

Waarom gaat tufsteen kapot ?

Barbara Lubell^{1,2}, Timo G. Nijland¹ & Hendrik Jan Tolboom³
¹TNO, ²Faculteit Bouwkunde, TU Delft, ³RCE

Inleiding

In de restauratiepraktijk in Nederland wordt men vaak geconfronteerd met schade aan tufsteenonderdelen met relatief grote lengte/breedteverhoudingen zoals montants en afzaten (Nijland & Van Hees 2014). Schade vindt vaak plaats in de vorm van scheuren, die vaak parallel aan de grootste lengte van de tufsteen onderdelen lopen (Fig. 1). De oorzaak van deze schade is nog onduidelijk. Een mogelijk reden is te vinden in de hygrische eigenschappen van de tufsteen. Tufsteen neemt snel water op, droogt langzaam, en heeft te gelijker tijd een bijzonder grote hygrische uitzetting. Wanneer tufsteen montants en afzaten aan regenwater blootgesteld worden en daarna weer gaan drogen, zal het buitenste deel sneller drogen dan het binnenste deel dat ingekapseld is in het metselwerk. Het daardoor optredende verschil in de hygrische uitzetting tussen het buiten- en binnendeel van de montants zou aanleiding kunnen geven tot het ontstaan van een schuifspanning tussen de beide delen, die uiteindelijk in scheurvorming kan resulteren (Nijland & Van Hees 2014). Hetzelfde geldt voor de afzaten.

Deze hypothese is uitgebreid onderzocht in het laboratorium van TNO in Delft door een combinatie van verouderingstesten en karakterisering van twee soorten tufsteen uit de Eifel: Ettringer en Weiberner tufsteen.

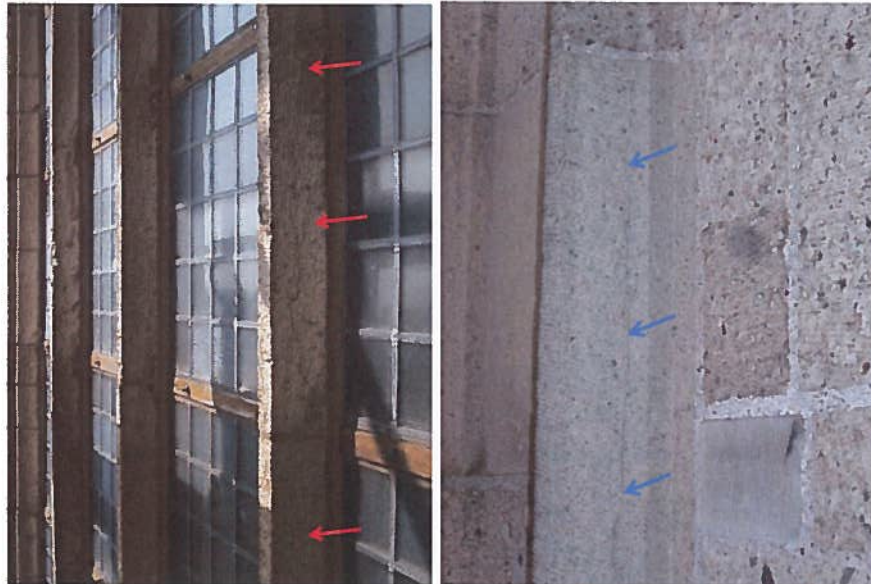


Fig. 1. Voorbeelden van scheurvorming in montants van de Pieterskerk (Leiden) en de Eusebiustoren (Arnhem).

Opzet van het onderzoek

Als basis voor het onderzoek zijn de Ettringer en Weiberner tufsteen op verschillende manieren gekarakteriseerd:

- Petrografische eigenschappen (samenstelling, microstructuur, aanwezigheid van scheurtjes, meer).
- Hygrisch gedrag (waterabsorptie en droging), open porositeit en poriegrootteverdeling.
- Hygrische en thermische uitzetting.
- Mechanische sterkte.
- Eventueel kristallografische veranderingen in de mineralogie van de steen onder invloed van RV wisselingen.

De testmethoden en de gerelateerde vastgestelde eigenschappen worden in tabel 1 samengevat.

Tabel 1. Gebruikte karakteriseringsmethoden en bepaalde eigenschappen.

Methode	Eigenschap
Fluorescentie-macroscopische analyse (FMA)	Aanwezigheid van scheurtjes en/of andere veranderingen veroorzaakt door behakken van het oppervlak of door de omgevingscondities.
Polarisatie-en-fluorescentie-microscopie (PFM) op slijplaatjes	Petrografische eigenschappen, mineralogische samenstelling, microstructuur en aanwezigheid van scheurtjes en/of andere veranderingen veroorzaakt door behakken van het oppervlak of door de omgevingscondities.
Röntgen diffractie analyse (XRD) onder een gecontroleerde omgeving, bij stabiele en bij wisselende RVs	Effect van RV op mineralogische samenstelling / kristallografie
Waterabsorptie bij atmosferische druk	Waterabsorptiecoëfficiënt Waterindringingsfront Open porositeit bij atmosferische druk
Droging bij 20 °C 50 % V	Droogsnelheid
Waterabsorptie onder vacuüm	Open porositeit onder vacuüm
Kwikporosimetrie (MIP)	Open porositeit en poriegrootteverdeling in het bereik tussen 0.007 en 366 µm
Stikstofadsorptie	Open porositeit en poriegrootteverdeling in het bereik tussen 0.001 en 0.01 µm
Mechanische testen	Buig- en druksterkte

Daarnaast is het proces van veroudering door beregening en bezonning in het laboratorium gesimuleerd om te zien of dit aanleiding geeft tot scheurvorming. Hierbij zijn montants, afzaten en, als referentie, kubussen beproefd (Fig. 2). Een deel van de proefstukken was alleen gezaagd, een ander deel behakt (Fig. 3). Om het ingekapseld zijn te simuleren, zijn de relevante delen van de proefstukken geseald met wapex zodat daar geen waterindringing of droging kon plaatsvinden. De proefstukken zijn vooraf gedocumenteerd en vervolgens blootgesteld aan gecombineerde nat-droog- en temperatuurscycli. De testopstelling bestond uit een frame waar de proefstukken op zijn geplaatst, twee buizen met watersproeiers die voor beregening zorgen en een serie van infraroodlampen die de proefstukken belichten en verwarmen tot een temperatuur van

40 °C om het effect van de zon simuleren (Fig. 4). Thermokoppels zijn gebruikt om de temperatuurscycli (tussen 20 en 40 °C) te sturen. De verouderingstest is gedurende ongeveer 3 maanden uitgevoerd.



Fig. 2. Overzicht proefstukken gezaagd na veroudering.



Fig. 3. Hakken montants.

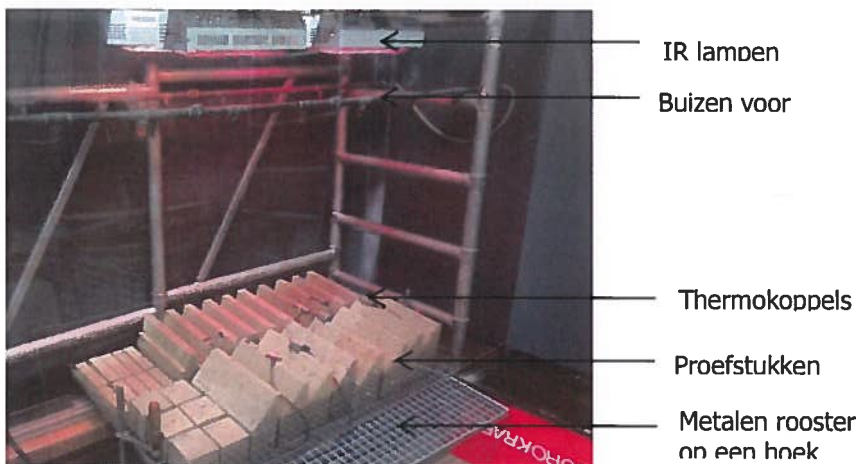


Fig. 4. Opstelling voor de verouderingstest.

Resultaten

De Ettringer tufsteen bevat in vergelijking met de Weiberner veel gesteentefragmenten, minder bims en is minder poreus (Fig. 5). In geen van de onderzochte proefstukken zijn scheurtjes aangetroffen, ook niet in de montants die handmatig behakt waren. Op deze basis kan dus geconcludeerd worden dat de normale wijze van handmatig behakken geen scheurvorming initieert (Fig. 6). Dit was eerder al geconstateerd voor gewoon frijnwerk (Nijland 2005).

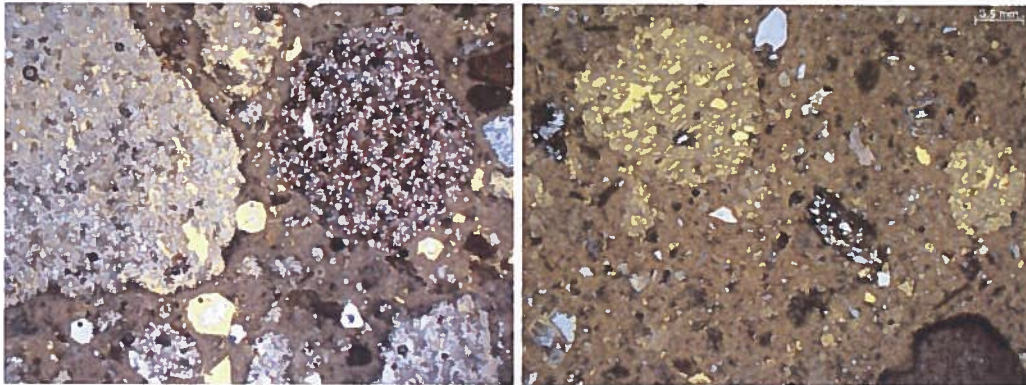


Fig. 6. Microfoto's met overzicht van de microstructuur van Ettringer (links) en Weiberner tufsteen (rechts) (parallel gepolariseerd licht).



Fig. 7. Samengestelde microfoto's van de aansluiting tussen neus en lijf van behakte montants van Ettringer (links) en Weiberner tuf (rechts).

Het bestuderen van het vochttransport en van de hygrische eigenschappen van de tufsteen heeft interessante resultaten geleverd. Het blijkt dat Ettringer tufsteen duidelijk minder water opneemt dan Weiberner tufsteen (Fig. 8 links); daarnaast beweegt het indringingsfront veel langzamer in Ettringer dan in Weiberner tuf. Ook de droging van Ettringer is veel trager dan die van Weiberner tuf (Fig. 8 rechts). Dit suggereert dat Ettringer gevoeliger kan zijn voor vorstschade dan Weiberner, aangezien de eerste langer nat blijft.

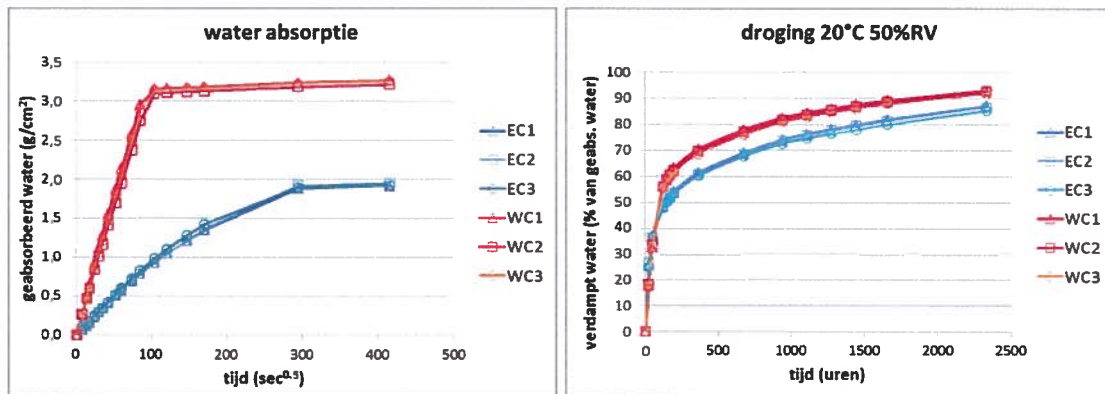


Fig. 8. Waterabsorptie (links) en droging (rechts) van Ettringer (E) en Weiberner (W) tufsteen.

Ook de hygrische uitzetting duidt er op dat Ettringer een grotere kans op schade heeft dan Weiberner: al bij een lage relatieve luchtvochtigheid (RV) heeft Ettringer een significante vochtopname en daaraan gerelateerde uitzetting. De dilatatie van beide tufstenen tussen 30 en 93 RV% is vergelijkbaar en ontzettend hoog voor een steenachtig materiaal ($0,8 \pm 0,05 \mu\text{m}$). Dit suggereert dat schade in deze tufsteensoorten al kan toetreden door uitsluitend RV wisselingen. Als de tufstenen met water verzadigd worden, wordt de uitzetting nog groter ($1,2 \mu\text{m}$) (Fig. 9). Ettringer toont een vergelijkbare uitzetting met Weiberner, maar al terwijl het watergehalte de helft is.

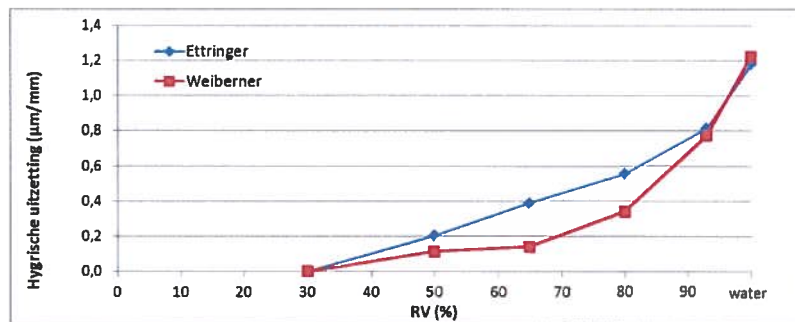


Fig. 9. Hygrische uitzetting van Ettringer en Weiberner tufsteen.

De resultaten van de bepaling van de poriegrootteverdeling met kwikporosimetrie (MIP) laten zien dat Ettringer tuf een lagere open porositeit heeft dan Weiberner (Fig. 10), wat het verschil in totale waterabsorptie verklaart. Het verschil in snelheid van wateropname tussen beide tufsteensoorten kan echter niet verklaard worden alleen op basis van de kwikporosimetriedata, aangezien uit deze metingen blijkt dat beide tufsteensoorten in het bereik waarover de poriegrootte bepaald is, dezelfde maat van poriën hebben. De reden van het verschil in hygrische gedrag van beide tufsteensoorten ligt in de hoeveelheid van zeer kleine poriën ($0,005 \mu\text{m}$). Bepaling van de poriegrootte met behulp van stikstofadsorptie laten zien dat Ettringer een grote hoeveelheid poriën $< 0,005 \mu\text{m}$ heeft, terwijl deze in Weiberner niet aanwezig zijn (Fig. 11). Dit verklaart de trage absorptie en droging van Ettringer tuf en zijn adsorptie bij lage RV. Ook Röntgen diffractiemetingen (XRD) onder gecontroleerde RV laten een verschil in gedrag zien tussen Ettringer en Weiberner tuf. Waar de RV geen effect heeft op de kristalstructuur van de mineralen waaruit de Weiberner tuf bestaat (Fig. 12) is dit bij Ettringer tuf wel zo. Bij lage RV treden verschillen op (Fig. 13). De reden hiervoor is onduidelijk; mogelijk spelen verschil in de aanwezige zeolieten (cf. Nijland et al. 2005ab) een rol.

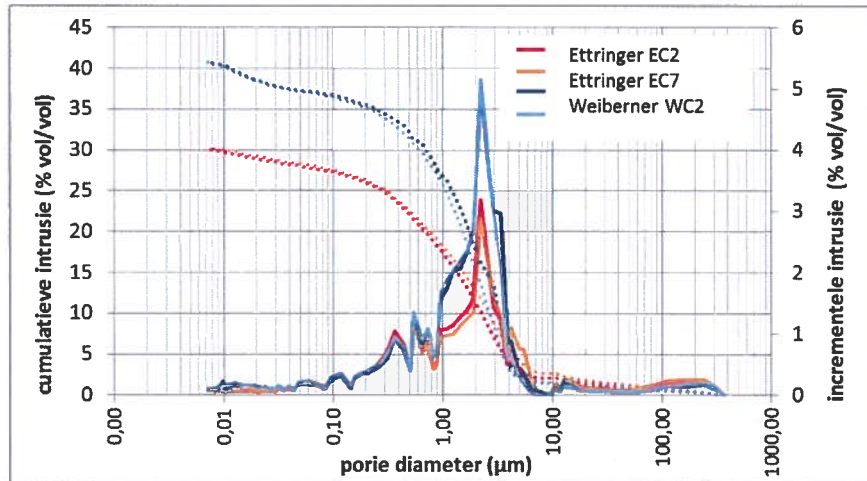


Fig. 10. Poriëgrootteverdeling bepaald door kwikporosimetrie in het bereik 0,007 -366 µm.

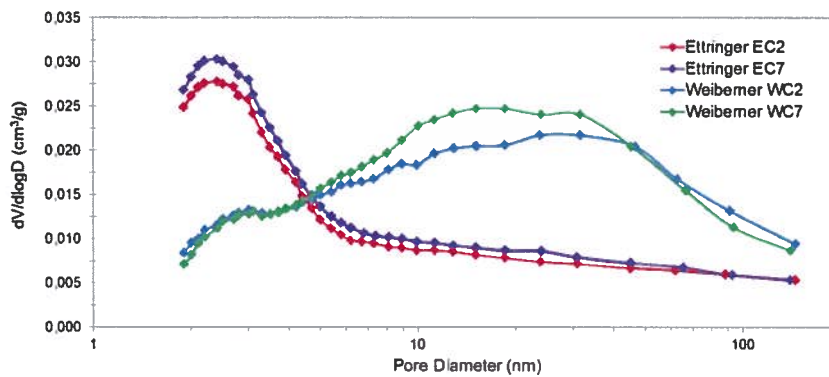


Fig. 11. Poriëgrootteverdeling bepaald door stikstofadsorptie in het bereik 0,002 -0,2 µm.



Fig. 12. Clusteranalyse van de diffractogrammen van hetzelfde monster Weiberner tuf bepaald bij verschillende RV. Er kan slechts één cluster onderscheiden worden.

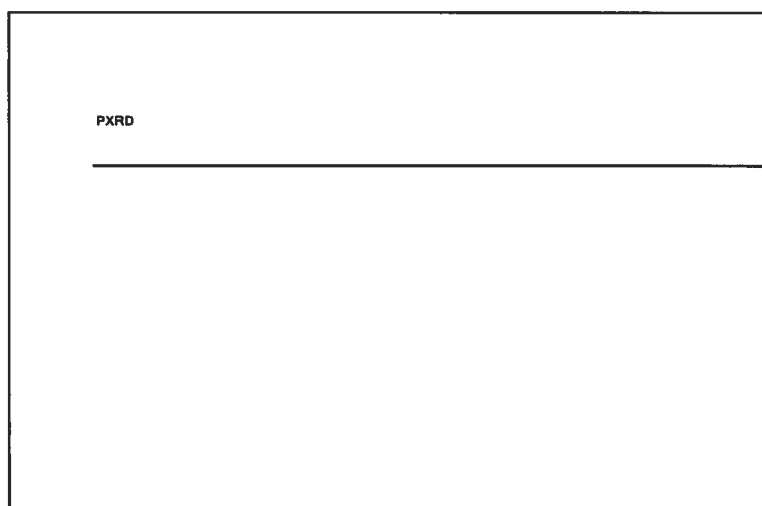


Fig. 13. Clusteranalyse van de diffractogrammen van hetzelfde monster Ettringer tuf bepaald bij verschillende RV. Er kunnen vier clusters onderscheiden worden: 1 – 60-90 %RV, 2 – 30-50 %RV, 3 – 20 %RV, 4 – 10 %RV.

Het is bekend dat de aanwezigheid van zowel fijne als grove poriën, zoals bij uitstek in tufsteen en nog meer in Ettringer dan in Weiberner, een risicofactor is voor het ontstaan van schade door vorst (de steen absorbeert snel water door de grote poriën maar blijft lange nat door de fijne porositeit) en zoutkristallisatie (de kristallisatiedruk is hogere in kleine poriën). Op grond van de boven gepresenteerde data mag worden geconcludeerd dat Ettringer gevoeliger voor schade zal zijn dan Weiberner tuf. Niettemin heeft Ettringer tufsteen een hogere mechanische sterkte dan Weiberner (Tabel 2), wat zijn hogere gevoeligheid voor schade (deels) zou kunnen compenseren.

Tabel 2. Buig- en druksterkte van Ettringer en Weiberner tufsteen (gemiddelde van 5 proefstukken) in $N\ mm^{-2}$ (gemiddelde \pm standaarddeviatie), bepaald op droge prisma's van $4\ x\ 4\ x\ 16\ cm$.

	Buigsterkte		Druksterkte	
	voor veroudering	na veroudering	voor veroudering	na veroudering
Ettringer	$8,1 \pm 1,8$	$6,1 \pm 1,1$	$29,4 \pm 3,2$	$27,7 \pm 1,8$
Weiberner	$4,2 \pm 0,4$	$3,1 \pm 0,6$	$13,2 \pm 1,4$	$14,4 \pm 1,5$

Uit de verouderingstest blijkt dat het verschil in vochtgehalte tussen delen van montants en afzaten die blootgesteld zijn aan beregening en de gesealde delen (die de ingekapselde delen in het metselwerk representeren) inderdaad groot kan zijn (Fig. 14). Een schuifspanning door verschil in hygrische uitzetting van beide delen zou dus tot schade kunnen leiden. De proefstukken uit de verouderingstest tonen macroscopisch na 3 maanden nog geen zichtbare scheurtjes op of nabij de grens tussen beide delen. (Microscopisch onderzoek is nog in uitvoering). Het lijkt wel dat vooraf bestaande scheurtjes wijder zijn worden na de test (Fig. 15) en dat de treksterkte van de beide tufstenen neemt af na veroudering, i.e. nat-droogcycli (Tabel 2). De reden voor deze irreversibele sterkteafname is, aangezien geen zoutkristallisatie of vorst heeft plaatsgevonden, hoog waarschijnlijk gelegen in de grote hygrische uitzetting van beide tufstenen. De thermische uitzetting is geringer en lijkt een veel kleinere rol te spelen ($0,15\ \mu m$ tussen 10 en $40\ ^\circ C$ voor beide tufstenen).

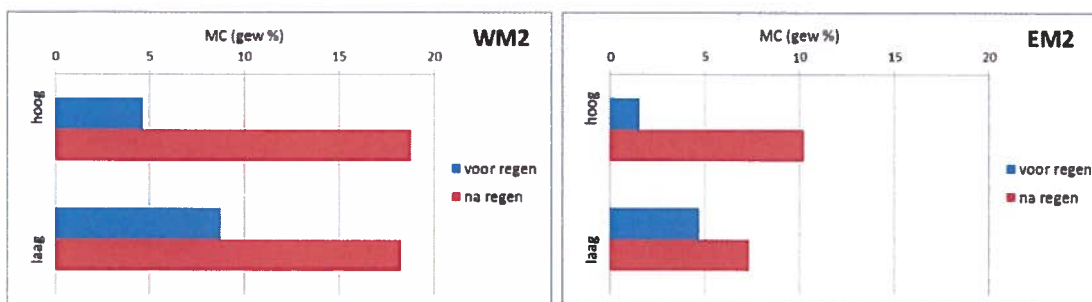


Fig. 14. Vochtgehalte in hogere (blootgesteld aan regen) en lagere (ingeboete) deel van de proefstukken voor en na beregenen.

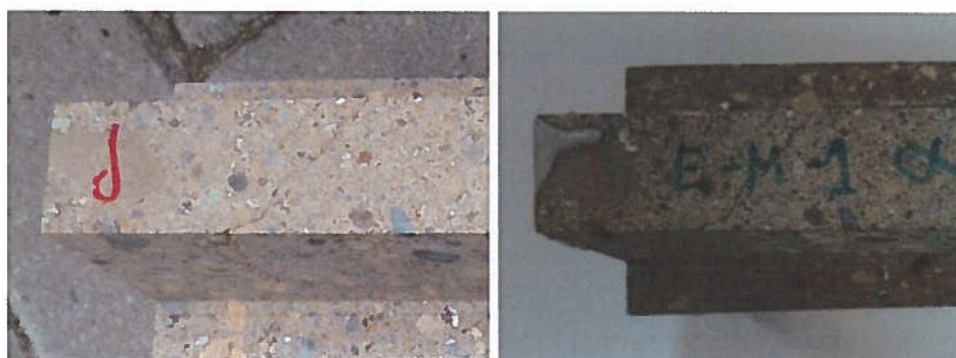


Fig. 15. Montant van Ettringer tufsteen voor (links) en na de verouderingstest (rechts).

Conclusie

De voorlopige en nog niet volledige resultaten van het onderzoek laten zien dat het hygrische gedrag van tufsteen een belangrijke rol speelt bij het ontstaan van eventuele schade aan deze natuursteensoort. Door de aanwezigheid van zowel grove als (zeer) kleine poriën absorbeert tufsteen snel terwijl hij langzaam droogt. Dit gedrag maakt deze steen potentieel gevoelig voor alle schademechanisme die met vocht te maken hebben, zoals biologische groei, vorst en zoutkristallisatie. Daarnaast heeft tufsteen een erg hoge hygrische uitzetting die kan leiden tot schuifspanning tussen meer en minder natte delen van de steen.

Van de beide bestudeerde typen tufsteen lijkt Ettringer meer gevoelig voor schade te zijn door de aanwezigheid van zeer kleine poriën ($< 0,005 \mu\text{m}$). Mogelijk spelen ook de mineralogische veranderingen die deze steen ondergaat door RV wisselingen een rol. Echter, de hogere sterkte van Ettringer zou deze hogere gevoeligheid voor schade (deels) kunnen compenseren. Verder onderzoek is nodig om dit definitief te bevestigen.

De verouderingstest heeft laten zien dat bestaande scheurtjes door nat-droogcycli bredere lijken te worden en dat de treksterkte van de beide tufstenen afneemt na veroudering. Na drie maanden beproeving zijn er geen macroscopisch zichtbare scheurtjes ontstaan aan de grens tussen tufsteen delen met verschillende vochtgehalte.

Referenties

Nijland, T.G., 2005. Oriënterend onderzoek naar de invloed van de bewerking op de duurzaamheid van Weiberner tuf en Portland steen. TNO-rapport 2005-CI-R0176.

Symposium Monumenten/Kennis | Kennis van Natuursteen

- Nijland, T.G. & Hees, R.P.J. van, 2014. Kosten bespaard, waarden verloren ? Achtergronden voor keuzes bij vervanging van tufsteen. In: Nijland, T.G., red., Restauratie voltooid, kwaliteit gehaald ? Syllabus, TNO-NVMz studiedag, Delft, 3 december 2014. TNO, Delft, 3-17.
- Nijland, T.G., Hees, R.P.J. van, Brendle, S. & Haas, G.J.L.M. de, 2005a. Tufsteen. Deel 1: Gebruik, samenstelling en verwerking van tuf in Nederlandse monumenten. Praktijkboek Instandhouding Monumenten 21(14), 20 pp.
- Nijland, T.G., Hees, R.P.J. van, Brendle, S. & Goedeke, H.K., 2005b. Tufsteen. Deel 2: Invloed van vocht op de duurzaamheid van 'Rheinische' tuf. Praktijkboek Instandhouding Monumenten 21(15), 12 pp.