

ZOUT EN BEHOUD?



Bergen op Zoom 2008

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 nr.: 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 nr 721-5406377-73

ZOUT EN BEHOUD?



Bergen op Zoom, 25 april 2008

**Editor:
Dionys Van Gemert
Rob van Hees**

PROGRAMMA

- 09.30 Ontvangst en registratie van de deelnemers
- 09.45 Opening door Dionys Van Gemert, voorzitter WTA Nederland-Vlaanderen
- 09.50 Welkom door de heer A.J. Hagenaars, wethouder Bergen op Zoom
- 10.00 Kristallisatie van zouten en vochttransport in poreuze materialen
Rob van Hees TNO-B en O / TU Delft Bouwkunde
- 10.40 "Waterdicht" massief opgaand metselwerk: materiaalkeuzen en uitvoeringsaspecten
voor nieuw werk en restaureren
Caspar Groot TU Delft Civiele Techniek & Geowetenschappen
- 11.20 Hydrofoberen en de grenzen aan het zout
Hilde De Clercq KIK Brussel
- 12.00 Gezamenlijke lunch
- 14.0 Grondkerende muren in de vesting Naarden, schadeoorzaak en reparatie
Jan Kamphuis, Rijks Gebouwen Dienst
- 14.40 Kan schade door zoutkristallisatie worden voorkomen?: (on)mogelijkheden van
kristallisatie inhibitoren
Barbara Lubelli TNO-B en O / TU Delft Bouwkunde
- 15.20 Koffiepauze
- 15.40 De fysische principes achter en de effectiviteit van ontzoutingsmethoden
Leo Pel, TU Eindhoven Natuurkunde
- 16.20 Vocht door hygroscopische zouten: wat doe je eraan? Toepassing op (deels)
ingegraven metselwerk
Yves Vanhellemont, WTCB Brussel
- 17.00 Afsluitende discussieronde
- 17.15 Drankje ter afscheid

Voorwoord

Zout en behoud?

Na een reeks studiedagen over beheersmatige, sociale en economische aspecten van restauratie en behoud, start WTA Nederland-Vlaanderen een nieuwe reeks studiedagen over technische aspecten van bouwrenovatie en monumentenzorg. Deze eerste studiedag van de nieuwe reeks richt zich op de effecten van zouten in metselwerk, en in het bijzonder op de interactie van deze zouten met de procedures en materialen die ingezet worden voor de consolidatie en de bescherming van gebouwen en monumenten.

Bij de aantasting van metselwerk spelen vocht en zouten een belangrijke rol, en de laatste decennia is intensief onderzoek uitgevoerd naar de mechanismen die hierbij actief zijn. Verschillende methoden voor de extractie van zouten uit steen en metselwerk werden in de praktijk uitgeprobeerd en in de laboratoria onderzocht. Hetzelfde geldt voor de producten en procedures voor de bescherming tegen indringend hemelwater en tegen optrekkend vocht. Een aantal Europese onderzoeksprojecten werd terzake reeds uitgevoerd of is nog lopende, waarbij ook aandacht wordt besteed aan de interactie tussen aanwezige zouten en beschermingsmaatregelen, en aan de beheersmaatregelen die terzake te nemen zijn of kunnen overwogen worden.

In deze studiedag worden de fysische en chemische grondbeginselen belicht inzake migratie en kristallisatie van zouten in metselwerk, in combinatie met vochttransport in poreuze materialen. De aandacht gaat vooral naar massief metselwerk, ondergronds of in aanraking met de grond. Theoretische onderzoeksresultaten worden voorgesteld, getoetst aan toepassing in de praktijk. Veel aandacht gaat ook naar de duurzaamheid van niet alleen de beschermingsmiddelen, maar vooral ook naar de duurzaamheid van het beschermde gebouw of monument. Ervaringen met gebouwen over perioden tot meerdere decennia lang worden toegelicht en geïnterpreteerd.

Deze studiedag gaat door in de Raadszaal van het 17^{de} eeuwse Oude Stadhuis te Bergen op Zoom.

Bergen op Zoom, 25 april 2008

Prof. Dr. Ir. Dionys Van Gemert
Vice-president WTA
Voorzitter WTA Nederland/Vlaanderen

INHOUDSOPGAVE

Rob van Hees	Kristallisatie van zouten en vochttransport in poreuze materialen
Caspar Groot	“Waterdicht” massief opgaand metselwerk: materiaalkeuzen en uitvoeringsaspecten voor nieuw werk en restaureren
Hilde De Clercq	Hydrofoberen en de grenzen aan het zout
Jan Kamphuis	Grondkerende muren in de vesting Naarden, schadeoorzaak en reparatie
Barbara Lubelli	Kan schade door zoutkristallisatie worden voorkomen?: (on)mogelijkheden van kristallisatie inhibitoren
Leo Pel	De fysische principes achter en de effectiviteit van ontzoutingsmethoden
Yves Vanhellemont	Vocht door hygroscopische zouten: wat doe je eraan? Toepassing op (deels) ingegraven metselwerk

KRISTALLISATIE VAN ZOUTEN EN VOCHTTRANSPORT IN POREUZE MATERIALEN

Rob P.J. van Hees^{1) 2)}, Barbara Lubelli^{1) 2)}

¹⁾ TNO Bouw en Ondergrond

²⁾ TU Delft Faculteit Bouwkunde, Delft

Samenvatting

Teneinde het zoutkristallisatiemechanisme in poreuze bouwmaterialen beter te kunnen begrijpen, is een goed begrip van vochttransport essentieel, net zoals een goed begrip omtrent de invloed van zouten op het vochttransport. Om preciezer te zijn, vocht- en zouttransport en –verdeling gedurende het droogproces zijn van het grootste belang.

In dit artikel worden verschillende schadetypen en schadegevallen beschreven. Voor de case-studies worden vocht- en zoutverdeling geanalyseerd en soms het verloop van de schade in de tijd gevolgd.

Hetzelfde gebeurt voor het onderzoek in het lab. Een aantal experimenten waarbij NMR werd gebruikt, maakt het mogelijk het vochttransport en het drogen van poreuze materialen beter te begrijpen.

Op basis van de voorbeelden en observaties worden verklaringen voor schademechanismen voorgesteld die kunnen bijdragen aan een beter begrip en mogelijk aan het praktisch oplossen van schade door zouten.

Trefwoorden: zoutkristallisatie, vocht, behandelingen, ontzouten

1. Inleiding

De meest voorkomende schadetypen ten gevolge van zoutkristallisatie zijn [1]:

- poederen of afzanden
- schilferen van materialen

Schilferen treedt meestal op wanneer er een dunne oppervlaktelaag bestaat met eigenschappen die licht van het overige materiaal verschillen. Is die laag eenmaal verdwenen, dan gaat de schadeontwikkeling vaak verder in de vorm van poederen.

Daarnaast bestaat een uitgesproken schadetype dat voorkomt in geval oppervlaktebehandelingen zoals hydrofobering zijn toegepast. Het gaat dan om het afspringen van een relatief dikke laag (meestal de gehydrofobeerde zone).

In dit artikel worden verschillende observaties uit praktijk en laboratoriumexperimenten besproken, met de bedoeling een beter beeld te krijgen van vocht- en zouttransport alsmede van het mechanisme van zoutschade en de omstandigheden waaronder het optreedt. De observaties betreffen gevallen van schade door zeezouten (natriumchloride) in de praktijk en van schade ten gevolge van natriumchloride en natriumsulfaat in het laboratorium.

Om in voorkomende gevallen een idee te verkrijgen van de zoutbelasting en de zoutverdeling is in vrijwel alle gevallen de hygroscopiciteit van het zoutbelaste materiaal gemeten. Bij hygroscopisch gedrag gaat het om vochtopname uit de omringende lucht. Zouten kunnen vocht opnemen uit de lucht wanneer de relatieve vochtigheid (RV) van de lucht boven hun evenwichts-RV (RV_{eq}) ligt. Voor een zeker type zout correspondeert een hogere vochtopname met een hoger zoutgehalte. De zoutverdelingen in dit artikel zijn meestal gebaseerd op de hygroscopische vochtopname van poeder monsters (boorgruismonsters) bij een RV van 96 %.

Deze RV is gekozen om het effect van zowel natrium chloride als natriumsulfaat te kunnen meten. Merk op dat de RV_{eq} voor NaCl bij 75.6 % ligt en voor $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ bij 93 % bij een temperatuur van 20 °C.

Voor het begrijpen van het zoutkristallisatie mechanisme is begrijpen van het vochttransport essentieel, evenals van de invloed van zouten op vochttransport. Voor de uiteindelijke schade zijn het drooggedrag en daarmee het vochttransport en de vocht- en zoutverdeling tijdens het drogen van belang.

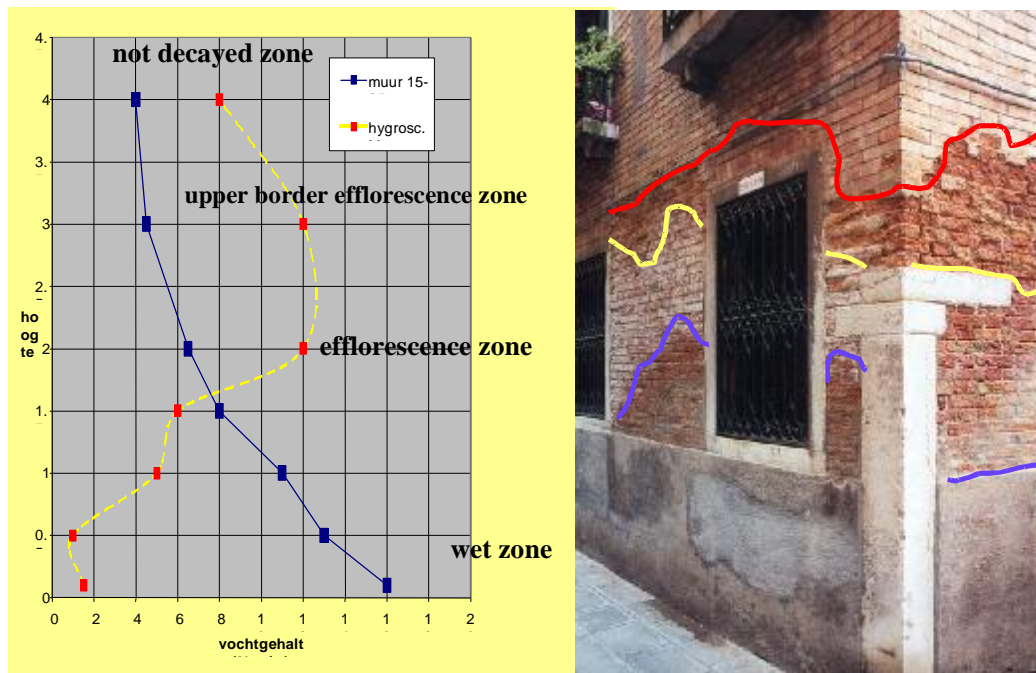
2. Optrekkend vocht

2.1. Typisch zoutschadepatroon in geval van optrekkend vocht

Figuur 1 toont een typisch patroon voor zoutschade gerelateerd aan optrekkend vocht. Dit patroon is goed vergelijkbaar met het model beschreven door Arnold [2]. We kunnen de volgende zones onderscheiden in een muur:

- natte zone, in het lagere deel van de muur, waar geen schade zichtbaar is;
- zone met uitbloei, waar zouten op het muuroppervlak zichtbaar zijn; hier kan sprake zijn van beperkt materiaalverlies; (in perioden met een hoge RV kan de zoutuitbloei verdwijnen door het in oplossing gaan van de zouten).
- zone met het grootste materiaalverlies, als gevolg van het grote aantal nat-droogcycli en van kristallisatie onder het materiaaloppervlak;
- niet beschadigde zone (zonder vocht- en zoutbelasting) in het hoogste deel van de muur.

Een belangrijke waarneming is dat de schade geconcentreerd is in de zone met het grootste aantal droog-nat cycli, aan de bovengrens van het optrekkend vocht. De stijghoogte van het optrekkend vocht wordt bepaald door de vochttoevoer, materiaaleigenschappen van de muur en door de droogcondities. Ook de aanwezigheid van zout speelt echter een rol, zoals in het volgende hoofdstuk zal worden getoond.

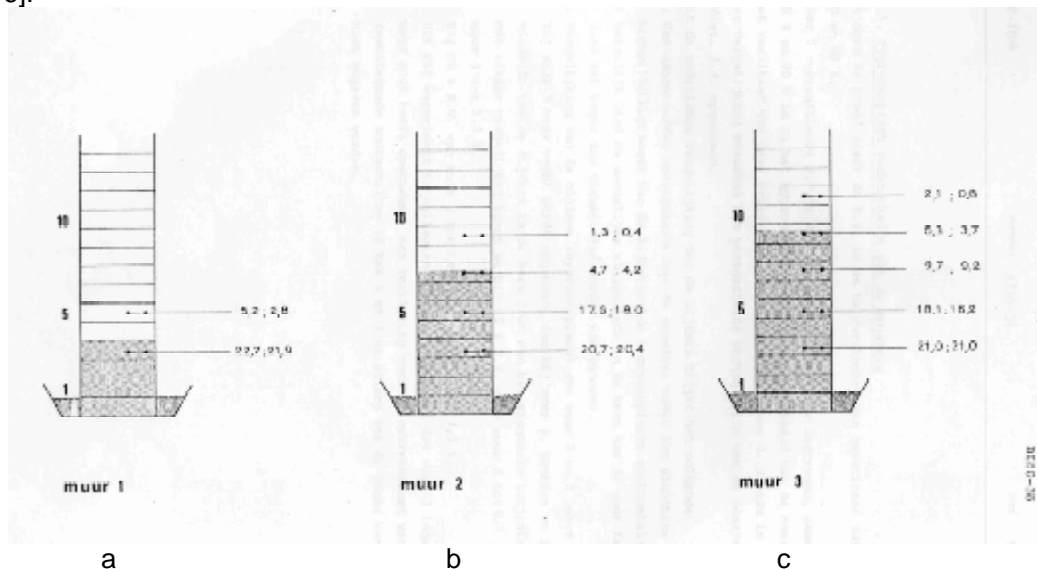


Figuur 1: Typisch schadepatroon en vocht- en zoutverdeling voor een muur met optrekkend vocht.

2.2. De invloed van zouten op optrekkend vocht in metselwerk

In metselwerk hebben mortel en baksteen in het algemeen een verschillende poriegrootteverdeling. De overgang tussen mortel en steen is meestal de beperkende factor voor de

stijghoogte van het optrekkende vocht. Dit bleek ook uit labonderzoek en wordt geïllustreerd door situatie a in figuur 2 [3]. Zelfs na verloop van enkele jaren trok het vocht niet hoger op. Door Tammes and Vos [4] werd al gesuggereerd dat deze barrière overwonnen zou kunnen worden door de aanwezigheid van zouten. Om de theorie van Tammes en Vos te toetsen en het effect van zouten te bestuderen, werd een experiment opgezet, waarbij het gedrag van drie muren werd vergeleken, die met hun voet stonden in respectievelijk leidingwater (a), water met 2.3 % Na_2SO_4 (b) en water met 5 % Na_2SO_4 (c.). Het was duidelijk dat inderdaad de overgang mortel – steen de beperkende factor was. De barrière kon echter worden overwonnen door het gebruik van een zoutoplossing; in dat geval werd een grotere stijghoogte bereikt (zie situatie b en c in figuur 2). De hoogste zoutconcentratie gaf de grootste stijghoogte. Dit effect zou een gevolg kunnen zijn van het kruipgedrag van zouten [5, 6].



Figuur 2: De stijghoogte van optrekkend vocht en de vochtverdeling in drie muren [3]. Zonder en met zouten toegevoegd aan het water (muur a is de referentie zonder zouten).

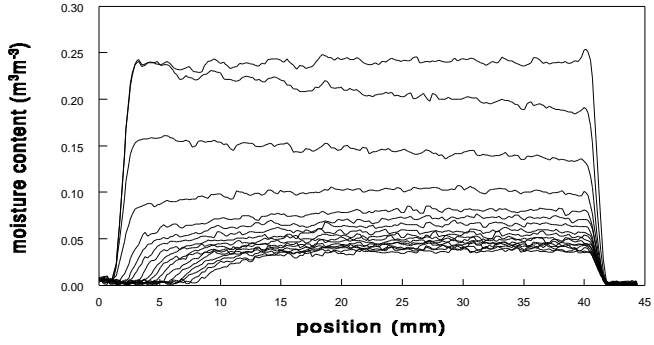
3. De invloed van NaCl op het drooggedrag van baksteen

In een laboratoriumexperiment werd het drooggedrag van baksteen bepaald, gebruikmakend van NMR [7]. Het experiment werd eerst uitgevoerd met water en wordt getoond in figuur 3. Er is een duidelijk terugtrekkend droogfront zichtbaar; het kritisch vochtgehalte is bereikt. Het kritisch vochtgehalte is het vochtgehalte waarbij capillairen niet meer volledig gevuld zijn met water en vloeistoftransport overgaat in damptransport.

Toen hetzelfde experiment werd herhaald met een (1M, 1 molair) NaCl oplossing was het resultaat geheel anders: er was onder gelijke omgevingscondities geen terugtrekkend droogfront zichtbaar, zie figuur 4. Verder werd zoutkristallisatie aan het oppervlak zichtbaar op het ogenblik dat de zoutconcentratie in de buurt van het oppervlak 6M (6 molair) bereikte, de verzadigingsconcentratie van NaCl (figuur 5). Het is interessant op te merken dat in de NMR metingen geen oververzadiging (supersaturatie) werd bereikt. Pel et al. [7], [7a]

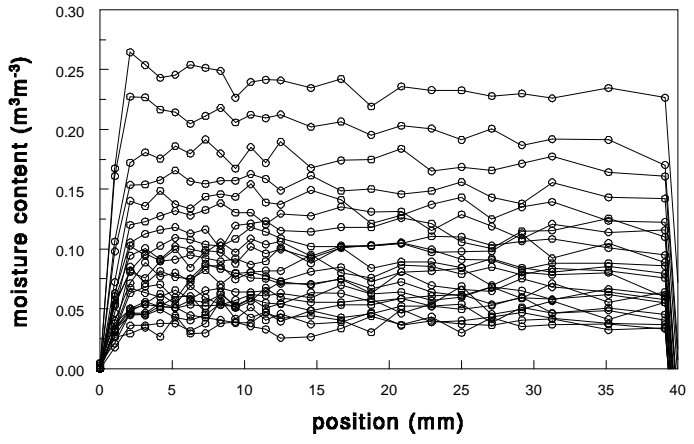
veronderstellen dat NaCl in een materiaal met relatief wijde poriën zoals baksteen, geen oververzadiging kan geven en dat schade veroorzaakt door NaCl daarom niet kan worden toegeschreven aan spanningen ontwikkeld door kristallisatie bij oververzadiging van de NaCl oplossing.

Aangezien volgens de theorie van Correns [8], de kristallisatiedruk gerelateerd is aan de mate van oververzadiging, zou NaCl dus geen hoge druk kunnen ontwikkelen.

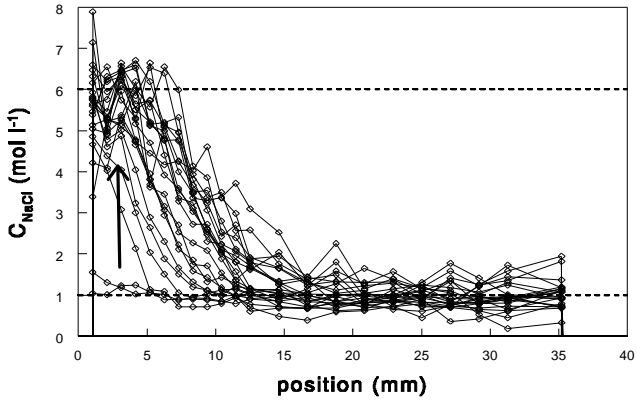


Verticaal: vochtgehalte;
 horizontaal: hoogte van het
 bakstenen proefstuk bij 0 is
 de positie van het drogend
 oppervlak

Figuur 3: Drooggedrag baksteen met water. Vochtverdeling op verschillende tijdstippen tijdens het experiment (NMR metingen) [7a].



Figuur 4: Drooggedrag baksteen met NaCl oplossing. Vochtverdeling op verschillende tijdstippen tijdens het experiment (NMR metingen) [7a].



Figuur 5: NaCl verdeling op verschillende tijdstippen (NMR metingen) [7a].

Rodrigues-Navarro & Doehne (1999) [9] stellen dat kubische (NaCl) kristallen ontstaan door kristallisatie bij een lage graad van supersaturatie en deze worden verondersteld minder schadelijk te zijn dan de naaldvormige kristallen die groeien bij een hoge supersaturatie; dit laatste kan ontstaan bij Na₂SO₄. Dit zou kunnen verklaren waarom het in veel laboratoriumexperimenten moeilijker blijkt schade aan bouwmaterialen met NaCl te verkrijgen dan met Na₂SO₄. De ernstige schade die zeezouten in de praktijk kunnen veroorzaken, zou dan bijvoorbeeld verklaard kunnen worden door het optreden van een afwijkend schademechanisme.

4. Het verschil in gedrag tussen NaCl en Na₂SO₄

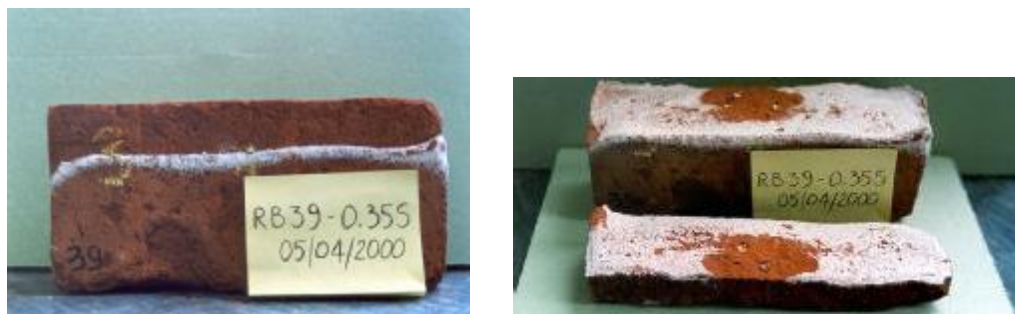
In het kader van het EU project SCOST [10] werden experimenten uitgevoerd, bedoeld om de uiterste zoutconcentraties vast te stellen, waarbij hydrofobering nog mogelijk zou zijn zonder schade te veroorzaken. Voor een vrij zacht type Nederlandse baksteen, worden de resultaten hierna beschreven (zie tabel 1).

Materiaal	Code	Afmeting	Droog gewicht	Fysische eigenschappen			Mechanische eigenschappen	
				C.M.C (w%)	W.A.C (g*cm ⁻² *h ^{-0.5})	porositeit (vol%)	σ _t droog (MPa)	σ _t nat (MPa)
Rode baksteen	RB	43x85x180 (mm)	1098 (g)	14.1	2.88	36	1.37	1.38

σ_t= treksterkte bepaald in splijttest
WAC= waterabsorptie coëfficiënt
CMC= kritisch vochtgehalte

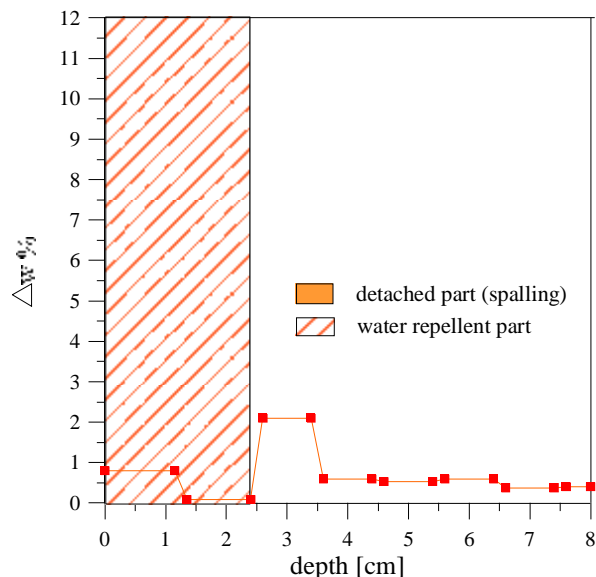
Tabel 1: Materiaaleigenschappen

Er werden twee typen zout, Na₂SO₄ and NaCl, gebruikt. De bakstenen werden eerst behandeld met een oplosmiddelhoudend (organisch) hydrofobeermiddel. Dit resulteerde voor het gebruikte type baksteen in een penetratiediepte van ca. 25 mm. De behandelde bakstenen werden belast met zotoplossingen met verschillende concentraties, die werden ingebracht door capillaire opzuiging van de zotoplossing. Voor natriumsulfaat ontstond schade bij een zoutconcentratie van 0.35 % ten opzichte van het gewicht van de baksteen (fig. 6) (bij latere experimenten bleek de gevoeligheid voor Na₂SO₄ zelfs al bij een lagere concentratie te liggen). De schade ontstond gedurende de eerste droogperiode (na 4 maanden bij 20 °C / 50 % RV) en bestond uit het afspringen van de volledige, (ca. 25 mm dikke) hydrofobe laag.



Figuur 6: Schade aangehydrofobeerde rode baksteen (RB39-0.35S): crypto-florescentie ter plaatse van de overgang van behandeld en niet-behandeld materiaal en loskomen van de behandelde zone. Kristallisatieproef met Na₂SO₄.

Aan deze steen werd de hygroscopische zoutverdeling bepaald. Hierbij bleek (fig. 7) dat in de hydrofobe zone (2.5 cm) nagenoeg geen Na_2SO_4 aanwezig was; het zout was geconcentreerd ter plaatse van de overgang behandeld/niet behandeld. Door het type zout en door de relatief lage zoutconcentratie is het gemeten hygroscopisch vochtgehalte betrekkelijk laag.



Figuur 7: Hygroscopische vochtverdeling in een gehydrofobeerde baksteen, belast met Na_2SO_4 .

Voor natriumchloride, ontstond de schade bij een duidelijk hogere concentratie: 1.41 % van het gewicht van de baksteen.

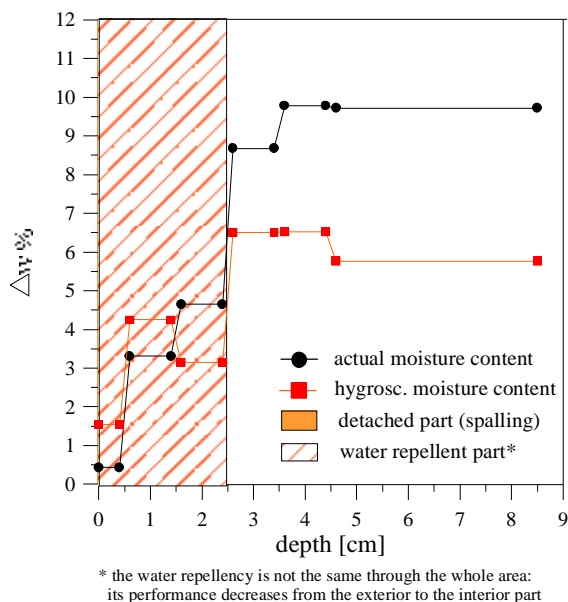
De schade begon met een scheur, rondom zichtbaar aan de zijanten van de baksteen op een diepte van ca. 5 mm (na ca. 2 maanden drogen bij 20 °C / 50 % RV), zie figuur 8. Na ca. 5 maanden kwam deze toplaag volledig los. Opmerkelijk in dit geval is dat niet de volledige hydrofobe laag van ca. 25 mm was losgekomen, maar slechts een dunne laag van ca. 5 mm (fig. 8).



Figuur 8: Schadeontwikkeling in gehydrofobeerde baksteen, belast met NaCl: horizontale scheur na 2 maanden; volledig loskomen van de laag na 5 maanden.

Metingen van vocht- en zoutverdeling (zie fig. 9), tonen de aanwezigheid van vocht en zouten zelfs in de eerste 5 – 25 mm van de baksteen, hoewel de penetratiediepte van het hydrofobeermiddel ook hier tussen 20 en 25 mm bleek te liggen. Op het losgekomen oppervlak konden natte en droge plekken worden onderscheiden (fig. 10).

Uit het hier beschreven schadebeeld zou, zonder de resultaten van de proef met Na_2SO_4 , geconcludeerd kunnen worden dat het hydrofobeermiddel maar matig presteert, en wel blijkt omdat er toch vloeibaar water getransporteerd kan worden.



Figuur 9: Vochtgehalte en hygroscopisch vochtgehalte (en verdeling) in een baksteen belast met NaCl

Figuur 10: Droge plekken (hydrofobering is effectief) en natte plekken (hydrofobering niet/onvolledig effectief) op het beschadigde oppervlak. Verondersteld wordt dat de natte zones verklaard kunnen worden door de bevochtigende eigenschappen van NaCl aanwezig in de fijne poriën

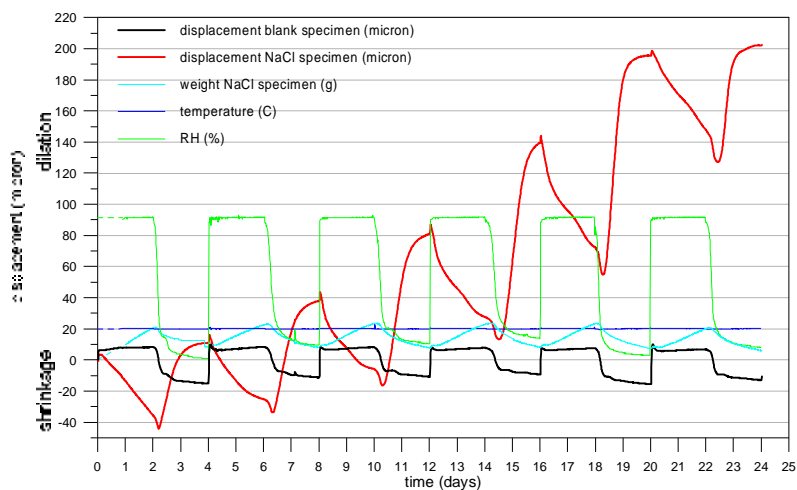
Het lijkt echter onwaarschijnlijk dat de kwaliteit van de hydrofobering bij de stenen belast met NaCl minder zou zijn dan die voor de stenen belast met Na_2SO_4 . Daarom veronderstellen we dat er sprake is van een ander fenomeen, namelijk dat dieper in het materiaal de fijnste poriën niet worden bereikt door het hydrofobeermiddel. Het lijkt er bovendien op dat de fijnere poriën in de baksteen wel bereikbaar zijn voor de NaCl oplossing, maar niet voor de natriumsulfaat oplossing. Of deze hypothese juist is, blijft de vraag, maar het verschil in schade tussen beide zouten lijkt wel in lijn met de theorie van Rodriguez Navarro & Doehne [9] en Arnold [2], die stellen dat NaCl vooral in de fijnere en Na_2SO_4 vooral in de wijdere poriën zal kristalliseren.

5. Het schademechanisme van NaCl

5.1. RV wisselingen

Uit onderzoek van Lubelli et al [11] komen nieuwe inzichten naar voren met betrekking tot het ontstaan van kristallisatieschade bij NaCl. Figuur 11 laat het gedrag van een zoutbelaste (NaCl) pleister zien onder invloed van cycli van afwisselend lage en hoge RV. Er treedt een

onomkeerbare lengteverandering op, die uiteindelijk resulteert in het uiteenvallen van het zoutbelaste materiaal; daarbij gedraagt het zoutbelaste materiaal zich wat uitzetting en krimp betreft opmerkelijk genoeg precies tegengesteld aan het gedrag van hetzelfde, maar dan niet met zout belaste, materiaal.



Figuur 11: Lengteveranderingen van kalk-cementpleister, met en zonder zoutbelasting, onder invloed van wisselingen in de RV. De zoutbelaste pleister vertoont een onomkeerbare en voortdurend toenemende lengteverandering.

5.2. In welke poriën kristalliseren de zouten?

Een van de onderzoeksvragen van het EU project COMPASS was: *in welke poriën kristalliseren de zouten?* Uit onderzoek in het kader van dat project en uit onderzoek door Lubelli [12] bleek dat NaCl, na het optreden van schade met name in de wijdere poriën werd gevonden. Dit werd vastgesteld in labonderzoek, waar schade werd veroorzaakt door RV wisselingen. Figuur 12 laat de zouten zien als een laagje, gekristalliseerd op de wanden van de poriën.



Figuur 12: NaCl, afgezet als een laag op de wanden van wijde poriën. Een en ander na schade in een labexperiment.

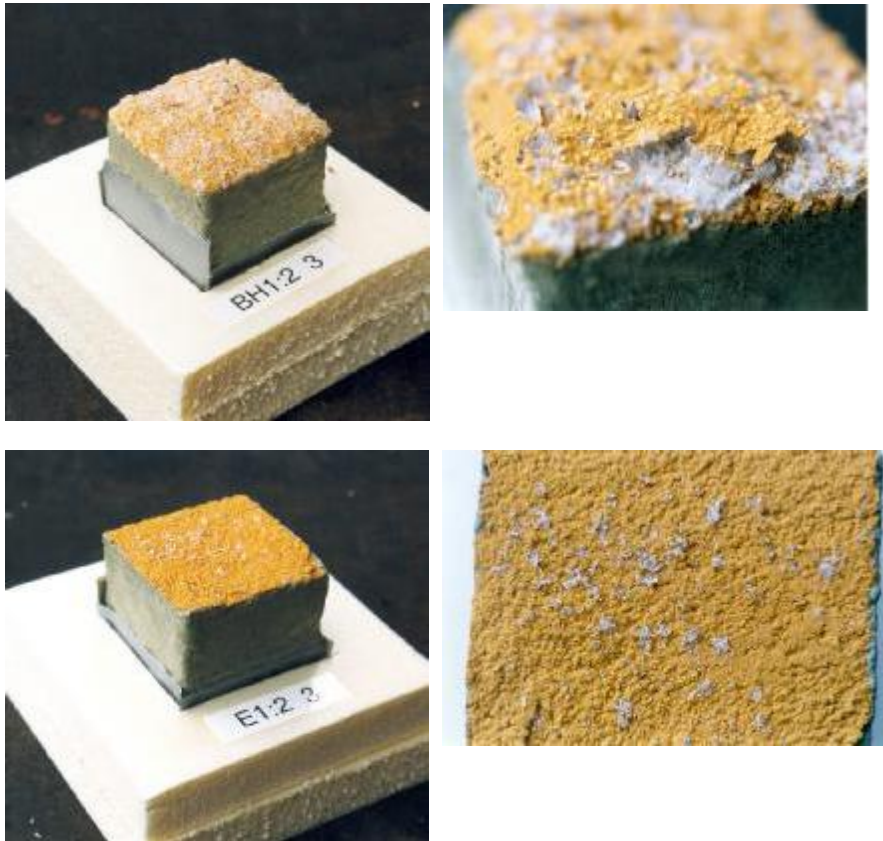
Experimenten als hierboven omschreven, maken dat de hypothese, die in hoofdstuk 4 werd voorgesteld, zeer onzeker wordt.

6. Recent onderzoek: restauratiepleisters, ontzouting

6.1. Het gedrag van zouttransporterende restauratiepleisters

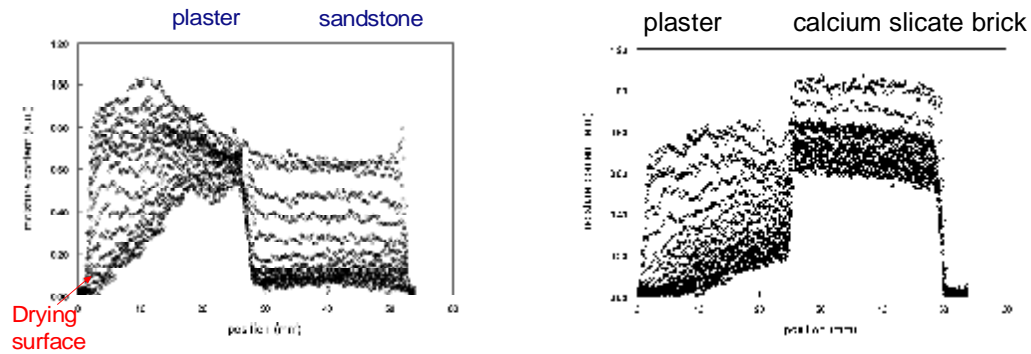
Als onderdeel van het onderzoek in het kader van het EU project COMPASS [13] werd het gedrag van een transporterende pleister op verschillende ondergronden bestudeerd.

In het laboratorium werden zoutkristallisatieproeven uitgevoerd waarbij het gedrag van eenzelfde pleisterlaag (kalk-cement), die zich gedraagt als een zouttransporterende pleister, op twee verschillende ondergronden (grof poreuze Bentheimer zandsteen en fijn poreuze kalkzandsteen) werd vergeleken. Het resultaat was opmerkelijk: een duidelijk verschil in schade, afhankelijk van de ondergrond (fig. 13).



Figuur 13: Kristallisatie proeven met eenzelfde pleister op twee verschillende ondergronden: Bentheimer zandsteen (boven) en kalkzandsteen (onder).

Parallel hieraan werden met behulp van NMR metingen uitgevoerd aan het vocht- en zouttransport bij droging van de steen-pleister combinaties (fig. 14).



Figuur 14: NMR metingen van vochtprofielen tijdens het drogen van een kalk-cementpleister op twee verschillende ondergronden (grof poreuze Bentheimer zandsteen, links en fijn poreuze kalkzandsteen, rechts). Elk van de vochtprofielen representeert een tijdstap in het droogproces.

Hierbij vallen enkele zaken op:

- in het geval van de Bentheimer zandsteen droogt de ondergrond eerst en daarna pas de pleister; daarmee gepaard gaat het verplaatsen van de zouten naar de pleister en, zoals in het labonderzoek bleek, het ontstaan van zoutschade aan het pleister oppervlak.
- in het geval van de kalkzandsteen is het grootste deel van het vocht (en van de zouten) nog in de ondergrond aanwezig op het moment dat de pleister al droog is. Daarmee wordt ook het (nauwelijks) optreden van schade aan het pleisteroppervlak in het lab onderzoek begrijpelijk.

De verklaring is dat de pleister die fijn poreus is in sterke mate de zoutoplossing uit de grof poreuze ondergrond kan aanzuigen, terwijl dat bij een ondergrond die zelf fijn poreus is niet of nauwelijks lukt; de zouten blijven daar grotendeels in de ondergrond en schade manifesteert zich niet of pas veel later.

Dit onderzoek is ook van belang voor de verklaring voor de uiterst snelle degradatie van een restauratiepleister op Curaçao (fig. 15). Met deze pleister waren op veel monumenten, met muren uit koraalsteen en mortel goede resultaten bereikt. Daarbij gaat het om een ondergrond die tamelijk fijn poreus is. In dit schadegeval echter waren de muren opgebouwd uit veel grover poreuze klipsteen, met een versneld transport van zouten uit de ondergrond naar de pleister en vervolgens snelle degradatie daarvan tot gevolg.



Figuur 15: Curaçao (NA) – Schadeontwikkeling aan een restauratiepleister op een zoutbelaste ondergrond, binnen een tijdsbestek van twee jaar na de applicatie. Nb kleurverschillen zijn een gevolg van het gebruik van verschillende camera's.

6.2. Ontzouting

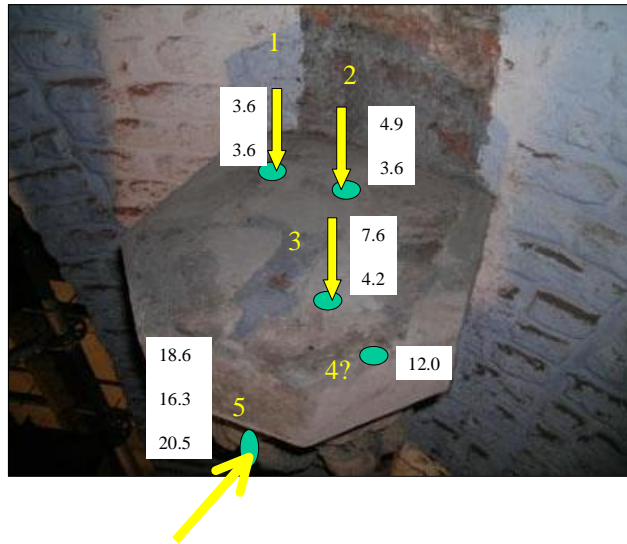
In de absis van het koor van de Pieterskerk in Leiden is een aantal 15e tot 16e eeuwse tufstenen gebeeldhouwde kapitelen (kraagstenen) aanwezig (fig. 16). Deze kapitelen representeren een belangrijke fase in de bouwgeschiedenis van de kerk. Net als diverse andere natuurstenen onderdelen in deze kerk hadden de kapitelen te leiden onder kristallisatieschade. Er werd besloten ze te ontzouten en vervolgens te behandelen met een steenversteviger (silicium-ester). De operatie werd uitgevoerd, echter nauwelijks gedocumenteerd, zodat onduidelijk is met welk ontzoutingsprocedé en ook niet hoe vaak werd behandeld. Voor zover bekend werd de effectiviteit van de ontzouting niet aan de hand van monsternamen gecontroleerd.

Ca. 1 ½ jaar na de behandeling werden wij in de gelegenheid gesteld de effectiviteit van de ontzouting te bestuderen.

Het resultaat van de ingreep bleek tamelijk teleurstellend (fig. 16). In figuur 16 is de hygroscopische vochtopname voor 5 verschillende bemonsteringsplaatsen, op een aantal diepten gegeven.

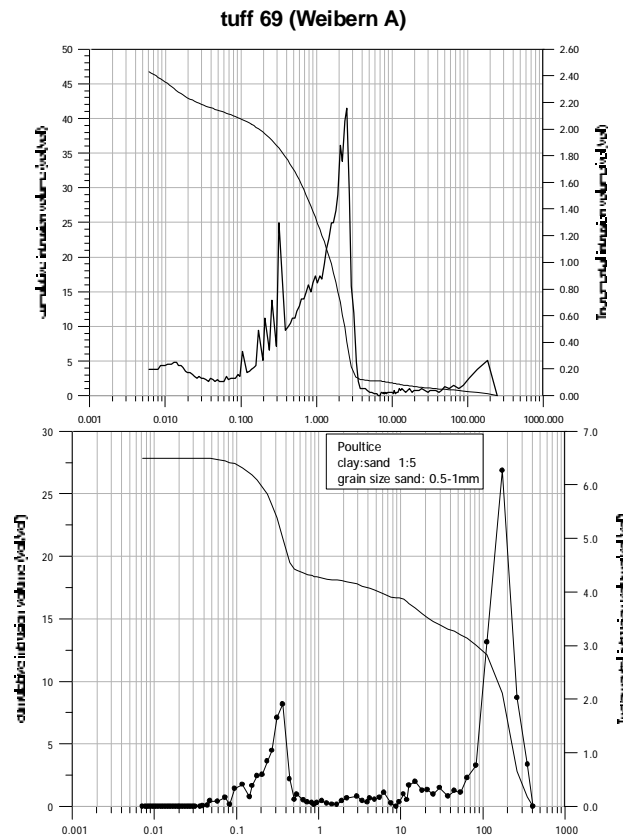
De resultaten van het onderzoek aan de monsters 1 t/m 3 geven aan dat in het bovendeel van de kraagsteen nog zouten aanwezig zijn. Het gaat op de meeste plaatsen om een relatief geringe hoeveelheid.

Een scherf afkomstig van de kraagsteen, die via de architect werd verkregen (monster 4), is waarschijnlijk afkomstig van het oppervlak, en genomen op een moment voor de ontzouting. Deze scherf heeft een beduidend hoger zoutgehalte. Monster 5 tenslotte, is genomen uit het gebeeldhouwde deel van de kraagsteen.



Figuur 16: Zoutverdeling (hygroscopisch vochtgehalte bij 96 % RV) in een tufstenen kapiteel na ontzouting en behandeling met een steenversteviger.

Met name het zoutgehalte in monster 5 wijst op het daar nog aanwezig zijn van een aanzienlijke hoeveelheid zouten (meer zelfs dan in de niet ontzoute scherf). Dit betekent dat in principe ook in de toekomst nog schade zou kunnen ontstaan door RV-variaties in het binnenklimaat, zie ook 5.1.



Figuur 17: Porieverdeling van Weiberner tuf (boven) en een ontzoutingsmassa (onder).

Bij de kapitelen gaat het om Weiberner tuf. Dit type tufsteen heeft een porieverdeling, zoals gegeven in figuur 17. Hieruit wordt duidelijk dat de steen een aanzienlijk aandeel kleine tot zeer kleine poriën bevat. Dit betekent dat het ontzouten door middel van gebruikelijke ontzoutingsmassa's, die bijvoorbeeld een porieverdeling hebben zoals weergegeven in figuur 17 op aanzienlijke problemen kan stuiten: de wijde van de poriën in de ontzoutingsmassa is dusdanig dat capillair transport vanuit de fijne poriën in de tuf naar de ontzoutingsmassa eigenlijk niet verwacht kan worden. Theoretisch beschouwd zou een aanzienlijk deel van de zouten in het materiaal achterblijven. Deze stelling lijkt te worden bevestigd door de in dit praktijkgeval aangetroffen situatie. Succesvolle behandeling is in het algemeen mogelijk met een ontzoutingsmassa met fijnere poriën dan de te behandelen steen, dan wel door ondergrond als ontzoutingsmassa gedurende lange tijd nat te houden; in het laatste geval wordt geen gebruik gemaakt van capillair transport maar van transport middels diffusie.

7. Discussie en conclusies

In dit artikel zijn diverse observaties, in labexperimenten beschreven en zijn relaties gelegd naar de praktijk. Deze observaties hebben het mogelijk gemaakt de condities te beschrijven die het ontstaan van zoutschade bevorderen steeds beter te begrijpen en te beschrijven. Hiermee wordt het uiteindelijk ook mogelijk in voorkomende gevallen in de praktijk een betere risico inschatting te maken.

Het begrijpen van het schademechanisme zelf is duidelijk gegroeid; zeker waar het de kristallisatie van NaCl betreft hebben het EU project COMPASS en Lubelli (2006) veel verhelderd.

Het is intussen mogelijk veel zoutbestrijdingsmaatregelen beter te beoordelen, en ook vooraf de kans op succes beter aan te geven. Dit kan teleurstellingen voorkomen en in elk geval leiden tot het uitsluiten van niet nuttige behandelingen. Uiteraard blijft onverlet dat altijd vooronderzoek nodig is: naar de condities waarin een gebouw of constructie zich bevindt en in veel gevallen naar de eigenschappen van de betreffende materialen.

Ook blijven nog veel vragen onbeantwoord:

- Hebben verschillende zouten inderdaad verschillende schademechanismen of kan een en hetzelfde zouttype meerdere schademechanismen bezitten?
- Kan schade ontwikkeling worden beïnvloed door een verstandige keuze van de eigenschappen van de reparatiematerialen en wat zijn de grenzen van de aanpasbaarheid en toepasbaarheid van materialen
- Is de invloed van omgevingscondities niet belangrijker dan die van de materiaaleigenschappen?
- In welke poriën vindt de kristallisatie van verschillende typen zout nu precies plaats? De onderzoeksresultaten geven hier nog geen eenduidig antwoord.
- Hoe is het verschillend indringgedrag van Na₂SO₄ en NaCl in hydrofobe lagen nu definitief te verklaren?
- Kunnen materialen met zeer fijne poriën wel effectief worden ontzout en zo ja met welke methoden?

Het nu lopende EU onderzoek Desalination [14] zal naar verwachting op een aantal van deze vragen meer inzicht verschaffen.

7. Referentie

- [1] Charola A.E., 2002, *Salts in the deterioration of porous materials: an overview*, JAIC 39, pp. 327-343.
- [2] Arnold A., Zehnder K. 1990, *Salt weathering on monuments*, in: Advanced workshop 'Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones', Pavia (I), September 1990, pp. 31-58.

- [3] Hees van, R.P.J., *Optrekkend grondvocht*, TNO rapport nr.BI80-36, pp.29, 1980.
- [4] Tammes E., Vos B.H., *Warmte- en Vochttransport in Bouwconstructies*, Kluwer Technische Boeken BV, Deventer, Antwerpen, 1980, ISBN 90 201 11663.
- [5] Pühringer, J., 1983, *Salt desintegration, salt migration and degradation by salt - a hypothesis*, Swedish Council for Building Research, Document D15: 1983, ISBN 91 540 4001 9.
- [6] Larsen K.P., *Desalinization of painted brick vaults*, PhD thesis, Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark, Series R, n.52).
- [7] Pel L., Huinink H., Kopinga K., 2002, *Ion transport and crystallization in inorganic building materials as studied by nuclear magnetic resonance*, Applied Physics Letters, Vol. 81 no 15, pp. 2893-2895.
- [7a] Pel L., 2002, *Moisture and ion transport during drying, as studied by NMR*, Mid term report EU project ASSET, contr. nr. ENK4-CT2000-00023.
- [8] Correns C.W., *Growth and dissolution of crystal under linear pressure*, Discussion of the Faraday Society, 5, 1949, pp.267-271.
- [9] Rodriguez Navarro C. - Doehne E., 1999, *Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern*, Earth Surface Processes and Landform, 24, pp.191-209.
- [10] De Witte E. et al., EU Project ENV CT 98-0710 Salt Compatibility of Surface Treatments.
- [11] B. Lubelli, R.P.J. van Hees, H.P. Huinink, C.J.W.P. Groot, Irreversible dilation of NaCl contaminated lime-cement mortar due to crystallization cycles, Cement and Concrete Research, 36 (2006), pp. 678-687.
- [12] B. Lubelli, 2006, Sodium chloride damage to porous building materials, PhD thesis, Delft University of Technology.
- [13] R.P.J. van Hees & S. Naldini eds., 2007, Compatibility of Plasters with Salt loaded Substrates in Historic Buildings, end report EU project COMPASS, contr. Nr. EVK4-CT-2001-00047.
- [14] <http://www.bk.tudelft.nl/desalination>.

- [1] Charola A.E., 2002, *Salts in the deterioration of porous materials: an overview*, JAIC 39, pp. 327-343.
- [2] Arnold A., Zehnder K. 1990, *Salt weathering on monuments*, in: Advanced workshop 'Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones', Pavia (I), September 1990, pp. 31-58.
- [3] Hees van, R.P.J., *Optrekkend grondvocht*, TNO rapport nr.BI80-36, pp.29, 1980.
- [4] Tammes E., Vos B.H., *Warmte- en Vochttransport in Bouwconstructies*, Kluwer Technische Boeken BV, Deventer, Antwerpen, 1980, ISBN 90 201 11663.
- [5] Pühringer, J., 1983, *Salt desintegration, salt migration and degradation by salt - a hypothesis*, Swedish Council for Building Research, Document D15: 1983, ISBN 91 540 4001 9.
- [6] Larsen K.P., *Desalinization of painted brick vaults*, PhD thesis, Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark, Series R, n.52).
- [7] Pel L., Huinink H., Kopinga K., 2002, *Ion transport and crystallization in inorganic building materials as studied by nuclear magnetic resonance*, Applied Physics Letters, Vol. 81 no 15, pp. 2893-2895.
- [7a] Pel L., 2002, *Moisture and ion transport during drying, as studied by NMR*, Mid term report EU project ASSET, contr. nr. ENK4-CT2000-00023.
- [8] Correns C.W., *Growth and dissolution of crystal under linear pressure*, Discussion of the Faraday Society, 5, 1949, pp.267-271.
- [9] Rodriguez Navarro C. - Doehne E., 1999, *Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern*, Earth Surface Processes and Landform, 24, pp.191-209.
- [10] De Witte E. et al., EU Project ENV CT 98-0710 Salt Compatibility of Surface Treatments.
- [11] B. Lubelli, R.P.J. van Hees, H.P. Huinink, C.J.W.P. Groot, Irreversible dilation of NaCl contaminated lime-cement mortar due to crystallization cycles, Cement and Concrete Research, 36 (2006), pp. 678-687.
- [12] B. Lubelli, 2006, Sodium chloride damage to porous building materials, PhD thesis, Delft University of Technology.
- [13] R.P.J. van Hees & S. Naldini eds., 2007, Compatibility of Plasters with Salt loaded Substrates in Historic Buildings, end report EU project COMPASS, contr. Nr. EVK4-CT-2001-00047.
- [14] <http://www.bk.tudelft.nl/desalination>.

“WATERDICHT” MASSIEF OPGAAND METSELWERK: MATERIAALKEUZEN EN UITVOERINGSASPECTEN VOOR NIEUW WERK EN RESTAURATIE

Caspar J.W.P. Groot^{1,2}, Jos M.T. Gunneweg^{1,2}

¹ TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

² www.grootgunnewegdelft.nl

Samenvatting

In deze publicatie wordt ingegaan op een aantal oorzaken van vochtproblemen in zwaar regenbelast opgaand massief metselwerk en worden mogelijke oplossingen nader uitgewerkt.

De nadruk ligt op de keuze van metselmortel en steen voor nieuw massief metselwerk en het herstel van historisch massief metselwerk. Voorts wordt aandacht besteed aan geconstateerde problemen bij hervoeegen. Tenslotte worden enige aspecten van injecteren van metselwerk behandeld.

Getracht is de problemen en oplossingen zowel uit een theoretische als praktische invalshoek te benaderen.

De gegevens voor deze publicatie zijn in belangrijke mate verkregen door onderzoek in de context van het project “Aanpak Vochtproblemen in Massief Metselwerk” uitgevoerd aan de TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen en gecoördineerd door de Rijksdienst voor Archeologie, Cultuurlandschap en Monumenten (RACM)

1. Inleiding

Massief historisch metselwerk vertoont regelmatig waterdichtheidsproblemen.

Vocht is een belangrijke oorzaak van schade aan het metselwerk (vorst- en zoutschade) en het vaak aanwezige houtwerk (rot). Bovendien kan lekkage een schadelijk effect hebben op leefcondities en bedrijfsvoering.

Sinds enige tijd is het besef gegroeid dat meer inzicht in de vochthuishouding van massief metselwerk sterk zou kunnen bijdragen aan duurzaamheidsverhoging van het gebouwde erfgoed in Nederland.

Kennis en kunde op het gebied van het hygrische gedrag van massief metselwerk lijken niet sterk ontwikkeld te zijn in de huidige bouwpraktijk of wellicht verloren te zijn gegaan. Eigenlijk is dit niet verwonderlijk; immers, in moderne bouw doet het er niet toe of metselwerk lek is. Het wordt tenslotte goeddeels toegepast als buitenblad in een spouwconstructie; en dit voorblad mag lek zijn, omdat de spouw er voor is om het doorgeslagen vocht te laten verdampen.

Dit gebrek aan kennis en kunde is naar voren gekomen bij een aantal nieuwbouwprojecten: bijvoorbeeld bij de nieuwbouw van molens; het realiseren van niet-lekkend massief metselwerk bleek niet eenvoudig te zijn. Al haalde men er het meest deskundige advies bij dan liep het toch nog mis.

Ook bij het herstel van massief opgaand metselwerk (bijvoorbeeld bij inboeten) bleek vaak, betrekkelijk korte tijd na oplevering, schade te ontstaan.

In deze bijdrage wordt ingegaan op een aantal oorzaken van vochtschade in massief metselwerk en hoe deze aan te pakken.

Daarbij zal de aandacht in het bijzonder uitgaan naar massief metselwerk in opgaande muren met hoge regenbelasting en/of bijzondere verwerende omstandigheden (bijvoorbeeld watertorens, kerk- en vuurtorens, hoge solitair gelegen gebouwen, zie bijlage 1).

2. Oorzaken van vochtproblemen

Gedurende de laatste 75 jaar zijn er vele praktijk- en laboratoriumonderzoeken gedaan naar waterdichtheid van metselwerk. De onderzoeksresultaten zijn geëvalueerd in literatuurstudies van Grimm (1982) en Ramamurthy & Anand (2001).

Zowel uit de literatuur als uit praktijkervaring blijkt dat er vele redenen zijn aan te wijzen voor het ontstaan van vochtproblemen in massief metselwerk.

Te noemen zijn:

- materiaaleigenschappen van metselstenen en metselmortel en de compatibiliteit tussen steen en voeg; te poreuze steen, inadequate mortelkeuze, inadequate steen-mortel keuze
- scheuren: dwarsscheuren, losse schil (figuur 1a)
- ontwerp: slechte detaillering
- slechte ventilatie
- de invloed van beschermende maatregelen op de vochtthuishouding: hydrofoberen, (overmatige) gevelreiniging, inwendig vochtdicht pleisterwerk; etc
- vakmanschap: bij de bouw niet "vol en zat" gemetseld, niet-vakbekwaam voegherstel (figuur 1b) etc



Figuur 1a: Losse schil in molenromp



Figuur 1b: Onvakkundig voegherstel

Het bovenstaande bevestigt de complexiteit van de problematiek: de vochtproblemen kunnen door een combinatie van invloedsfactoren bepaald worden. Ook kan opgemerkt worden dat de invloed van vakmanschap op het ontstaan en oplossen van problemen significant kan zijn.

3. Hoe vochtproblemen in massief metselwerk aan te pakken?

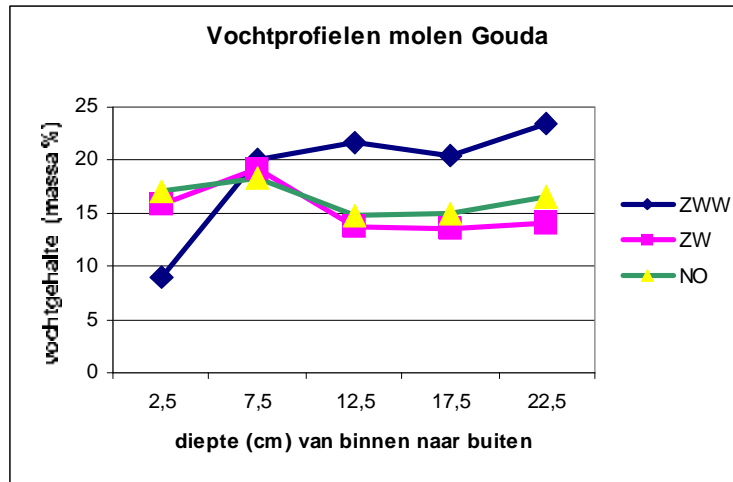
Veel massief metselwerk heeft vanaf het begin vochtproblemen vertoond; dit is af te leiden uit beschermingsmaatregelen die direct na de bouw werden getroffen (bijvoorbeeld molens, die vanaf de bouw aan de regenzijde gepleisterd, geteerd zijn geweest) . Verondersteld mag worden dat aan basiseisen ten aanzien van goede steen- en mortelkeuze + vakkundige uitvoering in vele gevallen niet werd voldaan.

Ook is er massief metselwerk dat in de loop van de tijd vochtproblemen is gaan vertonen door bijv. scheurvorming, uitloging van de mortel, veroudering enz.

Sinds enige tientallen jaren komt men tevens het fenomeen tegen dat vochtproblemen toenemen of zelfs ontstaan als gevolg van inadequate restauratiemethoden.

Bakstenen en mortels in massief metselwerk zijn poreuze materialen. Wezenlijk voor dit type materialen is dat deze via capillaire werking vocht op kunnen nemen, en via verdamping (droging) weer vocht kunnen afstaan. De balans tussen vochttopneming- en drooggedrag van het metselwerk onder uiteenlopende omgevingscondities bepaalt het al dan niet optreden van vochtdoorslag (lekkage).

Als zich vochtproblemen in opgaand massief metselwerk voordoen dan kan men, ongenueanceerd gesteld, twee verschillende strategieën volgen: de ene richt zich op het voorkomen van vochtindringing en de andere probeert het zoveel mogelijk het drogen te bevorderen; daarbij moet men zich realiseren dat maatregelen ter voorkoming van vochtindringing vaak het verminderen van de droogcapaciteit veroorzaken.



Figuur 2: Hoge vochtgehalten in molenmuur als het gevolg van opsluiting van, via microscheurvorming binnengedrongen, vocht. Aan de buitenzijde is een hydrofobering toegepast, aan de binnenzijde een dichte cementpleister waardoor een zeer slechte droging van het metselwerk.

Geconstateerd kan worden dat maatregelen ter bestrijding van vochtindringing (dichte pleisterlagen, dicht voegwerk, hydrofoberen) nog al eens tegengestelde effecten sorteren. Afsluiten betekent meestal drogen tegengaan of op zijn minst drogen aanzienlijk vertragen. In feite moet men bij het treffen van dergelijke maatregelen er heel zeker van zijn dat men in de toekomst niet geconfronteerd wordt met onvoorziene vochtbronnen (optrekkend vocht, lekkages, microscheurvorming etc), waardoor er toch vocht achter de afschermdende laag komt; ook moet men goed doordenken hoe men de afsluitende werking in stand kan houden (duurzaamheid).

Een andere benadering is er naar te streven het metselwerk zo goed mogelijk zijn vocht te laten afstaan, dus optimaal drogen. Deze benadering gaat er van uit dat goed gemaakt massief metselwerk geen vochtproblemen vertoont onder de normale tot zware gebruiksomstandigheden. Door maatregelen te treffen, die er op gericht zijn de kwaliteit van lekkend metselwerk op een hoger niveau te brengen en een goede droging te waarborgen, zouden de vochtproblemen opgelost kunnen worden.

Dit houdt bijvoorbeeld in dat voegmortels en binnenpleisters niet dicht maar "vochttransporterend" moeten zijn; dat het vocht vanuit het metselwerk met zo weinig mogelijk weerstand naar buiten kan. Er zijn voegmortels en (binnen)pleisters op de markt die deze eigenschappen bezitten. In de praktijk is gebleken dat "vochttransporterende" voegmortels gedeeltelijk de negatieve effecten van hydrofobering kunnen opheffen.

Alvorens herstelmaatregelen te treffen is het van belang te weten of het metselwerk holle ruimten bevat (vochtophoping in holle ruimten levert vaak ernstige vochtproblemen op). Met behulp van injectie is het veelal mogelijk de holle ruimten op te vullen en daarmee het metselwerk te homogeniseren. Hiermee wordt voorkomen dat vochtconcentraties in het metselwerk kunnen blijven bestaan.

Een goede ventilatie is een effectieve manier om van binnenuit te drogen. Geconstateerd kan worden dat de ventilatie vaak onvoldoende is; het aanbrengen van een eenvoudig ventilatiesysteem blijkt al een buitengewoon gunstig effect te kunnen hebben op het drogen.

Deze benadering, dus het optimaliseren van het drooggedrag en kwaliteit van het lekkende metselwerk, is in een aantal projecten effectief gebleken. Ook deze benadering kent uiteraard zijn limieten: er zijn combinaties van gebreken die ook met deze benadering niet oplosbaar zijn.

4. Het maken van nieuw “waterdicht” massief metselwerk

In het kader van het onderzoeksproject “Aanpak Vochtproblemen Massief Metselwerk” is onderzoek gedaan naar een optimale keuze van steen en mortel om “waterdicht” metselwerk te realiseren.

Daarbij is in de praktijk aan bestaande gebouwen onderzocht aan welke eigenschappen waterdicht metselwerk voldoet. Tevens is in daarop volgend laboratoriumonderzoek gezocht naar optimale combinaties van steen en *metselmortel* tav waterdichtheid. De nadruk lag hierbij op metselwerk met grote vervormingscapaciteit (in het traditionele metselwerk gaat het hierbij om mortels met voornamelijk kalk als bindmiddel).

4.1. Steenkeuze

Uit het praktijkonderzoek naar de gewenste hygrische eigenschappen van massief metselwerk kwam naar voren dat de stenen een *matige* initiële opzuigsnelheid (initiële wateropzuiging: IW) van water en een bijpassende wateropnamecapaciteit (vrijwillige wateropname: VW) moeten bezitten om waterdichtheid voor zwaar regenbelast metselwerk te realiseren.

Opzuigsnelheid en vochtnamecapaciteit worden gewoonlijk uitgedrukt in resp. *initiële wateropzuiging: IW* (of het Hallergetal) en de *vrijwillige wateropname: VW*. Deze karakteristieken kunnen op eenvoudige wijze op de bouwplaats worden bepaald. Voor de beschrijving van de proeven zie [Groot en Gunneweg, 2007 (b)].

Adequate stenen zijn: (matig zuigende) hardgrauw of gevelklinker

De hygrische eigenschappen zijn voor

- Hardgrauw: Initiële Wateropzuiging (IW): 2.5 kg/m²/min (Hallergetal ~25 gr/dm²/min (gemiddelde uit 10 stenen met als ondergrens IW: 2 en bovengrens IW: 3). Vrijwillige wateropneming (VW) bovengrens 35% (v/v)
- Gevelklinker: Initiële Wateropzuiging (IW): 1.75 kg/m²/min (Hallergetal ~1.75 gr/dm²/min (gemiddelde uit 10 stenen met als ondergrens IW: 1.5 en bovengrens IW: 2). Vrijwillige wateropneming (VW) bovengrens 25% (v/v)

4.2. Mortelkeuze

Daar waterdichtheid niet alleen bepaald wordt door de hygrische eigenschappen van de steen, maar ook door de al dan niet vochtkerende werking van de voegen, werd het effect van de mortel op de waterdichtheid nader onderzocht. Daartoe werd een onderzoekprogramma opgesteld waarin een aantal aspecten van gedrag van mortels, *op zich* en *in combinatie met* bakstenen kon worden geanalyseerd. Deze onderzoekingen

mondden uit in de bestudering van het vochtdoorlaat- en lekgedrag van een tweetal proefmuren, die berekend werden.

Van een 15-tal mortels werden 3 zeer goed verwerkbare (A,B en C) en een contrastmortel (X: een slecht verwerkbare mortel) uitgekozen voor verder onderzoek.

Deze mortels waren:

- Mortel A Schelpkalk mortel
- Mortel B Licht hydraulische kalkmortel
- Mortel C Steenkalk + weinig tras

-
- Mortel X Metselcement mortel

Om een indruk te krijgen van het vochtopnamegedrag en het drooggedrag werden metselwerk"beertjes" gemetseld. De beertjes bestaan uit 3 lagen metselwerk van 3 stenen per laag (zie figuur 3).

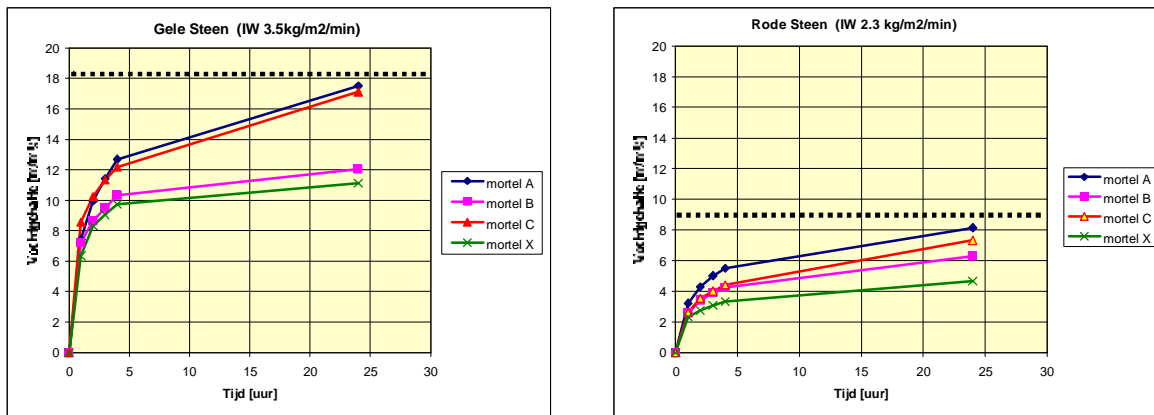


Figuur 3: Aanzicht van buitenmuuroppervlak van metsel"beertjes", van waaruit vochtabsorptie en droging plaatsvindt; de andere 5 zijden zijn met plastic bekleed om vochttransport vanuit die zijden te voorkomen.

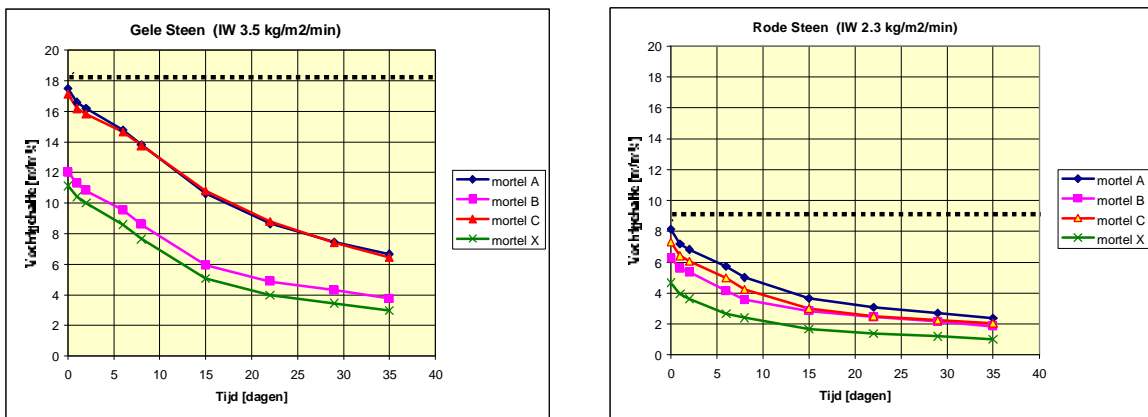
Ze zijn opgebouwd uit 2 typen stenen, een matig-zuigende (IW: 2,3) en een sterk-zuigende steen (IW: 3,5) ieder vermetseld met de 4 verschillende metselmortels.

De proefstukken zijn op te vatten als een deel van een muur. De in de foto naar boven gerichte zijde van de beertjes is de zichtzijde van de muur. Vanuit deze zijde wordt tijdens de proef (en ook in de werkelijkheid) vocht opgenomen en vocht afgestaan (gedroogd); het vocht passeert steen en waar mogelijk mortelvoegen. De andere 5 zijden zijn met plastic bekleed om vochttransport in deze richtingen te voorkomen.

Absorptieproeven



Droogproeven



Figuur 4: Resultaten absorptie- en droogproeven. In de figuren zijn door middel van de horizontale lijnen vrijwillige wateropnemingswaarden: 18,4 (gew %) voor de gele steen (IW: 2.3) en 9 (gew %) voor de rode steen (IW: 3.5) aangegeven.

4.3. Barrièrewerking

Bij de gele, sterk zuigende steen (zie linker grafiek, figuur4) valt op dat de vochtopname van de proefstukken vermeteld met schelpkalkmortel (A) en de basterd steenkalk-tras (C) mortel aanzienlijk hoger ligt dan bij de licht hydraulische kalkmortel (B) en de metselcement mortel (X). Na 24 uur zijn de proefstukken (A) en (C) nagenoeg verzadigd: vochtgehalte iets lager dan de vrijwillige wateropneming 18.4 % (m/m). Daarentegen is de vochtopname van de proefstukken (B) en (X) minder dan 2/3 van het beschikbare poriënvolume (11-12 % (m/m)).

Kennelijk werken de voegen in het laatste geval als een barrière voor het transport van vocht door het gehele proefstuk heen.

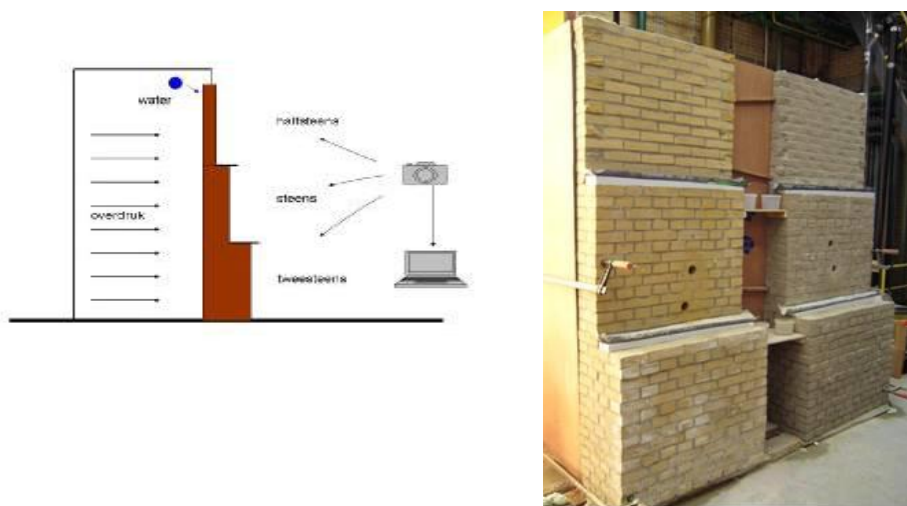
Het scherpe onderscheid in vochtopname tussen kalk en hydraulische mortels (bij de sterk-zuigende stenen) doet zich in veel mindere mate voor bij het metselwerk met matig-zuigende stenen (zie rechter grafiek, figuur4). Wel is een zelfde volgorde in mate van vochtopname te zien als bij de sterk-zuigende stenen en is de vochtopname van de proefstukken met hydraulische mortels 2/3 tot minder dan de helft van het beschikbare poriënvolume.

Uit de droogproeven komt naar voren dat metselwerk met sterk-zuigende stenen gemetseld in kalkmortels (linker figuren) in de praktijk *structureel vochtiger* zal zijn dan de andere combinaties.

Verhoudingsgewijs is de absorptie-droogsituatie van de zuivere luchtkalkmortels in combinatie met de sterk-zuigende bakstenen opvallend ongunstig en bij de matig-zuigende stenen minder ongunstig.

4.4. Beregeningsproeven

Aan de hand van beregeningsproeven werd het doorslaggedrag van een 2-tal muren bestudeerd.



Figuur 5: Links, de schematische opstelling van de regenproef (Tomas Wijffels, TNO); rechts, de 2 proefmuren; de muurdikten van boven naar beneden: $\frac{1}{2}$ steen, 1 steens en 2 steens

De proefopstelling is weergegeven in figuur 5. Hieruit blijkt dat de muren van onder naar boven verjongen van 2-steens via steens naar half steens. Hierdoor is het mogelijk het doorslaggedrag van de muur bij verschillende dikten te bestuderen. Er zijn twee typen stenen gebruikt, een sterk zuigende (links, geel) en een zwak-zuigende (rechts, grijs). De muren zijn gemetseld met mortel B, de licht hydraulische kalkmortel.

Uit de regenproeven blijkt dat bij kleine dikten van de muur ($\frac{1}{2}$ steens en 1 steens) de muur met de sterk-zuigende stenen het eerst doorslaat en aanzienlijke lekkage vertoont. Bij dikten groter dan $1 \frac{1}{2}$ steens blijken beide muren niet door te slaan. In dit geval komt het indringende vocht altijd een mortelbarrière tegen, die kennelijk effectief genoeg is om het water te keren.

4.5. Conclusies onderzoek

Uit de proeven komt naar voren dat zowel de hygrische eigenschappen als het type metselmortel grote invloed hebben op de vochtthuishouding in de muur.

Zo blijkt dat

- het vochtgehalte in muren met matig zuigende stenen structureel lager is dan in muren met sterk zuigende stenen.
- het vochtgehalte in de muur en vochtdoorslag afhankelijk is van de barrièrewerking van de mortel.

- de barrièrewerking van de voeg sterk afhankelijk is van de aanwezigheid van hydraulische componenten in de mortel. De barrièrewerking wordt effectief bij muurdikten > 1½ steens.
- zuivere kalkmortels nauwelijks barrièrewerking vertonen.
- voor metselwerk met een goede vervormingscapaciteit en barrièrewerking licht hydraulische metselmortels geschikt zijn.

4.6. Voorlopige aanbevelingen keuze mortel en steen voor nieuw werk

Uitgaande van de voorafgaande conclusies en in aanmerking nemend dat in massieve muren veelal dunne muurdikten aanwezig zijn (balkopleggingen, verlopende muurdikten etc.) wordt aanbevolen bij het realiseren van nieuw zwaar regenbelast opgaand massief metselwerk bakstenen met een Initiële Wateropzuiging (IW-waarde) van 1,7 tot 2,5 [kg/m²/min], type traditionele metselklinker / hardgraauw kwaliteit, in combinatie met een licht hydraulische metselmortel (druksterkte 4-5 N/mm²) toe te passen.

Opmerking: In dit onderzoek is metselwerk met 1 type licht hydraulische metselmortel nader onderzocht. In het kader van het uitbrengen van een aanbeveling door de RACM tbv de keuze van steen en mortel voor opgaand zwaar regenbelast metselwerk zullen nog een aantal andere licht hydraulische onderzocht worden onderzocht.

5. Restauratie van massief metselwerk

Stenen

Bij de bestudering van het initiële opzuiggedrag van een aantal historische gebouwen opgebouwd uit massief metselwerk, die geen vochtproblemen vertoonden, kwam naar voren dat er grote verschillen bestaan tussen het originele materiaal en het materiaal aan de verweerde zichtzijde van het metselwerk. De verwerking leidt in vele gevallen tot een halvering van de snelheid van de vochtname (zie figuur 6). Het is verstandig om bij herstelwerkzaamheden met de reparatiestenen aan te sluiten op het initiële opzuiggedrag van het aanwezige materiaal. Uit de resultaten weergegeven in figuur 6 blijkt dat de IW-waarden aan de verweerde buitenzijde (de zichtzijde) overeenkomen met die van matig zuigende stenen.

Initiële Wateropzuiging (IW)			
		zool *)	zicht #)
		[kg/m ² /min]	[kg/m ² /min]
1	DSM, Delft 1910	2.2	1.3
2	de Roos, Delft 1727	4.3	2.2
3	TU-Delft, Delft 1910	2.8	2.2
4	Aeolus, Vlaardingen 1793	2.8	1.3
5	Molen 7, Kinderdijk 1738	6.1	2.4
6	de Hoop, Zierikzee 1850-76	5.5	2.5
7	de Hoop, Rozenburg 1887	6.3	3.3
8	Windlust, Achthuizen 1852	3.3	1.7

*) ZOOL: binnenzijde / legzijde

#) ZICHT: verweerde buitenzijde / strekzijde

Figuur 6: Invloed van vervuiling op initiële opzuiging van bakstenen: de 'zool' waarden geven de initiële wateropzuiging tijdens de bouw weer; de 'zicht' waarden de huidige vervuilde buitenzijde waarden

De restauratiebaksteen dient vergelijkbaar hygrisch gedrag te vertonen: IW-Waarden: 1.7 tot 2.5 [kg/m²/min].

Opmerking 1

Reiniging van historisch metselwerk kan leiden tot de verwijdering van de verweringslaag. Dit kan leiden tot vochtproblemen in het metselwerk (immers, de initiële wateropzuiging kan verdubbelen)

Opmerking 2

De initiële wateropzuiging is niet het enige criterium om reparatiestenen op uit te kiezen. Er zijn restauratiestenen op de markt, die wat hygrisch gedrag betreft matig zuigend zijn maar mechanisch uiterst zwak zijn.

Dit vindt zijn oorzaak in het bakken van de stenen bij onvoldoende hoge baktemperaturen. Door het gebrek aan mechanische sterkte zijn dit soort stenen gevoelig voor verwerking door middel van zouten (kritallisatiecycli) en vorst-dooi cycli. Bij de keuze van restauratiestenen moeten deze niet alleen op hygrisch gedrag (IW) maar ook op mechanische sterkte worden gecontroleerd.

6. Hervoegen

Hervoegen wordt vaak als een effectief middel gezien om vochtproblemen in metselwerk tegen te gaan; en bij goede uitvoering kan het dit ook zijn.

Uit de praktijk blijkt dat goed hervoegen geen vanzelfsprekende zaak is; misschien is wel een goede indicatie hiervoor dat leveranciers van materialen en uitvoerders van hervoegwerk vaak schoorvoetend of helemaal niet bereid zijn om een garantie van 10 jaar voor het opgeleverde werk af te geven (terwijl je eerder in levensduren van minstens 30-40 jaar zou willen denken).

Bij het hervoegen gaat het om (i) een goede materiaalkeuze en, even zo belangrijk, (ii) een goede uitvoering.

Materiaalkeuze

In het nabije verleden zijn er veel problemen voortgekomen uit een verkeerde keuze van het hervoegmateriaal. Men is zich er daarbij onvoldoende van bewust geweest dat het hervoegmateriaal compatibel met de aanliggende materialen (de metselmortel en de steen) moet zijn. Met compatibel wordt bedoeld dat het nieuwe en oude materiaal elkaar moeten verdragen; in praktisch opzicht komt het er vaak op neer dat het technisch materiaalkundige gedrag van het nieuwe materiaal in de buurt van het oude moet liggen.

In relatie tot de vochtshouding in het metselwerk betekent dit dat het gekozen hervoegmateriaal

- vocht vanuit de achterliggende metselmortel gemakkelijk door de voeg moet kunnen laten transporteren (drogen); dit betekent over het algemeen dat de porositeit van het voegmateriaal hoger dan dat van de achterliggende metselmortel moet zijn.

Geconstateerde problemen:

bij een dichte (cement) voeg zal ophoping van water achter de voeg in de minder dichte metselvoeg kunnen plaatsvinden, waardoor vorstschade in de metselmortel kan optreden;

bij een onvolledige aansluiting (holte) van de hervoegmortel en achterliggende metselmortel kan bij regen een opvulling van de holte met water ontstaan; bevriezing gedurende een aansluitende vorstperiode kan dan leiden tot het uitdrukken van de voeg;



Figuur 7: Weg-geërodeerde stenen. Links: in een toren dicht bij de Noordzee; rechts: in een muur aan de Bosporus.



Figuur 8: Dichte cementvoeg incompatibel toegepast op een kalk metselmortel. Krimpscheur tussen voeg en bovensteen; holte tussen voeg en metselmortel

- indringing van vocht van buitenaf als gevolg van scheurtjes moet voorkomen. Dat betekent dat de krimp van het materiaal zeer gering moet zijn; tevens moet de hechting van de voegmortel aan de steen goed maar niet te sterk zijn (in verband met het voorkomen van mogelijke schade bij de volgende restauratie); ook moeten (thermische en vocht) zwellings/krimp van het voegmateriaal en het omgevende materiaal ongeveer gelijk zijn.

De uitvoering

Voor kwalitatief goed voegwerk is vakmanschap van wezenlijk belang. Het begint al bij het verwijderen van de oude voeg. Al te vaak leidt onvakkundig (slopers)werk tot onherstelbare beschadiging van de steen en een aanzienlijke opruiming van de voeg (verdubbeling of verdrievoudiging, met enorme consequenties voor het muurbeeld). De vorm van de nieuwe voeg is ook van belang: de ervaring leert dat V-vormige voegen vrij vaak voorkomen en vrij vaak schade vertonen. De voegvorm moet rechthoekig zijn en de diepte zou minstens 2x de breedte van de voeg dienen te zijn.



Figuur 9: Links: Onvakkundige verwijdering van voegwerk: grove beschadiging van de stenen; aanzienlijk verbreding van de voeg; V-vorm ipv rechthoekig; diepte voeg tov de breedte onvoldoende. Rechts: Het kan ook goed

Alvorens te beginnen met hervoegen dienen de voegen grondig schoongemaakt te worden. Dan volgen voorbevochtiging (drogen totdat smetvrij gewerkt kan worden), hervoegen en tenslotte de nabehandeling (vochtig houden; de periode afhankelijk van de toegepaste bindmiddelen).

Het is aan te raden om een aantal proefstukken op te laten zetten alvorens een keuze te maken van de toe te passen uitvoeringswijze.

7. Injecteren

Holten in metselwerk leveren een belangrijke bijdrage aan vochtdoorslag. In velerlei vormen kunnen holten voorkomen in metselwerk, van grof tot fijn. De oorzaken voor de aanwezigheid of het ontstaan van holten kunnen zeer verschillend zijn. Een heel belangrijke oorzaak voor het ontstaan van holten in massief metselwerk is een onvakkundige uitvoering. Bewust of onbewust niet *vol en zat* werken leidt vanaf het oprichting van een gebouw tot holten in het metselwerk. Een voorbeeld van het ontstaan van holten is gegeven in figuur 10. De metselaar heeft opdracht gekregen snel te werken door niet, zoals het hoort, per steen *vol en zat* te metselen, maar de metselmortel in stroken aan te brengen. Het resultaat spreekt voor zich.



Figuur 10: Het ontstaan van holten in metselwerk door onvakkundige uitvoering: het aanbrengen van de metselmortel in stroken leidt tot holten in het metselwerk

Bij recent onderzoek naar de toepassing van injectie ter verhoging van de waterdichtheid van metselwerk is naar voren gekomen dat vooral bij kalkmortels uitloging van kalkbestanddelen uit de metselmortel een belangrijke oorzaak kan zijn van het ontstaan van porositeit / holten.

De mate van porositeit en de grootte van de holten kan nogal uiteen lopen. Een sprekend voorbeeld wordt getoond in figuur 11.



Figuur 11: Uitloging van kalk uit een metselmortel.

Vochtproblemen als gevolg van holten in het massieve metselwerk kunnen in een aantal gevallen effectief bestreden worden door opvulling van de holten (homogenisering) met behulp van injectie.

In algemene zin geldt dat de holten in een muur veelal een netwerk vormen van ruimten van zeer verschillende afmetingen; ten aanzien van de toepassing van het geëigende preparaat geldt hierbij dat de minimale holteafmeting maatgevend is; bovendien mag het preparaat niet weglekken in doorlopende grotere holten / scheuren.

Ten aanzien van de bestrijding van vochtproblemen dmv injectie is in een aantal projecten gebleken dat

- traskalk injectie niet te realiseren was, omdat er te veel zeer fijne holten waren waardoor de injectiegroot niet in de muur kon penetreren (verstopping). Daar waar de grotere holten wel bereikt konden worden, bleek de groot weg te lopen in inwendige scheuren.
- polyurethaanhars injectie bood betere perspectieven, aangezien (i) ook zeer fijne poriën penetreerbaar zijn en (ii) de hars door opschuiming en een goede hechting aan de wanden van grotere gaten een reële kans op opvulling biedt.



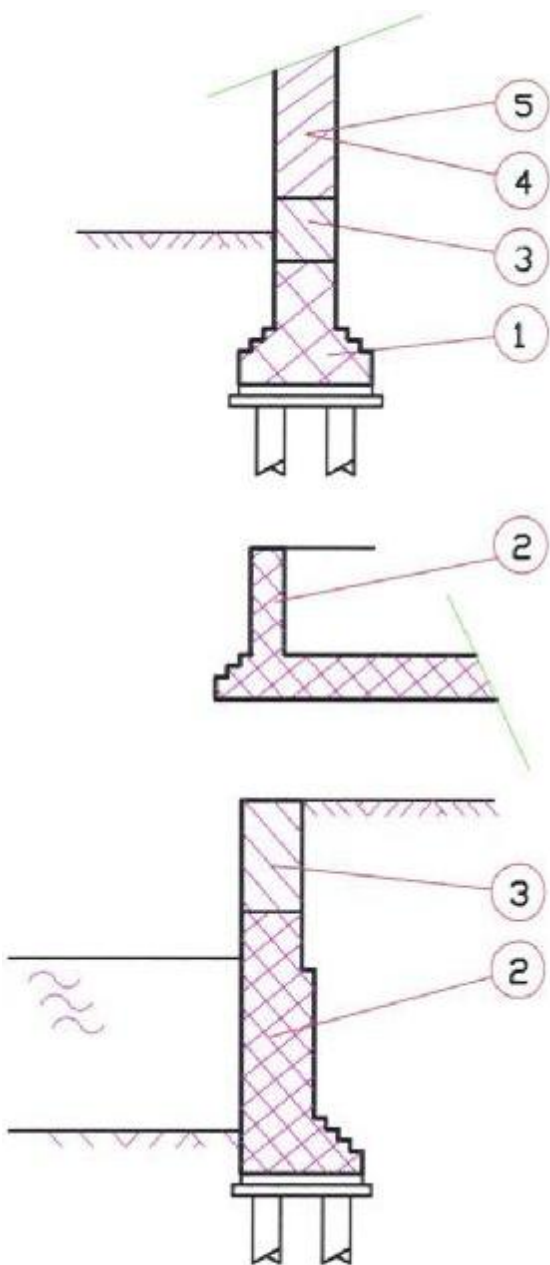
Figuur 12: Proefinjecties. Links: Injectie-apparatuur voor traskalkgrout injectie Rechts: Injectieapparatuur voor polyurethaanhars injectie

Hier stelt zich het probleem hoe om te gaan met compatibiliteitsproblemen (immers traskalk is meer compatibel dan de polyurethaanhars tav het originele materiaal).
Op het gebied van injecteren lijkt nog veel vooruitgang mogelijk te zijn bij een verdere ontwikkeling en betere integratie van theoretische en praktische kennis.

8. Literatuur

- Grimm C.T., Water Permeance of Masonry Walls: A Review of the Literature, in Masonry: Materials, Properties and Performance, ASTM STP 778, J.G. Borchelt ed., American Society for testing and Materials, pp. 178-199, 1982.
- Groot C. en Gunneweg J., Onderzoeksrapport Vochtproblematiek Stenen Molens – 1e Fase; in 2 delen, Delft / Zeist oktober 2002.
- Groot C. en Gunneweg J., Onderzoeksrapport Kwaliteitseisen Restauratiebaksteen / Kwaliteitseisen Metselmortels in Kalk, TU Delft, CiTG, maart 2007(a)
- Groot C. en Gunneweg J., Bouwstene voor de Richtlijn "Restauratiebaksteen / Kwaliteitseisen Metselmortels", TU Delft, CiTG, maart 2007 (b)
- Ramamurthy K. and K.B. Anand, Classification of Water Permeation Studies on Masonry, Masonry International, Vol. 14, No 3, pp.74-79, 2001.
- RDMZ, Kalkboek, Zeist september 2003

BIJLAGE 1



zone	toepassingsgebied
1	Funderingen <i>aanleg en voet van de muur</i>
2	Waterkerend werk onder water <i>kelders; kademuren onder de waterlijn; bij poldermolens: wielbak, opleider en krimp</i>
3	Permanent vochtig werk <i>trasramen, kademuren boven de waterlijn, grondkerende muren; bij poldermolens: waterkoopsmuren</i>
4	Opgaande muren met hoge regenbelasting en/of bijzondere verwerende omstandigheden <i>watertorens, kerk- en vuurtorens, molens, hoge solitair gelegen gebouwen met rechthoekige plattegrond</i>
5	Opgaande muren zonder hoge regenbelasting <i>alle overige opgaande muren</i>
6	Binnenmuren dragend en niet dragend

HYDROFOBEREN EN DE GRENZEN AAN HET ZOUT

Hilde De Clercq
Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium

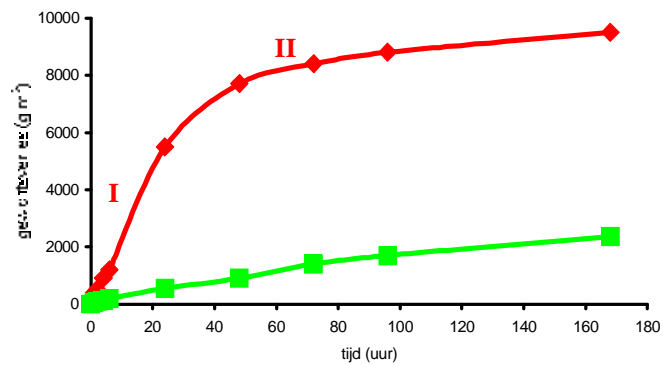
1. Inleiding

Historische gebouwen en monumenten vertonen vaak diverse fysische, chemische, mechanische of biologische schadefenomenen. Schadeprocessen aan poreuze bouwmaterialen kunnen veroorzaakt worden door de activiteit van zouten. Zouten op zich zijn eigenlijk vrijwel onschadelijk ; in combinatie met vocht daarentegen vinden fysische en/of chemische processen plaats zoals hydratatie, solvatatie, migratie en kristallisatie die aan de basis liggen van diverse schademechanismen.

Een logische gevolgtrekking ter beperking van zoutschade lijkt het weren van vocht, met name het aanbrengen van een waterwerende oppervlaktebehandeling of hydrofobering [1-8]. Studies hebben uitgewezen dat met een hydrofobering een duurzaam waterwerend effect haalbaar is en dit zelfs gedurende 35 jaren [9]. Positieve testresultaten met betrekking tot de duurzaamheid van waterwerende producten impliceren evenwel geenszins dat een waterwerende behandeling als standaard restauratieprocedure toepasbaar is. Een diagnose van de geschiktheid van steenachtige materialen voor hydrofobering en de kans op eventuele risico's verbonden met de toepassing van dergelijke conserverende behandelingen dient voorafgaandelijk uitgevoerd. Vochtcondensatie naast lokale defecten in een behandelde gevel, zoals uitspringend voegwerk, scheuren en materiaalverlies aan het oppervlak, kunnen vochtmigraties bewerkstelligen. Samen met het vocht migreren de zouten in het capillair netwerk van bouwmaterialen naar het zogenaamde droogfront waar het vocht verdampt en de zouten kunnen uitkristalliseren. Het droogproces van een onbehandeld poreus anorganisch materiaal is doorgaans gekenmerkt door twee fasen (figuur 1): een eerste fase (I) waarbij vloeibaar vocht door de capillaire kracht van bouwmaterialen migreert naar het oppervlak en daar verdampt in de atmosfeer. Verdamping treedt bijgevolg op aan het oppervlak en dit volgens een constante snelheid. Vanaf een bepaald gehalte is de hoeveelheid vocht onvoldoende om het oppervlak nat te houden en ontstaat een vochtfront dat steeds dieper in het bouw materiaal migreert. Tijdens deze droogfase (II) treedt verdamping bijgevolg niet meer op aan het oppervlak doch ergens in de materie zelf volgens een steeds afnemende snelheid. Droging vindt plaats door verdamping van vocht aan het vochtfront gevolgd door migratie van waterdamp naar het oppervlak waar het uiteindelijk in de atmosfeer terecht komt. Bij gehydrofobeerde materialen kan geen vloeibaar water naar het oppervlak migreren gezien de aanwezigheid van een waterwerende zone. Vocht kan wel migreren doorheen een waterwerende laag onder de vorm van waterdamp. Droging van natte bouwmaterialen behandeld met een waterwerend middel gebeurt dus doorgaans volgens fase II: migratie van waterdamp van het droogfront, gelegen achter de waterwerende zone, naar het oppervlak, een proces dat veel trager is in vergelijking met het droogproces van fase I.

Tijdens het droogproces van zoutbelaste materialen treedt zoutkristallisatie op aan het droogfront voor zover de verzadigingsgraad van de zoutoplossing, met name de maximale oplosbaarheid van de zouten in water, bereikt is. Indien voor onbehandelde materialen de verzadigingsgraad bereikt wordt tijdens droogfase I zullen de zouten aan het oppervlak worden afgezet; men spreekt van efflorescentie. Indien de verzadigingsgraad bereikt is tijdens droogfase II zullen de zouten in de poriën worden afgezet: een fenomeen cryptoflorescentie genaamd.

In technische fiches worden waterwerende middelen soms als oplossing aangeboden voor zoutbelaste materialen vanuit het standpunt dat de vochtopname en dus het vochtgehalte hierdoor beperkt wordt. De nodige voorzichtigheid is hier evenwel de boodschap [8-10]. De waterwerende laag vormt immers een blokkade voor in water migrerende zouten. Deze kristalliseren voornamelijk achter de waterwerende zone waar zich het verdampingsfront van water bevindt. De gepaard gaande kristallisatiespanningen kunnen ernstige schade veroorzaken. Een voorbeeld hiervan is een detail van de toren van de OLV Hemelvaartkerk te Gistel waar kristallisatiespanningen van natriumsulfaat (Na_2SO_4) het afstoten van de waterwerende laag hebben bewerkstelligd.



Figuur 1: droogproces van onbehandelde (rood) en gehydrofobeerde baksteen (groen).



Figuur 2: Toren O.L.V.-Kerk te Gistel na waterwerende behandeling : uitbloei van Na_2SO_4 .

Figuur 3: Toren O.L.V.-Kerk te Gistel, detail van schade na waterwerende behandeling.

Het Stadhuis te Eeklo is een bijkomend voorbeeld van zoutschade opgetreden na waterwerende behandeling van het baksteenmetselwerk (figuur 4). Het gebruik van dooizouten heeft een belangrijke contaminatie aan natriumchloride (NaCl) veroorzaakt die niet compatibel is met de

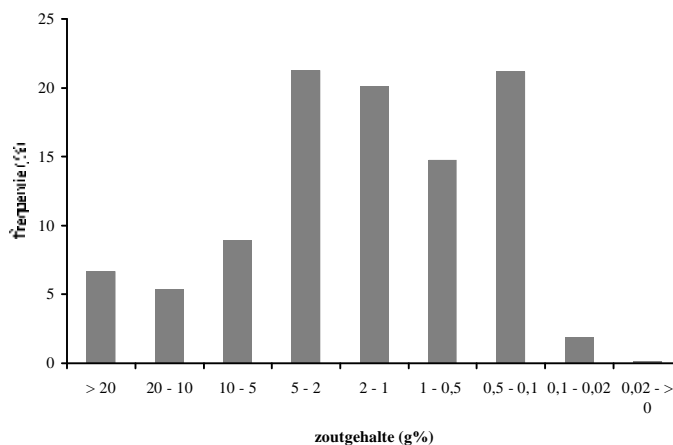
waterwerende behandeling.



Figuur 4: Stadhuis Eeklo, zoutshade en verlies van oppervlaktemateriaal na waterwerende behandeling.

2. Zouten en waterwerende behandeling: compatibel ?

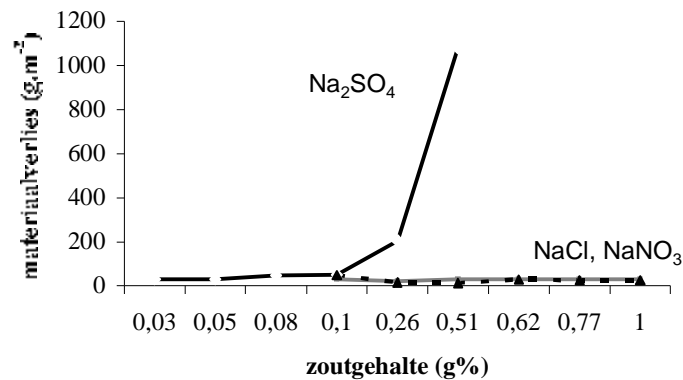
Het lijkt een dilemma: enerzijds kan een waterwerende behandeling een duurzaam effect hebben gedurende meerdere decennia; anderzijds zijn er met de conventionele analysetechnieken steeds in water oplosbare zouten detecteerbaar in bouwmaterialen (figuur 5) die op zich een tegen-indicatie kunnen vormen voor waterwerende behandelingen. In de meeste gevallen is het zoutgehalte lager dan 5 g%.



Figuur 5: statistisch overzicht van het zoutgehalte in monumentale constructies.

Dit dilemma lag aan de basis voor een Europees onderzoek "Salt Compatibility of Surface Treatments (SCOST)" waarbij aan de hand van zoutkristallisatietesten getracht werd zogenaamde limietwaarden voor zoutconcentraties te definiëren [11, 12]. Meer bepaald een maximaal toelaatbaar gehalte waarbij geen schade optreedt en een minimum gehalte vanaf waar schade optreedt en dit voor natrium- en magnesiumsulfaat, natriumchloride en -nitraat. De zoutkristallisatietesten werden uitgevoerd op diverse substraten gekenmerkt door verschillende

petrografische, fysische en mechanische eigenschappen. Na capillaire absorptie van een waterig mengsel van een gedefinieerde hoeveelheid zout werden de proefstukken (10 x 10 x 5 cm³) geconditioneerd op zo'n wijze dat droging enkel via het testvlak (10 x 5 cm²) plaats vond. Het testvlak kon onbehandeld hetzij behandeld zijn. Nadat 90 % van de hoeveelheid geïntroduceerd vocht verdampt is, werd water toegevoegd door capillaire absorptie alvorens de tweede zoutkristallisatiecyclus te starten. Voor deze studie werden tot 4 zoutkristallisatiecycli uitgevoerd. Uit het onderzoek is onder meer gebleken dat niet elk zout even destructief is. De onbehandelde Franse Savonnières steen bvb kan tot 1 g% natriumchloride en -nitraat verdragen zonder dat schade optreedt terwijl in geval van natriumsulfaat schade wordt vastgesteld vanaf 0,25 g% die intensiever wordt naarmate het gehalte verder toeneemt (figuur 6).



Figuur 6: Materiaalverlies van onbehandelde Savonnières steen gecontamineerd met diverse hoeveelheden natriumsulfaat, -chloride en -nitraat.

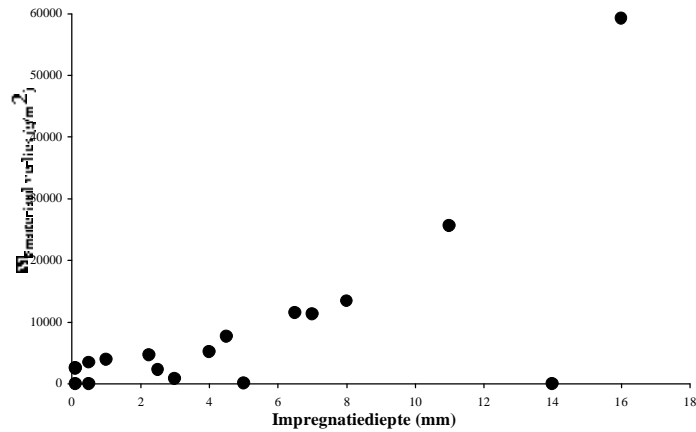
Het schadepatroon in geval van een poreus zoutbelast bouw materiaal na een waterwerende behandeling verschilt van het onbehandeld materiaal. Daar waar de schade voor onbehandelde materialen kan omschreven worden als verpoedering en verkrumeling (figuur 7A) manifesteert de zoutschade voor een gehydrofobeerd materiaal zich veelal in het afstoten van de waterwerend gemaakte laag (figuur 7B). Een trend van toenemend materiaalverlies per oppervlakte-eenheid voor toenemende impregnatiediepte van de waterwerende behandeling kon worden vastgesteld (figuur 8).



Figuur 7A: schade aan onbehandelde oölitische kalksteen gecontamineerd met natriumsulfaat



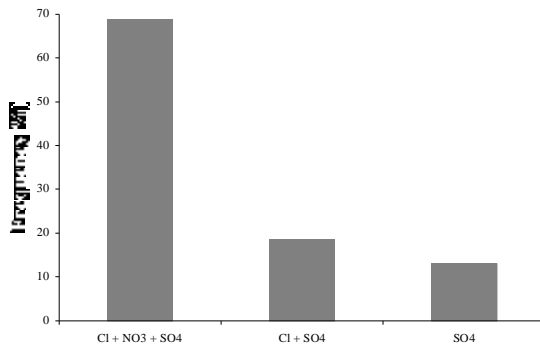
Figuur 7B: schade aan gehydrofobeerde oölitische kalksteen gecontamineerd met natriumsulfaat dat kristalliseert achter de waterwerende laag die hierdoor wordt afgestoten.



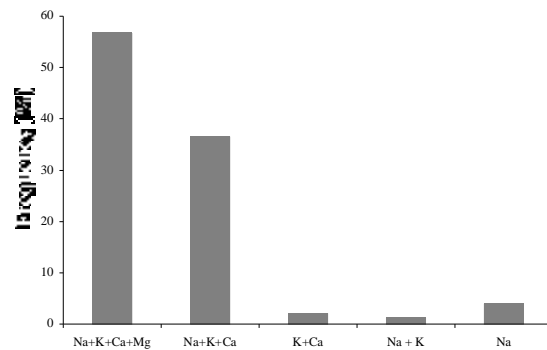
Figuur 8: Materiaalverlies van gehydrofobeerde bouwmaterialen in functie van de impregnatiediepte.

3. Zouten in de praktijk : so what ?

Het EU-project SCOST beoogde in functie van de aard van de ondergrond het definiëren van limietwaarden van individuele zouten die toelaatbaar zijn om een efficiënte waterwerende behandeling te garanderen en dit in vergelijking met het onbehandeld materiaal. In de praktijk is de situatie echter veel complexer. Een statistische studie van 1000 boorstalen heeft uitgewezen dat bouwmaterialen zelden één type zout bevatten doch een complex mengsel van anionen en kationen of zoutcocktail (figuren 9 en 10).



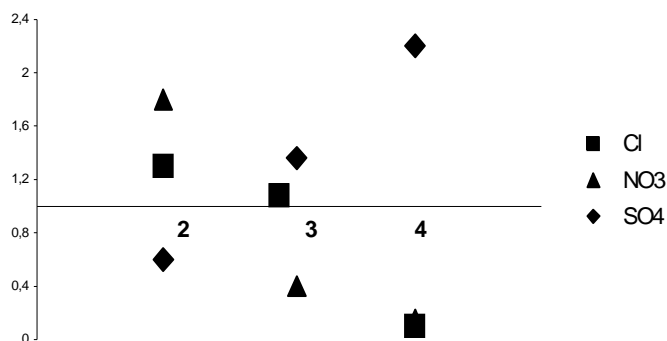
Figuur 9: Statistische verdeling van anionen in de zoutcontaminatie van Belgische monumenten



Figuur 10: Statistische verdeling van kationen in de zoutcontaminatie van Belgische monumenten

Zodoende werd verder onderzoek uitgevoerd in het KIK gebruik makende van zoutmengsels [13-15]. De samenstelling van de zoutmengsels was gebaseerd op de limietwaarden voor natriumsulfaat, zijnde het zout met de hoogste destructieve kenmerken, zoals bepaald in het SCOST-project waaraan variërende hoeveelheden natriumchloride en kaliumnitraat werden gevoegd. Deze drie zouten vertegenwoordigen de statistisch meest voorkomende contaminatie in bouwmaterialen van Belgische monumenten. Hieruit kon worden besloten dat NaCl als het ware individueel ageert en geen uitwisseling vertoont met kalium. De nitraten vertonen een trend tot ion-uitwisseling met natriumsulfaat tot vorming van darapskiet ($\text{Na}_3(\text{NO}_3)(\text{SO}_4)\cdot\text{H}_2\text{O}$) dat doorgaans minder destructief is dan natriumsulfaat. Uit het geheel kon worden opgemaakt dat voor een natriumsulfaat gehalte dat overeenkomt met de limietwaarde vanaf wanneer schade

optreedt in geval van individueel zout, de toevoeging van natriumchloride en kaliumnitraat een daling veroorzaakte van de destructieve activiteit en dit zowel voor onbehandelde als behandelde materialen. Met andere woorden: meer natriumsulfaat is toelaatbaar indien dit gecombineerd wordt met andere zouten. De samenstelling van de zoutuitbloei varieerde in functie van het nummer van de zoutkristallisatiecyclus (figuur 11): in vergelijking met het initiële zoutmengsel is de zoutuitbloei armer aan sulfaten en rijker aan chloriden en nitraten in het begin van de zoutkristallisatieprocedure. Het aandeel aan chloriden en nitraten in de zoutuitbloei daalt naarmate de kristallisatietest vordert terwijl de sulfaten intensiever worden gedetecteerd. Dit vormde op zich een belangrijk besluit van de noodzaak tot het uitvoeren van een voldoende lange zoutkristallisatietest alvorens een oordeel te vellen over de zoutcompatibiliteit van het betreffende bouw materiaal.



Figuur 11: gehalte aan ionen in de zoutuitbloei in functie van het nummer van de zoutkristallisatiecyclus relatief tegenover het initiële geïntroduceerd zoutmengsel (onbehandelde Franse Massangis steen).

Recent onderzoek uitgevoerd met binaire zoutmengsels van natriumsulfaat [16] heeft verder bevestigd dat een combinatie met natriumnitraat algemeen resulteert in de vorming van darapskiet, naast de oorspronkelijke zouten, en dit voornamelijk indien beide zouten in equivalente hoeveelheden aanwezig zijn in de initiële zoutmix. Hoe meer natriumsulfaat aanwezig in het initiële mengsel des te meer het als dusdanig ageert en des te hoger de kans op schade. Een combinatie met kaliumnitraat resulteert eveneens in de vorming van darapskiet en de oorspronkelijke zouten, naast aftitaliet ($K_3Na(SO_4)_2$). Dit zout wordt eveneens gedetecteerd indien natriumsulfaat gecombineerd wordt met kaliumsulfaat.

Hiermee wordt nogmaals bevestigd dat het gedrag van materialen gecontamineerd met natriumsulfaat verschillend is van deze waaraan een zoutmengsel van natriumsulfaat werd gevoegd. De toelaatbare waarden, zoals vastgesteld voor natriumsulfaat als individueel zout, zijn principieel niet meer geldig indien dit gecombineerd wordt met andere zouten.

Balansmatig kan dus worden gesteld dat in geval van een belangrijke contaminatie van natriumsulfaat de destructieve activiteit daalt door het toevoegen van natrium- of kaliumnitraat of kaliumsulfaat gezien door ionuitwisseling andere zouten worden gevormd die gekenmerkt worden door een lagere destructieve index. Dit impliceert tevens dat de voorspelling van het gedrag van zoutbelaste materialen in geval van een contaminatie met een zoutcocktail complex is omdat ten gevolge van ionuitwisseling andere zouten worden gevormd dan deze die aan de basis liggen van het geïntroduceerd zoutmengsel.

4. Besluit

In deze bijdrage werd getracht de aandacht te leggen op het risico van schade indien een waterwerende behandeling wordt aangebracht op zoutbelaste ondergronden. Dergelijke beschadiging kan in veel gevallen voorkomen worden indien vooraf de geschiktheid van de ondergrond voor een waterwerende behandeling door een gespecialiseerd laboratorium werd onderzocht.

5. Referenties

1. E. De Witte, S. Florquin, A. Terfve, The efficiency of water repellents for historic buildings, Int. Symposium "Materials and Restoration", Esslingen 1983, pp 131-135.
2. E. De Witte, H. De Clercq, *Duurzaamheid van metselhydrofobering*, Presentatie Studiedag Restauratie : Historische Materialen en Hedendaagse Technieken, 26 november 1997, Flanders Congres and Concert Centre Zoo Antwerpen.
3. H. De Clercq, E. De Witte, R. De Bruyn, A. Pien, *Doeltreffendheid en duurzaamheid van hydrofobering : prenormatief voorstel*, WTCB tijdschrift (1) 2000, pp 41-52.
4. E. De Witte, H. De Clercq, R. De Bruyn, A. Pien, *Oberflächenschutzmittel für Gesteinminerale, die aktuelle Situation im nördlichen Europa*, 8. Hanseatische Sanierung Bautenschutzmittel Kühlungsborn 1997.
5. R.P.J. van Hees, L.J.A.R. van der Klugt, E. De Witte, H. De Clercq, L. Binda, G Baronio, *Test methods for the evaluation of the in situ performance of water repellent treatments*, Proceedings of the first International Symposium on Surface Treatment of Building Materials with water repellent agents. Delft, 9-10 November 1995, pp. 14-1/14-16.
6. E. De Witte, H. De Clercq, R. De Bruyn, A. Pien, *Systematic testing of water repellent agents*, Proceedings of the first International Symposium on Surface Treatment of Building Materials with water repellent agents. Delft, 9-10 November 1995, pp 5-1/5-10.
7. E. De Witte, H. De Clercq, R. De Bruyn, A. Pien, *Systematic testing of water repellent agents*, International Journal for Restoration of Buildings and Monuments. Vol.2, No2, 1996 pp. 133-144.
8. Hilde De Clercq, Yves Vanhellemont, André Pien, *Waterwerende behandelingen op monumenten : realistisch of utopisch ?*, M&L, p 56-64, mei –juni 2007.
9. Evaluation of the performance of Surface Treatments for the Conservation of Historic Brick Masonry, Contract EV5V-CT94-0515, Coördinator : RPJ Van Hees (TNO-Bouw Nederland) , ISBN : 92-828-2366-0.
10. H. De Clercq, Y. Vanhellemont, A. Pien, Vooronderzoeken en controles van behandelingen van monumentale gebouwen : noodzakelijk of overbodig ?, ICOMOS contact, december 2006, pp 10-13 (2006).
11. Salt Compatibility of Surface Treatments (SCOST), Contract : ENV4-CT-98-0710, Coördinator : E. De Witte (KIK).
12. A. Miquel, P. Bromblet, V. Vergès-Belmin, L. Binda, G. Baronio, E. De Witte, H. De Clercq, R. van Hees, H. Brocken, Experiments on the Compatibility of a polysiloxane Treatment with Substrates Loaded with Sodium Sulphate : Influence of the Physical Properties of Substrates on the Salt Content Limit, International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 8, No 2/3, pp 271-291 (2002).
13. H. De Clercq, Performance of Selected Materials containing Different Mixtures of Salts after Water Repellent Treatment, International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 12, No 1, pp 25-33 (2006).
14. H. De Clercq, Performance of Single Materials Treated with a Water Repellent and Contaminated with a Salt Mix, Proceedings of the 4th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Hydrophobe IV, Stockholm (SE), 12-13/4/2005, pp 171 –184 (2005).

15. H. De Clercq, Performance of selected materials containing different mixtures of salts after water repellent treatment, Proceedings of the 7th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Orléans (F), 6-9 juni 2007, pp 139-148.
16. H. De Clercq, Performance of Limestone Contaminated with Binary Mixtures of Sodium Sulphate and Treated with a Water Repellent, Proceedings of Hydrophobe V, 5th International Conference of Water Repellent Treatment of Building Materials, edited by H. De Clercq and A.E. Charola, Brussels, 15-16 april 2008, pp 10-116 (2008).

GRONDKERENDE MUREN IN DE VESTING NAARDEN, SCHADEOORZAAK EN REPARATIE

**Jan Kamphuis met medewerking van Maarten Brouwers
Rijks Gebouwen Dienst**

Samenvatting

Onder leiding van de Rijksgebouwendienst (RGB) werd door een werkgroep een uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar de historische opbouw van grondkerende muren in vestingsconstructies, en naar de positieve en negatieve ervaringen met en bij restauraties die in de loop van vele decennia werden opgedaan. Deze bijdrage geeft een gedocumenteerd overzicht van de bevindingen, en duidt een aantal nieuwe concepten aan voor een verantwoorde restauratieaanpak van de vesting Naarden.

Inleiding

De vesting Naarden is voor het laatst gemoderniseerd tussen ca 1868-1880; daarna is het onderhoud aan de grondkerende muren minimaal geweest. De vesting werd in 1921 op de Monumentenlijst geplaatst en de Rijksgebouwendienst (RGD) is in 1964 begonnen met de restauratie van de verdedigingswerken.

Doel van de restauratie was het achterstallig onderhoud in te lopen en de verwachting was dat de vesting na restauratie ongeveer 50 jaar geen groot onderhoud nodig zou hebben. Om bevriezing van metselwerk te voorkomen werden folies toegepast, die opvallend hemelwater van de muren zou afvoeren. Deze methode is in Naarden bijna 40 jaar lang toegepast en bij de restauraties van andere vestingen overgenomen.

Na oplevering van Ravelijn 6 in 2002 bleek de werking van de folie niet aan de verwachtingen te voldoen. Nadere beschouwing leerde, dat het bastion Oranje, dat in 1980 is opgeleverd, qua vochthuishouding, in een slechtere staat verkeerde dan het niet gerestaureerde bastion Katten.

Gezien de grote investeringen die de RGD te wachten staan voor de restauratie van de laatste onderdelen van de vesting (bastion Katten en de helft van Oud-Molen) en het herstellen van de vervolgschade van de gekozen restauratiemethodiek, was een onderzoek naar de oorzaak van de schade noodzakelijk. Allereerst werd een uitvoerig archief onderzoek uitgevoerd naar bouwtekeningen, bestekken en foto's met een aansluitende bouwhistorische verkenning. Het archiefonderzoek werd uitgevoerd door drs E. Vink. Deze gegevens werden bouwhistorisch geïnterpreteerd door ir. A. Viersen (BBA te Utrecht). Vervolgens is in een iteratief proces een onderzoek verricht naar de oorzaak van de schade aan grondkerende muren en mogelijke oplossingen. Onder leiding van de RGD (Maarten Brouwers en Jan Kamphuis) hebben Alterra te Wageningen (John Mulder, Titus Brandsma, Paul Franzen), Ido Borkent Boslant; TNO te Delft (Rob van Hees, & Timo Nijland) en Architectenbureau Van Hoogevest (Ronald van Wakeren en Gijsbert van Hoogevest) het onderzoek uitgevoerd.

Het eindverslag is in wording; de navolgende bijdrage is gebaseerd op een nog niet voldragen rapport, daarom kunnen bepaalde passages onevenwichtig of onvolledig zijn. De gegevens en foto's zijn ontleend aan deelrapporten van de verschillende participanten. In deze bijdrage zijn ook de gegevens verwerkt die tijdens interviews en werkbezoeken zijn opgedaan. De dank van de samenstellers gaat uit naar dhr. J.W.C. Besemer te Rotterdam (oud architect Rijksgebouwendienst), dhr. C. Scheltema en mevrouw E. Scheltema te Naarden (oud architect en vesting deskundigen), dhr. E.J. Brans te Middelburg (vesting Gorinchem), dhr. H. Rijksen te Utrecht (oud medewerker Rijksgebouwendienst), de heren J. Zegveld en G. Orban (citadel van s' Hertogenbosch), de heren J. Voorvelt, M. Bastings en

M. Henissen (Hoge Fronten van Maastricht), de heren G. von Büren en H. Rosenzweig (citadel van Jülich).



Figuur 1: Luchtfoto van Naarden, 2006 . Het noorden ligt boven; tussen het IJsselmeer en de vesting Naarden ligt het fort Ronduit. De zuidelijke bastions zijn bij hun restauratie grotendeels van hun bomen ontdaan. De bastions Oud-Molen en Katten hebben nog vrij veel groen.

Kort historisch overzicht van de vesting Naarden

De vesting Naarden maakt vanaf de middeleeuwen een ontwikkeling door van groei en verbeteringen welke in het laatste kwart van de 19^e eeuw haar hoogtepunt vindt.

Naar aanleiding van de Frans-Duitse oorlog van 1870 werd in 1874 de Vestingwet aangenomen. Deze wet leidde tot een algehele modernisering van ondermeer de Nieuwe Hollandse Waterlinie waarvan de vesting Naarden deel uitmaakte. Deze modernisering was in Naarden in ca. 1880 afgerond. Daarna is de vesting nog één keer in staat van verdediging gebracht en gehouden: in de aanloop naar en gedurende de 1^{ste} Wereldoorlog. Daarna is de rol van de vesting uitgespeeld en vindt er nauwelijks of geen onderhoud meer plaats.

De vesting Naarden, die al in 1921 op de monumentenlijst werd geplaatst, werd bij de opheffing van haar militaire functie in 1926 door het Ministerie van Oorlog overgedragen aan het toenmalige Ministerie van Onderwijs, Kunsten en Wetenschappen (thans OC&W). Slechts een enkel onderdeel bleef nog tot medio jaren tachtig van de 20^{ste} eeuw in gebruik bij het Ministerie van Defensie. Het dagelijks beheer van de vesting kwam omstreeks 1961 in handen van de Rijksgebouwendienst.

Toen in 1964 door de Rijksgebouwendienst een begin werd gemaakt met de restauratie van de vesting ging men er van uit dat de hele vesting in één doorgaande cyclus zou worden gerestaureerd. Men zou beginnen bij de "zichtzijden", beginnende bij de voormalige Amsterdamsepoort aan de noordzijde en dan linksom via de Utrechtse poort aan de zuidzijde en vervolgens de oostzijde afwerken. De ambitie was dit binnen enkele jaren uit te voeren. De werkelijkheid was echter anders:

In 1964 is begonnen met de linkerkzijde van bastion Oud Molen. Daarna volgden bastion Turfpoort (1966-1969), bastion Promers (1969-1972), ravelijn 1 (1974), bastion Nieuw Molen (1975-1978), de Utrechtse Poort (1980), de ravelijnen 2 en 3 (1981-1982), bastion Oranje (1984), ravelijn 6 (2003) en de voorwal om de vesting, de enveloppe in 2004.

De bastions Katten, de rechterhelft van Oud Molen en de ravelijnen 4 en 5 zijn in 2008 nog niet gerestaureerd.



Figuur 2: Kaart van Naarden, in het midden boven het bastion Oud-Molen, rechts daarvan het bastion Katten. Overgenomen uit: "Gids voor de Vestingwerken van Naarden" door David Kips, 2001.

Proces van verval

Het proces van verval van grondkerende muren wordt aan de hand van enkele voorbeelden geschetst.

Lunet B) te Breda betreft een kazemat uit het midden van de 19^{de} eeuw, die in het begin van de 20^{ste} eeuw als (strooi)zoutmagazijn is gebruikt en vervolgens enkele decennia zonder deugdelijke afdekking in weer en wind heeft gestaan.

Vóór de restauratie werd tijdens vriezende weer een bijzonder verschijnsel waargenomen: vocht trad via de voegen naar het afgeboerde oppervlak en kristalliseerde daar tot ijs. (herkomst foto's: E.J. Brans).

Hieruit mag geconcludeerd worden dat het vochttransport in de muur via de voegen verloopt. Mogelijk is hiermee het afboeren van de muurschillen verklaard: indien de vorst ca 15 cm de muur kan indringen, zal de met vocht verzadigde staande voeg de strek uit de gevel drukken.

Indien de specie meer hechting geeft dan de hardheid van de bakstenen, zullen de koppen in het midden breken. De zodoende ontstane muurschil zal zich vergroten onder thermische invloeden: omdat de muurschil geen verbinding meer heeft met het achterliggende muurwerk zal tijdens opwarming door de zon (of afkoeling door de vorst) de schil de opgenomen warmte niet meer kwijt kunnen aan het achterliggende metselwerk, waardoor zettingsverschillen en daardoor scheurvorming in het ongedilateerde werk zal optreden.

Dit schadebeeld is bekend van Naarden.

Indien de specie tussen de strekken en de boven en onderliggende koppen onvoldoende hechting heeft, ontstaat het schadebeeld zoals dat bij de Hoge Fronten in Maastricht is waargenomen.



Figuur 3: Lunet B) voor de restauratie met afgeboerde schillen metselwerk.



Figuur 4: Lunet B) vrijwel onbeschermd tegen de invloeden van het weer.



Figuren 5 & 6: Lunet B) Detail van uittredend vocht bij de voegen, dat bij bevroering kristalliseert. Let op de klontjes mortel die op het als bij extrusie uittredend ijs hangen



Figuur 7: Bastion Katten te Naarden: afboeren van een schil metselwerk, als gevolg van een goede hechting tussen strekken en koppen.



Figuur 8: Maastricht, de hoge Fronten, "Tandvormige" erosie ten gevolge van minder goede hechting tussen strekken en koppen.

De start van de restauratie in 1964

In de jaren 1981 en 1982 stelt de technische commissie van de Stichting Menno van Coehoorn adviezen op voor "Vochtbezwaren in met grond gedekte ruimten van vestingwerken" en "Vochtbezwaren in keermuren van vestingwerken".

De oorzaken van schade zijn in deze adviezen goed beschreven:

- Verwering van stenen op de waterlijn;

- Aantasting van voegwerk en het optreden van begroeiing door grassen en mossen;
- Uitvallen van muuroppervlakken;
- Verwerking van afdekkende rollagen en bovengedeelten van keermuren en ten gevolge hiervan begroeiing door grassen, struiken en zelfs bomen;
- Uittreden van kalk- en steenzouten.

De aangedragen oplossingen (zoals behandeling met silanen en siliconen, het afgraven van historische grondprofielen, het inbrengen van "vreemde" materialen e.d.) zouden vandaag de dag zeker tot discussies hebben geleid.

Leden van deze technische commissie waren onder meer betrokken bij de restauratie van de vesting Naarden. Het is dan ook niet verwonderlijk dat de hierin gestelde adviezen een uitwerking zijn van de tot dan toe gehanteerde werkwijze in Naarden en op die manier de oplossingen uit Naarden ook elders worden geïntroduceerd.

Het zou daarom interessant zijn kennis te nemen van de ervaringen die elders in Nederland onder invloed van deze adviezen bij vestingwerken zijn opgedaan.

Uit archiefonderzoek en onderzoek ter plekke blijkt dat met name de oorzaak van het probleem gezocht werd in de toetreding van het water in het metselwerk en de vorstschade die dat met zich meebracht.

Toen men in 1964 met de linker helft van bastion Oud Molen begon met restauratie van de vesting heeft men ervoor gekozen de aardwerken af te graven en vanaf de achterzijde van de bekledingsmuur een naar de stadszijde toe afwaterende waterdichte laag ter breedte van ca. 8 meter in het grondpakket aan te brengen. Vervolgens werden hierop de aardwerken weer gereconstrueerd. De waterkerende laag bestond uit een product op basis van bitumen, het zogenaamde Hydrofaan.

Om indringing van water van bovenaf in de bekledingsmuren te voorkomen en de naad tussen deze muren en het Hydrofaan waterdicht af te sluiten werden de bekledingsmuren afgedekt met hardstenen platen waarvan de onderlinge naden met kit werden afgedicht.

Ook boven de grondgedekte onderkomens werd op een zelfde wijze een waterkerende laag aangebracht.

Ter plekke zien we dat rollagen en tandlijsten (met een harde steen) zijn vervangen of gereconstrueerd. Verder zijn boven de waterlijn knaapsifons geplaatst om optrekkend vocht kwijt te raken. Of deze laatste ingreep bij de restauratie van 1964 hoort hebben we niet kunnen vaststellen.

Het vervolg van de restauratie

In grote lijnen is na de start van de restauratie in 1964 nauwelijks van de toen gekozen uitgangspunten afgeweken. Deze uitgangspunten waren in grote lijnen:

- Het grotendeels verwijderen van de begroeiing en het gedeeltelijk verwijderen van de aardwal;
- Het aanbrengen van een richting stad afwaterende, waterkerende laag onder de aardwerken tot ca. 8 meter achter de bekledingsmuren welke het hemelwater van de bekledingsmuren en boven onderkomens moest wegleiden.
- Het afdekken van de bekledingsmuren met hardstenen platen.
- Het vervangen van al het "slechte" metselwerk.

Wijzigingen t.o.v. 1964 waren ondermeer dat het bitumenproduct Hydrofaan werd vervangen door kunststoffolie van verschillend fabrikaat.

De kunststoffolie werd, om naden en daardoor lekkages te voorkomen, in de fabriek op maat gesneden, aan elkaar gelast en opgevouwen. Dit pakket werd op het werk afgeleverd en daar volgens een meegeleverde instructie neergelegd en opgevouwen. Vanaf de restauratie van bastion Turfpoort werden ook zandpalen aangebracht in combinatie met drainage.

Van een aantal restauraties is bekend dat de grond die werd afgegraven om de waterkering in het grondpakket aan te brengen, tijdelijk in de binnengracht werd gedeponeed om daar

als dijklichaam te dienen om het herstel van het metselwerk onder de waterlijn te kunnen uitvoeren.

Nadere beschouwing van de uitgevoerde restauraties

Gedurende de afgelopen veertig jaar is niet alleen nooit de vraag gesteld of het gekozen technische principe wel voldeed aan de gestelde verwachtingen maar ook niet of de restauratievisie nog wel bij de tijd was.

Vergelijken we de restauratie-opvattingen uit de jaren zestig met die van nu dan is in de loop van de tijd hierin duidelijk sprake van een evolutie welke aan "Naarden" voorbij is gegaan.

Zo is reconstructie thans niet meer vanzelfsprekend evenals het ongedaan maken van latere aanpassingen. Het verloren laten gaan van historisch materiaal is thans uit den boze. Volgens de huidige opvattingen is het verplaatsen van aardwerken om tweeërlei redenen cultuurhistorisch een zware ingreep:

- de vorm van het in de loop der tijd ontwikkelde aardwerk met vervolgens zijn natuurlijke erosie gaat verloren: het kan immers nooit zo teruggebracht worden zoals het is aangetroffen;
- door het afgraven van aardwerken wordt de stratigrafie verstoord, wat een aantasting van de authenticiteit van het monument is vanuit archeologisch en cultuurhistorisch perspectief. In dit geval des te erger is omdat er vooraf geen bodemonderzoeken hebben plaatsvonden..

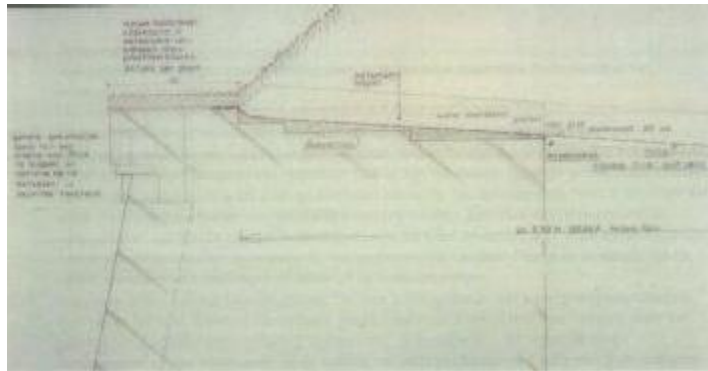
Initiatief tot en opzet van het onderzoek naar de uitgevoerde restauraties



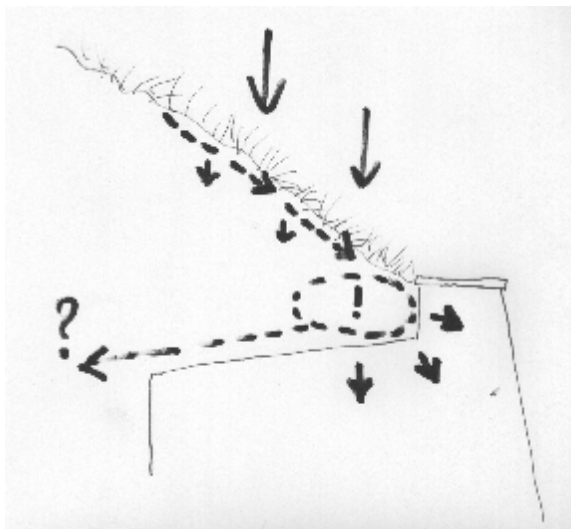
Figuur 9: Noordelijke flank van Oranje bij de saillant. Beeld van het muurwerk dat in 1980 geheel gerestaureerd is, waar vocht over de muur, onder de muurkroon en op diverse plaatsen uit het muurwerk stroomt en daardoor uitbloei van zouten veroorzaakt

Omdat, ondanks het aanbrengen van een waterkerende laag onder de aardwerken, toch water uit de bekledingsmuren bleef treden en in de onderkomens regelmatig lekkages optraden en de aardprofielen van de gerestaureerde onderdelen niet goed in profiel bleven, rezen in het begin van de jaren negentig de eerste twijfels of de uitgangspunten, waar men al dertig jaar lang aan vasthield, wel de juiste waren. Een aantal medewerkers van de

Rijksgebouwendienst heeft toen een eerste opzet gemaakt voor een onderzoek. Dit initiatief is door vertrek van medewerkers en een overvol bureauprogramma niet verder gekomen. Een aantal documenten uit die tijd liggen ten grondslag aan het huidige onderzoek.



Figuur 10: Restauratieprincipe van de grondkerende muren van Naarden. Op de muur wordt een folie gelegd met afschot naar binnen; de folie wordt op de muurkroon vastgezet met een hardstenen plaat. Met name deze aanhechting is problematisch: de folie scheurt af, of wordt doorgestoken bij het afsteken en de hardstenen plaat komt los van de bakstenen ondergrond waardoor onderspoeling plaatsvindt. Tevens is het afschot niet op alle plaatsen juist gerealiseerd. Het aardwerk is door het gras hydrofoob (waterafstotend) gemaakt, waardoor het regenwater van de wal afloopt in plaats van opgenomen te worden door de grond.



Figuur 11: Schema van het vochtprobleem van de grondkerende muren van Naarden. Het hemelwater wordt geacht loodrecht door de wal naar beneden te zakken en via de folie afgeleid te worden naar de binnenzijde van de wal, alwaar het via zandpalen naar het grondwater geleid zou worden. In werkelijkheid spoelt het water langs de helling naar beneden en stroomt over de hardstenen dekplaat heen. Langs het metselwerk stroomt nu vanwege de toepassing van folie niet alleen het vocht van de regen op de muur, maar ook het hemelwater dat op de aarden wal gevallen is. Indien de natuurstenen afdekplaat los ligt, stroomt het hemelwater van de aarden wal over de rollaag van de muur, zodat

deze verzadigd raakt van water. In het geval de folie bij de aanhechting op de natuurstenen afdekplaat gescheurd is, wordt het hemelwater dat op de wal gevallen is achter de muurkroon op het metselwerk geleid. Herkomst tekening: "Een onderzoek naar de waterdichtheid van de afdekkingen van de "Utrechtse poort" te Naarden-vesting", door Hoek Architectuur en restauratie te Utrecht, november 2005.

Bastion Katten

Bastion Katten is vanaf de grote aanpassingen in de jaren 1868-1880 onderhouden door het Ministerie van Oorlog. Hoewel Defensie het terrein pas in de jaren '80 verlaat, is er waarschijnlijk vanaf 1921 geen sprake meer van onderhoud aan de grondkerende muren.

Hierdoor bood dit bastion de mogelijkheid onderzoek te doen naar de samenstelling en het gedrag van een "ongerode" grondopbouw, beplantingen en samenstelling en opbouw van muren waar na 1880 geen grote ingrepen meer aan waren gedaan. Als referentie werd het in 1984 gerestaureerde bastion Oranje gekozen dat voor de helft ook aan de voormalige zoute gracht grenst. Bij dit bastion zijn eveneens geen onderkomens aan de zijde van de zoute gracht waardoor een goede vergelijking van niet (Katten) en wel (Oranje) gerestaureerde vestingmuren kon worden gemaakt.

Het onderzoek is verricht aan de hand van visuele waarnemingen in het veld en door plaatselijk destructief onderzoek. Tot de visuele waarnemingen horen ook grondboringen tot 6 meter diepte. De locaties voor de destructieve onderzoeken zijn aan de hand van de visuele waarnemingen en de resultaten daaruit bepaald.

De destructieve onderzoeken omvatten een tweetal opgravingen aan de stadszijde van bekledingsmuren, te weten achter de courtine Katten - Oud Molen en achter de linker face van bastion Katten. Voorts een gedeeltelijke doorzaging van de bekledingsmuur aan de grachtzijde ter plaatse van de opgraving achter de linkerface van bastion Katten en een aantal aan de grachtzijde uitgenomen boorkernen van diverse bekledingsmuren t.b.v. laboratoriumonderzoek.

Het onderzoek omvatte de volgende vakgebieden: bodemonderzoek, grondwaterstanden, invloed van planten op muren, bouwkundige situatie en archief- en bouwhistorisch onderzoek.

De kern van de aardwerken van Katten bestaat uit zand, dat van elders uit de omgeving van Naarden is aangevoerd (zanderijen). Het hoofdbestanddeel wordt gevormd door dekzand. Plaatselijk is ook gestuwd en fluvioglaciaal materiaal aangetroffen zoals lemig zand en grof zand.

De bovengrond van Katten bestaat uit een vrij dik (onnatuurlijk) pakket van 30 tot 80 cm zwart, humeus, zwak lemig, matig fijn zand. De zwarte bovengrond is bij het afgraven van de zanderijen apart gezet om later als afdekking van de bomvrije ruimten en wallen etc. rond 1874 te worden gebruikt. Hierdoor wordt het zandlichaam van de wal in profiel gehouden. Humus heeft namelijk een bindend vermogen.

Door de humushoudende grond wordt bovendien de kans op aanslaan van de grasvegetatie verhoogd (de humus vormt een goede voedingsbodem), zodat wortelvorming en bodemleven mogelijk is (tegen erosie en voor een betere infiltratie van regenwater naar het grondwater).

Hoewel uitgedroogde humus de infiltratie van regenwater bemoeilijkt t.g.v. hydrofobering, zorgen wortelgangen, wormen en ander bodemleven ervoor dat vochttransport mogelijk blijft waardoor verdroging van de vegetatie wordt voorkomen.

Bastion Oranje

Volgens de bestektekening voor de restauratie van bastion Oranje uit 1984 is onder de aardwerken achter de faces en de flanken over een breedte van 5.50m folie aangebracht.

Om deze folie te kunnen aanbrengen is het aardwerk over een breedte van ca. 7 meter tijdelijk in de binnengracht gedeponneerd. Bij het terugplaatsen van deze grond op het bastion is de oorspronkelijke gelaagdheid door vermenging van zand, humus en opgebaggerde grond ernstig verstoord. Hierdoor hebben we nu te maken met een structuurloze, zuurstofarme verdichte bodem waarvan de bovenste laag waarschijnlijk verslemt wat wortelvorming bemoeilijkt.

De dikte van het zandpakket op de folie loopt af van circa 10 cm vanaf de dekplaat tot circa 1, 80 m naar binnen in horizontale lijn gemeten. De strook met folie dicht langs de bekledingsmuur zorgt daardoor voor een uiterst ondiepe beworteling. Hierdoor verdroogt de vegetatie bij droge perioden zeer snel, terwijl ook de grond zelf (dekzand vrijwel zonder humus) uitdroogt. Dit heeft tot gevolg dat de kans op hydrofobie toeneemt, waardoor het regenwater niet kan infiltreren, maar langs het oppervlak wegstroomt. Door dit oppervlakkig wegstromen van regenwater zal water versneld over de dekstenen langs de

bekledingsmuren naar beneden stromen terwijl bij taluds versneld uitspoeling van grond zal optreden.

Hydrofobie: omdat bij Oranje langs de bekledingsmuren veelal de humus ontbreekt, wordt de mechanische weerstand voor wortelgroei vrij groot. Mochten er toch wortels doordringen dan is de kans groot dat bij langdurige warme, droge perioden die wortels afsterven (vochttekort). Daar komen bacteriën op af, die waterafstotendheid kunnen bewerkstelligen. Dergelijke gronden worden dan hydrofoob. Dat betekent dus ook dat het herstel van de beworteling in zo'n profiel beperkt zal blijven.

De oorzaak voor het lekken van de folie op ongewenste plekken moet ondermeer gezocht worden in het feit dat het materiaal gevoelig is voor het "per ongeluk" aanbrengen van beschadigingen zoals bij het afsteken van graskanten en het vastzetten van billboards is gebeurd waardoor het verzamelde water op die plekken kon uittreden. Het grootste probleem van de folies is de natuurlijke veroudering van het product: door vervluchtiging verdwijnen de weekmakers, zodat de folie bros wordt.



Figuur 12: Bastion Oranje, afdekking van de noordelijke face. Het bastion is omstreeks 1980 gerestaureerd. Door toepassing van folie kan de begroeiing niet diep wortelen en verbrand bij langdurige droogte. Behalve het gras e.d. langs de afdekplaten, deze onttrekken vocht aan de muur. De (lichte) verkleuring van de dekstenen wordt veroorzaakt door het onttrekken van vocht door begroeiing

Gedurende de droge zomer van 2006 bleek dat de dekplaat op de bekledingsmuur aan de grachtzijde van bastion Oranje vochtig was en aan de binnenzijde droog. De planten aan de rand van de dekplaat waren nog een beetje groen. Ze profiteren van vocht dat wordt aangevoerd vanuit de gracht. Het grachtwater wordt via de capillaire werking van de bakstenen naar boven toe getransporteerd, waardoor ook de natuurstenen platen bevochtigd worden. Door vochtonttrekking van de plantenwortels droogt de binnenzijde van de plaat op. Bij een rondgang over de hele vesting blijkt dit overal het geval te zijn, behalve op Katten, omdat daar de dekplaat niet van natuursteen is maar van beton

Het aanbrengen van zand- of grindpalen in een nat terrein boven een voormalige grachtbodem, zoals is vastgesteld op ravelijn 6, is niet zinvol gebleken omdat deze na verloop van tijd zullen dichtslibben. Bovendien kunnen ze als kwelbanen gaan fungeren. Evenmin is het aanbrengen van dergelijke zandpalen zinvol bij droge gronden bestaande uit (goed doorlatend) dekzand zoals bij de Katten en Oranje.

Samenvattend

Samenvattend kunnen we zeggen dat uit het bodem- en grondwateronderzoek geconcludeerd kan worden dat op bastion Katten gedurende 130 jaar ongehinderd bodemvorming (structuur en humus) kon plaats vinden. Hierdoor is een evenwichtig bodemprofiel ontstaan, waardoor vegetatie zich goed kon ontwikkelen. Door de goed gestructureerde bodem, wordt het hemelwater efficiënt naar beneden afgevoerd.

Bij bastion de Katten vindt, bij een lage grondwaterstand, weinig tot geen uitvloeiing van water plaats.

Bij bastion Oranje heeft de folie een sterk remmende werking gehad op de bodemvorming en de waterafvoer. Er ontstaat plaatselijk een schijngrondwaterspiegel vlak boven de folie. Hierdoor kan het hemelwater alleen wegvloeien via de muren en de dekplaten.

Kortom het niet gerestaureerde bastion Katten heeft een betere waterafvoer dan het gerestaureerde bastion Oranje.

Bomen op grondkerende muren

Bomen en muurwerk lijken niet samen te gaan. Er blijkt echter verschil te bestaan tussen bomen op de muur en bomen in het voegwerk. De laatste soort geven bouwkundigen traumatische beelden.



Figuur 13: Aanzicht van de courtine Oud-Molen-Katten. Dit gevreesde beeld van bomen die muurwerk ontwrichten is ontstaan door het iets afschuiven van de betonafdekking waardoor een zaailing zich kon nestelen. De wortels van deze boom hebben de betonafdekking opgetild. Frappant was dat bij een controlegraving de wortels achter de muur geen schade aan het metselwerk bleken te hebben aangericht.



Figuur 14: Oostelijke face van Bastion Katten, tijdens het boren van boorkernen. Bovenop de muur staat een wortelstomp van ca 130 jaar oud, die minimaal twee keer is teruggezet. De uitschieters zijn a 40 jaar oud. Frappant is dat het muurwerk eronder in goede (droge) staat verkeert: de wortels van de boom dringen niet in het muurwerk maar zoeken hun vocht boven en vooral achter de muur. (Foto: Architectenbureau Van Hoogevest).



Figuur 15: Detailopname van de oostelijke face van Bastion Katten. Het 130 jaar oude muurwerk verkeerd ondanks, of juist dankzij de boom erbovenop in goede staat.

Op het einde van de tweede wereldoorlog was er geen boom meer op de vesting te zien. Waarschijnlijk zijn een aantal stobben van in de oorlog gerooide bomen na de oorlog weer uitgelopen. Mogelijk maken daardoor een aantal van de huidige bomen op de bastions

Katten en Oud Molen nog deel uit van het historische bomenbestand of zijn dit zaailingen hiervan.

Op bastion Katten zijn de muren onder en nabij drie oudere bomen bekeken. Wat bij deze bomen opviel was dat tot op ca 5 à 10 meter afstand links en rechts van deze bomen het voegwerk en soms zelfs het metselwerk geen schade vertoont. De vraag was dan ook of het wortelpakket de muur zodanig droog houdt, dat vocht hier niet via voegen naar buiten kan treden waardoor bevriezing wordt voorkomen. Uit de literatuur is in ieder geval bekend dat wortels vele kubieke meters water per dag aan vocht wegzuigen

De zichtzijde van de bekledingsmuur onder de bomen vertoont op een enkele scheur onder de rollaag na en in beide gevallen wat ontbrekend voegwerk verder geen ernstige gebreken. Bij de ontgraving van de courtine Katten- Oud Molen bleek dat de zware beworteling (steunwortels) van een esdoorn vooral in de bovenste meter te zitten; duidelijk in de opgebrachte teelaarde. Dieper gaande wortels zijn dunner. Onder in het profiel zijn, zelfs in de oude humeuze teelaarde, nauwelijks wortels.

In het verticale vlak langs de muur was een pakket fijne beworteling aanwezig. De wortels maken gebruik van de ruw opgemetselde, niet afgestreken muur op zoek naar vocht en mogelijk mineralen. Duidelijk was te zien dat de fijne beworteling hier vocht kan vinden. De wat dikkere wortels zoeken steun in de voegen, maar beschadigen deze niet.

Samenvattend

- Ontstaan er of zijn er (kleine) bouwkundige gebreken (zoals scheuren, open voegen en naden), dan kunnen kiemplanten van de geboden mogelijkheden gebruik maken. Vooral bomen met lichte, door de wind te verplaatsen zaden (es, esdoorn) of besdragende soorten (meidoorn, lijsterbes) zijn daarin succesvol.
- Eenmaal gevestigde bomen of planten zullen, in samenwerking met het fysieke afbraakproces (warmte, vocht en vorst) een voortdurende bijdrage leveren aan het uiteindelijke verval van bouwwerken.
- Uit de waarnemingen blijkt niet dat de bomen op de muur met hun gewicht of hun wortelgestel in staat zijn de zware muren te beschadigen. Bomen lijken dus geen primaire aantaster van bouwwerken te zijn.

Bouwkundig onderzoek

Katten

De ongerestaureerde bekledingsmuren van bastion Katten tonen nauwelijks uitstromend water. Wel is er op uitgebreide schaal sprake van opbollende muurvlakken of van verdwenen metselwerk ter dikte van een halve steen.

Evenals bij de vestingmuren van Gorinchem zien we dat daar waar de muur door vorstschade over een halve steen is afgebroken en voegen dichtgeslibd zijn er een evenwicht lijkt te zijn bereikt. Niet duidelijk is waardoor dit evenwicht ontstaat.

Oranje

De bekledingsmuren van Oranje zijn minder homogeen dan die van Katten. Weliswaar zijn de laatstgenoemde meer onderhevig aan scheuren e.d. Die van Oranje hebben plaatselijk last van lekkages met sporen van ijzer- en kalkafzettingen. Verder zijn ze over grotere oppervlakten begroeid met korstmossen.

Zoals al eerder omschreven bestaat de indruk dat de folie achter de saillant is nagezakt waardoor een kuip is ontstaan. Als deze overloopt komt dit water in de linker face tevoorschijn.

Veel lekkages, al dan niet met uitspoelingen van kalk, treden op bij de scheiding van verschillende muurdelen. Er is in opeenvolgende perioden gewerkt met verschillende materialen: de kern van de muren is 17^e eeuws, het parament van de muur bestaat deels uit

materiaal uit 1874 en deels uit materiaal van de restauraties uit de jaren tachtig van de vorige eeuw. Daar vertoont de bekledingsmuur ook de meeste lekkages. De bij de restauratie toegepaste folie was opgesloten tussen de oorspronkelijke rollaag en een bij de restauratie toegevoegde hardstenen afdekplaat (80 x 200 x 10 cm). Door zettingsverschillen zijn de afdekplaten in de loop der tijd los van de ondergrond komen te liggen en door veroudering zijn de kitvoegen tussen de platen onderling gescheurd waardoor water vrij toegang heeft gekregen tot de bovenkant van het metselwerk. Daarnaast is vastgesteld dat de aansluiting van het folie op de bekledingsmuur in de loop der jaren veelvuldig is doorgestoken t.b.v. het bevestigen van billboards en het afsteken van de graskanten

Muurwerkonderzoek

Langs de Courtine van Oud-Molen-Katten en de face van bastion Katten is doormiddel van een graving het muurwerk aan de achterzijde geïnspecteerd. Tevens is aan de buitenzijde van de face een uitsnede in de muur gemaakt.



Figuur 16: Aanzicht binnenzijde van de muurkroon van de westelijke face van bastion Katten. De in de 19^{de} eeuw vervangen muurkroon is twee strekken hoog. Op de vertinlaag van cement was een bitumen/teer laagje aangebracht. Tijdens het onderzoek kon niet vastgesteld worden of de afdekkende betonplaat bij deze 19^{de} eeuwse reparatie is aangebracht, of dat dit later is verricht. Afgezien van de afbladderende vertinlaag is het muurwerk in goede staat

Aan de grachtzijde van de walmuur is het metselwerk onder een hoek van 6° tot 8° opgetrokken in schoon werk. De walmuur heeft een dikte van 1.200 mm en is in massief metselwerk uitgevoerd

De bovenste 525 mm van de walmuur is afgewerkt met een onder een naar binnen afwaterende opgetrokken, gemetselde tandlijst en rollaag. De rollaag is aan de bovenzijde afgesmeerd met specie.

In een latere fase is de bovenzijde van de muur over de volledige dikte van de muur afgedekt met een betonplaat, bestaande uit ongewapend fijn grindbeton, welke ingebed is in een zeer dun mortelbed. Op de afsmeerlaag onder het mortelbed is een bitumenemulsie aangetroffen.

Wellicht is het aanbrengen van de bitumen een eerste poging geweest tot het waterdicht maken van de vertinlaag geweest.

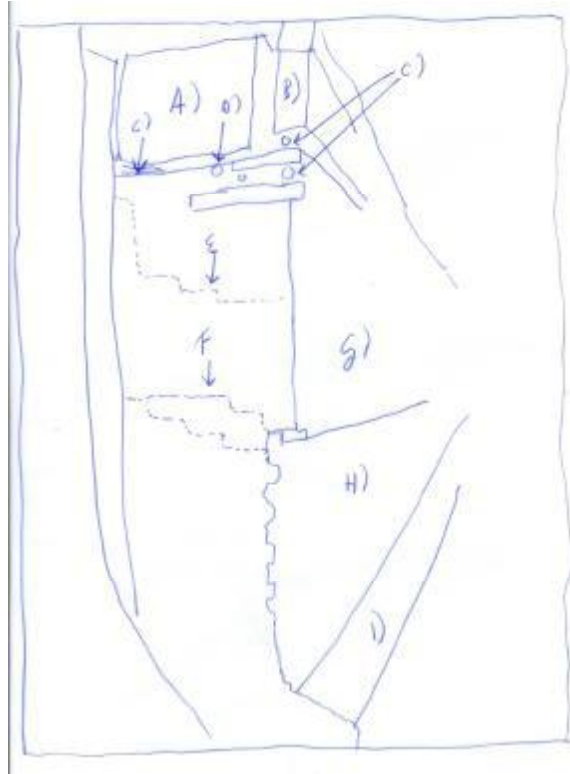
Na het plaatsen van de betonplaten zijn de onderlinge voegen van de betonplaten volgegoten met een vloeibare warme bitumen om deze onderling waterdicht te koppelen. De bovenzijde van de betonplaten is onbehandeld.

De rollaag is aan de walzijde uitgevoerd in schoonmetselwerk, gevoegd en voorzien van een dagstreep.



Figuur 17: Aanzicht muurkroon van de westelijke face van bastion Katten. Het achterste gedeelte van de rollaag verkeerd in goede staat; aan de grachtzijde is het muurwerk in de lengte gespleten, de buitenste schil is afgevroren en vervolgens is de schade vergroot door wortels. De middelste scheur is vermoedelijk veroorzaakt zijn door preferente vochtstromen in de muur, gevolg door uitspoeling van mortel en vervolgens hebben in deze vochtkanalen gedrongen wortels het proces van afscheuren afgemaakt.

Ter plaatse van de inspectieput langs de noordelijke face van bastion Katten is een doorsnede in de muur gezaagd. Hieruit bleek dat de rollaag door inwatering vorstschade heeft gekregen. De ontstane spleten zijn war mogelijk door wortels benut met ontzetting van het metselwerk als gevolg. Met name de rollaag heeft hieronder geleden. Frappant is dat andere schades (kanalenstelsels die het voegwerk hebben uitgespoeld) ogenschijnlijk geen fragmentatie van het metselwerk hebben veroorzaakt: het metselwerk is nog vrijwel geheel homogeen.



Figuur 18: Zaagsnede over de westelijke face van bastion katten. De muurkroon is twee maal gespleten (A & B). Wortels (C) hebben het muurwerk opgelicht of naar buiten gedrukt (D). In het restauratieplan is opgenomen dat de delen A & B van de muurkroon (met ca twee onderliggende lagen vervangen worden. In het metselwerk daaronder zijn twee kanalenstelsels te onderkennen (E & F). Het metselwerk is hier echter behoorlijk gaaf. Het wegnemen van de vochtanvoer via de spleten door een nieuwe muurkroon zou afdoende moeten zijn. Het muurvlak G) wordt gevoegd en het afgeboerde gedeelte H) wordt, al naar gelang de kwaliteit van het metselwerk of gevoegd of ingeboet. In het eerste geval wordt de door afboeren verkregen verjonging van de muur afgestreeken met mortel.

Restauratievisie

De bevindingen hebben geleid tot het inzicht dat het onwenselijk de aardwallen af te graven en middels folie te trachten de vochthuishouding te reguleren.

De bestaande (gezonde) vochthuishouding van bastion Katten zal gerespecteerd worden: de wallen worden niet vergraven en de bomen niet gekapt.

Uiteraard worden wel de wortelvormende gewassen uit de muren verwijderd.

Ten aanzien van het muurwerk wordt maatwerk geleverd, waarbij het besef dat vervangen (nieuw) metselwerk op de lange duur niet per definitie beter is dan het bestaande muurwerk met zijn nu geconstateerde gebreken. Daarmee wordt de visie verlaten, dat de vesting na restauratie er net zo moet uitzien als na de oplevering in de 19^{de} eeuw, het bijna romantische ruïneuze patina van de 20^{ste} eeuw zal zoveel mogelijk behouden blijven, met eliminatie van echte bouwkundige gebreken.

Zo zullen alleen losliggende muurkronen worden vervangen en van een nieuwe afdekking voorzien. Afgeboerde gevelvlakken, waar zich een evenwicht heeft ingesteld zullen slechts waar nodig bijgevoegd worden.

In feite wordt gestreefd naar het continueren van het huidige beeld, een symbiose van muurwerk en natuur die verrassend goed op elkaar in blijken te zijn gespeeld.



Figuur 19: Bastion katten, noordelijke face. Door bevroering is het muurwerk over een halve steen afgeboerd. Het afgeboerde metselwerk links lijkt zich al enige decennia goed te houden; reden om hier niet in te grijpen. Wel zullen de uitkragende stenen boven dit muurvlak worden verankerd, opdat zij bij bevroering niet afgedrukt worden. Het afgeboerde metselwerk zal, waar mogelijk met mortelinjectie gerestaureerd worden. Indien het verval, vooral vanwege beworteling, te groot is zal het muurschild worden weggenomen en opnieuw vertand opgemetseld worden.

STUDY OF THE POSSIBLE APPLICATION OF SODIUM FERROCYANIDE FOR THE PREVENTION OF SODIUM CHLORIDE DAMAGE IN BUILDING MATERIALS

Barbara Lubelli¹, Rob P.J. van Hees^{1,2}

¹ Delft University of Technology, Delft

² TNO Built Environment and Geosciences

Summary

This paper reports the results of an experimental study on the effects of a crystallization inhibitor (sodium ferrocyanide) on sodium chloride crystallization damage in porous building materials. The research consisted of laboratory experiments and field tests.

The laboratory results show that sodium ferrocyanide, when mixed in salt solution, enhances the solution transport favouring the appearance of efflorescences, instead of much more harmful crypto-florescences. This suggests the possible use of this inhibitor for minimizing sodium chloride damage and improving desalination treatments. Nevertheless, our crystallization tests and field experiments, show that the effect of ferrocyanide, when applied on substrates already contaminated with sodium chloride, is very limited: neither damage is significantly reduced nor desalination enhanced.

Keywords: crystallization inhibitor, sodium chloride, sodium ferrocyanide, experiments

1. Introduction

Salt crystallization in porous materials constitutes one of the most frequent causes of decay of building materials. Pressures created by crystallization of the salt in the pores weaken the material until its mechanical strength is overcome and damage occurs. Inhibiting or limiting the crystallization of the salt would therefore prevent or slow down the material decay.

It is known that products exist, that are able to delay salt crystallization [Veintemillas-Verdaguer 1996; Füredi-Milhofer and Sarig 1996]. These products (i.e. their composing ions or molecules) are called crystallization inhibitors. Crystallization inhibitors work by preventing or delaying nucleation (nucleation inhibitors) and/or by reducing the growth rate of specific crystal faces, thus modifying the habit of the crystals (habit modifiers).

Among the inhibitors of sodium chloride crystallization, sodium ferrocyanide is the most promising [Rodríguez-Navarro et al. 2002]. Nevertheless, in spite of its proven effectiveness in delaying crystallization in bulk solution, its actual capability of preventing salt decay in building materials is still object of discussion. The experimental results published until now indicate that this inhibitor may have a positive effect on the salt damage by delaying salt crystallization and by enhancing salt transport towards the surface and thereby promoting the formation of efflorescences instead of much more harmful crypto-florescences [Rodríguez Navarro et al. 2002; Selwitz and Doehne 2002]. Besides, it has been suggested that sodium ferrocyanide may have positive consequences for the damage by modifying the crystallization morphology of NaCl [Lubelli et al. 2006]. On the other hand, the theory on salt crystallization [Scherer 2004] states that the higher supersaturation is achieved, the higher the risk may be, at the moment crystallization finally occurs. The risk is due to the fact that crystallization will take place at higher supersaturation and therefore greater pressures will be developed and more severe damage may occur.

The experiments performed until now do not give a definitive answer. In fact all of them consist in introducing the salt and the inhibitor, dissolved in the same solution, simultaneously in the substrate. This procedure does not reproduce the actual situation in practice, where the salt has already crystallized in the pores of the substrate at the moment the inhibitor is applied.

From the above discussion, it emerges that experimental studies, reproducing as much as possible the application of the inhibitor in practice, are necessary to assess benefits and risks of the application of inhibitors on salt contaminated materials.

The present paper reports a series of systematic investigations aiming at assessing the actual efficiency of sodium ferrocyanide in minimizing sodium chloride crystallization damage. Both laboratory experiments and field tests on a building affected by NaCl damage have been performed.

2. Experimental section

The research consisted of laboratory experiments and field test. In the laboratory experiments the effect of sodium ferrocyanide on damage occurring in different substrates contaminated with NaCl has been investigated. In the field tests the effect of the crystallization inhibitor in minimizing salt damage and improving the efficiency of desalination treatments has been studied.

Laboratory experiments

The experimental research has been carried out on different materials, which were selected because of their very different chemical, physical and mechanical properties.

- Spanish limestone: it is constituted at 90 wt% by calcite [Rodriguez-Navarro 1994]. It has a porosity of about 30 vol%, with a high percentage of pores of a diameter between 10 and 50µm
- Czech sandstone: it is constituted up to 90% by quartz with a little percentage of clay minerals (up to 10%) [Rodriguez-Navarro and Ruiz-Agudo unpublished]. It has a porosity of about 30 vol% with a unimodal pore size distribution (pore diameters between 10 and 30 µm)
- Dutch fired-clay brick: it is a brick from industrial production. It has a total porosity of 33 vol% with most of the pore diameter sizes in the range between 0.5 and 8 µm.
- Calcium silicate brick: it has a porosity of about 27 vol% and pore sizes spread within the range 0.01-20 µm, with a large percentage of small pores.
- restoration plaster: it is a cement based plaster produced for salt contaminated substrates, thus expected to have a high resistance to salt crystallization damage. It has a high porosity (about 57 vol%), a bimodal pore size distribution with a large amount of very small pores (diameter smaller than 0.2 µm).
- lime-cement mortar: it has a lime : cement : quartz sand ratio of 3 : 1 : 20. It is therefore a very weak mortar, with an open porosity of 27 vol% and a bimodal pore size distribution with pores between 0.2 and 0.5 µm and between 50 and 80 µm.

The pore size distribution of the substrates is reported in Figure 1.

Sodium-ferrocyanide (in the text abbreviated as NaFeC) ($\text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) at 0.001M concentration has been used as salt crystallization inhibitor. The type and the concentration of the inhibitor have been selected on the basis of experiments performed within the framework of the research project SALTCONTROL Prevention of salt damage to the built cultural heritage by the use of crystallisation inhibitors (EC Project no. 5015710).

Two different tests have been performed: a drying test and a salt crystallization test. In the drying test the inhibitor and the salt, mixed in solution, have been introduced together in the substrate, whereas in the crystallization test the inhibitor in aqueous solution has been introduced afterwards in substrates already contaminated with salt. The drying test has been carried out on the Spanish limestone, the Czech sandstone and the fired-clay brick. The crystallization test has been performed on all materials.

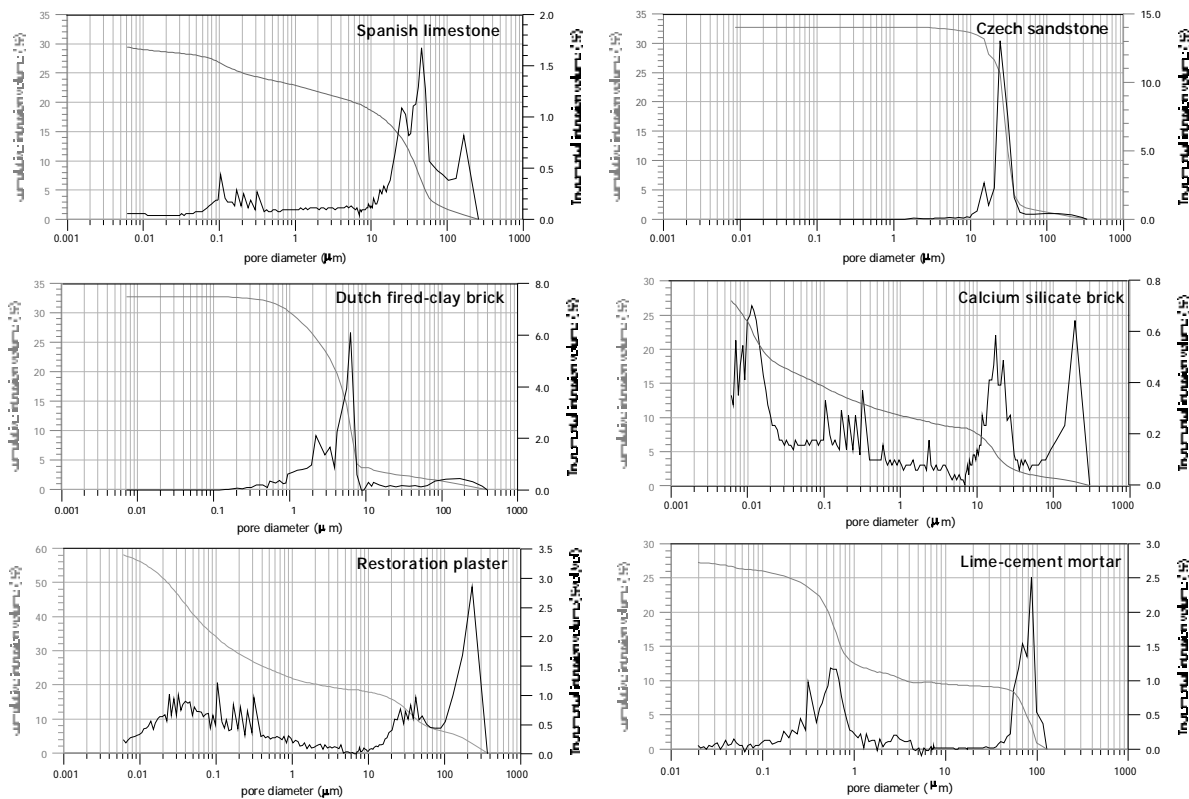


Figure 1: Pore size distribution of the substrates as measured by Mercury Intrusion Porosimetry

Drying test

The test aimed at studying the effect of the inhibitor on salt solution transport.

The specimens, of the size of 5x5x5cm, were sealed on the 4 lateral sides and saturated with 10 wt% NaCl solution with and without NaFeC (0.001M). Specimens saturated with demineralised water were used as reference. Once saturated, the specimens were sealed on the bottom side as well and allowed to dry at 20 °C 50% RH. Their weight was recorded regularly. All experiments were carried out in threefold.

For each material/solution combination the salt distribution at the end of the drying test was determined on one specimen. First the surface of the specimen was brushed and the efflorescences collected and weighed. Then the outer part (5 mm) of each specimen was ground in 1 mm slices, and the rest of the specimen was cut in slices (without the use of water to avoid salt dissolution).

The obtained samples were then stored at 20 °C 96 % RH for six weeks. The weight gain, i.e. the Hygroscopic Moisture Content (HMC), was measured. The HMC provides a reliable indication of the salt content in cases like this in which only one salt type is present [Lubelli et al. 2004].

The effect of the inhibitor on the morphology of the salt crystallizing in the stone has been studied. Inhibitors are expected to modify the crystallization habit of the salt, both by allowing crystallization at high supersaturation and by favouring the preferential growth of specific crystal faces. At the end of the drying experiments broken cross sections of the specimens have been investigated by means of a FEI Tungsten XL 30 Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) equipped with an Energy Dispersive X-ray system. Low magnifications were used to study salt distribution and location, while higher magnifications were used to investigate crystal shapes. The pressure in the ESEM chamber varied between 0.3 and 0.4 Torr, corresponding to

a RH of 1.7 – 2.3 % at 20 °C. This means that with the specimens being dry when they were introduced in the ESEM, no change in the structure of the salt would occur during the ESEM investigation.

Crystallization test

The test aimed at verifying the capability of NaFeC to minimize sodium chloride crystallization damage. The procedure set up for the crystallization test aimed at reproducing as much as possible the situation occurring in case the inhibitor would be applied on a salt contaminated building. For this reason, the inhibitor was not dissolved in the salt solution (as in the drying test), but applied in aqueous solution on the salt loaded substrates.

The specimens, sealed on the lateral sides, were contaminated with NaCl solution. The amount of solution was equal to the capillary moisture content (CMC), i.e. the amount of solution sufficient to wet the upper surface of the specimen when absorption takes place by capillary rise from the bottom. The concentration of the solution was calculated in order to have 2 % of salt in the specimen (weight of the salt/weight of the dry specimen). The specimens contaminated with salt solution were sealed with removable tape on the bottom surface and allowed to dry at 20 °C 50 % RH for 5 days. They were then dried in an oven at 70 °C until they reached a constant weight and cooled down at room temperature. In this way salt accumulation near the evaporation surface of the specimens was obtained, a salt distribution similar to the one usually found in buildings.

The surface of the specimens was then sprayed with the inhibitor (0.001M) dissolved in demineralised water. An amount equal to 50 % of the CMC was used. This amount of water allowed to wet the outer centimetres of the specimen where, due to evaporation, salt had accumulated. When the specimens reached a constant weight the crystallization test started. The specimens were subjected to wet dry cycles: each time that 90 % of the water had evaporated, they were re-wetted from the bottom surface with an amount of demineralised water equal to the CMC. Depending on the material type and on the presence or not of salt, 2 to 5 wet-dry cycles were performed in a period of about 8 months.

Field test

The field test aimed at verifying the capability of ferrocyanide to limit salt crystallization damage and enhance desalination. A masonry building with a high NaCl content was selected as case-study. Areas of about 50x50cm were selected for the application of the inhibitor. Next to them, reference areas to be treated with only water were selected. Brick powder samples were collected in the areas to be treated as well as from nearby reference areas. The moisture (MC) and hygroscopic moisture content (HMC) of these samples were determined. These data constitute the initial situation, with which the situation after the inhibitor application has to be compared.

The inhibitor was applied by poulticing. Two types of poultice material were used:

A: cellulose poultice (Arbocell 200 + Arbocell 1000)

B: poultice of industrial production (Remmers “Funcosil Entsalzungskompreße”) consisting of a mixture of clay, quartz sand and cellulose.

The inhibitor (NaFeC) in the concentration of 0.001M was added to the water used to prepare the poultice and the compresses. A ratio dry cellulose / water (or inhibitor solution) of 1: 7 was used. A ratio dry poultice / water (or inhibitor solution) of 1:3 was used for the clay-sand-cellulose poultice, according to the prescription of the producer.

The cellulose poultice has been applied in a 2 cm thick layer. In order to guarantee its good adherence to the wall, a plastic net was used. The clay-sand-cellulose poultice was applied in a 2 cm thick layer. Prior to the application the wall was pre-wetted either with water or with inhibitor solution (1 liter/m²). After three weeks from the application, both the poultices and the compresses were removed and replaced with new ones. After 3 more weeks these were removed too.

Conductivity measurements were performed on the poultices removed from the wall in order to have an indication of the amount of salt extracted. The following procedure was used to measure the conductivity of the poultices. Each of the four poultices was dried at 70°C until constant weight and then ground. One sample was collected from each of the poultices for the conductivity measurements. A defined amount of demineralised water was added to the poultice. After stirring for 24 hours, the solution was filtrated and the conductivity measured. Immediately after the removal of the second application of poultices new sampling of brick powder in the treated (with water and with inhibitor) and untreated areas (reference) was performed. The HMC of these samples was measured and compared with the HMC before the treatment. An additional survey of the damage was performed after 4 months from the treatment, to check eventual changes in the distribution of the efflorescences and of the damage.

3. Results

3.1. Laboratory experiments

Drying test

The drying curves for each material are reported in Figure 2. As expected, the specimens contaminated with NaCl solution dry slower than the ones saturated with water. In fact, the presence of soluble salts depresses the RH of equilibrium of the solution, thus the driving RH gradient for vapour transport between the surface and the environment becomes also lower and drying slows down.

The NaFeC enhances the drying but the relevance of this effect strongly depends on the material type. In the Spanish limestone and in the brick drying is clearly enhanced when NaFeC is added to the NaCl solution. In contrast, no effect is observed in the Czech sandstone.

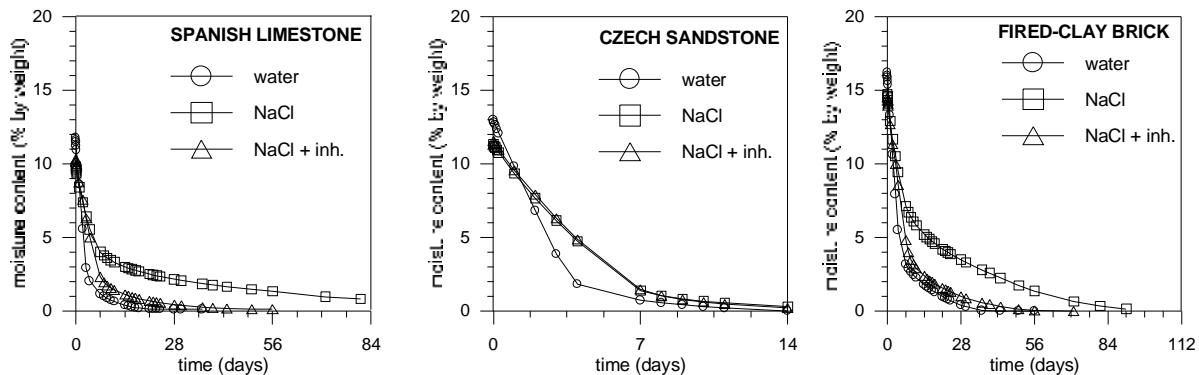


Figure 2: Drying curves at 20 °C 50% RH of the Spanish limestone, the Czech sandstone and the fired-clay brick saturated with water, 10 wt% NaCl solution and 10 wt% NaCl solution with 0.001M NaFeC

The explanation of these differences may be that the precipitation of salt, in the stone or at the surface of it, interferes with the drying process, delaying it (in case of occlusion of the pores or appearance of salt crust) or enhancing it (in case of fluffy efflorescences increasing the evaporation surface).

The location (inside the stone or at the surface) and the morphology (dense crust or fluffy crystals) of salt may in fact influence the drying. NaFeC has shown to be very effective in changing the morphology of the halite: in presence of NaCl only, a dense agglomeration of halite

crystals appears on the surface of all the materials, while in case NaFeC is added, efflorescences assume a branched shape having a much larger evaporation surface.

The drying curves clearly show the effect of the precipitation of salt on the drying: in the first hours, when the surface of the specimen is still wet and liquid transport is the governing mechanism, no significant differences are observed between specimens with and without NaFeC; after a few days, once salts start efflorescing at the surface, drying of specimens containing NaFeC is faster than the drying of specimens contaminated with NaCl only. This may be due to the larger evaporation surface of the branched efflorescences as well as to the fact that, thanks to the inhibitor delaying crystallization, less salt precipitates in the stone occluding the pores.

The limited effect of the NaFeC on the drying of Czech sandstone might be related to the unimodal pore size distribution of this stone. Because of this drying by water vapour transport might have started earlier in this stone, inhibiting further solution transport to the surface. The effect of the inhibitor will then be less important.

Summarizing, the rate of drying is the following:

- for the Spanish limestone and the fired-clay brick: Water > NaCl + NaFeC >> NaCl
- for the Czech sandstone: Water >> NaCl + NaFeC = NaCl.

In order to have a definitive confirmation of the effectiveness of the inhibitor in enhancing the salt solution transport to the surface, the salt distribution at the end of the drying test was measured, including the efflorescences on the surface. The HMC results are reported in Figure 3; the numbers at the top of the first columns in the graph indicate the amount of efflorescences (in grams) brushed from the surface at the end of the drying test.

The distributions confirm the indications given by the drying curves: the enhanced drying corresponds to a larger amount of salt at or near the surface. In the Spanish limestone and in the brick the presence of NaFeC enhances the transport of salt (NaCl) to the surface and therefore crystallization in the form of efflorescences instead of crypto-florescences. In the Czech sandstone the NaFeC does not have any effect.

The effect of the inhibitor on the crystal morphology is clearly visible on the efflorescences precipitated on the evaporation surface of the specimens: the salt forms dendritic crystals, clearly different from the crystals precipitating in absence of NaFeC. Also the morphology of NaCl precipitating inside the stone is influenced by the presence of the inhibitor. Figures 4a and b show the cross sections of NaCl contaminated Czech sandstone with and without inhibitor respectively. It is observed that in the absence of inhibitor halite precipitates mainly as a layer on the pore wall, whereas in the presence of the inhibitor an agglomeration of small crystals is visible, filling the pore spaces (this confirms previous observations [Lubelli et al. 2006]).

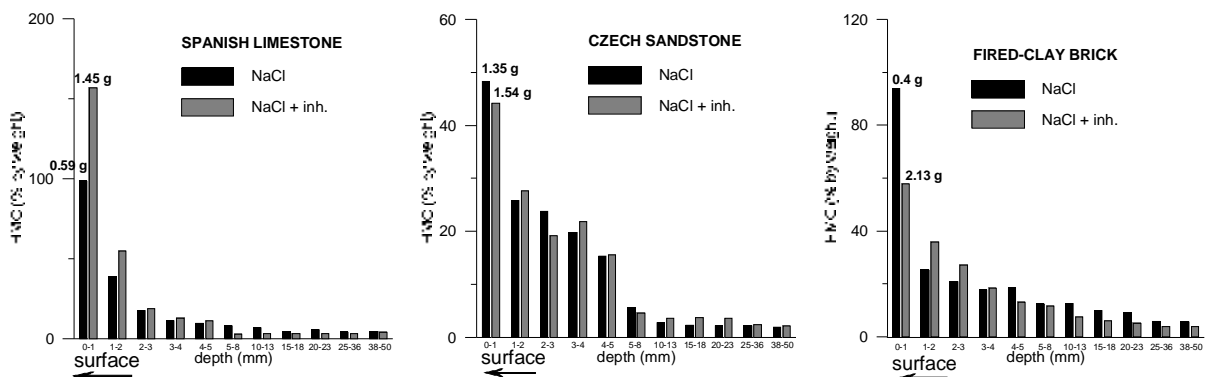


Figure 3: HMC distribution measured at 96% RH in the Spanish limestone, the Czech sandstone and the fired-clay brick specimens at the end of the drying test

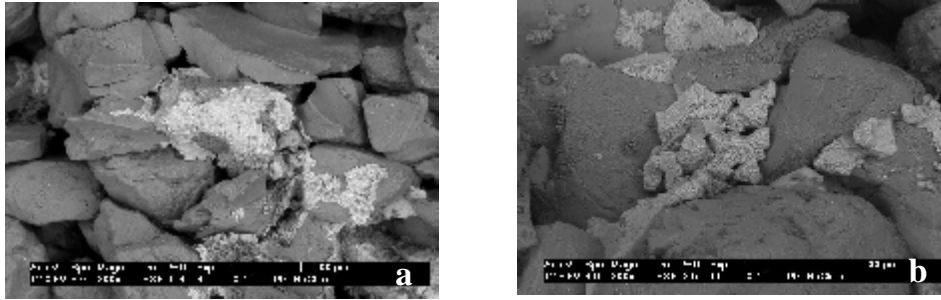


Figure 4: NaCl crystallized in absence (a) and presence of inhibitor (b)

Salt crystallization test

The results of the salt crystallization test are evaluated on the basis of the photographic monitoring and of the quantification of the material and salt loss.

The application of the inhibitor (dissolved in water and sprayed on the surface) has led to the appearance of efflorescences. The water has dissolved the salts and transported them to the surface where they have crystallized. The efflorescences clearly show the presence of the inhibitor in their branched shape.

Significant damage after 5 wet-dry cycles occurred only in the case of the lime-cement mortar. In this case the NaFeC had no effect on the amount of damage (the material loss between specimens with and without the inhibitor was the same) but influenced the type of decay: in the absence of the inhibitor bulging and scaling occurred, while sanding was observed in the presence of NaFeC (Figure 5). The other materials, untreated and treated with the inhibitor, did not suffer any significant damage in the time period of the experiment.

The total amount of efflorescences that could be brushed from the surface during the crystallization test was, in the case of the fired-clay brick and of the calcium silicate brick, higher in specimens with NaFeC than in specimens with only NaCl. The application of the inhibitor on the other materials did not lead to any significant increase in the total amount of efflorescences.

The control specimens with no salt, subjected to wet-dry cycle with pure water, did not suffer any damage.

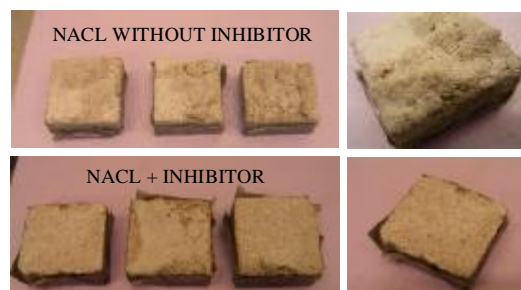


Figure 5: NaCl contaminated lime-cement specimens after 5 crystallization cycles: in specimens treated with the inhibitor sanding occurs, whereas bulging and scaling are present in untreated specimens

3.2. Field test

The results of the conductivity measurements performed on the desalination materials applied on site are reported in Figure 6. The conductivity has been expressed as mS/cm² of desalinated area instead of mS/g of poultice [Vergès-Belmin V. and Siedel H.]. Expressing

the conductivity in mS/g of poultice would in fact lead to a misleading interpretation due to the different density of the two poultices. The graph shows that the conductivity of the poultices with and without inhibitor is about the same: it can therefore be concluded that in this case the inhibitor does not improve the effectiveness of desalination.

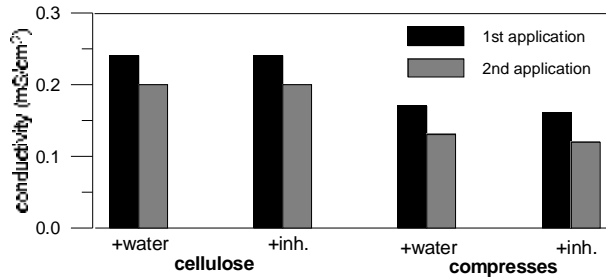


Figure 6: Conductivity of the poultices (1st and 2nd application)

The HMC of the bricks (at the depths of 0-1 cm and 1-5 cm) before and after the treatment has been measured in order to further evaluate the effect of the inhibitor on desalination. The obtained results are reported in Figure 7. No clear positive effect of the inhibitor on desalination is observed. This confirms the results of the conductivity measurements.

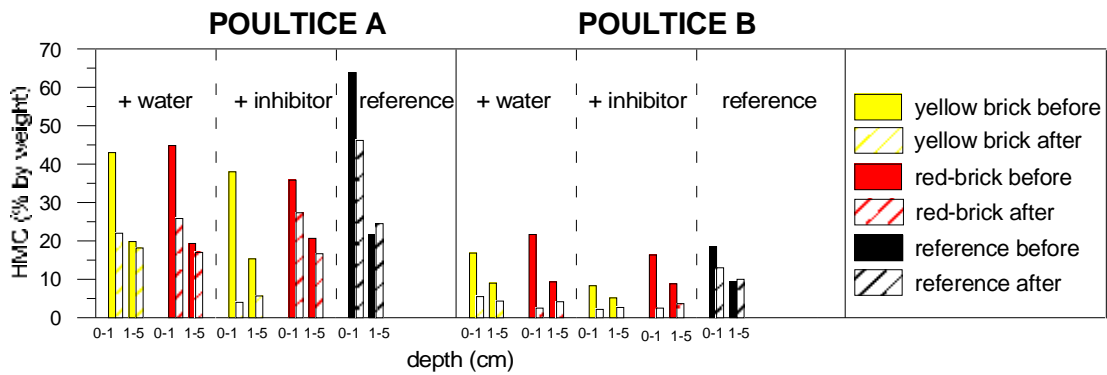


Figure 7: HMC at 96 % RH measured in treated bricks before and after the treatment with demineralised water and inhibitor in aqueous solution and in not treated (reference) bricks

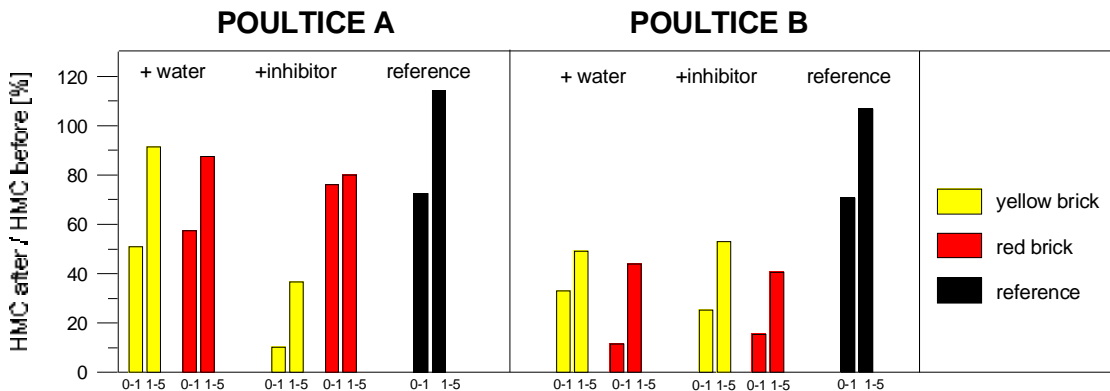


Figure 8: HMC at 96%RH after desalination expressed as percentage of the initial HMC

Regarding the desalination efficiency of the two poultices used some observations can be made, even if this research did not aim at evaluating the different desalination materials but at assessing the effect of the mixed in inhibitor on the desalination. In Figure 8 the HMC remaining after desalination as percentage of the initial HMC is reported. From these results it can be concluded that:

§ a general reduction of the salt content is measured;

§ as expected, the reduction of the salt content is higher in the outer one centimetre of the wall than at 1-5cm depth;

§ in general the efficiency of the clay-sand-cellulose poultice is better than the one of the cellulose, i.e. the reduction of the salt content is higher at both depths.

It should be reported that the cellulose with mixed-in inhibitor showed a change in colour (towards blue and green) during drying. This discoloration may become a problem if this inhibitor is applied on white or light coloured substrates.

After four months from the application of the treatment an increased amount of efflorescences was visible on the areas treated with inhibitor with respect to the ones treated with water only. The branched shape of the efflorescences indicates the effect of the inhibitor. No significant differences in damage between areas with and without inhibitor were observed.

4. Discussion and conclusions

In this research the use of crystallization inhibitors has been studied for the first time systematically in a practice oriented context. In spite of the encouraging results obtained with the use of inhibitors in bulk solutions, the performance of these products when applied on salt laden substrates has shown much more complicated.

This research has pointed out that sodium ferrocyanide, if introduced directly in the salt solution, enhances the solution transport and the appearance of efflorescences. This suggests that this inhibitor may minimize NaCl damage and improve the efficiency of desalination treatments. However, our laboratory crystallization experiments indicated that if this inhibitor is applied afterwards on the material already contaminated with salt, its positive effect on salt damage is very limited.

The application of NaFeC on salt contaminated brick masonry did not improve the efficiency of desalination: the amount of salt extracted in areas treated with inhibitor and areas treated with only water was similar. Nevertheless, after 4 months from the removal of the poultices an increased amount of efflorescences was observed in areas treated with the inhibitor. At the moment it is not possible to draw conclusions on the effects of the inhibitor on the damage. Additional inspections in the coming months/years are necessary to see whether the enhanced efflorescences resulted also in a reduction of the damage to the substrate.

On the basis of this research it is only possible to conclude that sodium ferrocyanide has a very limited effect on salt damage if introduced in materials already contaminated with NaCl. If the inhibitor is introduced in the material together with the salts, it can have a positive effect enhancing salt solution transport and efflorescences. This suggests that the application of the inhibitor in processes in which a large amount of water is involved (for example desalination by bath method) might give positive results. Future research on this inhibitor should therefore look in this direction.

5. References

1. Füredi-Milhofer H., Sarig H., "Interactions between electrolytes and sparingly soluble salts", *Prog. Crystal Growth and Charact.* 32, 1996, pp. 45-74.
2. Lubelli B., van Hees R.P.J., Brocken H.J.P., "Experimental research on hygroscopic behaviour of porous specimens contaminated with salts", *Cons. Buil. Mater.* 18, 2004, pp. 339-348.

3. Lubelli B., van Hees R.P.J., Huinink H.P., Groot C.J.W.P., "Irreversible dilation of NaCl contaminated lime-cement mortar due to crystallization cycles", *Ceme. Conc. Res* 36, 2006, pp.678-687.
4. Rodriguez-Navarro C., "*Causas y mecanismos de alteración de los materiales calcáreos de las catedrales de Granada y Jaén*", PhD thesis, University of Granada, Spain, 1994.
5. Rodriguez Navarro C., Linares-Fernandez L., Doehne E., Sebastian E., "Effects of ferrocyanide ions on NaCl crystallization in porous stone", *Journal of Crys. Growth* 243, 3-4, 2002, pp. 503-516.
6. Rodriguez-Navarro C., Ruiz-Agudo E., Internal report EC Project SALTCONTROL Project (Project n° 501517 Prevention of salt damage to the built cultural heritage by the use of crystallisation inhibitors), unpublished.
7. Scherer G., "Stresses from crystallization of salt", *Ceme. Conc. Res* 34, 2004, pp. 1613-1624.
8. Selwitz C., Doehne E., "The evaluation of crystallization modifiers for controlling salt damage to limestone", *J. Cult. Heri.* 3, 2002, pp. 205-216.
9. Veintemillas-Verdaguer S., "Chemical aspect of the effect of impurities in crystal growth", *Prog. Crystal Growth and Charact.* 2, 1996, pp. 75-109.
10. Verges-Belmin V., Siedel H., Desalination of masonries and monumental sculptures by poulticing: a review, *Restoration of Buildings and Monuments*, 11, (6), 2005, pp. 1-18.

DE FYSISCH E PRINCIPES ACHTER EN DE EFFECTIVITEIT VAN ONTZOUTINGSMETHODEN

Leo Pel, Nick van Gils en Victoria Voronina
Groep Transport in Permeabele Media,
Faculteit Technische Natuurkunde, Technische Universiteit Eindhoven

Samenvatting

Zoutkristallisatie is een van de belangrijkste redenen voor het verval van poreuze bouwmaterialen. De vermindering van het zoutgehalte is daarom belangrijk voor de instandhouding van historische gebouwen. Het ontzouten van objecten gebeurt meestal met behulp van een poultice (kompres). De verwijdering op deze manier klinkt eenvoudig, maar kan in de praktijk lastig zijn. Om een effectieve poultice te ontwerpen is kennis van zout- en vochttransport nodig. Dit artikel richt zich op de fysica van zout- en vochttransport in een poultice / substraat systeem. Ons doel is het categoriseren van poultices op basis van het fysische mechanisme van het transport van zouten.

1. Inleiding

De duurzaamheid van bouwmaterialen is een moeilijk vraagstuk. Hierbij zijn naast praktische aspecten - weten wanneer onderhoud nodig is - ook financiële aspecten - hoe economisch te onderhouden - en culturele aspecten - hoe voor toekomstige generaties te behouden - relevant. De belangrijkste factor voor de duurzaamheid is zoutverwerking [1, 2]. Daarom zijn de meeste preventieve en herstellende maatregelen bij historische objecten gericht op het verminderen van het zoutgehalte. De verwijdering van oplosbare zouten klinkt eenvoudig, maar het kan lastig zijn in de praktijk. Kleine objecten kunnen bijvoorbeeld worden ondergedompeld in water. Echter er ontstaan problemen wanneer men op deze manier zouten probeert te verwijderen uit metselwerk van een gebouw of monument. Het ontzouten van metselwerk wordt dan ook meestal gedaan met gebruik van een poultice [3-7].

Bij het ontzouten met een poultice kan men twee fasen onderscheiden. De eerste fase is bevochtiging: water dringt van de poultice in de muur en lost daarin aanwezige zouten op. De tweede is verwijdering van opgeloste zouten, uit de muur door transport hiervan naar de poultice. Dit zouttransport kan dan plaatsvinden door middel van een zoutconcentratieverschil tussen de te ontzouten muur en de poultice of de door advection van de zouten met de waterstroom van muur naar poultice. Het mechanisme van zouttransport in het poreuze materiaal beïnvloedt de effectiviteit van het ontzouten maar ook sterk de tijdsduur voor ontzouten. Het doel van dit artikel is het indelen van poultices naar hun fysische principe van transport voor ontzouten.

2. Diffusie gebaseerde methoden

De bekendste methode voor zouttransport is diffusie. Een goed voorbeeld van diffusie is een druppel inkt in water. Als een druppel inkt in een bekertje met water valt, dan zal deze zich verspreiden in het water totdat er een evenwicht is bereikt. De beweging van deeltjes (inkt) kan worden beschreven met een diffusievergelijking. Op deze manier kan ook diffusie van zout worden beschreven [8]:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2 C}{dx^2} \quad (1)$$

Hierin is t de tijd, x de positie and C de concentratie. Omdat diffusie in poreuze media wordt beperkt door de poriëwanden zal de effectieve diffusielengte toenemen. Men stelt ook wel dat de poriën ook kronkeligheid hebben; de tortuositeit. Hierdoor zal de effectieve diffusiecoëfficiënt voor een zout in een poreus materiaal altijd kleiner zijn dan in de bulk. De diffusie in een poreus medium kan worden beschreven met de volgende uitdrukking [9, 10]:

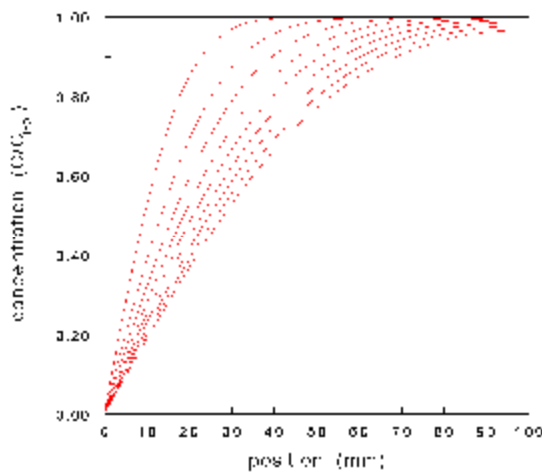
$$\frac{dC}{dt} = TD \frac{d^2C}{dx^2} \quad (2)$$

Hierin is T de tortuositeit (voor de meeste steenachtige poreuze materialen geldt dat $T < 1$). In tabel 1 zijn de diffusiecoëfficiënten van verschillende zouten in water en in verschillende poreuze materialen gegeven.

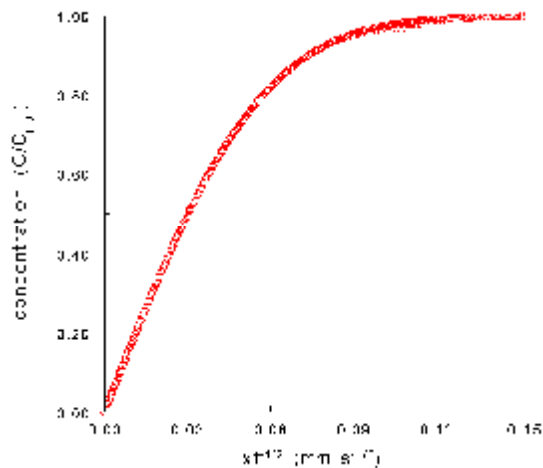
D (m ² s ⁻¹)	water	Bentheimer	Baksteen
NaCl	1.1 10 ⁻⁹	0.4 10 ⁻⁹	0.8 10 ⁻⁹
Na ₂ SO ₄	1.1 10 ⁻⁹	0.4 10 ⁻⁹	0.85 10 ⁻⁹

Tabel 1: De zoutdiffusiecoëfficiënt zoals gemeten voor van verschillende Na-zouten in Bentheimer zandsteen en baksteen.

Voor een beter begrip van de tijdschalen bij een diffusieproces is een simulatie gedaan van het ontzouten met behulp van diffusie van zout in een baksteen met een dikte van 100 mm. De gesimuleerde profielen zijn weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: Een simulatie van de concentratieprofielen tijdens ontzouten met behulp van diffusie. Het tijdsverschil tussen de profielen is een dag.



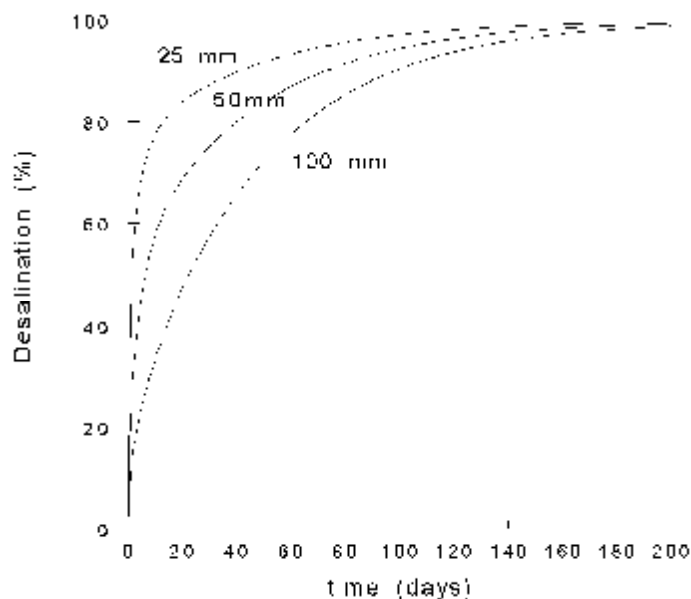
Figuur 2: De Boltzmann getransformeerde profielen van de zoutprofielen zoals weergegeven in figuur 1.

Omdat het hierbij om een diffusie proces gaat kunnen de profielen geschaald worden met behulp van de Boltzmann transformatie [9]:

$$\hat{x}_i = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

De geschaalde profielen zijn weergegeven in figuur 2. Zoals te zien is vallen nu alle afzonderlijke curven samen over een enkele curve.

Omdat we echter geïnteresseerd zijn in het ontzouten is in figuur 3 een simulatie weergegeven voor de totale hoeveelheid zout die is onttrokken als functie van de tijd over de eerste 2.5 en 5 cm en over de totale dikte van de baksteen.



Figuur 3: Het totale percentage van ontzouten over de eerste 25, 50 en totale baksteen van 100 mm zoals berekend met een simulatie.

Zoals te zien is duurt het totaal ontzouten van een steen meer dan 200 dagen. Echter het ontzouten van de eerste 25 mm met 80 % duurt ongeveer 10 dagen. Maar de tijdsduur voor het extra ontzouten neemt hierna zeer sterk toe.

Zoals vermeld in de inleiding kunnen er twee fases worden onderscheiden. Eerst zal water de muur indringen en de daarin aanwezige zouten oplossen en in een tweede fase zal het eigenlijke ontzouten plaatsvinden. Door het verschil in zoutconcentratie van het substraat en de poutlice zullen de ionen getransporteerd worden naar de poutlice. Echter hierdoor zal de ionenconcentratie toenemen in de poutlice. De diffusie van ionen zal werken zolang de concentratie in het substraat groter is dan die in de poutlice. Daarom zal voor het volledig ontzouten van het substraat de poutlice periodiek vervangen moeten worden.

3. Advectie gebaseerde methode

Doordat diffusie een erg traag proces is, wordt vaak gebruik gemaakt van advectie. Advectie is het transport van massa als gevolg van een bewegend medium. Een goed voorbeeld is het transport van vervuild water: de stroom water neemt de onzuiverheden als het ware met zich mee.

In het geval van een poutlice moet er dus een waterstroom van het substraat naar de poutlice zijn die de ionen meevoert. Omdat stroming vele malen sneller is dan diffusie kan een aanzienlijke tijdsreductie van ontzouten worden bereikt. Echter om dit proces te doen plaatsvinden dienen de poriegroottes van het substraat en van de poutlice aan enkele voorwaarden te voldoen.

3.1. Ideaal geval: alleen advectie

Bij het drogen van een homogeen poreus materiaal kunnen twee fasen worden onderscheiden. Een eerste uniforme droogfase, waarin het transport plaatsvindt door middel van vloeistof transport. De tweede fase wordt gekarakteriseerd door een droogfront. Het water moet eerst verdampen in het materiaal en het vervoer vindt plaats door veel trager damptransport.

De capillaire druk in een porie van een poreus materiaal wordt gegeven door [9, 11, 12]:

$$p_c = \frac{2\gamma \cos \varphi}{r_m} \quad (4)$$

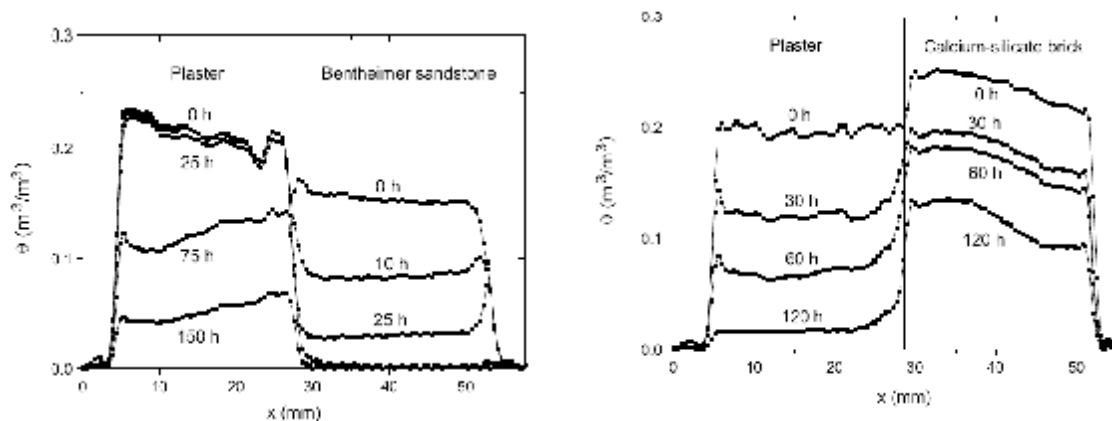
Hierin is γ de oppervlaktespanning, φ de contacthoek voor water met de vaste stof en r_m de poriestraal. Tijdens het drogen zal de lucht eerst indringen in de grootste poriën, waar de capillaire druk het laagst is. Daarom kunnen we onderscheid maken tussen poriën met $r < r_m$ welke gevuld zijn met water en $r > r_m$ welke leeg zijn.

Voor het vochttransport in een twee-laags poutlice/substraat systeem zullen we de volgende aannames maken:

- de twee materialen zijn in perfect hydraulisch contact
- er is een volledig percolerend netwerk
- de externe drukgradiënt is te verwaarlozen, dat wil zeggen dat het drogen volledig bepaald wordt door de capillaire druk in de materialen.

In dit geval geldt dat de kritische poriestraal r_m geldt voor de combinatie van de twee materialen. Daarom zal het materiaal met de grootste poriën het eerst drogen. Ofwel kan door het drogen een advectie worden verkregen als de poriën van de poutlice kleiner zijn dan deze van het substraat. Ter illustratie is in figuur 4 het drogen weergegeven van een zelfde pleister aangebracht op een fijn poreuze ondergrond (kalkzandsteen) en op een grof poreuze ondergrond (Bentheimer zandsteen) [12, 13].

Zoals te zien is droogt in de combinatie pleister/kalkzandsteen de kalkzandsteen het eerst, terwijl in de combinatie pleister/Bentheimer zandsteen, de zandsteen het eerste droogt. Dus alleen bij deze laatste combinatie zal er een advectie van zandsteen naar pleister zijn en kunnen de zouten op deze manier getransporteerd worden.



Figuur 4: De gemeten vochtprofielen in een pleister/substraat combinatie. De preparaten waren initieel bevochtigd met een 4 M NaCl oplossing.

Dus om een waterstroom te hebben van substraat naar poutlice moeten de poriën van de poutlice kleiner zijn dan deze van het substraat. Ofwel kan het ontzouten door advectie

gerealiseerd worden als de poriën van de poultice kleiner zijn dan die van het behandelde substraat. Dit wordt veelal verkregen door klei toe te voegen aan de poultice. Echter als de poultice wordt toegepast op een substraat met kleinere poriën, kan het zouttransport alleen plaatsvinden door diffusie zoals beschreven in het vorige gedeelte

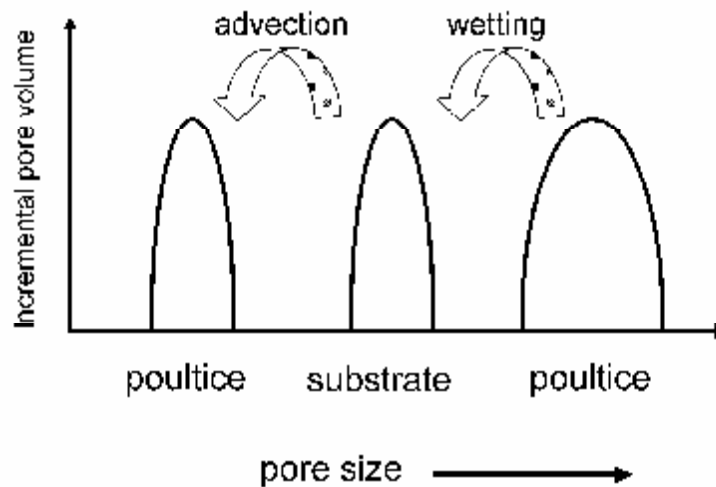
3.2. Niet ideaal: de praktijk

In de praktijk geldt echter dat we te doen hebben met een combinatie van advection en diffusie. Door advection zullen zouten getransporteerd worden. Echter hierdoor zal automatisch een zoutconcentratie worden opgebouwd. Echter deze opbouw zal weer tegengewerkt worden door diffusie. Want door diffusie worden concentratieverschillen vereffend. Daarom als het droogproces te langzaam is zal de advection te klein zijn en zal het zouttransport nog steeds worden gedomineerd door diffusie. De verhouding tussen advection en diffusie tijdens zouttransport kan met behulp van het Peclet getal worden beschreven [9, 14]:

$$Pe = \frac{UL}{D} \quad (5)$$

Hierin is U de vloeistofsnelheid voor advection, D de diffusiecoëfficiënt van het zout en L de lengteschaal waarin men is geïnteresseerd. Voor hoge droogsnelheden, $Pe \gg 1$, wordt het zouttransport gedomineerd door de advection en zal het ontzouten zeer snel zijn. Voor lage droogsnelheden, $Pe \ll 1$, wordt het zouttransport gedomineerd door diffusie en zal het ontzouten langzaam zijn.

In de praktijk zal men meestal starten met een hoge droogsnelheid en zal men initieel snel ontzouten. Echter na enige tijd zal de droogsnelheid afnemen en kan de diffusie dominant worden. Maar doordat eerst met behulp van advection zout is getransporteerd van het substraat naar de poultice, kan er een omgekeerd proces plaatsvinden als de droogsnelheid afneemt en de diffusie gaat overheersen. Door diffusie zullen zouten dan weer van het poultice naar het substraat gaan. Het is daarom van belang in dit geval de poultice op tijd te vernieuwen/verwijderen.



Figuur 5: Voor een optimale werking dient de poriënverdeling van de poultice aangepast te worden aan het te ontzouten substraat.

3.3. Gecombineerde poultices: bevochtigen en ontzouten

In de praktijk heeft een poultice meestal 2 functies. De poultice dient als eerste als een bron van water om het substraat te benatten en de daar aanwezige zouten op te lossen. Echter voor dit proces zullen de poriën van de poultice groter moeten zijn dan deze van het substraat. Tegelijkertijd hebben we gezien dat de poriën van de poultice ook kleiner dienen te zijn voor advectie. Deze tegengestelde eisen zorgen ervoor dat de porieverdeling van de poultice zal moeten worden aangepast aan de porieverdeling van het te ontzouten object. Dit is schematisch weergegeven in figuur 5. De grote poriën van de poultice fungeren hierbij als een reservoir voor het benatten van het object terwijl de kleine poriën zorgen dat het object eerder droogt dan het object en dat advectie dominant is.

4. Conclusies

Poultices kunnen in twee categorieën ingedeeld worden op basis van de twee transportverschijnselen die hieraan ten grondslag liggen: advectie en diffusie. Van deze transportverschijnselen is advectie het snelste voor ontzouten. Om een poultice te ontwerpen die op basis van deze methode werkt dient de poriënverdeling van de poultice te worden aangepast aan het te ontzouten object.

5. Literatuur

- [1] Salt weathering Hazard, A. Goudie and H. Viles, John Wiley and Sons, 1997.
- [2] A. Elena Charola, Salts in the deterioration of porous materials: an overview, JAIC 39 (200):327-343.
- [3] Poul Klens Larsen, Desalination of a painted brick vault, Ph. D thesis, The National Museum of Denmark, Department of Conservation, 1998.
- [4] Desalination of porous building materials: a review, V. Verges-Belmin and H. Siedel, Laboratoire de recherche des monuments historiques, Restoration of Buildings and Monuments Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege Vol. 11, No 6, 1-18 (2005).
- [5] WTA Merkblatt E-3-13-01/D, Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen poröse Baustoffen mittels Kompressen, Deutsche Fassung, 2001.
- [6] Clay poultices in Salt extraction from ornamental stones: a statistical approach, Maria Angeles Vicente and Santiago Vicente-Tavera, Clays and Clay Minerals, Vol. 49, No. 3, 227-235. 2001.
- [7] Removal of salts from granite by sepiolite Raquel Trujillano, Jacinta Garcia-Talegón, Adolfo C. L_igo, Maria A. Vicente, Vicente Rives, Eloy Molina, Applied Clay Science 9 (1995) 459-463.
- [8] Crank, J. (1989). The Mathematics of Diffusion, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom.
- [9] J. Bear and Y. Bachmat. Introduction to modeling of transport phenomena in porous media, v.4. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 1990.
- [10] Dullien, F.A.L. Porous media :fluid transport and pore structure. Academic Press, London, 1991.
- [11] C. Hall and W.D. Hoff. Water transport in brick, stone and concrete. Taylor & Francis, London, 2002.
- [12] J. Petkovic, Moisture and ion transport in layered porous building materials: a nuclear magnetic resonance study, Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands (2005).
- [13] J. Petkovic, H.P. Huinink, L. Pel, K. Kopinga and R.P.J. van Hees, Salt transport in plaster/substrate layers, Materials and Structures 40, 475-490 (2007).
- [14] H.P. Huinink, L. Pel and M.A.J. Michels, How ions distribute in a drying porous medium - A simple model, Phys. Fluids 14, 1389-1395 (2002).

VOCHT DOOR HYGROSCOPISCHE ZOUTEN : WAT DOE JE ERAAN? TOEPASSING OP (DEELS) INGEGRAVEN METSELWERK

**Ir. Yves Vanhellemont, Technologisch Adviseur “Renovatie van gebouwen”,
WTCB**

Abstract

Alle zouten (en dus ook de zouten die we in metselwerk aantreffen) vertonen hygroscopisch gedrag, de mate daarvan hangt af van de omgevingsomstandigheden. Dergelijk hygroscopisch gedrag leidt vaak tot problemen die louter esthetisch van aard kunnen zijn, maar ook tot ernstige aantasting van materialen en afwerkingslagen, zelfs indien er geen rechtstreekse aanvoer van vocht (meer) is.

Zoals genoegzaam bekend zijn ingrepen ter ontzouting, of andere rechtstreekse ingrepen op het zout (zoutomzetting bijvoorbeeld) eerder uitzondering dan regel. En dat heeft alles te maken met de relatief beperkte efficiëntie van dergelijke ingrepen, of de totale onmogelijkheid om ze op grote objecten, zoals gebouwen, toe te passen. Hun werkzaamheid wordt trouwens nog beperkter indien de vocht oorzaak in het metselwerk niet uitgeschakeld kan worden.

Desalniettemin staat er een hele batterij interventietechnieken ter beschikking van de restaurateur om de zoutschade te elimineren, of toch tenminste binnen de perken te houden. Helaas vloeken een aantal van deze technieken met de monumentale waarde van een gebouw. Een goed compromis dient er dan gezocht te worden, waarbij de duurzaamheid van het gebouw nog steeds als prioritair beschouwd moet worden.

In deze uiteenzetting wordt één en ander geïllustreerd met de behandeling van (volledig of gedeeltelijk) deels ingegraven metselwerk (zoals kelders of archeologische overblijfselen). Het gaat hier immers om metselwerk dat quasi steeds blootgesteld is aan één of andere vorm van vocht- en zoutbelasting, en dus ook uitstekend geschikt om interventietechnieken te illustreren.

Sleutelwoorden: onderhoudsplanning, monitoring, kostenraming, onderhoudscontract

1. Hygroscopische versus niet-hygroscopische zouten: een heel relatief begrip



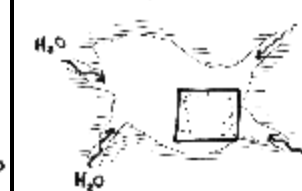
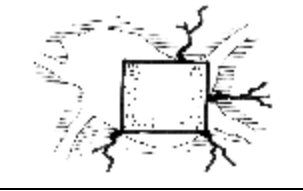
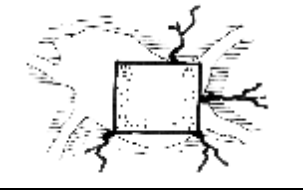

Zouten geven aanleiding tot problemen op meerdere niveaus, en dit hangt samen met hun fysische eigenschappen. Elk zout wordt immers gekenmerkt door een bepaalde karakteristieke relatieve luchtvochtigheid die gehandhaafd wordt boven een verzadigde waterige oplossing van dit zout:

- Is de werkelijke relatieve luchtvochtigheid hoger dan deze karakteristieke waarde, dan absorbeert dit zout spontaan luchtvocht en een vochtvlek ontstaat. Men beschrijft dit onder de noemer “hygroscopiciteit”. Hoe lager deze karakteristieke relatieve luchtvochtigheid, des te hygroscopischer het zout. Een typisch voorbeeld van een zout dat quasi steeds hygroscopisch is, en daardoor altijd in oplossing voorkomt, is CaCl_2 (een veel gebruikte component in dooizouten). Problemen met dergelijke zouten zijn veelal esthetisch (vochtvlekken of verkleuringen van verf), materiaaltechnisch inzake hechting van afwerkingslagen, en gezondheidsgerelateerd (schimmels).
- Is de werkelijke luchtvochtigheid lager dan die karakteristieke waarde, en is de zoutoplossing in het bouw materiaal in supersaturatie (concentratie die trouwens ook afhankelijk is van de poriënstraal), dan kristalliseert het zout uit. Met deze kristal groei gaat een kristallisatiedruk gepaard die vaak hoger is dan de mechanische weerstand van het materiaal. Indien een zout dus kristalliseert in een porie van dergelijk materiaal (zogenaamde cryptofluorescentie), dan kan het groeiende zout de poriënwand wegdrücken, hetgeen aanleiding geeft tot microscheuring, en op termijn bij

voortschrijdende kristallisatiecycli, tot macroscopische schade (verpoedering, scheuring) in het materiaal. De schade die dergelijke zout veroorzaakt, kan aanzienlijk verminderd worden, indien men erin slaagt om alle vochttoevoer te stoppen. Maar zelfs als dit lukt, blijven schommelingen in de relatieve luchtvochtigheid voor schade zorgen: deze zouten hydrateren (volumetoename van de zoutkristallen door wateropname in de kristalmatrix), waardoor steeds schade (verpoedering van het materiaal) mogelijk blijft.

- Als een soort ‘tussenvorm’ van beide schadefenomenen kunnen we nog volumetoename door hydratatie onderscheiden: bij wisselende luchtvochtigheden (dat is zowel binnen als buiten een gebouw quasi onvermijdelijk) zal een zoutkristal watermoleculen binden of afstaan, waardoor het volume van het zoutkristal kan toe-of afnemen. Bij herhaaldelijke van dergelijke cycli kan een zoutgevoelig materiaal ernstig beschadigd worden.
- Gemakshalve wordt er vaak een onderscheid gemaakt tussen hygroscopische zouten, matig hygroscopische zouten en niet-hygroscopische zouten. Op grond van het bovenstaande is dat niet echt een wetenschappelijke benadering, maar het is een zinvolle indeling indien we rekening houden met de grenzen waarbinnen de luchtvochtigheid varieert. Zeker voor binnenruimtes (woonkamer, kantoor, vergaderzaal, slaapkamer, ...) zijn de grenzen waarbinnen de luchtvochtigheid varieert relatief nauw, en kan men dergelijke indeling maken. Voor deels vochtige ruimtes (badkamers, keukens) is dergelijk onderscheid al minder zinvol, en voor buitengevels of kelders is ze dit al helemaal niet meer. Daar kan éénzelfde soort zout een hele waaier aan schades veroorzaken.

Overigens wordt één en ander een stuk ingewikkelder indien er mengsels van zouten aanwezig zijn.

voor			
na			
	1. Uitkristalliseren van zouten (droging van een zoutoplossing- ontstaan van een zoutkristal, gepaard gaande met kristallisatiedruk)	2. Hydrateren van zouten (volumetoename van het zoutkristal door opnemen van kristalwater, vocht opname via waterdamp in de lucht)	3. Hygroscopisch gedrag van zouten (volledig in oplossing gaan van zouten, de wateropname gebeurt via waterdamp uit de lucht)

Figuur 1: Schematische voorstelling van het gedrag van zouten in de poriën van een materiaal, dat aanleiding kan geven tot schade.

Afhankelijk van de omgevingsomstandigheden (meer bepaald de relatieve luchtvochtigheid en de temperatuur) kan één enkel zout meerdere van de hierboven beschreven schades veroorzaken.

			
			
<p>Oppervlakte-uitbloei: kristallisatie aan de oppervlakte van metselwerk. minst schadelijk, maar visueel zeer zichtbaar. Bij voldoende hoge luchtvochtigheid lossen deze zouten op (omwille van hun hygroscopische gedrag), om een schadebeeld te vormen zoals in de vierde kolom van deze tabel.</p>	<p>cryptofluorescentie (kristallisatie) in pleisterwerk en baksteen: verpoedering en aanzienlijk materiaalverlies. Een gelijkaardig schadebeeld treedt ook op bij hydratatie van zouten in de poriën van een materiaal</p>	<p>Efflorescentie (kristallisatie) tussen metselwerk en afwerkingslagen. Dit kan verf zijn, maar ook pleister- of cementeringslagen (kelderichtingen!) kunnen afgedrukt worden door zoutkristallisatie. Hydratatie van reeds aanwezige zoutkristallen kan dergelijk schadebeeld evenzeer veroorzaken.</p>	<p>Vochtvlakken tengevolge van hygroscopische zouten. In tegenstelling tot hetgeen men vaak denkt, verdwijnen deze vlekken nooit, ook niet als het metselwerk geen toevoer van vocht niet meer kent. Indien de luchtvochtigheid te laag wordt, dan kristalliseren deze zouten uit, met bijkomend schadebeeld zoals in de eerste drie kolommen van deze tabel.</p>
<p>Figuur 2: Diverse schadebeelden gekoppeld aan de aanwezigheid van zouten.</p>			

2. Hiërarchie van interventies

Er bestaan verschillende gradaties van ingrijpen bij een hygroscopisch zoutprobleem. Dit wordt in de volgende paragrafen meer in detail besproken. Het gaat min of meer om de volgende aspecten:

Indien het uitzicht van het gebouw niet veranderd mag worden, dan dient men zich te beperken tot een minimale interventie:

- helemaal niets doen, slechts onderhoudswerken uitvoeren die de door de zouten aangerichte schade dient te herstellen;
- interventie op het vlak van klimatisatie (temperatuur, luchtvochtigheid, ventilatie). Deze kan quasi onzichtbaar worden uitgevoerd.

Indien er getolereerd wordt dat het uitzicht van het gebouw verandert, dan bestaan er ook weer verschillende types van interventie:

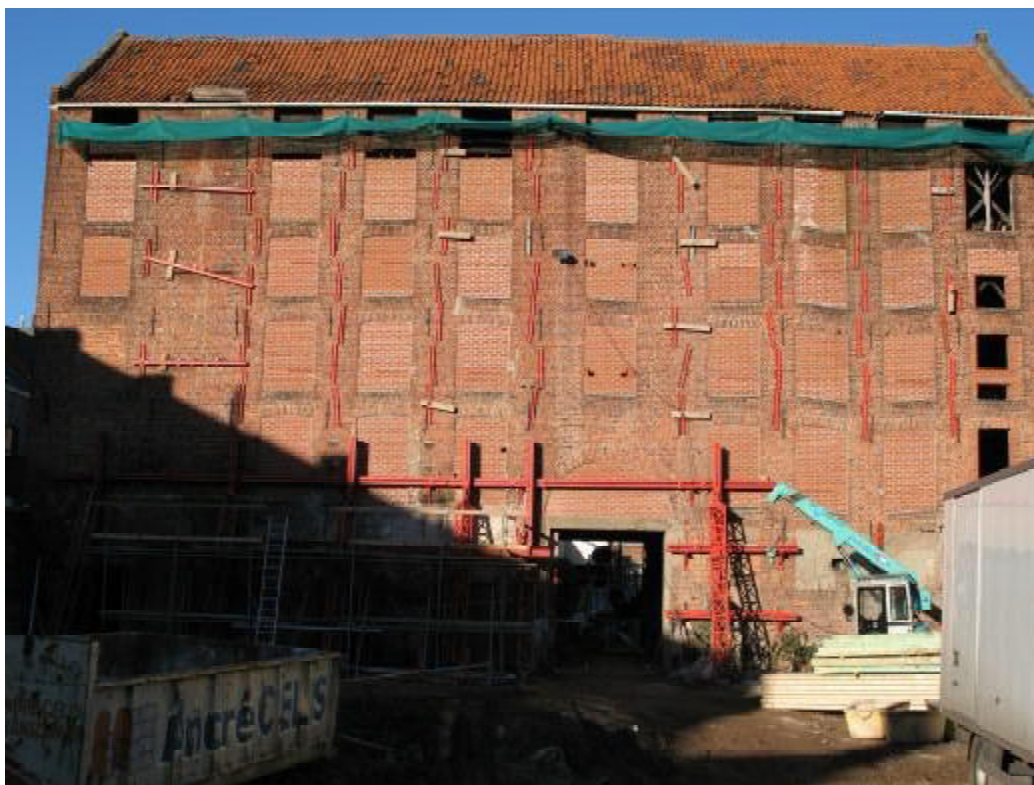
- aanbrenging van een compleet water- en dampdicht verfsysteem
- aanbrenging van een waterdichte pleister
- aanbrenging van een zoutbergende pleister
- aanbrenging van een membraan dat alle vochttransport tegenhoudt.

In alle gevallen geldt dat een interventie tegen vocht doorgaans de eerste en meest succesvolle behandeling tegen zoutproblematiek is. Op voorwaarde dat zo een behandeling mogelijk is, en dat ze geen vervelende neveneffecten zal veroorzaken.

3. De allerminimale ingreep: zo weinig mogelijk afwerking, en regelmatig onderhoud – quasi onvermijdelijk voor buitengevels

Bij dergelijke ingreep (die we eigenlijk bezwaarlijk een 'ingreep' kunnen noemen) is het enkel de bedoeling om schade, veroorzaakt door zouten, te herstellen. Je doet dus niets aan het klimaat (temperatuur, luchtvochtigheid, ventilatie, ... zeker als het om buitengevels gaat, kan dat ook helemaal niet) en brengt ook zo weinig mogelijk afwerkingslagen aan. Afwerkingslagen zijn zeer gevoelig voor de aanwezigheid van zouten (afschilfering bijvoorbeeld), maar ze verkleuren ook onder invloed van de vochttopstapeling door hygroscopiciteit. En een vochtvlek is nog steeds veel moeilijker te zien op een eerder heterogene ondergrond zoals metselwerk, dan op een geëgaliseerde ondergrond (bepoeterd, of rechtstreeks geschilderd op metselwerk). Het zicht hindert dan wat minder. Maar in dergelijke gevallen dient er wel nog steeds rekening gehouden te worden met het feit dat de gevelmaterialen beschadigd kunnen worden, en dat in extreme gevallen het moet voorzien worden dat er onderhoud uitgevoerd dient te worden. Een en ander kan nog wel verbeterd worden, indien er mogelijkheid is tot gevelbescherming door middel van geveldetaillering en oversteken. Reductie van de oplossings-kristallisatiecyclus wordt aldus verkregen, en zoutschade wordt vertraagd.

Op vlak van mogelijkheden aan buitengevels hebben we daarmee wel gehad...



Figuur 3: Mouterij in Leuven. In dergelijk gebouw is het bijna onvermijdelijk dat er allerhande zouten aanwezig zijn. Een ernstige belasting met zowel natrium- als calciumchloride, naast de grote aanwezigheid van natrium- en calciumnitraat, leidt tot een quasi onvermijdelijke minimale ingreep. Met andere woorden: geen kalei, en geen waterwerende oppervlaktebehandeling. Enkel herstellen van de gevel met een compatibele mortel is aan te raden. Indien men kan leven met een heterogeen uitzicht (vochtvlekken) en met het feit dat er aanzienlijk regelmatig dan 'normaal' onderhoud aan het verfwerk uitgevoerd moet worden, kan men eventueel ook nog schilderwerken met een gepaste verf voor buiten voorzien.

4. Onzichtbare of quasi-onzichtbare ingrepen: klimatisatie en ingrepen tegen vocht

Zoals eerder gezegd kunnen een aantal ingrepen tegen vocht reeds een aanzienlijke verbetering van de zoutpathologie teweeg brengen. Heel vaak zijn er ingrepen tegen opstijgend grondvocht, of zijdelingse infiltraties mogelijk.

Maar ingeval van hygroscopische zouten (en elk zout is dat in zekere zin) is het zelden een volledige oplossing. Indien men evenwel eist dat elke ingreep onzichtbaar blijft, dan dient men zich voor de rest te beperken tot ventilatie en klimatisatie.

Bij de klimatisatie zijn er twee mogelijkheden:

- Ofwel is alle aanvoer van vocht en zouten gestopt, en dan kan men ervan uitgaan dat indien het klimaat (temperatuur en vochtgehalte) constant blijft, dat er dan in principe niets meer kan gebeuren. De zouten bevinden zich op dat moment in een evenwichtstoestand (kristallijn of in hygroscopisch vocht) maar veroorzaken in eerste instantie geen schade meer (op eventueel esthetische schade na, door donkerverkleuring door vocht). Opgemerkt moet worden dat het volledig constant houden van het klimaat in een gebouw een moeilijke zaak is. Zelfs bij een ideaal verluchtungs- en verwarmingssysteem zullen er in een ruimte schommelingen in temperatuur en luchtvocht

optreden (door het veranderende weer, binnen- en buitengaan van personen, ...), en dat uit zich vooral op plaatsen die minder goed bereikbaar zijn voor verluchting, zoals hoeken, inhammen, ...

- Is de aanvoer van vocht en zouten niet gestopt, dan wordt de situatie nog wat ingewikkelder. Op dat moment heeft men er alle voordeel bij dat de zouten zich steeds in hun 'hygroscopisch regime' bevinden: op die manier kristalliseren ze niet uit, en veroorzaken ze toch al geen materiële schade. Vochtgevoelige materialen blijven op die manier evenwel een risico lopen.

In het tweede scenario is het van belang dat je weet boven welke relatieve luchtvochtigheid er geklimatiseerd moet worden, teneinde ervoor te zorgen dat de zouten niet uitkristalliseren. Dat kan op verschillende manieren:

- Bepaling van de zouten die aanwezig zijn in het materiaal in kwestie. Ten eerste geeft dit aan of er überhaupt een zoutprobleem is. Een identificatie van de aanwezige zouten geeft quasi rechtstreeks aan welke luchtvochtigheid er 'gekozen' moet worden: steeds hoger dan de hoogste karakteristieke luchtvochtigheid van alle types zout die aanwezig zijn.
- Problematisch is evenwel dat er vaak meerdere types anionen en kationen aanwezig zijn in het materiaal. Het ondubbeltzinnig vaststellen van het zouttype is daardoor verre van vanzelfsprekend. Veiliger is het om op dat moment over te gaan tot de bepaling van een 'isotherm'. Bij deze proef wordt een monster langzaam blootgesteld aan een stijgende luchtvochtigheid, waarbij de temperatuur constant blijft. Voortdurend wordt de massa van het monster opgevolgd. Hetgeen bij deze proef gebeurt, is een continue toename van de massa van het monster: bij stijgende luchtvochtigheid zal quasi elk materiaal meer water adsorberen. Rondom elke karakteristieke luchtvochtigheid van een aanwezig zout zal er echter een steilere sprong plaatsvinden. Een zout zal, als zijn karakteristieke luchtvochtigheid wordt bereikt, een relatief grote hoeveelheid vocht opnemen, waardoor de massatoename van het monster sneller gebeurt dan de geleidelijke 'normale' toename. Het is dan onmiddellijk af te lezen op de grafiek van de massa van het monster, in functie van de luchtvochtigheid, welke luchtvochtigheid gekozen moet worden om te verkrijgen dat er geen kristallisatie zal optreden.

Toepassing op kelders

Het droogleggen van een kelder is in veel gevallen geen sinecure. De zekerste oplossing is het aan de buitenkant van het gebouw aanbrengen van waterdichte membranen, eventueel gecombineerd met een drainage indien het grondwater hoger kan stijgen dan de onderkant van het membraan, of indien er slecht drainerende lagen zoals klei aanwezig zijn. Dergelijke membranen dienen in elk geval gecombineerd te worden met doelgerichte injecties tegen opstijgend grondvocht (waarbij er een onderscheid tussen binnen- en buitenmuren gemaakt moet worden, en bijzondere aandacht besteed moet worden aan aansluitingen tussen verschillende muren. De plaats van zo'n injectie hangt ook af van het feit of er al dan niet een beschermend membraan aan de buitenkant van het gebouw toegepast kan worden. Het aanbrengen van een membraan vraagt ook uitgravingen, en ook dat stuit vaak op praktische problemen (stabiliteit, bereikbaarheid). Ook kelders met een moeilijker' geometrie zijn vaak moeilijker droog te leggen (bijvoorbeeld overwelfde kelders, kelders met zeer dikke muren, kelders die omgeven zijn door water, of zich deels onder het grondwaterniveau bevinden).

Het droogleggen van kelders is evenwel een uitgebreid onderwerp op zich, en behandelen we dus hier niet verder. In de referentielijst staan een aantal publicaties opgesomd die verder uitweiden over dit onderwerp.

Veronderstellen we dat we erin slagen om alle keldermuren droog te leggen, dan is de verdere klimatisatie in theorie weer eenvoudig. Het constant houden van temperatuur en luchtvochtigheid volstaat dan in principe om de zouten te immobiliseren, waardoor ze geen schade meer veroorzaken). Indien dergelijk constant klimaat moeilijker haalbaar is, dan dient

er weerom een luchtvochtigheid gehandhaafd te worden die ervoor zorgt dat alle zouten in hun 'hygroscopische regime' terechtkomen. De keuze van die luchtvochtigheid staat hierboven aangegeven.

Indien we er niet in slagen om de keldermuren droog te leggen, dan moet er weer gezocht worden naar een klimatisatie die een luchtvochtgehalte garandeert, zodanig dat alle zouten in hun hygroscopische regime zitten.

Ventilatie van kelders

Je zou hieruit kunnen afleiden dat een complete afwezigheid van ventilatie in een kelder de ideale en eenvoudigste oplossing is. Op die manier bekom je op de duur een relatieve luchtvochtigheid die zeer dicht bij 100 % aanleunt, waardoor geen enkel zout nog kan uitkristalliseren. Probleem opgelost op die manier! Natuurlijk zijn er dan wel enkele problemen die de kop opsteken:

- Die kelder is niet meer bruikbaar voor menselijke activiteit, want daar is er toch wel enige luchtkwaliteit voor nodig.
- Ook voor het gebruik van een kelder als stockageruimte van goederen is dit geen goed idee. De hoge luchtvochtigheid kan allerhande types van aantasting veroorzaken (aan papier, metaal, voedsel, hout, ...).
- In principe kan je een kelder, die voor helemaal niets meer gebruikt wordt, wel compleet afsluiten. Er dient dan op gelet te worden dat eventuele vochtproblemen zich niet verplaatsen naar andere delen van het gebouw (volledig afsluiten van een kelder kan bijvoorbeeld opstijgend grondvocht veroorzaken in de hogergelegen etages – een preventieve behandeling tegen stijgvocht wordt dan noodzakelijk)
- Bovendien kan dit gebrek aan ventilatie in een kelder enkel verantwoord worden indien de kelderstructuur compleet steen is. Houten en metalen elementen zullen immers onherroepelijk aangetast worden in een dergelijke vochtige omgeving.

Meestal zal men er dus toch toe moeten komen om een kelder te ventileren op één of andere manier. Een klimatisatie, waarbij minstens de luchtvochtigheid van de kelder wordt geregeld, is hierbij ten eerste aan te raden. In veel gevallen wordt er evenwel enkel geopteerd voor een oplossing waarbij de lucht ververst wordt, zonder dat er rekening wordt gehouden met de luchtvochtigheid. Dat is een verdedigbare optie, indien men er wel rekening mee houdt dat er onderhoudswerken nodig zullen zijn.

Bij ventilatie van kelders dient er lucht aan- en afgevoerd te worden. Wat de afvoer betreft is de situatie vrij eenvoudig: deze dient bij voorkeur rechtstreeks naar buiten te worden afgevoerd, aangezien kelderlucht doorgaans relatief vochtig is, en soms schadelijke of onaangename stoffen bevat (geuren, schimmelsporen, ...).

Wat de aanvoerlucht betreft gaat de keuze tussen lucht uit de rest van het gebouw, of buitenlucht.

Buitenlucht heeft een aantal nadelen.

- Op koude winterdagen zal daardoor (door de lichte opwarming van de buitenlucht, van zodra deze zich in de kelder bevindt) de relatieve luchtvochtigheid vrij laag zijn. Veelal ziet men daardoor een gevoelige toename van zoutkristallisatieschade optreden op de keldermuren die niet afgewerkt zijn met een kelderdichting. De gemiddelde temperatuur in de kelder zal daarbij ook vrij laag zijn, wat toepassing van een thermische isolatie van het kelderplafond bijna tot een noodzaak maakt, indien de vloerconstructie van de gelijkvloerse verdieping uit een 'eenvoudige' balken- en plankenlaag bestaat.
- Op warme zomerdagen leidt de toevoer van buitenlucht tot een afkoeling in de kelder, met een gevoelige toename van de relatieve luchtvochtigheid. In dergelijke omstandigheden is er grote kans op condens- en schimmelvorming.

Bij gebruik van binnenlucht om de kelder te ventileren bestaat het condensrisico het hele jaar door, maar dan wel met een lagere intensiteit dan wanneer er op warme zomerdagen wordt geventileerd met buitenlucht. Bij een binnenhuisatmosfeer van 20 °C en 50 % relatieve luchtvochtigheid, zal er aldus een luchtvochtigheid in de kelder worden gecreëerd

die tot 70 à 80 % RV ligt. Hetgeen nog steeds een stuk lager is dan bij quasi afwezigheid van ventilatie. Bovendien kan verhinderd worden dat deze luchtvochtigheid te snel stijgt indien het ventilatievoud hoog genoeg ligt. In elk geval is het goed om voor ogen te houden dat noch binnenlucht, noch buitenlucht, erg geschikt zijn voor het ventileren van een kelderruimte. Binnenlucht is de minst slechte oplossing, maar enkel het toepassen van een klimatisatie die ook de luchtvochtigheid aanpast aan de specifieke zoutsituatie van de kelder, kan een maximale conservatie van de materialen in de kelder garanderen.

Veelal worden kelders geventileerd via een zogenoemde natuurlijke ventilatie, waar één of meerder kelderopeningen dienen als intree- en/of uittree-opening voor de ventilatielucht. Meestal is dat een zeer inefficiënte manier van ventileren:

- kelderopeningen zijn doorgaans niet erg groot, hetgeen het natuurlijke ventilatievoud reeds sterk beperkt.
- Vaak is er slechts één kelderopening, waardoor dezelfde kelderopening zowel voor intree als uittree van lucht dient. In dergelijk geval zal ook enkel de onmiddellijke omgeving van de kelderruimte geventileerd worden, en stagneert de lucht die verder van de kelderopening ligt.
- Maar ook bij meerdere kelderopeningen blijft de natuurlijke ventilatie vaak slecht. De geometrie van de keldergaten speelt dan mee (bijvoorbeeld enkel keldergaten aan de straatkant van het gebouw). Ook het feit dat ze zich vaak op hetzelfde niveau bevinden werkt een gunstig schouweffect niet in de hand.
- Een dergelijk schouweffect kan eventueel bekomen worden indien er ramen op hogergelegen niveaus van het gebouw in het traject van de ventilatielucht worden betrokken. Probleem is dan dat lucht vanuit de kelder in de woon of werkruimte terecht komt, hetgeen sowieso een ongunstige situatie is, zoals eerder besproken.

Case: ijskelder van Oudergem

Het gaat om een gigantische ondergrondse langwerpige overwelfde ruimte, compleet in baksteenmetselwerk, daterend uit midden 19^e eeuw. Het gaat om een spouwconstructie, waarbij het zichtbare metselwerk gescheiden is van het achterliggende metselwerk door een luchtspouw. De beide spouwbladen zijn aan mekaar verankerd door bakstenen die in beide spouwbladen verwerkt zijn. Ook de vloerconstructie is hol.

Boven deze ijskelder wordt een grootschalig winkelcomplex gepland, en de ijskelder wordt in deze planning verwerkt als een ruimte waarin bepaalde activiteiten kunnen doorgaan. Daarbij komt er stabiliteitsgewijs heel wat kijken, waar ook wat betreft vocht. De verwachting is dat de grond rondom de ijskelder zal uitdrogen (de verharding die bovengronds zal aangebracht worden, zal verhinderen dat er neerslag in de grond dringt, en het grondwaterniveau staat ruim beneden het vloerniveau) zodat er een potentieel probleem van zoutschade kan ontstaan. Verder diende er nagegaan te worden of een klimatisatie schade zou kunnen veroorzaken aan het metselwerk, en welke de luchtvochtigheid diende te zijn.

In opdracht van de architect werd door het KIK een vooronderzoek naar ondermeer de zoutproblematiek uitgevoerd. Deze syllabus is niet de plaats om dergelijk vooronderzoek compleet uit de doeken te doen, maar enkele hoofdresultaten waren toch wel:

- het meest voorkomende zout is calciumnitraat, met als karakteristieke luchtvochtgehalte 54 %;
- metingen van een isotherm begonnen bij een luchtvochtgehalte van 60 % en hoger. Enkel bij één staal wordt een zeer opvallende massatoename waargenomen bij luchtvochtgehaltes tussen 60 % en 65 % . Bij hogere luchtvochtigheden vlakt de curve af.

Moraal van het verhaal hier is dat er, ondanks de aanwezigheid van de zouten, het toch mogelijk is om de ruimte tot op voldoende lage luchtvochtgehaltes te klimatiseren, zodat er geen onaangename luchtvochtigheid is indien men de ruimte wil gebruiken voor allerhande activiteiten.



Figuur 4: zicht op de Oudergemse ijskelder (copyright KIK).



Figuur 5: Typische schade in het metselwerk van de Aula Magna te Brussel – heel gelijkaardig aan hetgeen men in zovele kelders kan waarnemen.

Case: Aula Magna (resten van het voormalig hertogelijk Paleis te Brussel)

In tegenstelling tot de vorige case, met een nogal uitzonderlijke structuur (die wellicht mee de relatief lage zoutbelasting verklaart) gaat het hier om massief metselwerk dat gedurende eeuwen onder de grond zat. Wat dat betreft is het wel een typisch voorbeeld van de conservatieproblematiek van veel archeologische overblijfselen, en ook van heel wat 'gewone' kelders.

Een vooronderzoek werd voorgesteld door KIK en WTCB, maar dit werd momenteel nog niet uitgevoerd. Desalniettemin is er toch het één en ander interessants te vertellen over deze resten.

De aanvoer van vocht en zouten is quasi niet te stoppen. Ook allerhande zaken zoals pleisters en verven mogen vanzelfsprekend niet toegepast worden, dus is enkel klimatisatie nog aangewezen om de resten te vrijwaren.

Het beste ware natuurlijk dat de archeologische resten ingegraven zouden blijven, maar dat is voor bezoekers een stuk minder interessant...

Tijdens het plaatsbezoek bleek dat er overal zeer intense uitbloeiingen van zouten te zien waren, wellicht gaat het om natriumsulfaat. Vrij typisch, de aanwezigheid van natriumsulfaat in ondergronds metselwerk (en grondvocht!) is eerder regel dan uitzondering. Dat deze zouten uitbloeien is vrij normaal: de ruimte werd zeer intens geventileerd, en ook wat verwarmd. De zouten veroorzaken schade aan het metselwerk. De enige praktisch haalbare manier om dit te voorkomen is om het luchtvochtgehalte van de ruimte aanzienlijk te laten toenemen. In principe kan alle schade door natriumsulfaat gestopt worden indien de luchtvochtigheid boven 94% blijft.

Dat dit vervelende consequenties heeft voor de bezoekers is duidelijk. Een dergelijk klimaat is niet bepaald aangenaam te noemen, maar het is dan ook kwestie van een prioriteit te stellen. Het behoud van de resten lijkt ons toch wel prioritair boven het comfort van de bezoekers.

Aanvullende ingrepen, zoals opvang en afvoer van condenswater (quasi zeker een condensproblematiek tijdens de winterperiode, op de koude betonnen plafondconstructie, die het bovengelegen Koningsplein moet dragen), dient de bezoekers een douche te besparen. En een bijkomende bescherming voor het beton in de vochtige omgeving zou ook niet noodzakelijk een slecht idee zijn.

De 'doorsnee' kelder

Eigenlijk is meestal de situatie van een 'gewone' kelder van een 'gewoon' historisch gebouw zeer sterk te vergelijken met de situatie van de Aula Magna. Het gaat vaak om een vergelijkbare vocht- en zoutbelasting, die dus quasi onvermijdelijk zal leiden tot ofwel:

- schade aan het metselwerk bij klimatiseren van de ruimte tot waarden die als comfortabel voor mensen worden ervaren.
- een ernstig discomfort voor de bezoekers of gebruikers van de ruimte, indien men ze klimatiseert zodanig dat het metselwerk van de kelder maximaal geconserveerd blijft.

Besluit hier is dat (meestal) in kelderruimtes de eisen naar maximaal comfort enerzijds, en maximale conservatie anderzijds, niet te verzoenen zijn. Meestal is het dus onhaalbaar om op een gezonde manier een kelder te gebruiken als werk- of woonruimte, en tegelijk het uitzicht van de kelder te bewaren.

5. Verven, pleisters en membranen

Indien men schade door zouten en vocht zoveel mogelijk wil beperken, bestaat er een hele waaier aan afwerkingsproducten die, op min of meer succesvolle wijze, de schade door zouten kunnen verminderen of stoppen. Het werkingsprincipe van deze methodes is één van de volgende:

- het compleet verhinderen van enige verdamping van vocht, zodat zouten niet meer kristalliseren, en het compleet afsluiten van zouten van de lucht, zodat ze niet meer transformeren onder invloed van schommelingen in de luchtvochtigheid
- het verplaatsen van het schadefront in een materiaal, dat daardoor zelfopofferend wordt. Op die manier wordt het oorspronkelijke materiaal van het gebouw wel beter gevrijwaard.

Verf

Door het aanbrengen van een waterdampdoorlatende verf op een metselwerk bekomt men zeker niet dat zoutschade zal verminderen. Integendeel, doordat de kleur geëgaliseerd wordt, zullen vochtvlekken, en eventueel ook afschilferende verf, extra in het oog springen. Eigenlijk is dit eerder af te raden indien men enkel vanuit esthetische overwegingen een muur zou schilderen. Het schilderen omwille van technische redenen (ondermeer beperken van de waterinfiltratie in het metselwerk) is wel ok, maar men dient zich te realiseren dat schilderwerk op een zoutbelaste gevel steeds onderhoudsintensief is.

Het aanbrengen van een waterdampondoorlatende verf (epoxy, polyurethaan, olie, ...) op een zoutbelaste ondergrond zou in theorie een goede oplossing voor een zoutproblematiek kunnen zijn. De theorie is evenwel niet de praktijk:

- Verven die op een vochtige ondergrond aangebracht kunnen worden en goed hechten, zijn zelden helemaal waterdampondoorlatend. Zoutschade kan dus vertraagd worden, maar helemaal verdwijnen zal ze niet.
- Bovendien is het aanbrengen van een waterdampondoorlatende verf eigenlijk enkel te verantwoorden op binnenmuren. Op buitenmuren is dit eerder een slecht idee. Regenwater kan immers via de kleinste scheurtjes naar binnen treden, waardoor er nadien vochttoppingen achter de verflaag ontstaan.
- Sowieso is het een slecht idee om muren af te sluiten van de buitenwereld. Elke minieme vocht oorzaak kan daardoor uitgroeien tot een groot probleem. Waterdampondoorlatende afwerkklagen (inclusief pleisters!) zijn daarom enkel aan te bevelen als de keuze zeer weloverwogen gebeurt, of als ze historisch te verantwoorden zijn (maar dan zal er een prijs naar onderhoud betaald worden...)
- De irreversibiliteit van dergelijke verfssystemen is een ander belangrijk nadeel.

Kelderdichtingen

Met kelderdichtingen worden alle pleisters aangeduid die, al dan niet gemodificeerd met een kunsthars, op vochtige muren worden aangebracht, om het vocht en zouten tegen te houden.

Ze verdoezelen ook de textuur van het metselwerk, hetgeen een nadeel is ten opzichte van waterdampondoorlatende verven. De andere nadelen van waterdampondoorlatende verven zijn eigenlijk ook hier van toepassing. Inclusief de vaststelling dat ze niet geheel ondoorlaatbaar zijn voor waterdamp! Dat heeft als gevolg dat op termijn ook weer schade aan dergelijke pleisters kan optreden. Het dient gezegd te worden dat dit echt wel zeer lange termijn is, de duurzaamheid kan oplopen tot enkele decennia of langer.

De duurzaamheid van dergelijke kelderdichtingen wordt mogelijkerwijs aanzienlijk gereduceerd door een intense ventilatie of verwarming in de ruimte. Ze 'forceren' als het ware het vocht uit de keldermuren, doorheen de (vrij kleine, doch wel bestaande) porositeit van de kelderdichting. Het vocht verdampt in versneld tempo, en achter de kelderdichting zullen zouten toch beginnen te kristalliseren. In geval van veel zouten in het grondvocht, intense ventilatie en/of verwarming, bekomt men aldus een zeer substantiële verkorting van de levensduur van de kelderdichting! Het is daarom aangeraden om dergelijke dichtingen niet te gebruiken in woon- of werkruimtes, of in ruimtes waarin er sterk geventileerd moet worden (wasruimtes, stookruimtes, ...).

Membranen

In ruimtes waarin er een niet op te lossen vocht- en zoutprobleem is, en die gebruikt dienen te worden als woon- of werkruimte, is het aanbrengen van waterdampdoorlatende membranen (typisch kunststof noppenfolies of aanverwanten) waarop een bepleistering of voorzetwand geplaatst wordt, de enige technisch duurzame oplossing. Doorheen dergelijke membranen komt er zo goed als geen waterdamp, waardoor er effectief ook geen kristallisaties ontstaan, en evenmin dat er vochtvlekken ontstaan door hygroscopische zouten.

Saneerpleisters of zoutbergende pleisters

Het gaat om pleisters die aangebracht kunnen worden op zoutbelaste en/of vochtbelaste ondergrond, met als doel om het achterliggende metselwerk te laten drogen, zonder dat zoutkristallisatie optreedt in het metselwerk. De poriënstructuur van de saneerpleister is dusdanig dat de pleisters bestand zijn tegen langdurige kristallisatiecycli in de pleister. De weerstand is evenwel niet eeuwigdurend, en op termijn zal ook dit type van pleister beginnen degraderen. Maar het is in elk geval een stuk duurzamer dan een klassieke bepleistering.

Voor de maximale werkzaamheid van dergelijke pleister is het absoluut noodzakelijk dat deze wordt afgewerkt met een dampopen verfsysteem!

Toegepast op kelders

Het grote voordeel van een saneerpleister die in een kelder wordt toegepast is dat er geen of nauwelijks verplaatsing van een vochtprobleem zal optreden. De pleister vormt immers nauwelijks een rem op de verdamping van het vocht, en de vochtsituatie zal niet veranderen. Het dient gezegd te worden dat, door de hoge vochtbelasting van de meeste keldermuren, een toepassing in een sterk geventileerde of verwarmde ruimte, zal resulteren in een gereduceerde duurzaamheid van de pleister.

Bij toepassing van de waterdampdichte oplossingen (verven, kelderdichtingen en membranen) is het absoluut noodzakelijk dat er vermeden wordt dat vochtproblemen zich zullen verplaatsen. Het toepassen van bijvoorbeeld een kelderdichting in een voorheen goed geventileerde kelder, zal er meestal toe leiden dat er een probleem van opstijgend grondvocht ontstaat op de hogergelegen etages. Bij het toepassen van dergelijke oplossingen is het dus zeer belangrijk dat er bijvoorbeeld doelgericht injecties tegen stijgvocht worden uitgevoerd, om het vocht in het keldermetselwerk vast te houden, en het zeker niet te laten opstijgen.

Indien dergelijke preventieve injecties niet kunnen, dan is het eerder verstandig om af te zien van dergelijke dampdichte afwerkingen, en alternatieven te gebruiken.

Ook voor kelders geldt: indien men er een woon- of werkruimte wil installeren, dan zal in de praktijk toch de voorkeur gegeven moeten worden aan een oplossing met bepleistering op een membraan. Meestal zal men toch automatisch naar dergelijke oplossing gedreven worden. Het omvormen van een kelder tot woon- of werkruimte zal immers dikwijls ook aanleiding geven tot de installatie van thermische isolatie (anders betaalt men zich blauw aan verwarming in zo'n kelder, en bekomt men aanzienlijke risico's op condensatie in de zomerperiode).

6. Besluit

De mogelijkheden om problemen met hygroscopische zouten aan te pakken zijn veeleer symptoomgericht, dan dat ze werkelijk het probleem bij de wortel aanpakken. Ontzouting is vooralsnog geen courant toe te passen methode...

Het aanpakken van een vochtprobleem is een eerste, doch extreem belangrijke stap, om zoutproblematiek op te lossen. Vaak is dit een moeilijk operatie, die in bepaalde omstandigheden zelfs niet praktisch haalbaar is.

Maar gelukkig zijn er dan nog mogelijkheden. De hygroscopiciteit van de zouten kan zelfs op een handige manier worden toegepast om schade aan het metselwerk te voorkomen. Probleem daarbij is dat dikwijls het comfort van de gebruikers van de ruimte erbij inschiet. Het gaat daar om het maken van keuzes, en om er zich bij neer te kunnen leggen dat niet elke ruimte geschikt is voor eender welke activiteit.

Meer ingrijpende maatregelen staan ter beschikking om de strijd aan te gaan met zouten en vocht, als de monumentale waarde van het gebouw dat toestaat tenminste. Maar ook hier geldt weer: elke ingreep heeft gevolgen ergens anders. Elke ingreep dient weloverwogen te gebeuren, om te vermijden dat een vochtprobleem zich plots ergens anders zal manifesteren.

En ook geldt: hoe duurzamer een ingreep, hoe verder we afstaan van een ingreep die te verzoenen is met de monumentale waarde van een gebouw.

7. Referenties

- [1] Technische Voorlichting 210, Vocht in gebouwen, bijzonderheden van opstijgend grondvocht, WTCB, december 1998.
- [2] Technische Voorlichting 224, Waterwerende behandeling, WTCB, juni 2002.
- [3] Gids voor de restauratie van gebouwen, Deel 2: opstijgend grondvocht en zouten, WTCB, 2002.
- [4] André Pien, Laurent Thijs, Yves Vanhellemont, Kelderrenovatie, WTCB-contact (te verschijnen in de loop van 2008).
- [5] Yves Vanhellemont, Metselwerk(natuursteen en baksteen), pleisters en verf, aantasting door kristallisatie en hygroscopiciteit van zouten, Handboek Onderhoud Renovatie Restauratie, Kluwer, 2004.
- [6] Eddy De Witte, Yves Vanhellemont, Metsel- en pleisterwerk: maatregelen tegen hoge zoutconcentraties, Handboek Onderhoud Renovatie Restauratie, Kluwer, 2004.

ADRESSENLIJST SPREKERS

Rob P.J. van Hees
TNO-bouw en Ondergrond
TU Delft Faculteit Bouwkunde
Bezoekadres: Van Mourik Broekmanweg 6 - NL-2628 XE DELFT
Postadres: P.O. Box 49 - NL-2600 AA DELFT
T +31 (0)15 276 31 64
F +31 (0)15 276 30 17
E Rob.VanHees@tno.nl

Caspar J.W.P. Groot
TU Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Stevinweg 4
NL-2628 CN Delft
T +31(0) 15 278 4036
F +31(0) 15 278 3173
E c.groot@citg.tudelft.nl

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
E hilde.declercq@kikirpa.be

Jan Kamphuis
Rijks Gebouwen Dienst
Advies & Architecten
Postbus 20952
IPC 440
NL-2500 EZ Den Haag
T +31(0) 70 - 339 45 62
F +31(0) 70 - 339 18 72
E Jan.Kamphuis@minvrom.nl

Barbara Lubelli
TNO-bouw en Ondergrond
TU Delft Faculteit Bouwkunde
Postadres: P.O. Box 49
NL-2600 AA DELFT
E barbara.lubelli@tno.nl

Leo Pel
Groep Transport in Permeabele Media
Faculteit Technische Natuurkunde
Technische Universiteit Eindhoven
Postbus 513
NL-5600 MB EINDHOVEN
T +31 (0)40 247 3406
E l.pel@phys.tue.nl

Ir. Yves Vanhellemont
Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het bouwbedrijf
Avenue Pierre Holoffe 21
B - 1342 LIMETTE
T +32 (0)2 655 77 11
F +32 (0)2 653 07 29
E Yves.vanhellemont@bbri.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 Merkblätters, 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: - Rob van Hees, TNO Bouw en Ondergrond – TU Delft Faculteit Bouwkunde
- Hilde De Clercq, Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium
- Jan Kamphuis, Rijks Gebouwen Dienst

Uitgever

WTA NEDERLAND - VLAANDEREN

© 2008 ISBN/EAN: 978-90-79216-02-4

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
	CD/MDDS Schadeatlas: € 10,00		

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