

## STEENVERSTEVIGEND EFFECT VAN DIVERSE ETHYLSILICAATPRODUCTEN AANGEBRACHT OP KALKSTEEN | TANAQUIL BERTO, HILDE DE CLERCQ EN LAURENT FONTAINE

Binnen de conservatie van steen en steenachtige materialen is granulaire desintegratie (het loskomen van individuele korrels wegens microscheurvorming of verlies van matrix), een oud en gekend fenomeen. Afhankelijk van de aard van het materiaal spreekt men van verpoedering (fijnkorrelige gesteenten), verzanding (zandsteen) of versuikering (marmer).<sup>[1]</sup> Dit schadefenomeen is algemeen het gevolg van verwerking: vries-dooi cycli, zoutkristallisatie, inwerking van zure regen en thermische cycli. In geval van verpoedering of verzanding is een steenverstevigende behandeling met ethylsilicaat (tetraethylorthosilicaat, TEOS) inmiddels een standaardbehandelingsoptie binnen de conservatiepraktijk. Elke casus is echter specifiek vanwege de intrinsieke eigenschappen van enerzijds de steensoort en anderzijds de graad van verwerking waardoor de doeltreffendheid van een steenverstevigende behandeling individueel dient benaderd. De markt kenmerkt zich door een breed gamma aan commerciële TEOS producten die onderling kunnen verschillen in chemische samenstelling en concentratie van het actief bestanddeel, het type verdunningsmiddel, het type katalysator en aard van additief waardoor de keuze van het meest aangewezen product voor elk afzonderlijk geval niet eenvoudig is. Een vergelijkend onderzoek van een selectie producten verkrijgbaar op de Belgische markt werd uitgevoerd teneinde hun steenverstevigende eigenschappen beter te begrijpen. Voor dit onderzoek werden zeven producten geselecteerd: KSE 100, KSE 300, KSE 300 HV, KSE 300 E, KSE 500 E, SH 75 eco verdeeld door Remmers en Artisil SVS 100 verdeeld door Rewah. De producten werden op twee (niet verwerde) kalksteensoorten aangebracht door middel van capillaire absorptie. Hierbij werden drie behandelingsmethodes toe-

gepast om het verstevigend effect ook in verband te kunnen brengen met de hoeveelheid geabsorbeerd product.

### STEENVERSTEVIGENDE PRODUCTEN

In de conservatiepraktijk wordt een steenverstevigend product vaak geselecteerd op basis van het percentage droge stof (amorf silica [SiO<sub>2</sub>] gel gevormd na polymerisatie van TEOS) of het gehalte aan actief bestanddeel (TEOS: tetraethylorthosilicaat, [Si(OCH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>] in het startproduct). De commerciële naamgeving van deze producten kan verwarrend zijn, gezien deze steeds refereert naar één van deze twee gegevens door middel van cijfercodering zoals "KSE 300" met 30 Gew-% droogstof gehalte of "SH 75 eco" met 75 M-% actief bestanddeel. Het droogstof gehalte is echter niet alleen afhankelijk van de hoeveelheid actief bestanddeel maar wordt ook bepaald door de chemische aard van het actief bestanddeel (monomeren of oligomeren) in het startproduct. Grotere oligomeren geven een relatief hoger percentage droogstof gewicht in vergelijking met monomeren die een lager percentage droogstof gewicht geven (wanneer TEOS polymeriseert tot amorf silica gel worden er tijdens de polycondensatie reactie alcoholenheden afgesplitst. Hoe groter de initiële oligomeren, hoe mindere alcoholenheden worden afgesplitst en hoe hoger het droogstof percentage van het actief bestanddeel als gevolg.<sup>[2]</sup> In de tabel wordt een overzicht gegeven van de algemene eigenschappen van de geteste producten: de soortelijke massa, de hoeveelheid aan actief bestanddeel, het droogstof gehalte, het aandeel aan solvent en additief als ook specificaties met betrekking tot het applicatiegebied volgens de verdelers

Product	Soortelijke massa (kg/l)*	Actief bestandd. (M-%)***	Droogstof gehalte (Gew-%)	- Solvent**** - Additief****	Specificaties***
KSE 100	0.81	20	10*** 18.5* 13**	- solvent: 80 % - geen additief	voor fijn poreuze en minder harde minerale materialen met eerder gering absorptievermogen
KSE 300	0.97	99	30*** 23.4* 22**	- geen solvent - geen additief	Voor alle poreuze eerder harde minerale materialen met gemiddeld tot sterk absorptievermogen
KSE 300 HV	0.97	95	30*** 27.5* 27**	- weinig solvent - additief: aminofunctioneel triethoxysilaan [3], specifiek voor de optimalisatie van de binding met kalk [4]	Voor fijn tot middel poreuze, harde en zachte kalksteen met gemiddeld tot sterk absorptievermogen - HV staat voor "Hechtung Verbesserung"
KSE 300 E	0.91	50	30*** 33* 30**	- solvent 50 % - additief: elastomeer, polyether [3]	Versteviger met verminderde Elasticiteitsmodulus voor gemiddeld tot grof poreuze, eerder zachte minerale materialen met gemiddeld tot sterk absorptievermogen
KSE 500 E	1.01	85	50*** 55* 46**	- solvent: 15 % - additief: elastomeer, polyether [3]	Versteviger met verminderde elasticiteitsmodulus voor gemiddeld tot grof poreuze, eerder zachte minerale materialen met gemiddeld tot sterk absorptievermogen
SH 75 eco	0.97	75	46* 41**	- solvent: 25 % - ecologisch solvent*** - geen additief	Voor alle minerale materialen
Artisil SVS 100	0.98	100	57* 55**	- geen solvent - geen additief	Voor alle minerale materialen

Overzicht algemene eigenschappen van de geteste ethylsilicaatproducten (\* onderzocht in labo in het kader van dit onderzoek, \*\* bepaald op de stalen Maastrichtersteen, \*\*\* volgens technische fiches of gecommuniceerd door de verdelers, \*\*\*\* vermoed op basis van literatuurgegevens). KSE = Kiesel Sauer Ester

## PROEFSTALEN

In het jaar 2008 werd de conservatiebehandelingsvergelijkend onderzoek kon niet op de veel voorkomende Belgische verweerde steensoorten worden uitgevoerd vanwege een te grote heterogeniteit in de reguliere Belgische steensoorten enerzijds en in de verweringsgraden anderzijds. Voor de proefstalen werden twee kalkstenen geselecteerd, de Maastrichter en de Franse Thénacsteen. Dit vanwege hun intrinsieke homogeniteit en hun specifieke kenmerken op het vlak van porositeit en hardheid. Zo wordt de Maastrichtersteen (meest typische Limburgse bouwsteen) gekenmerkt door een zeer lage hardheid en een zeer hoge intergranulaire macroporositeit, en bijgevolg snel absorptievermogen. Deze eigenschappen zijn bevorderlijk voor experimenteel onderzoek en verklaren het veelvuldig gebruik van deze steensoort als testmateriaal. De Thénacsteen werd geselecteerd vanwege een minder uitgesproken intergranulaire macroporositeit, en het bijgevolg trager absorptievermogen ten opzichte van de Maastrichtersteen. Deze steen is iets harder en compacter als de Maastrichtersteen en heeft gelijkaardige kenmerken als de meer gekende historische bouwsteen, Avendersteen die actueel niet meer wordt ontgonnen<sup>[3]</sup>, maar vaak werd toegepast als bouwsteen, voor architecturale ornamentatie en voor beeldhouwkunst vanwege zijn homogeniteit en lage hardheid.

Een overzicht van de algemene eigenschappen van deze twee steensoorten wordt in deze tabel weergegeven

Proefmateriaal	Beschrijving en eigenschappen
 <p>Maastrichtersteen</p>	<p>Grof poreuze kalkareniet</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mineralogie: calciet (CaCO<sub>3</sub>): 98 vol-%</li> <li>- schijnbaar massavolume: 1300-1450 kg/m<sup>3</sup></li> <li>- watertoeankelijke porositeit: 45 vol-%               <ul style="list-style-type: none"> <li>- intergranulaire macroporositeit (± 3/4)</li> <li>- intragranulaire microporositeit (± 1/4)</li> </ul> </li> </ul>
 <p>Thénacsteen</p>	<p>Krijtsteen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mineralogie: calciet (CaCO<sub>3</sub>): 99 vol-%</li> <li>- schijnbaar massavolume: 1870 kg/m<sup>3</sup></li> <li>- watertoeankelijke porositeit: 30,6 vol-%               <ul style="list-style-type: none"> <li>- intergranulaire macroporositeit (± 1/3)</li> <li>- intragranulaire microporositeit (± 2/3)</li> </ul> </li> </ul>

Overzicht petrografische omschrijving en eigenschappen van de twee geteste steensoorten

## BEHANDELINGSMETHODEN EN CONDITIONERING

De twee steensoorten werden tot blokjes van 4 x 5 x 5 cm verzaagd (behandeld oppervlak is 4 x 5 cm) en bleven gedurende het gehele onderzoek in een geconditioneerde omgeving met 60% RV en 20°C. In de conservatiepraktijk worden verweerde stenen behandeld met een sproei apparaat of een borstel waarbij het aangebrachte product door capillaire absorptie door het substraat wordt opgenomen. De hoeveelheid aangebracht product varieert sterk en is afhankelijk van de behandelingsmodaliteiten. In het kader van adviesverlening wordt door de onderzoeksceel Monumenten van het departement Laboratoria, voor steenverstevigende proefbehandelingen de volgende behandelingsmethode toegepast: de te behandelen steen wordt bevoeid tot oppervlakverzadiging, waarbij er aflopers van ongeveer 10 cm ontstaan en dit zodanig dat het oppervlak gedurende enkele seconden nat/glanzend blijft. Een bevoeiing kan meerdere malen herhaald worden, en dit van zodra het product visueel in de steen is ingedrongen en het oppervlak geen glanzend/nat effect meer verleent. De tijdsduur hiervan is afhankelijk van de steensoort en de verweringsgraad, maar over het algemeen dient hiervoor vijf tot tien minuten in acht genomen. Meerdere bevoeiingen (max. 4) bevorderen de impregnatiediepte terwijl meerdere behandelingen bevorderend zijn voor het algemeen verstevigend effect. De optimale tijd tussen opeenvolgende behandelingen is minimaal vier dagen en maximaal drie weken<sup>[6]</sup>, en dit teneinde het verstevigend effect te optimaliseren en het effect van verstopping van poriën (pore blocking) te minimaliseren.<sup>[7]</sup>

De bevoeiingsmethode werd voor dit onderzoek in het laboratorium gesimuleerd door de stalen gedurende 5 seconden in contact te brengen met het steenverstevigend product. Elk product werd volgens drie verschillende behandelingsmethodes aangebracht:

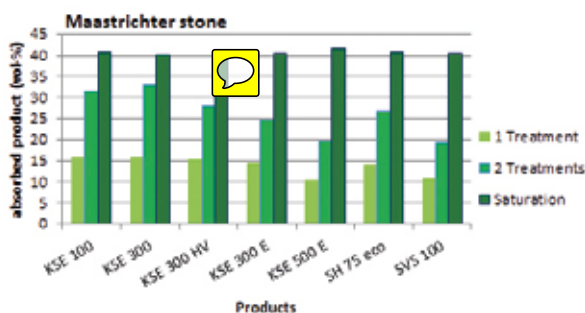
- 1 behandeling: het te behandelen oppervlak van het staal wordt twee maal gedurende 5 seconden 1 mm. in contact gebracht met het consolideringsproduct (interval van min. 10 minuten en max. 1 uur).
- 2 behandelingen: idem als 1 behandeling, maar met een herhaling ervan na 7 dagen.
- behandeling van 3 uur: het te behandelen oppervlak van het staal blijft gedurende 3 uur tot 1 mm diep in contact met het product. Deze behandelingsmethode, uitgevoerd in een gesloten container om verdamping van het product te vermijden, werd in dit onderzoek opgenomen om een internationaal standaard testprotocol te volgen.<sup>[8]</sup> Deze behandelingsmethode kan ook gezien worden als imitatie van de in de conservatiepraktijk veelvuldig toegepaste 'behandeling tot verzadi-

ging' door constante bevoeiing, toepassing van kompressen of onderdompeling met de doelstelling zoveel mogelijk product aan te brengen in het substraat. De stalen in Thénacsteen bereiken binnen 3 uur tijd echter niet hun verzadigingspunt terwijl de stalen in Maastrichtersteen reeds na ongeveer 1 minuut gesatureerd zijn. De behandelde stalen worden gedurende 4 weken geconditioneerd bij de eerder vermelde omstandigheden alvorens het effect van de behandeling te beoordelen.

## ONDERZOEKSMETHODES EN RESULTATEN

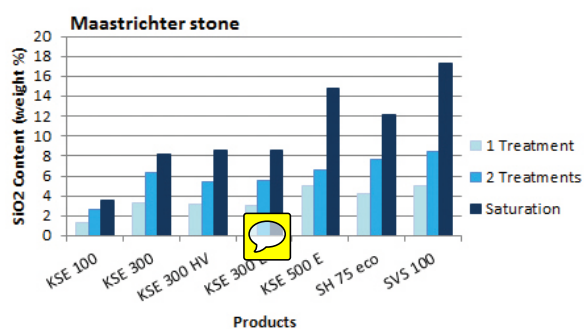
### PRODUCTOPNAME EN HOEVEELHEID GEPOLYMERISEERD PRODUCT (AMORF SILICA GEL)

Elk staal wordt voor en na elke capillaire absorptie gewogen om de productopname te bepalen. De figuur illustreert de productopname, omgezet in vol-%, van de zeven verschillende producten per drie behandelingsmethodes op de stalen Maastrichtersteen.



Overzicht hoeveelheid opgenomen steenverstevigende producten door capillaire absorptie

De productopname van de stalen met behandeling van drie uur (zie donkergroene balken in de figuur) bedraagt ongeveer 40 vol-% en benadert de watertoegankelijke porositeit. De hoeveelheid geabsorbeerd product bij 1 behandeling en 2 behandelingen vertoont variaties waarbij KSE 500 E en Artisil SVS 100 de laagste waarden hebben en dit vermoedelijk vanwege de hogere viscositeit van deze producten.



Overzicht gewichtsprocent van amorf gel van silica t.o.v. de stalen onbehandelde Maastrichtersteen

Na volledige polymerisatie van het steenverstevigend product (minimaal 28 dagen na de laatste behandeling) worden de stalen gewogen; hun gewicht wordt vergeleken met het initieel gewicht om de hoeveelheid aan gepolymeriseerd eindproduct (amorf SiO<sub>2</sub>) te bepalen.

De hoeveelheid aan amorf silica gel van elk toegepast product is afhankelijk van enerzijds het productverbruik en anderzijds van het droogstofgehalte van elk product. Zo heeft Artisil SVS 100, gekenmerkt door het hoogste droogstofgehalte (57%), bijgevolg ook de hoogste hoeveelheid aan amorf silicagel gevormd in de Maastrichtersteen.

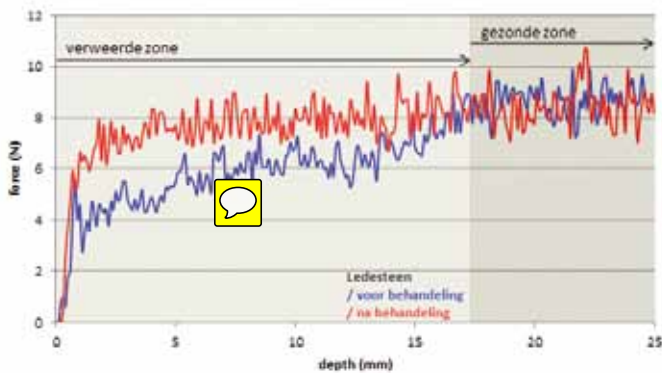
### VERSTEVIGEND EFFECT IN DE DIEPTE

Om de verandering in hardheid en intergranulaire samenhang in de diepte van de steen te bepalen worden de behandelde stalen onderworpen aan Drilling Resistance Measurement System (DRMS) metingen.

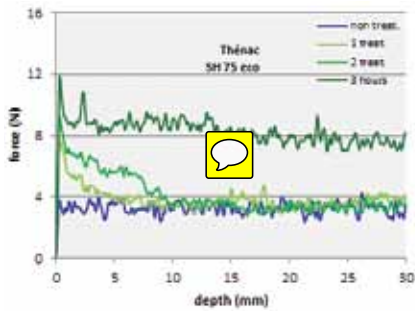
Het DRMS betreft een niet genormaliseerde testmethode waarmee hardheidsprofielen worden bekomen aan de hand van een speciaal ontworpen boormachine. Hiervoor wordt met een precisieboor (diameter van 4,8 mm, voorzien van een vlakke polykristallijne diamantkop) loodrecht op het steenvlak een gat geboord aan een constante penetratiesnelheid en een constante rotatiesnelheid. Het toestel meet de weerstand die het ondervindt bij het boren, waarbij de weerstand een rechtstreekse maat is voor de hardheid en de consolidatiegraad van het materiaal. Het bekomen resultaat betreft een hardheidsprofiel vanaf het oppervlak van de steen tot maximaal 40 mm diep in de steen. Ter toelichting worden hierbij twee voorbeelden gegeven uit de conservatiepraktijk. De figuur illustreert een hardheidsprofiel van een verweerde Ledesteen vóór en na een steenverstevigende proefbehandeling (twee behandelingen van drie bevoeiingen tot oppervlakteverzadiging met 75 M-% actief bestanddeel TEOS en met een totaalverbruik van 2,3 l/m<sup>2</sup>). De blauwe curve is het hardheidsprofiel bekomen vóór de steenverstevigende behandeling waarbij



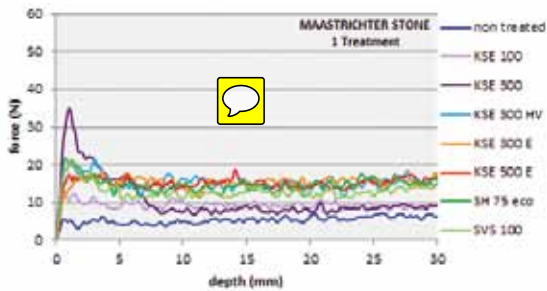
Hardheidsprofielen van een Ledesteen vóór (blauwe curve) en na (rode curve) steenverstevigende behandeling



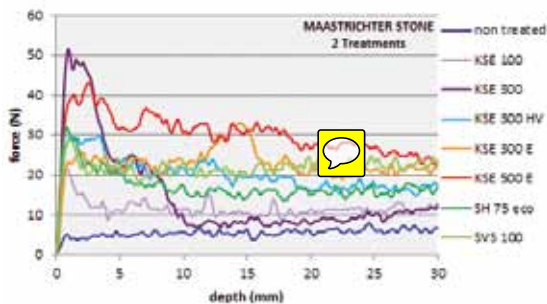
Hardheidsprofiel van een Avendersteen na steenverstevigende behandeling met overconsolidatie in de eerste 18 mm



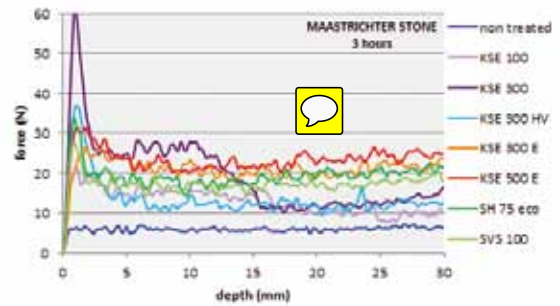
Hardheidsprofielen van stalen Thénacsteen behandeld met SH 75 eco volgens drie methodes (verbruik 1 behandeling: 0,56 l/m<sup>2</sup>; verbruik 2 behandelingen: 0,96 l/m<sup>2</sup> en verbruik bij behandeling van drie uur: 9,83 l/m<sup>2</sup>)



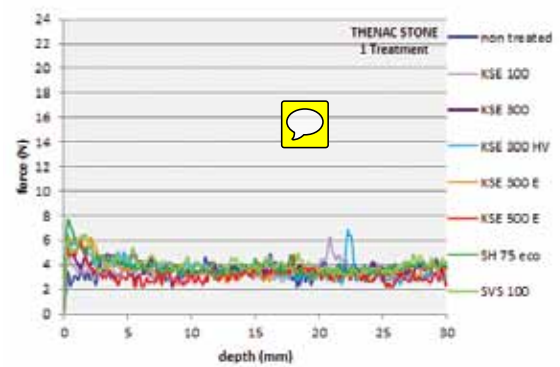
Hardheidsprofielen van stalen Maastrichtersteen na 1 behandeling met de zeven verschillende producten



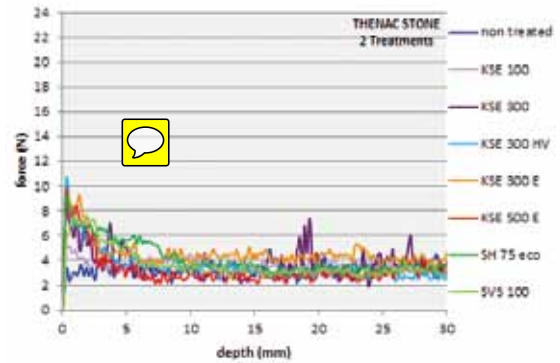
Hardheidsprofielen van stalen Maastrichtersteen na 2 behandelingen met de zeven verschillende producten



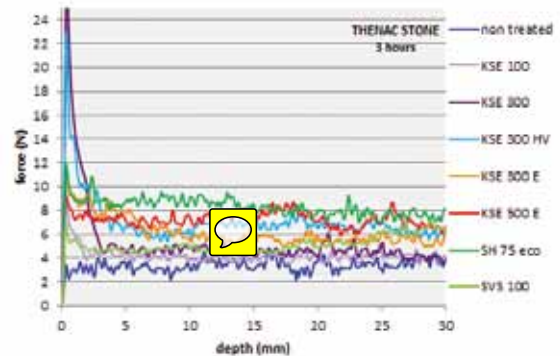
Hardheidsprofielen van stalen Maastrichtersteen na behandeling van drie uur met de zeven verschillende producten



Hardheidsprofielen van stalen Thénacsteen na 1 behandeling met de zeven verschillende producten



Hardheidsprofielen van stalen Thénacsteen na 2 behandelingen met de zeven verschillende producten



Hardheidsprofielen van stalen Thénacsteen na behandeling van drie uur met de zeven verschillende producten



een verwerking tot ongeveer 17 mm diepte wordt vastgesteld. De rode curve betreft het hardheidsprofiel bekomen na de steenverstevigende behandeling en duidt op een positief verstevigend effect in de verweerde zone.



Een voorbeeld van steenverstevigende behandeling met een overconsoliderend effect wordt weergegeven in figuur 4. Een steenverstevigende behandeling toegepast op een Avendersteen (met 75 M-% actief bestanddeel TEOS, behandelingsmethode en totaalverbruik niet gekend) geeft hierbij een negatief resultaat gezien deze een te hoge hardheid in de eerste 18 millimeters van de steen veroorzaakt. De nadelige ontstane disproportie ten opzichte van de normale lage(re) consolidatiegraad en hardheid in de diepte van de Avendersteen kan op termijn materiaalverlies veroorzaken door afstoting van deze overgeconsolideerde zone.



Voor dit onderzoek werden per staal vier DRMS metingen uitgevoerd, twee vóór het aanbrengen van het steenverstevigend product en twee na volledige polymerisatie van het steenverstevigend product. Vanwege het verschil in hardheid van de twee steensoorten dienden de boorparameters (rotatiesnelheid en penetratiesnelheid) per steensoort aangepast, waardoor de bekomen hardheidsprofielen enkel per steensoort en niet onderling vergeleken kunnen worden. Aan de hand van deze hardheidsprofielen kan het verstevigend effect van de zeven producten en de drie behandelingsmethodes vergeleken worden. Over het algemeen geldt per type product dat hoe meer verstevigend product een materiaal heeft geabsorbeerd, hoe hoger het verstevigend effect zal zijn en dit wordt ook bevestigd in de bekomen hardheidsprofielen van de behandelde stalen Thénacsteen. Ter illustratie worden in de figuur de hardheidsprofielen van de stalen Thénacsteen, onbehandeld en behandeld volgens de drie verschillende behandelingsmethodes met SH 75 eco, weergegeven. Het bekomen hardheidsprofiel van het staal na behandeling van drie uur (donkergroene curve) duidt op een aanzienlijke verhoging van de hardheid over de gehele meetdiepte wanneer deze wordt vergeleken met de donkerblauwe curve die de onbehandelde steen vertegenwoordigt. De hardheidsprofielen bekomen van de stalen met 1 behandeling (lichtgroene curve) en twee behandelingen (middelgroene curve) duiden op verstevigend effect tot 10 mm diepte met een hoger verstevigend effect volgens het aantal behandelingsmethodes.



Bij de stalen Maastrichtersteen wordt een meer homogeen verstevigend effect over de gehele meetdiepte vastgesteld bij de drie behandelingsmethodes. De drie figuren representeren de hardheidsprofielen van de stalen Maastrichtersteen

na respectievelijk 1 behandeling, 2 behandelingen en een behandeling van drie uur met de zeven producten. De hardheidsprofielen van KSE 300 volgens de drie behandelingsmethodes vertonen echter een sterk verhoogde hardheid aan het oppervlak tot 2 mm diepte en dit als gevolg van het zogenaamde backmigration fenomeen. Backmigration is een proces waarbij het actief bestanddeel terug migreert naar het oppervlak alvorens te polymeriseren tot grotere en meer immobiele bestanddelen. Dit product kon tevens als enige van de onderzochte producten niet gedetecteerd worden in de steenstalen met dithizone (dithizone in oplossing verandert van kleur bij contact met zware metalen). Gezien de meeste steenverstevigende producten op basis van ethylsilicaat metaal gebonden katalysatoren bevatten<sup>(9)</sup> kan hiermee zowel TEOS als het eindproduct, het amorf silicagel, worden gedetecteerd in de steen<sup>(10)</sup>. De vraag stelt zich hier in welke mate KSE 300 een andere, eventueel tragere, katalysator bevat die backmigration stimuleert. Het product KSE 300 HV, dat een additief bevat ter stimulatie van de binding van het actief bestanddeel met kalk en tevens gekenmerkt wordt door een gelijkaardig actieve stofgehalte en percentage droge stof, vertoont echter veel minder de symptomen van backmigration.

Wanneer de hardheidsprofielen bekomen voor de stalen Maastrichtersteen met 2 behandelingen worden vergeleken met deze behandeld gedurende drie uur zien we bijzondere resultaten: de stalen Maastrichtersteen na behandeling van drie uur met de producten KSE 300 HV, KSE 500 E en Artisil SVS 100 geven ten opzichte van de hardheidsprofielen van dezelfde producten aangebracht in 2 behandelingen lagere hardheidswaarden. Het lijkt hierbij dat voor deze producten de behandeling van drie uur een minder goed verstevigend effect op de stalen Maastrichtersteen bewerkstelligt als in geval van 2 behandelingen, en dit ondanks het hoger verbruik alsook afgezet SiO<sub>2</sub>.



Bij de stalen Thénacsteen is het verstevigend effect vanwege de veel lagere absorptiecapaciteit van deze steen, beperkt tot max. 1 cm diep bij 1 behandeling en 2 behandelingen. Het verstevigend effect in de diepte van deze steen wordt pas waargenomen bij de hardheidsprofielen bekomen van de stalen na behandeling van drie uur. Een sterk verhoogde hardheid aan het oppervlak wordt in het bijzonder ook hier vastgesteld bij KSE 300 alsook bij KSE 300 HV na de behandeling van drie uur. Het algemeen verstevigend effect van dit laatste type behandeling is voor KSE 100, KSE 300 en Artisil SVS 100 beperkter dan voor KSE 300 HV, 300 E, 500 E en SH 75 eco.



## EVALUATIE

De onderzochte proefstalen betreffen stenen zonder verwerking en die op zich dus geen steenverstevigende behandeling behoeven. Het verstevigend effect per behandelingsmethode van elk afzonderlijk product kan bijgevolg niet beschouwd worden als absoluut resultaat maar eerder als indicatieve waarde. Het steenverstevigend effect is niet alleen afhankelijk van het product en de behandelingsmethode maar ook van de eigenschappen van de steen. Aan de onderzochte producten kunnen twee steenverstevigende eigenschappen worden gelinkt die bij de selectie in het gamma aan beschikbare producten als leidraad kunnen functioneren. Zo zijn er enkele producten die voornamelijk aan het oppervlak van de steen een verstevigend effect bewerkstelligen, terwijl andere producten de hardheid meer homogeen in de diepte van de steen bewerkstelligen. Een overzicht van deze eigenschappen wordt in de tabel weergegeven met een quotering voor de graad van het verstevigend effect over de lengte van de behandelde zone in de steen en een quotering voor de graad van het verstevigend effect aan het oppervlak van de steen.

Wanneer we bij de Maastrichtersteen de quotering van de graad van hardheid over de volledige indringingsdiepte van 2 behandelingen vergelijken

met de behandeling van drie uur zien we bij meerdere producten dat de hoeveelheid aangebracht product niet evenredig is met de graad van het verstevigend effect. De oorzaak hiervan ligt vermoedelijk in de uithardingskrimp. Tijdens de polymerisatie van TEOS tot amorf silica gel treedt er een aanzienlijke krimp op. Deze krimp veroorzaakt microscheurtjes in het amorf silica gel wat gezien wordt als een bevorderlijke eigenschap in functie van de dampdoorlaatbaarheid. Wanneer er echter een grote hoeveelheid product wordt aangebracht waarbij de poriën bijna in hun geheel gevuld worden, kan vermoed worden dat de hechting tussen de steenpartikels niet alleen verbeterd wordt, maar ook afneemt vanwege de trekkrachten tijdens de polymerisatiekrimp van het verstevigend product op de steenpartikels. Het aanbrengen van een te grote hoeveelheid steenverstevigend product is dus niet alleen nefast voor de conservatie van steen en steenachtige materialen vanwege het risico op een overconsoliderend effect (met poreblocking), maar dus ook vanwege de polymerisatie krimp met risico van verminderde cohesie tussen de steenpartikels.

De nodige hoeveelheid aan te brengen product is echter dermate afhankelijk van de steensoort en zijn verweringsgraad en -diepte dat hiervoor geen richtlijnen kunnen worden gegeven die het verstevigend effect voorspellen. Specifiek voor-

Evaluatie steenverstevigend effect	Geen	Bepert	Matig	Hoog	Extreem hoog
graad hardheid over de lengte van de indringingsdiepte	/	+	++	+++	++++
graad hardheid aan het oppervlak t.o.v. in de diepte van de steen	/	△	△△	△△△	△△△△

Steensoort	Behandeling	Product						
		KSE 100	KSE 300	KSE 300 HV	KSE 300 E	KSE 500 E	SH 75 eco	SVS 100
Maastrichter steen	één	+	+	++	++	++	++	++
	twee	/	△△△	/	/	/	△	△△
	van drie uur	+	+	+++	+++	++++	++	+++
Thénac steen	één	△△	△△△△	△	/	△	△△	△
	twee	+	+	+	++	+++	++	++
	van drie uur	△	△△△△	△△△	/	△	△△	△
Thénac steen	één	/	/	/	/	/	/	/
	twee	△	△	△△	△△	△△	△△	△△
	van drie uur	/	/	/	++	/	/	/
Thénac steen	één	△	△△	△△△	△△	△△	△△	△△
	twee	+	+	+++	++	+++	+++	+
	van drie uur	△△	△△△△	△△△△	△	/	/	△

Overzicht van het steenverstevigend effect in de diepte en aan het oppervlak van de steen

onderzoek bij elke case blijft alsnog noodzakelijk om de behandelingsmethode en het soort product op een onderbouwde wijze nader te bepalen.

## EFFET DE PLUSIEURS PRODUITS À BASE DE SILICATE D'ÉTHYLE SUR LA CONSOLIDATION DE PIERRES CALCAIRES

### NOTES

- (1) VERGÈS-BELMIN V., *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*, ICOMOS-ISCS, 2008, p. 20.
- (2) HILBERT G., BOOS M., ENGEL J., *Monument preservation-news, information for professionals in the field of monument preservation*, 2<sup>de</sup> uitg., Remmers, 2004.
- (3) SNETHLAGE R., STERFLINGER K., *Consolidation of stone*, Stone in Architecture: properties durability, 2011, p. 472-474.
- (4) DUSAR M., DREESSEN R., DE NAEYER A., *Natuursteen in Vlaanderen, versteend verleden*, in *Renovatie & Restauratie*, Kluwer, 2009, p. 143.
- (5) ENGEL J., *New consolidation Agent for Limestone*, in *Proceedings of the International Symposium Stone Consolidation in Cultural Heritage*, 2008, p. 419-426.
- (6) DE CLERCQ H., DE ZANCHE S., BISCONTIN G., *The Influence of Application Schedules on the Effectiveness of Ethyl Silicate Based Consolidants for Brick and Limestone*, in *International Journal for the Restoration of Buildings and Monuments*, 2008, vol. 14, nr. 4, p. 283-294.
- (7) DE CLERCQ H., *Time and TEOS: Influence of Application Schedules on the Effectiveness of Ethyl Silicate based consolidants*, in *Stone Consolidation in Cultural Heritage, Research and Practice*, in *Proceedings of the international Symposium*, 2008.
- (8) PINTO F., RODRIGUES D., *Consolidation of carbonate stones: influence of treatment procedures on the strengthening action of consolidants*, in *Journal of Cultural Heritage*, 2012, p. 154-166.
- (9) SNETHLAGE R. e.a., *op. cit.*
- (10) LEROUX L., VERGÈS-BELMIN V., COSTA D., DELGADO RONDRIGUES J., TIANO P., SNETHLAGE R., SINGER B., MASSEY S., DE WITTE E., *Measuring the penetration depth of consolidating products: comparison of six methods*, in *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, vol. 2, 2000, p. 361-367.

LES INTERVENTIONS DURABLES DE CONSERVATION SUR LA PIERRE ET LES MATÉRIAUX PIERREUX DU PATRIMOINE MONUMENTAL BÂTI ET DES SCULPTURES SONT JUSQU'À PRÉSENT RAREMENT DÉFINIES PAR DES PROTOCOLES STANDARDS. LES TRAITEMENTS DE CONSOLIDATION À L'AIDE DE PRODUITS À BASE DE SILICATE D'ÉTHYLE (PLUS PRÉCISÉMENT D'ORTHOSILICATE DE TÉTRAÉTHYLE, TEOS) SONT NÉANMOINS D'USAGE COURANT EN CAS DE PULVÉRULENCE OU DE DÉSAGRÉGATION SABLEUSE. SELON LES PROPRIÉTÉS DE LA PIERRE, ET EN PARTICULIER LE DEGRÉ ET LA PROFONDEUR D'ALTÉRATION, IL CONVIENT DE SÉLECTIONNER LE CONSOLIDANT LE PLUS APPROPRIÉ PARMIS LES PRODUITS DISPONIBLES. IL EXISTE TOUTEFOIS UNE LARGE GAMME DE FORMULATIONS À BASE DE SILICATE D'ÉTHYLE SUR LE MARCHÉ, CARACTÉRISÉE PAR DES VARIATIONS DE LA COMPOSITION CHIMIQUE, DE TYPE DE CATALYSEUR, DE DEGRÉ DE DILUTION, DE TYPE DE SOLVANT ET DES ADDITIFS. DANS LE CADRE DE CETTE RECHERCHE, SEPT PRODUITS ONT ÉTÉ SÉLECTIONNÉS PARMIS CEUX DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ BELGE. PLUSIEURS ESSAIS DE TRAITEMENT SUR DEUX TYPES DE PIERRE CALCAIRE (NON ALTÉRÉE) ONT ÉTÉ RÉALISÉS. L'EFFET DE CONSOLIDATION DES PRODUITS A ÉTÉ ÉTUDIÉ AU MOYEN DE PROFILS DE DURETÉ OBTENUS PAR RÉSISTANCE AU MICRO-FORAGE (DRILLING RESISTANCE MEASUREMENT SYSTEM, DRMS).