccepteerd zijn de zeldzaamheid en de leeftijd van een gebouw, maar het gebouw of zijn materiaal kan ook waardevol zijn vanwege zijn betekenis in technologische ontwikkeling, zijn schoonheid, zijn geschiedenis en veel meer. De waarden die de aanwijzing als monument hebben gerechtvaardigd moeten worden behouden bij elke interventie, onafhankelijk van de leeftijd of het materiaal van het gebouw. De principes van interventies zijn vastgelegd in internationale restauratierichtlijnen, zoals het Charter van Venetië (ICOMOS 1964). Het jongere ICOMOS Charter – Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage – eist dat de gekozen restauratietechniek het '*least invasive and most compatible with the heritage values*, [moet zijn] *bearing in mind safety and durability requirements*' (ICOMOS 2003). Omdat deze restauratieprincipes zeer

algemeen zijn, is het nodig dat de betrokken partijen bij een interventie (dat wil zeggen restauratiearchitect, monumentenzorger, betonschade-inspecteur en -reparateur) het gebouw, zijn materiaal en zijn waarden begrijpen zodat kan worden ingeschat of de mogelijke benaderingen de restauratieprincipes volgen. En dit is een van de grootste problemen bij de restauratie van beton: experts die karakteristieke eigenschappen en de waarden van historisch beton kennen, zijn schaars.
Dit heeft tot gevolg dat bij een restauratieproject met historisch beton, de technische aspecten worden toevertrouwd aan externe experts van betonreparatie, meestal al vanaf de opname. Het inschakelen van betonexperts bij de 'praktische' aspecten van betonrestauratie lijkt op het eerste gezicht logisch, omdat de oorzaken van schade bij 'waardevol' en 'normaal' beton hetzelfde zijn. Bovendien hebben herstelexperts de ervaring en de kennis van de duurzaamheid en het herstel van beton. Het inschakelen van hun expertise is zelfs onvermijdelijk, omdat er bijna geen experts van betonrestauratie zijn. Deze betrokkenheid hoeft niet per sé schadelijk te zijn en/want restauratie betekent altijd teamwork. Maar als er geen besef is van het verschil tussen herstel en restauratie, kan de keuze van herstelbenadering in de context van een restauratie de monumentale waarden in gevaar brengen. Het is belangrijk dat capabele restauratiedeskundigen het proces leiden en in staat zijn om te bezien of voor de restauratie relevante aspecten in het proces zijn geïntegreerd, zoals bijvoorbeeld de analyse van de invloed van een hersteltechniek op het originele materiaal en zijn waarden.
Als het behoud van waarden de essentie van een restauratie is, is het nodig de relatie tussen het originele beton en de waarden vast te stellen om de invloed van de hersteltechnieken op de waarden te kunnen inschatten. De opname bij een restauratie kan zich niet alleen maar richten op mechanische en fysieke eigenschappen en zij vormen de enige basis voor het hersteladvies. Er moet een derde variabele worden meegenomen: de waarde van het beton.
Aangezien de onderliggende schadeoorzaak hetzelfde is bij monumentale en normale betonnen gebouwen, lijkt een standaard hersteltechniek een technisch juiste keuze. Maar omdat de technieken zijn ontwikkeld vanuit mechanische en fysieke oogpunten hoeven zij niet automatisch de waarden van het originele beton te respecteren. Omdat een gespecialiseerde betonrestauratiemarkt nog niet bestaat, moet er zeer kritisch worden bekeken of de bestaande hersteltechnieken de waarden van beton respecteren. De basis voor beslissingen bij een restauratieve benadering zou een evenwichtige afweging van waarden en technische uitvoering moeten zijn. In hoeverre de waarden van beton kunnen vragen om een maatgesneden restauratiebenadering in plaats van een standaard herstelbenadering en zodoende een extra uitdaging zijn voor de betrokken partijen, zal worden getoond aan de hand van drie voorbeelden: het behoud van het originele beton, de esthetische compatibiliteit van de reparatiemethode, en de geometrische beperkingen.

Behoud van het originele beton

Standaard herstelbenaderingen houden geen rekening met de hoeveelheid verloren origineel materiaal. Het is gebruikelijk dat het beschadigde beton wordt verwijderd en reconstructie van delen is niet uitgesloten. In de context van een restauratie kan de authenticiteit van het originele beton echter belangrijk zijn, en een dergelijke benadering zou dan een groot verlies van waardevol materiaal van het monument ten gevolg hebben.
In Nederland kennen we een zeer belangrijk voorbeeld van de waarde van het originele beton, de forten van de Stelling van Amsterdam, die vooral bekendheid geniet vanwege haar ingenieuze militaire functie. Maar de forten van dit stelsel speelden ook een belangrijke rol in de ontwikkeling van betontechnologie in Nederland. Als eenheid zijn de forten artefacten van de ontwikkeling van beton, die de overgang van bakstenen via niet-gewapend betonnen naar gewapend betonnen constructies laten zien. Niet alleen het constructietype veranderde, ook de samenstelling die een state-of-the-art en economische

ontwikkeling van vroeger liet zien. Het originele beton van de forten is als waardevol bestempeld in de verklarende beschrijving voor de nominatie als UNESCO Wereld Erfgoed.
Voor de restauratie van zo'n fort zou dit moeten betekenen dat het behoud van het originele beton een van de belangrijkste restauratiedoelen moet zijn en dit vergt kennis van het beton en zijn betekenis voor de ontwikkeling van betontechnologie. Dit kan worden bereikt door het historisch onderzoek naar betontechnologie te combineren met het onderzoek van het bestaande beton. Opnametechnieken zoals de petrografische analyse kunnen niet alleen de compositie van het beton in beeld brengen, maar ook historisch bewijs zoals de sporen van het vakmanschap.
Bij de keuze van een toepasselijke benadering moet niet alleen het voorkomen van verdere achteruitgang maar ook de technische uitvoering van een reparatietechniek worden afgewogen. Ook de hoeveelheid materiaalverlies op lange termijn moet hierbij worden betrokken. Dit kan door middel van een risicoanalyse van de hoeveelheid te verwijderen materiaal in het geval een hersteltechniek faalt of van het effect van en de te verwachten aantallen reparatiecycli.

Esthetische compatibiliteit

Algemeen wordt verondersteld dat betonnen gebouwen grijs en monotoon zijn en dat ze niet worden geassocieerd met esthetische waarden. Als men echter nauwkeuriger naar beton kijkt kan een variëteit aan kleuren en oppervlakken worden aangetroffen. Vooral in de naoorlogse architectuur is er geëxperimenteerd met de esthetische mogelijkheden van schoonbeton. Een verscheidenheid aan bekistingen, oppervlaktebewerkingen en aggregaten zijn karakteristiek voor dit deel van ons betonerfgoed en benadrukken de mogelijkheden van de esthetische waarde van beton.
Aangezien herstel zich meestal richt op de structurele werking van het beton, komt het esthetische effect van een reparatietechniek op de tweede plaats. Standaard herstelmortels passen niet bij de kleur of de textuur van het oudere beton, beschermlagen gaan vaak samen met het verlies van de fijne textuur en van de kleurnuances van het betonoppervlak. Andere technieken, zoals de kathodische bescherming of spuitbeton kunnen er zelfs voor zorgen dat het hele originele oppervlak verloren gaat. Daarom is het zeer belangrijk om de schadeoorzaak en de waarde van het oppervlak op de juiste manier te bepalen, om de eigenschappen van de restauratietechniek (technisch en esthetisch) vast te leggen. Om een esthetische aanpassing te bereiken is het nodig om de visuele en textuureigenschappen van beton vast te leggen. Deze informatie kan gebruikt worden om toegesneden herstelmaterialen te ontwikkelen en het zou nodig kunnen zijn om in het werk te testen wat het effect van het herstelmateriaal is.

Geometrische beperkingen

De geometrie van betonnen elementen beïnvloedt niet alleen het uiterlijk van een gebouw, maar ook zijn duurzaamheid. In dit opzicht zijn betonnen gebouwen met slanke proporties kwetsbaarder voor aantasting zoals corrosie door carbonatatie. Historische betonnen gebouwen hebben vaker te slanke proporties, gemeten aan de hedendaagse standaard. Behalve het ontwerp zelf waren het vroegere ontwerpregels en de relatief hoge materiaalkosten in vergelijking met de arbeidskosten die slanke proporties in de hand werkten. Dit had constructies tot gevolg met een te geringe betondekking. Omdat veel betonnen gebouwen te maken hebben gehad met jarenlange leegstand en niet meer wind- en waterdicht zijn, is schade door corrosie gebruikelijk.

Figuur 1: Niet alleen de visuele effecten van een reparatie kunnen ongewenst zijn, maar ook het verlies van origineel beton (Fort Bezuiden Spaarndam na restauratie).

Figuur 2 en 3: Het beton van de Parksluizen Gemaal in Rotterdam is gekarakteriseerd door een architectonisch gebruik van de bekisting. De houtnerfstructuur is gedeeltelijk nog goed zichtbar (Fig. 3). Een te geringe betondekking veroorzaakte corrosie en meerdere reparaties waren al nodig. Tijdens een reparatie in de jaren 90 was er special aandacht voor een esthetische compatible reparatie (van der Zande 1997; Hinterthür 1997). (Maatschap voor Architectuur en Stedenbouw Van der Grinten en Heijdenrijk, 1968)

Figuur 4 en 5: Voor de restauratie van het Dresselhuys paviljoen, onderdeel van het Sanatorium Zonnestraal van J. Duiker, B. Bijvoet en J.G. Wiebenga), was het belangrijk dat de betonnen elementen hun ranke geometrie behielden. Niet alleen uit respect voor het originele beton, maar ook om de originele stalen vensterramen te kunnen blijven gebruiken. Foto links tijdens restauratie, rechts kort voor voltooiing.

Bij een standaard herstelbenadering zou dit betekenen dat het aangetaste en gecarboneerde beton tot voorbij de wapening zou worden verwijderd en hersteld en dat de nieuwe dekking conform de hedendaagse standaard zou zijn, daarmee de geometrie van het element vergrotend. Omdat veiligheidseisen ook belangrijk zijn voor monumenten, moet het verlies van origineel materiaal soms worden geaccepteerd voor het behoud van het gebouw. Maar herstel volgens de standaard kan ook de originele geometrie van het betonnen element aantasten indien een dikkere wapening nodig is. Een benadering volgens de standaard kan niet alleen de waarde van het betonnen element beïnvloeden, maar kan ook gevolgen hebben voor andere elementen wanneer de geometrie van details verandert.

Conclusie

Aangezien het veld van betonrestauratie betrekkelijk jong is, zijn er nog geen maatgesneden regels voor restauratie. Aangezien er wel expertise is op het gebied van betonherstel en monumentenzorg zelf nog niet vertrouwd is met het materiaal beton, worden betonherstel experts meestal ingehuurd voor de technische aspecten. Deze mensen zijn getraind in het opsporen van schade en kiezen geschikte herstelbenaderingen; daarom lijkt het redelijk om zo te werk te gaan. Maar in hun benadering mist een variabele: de determinatie, de integratie en het behoud van waarden.
Het is belangrijk om voor ogen te houden dat de doelen van reparatie en restauratie verschillen. Herstel richt zich op de prestatie van de constructie, terwijl restauratie is gericht op het behoud van de waarden van een gebouw en/of zijn materialen. Een herstelbenadering lijkt technisch goed te klinken maar gaat niet uit van het behoud van de waarden van het monument. Daarom is het nodig om kritisch naar de waarden, de conditie van het monument en de opties voor behoud te kijken. Dit vraagt kennis van het historische beton en begrip voor de beperkingen en de mogelijkheden van hersteltechnieken waaruit gekozen kan worden voor een passende restauratieaanpak.
Restauratieprojecten zijn nooit standaard. De omstandigheden, waarden en restauratiedoelen kunnen van project tot project verschillen. Daarom is het moeilijk om bepaalde technieken in het algemeen uit te sluiten of aan te bevelen. In plaats daarvan moet voor elke opdracht een passende benadering worden ontwikkeld, die balanceert tussen het behoud van waarden en de technische mogelijkheden. Oplossingen buiten de officiële aanbevelingen of regels kunnen nodig zijn. Dit vraagt zorgvuldig onderzoek door experts om de prestaties van de techniek vast te stellen en om schadelijke resultaten uit te sluiten. Kleine aanpassingen aan bestaande technieken zoals de aanpassing van de kleur en textuur van reparatiemortels zijn heden ten dage al uitvoerbaar.
De basis voor het bereiken van een kwalitatieve betonrestauratie is de volledige kennis van historisch beton. In het algemeen betekent dit dat meer vergelijkbaar onderzoek naar eigenschappen, geschiedenis en waarden van historisch beton nodig zijn en bovendien de mogelijkheid om waarden te integreren als beslissende factoren in het restauratieproces. Voor het individuele geval betekent dit dat goed teamwork tussen de restauratiearchitect, de historici en de betonherstelexpert nodig is, zodat de doelen en de opties van elk project openlijk kunnen worden besproken.
Er moet openlijk worden bezien of alternatieve passende benaderingen in plaats van de standaardmethode het originele materiaal en/of de waarden op de lange termijn niet beter bewaren. Het is een optie om onderhoud en inspectie in de zin van *preventive conservation* vanaf het begin te integreren. Dit kan het gebruik van gevoeligere/passendere technieken mogelijk maken die op de lange termijn het verlies van het originele materiaal minimaliseren of het denken buiten de bestaande kaders om creatieve oplossingen te vinden voor het behoud van monumenten met hun waarde en goede technische prestaties.

Referenties

ICOMOS (1964). *The Venice Charter - International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites*. http://www.icomos.org/venice_charter.html (bezocht 11-03-2008)

ICOMOS (2003) *Icomos Charter – Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage,*. http://www.international.icomos.org/charters/structures_e.htm (bezocht 11-03-2008)

Hinterthür, H. (1997). An unobtrusive treatment. Wessel de Jonge and Arjan Doolaar (Eds.) DoCoMoMo*: The Fair Face of Concrete Conservation and Repair of Exposed Concrete.* pp. 95 – 98; Docomomo International: Eindhoven

NVN EVN 1504-9:1997: Producten en systemen voor de bescherming en reparatie van betonconstructies - Definitie, eisen, kwaliteitsborging, conformiteitsbeoordeling - Deel 9: Algemene principes voor het gebruik van producten en systemen. December 1997.

van der Zanden, K. (1997). A brilliant match. Wessel de Jonge and Arjan Doolaar (Eds.) DoCoMoMo*: The Fair Face of Concrete Conservation and Repair of Exposed Concrete.* pp. 95 – 98; Docomomo International: Eindhoven

MONITORING EN PREVENTIEVE CONSERVATIE – RAAKPUNTEN MET BETONNEN MONUMENTEN

Koenraad Van Balen, Luc Schueremans,
K.U.Leuven, Departement Burgerlijke Bouwkunde

Samenvatting

In eerste instantie wordt toegelicht hoe erfgoedbehoud uitgaande van preventieve conservatie mogelijk is en wat daarvan de uitgangspunten zijn. Kernbegrippen daarbij zijn “preventieve conservatie”, “monitoring” en “onderhoudsplanning”. Vervolgens wordt gesteld dat in betonnen monumenten de functionele onderhoudsbenadering botst met de principes van erfgoedbehoud. Voor betonnen constructies wordt vervolgens nagegaan hoe de bewaringstoestand ervan kan worden gevolgd (monitoring) uitgaande van een aantal belangrijke kenmerken van het materiaal beton.

Inleiding

Voor erfgoedbehoud van historische gebouwen en sites wordt vandaag uitgekeken naar de mogelijkheden van een preventieve benadering die uitgaat van het principe dat preventie beter is dan genezen. Bij verschillende gelegenheden is binnen WTA Nederland-Vlaanderen op het belang daarvan gewezen. Dat is begrijpelijk omdat precies in deze regio’s Monumentenwachtverenigingen op aansturen van de overheden bevoegd voor monumentenzorg deze benadering een sterke impuls gegeven hebben.
Betonnen monumenten behoren tot een nieuwe categorie monumenten waarvoor we nog steeds op zoek zijn naar een gepaste wijze om ermee om te gaan. Hun erfgoedwaarde verschilt van andere soorten monumenten, alhoewel op de keper beschouwd en gebruik makend van een gemeenschappelijk referentiekader ze even goed of even verscheiden “monument” kunnen zijn dan andere monumenten.
In het geval dat deze nieuwe monumenten tot ons komen, goed onderhouden werden (wat zeker niet altijd het geval is) stellen we vast dat hun monumentenstatus ons nu verplicht er anders mee om te gaan dan net voordien. Hoe komt dat? Waarin verschilt dan onderhoud van niet-monumenten dan van onderhoud van monumenten? Hoe komt het dat we dat in het geval van betonnen monumenten zo duidelijk ondervinden.

Erfgoedbehoud uitgaande van preventieve conservatie

Preventieve conservatie gaat uit van het minimaliseren van verwering en van schade aan het erfgoed, daarbij ingrijpende restauratie-ingrepen mijdend. Hoewel het sinds het Charter van Athene in 1931 wordt verdedigd en hoewel zij formeel werd ingeschreven in het Charter van Venetië (1964) neemt het belang van deze benadering pas sinds 15 jaar toe. Regelmatige opvolging (monitoring), de controle van de belangrijkste schadeoorzaken en routine onderhoud met eventueel kleine ingrepen maken er de kern van uit.
Preventieve conservatie vergt naast een technische inzet ook een belangrijke inzet van de gemeenschap. De betrokkenheid van een (groter) deel van de bevolking wordt verzekerd door de rol die de vele eigenaars en beheerders hebben in het proces. Bij preventieve conservatie die uitgaat van onderhoud worden meestal op lokaal vlak meer mensen ingeschakeld terwijl het bijdraagt tot het behoud van meer authentiek materiaal (Cebron e.a. 2008).

In de twee **seminaries over preventieve conservatie van monumenten en sites** (SPRECOMAH) werden ervaringen en wetenschappelijke informatie uitgewisseld over dat thema. Na het seminarie van Leuven in juni 2007 en dat van de Val de Loire in mei 2008 werden een aantal besluiten en suggesties gedistilleerd met de bedoeling het onderzoek in de Europese Gemeenschap in deze zin te stimuleren. Enkele relevante aandachtspunten zijn in dit verband vermeldenswaardig.
Preventieve conservatie gaat uit van een holistische benadering: ze kan niet op een kleine geïsoleerde schaal worden uitgewerkt. Ze heeft een lange tijdspanne voor ogen en werkt op verschillende schalen in ruimte en tijd. Ze heeft oog voor de grote schaal (regio's, territoria, sites, gebouwencomplexen, gebouwen,…) tot voor het gedetailleerd identificeren van specifieke noden. Ze heeft oog voor high-tech maar ook voor low-tech. Ze heeft oog voor de concrete uitwerking en realisaties ("hands-on") als voor cultuurgebieden ("cultural territories") waar dergelijke benaderingen kunnen aarden en zodoende kunnen bijdragen tot het welzijn van de bevolking. Kortom het vraagt een geïntegreerde aanpak binnen een juiste ingesteldheid, binnen een gepast economisch en juridisch kader.
In Nederland en Vlaanderen kunnen we stellen dat er een geschikt kader bestaat voor de benadering van preventieve conservatie. Dat werd onder andere mogelijk gemaakt door de oprichting van Monumentenwacht-verenigingen en door het voorzien van een beleid dat (financieel) onderhoud stimuleert. Hoewel al veel bereikt werd op het gebied van het sensibiliseren van brede lagen van de bevolking menen we dat hier nog werk aan de winkel is om het draagvlak voor erfgoedbehoud te vergroten maar tevens om meer mensen te betrekken en te responsabiliseren in het onderhoudsproces van het erfgoed.
Op internationaal vlak wordt interesse voor deze benadering gewekt met de oprichting van de UNESCO leerstoel over "*Preventive Conservation, Monitoring and Maintenance of Monuments and sites*" aan de K.U.Leuven in samenwerking met Monumentenwacht Vlaanderen.
Rond deze leerstoel werd een internationaal netwerk opgezet met een 100-tal organisaties die in deze benadering van erfgoedbehoud hun interesse hebben betoond. Over dit netwerk en de UNESCO leerstoel, zal U later nog uitvoerig worden geïnformeerd. Het doel is uiteindelijk bij te dragen tot een betere monitoring van werelderfgoedsites door de verbetering van de vaardigheden en technieken die nodig zijn voor het opstellen van de periodieke rapporten over het werelderfgoed. Deze monitoring moet bijdragen tot een conservatiestrategie die in eerste instantie uitgaat van het onderhoudsprincipe. Nederland en Vlaanderen zullen in dit netwerk een voortrekkersrol kunnen en moeten spelen.

Wat is er preventief aan "monitoring"?

"Preventieve conservatie

Preventieve conservatie gaat uit van het minimaliseren van verwering en van schade aan het erfgoed." Monitoring draagt daartoe bij omdat het toelaat een betere inschatting te maken of er werkelijk schade optreedt en zo ja aan welke snelheid. Het draagt er eveneens toe bij noodzakelijke ingrepen te minimaliseren. Dat laatste wordt verzekerd door de inschatting van de noodzaak tot ingreep (als resultaat van de monitoring) maar ook omdat het toelaat op een gepaste wijze minimale ingrepen naar hun effectiviteit te evalueren. Zodoende kan op getrapte wijze in functie van de noodzaak die objectief vaststelbaar is, worden ingegrepen.
Onderhoud kan bijdragen tot preventieve conservatie. Het is dan pro-actief, bouwt voort op de kennis van risico's en de mogelijke (tijdelijke) ingrepen die ze vergen. Soms komt onderhoud (net) iets te laat en dan kan monitoring (verslag van een bewaringstoestand) bijdragen tot tijdelijke identificatie van schade en zorgt een minimale ingreep voor het snel behelpen van een probleem. Tot zover gelden deze uitspraken voor eender welk gebouw: historische monumenten of niet.

In het geval van een monument moet een onderhoudsstrategie zich inpassen in een ruimer objectief waarbij het behoud van erfgoedwaarden centraal staat. Het blijkt niet altijd eenvoudig deze twee strategieën met elkaar te verzoenen. Ze lijken vaak in dezelfde zin te bewegen, maar in de monumentenzorg zijn er een aantal principes die “gewoon” onderhoud in de weg kunnen staan. Nigel Dann (Dann 2006) noemt zes principes: “minimum interventie”; “conserveer zoals het werd gevonden”; “gebruik van materialen voor herstel die zoveel mogelijk dezelfde materialen zijn als de oorspronkelijke”; “reversibiliteit”; “eerlijkheid in herstel” en tenslotte het “belang van documentatie”. Hoewel we het hier niet woordelijk met de voorstellen van Nigel Dann eens moeten zijn, is het zo dat in de monumentenzorg een aantal principes primeren die moeten bijdragen tot een maximaal behoud van authenticiteit. Zelf zouden we de volgende lijst van criteria willen inroepen: “reversibiliteit” en indien dat niet kan “compatibiliteit en herbehandelbaarheid”; “minimum interventie”; “belang van documentatie”, “maximaal en transparant behoud van authenticiteit” waarbij authenticiteit zelf moet begrepen worden als een gelaagd begrip met verschillende dimensies en aspecten (Van Balen 2008).
Nederland en Vlaanderen zijn in staat met de hulp van Monumentenwachtverenigingen een goede monitoring te doen van de “monumentenstock”. Waar ons inziens nog een belangrijke uitdaging ligt, is de integratie van deze monitoring in beheersplannen voor elk van deze monumenten.

Monitoring als diagnose instrument

Monitoring (regelmatige inspectie) draagt bij tot tijdige vaststelling van schade en zorgt er zodoende voor dat de mogelijke schade beperkt blijft, indien niet kon geanticipeerd worden.
De studie en de monitoring van schade is eveneen belangrijk om het mechanisme dat tot schade leidt (beter) te begrijpen. Het laat toe risico’s beter in te schatten en er rekening mee te houden bij de bepaling van de noodzakelijke ingrepen of bij het plannen van onderhoud. Daarom is het aangewezen monitoring van schade in langetermijnplanning en -beheer op te nemen.
“Meten is weten” en vult het modelleren aan. Deze aanvulling laat toe een juiste risico-analyse te kunnen uitvoeren en te bepalen waar inspanningen het meest renderen. Een goed voorbeeld daarvan staat in het doctoraat van dr. ir. Luc Schueremans (Schueremans 2001). Men kan soms meer zekerheid over de stabiliteit van gewelven verkrijgen door deze nauwkeurig(er) op te meten dan door (tijdelijke) versterkingen aan te brengen.
De getrapte benadering stoelt op een cyclische benadering van het conservatieproces. Voor stabiliteitsingrepen wordt de lus “Analysis-Diagnosis-Therapy-Control-Analysis-…” voorgesteld (ISCARSAH 2003). Voor projecten op territoriale schaal definieert men dat als “Studies-Project-Execution-Monitoring-Studies-…” (SPRECOMAH).
Een lus veronderstelt een proces dat nooit voleindigd is, monitor en onderhoud maken de terugkoppeling van wat werd uitgevoerd of vastgesteld naar de nieuwe “ge-update” analyse.

Toepasbaarheid in betonnen monumenten

Monumenten

Conservatie is verschillend van herstellen: methodologie van erfgoedbehoud is noodzakelijk, uitgaande van minimuminterventie, afwegen van de verschillende erfgoedwaarden om zodoende tot een ingreep te komen (indien noodzakelijk) die voortdurend opgevolgd en bijgestuurd kan worden. In haar bijdrage aan de eerste SPRECOMAH bijeenkomst stelde drs ir. Herdis Heinemann (Heinemann 2007) dat de meeste benaderingen van betonherstel uitgaan van functioneel herstel en geen conservatie-uitgangspunten inhouden. De conservatie benadering gaat volgens drs. Heinemann uit van abstracte en niet toepassingsgerichte uitgangspunten. Dit leidt ertoe dat al te vaak in monumenten

(functionele) hersteltechnieken worden aangewend met een verlies aan authenticiteit voor gevolg.
Om het volgens de concepten van Nigel Dann te zeggen (Dann 2006): onderhoud van niet-historische gebouwen hoeft zich niet te bekommeren om de principes van erfgoedbehoud. Wanneer gebouwen die in het ideale geval goed werden onderhouden, een erfgoedstatus krijgen, dan verandert het referentiekader waarbinnen onderhoud kan worden uitgevoerd.
We willen stellen dat precies bij de conservatie van “modernere” monumenten de overgang van functioneel herstel naar conservatie het meest aan de orde is. Immers oudere gebouwen worden al langer onderkend als historisch belangrijk, terwijl bijvoorbeeld gebouwen van de moderne beweging pas zeer recent als erfgoed kunnen erkend.worden, waardoor er zich een wijziging van onderhoudsbenadering opdringt.
Aan de waardebepaling van erfgoed zijn verschillende publicaties gewijd waaruit blijkt dat zowel de methode als het referentiekader veranderen met de tijd, ze zijn zelfs cultureel bepaald. Op internationaal vlak –wanneer bijvoorbeeld sprake is van werelderfgoed- groeit een consensus die een gelaagdheid van waarden onderkent. We verwijzen daarvoor naar de discussie over authenticiteit (zie bijvoorbeeld het laatste themanummer van APT bulletin, 49 (2-3): Association for Preservation Technology) en bijvoorbeeld naar het gebruik van het Nara grid, als methode (Van Balen, 2008).

Beton

Beton kende in de 20ste eeuw een grote vlucht waarmee door de moderne architecten werd geëxperimenteerd om een nieuwe architecturale expressie te realiseren. Vorm, textuur maar ook kleur waren bepalend. De (architecturale) praktijk werd een laboratorium ondersteund door opkomende bouwmateriaallaboratoria waarvan de meesten geloofden in de nieuwe moderne materialen die wetenschappelijk werden “ontwikkeld”. Er ontstond een paradigma dat meer geloof hechtte in de wetenschappelijke kennis van labo’s dan in empirisch gegroeide praktijk. Duurzaamheid was toen nog geen begrip.
Deze constructies zijn nu historische getuigen van een tijd, van een geschiedenis en sommigen daarvan worden erfgoed.
Het beton dat in het betonnen erfgoed wordt gebruikt, maar uiteraard ook aanwezig kan zijn in recentere monumenten die voornamelijk uit andere materialen bestaan; bestaat uit cementsteen met aggregaten en (wapenings-)ijzer. Wanneer het beton alkalisch is, wordt het ijzer daarin beschermd door dat beton. Wanneer het beton carbonateert vermindert de zuurtegraad (pH) waardoor het ijzer niet meer beschermd wordt tegen corrosie, zodat wanneer de omstandigheden aanwezig zijn, het ijzer gaat corroderen wat met een zeer grote volumetoename gepaard gaat.
Om ijzer te doen corroderen is niet veel water nodig. Ook de aanwezigheid van andere ionen, bvb chloriden, kunnen zorgen voor een snelle corrosie.
Beton is in historische gebouwen vaak als kunststeen aangewend. Kleur, textuur en uitzicht zijn dan bepalend; de inwendige structuur blijft evenwel min of meer dezelfde.
In het zwembadcomplex in Antwerpen (Mertens e.a. 2006) werd door materiaalbepaling en door kleurenstudie duidelijk hoe beton werd gebruikt als imitatie blauwe hardsteen en hoe grintbeton werd gebruikt voor lateien.

Problemen met beton in monumenten

Uit de bijdragen van vorige WTA studiedagen hebben we enkele voorbeelden gehaald waarin sprake was van problemen met beton of waarin aspecten daarvan werden toegelicht.
De historiek geschetst door Birgit Van Laar (Van Laar 2006) toont aan hoe verschillende vormen van voorlopers van (kunstbeton) bestaan, zoals bvb rocaille en namaak rotsen. Veel voorkomende problemen bij dergelijke kunststeentoepassingen is de corrosie van de ijzeren wapening, waarvan de snelheid en de omvang onder andere bepaald worden door de

porositeit van de mortel. Het gaat in dergelijke gevallen eerder om een mortel dan het dichte beton dat we vandaag meestal gebruiken. De wapening die daarin gebruikt werd is meer van de aard van “kippendraad” dan van wapening waarop gerekend wordt voor het opnemen van (grote) trekspanningen in het materiaal.
De eigenschappen van het vroege beton die de verwering ervan uitleggen, zijn de (grote) porositeit waardoor vochtinfiltratie wordt bevorderd en waardoor de carbonatatiesnelheid groot is. Met de jaren is ook gesleuteld aan de eigenschappen van het wapeningsijzer en aan het bevorderen van de hechting tussen het beton en het ijzer. Zo zien we dat oudere betontoepassingen vaak hiermee problemen hebben. De bescherming tegen corrosie van het ijzer werd tenietgedaan als gevolg van de voortschrijdende carbonatatie of van de opname van bijvoorbeeld chloriden (Ignoul e.a. 2006)

Wat zijn de typische problemen? Hoe kunnen we ze identificeren?

In de vorm van een kort overzicht willen we hier de verschillende vormen van schade of schadeoorzaken aanduiden. Andere sprekers zullen op één of andere van deze aspecten dieper ingaan.
“Betonrot” is een verzamelnaam voor problemen met het beton.
Oppervlakte of inwendige condensatie van beton komt vaak voor door de grote geleidbaarheid voor warmte van betonnen structuren. Ze kunnen corrosie versnellen maar ook leiden tot patogene toestanden door schimmelvorming, enz…
Hoewel door de grote densiteit van beton deze als relatief water ondoorlatend wordt beschouwd, leiden bvb stortnaden (dus technologische randvoorwaarden) er toe dat betonnen structuren te **waterdoorlatend zijn of worden** (Ignoul e.a. 2006). Differentiële zettingen, thermische uitzetting kunnen dit fenomeen nog versterken.
Betonsteen is een bros materiaal met een zeer beperkte treksterkte. Gewapend beton haalt zijn treksterkte uit de wapening. De uitzettingscoëfficiënt van beton is dezelfde als die van ijzer (vandaar de compatibiliteit van beide materialen) waardoor soms kleine gebreken of anomalieën in betonnen structuren kunnen leiden tot **scheurvorming**. Er zijn dus scheuren mogelijk tengevolge van (thermische) dilatatie of mechanische belastingen. Het gebruik van deformatiemetingen (demec punten) in combinatie met metingen die een verband met de oorzaak van de scheurvorming aangeven (bijvoorbeeld meting van de temperatuur van het beton of van de omgeving), kunnen een gepaste niet-destructieve meettechniek zijn. Scheuren vergemakkelijken ook de toegang van water en koolzuur in het beton, wat de kans op corrosie vergroot.
Door het roesten van het ijzer, neemt de volume ervan spectaculair toe. Hierdoor ontstaan trekspanningen in het beton en wordt de buitenschil afgestoten. Het **loskomen** van de betonnen beschermlaag op het staal is een veel voorkomend fenomeen (Van Laar 2006). In sommige gevallen komt het roestige ijzer aan de oppervlakte (Van Laar 2006).
De samenstelling van het beton bepaalt in belangrijke mate zijn duurzaamheid. Is het gehalte aan bindmiddel voldoende, werden de juiste aggregaten gebruikt of kunnen deze aanleiding geven tot de vorming van secundaire zouten? Een analyse van de **betonsamenstelling** (analyse van de samenstelling en van de componenten) kan dan aangewezen zijn (Ignoul e.a. 2006).
De voortgang van het **carbonatatiefront** kan gemeten worden met een eenvoudige niet-destructieve techniek aan de hand van een phenolftaleïne oplossing in alcolhol (Brosens e.a. 2006).
In marine omgeving, op plaatsen waar (veel) strooizouten werden gebruikt maar ook bijvoorbeeld in zwembaden is **chloridenaantasting** van beton mogelijk. Om zekerheid te hebben over het mechanisme van de schade kan door chemische analyse de gradiënt in het chloridengehalte worden bepaald. In bepaalde gevallen waar de aantasting van het beton en het staal kan worden opgevolgd kan aan de hand van een regelmatige inspectie (monitoring bijvoorbeeld met Demec punten) beslist worden wanneer een ingreep nodig zou zijn (Ignoul e.a. 2006). Gebruik makend van bijvoorbeeld chloride inhibitoren en van hydrofuge kan men

in bepaalde gevallen de toename van schade beperken (Ignoul e.a. 2006) (Brosens e.a. 2006).
Voor een beter begrip van schade of om het risico op schade te kunnen schatten wanneer de structuur relatief gaaf is, wil men de **inwendige structuur van het gewapend beton** kennen. Waar ligt het wapeningsijzer, wat is de diameter van de wapeningsstaven en hoe diep liggen ze onder het betonoppervlak? Hier kan men de volgende niet-destructieve methodes gebruiken: gammagrafisch onderzoek, thermografie of het gebruik van een pachometer om de wapening te detecteren.
De corrosiesnelheid van metaal wordt bepaald door elektropotentiaalmetingen die rechtstreeks verwijzen naar de elektronenstroom die de corrosie veroorzaken. De Galva pulse methode die in 1986 werd ingevoerd maakt gebruik van het aanbrengen van een korte stroompuls tussen een elektrode aan de oppervlakte van het beton en het wapeningsijzer. Het wapeningsijzer wordt anodisch gepolariseerd en de daaruit voortvloeiende verandering van de elektrochemische potentiaal wordt gemeten met een referentie elektrode (Poursaee e.a. 2008).
Voor constructieve toepassingen is een inzicht in **de betonsterkte** belangrijk. Deze kan "rechtreeks gemeten worden op boorkernen die ontnomen worden wat een (beperkt) destructieve proef is (Ignoul e.a. 2006) (Brosens e.a. 2006). Niet destructieve proeven die evenwel goed moeten geijkt worden maken gebruik van een sclerometer of van ultrasoon meten van de dynamische E-modulus (Ultrasoon) (Brosens e.a. 2006).
Betonnen structuren versterken is soms noodzakelijk t.g.v. wijziging of onderschatten van de belastingen (Brosens e.a. 2006). Ook de verandering van de materiaaleigenschappen (beton, wapening) of uitwendig veroorzaakte schade (bijvoorbeeld brand, mechanisch, gebrek aan onderhoud kunnen aanleiding geven tot bijkomende versterkingen (Brosens e.a. 2006). Een nieuwe techniek die daarbij van groot nut is gebleken, zeer in het bijzonder voor historische structuren, is het gebruik van opgelijmde wapening of opgelijmde vezels.

Wat kan men gangbaar monitoren?

De verschillende hierboven beschreven niet-destructieve proeven laten toe de toestand te monitoren. De ene techniek is al wat toegankelijker dan de andere.
Monumentenwacht maakte gebruik van niet-destructieve vaststellingen aan de hand van visuele inspectie, eventueel aangevild met bekloppen van beton om loskomende schellen of om holtes te ontdekken (Van Laar 2006).

Besluiten

Betonnen monumenten onderhouden confronteert de benadering van functioneel onderhoud met de principes van erfgoedbehoud. Omdat soms gesteld wordt dat de eerste benadering duidelijke en rechtlijnig is en dat de principes van erfgoedbehoud vaag zouden zijn hebben we geprobeerd deze confrontatie te verduidelijken.
Het materiaal beton heeft een aantal inherente eigenschappen die toelaten de risico's die tot de schade van beton leiden, in te schatten, of beter nog: op te volgen. Zodoende worden een aantal problemen van conservatie van beton en mogelijkheden om deze te monitoren toegelicht, uitgaande van een strategie van preventieve conservatie.

Referenties

Brosens, K; Figeys, W; Schueremans, L.; Van Gemert, D.; De Vuurmolen te Overijse (België); deel 2: structurele restauratie van een historische structuur in gewapend beton in: Van Gemert, D (2006) (Ed.), *Valorisatie en consolidatie van monumentale betonconstructies*, WTA, Turnhout, 2006, 13p.

Cebron Lipovec, N.; Van Balen, K.; Preventive conservation and maintenance of architectural heritage as means of preservation of the spirit of place; *16th General Assembly and Scientific Symposium of ICOMOS*, Québec, Canada, 2008.

Dann, N.; Hills, S.; Worthing, D.; Assessing how organizations approach the maintenance management of listed buildings, *Construction Management and Economics*, January 2006, 24; pp. 97-104.

Heinemann, H.; Problems and Challenges of the Conservation of Historic Concrete Buildings, Example: Defence Line of Amsterdam, unpublished contribution to 1st SPRECOMAH, Leuven, June 2007.

Ignoul, S.; Brosens, K; Van Gemert, D.; Zwembad veldstraat. Deel 2: Betonproblematiek in: Van Gemert, D (2006) (Ed.), *Valorisatie en consolidatie van monumentale betonconstructies*, WTA, Turnhout, 2006, 7p.

ISCARSAH zie http://www.international.icomos.org/charters/structures_e.htm, 2003

Mertens, R.; Stevens, P.; De Walsche, J.; Zwembad veldstraat. Deel 1: restauratie van het zwembad – bouwen van een stoombadcomplex in: Van Gemert, D (2006) (Ed.), *Valorisatie en consolidatie van monumentale betonconstructies*, WTA, Turnhout, 2006, 11p.

Poursaee, A.; Hansson, C.M. ; Galvanostatic pulse technique with the current confinement guard ring: The laboratory and finite element analysis; *Corrosion Science*; vol. 50, nr. 10; pp. 2739-2746.

Schueremans, L.; Probabilistic evaluation of structural unreinforced masonry; K.U.Leuven, Faculteit Ingenieurswetenschappen, Departement Burgerlijke Bouwkunde; 2001; 273 p.

SPRECOMAH: zie http://sprecomah.eu

Van Balen, K. (2008). *The Nara Grid: An Evaluation Scheme Based on the Nara Document on Authenticity*. In: APT bulletin, 49 (2-3), 39-45: Association for Preservation Technology.

Van Gemert, D (2006) (Ed.), *Valorisatie en consolidatie van monumentale betonconstructies*, WTA, Turnhout, 2006

Van Laar B., Betonmonumenten in het gebouwenbestand van Monumentenwacht Vlaanderen vzw; in: Van Gemert, D (2006) (Ed.), *Valorisatie en consolidatie van monumentale betonconstructies*, WTA, Turnhout, 2006, 7p.

HUIS TER HORST: 19E EEUWSE NEOGOTISCHE GEPREFABRICEERDE SIERBETONELEMENTEN

Wijnand Freling
Freling Advies

Woord vooraf

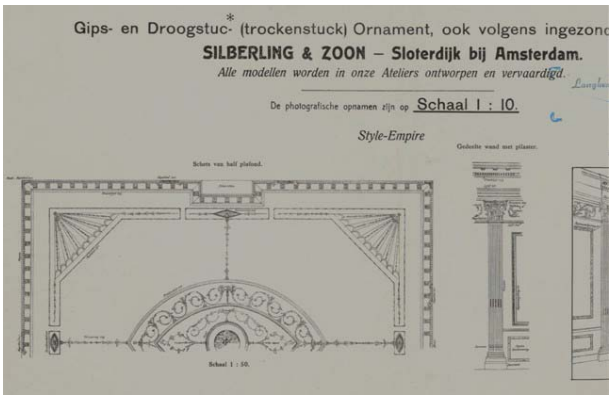
In 2005 is de restauratie van de gevels van het jachtslot Huis ter Horst in Voorschoten afgerond (fig. 1 en 2). Naar aanleiding van deze restauratie waar auteur als adviseur bij betrokken is geweest, is in 2005 van zijn hand een artikel verschenen in Mebest, een periodiek voor de afbouwsector. Het artikel dat u hier aantreft is een bewerking van dit bewuste artikel. Ook zult u produktnamen en leveranciers tegenkomen. Zonder een kwalitatief oordeel uit te spreken over de gebruikte produkten dient dit vooral ter illustratie van de veelheid aan gebruikte materialen van verschillende leveranciers. De keuze van deze materialen is in nauw overleg met de restauratie-stukadoor tot stand gekomen. Uiteraard is op basis van een produktspecificatie een voorselectie gemaakt van toe te passen materialen en technieken. In dit geval lag de uiteindelijke keuze bij de stukadoor die of een voorkeur had voor bepaalde produkten of bij proefstukken er achter kwam dat sommige materialen in de vergelijking beter naar zijn hand te zetten waren.

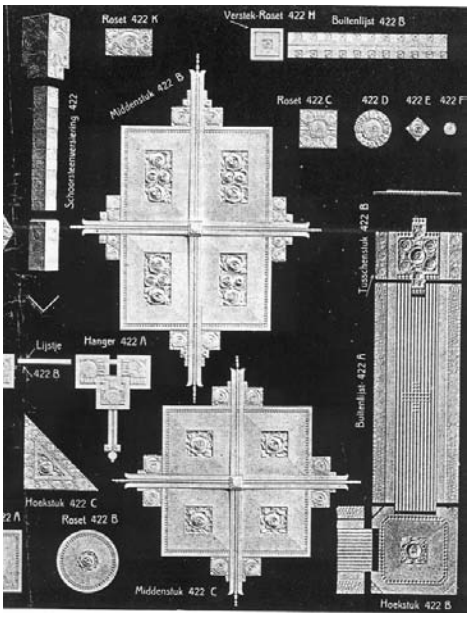
Inleiding

In de loop van de 19e eeuw neemt het volume in het prefabriceren van ornamenten, consoles en lijsten snel toe. Enerzijds door de toename van de bouwproductie, anderzijds door de uitbundige 19e eeuwse stijlen: neo-stijlen maar ook het eclecticisme. Voor binnengebruik vaak vervaardigd in gips of papier-mâché, voor buiten in diverse soorten kunststeen, beton of terra-cotta. Ook het bepleisteren van gevels neemt als decoratief element toe. De uitvinding van het cement dat vele malen harder is dan de ouderwetse kalkmortels, en de snelheid van verharden leidt tot grootschalige toepassingen.
Prefabricage leidt tot industriële productie. In Nederland onder ander door de firma's Benewitz, Dÿckerhoff, Silberling en Grolleman & Nierdt (fig. 3). Al deze firma's hebben zo hun specialiteiten in ornamenten. Levering van de ornamentiek in portland cement, terra cotta maar ook in andere kunststeen en in gips en papier-mâché behoort tot de mogelijkheden. Ook stukadoors legden zich in sommige gevallen toe op het maken van dergelijke ornamenten. De Utrechtse firma P.R. Lutters & Zonen is hier een fraai voorbeeld van.
In 2004 werd een prachtig voorbeeld van neo-gotische gevelornamenten gerestaureerd. De gevel van Huis Ter Horst in Voorschoten diende in zijn geheel te worden gerestaureerd. Naast de roestvorming in de blindankers in het metselwerk waren het ook aan de bakstenen gevel gehangen geprefabriceerde betonnen neogotische elementen. Na meer dan een eeuw blootgesteld te zijn aan weer en wind, aangetast door de tand des tijds, bleek bij het uitnemen van de ornamenten dat de schade vele malen groter was dan bij een eerste visuele inspectie was gebleken. Delen van de arkels waren inmiddels naar beneden gekomen (fig. 4). Verschillende onderdelen van de waterslagen ontbraken en ook water en regen hadden hun sporen in het cementwerk achtergelaten. In de tootboog-ornamenten boven de vensters waren bij eerdere onderhoudsbeurten stukjes hout aangebracht (fig. 5). Ook was er creatief pvc-pijp gebruikt om lijstwerk in de zijgevel terug te brengen (fig. 6). Reparaties die in de geest van de 19e eeuw pasten. Het uiterlijk van de gevels was belangrijker dan het materiaal waaruit het was opgebouwd. Een lijn die bij het restaureren ook is voortgezet.

Figuur 1: Voorgevel van het jachtslot Ter Horst voor de restauratie

Figuur 2: Voorgevel van het jachtslot Ter Horst na de restauratie





Figuur 3: Deel uit catalogusblad Silberling

Figuur 4: Een stuk van de naar beneden gekomen arkel. Duidelijk zichtbaar is de samenstelling van het materiaal: baksteen, grint en cement

Figuur 5: Stukjes hout die bij een eerdere restauratie zijn aangebracht ter vervanging van het verdwenen gegoten betonwerk

Figuur 6: Creatief met pvc-elektrapijp. Een goedkopere oplossing om een verdwenen deel van een waterslag bij te maken, is niet voorhanden

Figuur 7: Voorgevel van Huis de Schaffelaar in Barneveld in neo-tudorstijl ook wel Willem-II-gotiek genoemd. Helaas stond de gevel deels in de steigers

Figuur 8: Voorgevel van het Zwanen-broedershuis in 's-Hertogenbosch

Alvorens in te gaan op de restauratieve aspecten van de schade aan het betonwerk wordt hier in het kort de achtergrond van deze buitenplaats geschetst.

Historie

Het huidige jachtslot Ter Horst is gebouwd op fundamenten van een kasteel dat op deze plaats in 1203 is gesticht en in 1863 is gesloopt om plaats te maken voor het huidige jachtslot. Het kasteel was in 1838 gekocht door prins Frederik der Nederlanden. Prins Frederik was de jongere broer van koning Willem II die opdracht gaf tot de bouw van het jachtslot. De architect was P.F.W. Mouton, afkomstig uit Den Haag en leefde van 1830 tot 1898. Hij ontwierp dit jachtslot in de zogenaamde Willem-II-gotiek, ook wel neo-tudorstijl genoemd.
Ander neogotisch werk van de architect P. Mouton is aanwezig op Plaats 33 in Den Haag. Dit ontwerp dateert uit 1874. Nassaulaan 3-11 en 13-23 in Den Haag zijn in Willem-II-gotiek ontworpen door de architect G. Brouwer of J.G.W. Merkes van Gendt. Als we naar de versiering en detaillering van deze gevels analyseren dan is een vergelijking ver te zoeken. Kortom we hebben hier met Huis Ter Horst te maken met een gevelarchitectuur met uniek materiaalgebruik.
Willem-II-gotiek buiten Den Haag is onder andere te vinden in Huis de Schaffelaar in Barneveld, gebouwd in 1852 naar een ontwerp van de architect A. van Veggel (fig. 7). In de voorgevel komt de ornamentiek van de balustrade van Huis Ter Horst in essentie terug. Verder zijn er voorbeelden te vinden in Boxtel, kasteel Stapelen 1857-1858 en in Tilburg het paleis-raadhuis dat in opdracht van koning Willem II is ontworpen door de architect A. Goyaerts in 1847-1849. Het Zwanenbroedershuis in ’s-Hertogenbosch heeft een neogotische gevel naar ontwerp van J.H. Laffertée van omstreeks 1848 (fig. 8). Kasteel Moersbergen in Doorn heeft in de tweede helft van de 19e eeuw een neogotische gedaanteverwisseling ondergaan. In de 20ste eeuw is deze weer verwijderd. De neogotiek was in enkele gevallen geen blijvende decoratie voor de gevelarchitectuur. De gegeven voorbeelden geven geen van alle een duidelijke verwantschap met de neogotische vormentaal van Huis Ter Horst. Ook aanvullend onderzoek na gereedkomen van de restauratie heeft nog niet geleid tot vergelijkbare voorbeelden in binnen- en buitenland.
De neogotiek is in Nederland met name verspreid in de 19e eeuwse kerkbouw. Het zijn onder andere architecten als J. en P. Cuijpers, J. Tonnaer en H. van Tulder die zich met neogotiek bezighouden. De schaalvergroting in geloofsbelevenis leidt in de loop van de 19e eeuw tot nieuwe en grotere kerken.Ook hier speelt de ratio een belangrijke rol in de ontwikkeling van geprefabriceerde ornamenten. In veel gevallen wordt de neogotiek opgebouwd uit “standaard” elementen die naar de wens van de opdrachtgever worden geschakeld in een uniek patroon. Op die manier krijgt elke 19e eeuwse kerk toch weer zijn eigen karakteristieke vormgeving.
In de historische context gezien is het vervaardigen van prefab-elementen al veel ouder. In opdracht van de stukadoor/ontwerper werden aan schrijnwerkers opdrachten verstrekt om gietmallen te maken. De oudste bekende mallen stammen uit de 16e eeuw. Vasari maakt hier al melding van. Voor decoratief werk aan het leemstucplafond in de Berckepoort te Dordrecht zijn waarschijnlijk houten mallen gebruikt om het diepreliëf uit 1572 in de nog plastische kalk- en leemlaag in te drukken.Kortom de drang om sneller en efficiënter te werken is in de bouw al vroeg ontstaan.

Materiaalgebruik van de neogotische ornamentiek

De neogotische versieringen in de gevel van Huis Ter Horst zijn voor een belangrijk deel geprefabriceerd. De gegoten versieringen zijn met nokken in het metselwerk opgehangen. De kroonlijst onder de balustrade bestaat uit repeterende gegoten elementen die tegen elkaar zijn gezet (fig. 9). Op een zeer kunstige wijze is de balustrade in elkaar gestoken. De

bovenrand van de balustrade sluit van kolom tot kolom het onderliggende prefab-werk op. Hierdoor krijgt het geheel een geweldige stabiliteit en samenhang. De waterslagen zijn voor zover was na te gaan ter plaatse getrokken.
Bij de arkels is sprake van opbouw prefabwerk. De kern is een gietstuk waaraan vele brokken baksteen zijn toegevoegd om de hoeveelheid bindmiddel cement te beperken. Daarop zijn weer lijsten geplakt die van tevoren waren gemaakt. Alles past dan tot in detail goed in elkaar (fig. 10).
Het gebruikte materiaal bestaat uit een pure cementmortel, al dan niet verschraald met zand en brokken baksteen. Dit duidt er op dat de ornamenten in mallen zijn afgegoten. Ter plaatse opbouwen in dergelijke materiaalsamenstellingen lukt niet. De mortel heeft te weinig stabiliteit om zich in de vorm te handhaven als deze vochtig wordt aangebracht.
Het gieten van een pure cementmortel leidt normaal tot vervormingen door krimp. Blijkbaar zijn de gieters in staat geweest deze krimp tot aanvaardbare afmetingen terug te dringen. Het op elkaar laten aansluiten van de verschillende gietstukken gebeurde met nokken en verstekken. Het geheel van naden werd voor zover noodzakelijk tenslotte afgesmeerd. Zo ontstond dan de samenhang in het prefab-elementen.
Recente waarnemingen aan het gevelstucwerk van Huis De Schaffelaar laten zien dat hier sprake is van een baksteenconstructie die afgewerkt is met een cementmortel (fig. 11). Hier is alles ter plaatse opgebouwd en is er geen gebruik gemaakt van geprefabriceerde betonnen elementen.

Restauratieproblematiek

Bij een gevelrestauratie is het belangrijk om eerst te kijken wat voor schades er aanwezig zijn. Daarna komt de uitwerking van restauratie-aanpak en offertes. Een hoogwerker om alles van nabij te kunnen bekijken leek een goed alternatief voor een steiger te zijn. In de praktijk valt dit toch tegen. Het verschil in aantasting van het cementwerk is zo verschillend dat pas na het volledig nalopen van het werk een beeld kan worden gevormd over de omvang van het restauratiewerk. Veel beter is het om eerst een globale opname te maken van de verschillende schade-soorten en de restauratiemethodieken. Dit kan heel goed vanuit een hoogwerker gebeuren. Maar voor de offertevorming is het noodzakelijk om de gevel te steigeren. Achteraf bleek dat beperkt destructief onderzoek noodzakelijk was om een goed beeld te krijgen van de aanwezige schade. Met name de schade onder het oppervlak was vele malen groter dan visueel was vast te stellen. Uitloging van het cementwerk gedurende meer dan een eeuw had zijn sporen in het materiaal achtergelaten (fig. 12).
Na het plaatsen van de steiger kon het werk goed worden opgenomen. De volgende restauratie-problematiek zijn we tegengekomen: uitspoeling, ontbrekende delen, verpulvering van delen van de balustrade, instabiliteit van de arkels, verzakkingen, inwatering, optrekkend vocht, zoutuitbloeiingen, scheuren, eerdere restauraties met andere materialen, vervuiling en een scala aan afwerkingen in verf. Een prachtige staalkaart om allerlei restauratietechnieken op los te kunnen laten.
Door jarenlange uitspoeling van het cementwerk is er op verschillende plaatsen een prachtig patroon van holtes ontstaan. Grotachtige structuren worden zichtbaar zodra een hamer het toplaagje doorbreekt. De tand des tijds heeft zijn werk gedaan en op veel plaatsen is het cementwerk enkele centimeters en soms ook dieper aangetast. Tijdens de restauratie is al het cementwerk dan ook zorgvuldig nagelopen en zijn al deze slechte plekken aangepakt.
Na de inventarisatie van de verschillende schades komt de fase waarin experts langskomen om advies te geven over de wijze van restaureren en het materiaalgebruik. Hier vindt de uitwisseling plaats tussen restauratie-adviseur, materiaaltechnoloog en restauratie-stukadoor. Gaan we mallen maken om met gietmortels te kunnen werken of kiezen we liever voor aarddroge mortels die in lagen nat in nat ter plaatse kunnen worden aangebracht en gemodelleerd? Moeten we het oorspronkelijke materiaalgebruik op alle mogelijke manieren respecteren of is het toch verstandiger hier en daar ook andere materiaalsamenstellingen toe te passen? We constateren dat het klimaat waaraan deze gevels meer dan een eeuw zijn

blootgesteld het verval in materiaal zo ver is voortgeschreden dat vervanging op enkele plaatsen de enige reëele optie is. Steeds weer komt die vraag terug. Proefstukjes en het oordeel van de restauratiestukadoor wegen zwaar in alle beslissingen die we nemen. En steeds weer klinkt het uitgangspunt van behoud en herstel door, maar niet het onmogelijke. Zo komen we tot een keuze aan restauratiematerialen waarmee de stukadoor zijn werk naar behoren kan doen. En wat minstens zo belangrijk is: dat het eindresultaat ook goed wordt beoordeeld door de opdrachtgever.
De latere toevoegingen van stukjes hout en pvc-pijp worden tijdens de werkzaamheden wel verwijderd. Deze worden niet gehandhaafd als overblijfsel van een eerdere onderhoudsbeurt.
Het kost veel tijd om alle materialen uit te zoeken. Het blijft voor een belangrijk deel pionieren in de markt van materiaalhandelaren en producenten. Vooral het gedrag op wat langere termijn van de te gebruiken materialen is niet altijd te doorgronden. Dit stelt ons steeds weer voor de vraag of we het goed doen en of de reparatiemortels voldoende duurzaam zijn om weer voor minimaal 50 jaar mee te kunnen. Het blijft in deze gevallen altijd een samenspel tussen het materiaalgebruik en de zorgvuldigheid van de vakman die de applicaties aanbrengt. Een geruststellende gedachte is wel dat we weten dat al het werk na de restauratie weer wordt geschilderd. Een conserverende werking waar we dankbaar gebruik van zullen maken.

Van theorie naar praktijk: de oplossingen

Op een deel van het ornamentwerk zijn verflagen aangebracht. Om het restauratiewerk op te kunnen bouwen is het noodzakelijk dat de ondergrond voldoende wordt gereinigd om hechting van materialen te kunnen garanderen. De proeven om de verflagen mechanisch te verwijderen mislukken. De keuze wordt gemaakt om de vlakken schoon te maken waar gerestaureerd moet worden. Dit is het werk van de stukadoor. Het overige schoonmaakwerk wordt aan de schilder overgelaten.

Plinten rondom het gebouw
De plinten rondom het gebouw zijn deels in hardsteen uitgevoerd en deels in een harde gefrijnde cementpleister. De voorgevel en de aansluitende stukken van de zijgevels zijn in hardsteen. Daarna gaat de plint over in cementsteen. Deze cementstenen plint heeft te lijden gehad van inwatering door slecht functionerende hemelwaterafvoeren en optrekkend vocht en de daarmee gepaard gaande zoutuitbloei (fig. 13) .
De aanpak van herstel is hier zeer terughoudend geweest. Enerzijds om te voorkomen dat er onnodig origineel kamwerk zou verdwijnen, anderzijds vanwege het kostenaspect. De aangetaste delen zijn uitgehakt. De ondergrond heeft tijd gehad om te drogen ter plaatse van de lekkages. Daarna is dit cementwerk gerepareerd met Betofix RM van Remmers. Ook het kamwerk dat moest worden bijgemaakt is in deze mortel gemaakt. De keuze viel op deze mortel vanwege het gemak waarin er laag in laag kon worden doorgewerkt zonder dat er vervormingen optraden. Voor het repareren van het frijnwerk een bijkomend voordeel. Om het nieuwe kamwerk goed op het bestaande aan te laten sluiten heeft de stukadoor hier apart een kam voor gemaakt.
Nadat de restauratie was afgerond, bleek dat de ondergrond toch meer problemen gaf. Dit heeft er in geresulteerd dat jaarlijks wordt gekeken welke schade er aan de plint is opgetreden door zoutuitbloei en deze dan partiëel te herstellen. Tot op heden zijn deze reparaties op zeer beperkte schaal uitgevoerd.

Waterslagen
Op de waterslagen is geen verf aangebracht. De vervuiling van meer dan een eeuw wordt verwijderd door de waterslagen te stralen met olivinezand bij een druk die ligt tussen de 3 en

6 bar. Om dit te kunnen doen zijn verschillende proeven met deze techniek genomen. Ook zijn proeven met neutrale en agressieve schoonmaakmiddelen genomen. De keuze viel uiteindelijk toch op het stralen. De relatief lage druk en de beperkte hoeveelheid water die hiervoor werd gebruikt en het resultaat gaven hierin de doorslag. Slechts het vuil op de zeer harde cementlaag werd verwijderd. Op deze schone ondergrond kon de stukadoor de waterslagen restaureren: gaten vullen en scheuren dichtzetten (fig. 14) .
Nadat de ondergrond was schoongemaakt, zijn de waterslagen nagelopen op uitspoelingen en scheuren. De uitspoelingen zijn ontstaan in de loop der tijden. Geen van de scheuren gaf aanleiding tot constructief herstel van muurwerk of fundamenten. Ook hier was voor zover zichtbaar de schade ontstaan door de tand des tijds. De aangetroffen uitspoelingen werden uitgehakt en met een betonreparatiemortel aangeheeld. De keuze is in dit geval gevallen op Betofix RM van Remmers bouwchemie. De grote scheuren werden eerst uitgeslepen om schone hechtvlakken te krijgen. Daarna werden ze ook opgevuld met Betofix RM. Voor het inwassen van de haarscheurtjes is de keuze gevallen op een betonreparatiemortel spo BRS-12 van Strikolith.
De kleurverschillen die zijn opgetreden door toepassing van verschillende reparatiemortels zijn door de schilder weggeschilderd. Ook de waterslagen hebben een tweetal lichtgrijze verflagen gekregen, zowel uit esthetisch oogpunt als uit duurzaamheid.

Arkels
Delen van de arkels waren reeds naar beneden gekomen (fig. 15) Indrukwekkende scheurvorming in de arkels gaf de noodzaak aan om de arkels opnieuw te verankeren aan de gevel. Het ter plaatse restaureren genoot de voorkeur boven demontage en na restauratie herplaatsing. Bovendien werd getwijfeld aan de mogelijkheid tot zorgvuldige demontage. Het consolideren van de arkels is gebeurd door chemische ankers dwars door de arkels heen te boren en vast te zetten in het achterliggende metselwerk. Het boren van deze gaten met een holle boor gaf gelijk ook informatie hoe de opbouw en kwaliteit van de kern was (fig. 16). Los van enkele scheuren bleek deze overeen te komen met het afgevallen deel van een van de arkels: een kern van gebroken baksteen vermengd met grint, zand en cement. Het oppervlak bestond uit een zeer harde cementpleister dat was afgewerkt met enkele verflagen.
Na het aanbrengen van de chemische ankers, Fischer injectiemortel FIS VT 380 C, heeft de stukadoor voor de verdere samenhang de scheuren vol laten lopen met een langzaam uithardende epoxymortel, Curaton BL 875 van Prochemko. De arkels zijn aan de binnenzijde van het metselwerk ook nog verankerd met roestvaststalen strips.
De beschadigingen aan het oppervlak zijn weggewerkt met dezelfde mortel die ook is gebruikt voor de waterslagen: BRS-12 van Strikolith.

Neogotische traceringen op de voorgevel
Het reparatiewerk aan de gotische traceringen boven de vensters bestaat uit aanhelingen ter plaatse en nieuwe gietstukken die ter plaatse worden gemonteerd. De aanhelingen zijn uitgevoerd in Remmers Betofix RM. Deze mortel blijkt bij uitstek geschikt te zijn om laag in laag door te kunnen werken zonder dat vervormingen optreden. Voor het nagieten van ontbrekende delen worden bestaande delen afgemald (fig. 17). Het gietwerk bestaat uit een epoxygemodificeerde en kunststofvezel versterkte mortel op basis van een portlandcement. Succesvolle experimenten met het gietwerk zijn gedaan met Curacem 108 van Prochemko. Uiteindelijk is hier de keuze gemaakt voor Concover ECC van JinT bouwchemie, een product met vergelijkbare eigenschappen als de Curacem 108 van Prochemko. Concover ECC is een epoxy-gemodificeerde mortel die uit drie verschillende componenten is opgebouwd: twee wateremulgeerbare epoxy-componenten en een mortel op basis van portlandcement. In dit geval de portlandcement van Deys, natspuitmortel Betec 322. De korrelopbouw in de mortel is 0-4 mm. Door de hoeveelheid water te variëren kan deze mortel zowel als gietmortel worden toegepast maar ook in aarddroge vorm in een mal worden gedrukt en aangestampt. De componenten in de mortel zijn zodanig gekozen dat er geen krimp

optreedt. Belangrijk in de toepassing is ook dat de mortel vrij van chloriden is. In de aarddroge toestand worden ook de naden en andere onvolkomenheden dichtgepleisterd.

Figuur 9: Detail geprefabriceerde kroonlijst waarbij de gietstukken en naden zichtbaar zijn

Figuur 10: Detail van de arkel waaruit de opbouw van het gietstukblijkt. Het lijstwerk is los van de kern gegoten en naderhand er tegenaan geplakt

Figuur 11: Detail Huis De Schaffelaar. Tussen het steigerwerk door is te zien dat de balustrade een kern bevat van metselwerk. Daaroverheen is een pleisterlaag aangebracht

Figuur 12: Uitloging van gegoten onderdelen

Degradatie van de plint door inwatering en zoutuitbloei

Figuur 13: Zoutuitbloei in de plint waardoor er stukken frijnwerk worden afgedrukt van de bakstenen ondergrond

Figuur 14: Gezandstraalde waterslag waar scheuren met een betonreparatiemortel zijn dichtgezet

Figuur 15: Schade aan de arkels. Zichtbaar is de opbouw en de splijting van de arkels

Figuur 16: Gedeelte van een boorkern uit een arkel ten behoeve van het aanbrengen van chemische ankers. De aangetroffen holtes zijn met een kunstharsmortel gevuld.

Figuur 17: Ontbrekende delen aan de neogotische traceringen zijn aan de hand van nog aanwezig materiaal afgemald en afgegoten en weer aangebracht

Figuur 18: Het uiteenvallen van de traceringen onder de afdeklijst van de balustrade

Figuur 19: De gietmallen om de traceringen weer terug te kunnen brengen

Figuur 20: Het dichtzetten van de naden en het wegwerken van onvolkomenheden door de stukadoor

Figuur 21: Het eindresultaat in detail

Balustrade op de voorgevel
De balustrade met de cirkelvormige ornamenten geeft meer problemen. Oorspronkelijk zijn we uitgegaan van maximaal behoud van het aanwezige materiaal. Bij het demonteren van de bovenregel blijkt dat grote delen in heel kleine stukjes uiteenvallen (fig. 18). Er valt helaas nauwelijks meer iets te redden van het oorspronkelijke materiaal. De kolommetjes tussen de cirkelvormige ornamenten zijn in het algemeen nog goed en kunnen worden gehandhaafd. De prefab-bovenregels verkeren in een wisselende conditie. Sommige delen worden vervangen en andere gerepareerd. Voor de cirkelvormige ornamenten worden twee mallen gemaakt (fig. 19). Deze ornamenten worden in Concover ECC afgegoten. Na het herplaatsen van de nieuwe gietstukken wordt de balustrade weer bijgewerkt met dezelfde gietmortel zoals dat ook bij de eerder beschreven onderdelen is gebeurd (fig. 20).

Afwerking
De kleurverschillen in de gebruikte materialen worden uiteindelijk door de schilder weggewerkt. Alles wordt in één kleur overgeschilderd. De keuze van de verfkleur berust op het uitgevoerde kleurenonderzoek. De verfanalyse laat zien dat de eerste afwerklaag bestond uit een krijtlaag met lijnolie. De daaropvolgende lagen een loodwit met een weinig meekrap. Dit geeft een zachtroze kleur aan het ornamentwerk. Als drager van pigment is een noten- of papaverolie gebruikt. Deze oliesoorten verkleuren nauwelijks. De laag die zichtbaar was op het ornamentwerk voor de restauratie was een leisteenverf met veel kalk, wit tot grauwwit.
Voor het afzwakken van het reparatiewerk aan de cementen plint is gekozen om deze plint in een lichtgrijze kleur te schilderen.

Uitvoering
De firma Delstuc uit Monster is met het restauratiewerk aan het cementwerk in het najaar van 2004 begonnen. Omdat hier met kunsthars-gemodificeerde produkten is gewerkt, was het noodzakelijk de winterperiode te overbruggen. Het verwerken van deze produkten op een koude ondergrond was bijna onmogelijk. In allerlei verwerkingsvoorschriften wordt het ontraden om beneden de 5 °C deze producten te verwerken. Naarmate de ondergrond kouder werd, nam ook de stroperigheid toe. Voor een kwalitatief goed resultaat hield dat in ofwel stoppen ofwel inpakken en verwarmen. Deze laatste oplossing was, gelet op de stand van het werk, zondermeer een zeer kostbare oplossing. Gekozen is toen om in het voorjaar van 2005 het werk af te maken.
Het restauratiewerk overziend blijkt dat met name de speurtocht naar goed te gebruiken materialen veel tijd heeft gekost. Ook het maken van proefstukken door de stukadoor om te zien op welke wijze de materialen kunnen worden gebruikt kostte veel energie. Steeds weer blijkt bij dergelijk handwerk dat de hand van de vakman bepalend is voor het product dat wordt gebruikt en het eindresultaat dat wordt verkregen (fig. 21).

Referenties

W.V.J. Freling Huis *Ter Horst Voorschoten een bijzondere gevelrestauratie met neogotische stucdecoraties* in Mebest, nr 6. 2005 15-22, incl. fig.
M. Stokroos *Terra-cotta in Nederland, het gebruik van terra-cotta en kunststeen in de 19e eeuw*, Amsterdam 1985

Catalogi: Silberling, Bennewitz

De betrokken partijen bij deze restauratie zijn:
Architectenbureau Rothuizen van Doorn ’t Hooft uit Middelburg

Freling advies voor de begeleiding van de restauratie van de gevelornamentiek
Firma Delstuc uit Monster als uitvoerend restauratie-stukadoor
En de technische ondersteuning van diverse leveranciers

Samenvatting

In 2004 en 2005 is het casco van het neogotische jachtslot Ter Horst gerestaureerd. Een bijzondere restauratie-opgave waren de neogotische versieringen aan de voorgel. Deze bestonden grotendeels uit vooraf vervaardigde en in cement gegoten elementen die middels ingenieuze nokken en profielen in elkaar pasten. Bij de restauratie zijn constructieve verankeringen aangebracht in de arkels en is het ontbrekende werk bijgemaakt. De traceringen in de balustrades zijn opnieuw gegoten in beton.
Dit werk geeft een goed beeld van het samenspel van architect, adviseur en restauratie-stukadoor. Essentieel om te komen tot een hoogwaardige en duurzame restauratie van versieringen die verder nog niet zijn aangetroffen in Nederland.
Tekst en foto's: Wijnand Freling

KAAIMUUR TE ZEEBRUGGE - IMPACT VAN MONITORING EN PREVENTIEVE INGREPEN OP HET BEHOUD

Luc Schueremans[1], Dionys Van Gemert[1], Manuel Friedel[2], Sabine Giessler-Blank[3], Kris Brosens[4], Sven Ignoul[4]
[1]Departement Burgerlijke Bouwkunde, KULeuven
[2]Evonik Degussa GmbH Rheinfelden Rheinfelden
[3]Evonik Goldschmidt GmbH, Essen
[4]Triconsult NV

Abstract

Deze bijdrage heeft voornamelijk een structurele invalshoek. Ze richt zich in een eerste luik op het nut en belang van preventieve maatregelen en monitoringtechnieken in het behoud van (gewapend) betonnen structuren. Uitgaande van de belangrijkste schadeoorzaken en schademechanismen wordt nagegaan welke elementen daaruit kunnen worden opgemeten. Dit verloopt bij voorkeur op een niet-destructieve werkwijze.
In een tweede luik wordt het gebruik, het nut en de impact van preventieve maatregelen geïllustreerd voor de kaaimuur te Zeebrugge. Het gaat hier niet om een historisch gebouw en aldus ligt de nadruk voornamelijk op de methodiek die wordt toegepast bij dit type van monumentale betonconstructies. De effectiviteit van deze preventieve maatregelen wordt getoetst op basis van herhaaldelijke meetcampagnes in site.
Chloride indringing is een van de belangrijkste oorzaken van wapeningscorrosie in gewapend betonnen structuren, zeker voor dat type van constructies dat in hoge mate is blootgesteld aan chloriden, zoals constructies aan de kust, offshore constructies of zwembaden. De kaaimuur te Zeebrugge, België, werd preventief beschermd tegen chloriden indringing door middel van een waterwerende behandeling, onmiddellijk na de constructie ervan in 1993. Daartoe werd gebruik gemaakt van een alkyl-tri-ethoxsilaan, waarvan de efficiëntie vooraf in een laboratorium onderzoek werd getoetst. Om de effectiviteit van deze waterwerende behandeling te verifiëren, werden 3 opeenvolgende proefcampagnes uitgevoerd, in 1996, 1998 en 2005. Op basis van boorkernen, ontnomen uit de kaaimuur, werden de chloridenprofielen opgesteld als functie van de diepte en tijd. Daarbij was het mogelijk om de vergelijking te maken met een niet-behandelde zone, die als referentie werd gehanteerd. Uit de beschikbare datareeks kan een inschatting gemaakt worden van de lange termijn efficiëntie van dit type behandeling.
In een laatste deel ligt het accent op het hergebruik van een gewapend betonnen constructie die wel tot het historische erfgoed behoort, de Vuurmolens te Overijse (1902). Bij deze herbestemming, die gepaard gaat met hogere dienstlasten, is een belangrijke meetcampagne uitgevoerd om de huidige sterkte te begroten. Deze meetcampagne, samen met het verwerken van de resultaten, hebben geleid tot het ontwerpen van de gepaste consolidatie- en versterkingstechnieken. Aldus heeft het “meten is weten” in belangrijke mate bijgedragen tot het “beton behouden”.

Sleutelwoorden: chloride penetratie, preventieve behandeling, monitoring, beton behouden, waterwerende behandeling, levensduur

Inleiding

“Meten is weten” wordt vaak als leuze gehanteerd. Belangrijk hier is in eerste instantie te onderkennen dat monitoring vraaggerelateerd is. Waarin ben ik geïnteresseerd? Wat wil ik meten? Van zodra deze vraag beantwoord is, kan worden nagegaan welke middelen ter beschikking staan om deze parameter op te volgen. Hoe kan dit worden gemeten? Op deze

wijze wordt de garantie geboden dat op een intelligente manier wordt gemeten (en wordt omgesprongen met het beschikbare budget). Daarom is het belangrijk vooraf in kaart te brengen welke schade(parameters) of schade-evolutie relevant zijn voor (gewapend) beton en om na te gaan welke technieken daartoe voorhanden zijn, zinvol zijn of eerder zinloos zijn.
Hierna wordt kort een overzicht gegeven van schade bij (gewapend) beton, zodat achteraf de relevantie van monitoring technieken daaraan kan worden afgetoetst. Ze worden vervolgens geïllustreerd aan de hand van 2 reële case studies, zodat het vraaggerelateerde aspect duidelijk op de voorgrond treedt.

Schadeprocessen bij gewapend beton

De meest optredende gebreken bij gewapend betonnen constructies kunnen in een aantal categorieën ondergebracht worden. Vaak gebeurt het dat verschillende categorieën tegelijk optreden, aanwezig zijn op verschillende plaatsen in de structuur of elkaar in de hand werken (Van Gemert and Schueremans, 1997; Figeys et al., 2007, TV 231, 2007). Enerzijds kan het beton zelf onderhevig zijn aan schade door velerlei oorzaken:

- Mechanisch: impact- of overbelasting, (differentiële) zettingen, explosies, trillingen;
- Chemisch: AAR (alkali-aggregaat-reactie) zie ook annex, agressieve stoffen, sulfaten, zouten, zacht water), biologische reacties (biogene zwavelzuur aantasting);
- Fysisch: vorstdooi cycli, thermische werking, dooizouten, krimp, erosie/slijtage.

Anderzijds kan de schade aan het beton veroorzaakt worden door wapeningscorrosie, zie ook annex. Deze wordt beïnvloed door:

- Aanwezigheid van vocht (door slecht functionerende waterafvoer, door conceptiefouten, of andere);
- Carbonatatie (zie ook annex);
- Zwerfstromen;
- Corrosiebevorderaars: chloriden initieel toegevoegd bij het mengsel, of uit de omgeving die aanleiding geven tot putcorrosie (zie ook annex).

Transportmodellen - schademechanismen

De schademechanismen bij beton zijn gerelateerd aan transport van waterdamp, water, CO_2 en zouten doorheen de beschermende laag: de betondekking. Wanneer een preventieve bescherming van het beton wordt beoogd, zijn het deze parameters waarop de preventieve bescherming kan inspelen om de levensduur van het (gewapend) beton te beïnvloeden.
Het modelleren van het transport is complexe aangelegenheid (Anne-Séverine Poupeleer, 2006), maar voor een aantal componenten worden vaak eenvoudige modellen gehanteerd die bruikbaar blijken in de praktijk. Het transport van CO_2 en chloriden doorheen de betondekking is een diffusiegestuurd proces.

Zo kan de diepte van het carbonatatiefront worden begroot door:

$$x_c = A\sqrt{t} \tag{1}$$

Hierin is: x_c: de diepte van het carbonatatiefront, A: de diffusiecoëfficiënt voor CO_2 in het beton, t: de tijd.
Het transport van chloriden kan vereenvoudigd worden beschreven aan de hand van:

$$C_i(x,t) = C_0 + (C_S - C_0).\mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \tag{2}$$

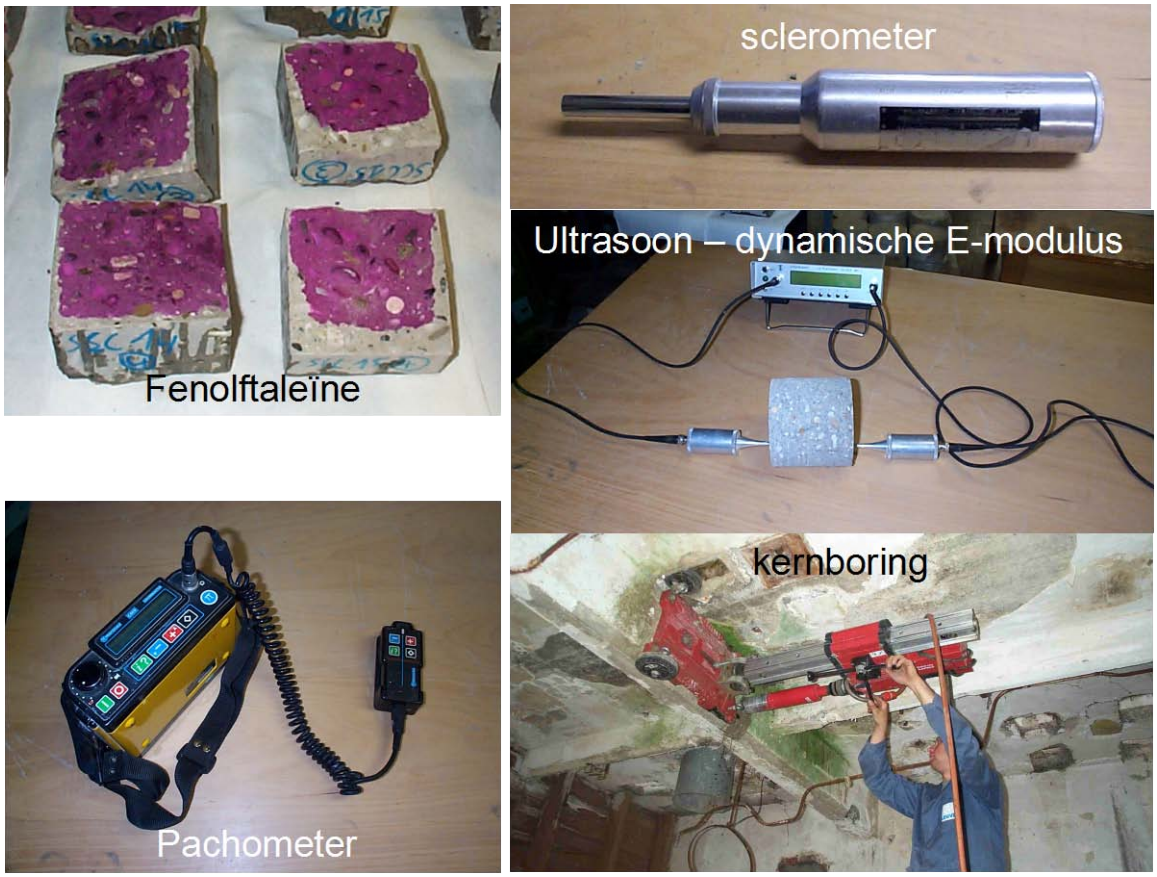
Hierin is: $C_i(x,t)$: de chloridenconcentratie op een diepte x en tijdstip t; C_0: de initiële chloridenconcentratie in het beton, C_S: de chloridenbelasting aan het oppervlak en D de diffusiecoëfficiënt voor Cl^--ionen in het beton.
Het gunstig effect van bijkomende betondekking en de kwaliteit van de betondekking zijn hierbij duidelijk. Een grotere betondekking vertraagt aanzienlijk de tijd die vereist is voor schadelijke elementen om de wapening te bereiken. De kwaliteit van de betondekking (waaronder de porositeit) beïnvloedt de diffusiecoëfficiënten A en D en daarmee rechtstreeks het beschermende effect op het achterliggend wapeningsstaal.
De duurzaamheid van gewapend beton wordt bepaald door de weerstand tegen diverse chemische en fysische processen. In normaal beton verkeert de wapening in een alkalisch milieu met een pH van 12.5 tot 13 en vormt er zich een beschermende patinalaag op het staaloppervlak. Deze laag met een dikte van nagenoeg 10 nm, voorkomt het corrosieproces. Onder invloed echter van het atmosferische CO_2 wordt de vrije kalk in het beton gebonden, waarbij het alkalisch milieu verloren gaat. De pH van het beton daalt hierbij tot waarden van 8.5 tot 9 (carbonatatie, zie ook annex). Wanneer de carbonatatiediepte gelijk is aan de betondekking, kan de wapening gaan roesten.
Voor corrosie is de aanwezigheid van vocht en toetreding van zuurstof uit de lucht nodig. Voor beton in de buitenlucht is voldoende vocht aanwezig om dit proces te onderhouden. De zuurstof kan tevens doorheen de betondekking toetreden.
Chloorionen afkomstig van contaminanten (maritieme klimaat, zwembaden, dooizouten), reageren slechts weinig met de vaste fase van het beton en zijn in de poriën voornamelijk terug te vinden als vrije chloriden. Door concentratieverschillen aan chloriden aan het oppervlak en dieper in het beton, zullen de chloriden geleidelijk aan migreren naar de wapening toe. Wanneer vrije chloriden in het beton aanwezig zijn, kan de corrosie ook in het alkalische milieu doorgaan. Deze agressieve stoffen in het beton geven aanleiding tot een snel verlopende corrosie, putcorrosie genoemd.
De reactie van alkalis met reactieve aggregaten (AAR), is in tegenstelling tot voorgaande, geen oppervlaktereactie. Het proces speelt zich af in de betonmassa. De alkalis (Na^+, Ka^+ komen in het cement voor onder de vorm van oxiden) reageren met de reactieve bestanddelen van het aggregaat wanneer het gehalte aan alkalis een zekere grenswaarde overschrijdt. De gevormde alkali-silikaatgel zwelt door opname van water ($CaSiO_3.mH_2O$) en veroorzaakt expansieve krachten die het beton van binnenuit stukdrukken. De mate waarin deze reactie optreedt, wordt mede bepaald door de vochtigheid van het beton. Ook hier is de aanwezigheid van water in het beton de bezwarende parameter.
Het zijn telkens de expansieve reacties (vorming van corrosieproducten, gel-vorming) die trekspanningen in het beton veroorzaken. Overschrijden deze trekspanningen de treksterkte van het beton, dan zal de betondekking barsten en scheuren gaan vertonen. In de gevormde barsten en scheuren verloopt de carbonatatie van het beton onder invloed van CO_2 sneller door lokale blootstelling aan de omgevingslucht. Zo ook zal de toevloed van water versneld plaatsvinden. Het beschermende effect van de betondekking gaat verloren waardoor het verval nog versnelt. Finaal zal de betondekking afspringen, waardoor de wapening volledig is blootgesteld zonder bijkomende bescherming.

Monitoringtechnieken voor (gewapend) beton

Schade aan beton op termijn is in vele gevallen te wijten aan corrosie van de wapening, eventueel versneld door aanwezige zouten. De beschikbare technieken zijn dan ook in grote mate toegespitst op detectie en lokalisatie van de wapening in het beton (bepalen van betondekking), meting van het carbonatatiefront, analyse van de chemische samenstelling en aanwezige zoutbelasting die het corrosieproces versnellen, Tabel 1, Figuur 1. Daarmee wordt getracht de actoren van de schade in kaart te brengen. Verschillende van deze technieken en hun nut zullen in de behandelde gevallenstudies aan bod komen.

Techniek	Evaluatie van techniek	Gebruik in case study
Visuele inspectie (met inbegrip van expertsystemen)	++	1
Historisch onderzoek	++	
Carbonatatiefront – phenolftaleïne	++	1
Chloridenaantasting: chemische analyse (marine omgeving – dooizouten)	++	1
Betonsterkte: Sclerometer (NDT) Kernboring (DT) Via dynamische E-modulus (Ultrasoon) - NDT	 ++ ++ ++	 2 2 2
Gammagrafisch onderzoek (NDT	+/-	
Thermografie (NDT)	+/-	
Pachometer - wapeningsdetectie (NDT)	++	
Legende: ++ bijzonder zinvol; +: zinvol; +/- bruikbaar; -: minder zinvol; --: totaal zinloos; (N)DT: (Niet-)Destructieve Techniek		

Tabel 1: Monitoring en proeftechnieken – (gewapend) beton

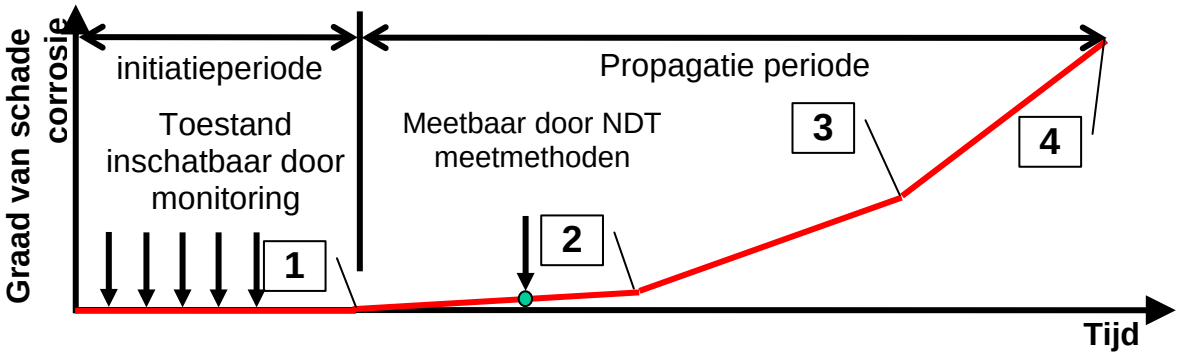


Figuur 1: Monitoring en proeftechnieken – (gewapend) beton

Het belang van monitoring is een tijdige schadedetectie. De schade zal versneld optreden en gepaard gaan met steeds grotere consequenties en kosten. Het is van cruciaal belang tijdig in te grijpen, en verdere gevolgschade aldus niet af te wachten. Figuur 2 geeft het verloop van de schade schematisch weer als functie van de tijd. Daarin zijn een aantal mijlpalen in het schadeproces aangegeven (initiatieperiode tot depassivatie van de

betonwapening en propagatieperiode tot finaal structureel bezwijken van de structuur), onder de vorm van het bereiken van grenzen (grenstoestandsfuncties):

1. depassivatie van de wapening;
2. scheurvorming;
3. afspringen van de betonwapening;
4. structureel falen door gebrek aan hechting of door reductie van de dwarsdoorsnede van de wapening.



Figuur 2: Schade-evolutie in gewapend beton

Voorbeeld 1 – kaaimuur te Zeebrugge

De nieuwe container terminal in de haven van Zeebrugge is gebouwd in 1993. Onmiddellijk na de bouw werd deze gewapend betonnen constructie behandeld met een waterwerende bescherming als een preventieve beschermingsmaatregel. Dit type van structuur is onderhevig aan de chloridenbelasting van de maritieme omgeving, niet alleen onder het niveau van de getijdenwerking, maar tevens in de getijdenzone als bovenop de kademuur.
De effectiviteit van de waterwerende behandeling is vooraf bestudeerd in het Laboratorium Reyntjens van K.U.Leuven. Gebaseerd op een experimentele vergelijkende studie, werd in 1993 besloten om Protectosil® BH N (het vroegere Dynasylan® BHN: alkyltriethoxysilaan) te gebruiken.
Om de effectiviteit van de waterwerende behandeling na te gaan, werden tot op heden 3 opeenvolgende meetcampagnes uitgevoerd: in 1996, 1998 en in 2005, dus na respectievelijk 3, 5 en 12 jaar blootstelling in reële maritieme omgeving aan de Belgische Noordzee kust (Schueremans en Van Gemert, 1996, 1998 en 2005; Schueremans et al., 2006, 2008).
Tijdens elk van deze meetcampagnes worden kernen geboord op verschillende locaties in de behandelde en niet-behandelde locaties. Op basis van deze kernen worden de chloridenprofielen in het beton bepaald. Dit laat toe om de reële effectiviteit van de waterwerende behandeling op een bepaald moment in de tijd alsook in functie van verschillende locaties te bepalen.
Bijkomend worden de verkregen data gebruikt om de chloridenpenetratie in de structuur, waarvoor de 2de diffusiewet van Fick wordt gehanteerd, te modelleren. Om rekening te houden met de spreiding op de data wordt een probabilistische procedure gevolgd. De methodologie laat toe om een schatting te maken van de resterende levensduur van de structuur, zowel voor de behandelde als niet-behandelde locatie. De methodiek en resultaten worden voorgesteld, met nadruk op de impact van het meten op de beoordeling van de preventieve behandeling.
De productie, applicatie en werkingsmechanismen van waterwerende producten komen elders uitgebreid aan bod (Schueremans et al., 2008). Voor een langdurige en efficiënte bescherming van het beton, is een voldoende diepe indringing in het beton van het waterwerende product noodzakelijk. In labomstandigheden werd een penetratiediepte van 6 tot 9 mm opgetekend. De resultaten van deze voorafgaande proeven zijn weergegeven in

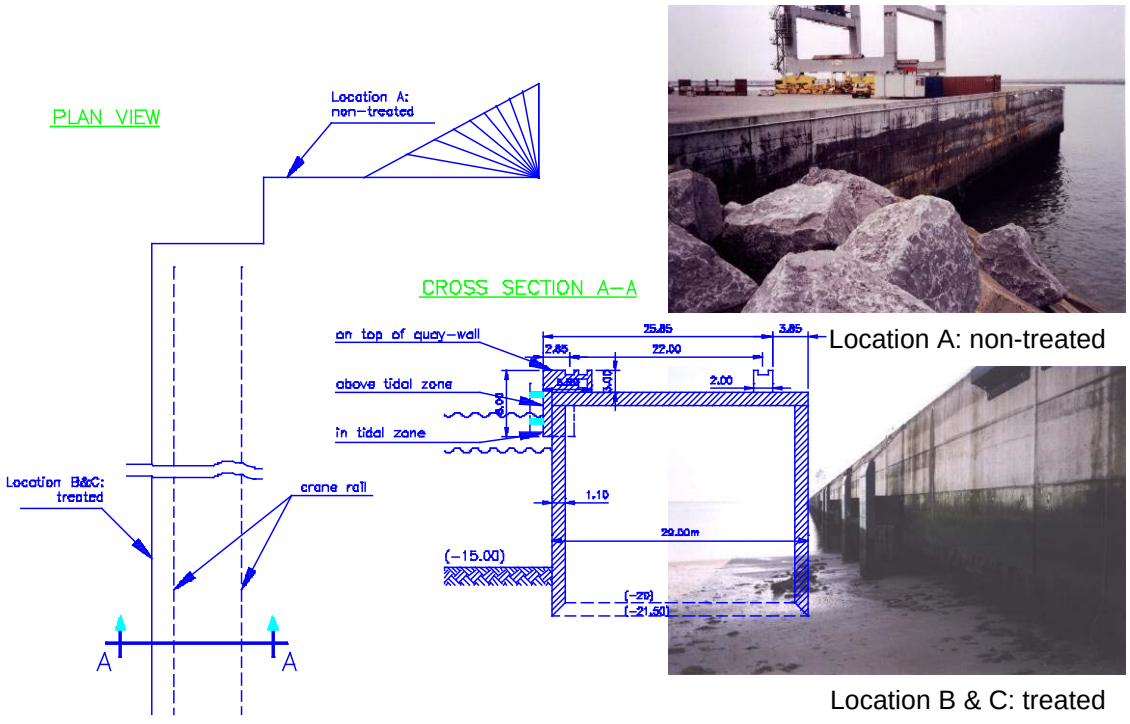
Tabel 2. Een behandeling in labo bestond uit een onderdompeling in het waterwerende product gedurende een periode van 15 seconden. Het product verbruik (g/m²) is eveneens aangegeven.

Staal nr.	Tweede behandeling na	Penetratie diepte [mm]	Onderdompeling [s]	Verbruik [g/m^2]		
				1ste behandeling	2de behandeling	Totaal
1	2 dagen	6	2 x 15	138	187	325
2	4 dagen	7	2 x 15	169	285	454
3	7 dagen	8	2 x 15	89	182	271
4	7 dagen	8	2 x 15	102	204	306
5	7 dagen	9	2 x 60	156	244	400

Tabel 2: Penetratie diepte en productverbruik (g/m²) als functie van de tijd tussen eerste en tweede behandeling

Kaaimuur te Zeebrugge – achtergrond en in site meetcampagne

Figuur 3 geeft een overzicht van de kademuur die werd opgetrokken op afgezonken funderingen (caissons). Om praktische redenen werd beslist om het hydrofoberingsproduct aan te brengen met behulp van een hooggeconcentreerde solventvrije component gebaseerd op iso-butyl-triethoxy-silaan. Bedoeling is het preventief vermijden van schade veroorzaakt door chloriden indringing, putcorrosie en alkali-aggregaat-reactie (Van Gemert, Schueremans, 1997).



Figuur 3: Planzicht en dwarsdoorsnede van de kademuur te Zeebrugge

Op de werf werd volgend applicatieschema gehanteerd, gebaseerd op de voorafgaande resultaten verkregen in het laboratorium:

- Een eerste applicatie van het waterwerende product onmiddellijk na het ontkisten. Dit voorkomt de droging van het oppervlak alsook een eventuele initiële indringing van zeewater;
- Een tweede applicatie na 7 dagen, om een diepe productpenetratie in het beton te bewerkstelligen.

Het waterwerende product werd aangebracht door airless versproeien op lage druk met behulp van een plunjerpomp, Figuur 4. Het verbruik werd globaal geraamd op 0.35 liter per m² (300 g/m²), wat goed overeenkomt met het verbruik dat in labo werd vooropgesteld om een voldoende indringing in het beton te kunnen garanderen, noodzakelijk voor duurzame bescherming, Tabel 2.

Om de effectiviteit van deze waterwerende behandeling te beoordelen, werden tot op heden 3 meetcampagnes uitgevoerd, respectievelijk na 3, 5 en 12 jaar blootstelling. De effectiviteit kan mede objectief beoordeeld worden omdat een gedeelte van de kademuur niet werd behandeld met een waterwerend product (locatie A, Figuur 3).

De vergelijkende studie bevat resultaten van verschillende zones:

- Niet-behandeld – in getijdenzonde (locatie A) – effect van getijden + aanwezigheid van algen;
- Niet-behandeld – boven getijdenzone (locatie A) – effect van spatwater;
- Behandeld – in getijdenzone (locatie B);
- Behandeld – boven getijdenzone (locatie B);
- Behandeld – bovenop de kademuur (locatie C) – contact met zeelucht.

Daarmee gaat de aandacht naar de effectiviteit van de behandeling (onderlinge vergelijking tussen locatie A en B) alsook naar het verschil dat wordt opgetekend onder verschillende belasting (locatie A, B en C).

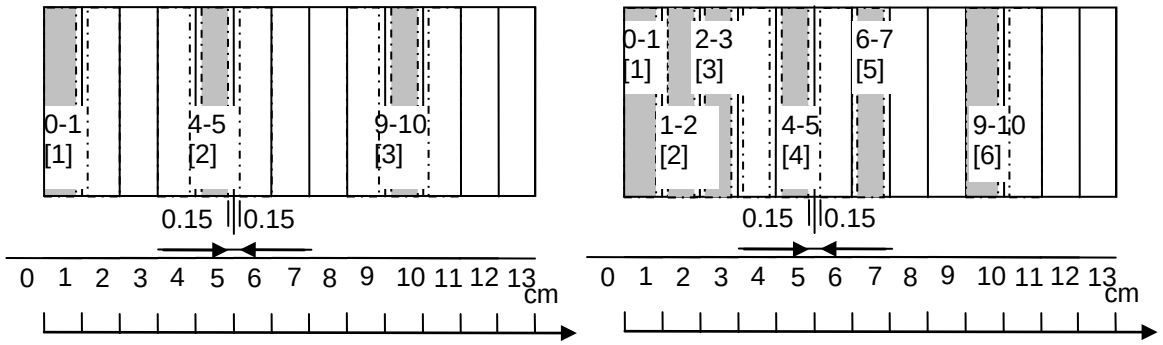
Figuur 4: Airless versproeien op lage druk met behulp van een plunjerpomp

Monitoring campagne

Tijdens de opeenvolgende meetcampagnes werden betonnen kernen uitgeboord (diameter = 50mm) telkens op de verschillende locaties. Volgende proeftechnieken werden gebruikt als basis voor de beoordeling van de efficiëntie:

- Visuele interpretatie van de penetratiediepte van het hydrophoberingsproduct te bepalen op basis van het bevochtigen van een vers gebroken betonoppervlak;
- Opmeting van de betondekking;
- Meting van de carbonatatiediepte op de site onmiddellijk na het uitboren van de kernen alsook de dag erna in het labo voor een objectieve vergelijking;
- Chemische analyse ter bepaling van:
  - Het cementgehalte;
  - Het water- en zuuroplosbaar chloridengehalte op verschillende dieptes ten opzichte van het buitenoppervlak om zo het profiel van de chloridenpenetratie te kunnen

samenstellen. Daartoe worden de kernen in schijfjes verzaagd, zoals aangegeven in figuur 5.



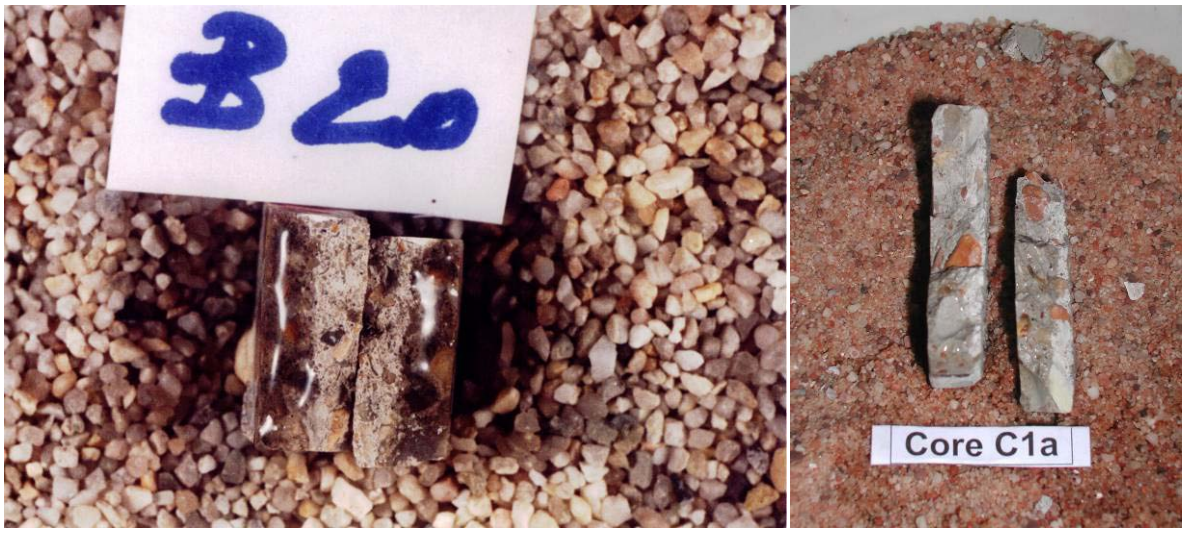
Figuur 5: Bepalen van de chloridenconcentratie op verschillende dieptes ten op zichte van het betonoppervlak: 3 dieptes (links), 6 dieptes (rechts)

Penetratie diepte – hydrofoob – hydrofiel gedrag

De betonschijfjes hebben over het algemeen een dikte van 7 tot 9 mm, steeds voldoende om de penetratiediepte visueel vast te stellen. De overgang tussen hydrofoob en hydrofiel gedrag is veelal duidelijk visueel waarneembaar, Figuur 6. De absorptie van water in het hydrofiele deel geeft een duidelijke verkleuring van het oppervlak. De opgemeten waarden variëren van 1 tot 6 mm (gemiddelde waarde: 3.5mm). De individuele resultaten zijn in Tabel 3 samengevat. De kolommen 2 en 3 vatten de resultaten van de visuele inspectie samen. De resultaten van een pyrolyse gaschromatografie – patent EP 0 741 293 – is in de laatste kolom weergegeven (Herrmann et al., 1998). Alle proefstukken bevatten een significante concentratie alkyltriethoxysilaan op 2 mm diepte. Zelfs op een diepte van 8 mm wordt een aanwezigheid vastgesteld voor de onderzochte monsters. Gebaseerd op de visuele inspectie kan men aldus afleiden dat, zelfs na 12 jaar, een hydrofobe werking waarneembaar blijft.

Locatie	Visuele inspectie van penetratiediepte [mm]		Concentratie alkyltriethoxysilaan [%w/cem] in functie van de penetratiediepte 0mm 2mm 4mm 6mm 8mm
	2005	1998	1998 [20]
B : boven getijdenzone	4-6 mm	2-6	0,14 / 0,20 / 0,08 / 0,02 / 0,00 0,13 / 0,14 / 0,16 / 0,17 / 0,06 0,07 0,18 0,19
B : in getijdenzone	5-6 mm	3-5	0,12 0,04
C : bovenop kademuur	1-2 mm	1-3	0,15 0,29

Tabel 3: Hydrofobe actie en visuele inspectie door middel van het bevochtigen van een vers gebroken betonoppervlak



Figuur 6: Voorbeeld van visuele vaststelling van de hydrofobe werking door middel van het bevochtigen van een vers gebroken oppervlak (dikte van het schijfje 7 mm) – kern B2 (links:1998) en kern C1 (rechts:2005)

Carbonatiediepte

De carbonatatiediepte wordt bepaald door het vers gezaagde oppervlak met een phenolftaleïne oplossing (opgelost in 1% ethylalcohol) te besproeien. De resultaten zijn in tabel 4 opgelijst. De carbonatatiediepte is nagenoeg onbestaande voor de niet-behandelde locaties. In de behandelde locaties varieert de carbonatatiediepte van 4-6 mm in de getijdenzone, tot 8-12 mm boven de getijdenzone (spatwater) en 12-16 mm bovenop de kademuur (contact met zeelucht). Wanneer de verschillende locaties onderling met elkaar worden vergeleken, is het duidelijk dat de diffusie van CO_2 in het beton versterkt wordt door de waterwerende behandeling. De toegang voor CO_2 wordt verhoogd doordat de waterbarrière in belangrijke mate wegvalt door de waterwerende behandeling.

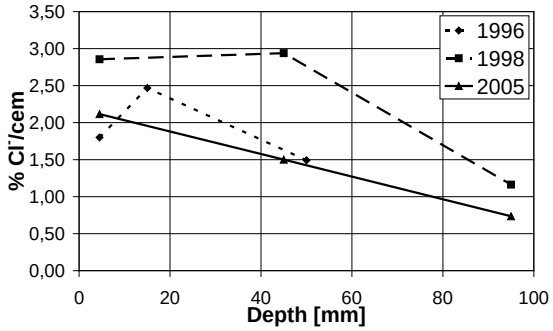
Locatie	Carbonatatie diepte [mm]		
	2005	1998	1996
A: niet-behandeld			
Boven getijdenzone In getijdenzone	0 0	0-0.5 0	0 1
B en C: behandeld met Protectosil® BH N			
Boven getijdenzone In getijdenzone	8-12 4-6	6-12 5-10	4 5
Bovenop kademuur	12-16	5-10	5

Tabel 4: Carbonatatie diepte in niet-behandelde en behandelde locaties

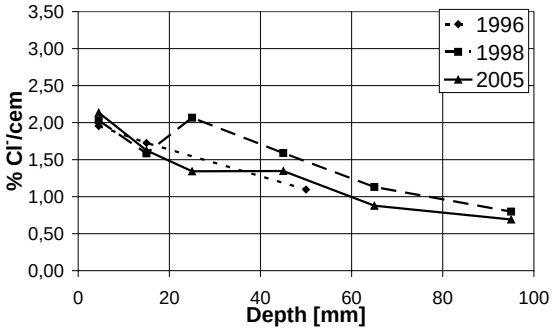
Chemische analyse - water en zuuroplosbaar chloridengehalte

Op basis van de chemische analyse wordt de chemische samenstelling (NBN B15-250:1990) van het beton bepaald, waaruit het meest waarschijnlijke cementgehalte kan worden bepaald. Daarnaast worden twee verschillende chloridenconcentraties bepaald: het wateroplosbare en het zuuroplosbare chloridengehalte.

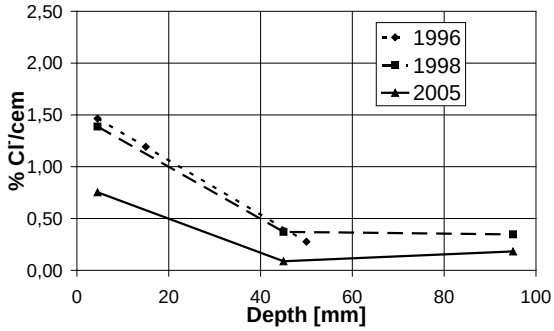
Om de chloridenpenetratie profielen op te kunnen stellen, worden de kernen in schijfjes gezaagd met een gemiddelde dikte van 7-9 mm, Figuur 6, en wordt de concentratie aan chloriden op verschillende van deze schijfjes en dus op verschillende dieptes bepaald. Het wateroplosbare chloridengehalte is gelijk aan het gehalte aan vrije chloriden en een groot deel van de chloriden, gebonden onder de vorm van het Friedelzout ($C_3A.CaCl.10H_2O$) dat in water wordt opgelost gedurende de extractie. Omdat het juist deze wateroplosbare chloriden zijn die het risico op corrosie inhouden, worden enkel deze resultaten hier aangegeven. De resultaten worden weergegeven in de tabellen 7-11, telkens voor de eerder aangegeven 5 locaties, als functie van de diepte ten opzichte van het betonoppervlak en in functie van de tijd (1995, 1998, 2005) waarop de analyse is uitgevoerd. Elke waarde, aangegeven in de figuren, is het gemiddelde van 3 chemische analyses uitgevoerd op naburig geboorde kernen.
Met betrekking tot de weergegeven resultaten zijn enkele bemerkingen over de nauwkeurigheid van de resultaten op haar plaats. De data vertonen een belangrijke spreiding. Deze wordt mede veroorzaakt door de heterogeniteit van het beton (samengesteld uit aggregaten en cement) in relatie tot de relatief kleine schaal van de geboorde kernen (d = 50 mm) en de gemiddelde dikte van de schijfjes: 7-9mm. De variatie in de resultaten wordt mede veroorzaakt door het aantal en de grootte van de aggregaten binnen het geanalyseerde monster. De onzekerheid met betrekking tot de blootstelling is een belangrijke bijkomende factor van onzekerheid (algen, spatwater, verhoogde carbonatatiediepte).



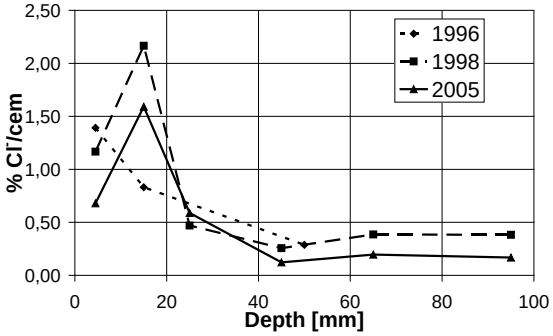
Figuur 7: wateroplosbare chloridengehalte - Locatie A – niet-behandeld – boven getijdenzone (1996-1998-2005);



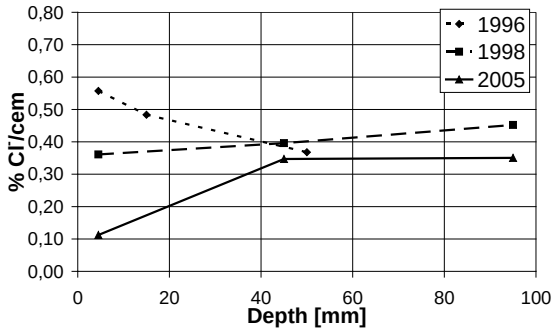
Figuur 8: wateroplosbare chloridengehalte - Locatie A - niet-behandeld – in getijdenzone (1996-1998-2005);



Figuur 9: wateroplosbare chloridengehalte Locatie B – behandeld met alkyltriethoxysilaan - Boven getijdenzone (1996-1998-2005);



Figuur 10: wateroplosbare chloridengehalte Locatie B - behandeld met alkyltriethoxysilaan in getijdenzone (1996-1998-2005);



Figuur 11: wateroplosbare chloridengehalte - Locatie C – behandeld met alkyltriethoxysilaan – bovenop kademuur (1996-1998-2005);

Vanuit deze chloridenprofielen kunnen volgende besluiten getrokken worden:

- Het wateroplosbare chloridengehalte in de niet-behandelde zone bereikt hoge waarden die variëren van 2.2%Cl^-/cem (wateroplosbaar) tot 0.90%Cl^-/cem op een diepte van 95 mm. De afwezigheid van een effectieve barrière, gecombineerd met een relatief hoge porositeit (15.6-16.2 vol%), hebben er toe geleid dat de chloorionen reeds diep tot in het beton zijn doorgedrongen;
- De corresponderende wateroplosbare chloridenconcentraties in de behandelde locatie (B) in de getijdenzone blijft significant lager. De waarden variëren van 1.20%Cl^-/cem tot 0.30%Cl^-/cem op een diepte van 95 mm;
- Directe blootstelling in de getijdenzone en blootstelling door spatwater leveren de grootste chloridenbelasting op. Het onderlinge verschil is beperkt. De blootstelling aan chloorionen bovenop de kademuur, door zeelucht en verder verwijderd van directe blootstelling, is duidelijk veel lager;
- Klaarblijkelijk wordt een opstapeling van chloorionen opgemeten in de behandelde zone (B) in de getijdenzone op een gemiddelde diepte van ongeveer 15 mm, Figuur 10. Initieel, 1996 – na 3 jaar blootstelling – werd deze niet vastgesteld. Ook in de literatuur wordt melding gemaakt van een opstapeling van chloridenionen achter de waterwerende laag (Polin et al., 2005), mede veroorzaakt door opeenvolgende nat-droogcycli in de getijdenzone. Deze buffering van chloorionen is niet aanwezig in de niet-behandelde zone, figuur 8. Echter blijkt deze piekwaarde van chloridenionen op een diepte van 15 mm niet te leiden tot een verhoogde waarde van de chloorionen op grotere diepte. Op 25 mm diepte worden chloridenconcentraties bereikt die verwacht worden op deze diepte zonder intermediaire piekwaarde.

Levensduur voorspelling – Diffusie coëfficiënt als toevalsvariabele

Gebaseerd op de opgemeten materiaaleigenschappen en chloridenprofielen, kan een levensduurvoorspelling worden uitgevoerd, gebruik makend van een tijdsafhankelijke betrouwbaarheidsanalyse (Prezzi et al., 1993; Clifton, 1993; Melchers, 1999; Siemes et al., 1999; Costa en Appleton, 1999; Thoft-Christensen et al., 1996). Het is belangrijk aan te geven dat dit type van analyse kan worden uitgevoerd voor eender welk schademechanisme, zolang de materiaaldata beschikbaar zijn en de mathematische formulering van de faalmode – grenstoestandsfunctie – voorhanden is. In deze analyse is de faalmode het einde van de initiatieperiode. Dit komt overeen met het punt 1 op de figuur 2.
Zelfs al wordt enkel de initiatieperiode beschreven, dan nog bevat de uitgevoerde analyse behoorlijk wat vereenvoudigingen. Om het transport van chloriden doorheen het beton te modelleren, wordt aangenomen dat de 2de wet van Fick toepasbaar is. Eigenlijk is deze enkel van toepassing voor zuiver diffusiegestuurde transportmodellen. Dit betekent voor het beton dat capillaire krachten van lege poriën verwaarloosd worden en dus wordt uitgegaan

van verzadigde poriën. Daarnaast wordt aangenomen dat het materiaal homogeen en isotroop is, en bovendien dat het beton niet-reactief is.
Ondanks de belangrijke verschillen tussen de toepasbaarheid van de 2de wet van Fick en de realiteit, wordt ze nog steeds vaak gebruikt als transportmodel om het chloridentransport in het beton te beschrijven. Natuurlijk kan een vergelijkbare analyse steeds worden uitgevoerd wanneer een meer nauwkeurig transportmodel beschikbaar is. Daarenboven gelden deze beperkingen voor eender welke analyse waarbij gebruik wordt gemaakt van dit transportmodel en is het dus niet enkel een beperking van een probabilistische analyse.
De diffusiewet, 2de wet van Fick, voor ééndimensionaal transport heeft volgende vorm:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x}\left(D \frac{\delta C}{\delta x} \right) \tag{3}$$

Waarin het beton wordt verondersteld een homogeen en isotroop materiaal te zijn. Wanneer daarenboven kan worden aangenomen dat er geen scheikundige reacties voorkomen tussen beton en chloriden, kan een expliciete oplossing voor deze differentiaalvergelijking worden uitgewerkt, gebruik makend van volgende randvoorwaarden:

- $C(x,t=0) = C_0$; $0<x<\infty$ (de initiële chloridenconcentratie in het betonmengsel) en
- $C(x=0,t) = C_S$; $0<t<\infty$ (de chloridenconcentratie belasting op het betonoppervlak ten gevolge van de maritieme omgeving),

$$C_i(x,t) = C_0 + (C_S - C_0).\mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \tag{4}$$

Waarin $C_i(x,t)$ het chloridengehalte voorstelt op tijdstip *t* ,op een afstand *x* van het betonoppervlak en *erfc*() is de error-functie.
Een betrouwbaarheidsanalyse voorziet in een methode om de faalkans van een structurele component te begroten. Deze component is een structuur of een onderdeel van een structuur waarvan de faalmode wordt geschreven door een grenstoestandsfunctie (Melchers, 1999). In deze analyse, waarin enkel de diffusiecoëfficiënt als toevalsvariabele wordt gedefinieerd, kan de grenstoestandsfunctie g(D) geschreven worden als:

$$g(D) = C_T - C(D) \tag{5}$$

waarin C_T de grenswaarde is voor de chloridenconcentratie en *C(D)* de chloridenconcentratie voorstelt op een afstand *x* vanaf het blootgestelde oppervlak op een tijdstip *t*. Met de cumulatieve waarschijnlijkheidsverdeling van de diffusiecoëfficiënt (*D*) voor chloorionen, kan de kans dat de grenstoestandsfunctie overschreden wordt, expliciet berekend worden (Clifton, 1993):

$$P_f = P(C > C_T) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(D_T) - \lambda_D}{\xi_D} \right) \tag{6}$$

Waarin λ_D en ξ_D de parameters zijn van de lognormaal verdeeld veronderstelde diffusiecoëfficiënt en waarin $\Phi(D)$ de cumulatieve standaard normaal verdeling is. De parameters λ_D en ξ_D worden berekend uit de experimenteel opgemeten chloridenprofielen. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van volgende randvoorwaarden: C_0 = 0.03%Cl^-, C_S=7%Cl^- /H_2O en C_T=0.7%Cl^-/cem.
Tabel 5 geeft de gemiddelde waarde $\mu(D)$ en de standaarddeviatie $\sigma(D)$ weer van de diffusiecoëfficiënt (*D*) voor de 3 opeenvolgende meetcampagnes: 1996, 1998 and 2005. De voorspelde levensduur t_L is aangegeven voor een faalkans gelijk aan $p_f = 0.5$ dat de grenswaarde C_T wordt overschreden ter hoogte van de wapening, die zich op een diepte

gelijk aan *x=12cm* van de betonoppervlakte bevindt. De hoofdwapening bevindt zich op deze diepte. Dit uitgaande van de aanvang van blootstelling na blootstelling van het oppervlak in 1993.
Merk op dat na deze periode de structuur niet zal bezwijken. De levensduurvoorspelling heeft enkel betrekking op de initiatieperiode, de periode nodig voor de chloridenionen om de wapening te bereiken en aldaar een chloridenconcentratie gelijk aan 0.7%Cl^-/cem op te bouwen.
Ondanks alle aangenomen vereenvoudigingen in de analyse is het opvallend dat de diffusiecoëfficiënt voor chloorionen nagenoeg een orde grootte groter is voor de niet-behandelde zone in vergelijking tot de behandelde zone, wat zich onmiddellijk vertaalt in de veel beperktere levensduur.

Locatie	Gebaseerd op meetcampagnes: 1996, 1998 en 2005		
	$\mu(D)$ $[cm^2/s]x10^{-8}$	$\sigma(D)$ $[cm^2/s]x10^{-8}$	Service life [y] C_T= 0.7 % Cl^- /cem
A (niet-behandeld)	9.58	10.55	16.5
B (behandeld)	1.61	2.49	107
C (behandeld bovenop de kademuur)	2.13	3.46	91

Tabel 5: Diffusiecoëfficiënt D – parameters van lognormaal verdeelde toevalsvariabele en voorspelde levensduur op basis van informatie uit meetcampagnes na 3, 5 en 12 jaar in site blootstelling

Voorbeeld 2 - De Vuurmolens te Overijse (1902)

De Vuurmolens te Overijse is één van de oudste gewapend betonnen gebouwen in België. Het oudste deel werd gebouwd in 1902 als een industriële graanmolen (Brosens et al., 2006).
Herbestemming van monumenten is vaak van cruciaal belang voor het behoud ervan. Denk maar aan de Sint-Jacobskerk te Leuven, die nu al meer dan 40 jaren leegstaat en waarbij de uitvoering van de nodige consolidatie-ingrepen sterk gerelateerd blijkt aan het vinden van een nieuwe zinvolle functie.
Bij herbestemming van een historisch monument kan de nieuwe invulling aanleiding geven tot een verandering van dienstlasten. Om na te kunnen gaan of de huidige draagstructuur een voldoende draagvermogen heeft voor de toekomstige dienstlasten, is het nodig een goede inschatting te kunnen maken van de eigenlijke sterkte van gebruikte bouwmaterialen, staal en beton. In vele gevallen is van het aanwezige beton en wapeningsstaal weinig tot geen informatie beschikbaar. Het beton kan daarenboven onderhevig zijn (geweest) aan verscheidene degradatieprocessen en het is net deze informatie die nodig is om vervolgens het gepaste ontwerp te kunnen maken voor de consolidatie en/of versterking.
Dit tweede voorbeeld legt de nadruk op (de complexiteit bij) het verzamelen en verwerken van de basisgegevens betreffende de druksterkte van het constructiemateriaal beton in geval van een historisch monument. Aangezien het gebouw sinds 1980 een beschermd monument is, worden bij voorkeur niet-destructieve technieken aangewend bij de bepaling van de sterkte van het materiaal.

Figuur 12: De Vuurmolens te Overijse (B) – bouwjaar 1902

In de structurele analyse wordt het draagvermogen van de gewapend betonnen balken en kolommen bepaald. Omwille van het feit dat het hier om een beschermd monument gaat, wordt het aantal destructieve proeven tot een minimum beperkt. Echter, het is duidelijk dat, om voldoende kwantitatieve gegevens te vergaren, het uitvoeren van een zekere hoeveelheid van destructief onderzoek, zoals ook hier, vaak onvermijdbaar is. De druksterkte van het beton wordt bepaald op basis van een combinatie van destructieve (DT) en niet-destructieve proeven (NDT):

- De druksterkte op boorkernen;
- Ultra-soon proeven (NDT);
- Sclerometer proeven (NDT);

De resultaten uit de sclerometer proeven worden omgezet naar druksterktes via omzettingsformules die gekalibreerd werden door de fabrikant van het toestel. De ultra-soon metingen worden omgezet naar waarden voor de druksterkte via:

$$E = \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}c^2 \tag{7}$$

Waarin:

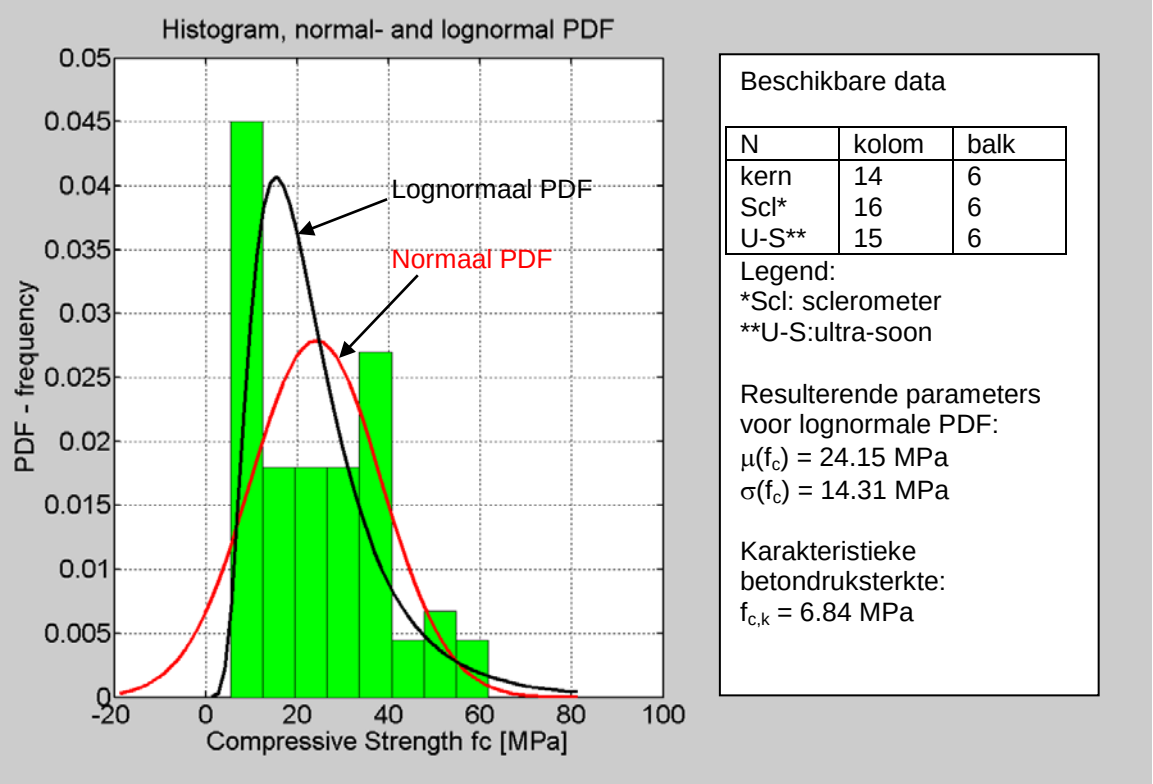
- E de elasticiteitsmodulus;
- ρ=2400 kg/m³ de dichtheid van het beton;
- ν=0.2 de coefficient van Poisson en
- c: de gemeten geluidssnelheid gebaseerd op de opgemeten dikte en de doorlooptijd van de ultrasone golf doorheen het materiaal.

De druksterkte resulteert vervolgens uit (EN 1992-1-1:2005):

$$f_c^{'} = \left(\frac{E}{9.5}\right)^3 \tag{8}$$

Voor de berekening van de karakteristieke waarde van de betondruksterkte wordt een gepaste materiaalverdeling voorgesteld. De Europese probabilistische ontwerpcode stelt voor een lognormaal verdeelde toevalsvariabele (PDF: probability density function) te hanteren voor de betondruksterkte (Diamantidis, 1999; Vrouwenvelder, 2002). Omdat beton enkel niet-negatieve waarden kan aannemen – positief in druk – en omdat de proefresultaten duidelijk een redelijk zware staart vertonen naar de hogere druksterktes toe, is een lognormaal verdeelde toevalsvariabele meer aangewezen in vergelijking tot een klassieke normaal of Gaussiaanse verdeling. Het histogram, de geschatte normaal en lognormaal verdeelde toevalsvariabelen zijn weergegeven in Figuur 13.

Op 32 locaties verspreid over 5 verdiepingen en over de verschillende betonnen elementen (balken en kolommen) werd een kernboring uitgevoerd. De geboorde kern wordt in het laboratorium op sterkte beproefd. Om een voldoende grote set van gegevens te verzamelen werden rond elke kern 8 ultrasoonmetingen en minimum 3 testen met de sclerometer uitgevoerd. Voor het berekenen van de karakteristieke betondruksterkte werd een gewichtsfactor toegekend aan de verschillende proefmethodes; een vertaling van de betrouwbaarheid van de proefresultaten. Het is duidelijk dat de resultaten verkregen op destructieve wijze een groter gewicht meekrijgen dan de resultaten verkregen uit niet-destructieve technieken.



Figuur 13: Experimenteel bepaalde betondruksterkte – Vuurmolens te Overijse 1902 (B)

Gebruik maken van een normaal verdeelde toevalsvariabele zou in dit geval, omwille van de grote spreiding op de proefresultaten, aanleiding geven tot een zeer lage karakteristieke druksterkte. Een waarde die het bestaan van de structuur niet langer zou kunnen verklaren, laat staan het hergebruik van het gebouw.
Op basis van deze informatie werd het ontwerp van de versterking van kolommen en balken uitgewerkt, wat succesvol werd afgerond dd. 2004. Momenteel zijn de gemeentediensten al 4 jaar gehuisvest in deze gebouwen.

Conclusies

Het aantal (gewapend) betonnen monumenten is in stijgende lijn. Momenteel lig de nadruk bij het herstel van beton voornamelijk op grote gewapend betonnen infrastructuur die 30-50 jaar geleden werd opgetrokken en waar schade zich manifesteert. De technieken zijn dan ook voorhanden om deze schade-evolutie op een gepaste wijze op te volgen en preventief op te treden in het behoud ervan. Naar de toekomst toe zullen steeds meer van deze technieken doordringen naar de gebouwen die we nu stelselmatig als een nieuwe groep historische monumenten aan het opnemen zijn.

In deze bijdrage werd uitgaande van de meest frequent voorkomende schadefenomenen gepeild naar de achterliggende transportmodellen. De beschikbare monitoring technieken laten toe om een duidelijk beeld te schetsen van de huidige status in het degradatieproces. De nadruk ligt vooral op de impact die deze technieken hebben op het (preventief) behoud van de structuur.
Aan de hand van 2 voorbeelden wordt de impact van het meten op de evaluatie van de structuur toegelicht. Het eerste voorbeeld - de kademuur te Zeebrugge (1993) - spitst zich toe op corrosie van het beton in maritieme omgeving en het nut van een preventieve bescherming met een hydrofoberingsmiddel. Uit dit voorbeeld kan met behulp van een regelmatige opvolging van de chloridenprofielen een duidelijk beeld geschetst worden van de evolutie van chloridenpenetratie. In extensie kan met behulp van een transportmodel het einde van de initiatieperiode gekwantificeerd worden. De effectiviteit van de preventieve behandeling kan zo beoordeeld worden.
In het tweede voorbeeld – de Vuurmolens te Overijse (1902) – wordt aangegeven hoe een latere consolidatie kan worden uitgevoerd op basis van een correcte data-analyse. De bepaling van de sterkte van het beton wordt uitgevoerd met behulp van zowel destructieve (drukproeven op kernen) als niet-destructieve technieken (ultrasoon-metingen en sclerometer). Ook hier levert de opgemeten en statistisch verwerkte data een belangrijke meerwaarde in het behoud van het gewapend betonnen monument.

Referenties

Brosens K., Figeys W., Schueremans, L., et al., De Vuurmolen te Overijse (België) Deel 2: Structurele restauratie van een historische structuur in gewapend beton, in : Proceedings of WTA-dag 2006, Turnhout, 21 april 2006

Clifton JR. Predicting the service life of concrete. ACI Materials Journal, 1993;90(9):661-671.

Costa A, Appleton J. Chloride penetration into concrete in marine environment – Part II: Prediction of long term chloride penetration. Materials and Structures, 1999;32: 354-359.

Diamantidis, “Koordinaten und Entwicklung eines probabilistischen Sicherheidskonzepts für neue und bestehende Tragwerke“, T2881, Frauenhofer IRB Verlag,1999.

Figeys W., Schueremans L., Brosens K., Van Gemert D., Ignoul S., “Verjongingskuur voor historische monumenten”, in: Het Ingenieursblad, 2006, nr. 2006, pg. 24-30.

Herrmann C, Rotzsche H. Determining Silanes in Inorganic Matrices by Pyrolysis – GC. International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Hydrophobe II, 1998, p.231 – 236.

McPolin D, Basheer PAM, Long AE, Grattan KTV, Sun T. Obtaining progressive chloride profiles in cementitious materials. Construction and Building Materials, 2005;19: 666-673.

Melchers RE. Structural reliability: analysis and prediction. John Wiley and Sons, second edition, 1999.

NBN B15-250. Tests on hardened concrete: chemical analysis of hardened concrete. Belgian standard, 1990.

Poupeleer Anne-Séverine, "Transport and crystallization of dissolved salts in cracked porous building materials", PhD Thesis, K.U.Leuven, 2007.

Prezzi M, Geyskens Ph, Monteiro PJM. Reliability approach to service life prediction of concrete exposed to Marine Environment. ACI Materials Journal, 1996;93(6):554-562.

Schueremans L, Van Gemert D. In site survey of chloride penetration in a quay-wall at Zeebrugge (B) Harbor containing Protectosil® BH N. internal Report, PV30366 , KULeuven, 2005.

Schueremans L, Van Gemert D. Sivento Cl¯Zeebrugge. internal Report, PV29143, KULeuven, 1998.

Schueremans L,.Van Gemert D. Performantie IBTEO voor remming chloridenpenetratie. internal Report, PV28521, KULeuven, 1996.

Schueremans L., “Monitoring van gebouwd erfgoed”, Eindsymposium van het Europees Interreg IIIA-project, 28/05/2008, Thorn, Nederland. pp. 1-17.

Schueremans L., Van Gemert D., Friedel M. and Giessler-Blank S., “Durability of water repellents applied in marine environment”, Hydrophobe V, Brussels, April 15-16, 2008, pp. 357-367.
Schueremans L., Van Gemert D., Giessler S. “Chloride penetration in RC-structures in marine environment – long term assessment of a preventive hydrophobic treatment”, Construction and Building Materials, Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 6, June 2007, Pages 1238-1249.
Siemes T, Edvardsen C. Duracrete: service life design for concrete structures. 8th international conference on durability of building materials and components, Canada, 1999, p.1343-1356.
Thoft-Christensen P, Jensen FM, Middleton CR, Blackmore A. Assessment of the reliability of concrete slab bridges. 7th IFIP WG7.5, Working Conference, Colorado, USA, 1996.
TV 231, “Betonherstelling”, WTCB Wetenschappelijk en Technologisch Centrum voor de Bouwnijverheid, 2007.
Van Gemert D, Schueremans L. Preventieve bescherming van gewapend betonstructuren tegen chloriden-indringing: Evaluatie op container-terminal Zeebrugge”, Infrastructuur in het Leefmilieu, 1997, pp. 93-100.
Vrouwenvelder, “Development towards full porbabilistic design code, Structural Safety, Vol 24, 2002, pp. 417-432

Annex

Carbonatatie

$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$

$H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$

Bij overmaat CO_2:

$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca(HCO_3)_2$

Bij volledige carbonatatie zal zich een $CaCO_3/Ca(HCO_3)^+$ evenwicht instellen waarbij de pH daalt tot 8,3. Het wateroplosbaar $Ca(HCO_3)_2$ kan aanleiding geven tot erosie van het betonoppervlak.

Corrosie

Een corrosieëlement bestaat uit een cathode en een anode waarbij volgende reacties plaatsvinden:

Anode : $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (ijzer in oplossing)

Kathode : $4e^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4(OH)^-$

$Fe^{2+} + 2(OH)^- \rightarrow Fe(OH)_2$

$2Fe^{3+} + 6(OH)^- \rightarrow 2Fe(OH)_3$

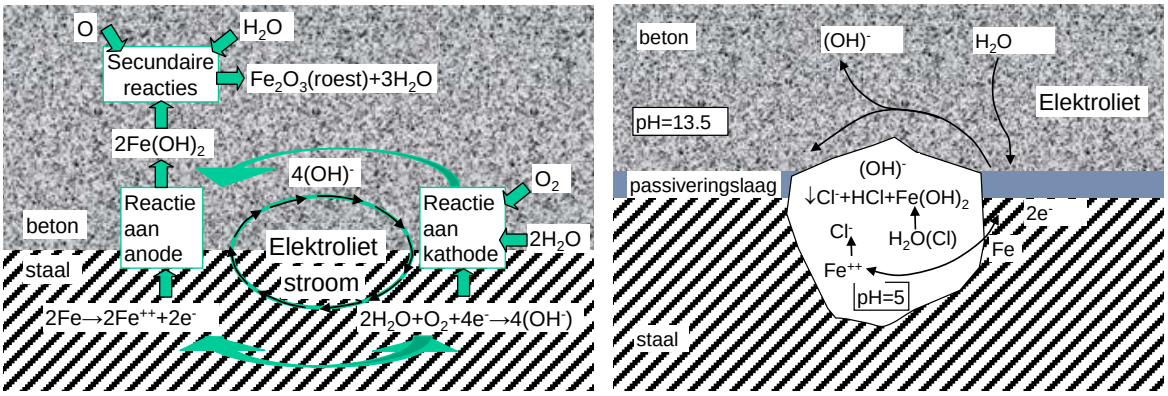
$2Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3$ (rust) $+ 3H_2O$

Verder: $3Fe^{2+} + 8OH^- \leftrightarrow Fe_3O_4 + 4H_2O + 2e^-$

$2Fe_3O_4 + 8OH^- \leftrightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O + 2e^-$

$2Fe^{2+} + 6OH^- \leftrightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O + 2e^-$

Bij overmaat Cl^- : Vorming van Friedelzout in beton



Figuur: schematische voorstelling van wapeningscorrosie (links) en putcorrosie (rechts) van wapening in beton

<u>Putcorrosie (in aanwezigheid van chloorionen)</u>

Anode : $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (ijzer in oplossing)

kathode : $4e^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4(OH)^-$

$2Fe^{3+} + 6(OH)^- \rightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O$

In een tussenstadium wordt zoutzuur (HCl) gevormd waardoor de pH plaatselijk daalt tot 5:

$Fe^{2+} + 2Cl^- + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl$

$HCl \rightarrow Cl^- + H^+$

<u>Alkali-aggregaat-reactie</u>

$SiO_2 + 2NaOH + nH_2O \rightarrow Na_2SiO_3.nH_2O$

$Na_2SiO_3.nH_2O + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow CaSiO_3.mH_2O + 2NaOH$

Het product $CaSiO_3.mH_2O$ is een gel met expansieve eigenschappen.

ADRESSENLIJST SPREKERS

Lucie Vandewalle
K.U.Leuven
Departement Burgerlijke Bouwkunde
Kasteelpark Arenberg 40 bus 2448
B-3001 Heverlee
Tel.: + 32 16 32 16 76
Fax: + 32 16 32 19 76
lucie.vandewalle@bwk.kuleuven.be

Timo G. Nijland
TNO Bouw en Ondergrond
Van Mourik Broekmanweg 6
NL- 2628 XE Delft
Postadres:
Postbus 49
NL-2600 AA Delft
T +31 15 276 32 19
F +31 15 276 30 16
timo.nijland@tno.nl

Jan Elsen
K.U.Leuven
Afdeling Geologie
Fysico-Chemische Geologie
Celestijnenlaan 200c
B-3001 Heverlee
Tel.: +32 16 32 75 81
Fax: +32 16 32 79 81
Jan.Elsen@geo.kuleuven.be

Herdis Heinemann
TU Delft
Faculteit Bouwkunde
Postadres:
P.O. Box 5043
NL-2600 GA Delft
T +31 15 278 85 13
F +31 15 278 10 28
H.A.Heinemann@tudelft.nl

Koenraad Van Balen
K.U.Leuven
Departement Burgerlijke Bouwkunde
Raymond Lemaire Int. Center for Conservation
Kasteelpark Arenberg 40 bus 2448
3001 Heverlee,
Tel.: + 32 16 32 11 72
Fax: + 32 16 32 19 76
Koenraad.vanbalen@bwk.kuleuven.be

Wijnand Freling
Zandberglaan 31 a
NL - 4818 GH BREDA
Tel.:+ 31 (0)76 521 16 83
Fax:+ 31 (0)76 521 21 37
wvj.freling@inter.nl.net

Luc Schueremans
K.U.Leuven
Departement Burgerlijke Bouwkunde
Kasteelpark Arenberg 40 bus 2448
B-3001 Heverlee
Tel.: ++ 32 16 32 16 54
Fax: ++ 32 16 32 19 76
luc.schueremans@bwk.kuleuven.be

BESTUURSLEDEN

Voorzitter

Prof.dr.ir. Dionys Van Gemert
Dept. Burgerlijke Bouwkunde
Laboratorium Reyntjens
Kasteelpark Arenberg 40 bus 2448
B - 3001 HEVERLEE
Tel.: + 32 (0)16 32 16 71
Fax: + 32 (0)16 32 19 76
Dionys.vangemert@bwk.kuleuven.be

Secretariaat

A. (Ton) J.M. Bunnik
A. Bloemaerthoek 11
NL-4907 RD OOSTERHOUT
T +31 (0)162 471 840
F +31 (0)162 471 841
M +31 (0)6 21558 950
E ton.bunnik@wta-nl-vl.org

Penningmeester

Prof.dr. ir. Luc Schueremans
Dept. Burgerlijke Bouwkunde
Laboratorium Reyntjens
Kasteelpark Arenberg 40 bus 2448
B - 3001 HEVERLEE
Tel.: + 32 (0)16 32 16 79
Fax: + 32 (0)16 32 19 76
Luc.schueremans@bwk.kuleuven.be

Leden

Ing. Jo Blomme
STAMOTEC bvba
Striepe 2B
B – 9991 ADEGEM
Tel.: + 32 (0)50 380888
Fax: + 32 (0)50 300388
GSM: + 32 (0)473 68 30 68
info@stamotec.be

Hilde De Clercq
Koninklijk Instituut voor het
Kunstpatrimonium (KIK)
Jubelpark 1
B-1000 BRUSSEL
T +32 (0)739 68 41
F +32 (0)732 01 05
M +32 (0)497 76 84 72
E hilde.declercq@kikirpa.be

Dr.ir. Wijnand Freling
Zandberglaan 31 a
NL - 4818 GH BREDA
Tel.: + 31 (0)76 521 16 83
Fax: + 31 (0)76 521 21 37
GSM: + 31 (0)6 203 610 41
wvj.freling@inter.nl.net

Prof.ir. R. van Hees
Building and Systems
Business Unit of TNO Built
Environment and Geosciences
Bezoekadres:
Van Mourik Broekmanweg 6
NL-2628 XE DELFT
Postadres:
P.O. Box 49
NL-2600 AA DELFT
Tel.: + 31 (0)15 276 31 64
Fax: + 31 (0)15 276 30 17
GSM: + 31 (0)6 518 333 73
Rob.VanHees@tno.nl

Dr.ir. Henk L. Schellen
T.U.Eindhoven
Faculteit Bouwkunde
Vertigo 06H17
NL – 5600 EINDHOVEN
Tel.: + 31 (0)40 247 2651
Fax: + 31 (0)40 243 8595
GSM: + 31 (0)651763001
h.l.schellen@bwk.tue.nl

Ir. Yves Vanhellemont
WTCB- CSTC
Avenue Pierre Holoffe 21
B - 1342 LIMETTE
Tel.: + 32 (0)2 655 77 11
Fax: + 32 (0)2 653 07 29
Yves.vanhellemont@bbri.be

De WTA stelt zich voor

Wetenschappelijk – Technische Groep voor Aanbevelingen inzake Bouwrenovatie en Monumentenzorg.

Er bestaat in binnen - en buitenland, versnipperd over vele bedrijven en instellingen, researchafdelingen en adviesorganen, een uitgebreid aanbod van kennis op het gebied van renovatie en instandhouding van het gebouwenpatrimonium. Van die kennis zou de bouwrenovatiemarkt en daarmee ook de zorg voor de monumenten meer kunnen profiteren dan nu het geval is, en dat eens te meer daar het zwaartepunt van die zorg geleidelijk verschuift van de traditionele restauratie naar renovatie en onderhoud en bovendien de “jonge“ monumenten met een geheel eigen conserveringsproblematiek, in de zorg worden betrokken.

Probleem is echter dat dit grote kennisaanbod niet zo gemakkelijk is te overzien en zich bovendien steeds aanpast. Het adagium “bouwen is traditie” gaat steeds minder vaak op, en dat geldt evenzeer voor renovatie - en onderhoudstechnieken.

Kwaliteit, bruikbaarheid en actualiteit van kennis staan daarbij voorop. De Nederlands-Vlaamse afdeling van de WTA kan daarbij een belangrijke rol spelen. De WTA beijvert zich voor onderzoek en de praktische toepassing daarvan op het gebied van onderhoud aan gebouwen en monumentenzorg.

Daartoe worden bijeenkomsten van wetenschappers en praktijkdeskundigen georganiseerd, waar een specifiek probleem inzake onderhoud van gebouwen en duurzaamheid van gebruikte bouwmaterialen en methoden zeer intensief wordt onderzocht. In studiewerkgroepen op onder meer het terrein van **houtbescherming, oppervlaktetechnologie, metselwerk, natuursteen, statische/dynamische belastingen van constructies, versterking en consolidatie, monitoring** worden kennis en ervaringen uitgewisseld.
Resultaten worden vertaald in een richtlijn voor werkwijzen en behandelingsmethoden. Gezien de kwaliteit en de heterogene samenstelling van de werkgroepen, kunnen die richtlijnen, zogenaamde Merkblätter, beschouwd worden als objectief en normstellend. Zij worden in brede kring verspreid door middel van publicaties in de vakpers en in het WTA-tijdschrift “International Journal for Technology and Applications in Building Maintenance and Monument Preservation” gepubliceerd dat aan alle leden 4x per jaar wordt toegestuurd.

Leden van de WTA kunnen aldus, door een actieve vertegenwoordiging in werkgroepen bijdragen aan de totstandkoming van dergelijke normstellende advisering.

In beginsel staat het lidmaatschap open voor allen die vanuit hun functie of belangstelling bij de bouw, restauratie en het onderhoud van gebouwen betrokken zijn. Werkgroepen worden samengesteld op basis van deskundigheid en ervaring van de participanten. Deelname is altijd vakinhoudelijk. Leden hebben het recht voorstellen te doen voor de op- en inrichting van nieuwe werkgroepen en gebruik te maken van door de WTA geleverde faciliteiten zoals een vakbibliotheek en enig administratieve ondersteuning.

Het betreft daarbij niet alleen advisering, maar ook het harmoniseren van de verschillende internationale technische regelgevingen. Hiertoe biedt de Nederlands-Vlaamse tak van WTA een uitstekende mogelijkheid.

Wanneer u belangstelling heeft voor de WTA of één van de hiervoor genoemde vakgebieden of werkgroepen kunt u met de WTA Nederland-Vlaanderen contact opnemen.

Kosten van het lidmaatschap bedragen: € 170,--
per jaar per persoon,
Eenmalig inschrijfgeld van: € 25,--
Een ondersteunend lidmaatschap voor bedrijven en instellingen kost minimaal € 170,-- tot € 610,-- per jaar, al naargelang het aantal werknemers.
Eenmalig inschrijfgeld vanaf: € 25,-- tot € 150,--

WTA Nederland - Vlaanderen

Correspondentieadres Nederland
A. Bloemaerthoek 11
NL - 4907 RD OOSTERHOUT
T +31 (0) 162 471 840
F +31 (0) 162 471 841
e-mail : **info@wta-nl-vl.org**
Internet : **www.wta-nl-vl.org**

Correspondentieadres België
Mevr. Kristine Loonbeek
P/a Katholieke Universiteit Leuven
Departement Burgerlijke Bouwkunde
Laboratorium REYNTJENS
Kasteelpark Arenberg 40 bus 2448
3001 Heverlee
Tel. : +32 (0)16 32 16 54
Fax : +32 (0)16 32 19 76
e-mail : **Kristine.Loonbeek@bwk.kuleuven.be**

COLOFON

Concept en eindredactie
WTA Nederland - Vlaanderen

© WTA en Auteurs 2008

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

De auteurs dragen zorg dat hun bijdrage geen inbreuk op auteursrechten inhoudt. Zij dragen de rechten op hun bijdrage over aan WTA NL/VL.

Foto's: - Timo G. Nijland, TNO Bouw en Ondergrong en Jan Elsen, K.U.Leuven
- H.A. Heinemann, TU Delft Faculteit Bouwkunde
- Wijnand Freling, Freling Advies
- Luc Schueremans, K.U.Leuven

Uitgever

WTA NEDERLAND - VLAANDEREN

© 2008 ISBN/EAN: 978-90-79216-03-1

Nr	Lijst verschenen syllabi	Jaar	ISBN nummer
1	Stad beeld	1992	
2	Nieuwe ontwikkelingen	1993	
3	Restaureren & Conserveren	1994	
4	Kleur bekennen	1994	
5	Hout	1996	
6	Gevelreinigen	1996	
7	Kalk	1997	90-76132-01-1
8	Metaal	1997	90-76132-02-1
9	Kwaliteit in de restauratie	1998	90-76132-03-8
10	Natuursteen deel 1	1998	90-76132-04-6
11	Natuursteen deel 2	1999	90 76132-05-4
12	Mortels in de restauratie	1999	90-76132-06-2
13	Pleisters voor restauratie en renovatie	2000	90 76132-07-0
14	Bereikbaarheid van monumenten	2000	90-76132-08-9
15	Schoon van binnen	2001	90-76132-09-7
16	Glas in lood	2001	90-76132-10-0
17	Scheuren in metselwerk en pleisters	2002	90-76132-11-9
18	Biodegradatie	2002	90-76132-12-7
19a	Zouten in natuursteen- en baksteenmetselwerk	2003	90-76132-14-3
19b	Surface and structural consolidation of masonry		
20	Authenticity in the restoration of monuments	2003	90-76132-13-5
21	Kleur, Pigment en Verf in Restauratie	2003	90-76132-15-1
22	Graffiti op monumenten: een last of een lust	2004	90-76132-16-x
23	Isolatie en klimaatbeheersing van monumenten (Hoe) is het mogelijk?	2004	90-76132-17-8
24	Monumenten en water	2005	90-76132-18-6
25	Monitoring en Diagnose	2005	90-76132-19-4
25a	CD MDDS Damage Atlas	2005	geen
26	Valorisatie en Consolidatie van Monumentale Betonconstructies	2006	90-76132-20-8
27	Restauratie en onderhoud van monumentale gebouwen	2006	ISBN-10: 90-76132-21-6 ISBN-13: 978-90-76132-21-1
28	Restauratie, onderhoud en beheer van monumenten	2007	ISBN/EAN: 978-90-76132-22-8
29	Herbestemming van Religieus Erfgoed	2007	ISBN/EAN: 978-90-79216-01-7
30	Zout en behoud? (nieuwe ontwikkelingen)	2008	ISBN/EAN: 978-90-79216-02-4
31	Beton behouden – theorie in de praktijk gezet	2008	ISBN/EAN: 978-90-79216-03-1
	CD/MDDS Schadeatlas: € 10,00		

Informatie: zie website www.wta-nl-vl.org