



Delft University of Technology

Een plaag van alle tijden: zout

Over oude en toekomstige schade, oud en toekomstig onderzoek

Nijland, T.G.; Lubelli, Barbara; van Hees, Rob

Publication date

2018

Document Version

Final published version

Published in

Omgaan met Vocht en Zout

Citation (APA)

Nijland, T. G., Lubelli, B., & van Hees, R. (2018). Een plaag van alle tijden: zout: Over oude en toekomstige schade, oud en toekomstig onderzoek. In T. G. Nijland (Ed.), *Omgaan met Vocht en Zout: Syllabus symposium MonumentenKennis, Amersfoort, 28 november 2018* (pp. 12-35). MonumentenKennis.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Symposium MonumentenKennis

Omgaan met Vocht en Zout

Amersfoort, 28 november 2018



Colofon: Nijland, T.G., red., 2018. Omgaan met Vocht en Zout. Syllabus symposium MonumentenKennis, Amersfoort, 28 november 2018. ISBN 978-90-5986-494-8.

In deze pdf versie zijn enige errata uit de gedrukte versie gecorrigeerd.

MonumentenKennis is een programmatische samenwerking tussen TNO, de TU Delft en de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Voor info, zie www.monumentenkennis.nl

Coverfoto: Obernkirchener zandsteen met alveoli, een vorm van zoutschade.

© Artikelen en foto's: auteurs, tenzij anders vermeld.

Inhoud

Programma	2
Nijland, T.G. Voorwoord	3
Hof, J. van 't Van droom naar materiaal; erfgoedzorg tussen Ruskin en heden	4
Nijland, T.G. Lubelli, B. & Hees, R.P.J. van Een plaag van alle tijden: zout. Over oude en toekomstige schade, oud en toekomstig onderzoek	12
Granneman, S., Lubelli, B. & Hees, R.P.J. van Kalkmortel met een snufje chemie	36
Bouvier, E. des & Lubelli, B. In-situ onderzoek naar de zoutbestendigheid van (pleister)mortels met ingemengd kristallisatie-inhibitor	45
Quist, W., Dam, J. van & Hees, R. van Hydrofoberen: duurzaamheid in de praktijk	57
Hees, R.P.J. van, Lubelli, B. & Hacquebord, A. Injectie tegen optrekkend vocht...werkt het ?	60
Lubelli, B., Hees, R.P.J. van & Bolhuis, J. Optrekkend vocht: Hoe kiest u een geschikte interventie ?	74

Een plaag van alle tijden: zout

Over oude en toekomstige schade, oud en toekomstig onderzoek

Timo G. Nijland¹, Barbara Lubell² & Rob P.J. van Hees²

¹TNO, ²TU Delft

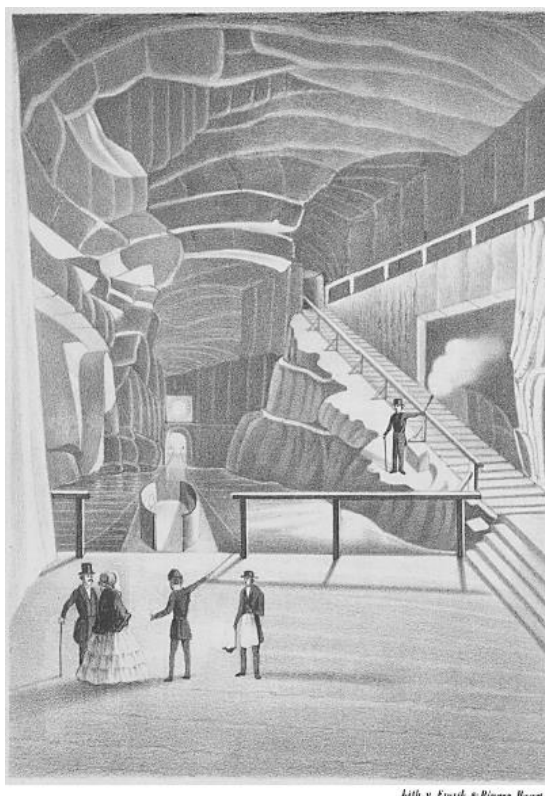
Inleiding

Met zout, waarvan Mark Kurlansky in zijn boek *Salt, a world history* (2002) de talrijke invloeden op de geschiedenis beschrijft, is het een beetje ongemakkelijk. De Middeleeuwse folklore wil weliswaar dat *'das wolthätige Salz abgesprochen und als Sicherungsmittel gegen alle zauberei angesehen werden konnte, denn der Hexenküche und den teuflischen Mahlzeiten fehlt gerade das Salz'* (Grimm 1844), toch wist men al lang dat zout niet alleen wit was, maar ook een donkere kant had die zeer destructief kon zijn. Dat geldt, -hoewel er zowel ondergronds (b.v. de in de zoutmijnen van W ... in Polen (Fig. 1) als bovengronds (b.v. Rovero et al. 2009) ook een architectuur in zout bestaat-, in het bijzonder voor de kwalijke rol van zouten bij de achteruitgang van poreuze bouwmaterialen als natuursteen. Deze was al bij de oude Grieken en Romeinen bekend. Wat dat betreft niets nieuws. Zo schreef Herodotos in de 5^e eeuw voor Christus in *Het verslag van mijn onderzoek*: *'... dat heb ik zelf gezien. Verder kun je op de heuvels zeeschelpen aantreffen; daar komen ook zoutkorsten voor waardoor zelfs de pyramiden zijn verweerd.'* (Herodos z.j. (1995)). In de 1^e eeuw voor Christus waarschuwde de Romeinse architect Vitruvius in zijn *Bouwkunst* voor het gebruik van zeezand voor metselwerk en pleisters vanwege hun zoutgehalte, -hier aangehaald in de mooie vertaling van Mialaret uit 1914: *'Wanneer echter geen zandgroeven aanwezig zijn ... of ook nog, het van den zeeoever betrekken. Maar in metselwerk toegepast heeft dit (laatste) de nadeelen dat het moeilijk droogt ... Zeezand heeft dit (nadeel) bovendien, dat de wanden, wanneer de bepleisteringen er op zijn aangebracht, door het afscheiden van ziltigen uitslag de pleisterhuid afstooten.'* (Vitruvius z.a. (1914)). Zijn landgenoot Plinius de Oudere stelt in de eerste eeuw na Christus: *'Van de vele stenen die nog resteren is de tufsteen¹ door zijn geringe duurzaamheid en zachte structuur onbruikbaar voor bouwwerken. Toch kennen sommige plaatsen, zoals Carthago in Afrika, geen andere steensoort. Het wordt door zeedampen aangevreten, door wind verbrokken en door regenbuien tot puin gegeseld. Maar de Carthagers beschermen hun muren zorgvuldig ...'* (Plinius Secundus 77 (2004)). Dat was twee millennia geleden, en we zitten er nog steeds mee.

Wanneer ze eenmaal aanwezig zijn, of hun aanvoer niet te verhinderen is, zijn er verschillende om daar mee om te gaan:

- Gebruik van intrinsiek minder of niet zoutgevoelige vervangende materialen.
- Accommoderen van het zout zoals mortels met ruimte om zouten op te vangen, materialen waarin het vochttransport is gewijzigd om de zout toevoer te remmen of kristallisatie-inhibitoren
- Ontzouten
- Beheersen van het vocht aanbod.

In deze bijdrage wordt nader ingegaan op de achtergronden van zoutschade, de vraag of we er in de toekomst meer last van zullen krijgen, en op oud, nieuw en gewenst onderzoek.



ZOUTHAIER ROSETTI TE WIELICZKA.

Fig. 1. Ondergrondse zoutarchitectuur in de zoutmijn van Wieliczka bij Krakow in Polen (Uit: Van Geuns 1858). De mijn is inmiddels UNESCO Werelderfgoed.

Zouten

Onder zouten in dit verband verstaan we niet alleen het wijdverbreide keukenzout, NaCl, door mineralogen halië genoemd, maar alle wateroplosbare zouten in chemische zin, dat wil zeggen chemische stoffen met een ionbinding, gevormd uit een positief ion (een metaal zoals Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc.) en een negatief ion (bijvoorbeeld Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^{2-} , CO_3^{2-}). Dat betekent dat ze bij oplossing in deze ionen uiteenvallen, getransporteerd kunnen worden, en dan weer kunnen combineren en vaste kristallen vormen. Sommige zouten bevatten kristalwater: naast het zout is er ook een relatief los gebonden hoeveelheid water, H_2O , aanwezig. Een voorbeeld is gips, $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ook natriumsulfaat, Na_2SO_4 , kent verschillende vormen met verschillende hoeveelheden kristalwater: thenardiet (watervrij), heptahydraat ($\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en mirabiliet ($\cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Daarnaast zijn zouten in meer of minder mate hygroscopisch, wat zo veel wil zeggen als dat ze water uit de lucht (RV, relatieve luchtvochtigheid) aantrekken en daardoor kunnen oplossen. Vloeibaar water (regen, optrekkend vocht, etc.) is dus niet altijd nodig.

Een overzicht van in Nederland op baksteen- en natuursteenmetselwerk met Röntgen diffractie-analyse (XRD) aangetroffen zouten wordt gegeven in tabel 1. Het valt op dat er een verschil is tussen zouten die in metselwerk tot schade leiden en witte uitslag op baksteenmetselwerk bij nieuwbouw (cf. Brocken & Nijland 2004). Van de eerste zijn halië, thenardiet en gips verreweg het meest gangbaar, terwijl in het tweede geval glaseriet, syngeniet en gips het meest voorkomen. Het valt tevens op dat Mg-zouten afwezig zijn.² Met rasterelectronenmicroscopie (SEM) zijn daarnaast nog enkele zouten aangetroffen waarvan de mineralogische samenstelling niet nader onderzocht is, waaronder kalium-,

magnesium-, lood- en zinksulfaten. SEM laat ook zien dat de kristalvorm van dezelfde zouten sterk kan variëren (Fig. 2, 3).

Tabel 1. Overzicht van in Röntgen diffractie-analyse (XRD) aangetroffen zouten op metselwerk in Nederland, op basis van niet gepubliceerde TNO rapporten door de jaren heen en Lubelli (2006). Polymorfen van CaCO_3 (calciet, vateriet, aragoniet) zijn in het overzicht niet opgenomen. Expositie: I – interieur, E – exterieur. Situatie: M – monument (schade), N – nieuwbouw (witte uitslag en vergipsing/Vergrauung).

Zout	Formule	Expositie	Situatie
Anhydriet	Ca_2SO_4	E	N
Darapskiet	$\text{Na}_3\text{NO}_3\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	I, E	M
Eugsteriet	$\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	I	M
Gaylussiet	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	I	M
Gips	$\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	I, E	M, N
Glaseriet	$\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$	E	N
Haliet	NaCl	I, E	M
Heptahydriet	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	I	M
Mirabiliet	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	I, E	M
Natron	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	I	M
Niter	KNO_3	I	M
Nitratine	NaNO_3	E	M
Syngeniet	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	E	M, N
Thenardiet	Na_2SO_4	I, E	M, N
Thermonatriet	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	I, E	M
Trona	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	I, E	M

Witte uitslag

Witte uitslag op metselwerk³, -dikwijls ten onrechte salpeter genoemd-, is een probleem waar de bouw als sinds jaar en dag mee worstelt. Zo laat de vereniging De Nederlandse Baksteenindustrie begin jaren '60 het rapport *Muuruitslag* verschijnen (Tucker z.j.). Naast uitspoeling van kalk kunnen drie types witte uitslag op nieuwbouwmetselwerk onderscheiden worden (Brocken & Nijland 2004ab): uitbloei van sulfaten (veelal glaseriet, syngeniet, thenardiet), uitbloei van gips op betonstenen, en de vorming, na enige tijd, van een eerst dunne waas, later dikkere korst van gips op baksteenmetselwerk, ook wel *Vergrauung* of *vergipsing* genoemd. De uitbloei van sulfaten in de vorm van witte, pluizige afzettingen op het oppervlak, gebeurt al in een vroeg stadium (Fig. 4), vaak nog voordat gevoegd is, en ook op stenen die zelf amper wateroplosbare zouten bevatten. Vergipsing treedt pas na enige tijd op, eerst als een dunne waas die later in intensiteit toeneemt en de vorm van een korst kan aannemen (Fig. 5). Naar analogie van de vorming van gipsuitbloei op betonstenen, wordt verondersteld dat sulfaat, vrijkomend door carbonatatie van ettringiet in de metselmortel, een rol speelt bij de vorming van dit type witte uitslag (Brocken & Nijland 2004ab).

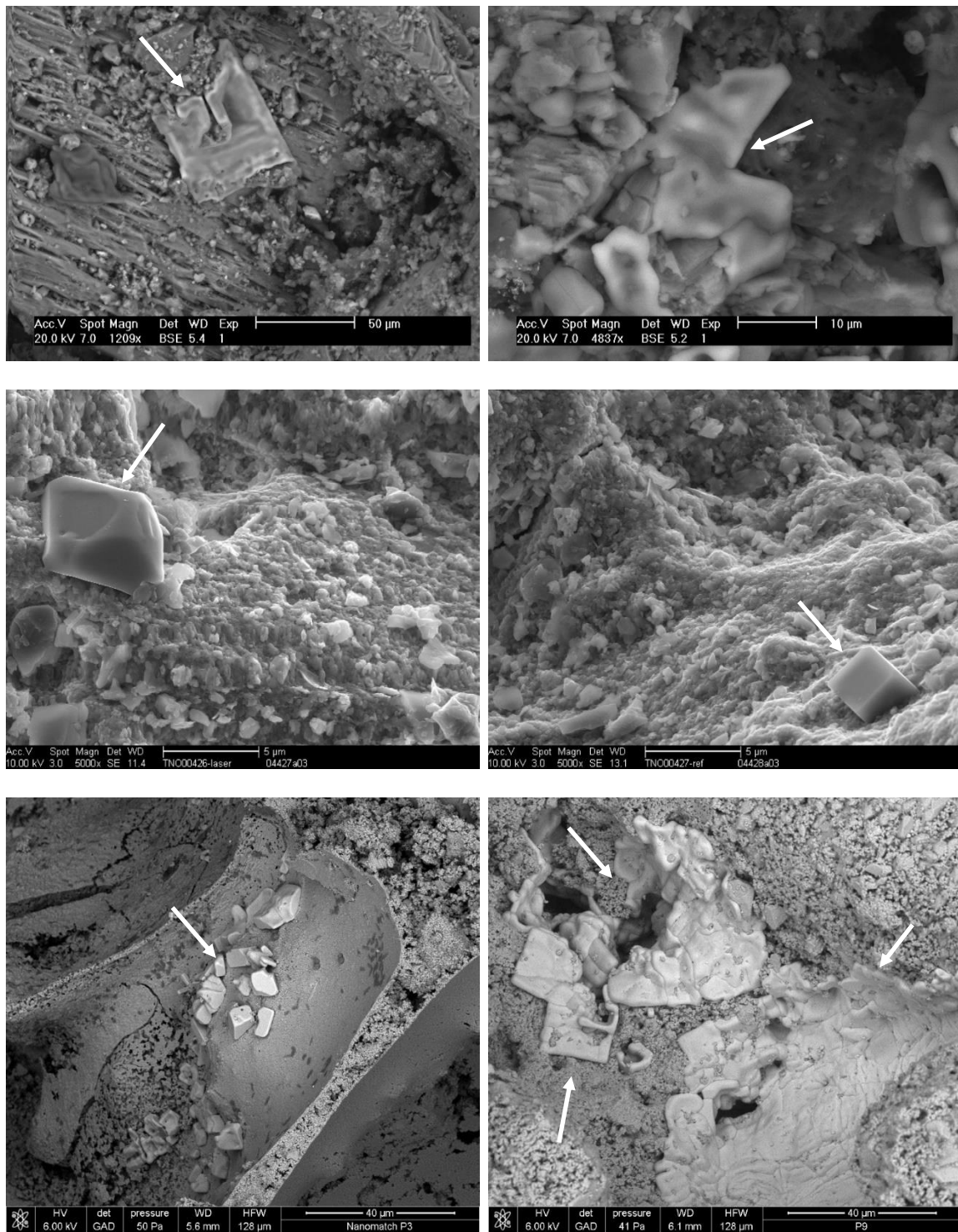


Fig. 2. SEM foto's van haliet, NaCl, met verschillende habitussen.

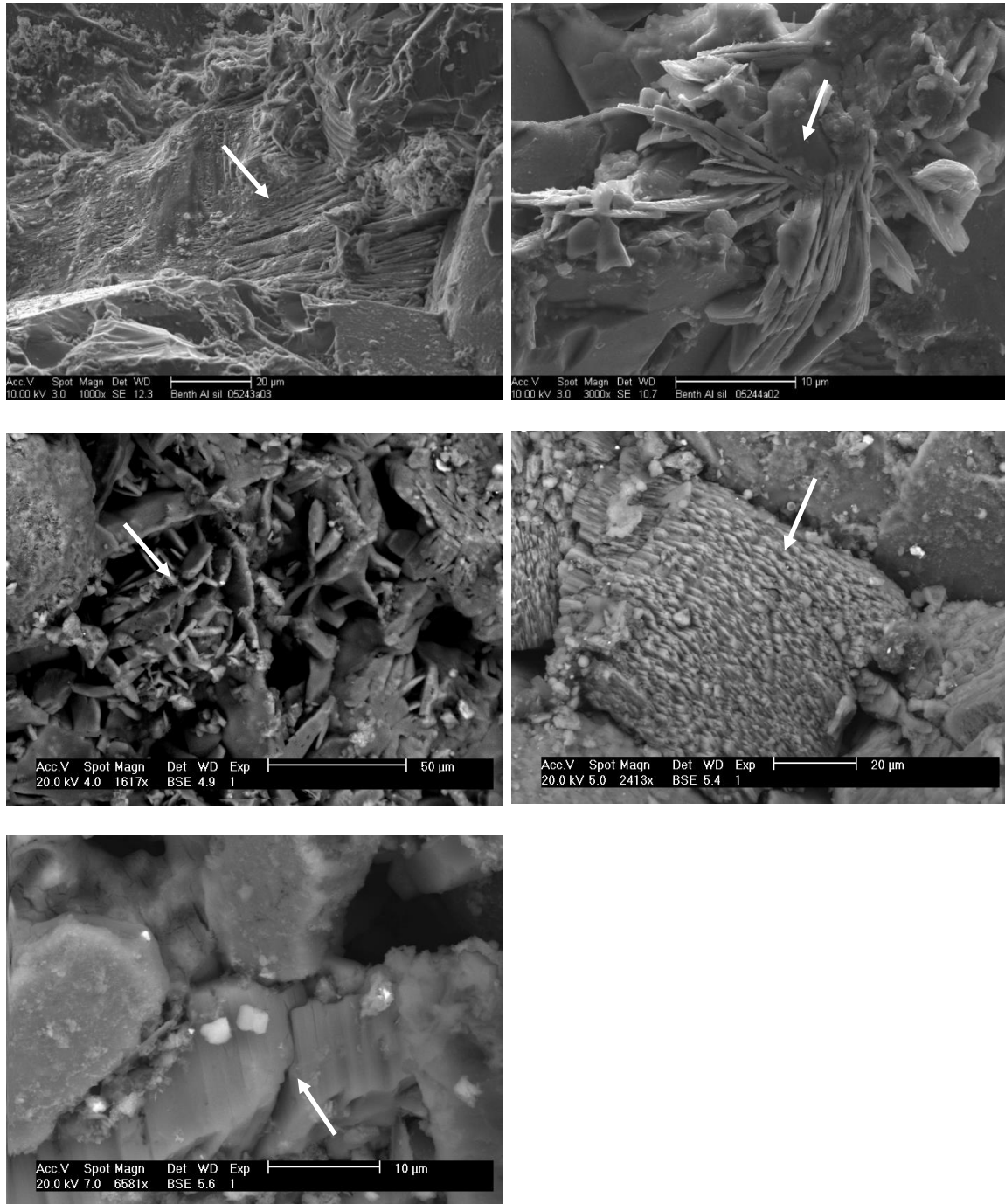


Fig. 3. SEM foto's van gips, $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, met verschillende habitussen.



Fig. 4. Vroege sulfaatuitbloei op metselwerk vlak na uitvoering.



Fig. 5. Vergipsing op metselwerk.

Zoutschade: kristallisatiedruk

Bij het verklaren van zoutschade speelt het concept van kristallisatiedruk een centrale rol. De hypothese is dat een kristal dat groeit druk uitoefent op de poriewand (al dan niet met nog een minuscuul laagje vloeistof daartussen) en daardoor, indien deze druk de treksterkte van een materiaal overstijgt, schade veroorzaakt. De grootte van deze druk is afhankelijk van de hoek tussen een kristal en de oververzadiging van een oplossing:

$$P_c = \frac{n R T}{V_c} \ln \frac{C}{C_0} \quad \text{en} \quad P_c = \frac{-2 \gamma \cos \theta}{r_p}$$

waarin P_c de kristallisatiedruk is, n het aantal ionen in het betreffende zout, R en T de gasconstante zijn, V_c het molair volume van het zout, c en c_0 respectievelijk de verzadigingsconcentratie van het zout in de porie en in de bulk oplossing, γ de oppervlaktespanning, θ de contacthoek tussen het zoutkristal en de poriewand en r_p de straal van de porie.

Dit concept is voor het eerst geïntroduceerd door de Jean Laval (1820-1880), een Franse arts, botanicus, geoloog, vinoloog, afgevaardigde en verdediger van de stad Dijon, kortom een man die van vele markten thuis was (Nijland & Touret 2014). De publicatie in de *Comptes Rendu de l'Académie des Sciences à Paris* (Laval 1853) heeft de vorm van claims, zoals toen niet ongebruikelijk, en omvat geen duidelijke beschrijving van de experimenten waarop hij zich baseerde. Duidelijk is dat hij meer dan twintig zouten gebruikte, waarvan het er maar twee bij naam noemt (aluin en loodnitraat). De relevante claims in dat artikel zijn de voor ons vandaag nogal cryptisch geformuleerd.

In de eerste helft van de 20^e eeuw doen onder ander George Becker (1849-1919) en Arthur Day (1869-1960) aan het Carnegie Institution of Washington (Becker & Day 1905, 1916), Stephen Taber (1882-1963) van de Universiteit van South Carolina (Taber 1916ab) en Carl W. Correns (1893-1880) aan de Universiteit van Rostock (Correns 1926, 1949, Correns & Steinborn 1939) vergelijkbare experimenten. Een uitgebreider historisch overzicht wordt gegeven in Nijland et al. (2010a) en Nijland & Touret (2014). Het huidige begrip gaat daar, en dan met name op Correns, terug⁴ en is recent uitgebreid beschouwd door Steiger (2015). Sinds Lavalle is het concept van kristallisatiedruk zowel terecht als ten onrechte ingeroepen in allerlei wetenschappelijke en technische disciplines.

De kristallisatiedruk wordt uitgeoefend op microschaal, treksterkte is een eigenschap van een materiaal op macroschaal; ze zijn dus niet direct te vergelijken. Het naast elkaar zetten van de waarden laat echter wel zien dat de kristallisatiedruk aanzienlijk kan zijn, een orde van grootte groter dan de treksterkte.⁵ Toch valt er wel wat af te dingen op de brede toepassing van het concept van kristallisatiedruk ter verklaring van de schade aan poreuze bouwmaterialen.

Uit de relatie voor de kristallisatiedruk volgt dat deze het grootst is bij de groei van kristallen in de kleinste poriën, omdat daar de oververzadiging het grootst is. Echter, bij elektronenmicroscopisch onderzoek blijkt telkens weer dat de zoutkristallen meestal juist niet in de kleinste poriën zitten. Dat is vaak weggewuifd met de opmerking dat ze te klein zouden zijn om te zien. Met de huidige generatie NanoSEM's, waarbij het ook bij steenachtige materialen niet meer nodig is een materiaal te coaten om oplading te voorkomen en een resolutie van de orde van grootte van 10 nm (10^{-9} m) prima gehaald kan worden, is dat argument moeilijk vol te houden. Tevens valt op dat de zouten lang niet altijd een goed gedefinieerd kristal vormen, maar vaak als een deken de poriewand bedekken (Fig. 6). In een dergelijk geval is dus geen sprake van een duidelijke contacthoek tussen zoutkristal en poriewand die deel uitmaakt van bovenstaande vergelijking. Nadeel van SEM is echter wel dat het slechts de eindsituatie laat zien in het (beschadigde) materiaal, niet de situatie tijdens de kristallisatie van de zouten en het ontstaan van de schade.

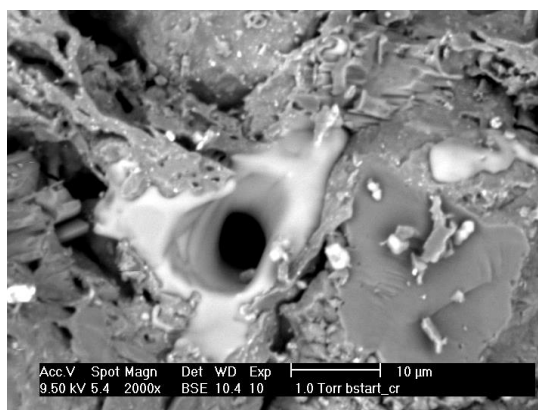


Fig. 6. SEM foto van NaCl dat de hele poriewand bedekt.

Dit is wel mogelijk met een andere techniek waarbij gebruik gemaakt wordt van magnetische kernspinresonantie, NMR⁶, zoals dat wordt uitgevoerd aan de TU Eindhoven. Dergelijk laat zien dat voor Na_2SO_4 de oververzadiging in de kleine poriën inderdaad het hoogst is (Rijniers 2004). Om ook het ontstaan van kristallisatiedruk in grotere poriën te verklaren, is aangevoerd dat grovere poriën vaak kleinere toegangen hebben, en dat er een tijdelijke porie ontstaat tussen het zoutkristal en de poriënwand tijdens kristallisatie (Scherer 1999, 2004). Ook hiervoor is onderbouwing uit NMR onderzoek. In een recent

artikel laten Saidov et al. (2017) dit zien: ze hebben de kristallisatiedruk indirect gemeten als uitzetting van het materiaal en tegelijkertijd de oververzadiging en kristallisatie gevolgd met NMR. Zo laten ze het ontstaan van de kristallisatiedruk en schade zien in relatie tot het kristalliseren van thenardiet en mirabiliet.

Voor NaCl is de situatie ingewikkelder. Zo laat NMR onderzoek zien dat alleen in heel kleine poriën (< 5 nm) de kristallisatiedruk hoog genoeg wordt om tot schade te leiden (Rijniers 2004) en is er controverse over de oververzadiging die nodig is. De volgens sommige experimenten nodige extreme mate van oververzadiging (Desarnaud et al. 2014), wordt volgens NMR metingen in de praktijk niet gehaald (Pel et al. 2002).

Schadevormen

Zoutschade aan poreuze bouwmaterialen (baksteen, natuursteen, mortel) kan vele vormen aannemen. Bij herkenning daarvan kan de schadeatlas in het Monument Diagnose en Conserverings Systeem (MDCS), vrij beschikbaar op mdcs.monumentenkenis.nl, behulpzaam zijn. Hier wordt volstaan met enkele voorbeelden, gegeven in figuur 7. Het zijn alleen materialen met een duidelijke porositeit. Dat wekt ten onrechte de illusie dat weinig poreuze steensoorten niet gevoelig zullen zijn voor aantasting door zouten. Dat is niet het geval, ook een kleine hoeveelheid fijne porositeit kan er al voor zorgen dat een dicht gesteente als graniet toch door zouten aangetast kan worden (Fig. 8).



Fig. 7. Voorbeelden van zoutschade. Bovenste rij: verpoederen en sterk terugverweren van Bontzandsteen, links aan de Römerbrücke in Trier (2012), rechts op de Schlossberg in Saarburg (2012). Middelste rij: links vergelijkbare schade aan baksteen van de Hooglandse kerk in Leiden (2005), rechts schade aan gehydrofobeerd baksteen metselwerk van pakhuis Zondag in Amsterdam (2008). Onderste rij: selectief verweren van Udelfanger zandsteen: de ene laag wel, de andere niet; links aan de pandhof van de Dom in Utrecht (2005), rechts aan de St. Jan in Gouda (2013).



Fig. 7 (vervolg). Voorbeelden van zoutschade. Bovenste rij: alveoli in links Savonnières kalksteen, Place St. Pierre 2, Bar le Duc (2010) en rechts Obernkirchener zandsteen, Nieuwe Badkapel, Scheveningen (2017). Middelste rij: alveoli in mortel, links aan de Laurentiuskerk in Baflo (2004), rechts aan de NH Kerk in Hoorn, Terschelling (2005). Onderste rij: zoutschade aan pleister, Frantiskanske namestie 4, Bratislava (2014).



Fig. 7 (vervolg). Voorbeelden van zoutschade. Bovenste rij: zoutschade aan pleister, Suur-Klooster, Tallinn (2005). Onderste rij: Afspringen van Weiberner tuf, St. Maria im Kapitol, Keulen (2009 & 2017).



Fig. 8. Zoutaantasting van graniet, Misericordia van Viana do Castelo (2004).

Rustig achteroverzitten ?

Is zoutschade een langzaam proces, dus kunnen we rustig achteroverzitten nadat we een beschadigd materiaal vervangen hebben ? Dat valt tegen. Bij een ongunstige combinatie van zouttype, zoutbelasting, ondergrond en expositie kan zoutschade al na een paar jaar optreden. De onderstaande figuren illustreren dat (Fig. 9, 10).



Fig. 9. Zoutschade aan een in 2003 geplaatste kalkstenen plaquette en gevelbekleding van een gebouwtje in de haven van het Portugese Lagos. De foto is slechts drie jaar later genomen.

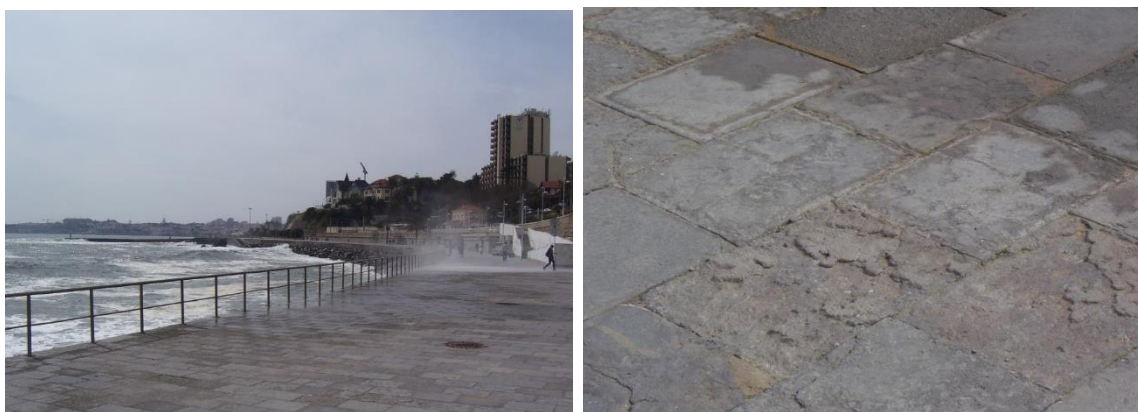


Fig. 10. Achteruitgang van een paar jaar oude kalksteentegels op de esplanade in Cascais waar regelmatig de golven over heen slaan (2010).

Voorkomen en beheersen

Willen wateroplosbare, hygroscopische zouten tot schade leiden, dan dient aan een aantal voorwaarden te worden voldaan:

- Er moet een zoutbron zijn (geweest). Deze kan velerlei zijn: eigen aan het materiaal, bijvoorbeeld door gebruik van zout zand uit mariene afzettingen als toeslag, of van buiten. In dat geval kan het zout uit talrijke bronnen afkomstig zijn: optrekkend vocht, zout of brak water, dooizouten, de zoutnevel van de zee, gebruik (zoutopslag, mestberging), eerdere interventies (zoals verwijderen van pleisters met zuur).
- Er moet een vochtbron zijn. Dat kan vloeibaar water zijn (regen, optrekkend vocht) maar ook afkomstig zijn uit de lucht wanneer de relatieve luchtvochtigheid (RV) daarvan boven de evenwichts-RV van een specifiek zout ligt.
- Het materiaal moet poreus zijn. De zouten moeten getransporteerd kunnen worden en zich ophopen.
- De vochttransporteigenschappen zoals poriegrootteverdeling en -structuur en balans tussen vocht aanbod en droging moet zodanig zijn dat de zouten zich ophopen achter het zichtvlak (cryptoflorescentie).
- Het materiaal moet gevoelig zijn voor zoutaantasting. In principe zijn alle poreuze materialen dat, maar het ene wel veel meer dan het andere. Dit overlapt deels met

bovenstaande: het moet voldoende poreus zijn, kleine poriën geven in de regel een groter risico dan grote, etc. De wijze waarop een materiaal (of combinatie daarvan) droogt, is ook van belang: als de zouten zich ergens kunnen verzamelen omdat het transport niet continue is, zal daar schade ontstaan. Ook de mechanische sterkte is van belang. Toch is het niet zo dat een zwakke steen per definitie zoutgevoelig is (lage sterkte maar grof poreus kan heel wel goed gaan in de praktijk). Zoutbestandheid is daarom lastig in (eenvoudig) meetbare getallen en duidelijke grenswaarden te vatten.

Op basis hiervan zijn verschillende maatregelen te bedenken om zoutschade te voorkomen. Het vermijden van het gebruik van materialen die zelf zout mee brengen, is evident. Simon Stevin realiseerde zich dat al in de 16^e eeuw: *'Maer Leydts calck, gemaect zynde van gebrande zeeschelpen, maeckt vochtige muyren om de souticheytswille'* (Van den Heuvel 2005). De keuze van een zoutbestande steen ligt eveneens voor de hand. Echter, het laatste punt betekent dat het verre van evident is om vooraf op basis van bijvoorbeeld treksterkte en porositeit een uitspraak te doen. Om dat probleem te omzeilen, is men overgegaan tot versnelde zoutkristallisatieproeven (Fig. 11). Die geven geen absolute waarde in termen van zoutbestandheid, maar maken wel onderscheid tussen verschillende materialen waaruit men overweegt te kiezen. Zoutkristallisatieproeven bestaan al sinds het begin van de 19^e eeuw. Ze dienden toen een ander doel: Men had nog geen vrieskasten, en wou toch een uitspraak doen over de vorstbestandheid van bouwmaterialen. De analogie tussen de kristallisatie van water en zouten was snel gemaakt. Zouten in plaats van vorst. Het eerste bekende voorschrift is opgesteld door Louis-Étienne Héricart de Thury (1776-1854), ingenieur van de fameuze Ecole des Mines (Héricart de Thury 1828). Zo beproefde Louis Vicat (1786-1861) voor de bouw van de brug van Souillac in 1819-1820 honderd mortels met een natriumsulfaatoplossing en realiseerde zich meteen dat een verzadigde oplossing van dit zout veel agressiever was dan de vorst (Vicat 1837). Later in de 19^e eeuw werd het idee van zoutkristallisatietesten toch weer opgepakt, maar niet meer om vorst te simuleren. Nu ging het om de zouten zelf, een ontwikkeling die zich tot nu toe voortgezet heeft (zie historisch overzicht in Nijland et al. 2010a).

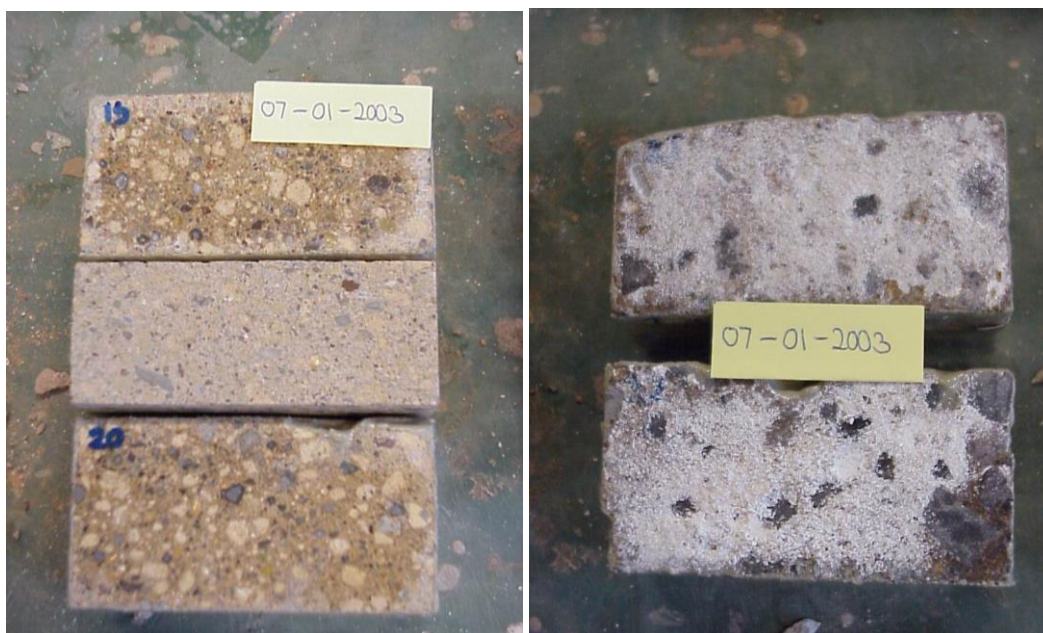


Fig. 11. Resultaten van een versnelde zoutkristallisatieproef met Na_2SO_4 op twee soorten tufsteen, Ettringer en Römer tuf, na vier weken (Brendle 2003).

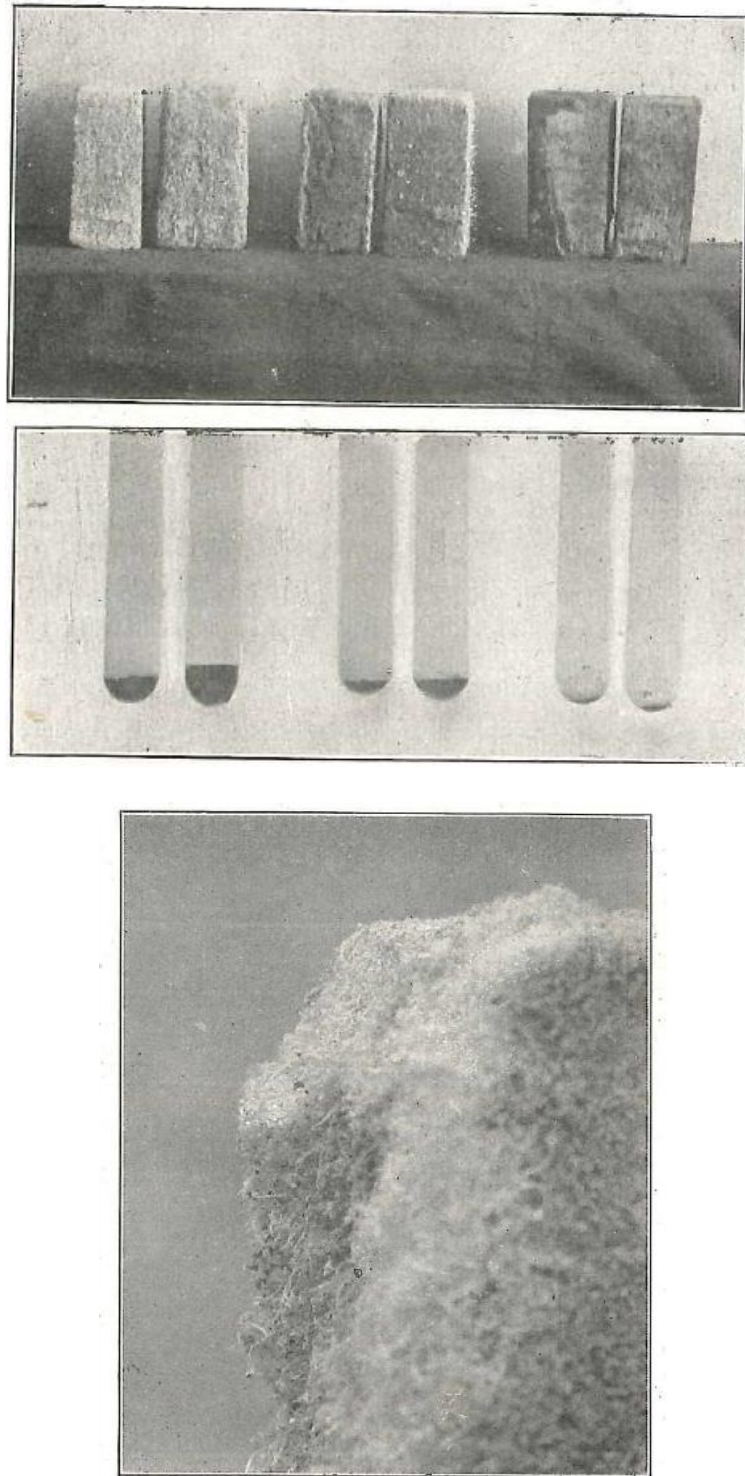


Fig. 12. Resultaten van de zoutkristallisatie experimenten van P.F. van der Wallen uit 1915. Boven (fig. 10 in het citaat): De proefstukken na beproeving; de stenen zijn telkens een handvormsteen (links) en een hardgrauwe steen (rechts), v.l.n.r. belast met respectievelijk Na_2SO_4 , Na_2CO_3 en NaCl . Midden (fig. 11 in het citaat): Het afgekomen materiaal. Onder: detail van de Na_2SO_4 met belaste handvormsteen.

Nederland heeft er een lange traditie in. Begin vorige eeuw deed P.F. van der Wallen al experimenten met baksteen om aan te tonen dat de kristallisatie van zouten en daarmee gepaard gaande volumevergroting tot schade aan metselwerk kon leiden (Van der Wallen 1915; fig. 12): 'Om nu aan te toonen dat inderdaad het natriumsulfaat en ook het

natriumcarbonaat ... een vernielende invloed op de steen kan uitoefenen, werden in de breedte in vieren gezaagde steenen gedrenkt met verzadigde oplossingen van natriumsulfaat, natriumcarbonaat en -ter vergelijking, chloornatrium ... Na gedurende een week in de verzadigde oplossingen te hebben doorgebracht en daarna gedurende drie dagen aan de lucht te hebben gestaan, werden de proefstukken gefotografeerd (fig. 10). Hetgeen bij het uitkristalliseeren was afgeschilderd, werd verzameld; deze hoeveelheden zijn in dezelfde volgorde van links naar rechts in fig. 11 afgebeeld ... Later zette Christian Visser, opvolger van Van der Kloes in Delft als hoogleraar Bouwstoffen, deze traditie voort en deed ook experimenten met natrium- en magnesiumsulfaat (Visser 1922). Er valt echter nog steeds wel wat af te dingen in hoeverre de bestaande testen de werkelijkheid goed simuleren (Lubelli et al. 2014, 2018). De ontwikkeling gaat dus door. Een andere optie om zoutschade te reduceren, is het aanpassen van het materiaal of materiaalcombinatie. In dat laatste geval probeert men om schade aan de oorspronkelijke historische materialen te beperken is door restauratiematerialen te gebruiken die de zoutbelasting op de historische materialen kunnen wegnemen in plaats van tegenhouden. Dit kan bijvoorbeeld een fijn poreuze mortel zijn op een grof poreuze steen.

Wat aanpassen van de materialen zelf betreft, is het evident dat dat niet gaat voor natuursteen. Voor mortels is dat een ander verhaal. Wellicht kan een mortel dusdanig aangepast worden, dat er geen of minder schade ontstaat? Dit kan door de structuur van de mortel aan te passen, een concept dat ten grondslag ligt aan zout accumulerende en -transporterende restauratiepleisters (Van Hees et al. 2010a). Hierbij wordt ruimte gecreëerd voor de zouten, dan wel geprobeerd ze sneller naar het oppervlak af te voeren. Een andere mogelijkheid is het direct beïnvloeden van de kristallisatie van zouten zelf. Daartoe wordt een kleine hoeveelheid van een hulpstof, een z.g. kristallisatie-inhibitor toegevoegd, die de vorm van de zoutkristallen verandert (en daarmee bijvoorbeeld de contacthoek tussen zoutkristal en poriewand) of de mate van verzadiging beïnvloedt. Deze gedachte is niet nieuw; ze is al onderwerp van het proefschrift van Van Damme-Van Weele uit 1965, die eerder voor haar promotie aan de TU Twente in het Centraal Laboratorium van TNO onderzoek deed aan de gevolgen van de Watersnoodramp van 1953 voor bouwmaterialen (Van Damme 1956) en later de eerste vrouwelijke hoogleraar aan de TU Twente werd. Het concept is begin deze eeuw opnieuw onderwerp van onderzoek geworden bij TNO en TU Delft. In ieder geval voor NaCl geldt dat de schade duidelijk vermindert door toevoeging van een kleine hoeveelheid inhibitor (Lubelli et al. 2010). Dit empirisch onderzoek verklaart nog niet volledig waarom, al is de invloed van de inhibitor op de kristalhabitus duidelijk (Fig. 13). Een deel van de verklaring is zonder inhibitoren grotere kristallen ontstaan die beter aan de poriewand hechten en zo transport naar het oppervlak verhinderen, terwijl met inhibitor de kristallen kleiner zijn, een andere morfologie hebben en minder slechter gehecht zijn aan de poriewand (Gupta et al. 2014, 2015). Hierdoor kristalliseren er meer zouten aan het oppervlak dan in een mortel zonder inhibitor en is er minder schade. Waarvoor nog geen verklaring is, is het feit dat er geen uitzetting wordt gemeten tijdens het kristalliseren van NaCl in de poriën van een mortel met daarin een inhibitor (Lubelli 2006), wat er op duidt dat er geen (meetbare) kristallisatiedruk is.

Vooralsnog is er alleen een inhibitor geïdentificeerd voor NaCl, niet voor het andere belangrijke en zo mogelijk nog schadelijker natriumsulfaat, noch voor zoutmengsels; dit is momenteel onderwerp van onderzoek aan de TU Delft (Grannemann et al. 2018); er lopen momenteel ook praktijkproeven (Des Bouvrie & Lubelli 2018). In het geval van pleisters is het ook nu al, zonder inhibitoren, mogelijk meer zoutbestendige pleisters te kiezen bij restauratie; de toepassing van dergelijke zout accumulerende en -transporterende pleisters wordt beschreven in Van Hees et al. (2010a).

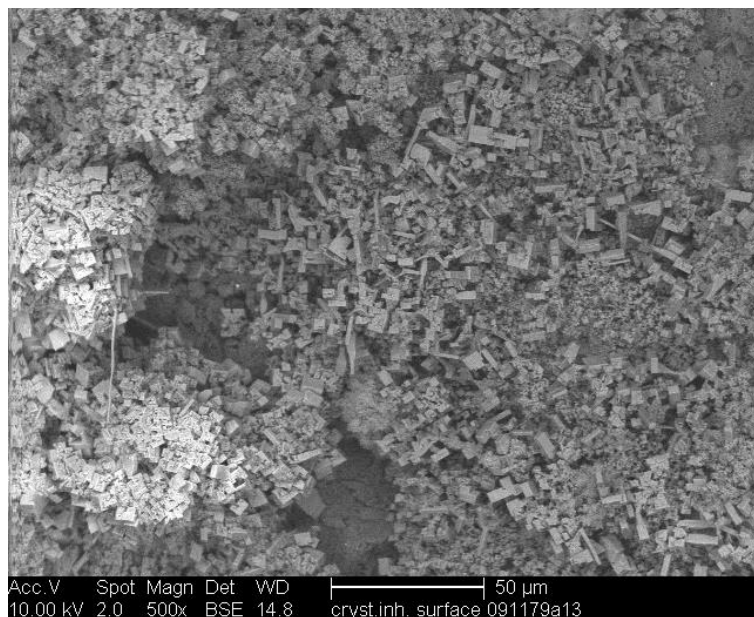


Fig. 13. SEM foto van NaCl in een kalk-cementmortel met kristallisatie-inhibitor. Let op de ongebruikelijk lange kristallen van NaCl, dat idealiter kubussen vormt.

In bestaande, te handhaven situaties is keuze van meer zoutbestendige materialen vanzelfsprekend geen optie. Er wordt immers niets vervangen. Toch is het lang niet in alle gevallen onmogelijk zoutschade te verminderen. Als er geen vocht beschikbaar en dus geen transport mogelijk is, dan wordt de actuele situatie stil gezet: er worden geen zouten opgelost en getransporteerd naar een plek waar ze zich ophopen en dus zal de door de zouten uitgeoefende druk niet toenemen. Er zit echter wel een addertje onder het gras: het stoppen van de toevoer van vloeibaar vocht is niet voldoende. De meeste zouten zijn hygroscopisch, wat betekent dat ze vocht onttrekken aan de lucht. Elk zout doet dat bij een verschillende relatieve luchtvochtigheid (RV); boven deze evenwichts-RV trekken ze voldoende vocht uit de lucht aan om in oplossing te gaan, daaronder blijven ze in vaste toestand, zich niet verplaatsen en ook ter plaatse niet onderhevig zijn aan oplossings- en kristallisatiecycli (Fig. 14). Om de actuele situatie stil te zetten, moet dus niet alleen de toevoer van vloeibaar water gestopt worden, maar ook de relatieve luchtvochtigheid van een ruimte permanent onder de evenwichts-RV van het aanwezige zout gehouden worden. Dat is soms een optie, maar vaak ook niet.

Een andere mogelijkheid om schade te beheersen, is niet de klok stil zetten, maar deze zelfs terugzetten. Immers, als het totale zoutgehalte verlaagd wordt, zijn er ook minder zouten die zich op één plaats kunnen ophopen en zo schade veroorzaken. Dit is ontzouten. Ook als ontzouten beperkt blijkt tot de buitenste 4-5 cm van een materiaal, zal dit al helpen de schade te verminderen. De invloed van RV-cycli en daarmee samenhangend oplossings- en kristallisatiecycli is op diepte veel minder. Ontzouten kan ook nuttig zijn om de levensduur van een renovatiemateriaal zoals een pleister of vertinlaag te verleggen. Inmiddels zijn er verschillende projecten in de praktijk uitgevoerd, zoals het ontzouten van de meesterstukken in De Waag in Amsterdam (Lubelli & Van Hees 2013) en het metselwerk van de Witte Kerk in Katwijk.

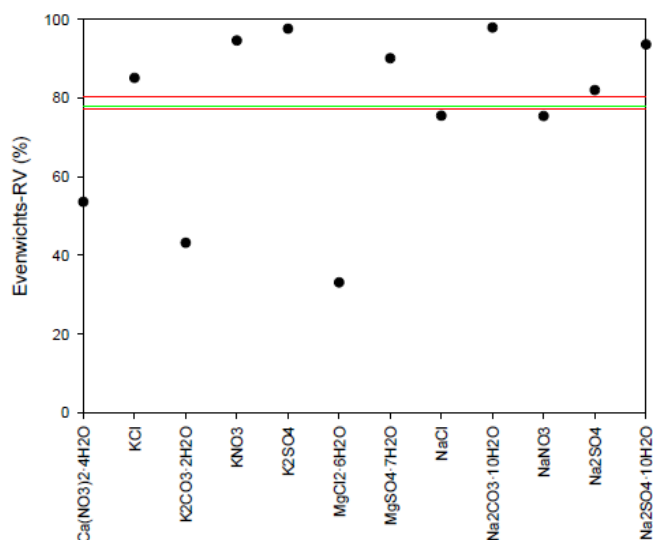


Fig. 14. Evenwichts-RV's van verschillende voor bouwmaterialen relevante zouten bij 20 °C (Data uit Arnold & Zehnder 1990) in relatie tot de gemiddelde RV in Nederland over de periode 1981-2010 (groene lijn) en verwachte af- c.q. toename van de gemiddelde RV gedurende de zomer in de KNMI'14 klimaatscenario's (KNMI 2014; rode lijnen).

Ontzouten kan in situ, met behulp van compressen (z.g. *poultices*), of door spoelen na het uitnemen van materiaal. De eerste methode is gebaseerd op advectie, de tweede methode op diffusie. Het zal evident zijn dat de tweede methode laatste vooral voor beelden en in museale situaties een optie is. In die context is het ook ontwikkeld (Fig. 15), zelfs voor grote objecten. Zo is de Ishtar poort in het Pergamon Museum in Berlijn na het overbrengen uit Irak indertijd steen voor steen ontzout (Marzhan 1995). In Nederland is er bij restauraties vanaf de jaren '70 mee geëxperimenteerd en de methode onder andere toegepast bij het grafmonument van Willem van Oranje in de Nieuwe Kerk in Delft (Ex & Scholten 2001).

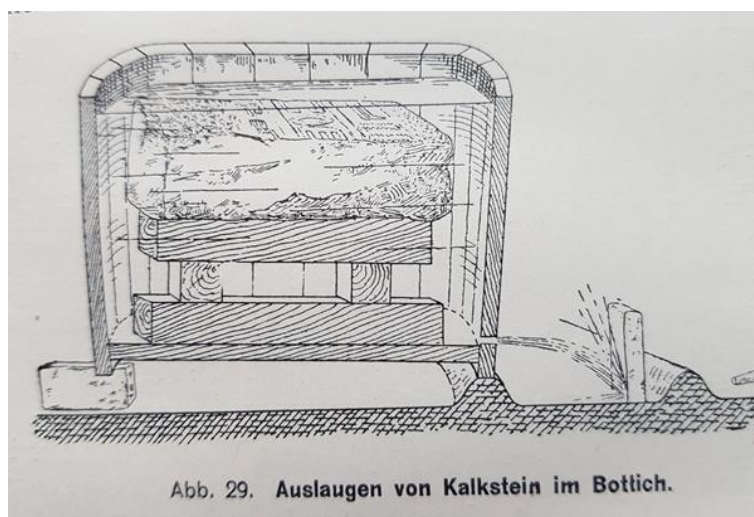


Fig. 15. Vroeg voorbeeld van ontzouten in het laboratorium, afkomstig uit Rathgen's *Die Konervierung von Altertumsfunden* uit 1915.

Hoe ontzouten met compressen in zijn werk gaat, is uitgebreid beschreven in Van Hees et al. (2010b); meer informatie over de achtergronden is te vinden in bijvoorbeeld Pel et al. (2008). De methode is primair gebaseerd op advectie: eerst wordt het materiaal vocht

gemaakt, daarna wordt dit vocht met daarin opgeloste zouten onttrokken. Essentieel daarbij is dat het compres in staat is vocht (met daarin opgeloste zouten) op te zuigen uit de ondergrond. De poriestructuur van het natte (!) compres dient dus zodanig te zijn, dat het opzuigen van vocht uit de ondergrond mogelijk is⁷; het dient dus in die toestand kleinere poriën te hebben dan de ondergrond. Een standaard, op elke ondergrond toepasbaar compres bestaat dus eigenlijk niet. Minstens zo belangrijk is het om daadwerkelijk te meten of het zoutgehalte met de diepte omlaag gebracht is; alleen het meten van zouten in het compres, b.v. door middel van elektrische geleidbaarheid, geeft daarover te weinig informatie.

Op weg naar meer schade ?

De verandering van het klimaat heeft ook implicaties voor de aantasting van bouwmaterialen door zouten (Nijland et al. 2009, 2010b, Grossi et al. 2011, Brimblecombe 2014). Het KNMI hanteert vier scenario's, gebaseerd op een combinatie van verwachte temperatuurstijging en verandering van luchtstromingspatronen (KNMI 2014): gematigde temperatuurstijging (G) en warm (W), in combinatie met lage (L) en hoge (H) waarden voor verandering in het luchtstromingspatroon. Dit leidt tot de scenario's G_L , G_H , W_L en W_H (Fig. 16). Wat dit betekent voor een aantal voor zoutkristallisatie relevante variabelen zoals temperatuur, neerslag, verdamping en RV wordt samengevat in tabel 2. De scenario's hebben het volgende gemeen:

- Stijging van de temperatuur
- Toename van de hoeveelheid neerslag (behoudens G_H in de zomer)
- Toename van de verdamping
- Beperkt effect op de RV in de zomer
- Geen zicht op verandering in het aantal RV cycli

Deze veranderingen hebben mogelijk een effect op de mate van zoutschade aan gebouwd erfgoed. Hogere neerslag die in de scenario's voorzien is, met name in de winter (en met uitzondering van in de zomer voor de H-scenario's), in combinatie met meer extreme neerslag en door de wind voortgestuwde regen, kan leiden tot dieper doordringen van vocht in de gevel, waardoor niet alleen hygrisch-thermische effecten kunnen optreden (Sabbioni et al. 2006), maar ook zouten dieper in het metselwerk, -bijvoorbeeld bij massief metselwerk met binnenin zachte, bij relatief lage temperatuur gebakken stenen-, opgelost kunnen worden en gaan deelnemen aan de cycli van oplossing en kristallisatie die aanleiding geven tot de schade. Hogere temperaturen en toename van de verdamping zullen hier eveneens aan bijdragen.

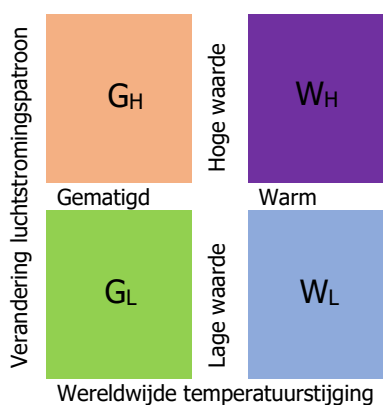


Fig. 16. Schematische weergave KNMI'14 scenario's.

Tabel 2. Selectie huidige en verwachte klimaatdata volgens de KNMI'14 scenario's voor 2050 (KNMI 2014).

Variabele			Huidig klimaat			Verandering per scenario			
			1951-1980	1981-2010		G _L	G _H	W _L	W _H
Gemiddelde temperatuur	°C	Jaar	9,2	10,1	°C	+1,0	+1,4	+2,0	+2,4
		Winter	2,4	3,4		+1,1	+1,6	+2,2	+2,7
		Lente	8,3	9,5		+0,9	+1,1	+1,8	+2,1
		Zomer	16,1	17,0		+1,0	+1,4	+1,7	+2,3
		Herfst	10,0	10,6		+1,1	+1,3	+2,2	+2,3
Neerslag	mm	Jaar	774	851	%	+4,0	+2,5	+5,5	+5,0
		Winter	188	211		+3,0	+8,0	+8,0	+17,0
		Lente	148	173		+4,5	+2,3	+11,0	+9,0
		Zomer	224	224		+1,2	-8,0	+1,4	-13,0
		Herfst	214	255		+7,0	+8,0	+3,0	+7,5
Verdamping	mm	Jaar	534	559	%	+3,0	+5,0	+4,0	+7,0
		Zomer	253	266		+5,0	+17,0	+4,5	+25,0
RV	%	Zomer	78	77	%	-0,6	-2,0	+0,1	-2,5
Vorst dagen		Winter	42	38	%	-30	-45	-50	-60
IJsdagen		Winter	11	7	%	-50	-70	-70	-90

De grote onzekerheid zit in de rol van de relatieve luchtvochtigheid (RV). De verandering van de landelijke gemiddelde RV in de zomer ten opzichte van het langjarig gemiddelde is beperkt (Tabel 3). De mate waarin dit van belang is, hangt sterk af van de evenwichts-RV van een zout (Fig. 14) en of de zouten individueel of als mengsel aanwezig zijn. We beperken ons hier tot de twee voor Nederland belangrijkste zouten, NaCl en Na₂SO₄. De gemiddelde dag-RV blijft volgens de verwachtingen net boven de evenwichts-RV van NaCl en net onder die van Na₂SO₄ (Fig. 14). Zoals blijkt uit figuur 17, zijn de verschillen in RV, tussen binnenland en de meer kustnabije zone, echter aanzienlijk. Dit zegt echter niets over het aantal RV-cycli. Juist deze cycli, het telkens passeren van de evenwichts-RV, geven aanleiding tot schade (Lubelli 2006). Het effect van slechts een geringe toename in het aantal cycli is evenwel groot (Koster et al. 2009). De vraag is wel hoe lang de RV onder c.q. boven de evenwichts-RV moet zijn. In veel gevallen is, ook op dagen waarop de gemiddelde dag-RV onder de evenwichts-RV van zowel NaCl als Na₂SO₄ ligt, de maximum-RV op een dag wel hoger dan deze evenwichts-RV. Het lijkt echter waarschijnlijk dat, als de gemiddelde RV omhoog gaat, het aantal RV-cycli waarbij de evenwichts-RV van NaCl en Na₂SO₄ wordt overschreden, toeneemt, ook bij gelijkblijvend totaal aantal RV-cycli. Als de vergelijking tussen 1950 en 2017 representatief is, lijkt zich voor Zuid-Limburg zo iets af te spelen (Fig. 17). De, -op wat oudere klimaatscenario's gebaseerde-, risicokaarten voor RV-cycli waarbij de evenwichts-RV van NaCl wordt overschreden laten voor de nabije toekomst (2010-2039) een duidelijke, voor de verre toekomst (2070-2099) een sterke toename van deze cycli zien voor Noordwest-Europa, waarbij voor Nederland het verschil tussen de kustprovincies en het binnenland eveneens blijkt, met daaraan gekoppeld een toename van de schade door zouten (Sabbioni et al. 2012).

Behalve verandering van het klimaat als zodanig, heeft een van de directe gevolgen daarvan, de zeespiegelstijging, afhankelijk van de locatie, invloed op zowel het aanbod van zouten als vocht door de volgende effecten (Deltacommissie 2008):

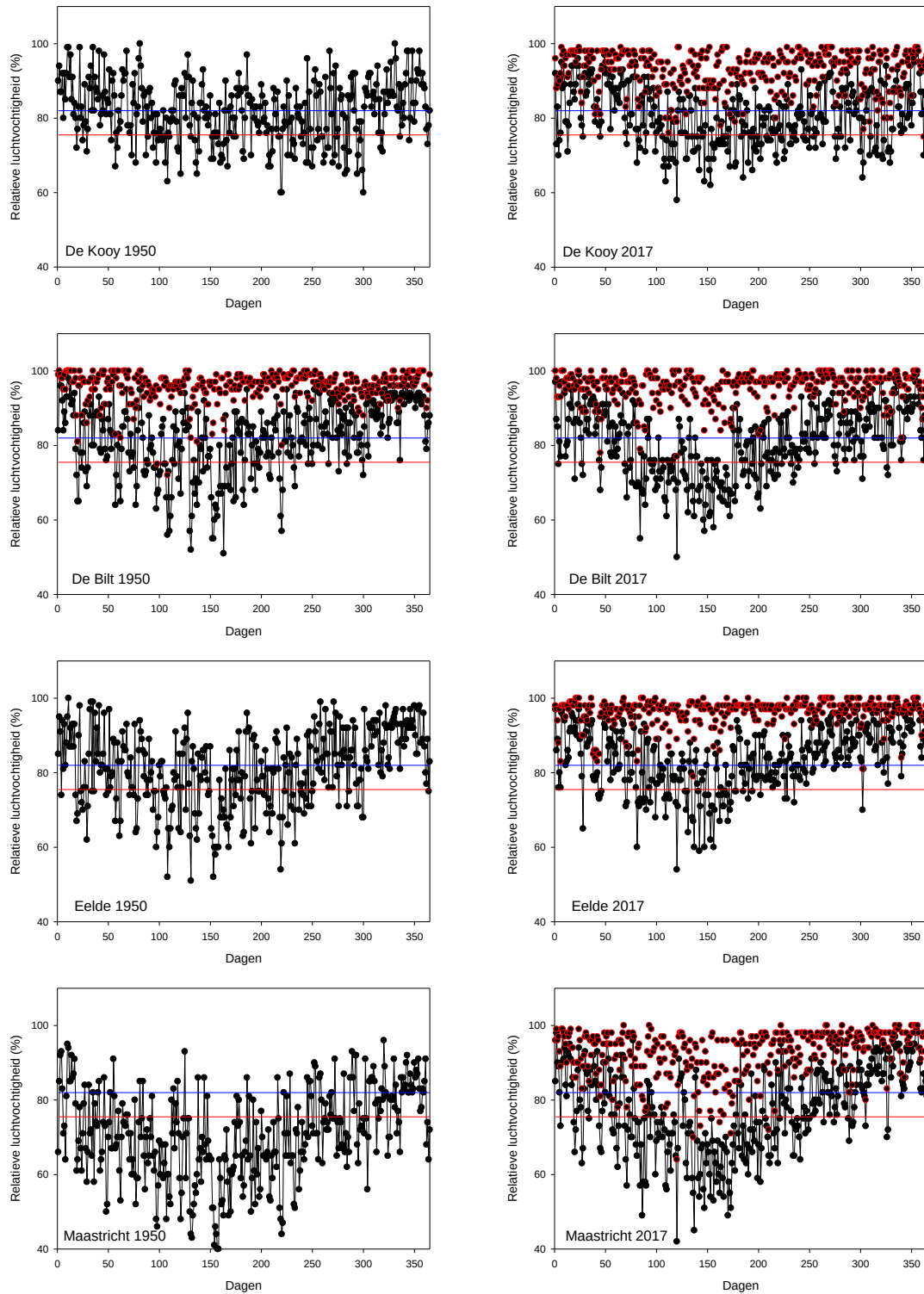


Fig. 17. Gemiddelde RV per dag (zwarte curve) en (voor zover beschikbaar) maximum RV per dag (rode data) voor de KNMI weerstations De Kooy, De Bilt, Eelde en Maastricht in 1950 en 2017 in relatie tot de evenwichts-RV bij 20 °C van NaCl (rode lijn) en Na₂SO₄ (blauwe lijn). Klimaatdata van <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/daggegevens>.

- Afname van de afvoer van water door de rivieren gedurende de zomer
- Binnendringen van zoutwater via rivieren en grondwater gedurende langere droge perioden.
- Variabel effect op grondwaterstanden (zowel verhoging als verlaging), afhankelijk van de locatie.
- Toename van het zoutgehalte van het grondwater.
- Verhoging van het waterniveau in het IJsselmeer, afhankelijk van te nemen maatregelen.

Hoewel bijvoorbeeld in de recente verkenning van Deltares met betrekking tot de gevolgen van een mogelijk versnelde zeespiegelstijging (Deltares 2018) geen aandacht besteed wordt aan de mogelijke gevolgen voor gebouwd erfgoed, moge duidelijk zijn dat deze effecten waarschijnlijk tot een toename van zoutschade zullen leiden.

Besluit

Het zal duidelijk zijn dat zoutschade aan poreuze bouwmaterialen een plaag van alle tijden is, die ook na millennia ervaring en meer dan een eeuw onderzoek nog onvoldoende onder controle is, terwijl in de Nederlandse situatie de intensiteit waarschijnlijk zal toenemen. Dit maakt de noodzaak tot goed fundamenteel begrip als basis voor praktische, hanteerbare oplossingen alleen maar groter.

Noten

¹ Plinius doelt hier duidelijk op kalktuf ('tufa') en niet op vulkanische tufsteen.

² Hetgeen waarschijnlijk in belangrijke mate verklaard wordt doordat dolomitische kalkmortels in Nederland niet gebruikt zijn.

³ Naast de witte uitslag zijn er overigens ook kleurige uitbloeiingen (Van der Klugt 1994).

⁴ Het is overigens opmerkelijk dat Correns' bijdrage op dit gebied in levensbeschrijvingen van hem geheel genegeerd wordt (b.v. Hoefs 1982).

⁵ Bijvoorbeeld 39 N mm^{-2} voor de kristallisatie van NaCO_3 in een porie kleiner dan $5 \mu\text{m}$ (Rijniers et al. 2003) of 11 N mm^{-2} voor de hydratatie van anhydriet tot gips (Keulen et al. 2001).

⁶ NMR (Nuclear Magnetic Resonance) gebaseerd op het feit dat sommige atoomkernen, als zij zich in een magnetisch veld bevinden dat verstoord wordt door een oscillerend magnetisch veld, een electromagnetisch signaal afgeven dat karakteristiek is voor het atoom. Dit effect kan gebruikt worden om de concentratie op een plaats in een materiaal met de tijd (en dus transport en kristallisatie) van deze atomen (zoals waterstof, natrium, chloor, sulfaat) te volgen.

⁷ Ander zal alleen diffusie optreden; dit proces is langzaam en vindt slechts plaats zolang het compres zelf nog niet verzadigd is.

Referenties

- Arnold, A. & Zehnder, K., 1990. Salt weathering on monuments. In: Advanced Workshop Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones, Pavia, 31-58.
- Becker, G.F. & Day, A.L., 1905. The linear force of growing crystals. Proceedings of the Washington Academy of Sciences 7:283-288.
- Becker, G.F. & Day, A.L., 1916. Note on the linear force of growing crystals. Journal of Geology 24:313-335.
- Bouvier, E. des & Lubelli, B., 2018. In-situ onderzoek naar de zoutbestendigheid van (pleister)mortels met ingemengd kristallisatie-inhibitor. Deze syllabus.
- Brimblecombe, P., 2014. Damage to materials and buildings in a changing urban climate. In: Freedman, B. red., Global environmental change. Springer, Dordrecht, 455-460.

- Brocken, H. & Nijland, T.G., 2004a. White efflorescence on brick masonry and concrete masonry blocks, with special emphasis on sulfate efflorescence on concrete blocks. *Construction and Building Materials* 18:315-323.
- Brocken, H. & Nijland, T., 2004b. Witte uitslag op baksteen- en betonsteenmetselwerk. *Cement* 56:80-85.
- Correns, C.W., 1926. Über die Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. *Sitzungs-Berichte der Preußische Akademie der Wissenschaften* 11:81-88.
- Correns, C.W., 1949. Growth and dissolution of crystals under linear pressure. *Discussions of the Faraday Society* 5:267-271.
- Correns, C.W. & Steinborn, W., 1939. Experimente zur Messung und Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. *Zeitschrift für Kristallographie etc.* 101:117-133.
- Damme, M.A. van, 1956. Destructie van bakstenen door zeewater. Centraal Laboratorium TNO, Delft, rapport CL/56/49.
- Damme-Van Weele, M.A. van, 1965. Influence of additives on the growth and dissolution of sodium chloride crystals. Proefschrift, TH Twente, Enschede.
- Deltacommissie, 2008. Samen werken met water: Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst. Bevindingen van de Deltacommissie. Deltacommissie, Den Haag.
- Deltares, 2018. Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning. Deltares, Delft.
- Desarnaud, J., Derluyn, H., Carmeliet, J., Bonn, D. & Shahidzadeh, N., 2014. Metastability limit for the nucleation of NaCl crystals in confinement. *Journal of Physical Chemistry Letters* 5:890-895.
- Ex, N. & Scholten, F., 2001. De Prins en de Keyser. Restauratie en geschiedenis van het grafmonument voor Willem van Oranje. Thoth, Bussum.
- Geuns, W.A.J. van, 1858. Het steenzout en zijne begeleiders. *Album der Natuur* 4:1-18.
- Grannemann, S.A. Lubelli, B. & Hees, R.P.J. van, 2018. Kalkmortel met een snufje chemie. Deze syllabus.
- Grimm, J., 1844. *Deutsche Mythologie*. 2. Band. 2^e druk, Dieterische Buchhandlung, Göttingen.
- Grossi, C.M., Brimblecombe, P., Menéndez, B., Benavente, D., Harris, I. & Déqué, M., 2011. Climatology of salt transitions and implications for stone weathering. *Science of the Total Environment* 409:2577-2585.
- Gupta, S., Huinink, H.P., Pel, L. & Kopinga, K., 2014. How ferrocyanide influences NaCl crystallization under different humidity conditions. *Journal of Crystal Growth & Design* 14:1591-1599.
- Gupta, S., Pel, L., Steiger, M. & Kopinga, K., 2015. The effect of ferrocyanide ions on sodium chloride crystallization in salt mixtures. *Journal of Crystal Growth* 410:7-13.
- Hees, R.P.J. van, Lubelli, B. & Naldini, S., 2010a. Verantwoord kiezen van een restauratiepleister. Onderzoeken en afwegen van risico's bij vocht- en zoutbelasting. In: Koldeweij, E., Hunen, M. van & Hermans, T., red., *Stuc, kunst en techniek*. Waanders, Zwolle / RCE, Amersfoort, 142-157.
- Hees, R.P.J. van, Lubelli, B. & Naldini, S., 2010b. Richtlijn voor het ontzouten van poreuze ondergronden. *Praktijkreeks Cultureel Erfgoed* 12(32).
- Héricart de Thury, L., 1828. Sur le procédé proposé par M. Brard pour reconnaître immédiatement les pierres qui ne peuvent pas résister à la gelée, et que l'on désigne ordinairement par les noms de pierres gelives ou pierres gelisses. *Annales de Chimie et de Physique* 38:160-192.
- Herodotos, z.j. Het verslag van mijn onderzoek. Nederlandse vertaling: H.L. van Doolen (1995), Sun, Nijmegen, boek 2:12.
- Heuvel, C. van den, 2005. 'De Huysbou', a reconstruction of an unfinished treatise on architecture, town planning and civil engineering by Simon Stevin. Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Amsterdam.
- Hoefs, J., 1982. Memorial of Carl Wilhelm Correns May 19, 1893-August 29, 1980. *American Mineralogist* 67:399-400.
- Keulen, N.T., Brok, S.W.J. den & Spiers, C.J., 2001. Force of crystallisation of gypsum during hydration of synthetic anhydrite rock. In: 13th DRT conference Deformation Mechanisms, Rheology, and Tectonics, Noordwijkerhout.
- Klugt, L.J.A.R. van der, 1994. Farbige Ausblühungen an Ziegelmauerwerk. *ZI-Jahrbuch* 1994, 33-44.

- KNMI, 2014. KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st century - A Netherlands perspective. KNMI, De Bilt, rapport WR2014—01. Zie ook: www.climatescenarios.nl.
- Koster, T., Nijland, T.G. & Hees, R.P.J. van, 2009. Faalkansen van zoutbelast natuursteen: een probabilistische benadering. *Praktijkreeks Cultureel Erfgoed* 8(21).
- Kurlansky, M., 2002. *Salt, a world history*. Jonathan Cape, Londen.
- Lavalle, J., 1853. Recherches sur la formation lente des cristaux à la température ordinaire. *Comptes Rendu de l'Académie des Sciences à Paris* 36:493-495.
- Lubelli, B.A., 2006. Sodium chloride damage to porous building materials. Proefschrift, TU Delft, Delft.
- Lubelli, B., Cnudde, V., Diaz-Goncalves, T., Franzoni, E., Hees, R.P.J. van, Ioannou, I., Menendez, B., Nunes, C., Siedel, H., Stefanidou, M., Verges-Belmin, V. & Viles, H., 2018. Towards a more effective and reliable salt crystallization test for porous building materials: state of the art. *Materials & Structures* 51:55.
- Lubelli, B. & Hees, R.P.J. van, 2013. Desalination of historical brick masonry-The case of the Waag building in Amsterdam. In: Heritage, A., Heritage, A. & Zezza, F., red., *Desalination of historic buildings, stone and wall paintings*. Archetype Publications, Londen, 122-129.
- Lubelli, B., Hees, R.P.J. van & Nijland, T.G., 2014. Salt crystallization damage: how realistic are existing ageing tests ? In: *Proceedings of SWBSS 2014, 3rd International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures*, Brussels, 259-273.
- Lubelli, B.A., Nijland, T.G., Hees, R.P.J. van & Hacquebord, A., 2010. Effect of mixed-in crystallization inhibitor on resistance of lime-cement mortar against NaCl crystallization. *Construction & Building Materials* 24:2466-2472.
- Marzahn, J., 1995. *The Ishtar gate*. Philipp von Zabern, Mainz.
- Nijland, T.G., Adan, O.C.G, Hees, R.P.J. van & Etten, B.D., 2009. Evaluation of the effects of climate change expected for the Netherlands on durability of building materials, with suggestions for adaptation. *Heron* 54:37-48.
- Nijland, T.G., Hees, R.P.J. van, Adan, O.C.G. & Etten, B.D. van, 2010b. Evaluation of the effects of expected climate change scenarios for the Netherlands on the durability of building materials. In: Bunnik, T., Clercq, H. de, Hees, R. van, Schellen, H. & Schueremans, L., red., *Effect of climate change on cultural heritage*. WTA Schriftenreihe 34:33-44.
- Nijland, T.G., Hees, R.P.J. van, Lubelli, B.A. & Touret, J.L.R., 2010a. Zoutschade aan natuursteen en metselwerk: De ontwikkeling van ideeën en concepten ter verklaring van de verpoedering van gebouwd erfgoed. *Praktijkreeks Cultureel Erfgoed* 10(27).
- Nijland, T.G. & Touret, J., 2014. Un naturaliste aux multiples facettes: Jean Lavalle (1820-1880) et la notion de pression de cristallisation. *Travaux du Comité Français d'Histoire de la Géologie*, 3^e série, 28:55-72.
- Pel, L., Gils, van, N., & Voronina, V., 2008. De fysische principes achter en de effectiviteit van ontzoutingsmethoden. In: Gemert, D. van & Hees, R. van, red., *Syllabus WTA studiedag Zout en behoud*, Bergen op Zoom, 6 pp.
- Pel, L., Huinink, H.P. & Koppinga, K., 2002. Ion transport and crystallization in inorganic building materials as studied by nuclear magnetic resonance. *Applied Physics Letters* 81:2893-2895.
- Plinius Secundus, G., 77. *De Wereld*. Nederlandse vertaling: J. van Gelder, M. Nieuwenhuis & T. Peters (2004), Athenaeum-Polak & Van Gennip, Amsterdam, boek 36:166-167.
- Rathgen, F., 1915. *Die Konervierung von Altertumsfunden*. 1. Teil. Stein und steinartige Stoffe. 2^e druk, Gerog Reimer, Berlijn.
- Rijniers, L.A., 2004. Salt crystallization in porous materials: An NMR study. Proefschrift, TU Eindhoven, Eindhoven.
- Rijniers, L.A., Huinink, H.P., Pel, L. & Koppinga, K., 2003. Salt crystallization in porous materials and its implications for stone decay. In: *EUROMAT 2003*, Lausanne.
- Rovero, L., Tonietti, U., Fratini, F. & Rescic, S., 2009. The salt architecture in Siwa oasis - Egypt (XII-XX centuries). *Construction & Building Materials* 23:2492-2503.
- Sabbioni, C., Brimblecombe, P. & Cassar, M., 2012. *The atlas of climate change impact on European cultural heritage*. Anthem Press, London & New York.
- Sabbioni, C., Cassar, M., Brimblecombe, P., Tidblad, J., Kozłowski, R., Drdácý, Saiz-Jimenez, C., Grøntoft, T., Wainwright, I. & Ariño, X., 2006. Global climate change impact on bluit heritage and cultural landscapes. In: Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Gomez-Heras, M. &

- Vazquez-Calvo, C., red., Heritage, weathering and conservation I. Taylor & Francis, London, 395-401.
- Saidov, T.A., Pel, L. & Kopinga, K., 2017. Sodium sulfate salt weathering of porous building materials studied by NMR. *Materials & Structures* 50:145.
- Scherer, G.W., 1999. Crystallization in pores. *Cement & Concrete Research* 29:1347-1358.
- Scherer, G.W., 2004. Stress form crystallization of salt. *Cement & Concrete Research* 34:1613-1624.
- Steiger, M., 2005. Crystal growth in porous materials I: The crystallization pressure of large crystals. *Journal of Crystal Growth* 282:455-469.
- Taber, S., 1916a. The growth of crystals under external pressure. *American Journal of Science* 41:532-556.
- Taber, S., 1916b. The origin of veins of the asbestiform minerals. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2:659-664.
- Tucker, J.F.E., z.j. Muuruitslag. De Nederlandse Baksteenindustrie, Arnhem.
- Vicat, J.L., 1837. A practical and scientific treatise on calcareous mortars and cements, artificial and natural, containing directions for ascertaining the qualities of the different ingredients, for preparing them for use, and for combining them together in the most advantageous matter; with a theoretical investigation of their properties and modes of action. Engelse vertaling J.T. Smith. John Weale, Londen.
- Vitruvius, M., z.j. Bouwkunst. Nederlandse vertaling J.H.A. Mialaret (1914). L.J. Veen, Amsterdam, boek 2:4.