

HA

HERITAGE & ARCHITECTURE

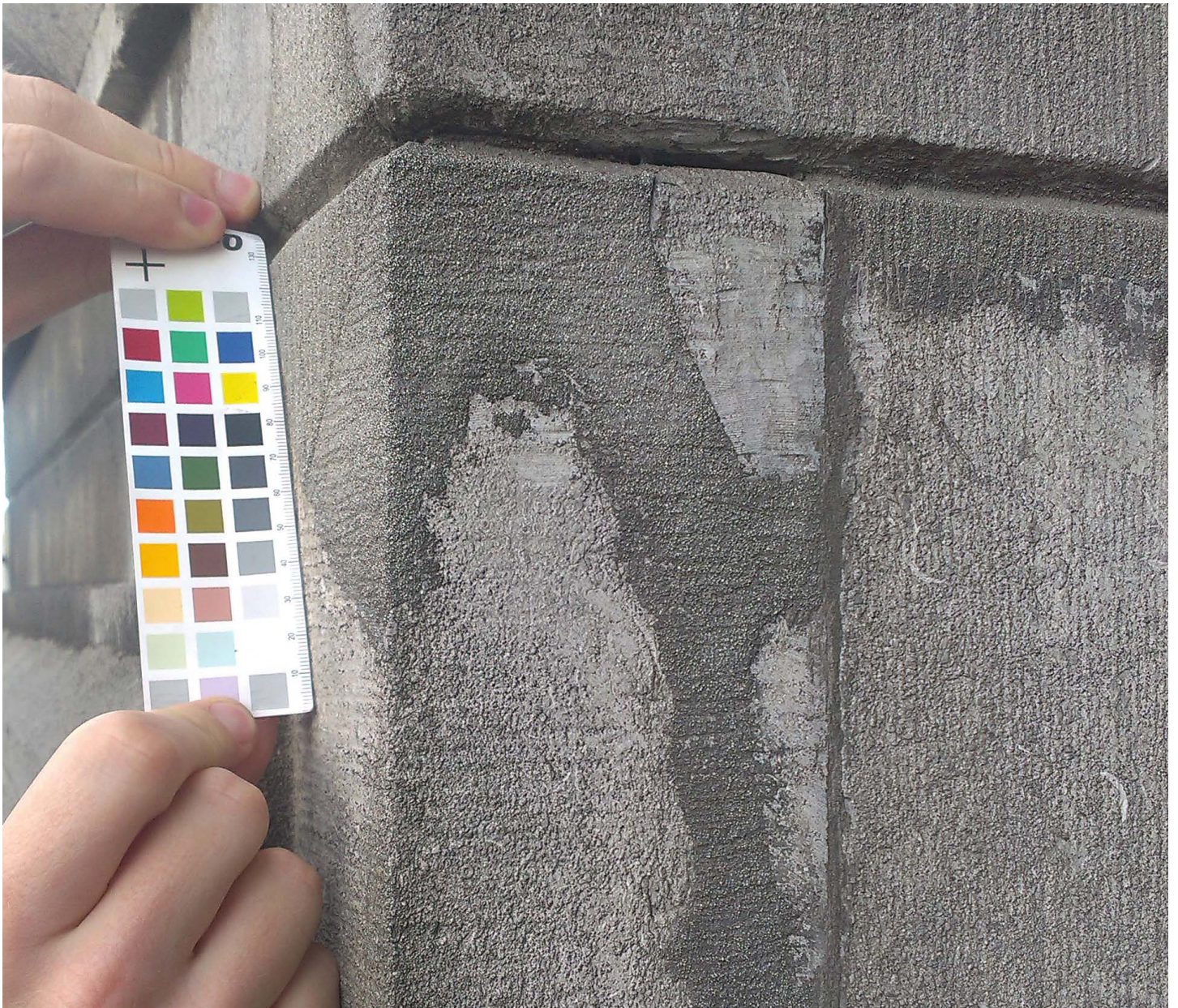
TU Delft

Barbara Lubelli, Rob van Hees,
Michiel van Hunen, Timo Nijland,
Wido Quist

20-12-2018

Steenreparatiemortels

Onderzoek naar het gedrag en de duurzaamheid
van reparatiemortels in het lab en de praktijk



Colofon

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen MonumentenKennis, de programmatische samenwerking tussen TU Delft, RCE & TNO.

Auteurs:

Barbara Lubelli¹, Rob van Hees¹, Wido Quist¹, Michiel van Hunen², Timo Nijland³

1. Technische Universiteit Delft
2. Rijksdienst voor Cultureel Erfgoed
3. TNO

De auteurs willen graag Hendrik-Jan Tolboom (RCE) bedanken voor het deelname aan het onderzoek, Rob van Zweet (TNO) voor het uitvoeren van de mechanische testen in het laboratorium, Ruben Klinkenberg en Ernst des Bouvrie (TU Delft) voor de bijdrage aan het verwerken van de data in kaarten en grafieken en Jacqueline van Dam en Lola Kleindouwel (TU Delft) voor de vormgeving van dit rapport.

1	Inleiding	5
2	Historische ontwikkeling in de toepassing	7
2.1	Algemeen	7
2.2	Reparatie van beeldhouwwerk	8
2.2.1	Zeventiende-eeuwse recepten voor steenreparatiemortels	8
2.2.2	Sorel-cement en ciment metallique	8
2.2.3	Deckosit	11
2.3	Reparatie van bouwkundig werk	12
2.3.1	Portland cement	12
2.3.2	Asgaten in tufsteen	14
2.3.3	Geprefabriceerde mortels	14
2.3.4	Kunststofgemodificeerde of kunststofgebonden reparatiemortels	16
2.4	Recente ontwikkelingen	16
3	Eisen aan reparatiemortels	19
3.1	Algemeen	19
3.2	Compatibiliteit - Optimale afstemming reparatiemortel op ondergrond	20
3.3	Aanpassen van de mortelsamenstelling op eigenschappen	21
3.3.1	Bindmiddel	21
3.3.2	Aggregaat	22
3.3.3	Additieven en toeslagstoffen	22
3.3.4	Laagdikte	23
3.4	Van eigenschappen tot eisen	23
3.5	Overzicht eigenschappen stenen en kant-en-klare reparatiemortels	26
3.6	Bespreking	29
4	Case studies	31
4.1	Algemeen	31
4.2	Enquête	31
4.2.1	Geënquêteerde	33
4.2.2	Producten	33
4.2.3	Criteria gebruikt voor de keuze van een reparatie mortel	33
4.2.4	Toepassing verschillende types reparatiemortels	34
4.2.5	Prestaties mortels	35

4.3	Toepassing in de praktijk	38
4.3.1	Casuïstiek in kaart	38
4.3.2	Casuïstiek in beeld.....	41
4.3.3	Rotterdam, Atlantic huis	59
4.3.4	Breda, de Grote of Onze-Lieve-Vrouwekerk.....	59
4.4	Bespreking en conclusies.....	60
5	Laboratoriumonderzoek naar eigenschappen van kant-en-klare steenreparatiemortels.....	63
5.1	Algemeen	63
5.2	Selectie van te meten eigenschappen	64
5.3	Materialen en methoden.....	66
5.3.1	Typen reparatiemortels	66
5.3.2	Aanmaken van de mortel	67
5.3.3	Maken van de proefstukken	68
5.4	Test- en analysemethoden	71
5.4.1	Microscopisch onderzoek (PFM)	71
5.4.2	Porositeit en poriegrootteverdeling gemeten met kwikporosimetrie (MIP)...	71
5.4.3	Vochttransporteigenschappen	72
5.4.4	Hygrische uitzetting	74
5.4.5	Hechting	74
5.4.6	Dynamische E-modulus	75
5.4.7	Buigtrek- en druksterkte.....	75
5.5	Resultaten	76
5.5.1	Polarisatie-en-fluorescentiemicroscopie (PFM)	76
5.5.2	Porositeit en poriegrootteverdeling gemeten met kwikporosimetrie (MIP)...	83
5.5.3	Waterabsorptie en droging	84
5.5.4	Hygrische uitzetting	87
5.5.5	Hechting	90
5.5.6	Buigtrek- en druksterkte.....	93
5.5.7	Dynamische E-modulus	93
5.6	Bespreking en conclusies.....	94
6	Besprekingen en conclusies.....	97
7	Literatuur.....	101
8	Bijlage - veelgestelde vragen	105

Een mortel kan worden gedefinieerd als een mengsel van één of meerdere bindmiddelen, toeslagstoffen en eventueel toegevoegde hulpstoffen, meestal aangemaakt met water.

Mortel wordt gebruikt om te metselen, te voegen, te pleisteren of aan te vullen en wordt daarnaast soms ook gebruikt als constructief materiaal.

Reparatiemortels zijn mortels die worden gebruikt in de conserveringspraktijk om ontbrekende delen van baksteen- of natuursteenblokken, beton, of natuursteen en terracotta ornamenten of beeldhouwwerk aan te vullen. Mortels kunnen ook als reparatiemortels beschouwd worden wanneer deze zijn aangebracht op metselwerkgevels om de samenhang ervan te vergroten. Het doel van de reparatie kan functioneel (het voorkomen van verdergaand verval) en/of esthetisch (het verbeteren van de uitstraling) van aard zijn.

In de Nederlandse conserveringspraktijk worden reparatiemortels regelmatig gebruikt, met wisselende resultaten met betrekking tot compatibiliteit met het bestaande en duurzaamheid van de reparatiemortel zelf. Tegenwoordig zijn er diverse verschillende geprefabriceerde reparatiemortelproducten beschikbaar; daarnaast gebruiken conservatoren/beeldhouwers zelf-samengestelde mortels.

Informatie over de eigenschappen van reparatiemortels zijn schaars; daarnaast hangt het gedrag van de reparatiemortel in de praktijk niet alleen af van deze eigenschappen, maar ook van de situatie (functie, omgevingscondities zoals vocht- en zout-belasting, aanbrengcondities, etc.) waarin deze gebruikt wordt.

Bestaande richtlijnen definiëren enkele criteria voor de keuze voor een geschikte reparatiemortel maar, naast het feit dat deze richtlijnen vaak erg brede eisen stellen, bestaat er weinig validatie op basis van laboratorium- of praktijkonderzoek.

Het blijft dus moeilijk voor de gebruiker om uit het grote aantal opties, de meest geschikte reparatiemortel te kiezen.

Dit onderzoek, opgezet binnen het samenwerkingsverband MonumentenKennis, heeft als uiteindelijk doel een methodologie te ontwikkelen, die de verantwoordelijke voor een interventie helpt bij het kiezen van een geschikte reparatiemortel.

Om dit doel te bereiken zijn de volgende onderzoeksstappen gezet:

- Literatuuronderzoek naar typen reparatiemortels en hun gebruik in de Nederlandse conserveringspraktijk, van de 17e eeuw tot nu;
- Literatuuronderzoek naar bestaande criteria voor en eisen aan reparatiemortels;
- Archiefonderzoek, enquêtes, interviews en inspectie van casussen om zo het type mortels gebruikt in de recente conserveringspraktijk zo veel mogelijk in kaart te brengen en daardoor meer inzicht te krijgen in hun gedrag;
- Laboratoriumonderzoek om de eigenschappen van vaak gebruikte (kant-en-klare) producten vast te stellen;
- Het formuleren van aangepaste criteria (inclusief eisen aan de mortel) voor de keuze van een reparatiemortel, op basis van de resultaten uit het onderzoek.

2.1 Algemeen

Mortels in de breedste zin worden reeds eeuwen gebruikt in het bouwen. Mortels worden primair gebruikt om steenachtige onderdelen aan elkaar te plakken tot een samenhangende constructie die aan de wensen van sterkte, draagvermogen en afscheiding voldoet. Het is een kleine stap van dit vul- en hechtmiddel naar pleisterwerk. In het geval van pleisterwerk wordt de mortel – allicht anders van samenstelling – gebruikt om een oppervlak of te werken; om het oppervlak dichter, gladder en/of mooier te maken. In zekere zin zou je pleister hier als een soort reparatiemortel kunnen beschouwen, omdat met het pleisteren ook de oneffenheden in het oppervlak worden gevuld en hiermee worden “gerepareerd”. Het pleisteren, in dit geval cosmetisch repareren, van steenachtige constructies had vaak ook tot doel om interventies aan het oog te onttrekken. Zeker in de negentiende eeuw zijn er vele voorbeelden waar historische gebouwen werden “aangesmeerd” om de samenhang te vergroten. Bij gebrek aan financiële middelen of visie om het herstel uit te voeren met de juiste natuur- of baksteen werd periodiek onderhoud gepleegd door het aansmeren met mortel (figuur 1).



Figuur 1: Zwaar waterbelaste en/of zwaar gedegradeerde onderdelen werden in de negentiende eeuw regelmatig aangesmeerd met (cement)mortel, zoals uit oude onderhoudsbestekken en oude foto's blijkt. (foto: 1905, Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed OF-03057)

Dit “aansmeren” van oppervlakken is één van de twee lijnen waarlangs reparatiemortels zich hebben ontwikkeld. De ander lijn is die van het aanvullen en repareren van beeldhouwwerk of geprofileerd werk. Hierover werd reeds in de zestiende en zeventiende eeuw gepubliceerd.¹ Vanwege de hernieuwde interesse in de oudheid en alle archeologie die daarmee samenhang aan het einde van de negentiende eeuw werd het vraagstuk van aanvullen en repareren ook in een museale context weer actueel.

Een derde, minder frequent gebruik van reparatiemortels betreft het repareren van grote holten en gaten in sommige natuursteensoorten, zoals tufsteen, voordat ze daadwerkelijk worden geplaatst.

In de volgende paragrafen wordt de ontwikkeling van deze drie verschillende manieren van gebruik van steenreparatiemortels besproken; daarnaast worden de meeste relevante typen beschreven.

2.2 Reparatie van beeldhouwwerk

Het herstellen van beeldhouwwerk heeft altijd tot doel gehad om de leesbaarheid van het beeld, van de vormen te vergroten. Hier speelt altijd een grote architectuurhistorische en kunsthistorische discussie over het wel of niet aanvullen en als het gekozen wordt voor aanvullen: hoe dan. Hierover is ook het nodige geschreven. Over de typen mortels die daadwerkelijk werden gebruikt is veel minder documentatie beschikbaar. Hierna worden een aantal typen mortel besproken, zonder dat volledigheid is nagestreefd.

2.2.1 Zeventiende-eeuwse recepten voor steenreparatiemortels

Danesi & Gambardella (2005) refereren aan de boeken van Borghini (1584) en Del Riccio (1597) voor wat betreft de receptuur voor een “mortel” voor het repareren of aanvullen van marmer. Borghini beschrijft een mix van colofonium (pijnboomhars) en ruwe was in de verhouding 48:1 en marmerpoeder. Elders beschrijft Borghini een andere verhouding en wordt er ook nog terpentijn aan het mengsel toegevoegd. Del Riccio noemt ook terpentijn en colofonium met daarnaast gele was en mastiek zonder de verhoudingen te duiden. Om de mix te kunnen maken en het geheel te vormen diende het mengsel te worden verwarmd en warm te worden verwerkt.

2.2.2 Sorel-cement en ciment metallique

Magnesia-cement, ook wel Sorel-cement genoemd, naar de uitvinder Stanislaus Sorel (1803-1871) werd vanwege de hoge bindkracht gebruikt voor houtcement-vloeren

(xylolith), kunstmarmer en vermoedelijk ook als reparatiemortel (figuur 2). Sorel patenteerde, samen met Emil Ménier de productie van magnesia-cement in 1866.² De belangrijkste grondstof voor Sorel-cement is magnesiet ($MgCO_3$) dat onder andere gewonnen werd op het Griekse eiland Euboea. Het uiteindelijke bindende effect wordt bereikt door het mixen van een verzadigde $MgCl_2$ -oplossing met MgO -poeder. Voor recent onderzoek naar de werking van dit soort bindmiddelen, zie onder andere ³.

EERSTE

EUBOEA MAGNESIT-Exploitation der
Manthoudi Groeven.

MAGNESIA-CEMENT van hooge bindkracht, voor fabricatie van kunstmarmer, Xylolith-vloeren etc.; eenig afdoend materiaal voor absolute wering van vochtig uitslaande muren, kelders etc., desgewenscht met bijlevering van **Gegarandeerd ijzervrijen Chloormagnesium.**

Prima **HOUTMEEL** gegarandeerd droog en vrij van zuren voor technische doeleinden.

HAAG & Co. Amsterdam, Gieterstraat 8.
Telegramadres: „Weichsel”, Telefoon 818.

Figuur 2: Reclame voor magnesia-cement. (uit: Bouwkundig weekblad jg 22, 1902)

Er bestond een reeks toepassingen, waaronder kunststeen (o.a. gepatenteerd door Q.A. Gilmore in de VS in 1871) en vloeren.⁴ In hoeverre magnesia cement is gebruikt voor reparaties aan steenachtige materialen is niet duidelijk. Wel is bekend dat een vergelijkbaar product, op basis van zinkoxyde (in het Frans ciment metallique genoemd, wat niet verward moet worden met ferro-cement wat staat voor een gewapende mortel of pleister waarmee in de eerste helft van de twintigste eeuw vele toepassing werden ontwikkeld, met name door Pier Luigi Nervi), gebruikt is voor reparatiemortels. Sorel had dit al eerder, in 1853 ontdekt.⁴ In ieder geval aan de collonaden van het Louvre: “Een nieuw bindmiddel voor steen. Bij de restauratie van de colonnaden aan het Louvre werd door prof. Brune een nieuw metaalkit aangewend, dat was samengesteld als volgt: twee deelen zinkoxyde, twee deelen fijngeklopte harde kalksteen en een deel fijn zand worden goed doorengemengd en zoonoodig met oker gekleurd. Dit poeder wordt vervolgens met een vloeistof vermengd, bestaande uit een oplossing van zink in zoutzuur, waaraan nog salmiak ter

hoeveelheid van 1/6 der opgeloste hoeveelheid zink moet toegevoegd worden; het mengsel wordt eindelijk met 2/3 van zijn volume aan water verdund. Bij het gebruik verhardt het zeer spoedig tot eene vaste massa".⁵ Voor modern onderzoek naar de werking van dit bindmiddel, zie onder andere ^{6,7}.

Uit de pers is een toepassing van 'metaalkit' aan het Koninklijk Paleis te Amsterdam bekend. In 1915 is het timpaan aan de voorzijde en in 1917 het timpaan aan de achterzijde gerepareerd door de Brusselse prof. Albert Aerts. Aangezien hier de term "metallisch cement" wordt gebruikt is het vermoeden dat hier ook gebruik is gemaakt van een mortel op basis van zinkoxide.⁸ De applicatie ging als volgt in zijn werk: *'Van een weinig verweerd gedeelte wordt een afdruk genomen, daarna wordt het zieke gedeelte voorzichtig weggehakt tot aan het gezonde marmar. Nu wordt het tegenmodel er weer tegenaan gebracht, en in dien hollen vorm wordt het cement metallique gegoten. Dunne koperen doken zijn nog ten overvloede aangebracht voor de zekere verbinding tusschen marmar en cement. Het herstelde gedeelte toont dus in dit geval geen nieuwen vorm ; alleen wordt door het vervangen van het zieke deel door een hard materiaal, het verder voortwoekeren belet. Hoelang dit cement weerstand biedt tegen de weersinvloeden is niet bekend. De ondervinding strekt zich pas uit over een 15-tal jaren. Er zijn enkele plekken, die zwaarder zijn verweerd b.v. de snuiten der paarden, de bek van den kaaiman, enkele deelen van sommige koppen, enz.'*⁹

De toepassing was overigens verre van onomstreden: *'Voor het herstellen der frontispiesen wil het Rijk gebruik maken van een cement, die door een zekeren Professor Aerts te Brussel is uitgevonden. Als het de bedoeling mocht zijn de Avendersteen, die verdween, door deze cement te vervangen, dan zou dit voor het werk van een groot kunstenaar als Aert Quellijn zeer te betreuren wezen. In de negentiende eeuw heeft men zulke „restauraties" soms verricht, doch tegenwoordig wordt dit, terecht, als vandalisme gebrandmerkt. Een vernieuwing der verdwenen of beschadigde deelen in Avendersteen zou bij kunstwerken, als de frontispiesen zijn, niet minder vandaalsch wezen ! Daarom is het te hopen, dat men er zich toe bepalen zal de frontispiesen goed te reinigen, deelen, die los mochten' zitten, met cement of op andere wijze te bevestigen en maatregelen te nemen, die verdere verontreiniging onmogelijk maken. De moderne techniek kent middelen, die het verweeren van steen tegengaan en die hier ook gevoeglijk aangewend zouden kunnen worden. Zekerheid dient echter gegeven te worden, dat geen vernieuwingen in cement zullen geschieden. Het zou onverantwoordelijk zijn, wanneer Quellijn's frontispiesen op zulk een onwaardige wijze werden opgelapt'*.¹⁰ Aerts gebruikte overigens niet alleen 'metallisch cement', maar ook gewone op Portland cement gebaseerde mortel: *'Het Handelsblad gaf*

een interview met den hoogleeraar en daaruit blijkt, dat hij zich ertoe bepaalt te behouden en te versterken, wat bestaat, wat gebeurt met een soort metallisch cement. Alleen een vrouwenhand, links van de middenfiguur, welke hand een kroon vasthoudt, ontbreekt, die zal er bij worden gemaakt, vermoedelijk met Portland-cement en geperst rijnzand, volgens het stelsel Blaton-Aubert'.¹¹

Het tegenwoordig nog gebruikte Monulit is gebaseerd op hetzelfde werkingsprincipe.

2.2.3 Deckosit

Behalve puur minerale mortels (zoals ciment metallique, hydraulische kalk of Portland cement) verschijnen in de eerste decennia van de 20e eeuw ook andere producten, bijvoorbeeld met nitrocellulose als bindmiddel. Een voorbeeld hiervan is Deckosit, een product op basis van nitrocellulose en (zand)steenmeel dat in dunne lagen van 1 a 2 mm werd aangebracht. Het wordt uitgebreider beschreven in Nijland en Quist 2018.¹² De Delftse hoogleraar Chr. Visser maakte in 1937 een studiereis naar Duitsland 'in opdracht van de Minister van Onderwijs, Kunsten en Wetenschappen ter bestudeering van het Deckosit-procedé'. Hij kwam tot de conclusie dat het procedé tot zeer goede resultaten leidde. Wanneer de foto's van Beeldhouwwerk uit Kassel in de collectie van de RCE – vermoedelijk door prof. Visser meegebracht van zijn reis - worden bekeken lijkt het hier inderdaad om een reparatiemortel te gaan (figuur 3). Tot in de jaren'40 wordt er mee geadverteerd (figuur 4).



Figuur 3: Beeldhouwwerk voor en na restauratie door behandeling met Deckosit. Beeldhouwwerk te Kassel. (Foto's behoren vermoedelijk bij de dienstreis van Chr. Visser naar Kassel in 1937, Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, 20410061)



Figuur 4: Advertentie van steenhouwerij Weegewijs uit het Tijdschrift van de Bond Heemschut van 1 augustus 1943 voor herstelling met Deckosit, waarin duidelijk sprake is van het 'herstellen van beeldhouwwerk'.

2.3 Reparatie van bouwkundig werk

Veel vroege foto's van historische gebouwen laten dichtgesmeerde (steen)oppervlakken zien. In veel gevallen zullen dit nog deels de oorspronkelijke afwerkingen betreffen, maar voor een groot deel zijn dit ook "reparaties" met als doel verder verval te voorkomen. Interessant in deze context is het artikel van A.W. van Dam uit 1842, herdrukt in de speciale editie van het Bouwkundig Weekblad Architectura van 29 april 1939 ter ere van het afscheid van Jan Kalf als directeur van het Rijksbureau voor de Monumentenzorg. In dit artikel gaat Van Dam tekeer tegen de bepleistering van de Nieuwe Kerk te Amsterdam en in het verlengde hiervan tegen allerhande species die aan het exterieur van historische gebouwen worden gesmeerd. Hierin eechoot natuurlijk de laat-negentiende-eeuwse wens tot ontleistering en het tonen van het naakte materiaal reeds door, maar in de kern gaat het ook over de duurzaamheid van het aansmeren van pleister en (bak)steen met een (reparatie)mortel.

2.3.1 Portland cement

Het ligt voor de hand om te veronderstellen dat met het verschijnen van Portland cementgebonden buitenpleisters in de 19e eeuw ook cementgebonden steenreparaties, al dan niet vlakvullend, hun intrede doen. Dergelijke reparaties zijn bouwhistorisch zelden gedocumenteerd. Aangezien het vaak zelfsamengestelde (in tegenstelling tot fabrieksmatig geprefabriceerde) mortels zullen zijn geweest, zijn recepturen ook amper gedocumenteerd. Er is aanleiding om te veronderstellen dat het met enige regelmaat gebeurde. Zo zijn aan de oostzijde van het noordtransept van de Domkerk in Utrecht vlakvullende cementgebonden mortelreparaties van tufsteen aanwezig, die waarschijnlijk zijn aangebracht tijdens de restauratie onder W.J. Kamperdijk vanaf 1850 (figuur 5). Aan de lantaarn van de Domtoren zijn nog, deels vlakvullende, mortelreparaties op natuursteen aanwezig waarin

baksteen is gebruikt als toeslag (figuur 6); deze zijn waarschijnlijk aangebracht tijdens de restauratie onder leiding van F.J. Nieuwenhuis in de periode 1875-1920.



Figuur 5: Vlakvullende mortelreparaties van tufsteen aan de Domkerk in Utrecht, waarschijnlijk aangebracht tijdens de restauratie onder W.J. Kamperdijk vanaf 1850.¹³



Figuur 6: Mortelreparaties op natuursteen aan de lantaarn van de Domtoren in Utrecht, waarschijnlijk aangebracht tijdens de restauratie onder leiding van F.J. Nieuwenhuis in de periode 1875-1920.

Naast de gewone cementpleisters kwamen er in de jaren '30 van de twintigste eeuw ook mortels op de markt, die bedoeld waren als muurpleister voor natuursteenimitatie en voor kunststeen, gemaakt op basis van witte Portland cement, soms 'gewoon', bijvoorbeeld voor de imitatie van Namense steen, soms met gemalen natuursteen als Cararra marmer of Euville kalksteen (respectievelijk als Simili Carrara en Simili Euville op de markt gebracht).¹⁴ Hoewel het voor de hand ligt te veronderstellen dat dergelijke mortels ook voor steenreparatie gebruikt zijn, bijvoorbeeld voor beelden, is onduidelijk of dit ook daadwerkelijk gebeurd is.

Een interessante manier om natuursteenwerk te repareren wordt in 1929 door A.R. Powys, de toenmalige secretaris van de Society for Protection of Ancient Buildings (SPAB) gegeven in *Repair of Ancient Buildings*. Deze manier van repareren gaat verder dan het door Van Dam zo verafschuwde aansmeren met mortel: de beschadigde steen wordt uitgehakt en het zo ontstane gat wordt netjes dichtgemetseld met gebakken tegels die daarna worden afgepleisterd (figuur 7). Met deze methode wordt vooral ingezet op de esthetische kant van het repareren en wordt minder belang gehecht aan het behoud van zoveel mogelijk origineel materiaal.

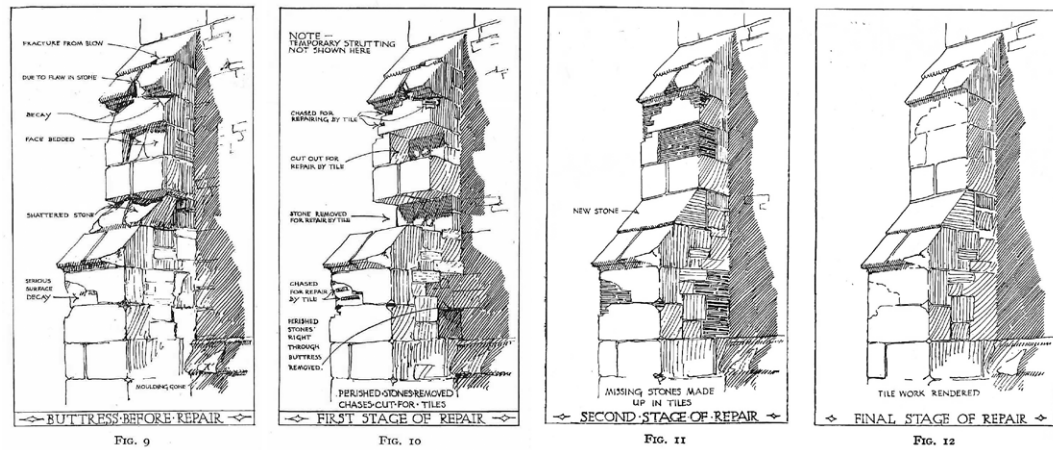
2.3.2 *Asgaten in tufsteen*

Een bijzondere vorm van steenreparatie is het repareren van stenen voordat ze daadwerkelijk worden geplaatst. A.L.W.E. van der Veen, natuursteenadviseur voor de Rijkscommissie schrijft in 1927 bijvoorbeeld over het vullen van asgaten in tufsteen: "... *Midderwijl wordt de goede soort verwerkt aan den toren te Amersfoort. Wel had men hier fijner materiaal verkozen dan dit jaar beschikbaar is, doch men vermijdt de moeilijkheden door de figuren naar de ashgaten te voegen en zoo dit niet gaat, doch alleen bij hooge uitzondering, de grootste ashgaten vol-te-zetten met een poreuse massa, gevormd uit het gestampte materiaal en zoo min mogelijk cement*".¹⁵ Van enkele blokken Ettringer tufsteen in de entreepartij van BK-City te Delft lijken de gaten op deze wijze te zijn gevuld (figuur 8). Deze praktijk vindt overigens de afgelopen decennia op grote schaal plaats bij het stoppen van travertijn en andere poreuze kalksteen in de nieuwbouw, voor bijvoorbeeld vloeren.

2.3.3 *Geprefabriceerde mortels*

Net als elders in de bouw hebben de laatste decennia van de 20e eeuw ook geprefabriceerde reparatiemortels hun intrede gedaan in de natuursteenreparatie. Deze kunnen

mineraal (lees: cement) zijn, of kunststofgemodificeerd of -gebonden. In de categorie minerale mortels zijn eerst Mineros (met name voor zandsteen)¹⁶ en daarna Alja M70 van Jahn, onder andere veelvuldig gebruikt bij de restauraties van het Vijf Kerken Restauratieplan in Utrecht in de jaren '70 en '80, bekende namen^{17, 18}.



Figuur 7: De reparatie van natuursteen met andere materialen dan natuursteen volgens A.R. Powys (uit: Powys 1929).



Figuur 8: Reparatie van Ettringer tufsteen aan de entree van BK-City. Onduidelijk is wanneer deze gaten zijn gevuld en waarmee.

2.3.4 *Kunststofgemodificeerde of kunststofgebonden reparatiemortels*

Net als elders in de bouw hebben de laatste decennia van de 20e eeuw ook kunststofgemodificeerde of kunststofgebonden reparatiemortels (b.v. epoxy) hun intrede gedaan in de natuursteenreparatie. Bij de recente proefrestauratie aan het stadhuis van Antwerpen kwamen deze bijvoorbeeld tevoorschijn. Ondanks dat ze met marmergruis zorgvuldig op kleur waren gemaakt tijdens een eerdere restauratie van de gevel, blijken ze (technisch) niet compatibel te zijn met de natuursteen en worden ze allemaal verwijderd (figuur 9). Tegenwoordig worden kunstharsmortels voornamelijk nog gebruikt bij de reparatie van zeer dichte en harde steensoorten die zwaar worden belast door belopen (vloeren en trappen). Daarnaast worden de mortels bijvoorbeeld gebruikt om beschadigingen ontstaan bij vervoer of bij plaatsing van uitgebroken doken in gevelplaten (figuur 10).

2.4 **Recente ontwikkelingen**

Met het breed beschikbaar komen van fabrieksmatig geprefabriceerde mortels, specifiek bedoeld voor het repareren van steenachtige materialen vanaf de jaren '60 van de vorige eeuw heeft zich een ontwikkeling in gang gezet waarbij een groot scala aan mogelijkheden voor herstel beschikbaar is. De discussie over wel of niet repareren met een mortel wordt gevoerd door diverse betrokken deskundigen: restauratoren, steenhouwers, architecten, monumentenzorgers, eigenaren en anderen. Hierbij gaat het niet alleen om de vraag of er gerepareerd moet worden, maar ook over de vraag met welke mortel.

Er speelt altijd een discussie tussen het gebruik van fabrieksmatig geprefabriceerde mortels of het gebruik van zelf-samengestelde mortels. Was er in de jaren '60 van de twintigste eeuw slechts één kant-en-klare reparatiemortel beschikbaar (Mineros) die in alle gevallen werd toegepast, anno 2018 zijn er diverse producten op de markt, gebaseerd op een grote variëteit aan bindmiddelen en daarnaast heeft er veel ontwikkeling plaatsgevonden in het zelf samenstellen van mortels op basis van kalk of cement (zie verder § 5.3).



Figuur 9: Kunsthars met marmerfragmenten toegepast als herstelmortel van Belgisch rood marmer aan het monument Willem I in Den Haag.

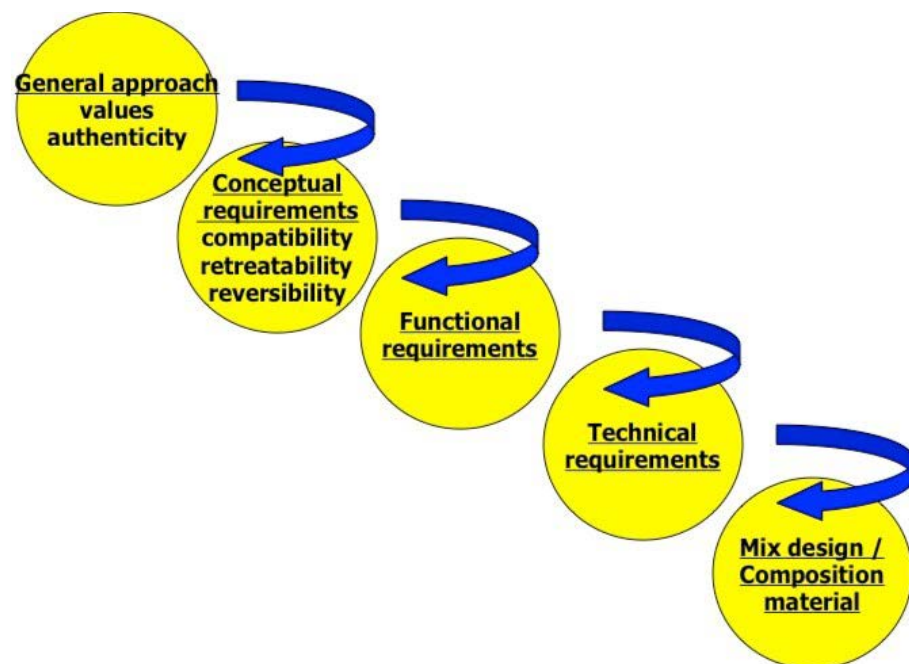


Figuur 10: Diverse stukken "Aziatische hardsteen" werden reeds gerepareerd geleverd voor en geplaatst in het Mekelpart te Delft. Overigens waren de reparaties van dusdanige aard dat de mortel binnen enkele jaren allemaal verdwenen is.

In dit deel worden criteria voor het kiezen van reparatiemortels en de resulterende technische eisen, zoals geformuleerd in recente literatuur, kritisch besproken. Deze zullen vervolgens als referentiekader gebruikt worden bij het beoordelen van het gedrag van reparatiemortels in het laboratorium en in de praktijk.

3.1 Algemeen

Ontwerp en toepassing van de steenreparatiemortel dienen te passen binnen een benadering waarbij rekening wordt gehouden met algemene waarden en conceptuele, functionele en technische eisen, zie ook ¹⁹.



Figuur 11: Eisen gestelde aan reparatiemortels.¹⁹

Verder dient, zoals bij andere instandhoudingsingrepen, ook bij steenreparatie een aantal stappen vooraf te worden uitgevoerd ten einde zeker te zijn van een adequate ingreep. Het gaat dan in de eerste plaats om het uitvoeren van een vooronderzoek en de daaruit voortkomende voorbereidende werkzaamheden; daarbij gaat het om de volgende stappen:

- Opname van de aangetaste constructies en materialen en hun staat van conservering
- Vaststellen van het type natuursteen of baksteen
- Vaststellen van de oorzaak van de aantasting
- Zoveel mogelijk wegnemen van de oorzaak, bij voorbeeld bestrijden van eventuele vocht- en zoutbronnen

Vervolgens moet overwogen worden of voor reparatie of vervanging dan wel voor niet ingrijpen wordt gekozen en in geval van de keuze voor een reparatiemortel of een kant-en-klaar product dan wel een op maat samengestelde reparatiemortel zal wordt toegepast. Er wordt nadrukkelijk aanbevolen met de geselecteerde reparatiemortels proefvlakjes te maken.

3.2 Compatibiliteit - Optimale afstemming reparatiemortel op ondergrond

Vooropgesteld dat het doel niet is om door middel van een extreem contrast de reparatie zichtbaar te houden, zal in het algemeen worden gestreefd naar een technisch en esthetisch compatibele ingreep. Dat wil in technische zin zeggen dat de ingreep niet mag leiden tot een versnelde aantasting van het originele materiaal en dat de ingreep zelf zo duurzaam mogelijk moet zijn²⁰; in esthetische zin betekent het dat kleur en textuur van de reparatie moeten passen bij die van het originele materiaal.

Redenerend vanuit de hier geschetste compatibiliteitsgedachte is het voor een optimale afstemming op de ondergrond belangrijk dat wordt voldaan aan de volgende eisen:

- kleur en textuur zoveel mogelijk overeenkomend met die van de ondergrond
- drooggedrag en water-absorptie ongeveer gelijk aan die van de ondergrond
- thermische en hygrische uitzetting: ongeveer gelijk aan die van de ondergrond
- porositeit: ongeveer gelijk aan die van de ondergrond
- sterkte en stijfheid: geringer dan die van het origineel
- krimp-scheurtjes dienen te worden vermeden
- er dient voldoende hechting aan de ondergrond te zijn. De hechting moet in iedere geval niet te sterk zijn, om te voorkomen dat wanneer de reparatie loskomt of verwijderd moet worden, dit geen schade aan de achterliggende materiaal oplevert.

3.3 Aanpassen van de mortelsamenstelling op eigenschappen

De juiste samenstelling en verhouding van de verschillende mortelonderdelen bepaalt in hoeverre aan de genoemde eisen wordt voldaan. Om aan de genoemde eisen te voldoen kan gevarieerd worden met de verschillende onderdelen van de mortel. De belangrijkste daarvan zijn bindmiddelen, aggregaten (vulmiddel en/of het zand), additieven (zoals plastificeerders) en toeslagstoffen (zoals pigmenten).

3.3.1 Bindmiddel

Het bindmiddel bepaalt in grote mate de mechanische en fysische eigenschappen en tevens voor een deel de esthetische. Daarnaast kan het type bindmiddel invloed hebben op de chemische compatibiliteit van een mortel. Zo kan cement bijvoorbeeld relevante hoeveelheden alkali bevatten die vervolgens tot het ontstaan van zoutschade kunnen leiden.²¹

In tabel 1 is een kwalitatieve vergelijking gemaakt tussen bindmiddeltypen voor een aantal technische eigenschappen.

Tabel 1: Eigenschappen toegepaste bindmiddelen (ontleend aan ²²); 1 zeer laag...6 zeer hoog.

–	Algemeen bindmiddel type						
	Lucht-kalk	Hydraulische kalk / NHL 2, 3.5, 5	Tras-kalk	Natuurlijke en Romeinse cementen	Calcium-silicaat cementen (Portland-cement)	Epoxy	Acrylaten
Hechting	3	3-5	3-4	4-6	5-6	4-6	3-6
Sterkte (druk-, buig-, trek-)	2	2-5	2-4	4-6	5-6	4-6	3-6
E-modulus	1	1-4	1-3	4-6	5-6	4-6	3-6
Weerstand waterpenetratie	3	3-4	3-4	5-6	5-6	5-6	5-6
Vorstbestandheid	2	3-4	3-4	4-6	4-6	5-6	5-6
Thermische dilatatie	1	1	1	1	1	5-6	5-6
Waterdamp transport	5	4-5	3-4	3-5	2-4	1-3	1-3
Esthetisch	Afhankelijk van specifieke eisen						

Cement zorgt voor grotere stijfheid (E-modulus) en hogere sterkte dan (lucht)kalk. Hydraulische kalk en tras-kalk geven een hogere sterkte en stijfheid dan luchtkalk en een lagere dan cement. Donkergrijze portlandcement is esthetisch moeilijk in lijn te brengen met een witte kalksteen, terwijl kalk minder goed zal aansluiten op zandsteen.

Een bijzonder bindmiddel in dit verband is 'Romeins' cement, ook wel Parker's cement, een uit de 19e eeuw daterend en onlangs weer herontdekt snel verhardend bindmiddel, qua samenstelling een natuurlijk hydraulisch cement, dat op aanzienlijk lagere temperatuur dan Portlandcement wordt geproduceerd en uitstekende eigenschappen heeft voor het maken van decoraties en reparaties.

3.3.2 *Aggregaat*

Het aggregaat bestaat het vaakst uit zand; behalve silicium zand kunnen ook gebroken kalksteen, glasdeeltjes, vulkanische materialen als bims (puimsteen), perliet en dergelijke als aggregaat worden toegepast;

Een evenwichtige korrelgradering helpt om de krimp van de mortel te beperken.

De korrelgradering van het zand en de bindmiddel-zandverhouding zijn van grote invloed op de sterkte en de soortelijke massa van de mortel en op zijn porositeit en poriegrootteverdeling.

Om compatibiliteit te kunnen bereiken moet het aggregaat of het 'zand' qua vorm, afmeting en kleur van de korrels overeenkomen met het origineel materiaal.

3.3.3 *Additieven en toeslagstoffen*

Additieven, dat wil zeggen stoffen die in kleine hoeveelheden worden toegevoegd om het gedrag van de mortel te verbeteren, kunnen de fysische en mechanische eigenschappen van zowel de verse als de verharde mortel sterk beïnvloeden. Bij voorbeeld toepassing van luchtbelvormers of plastificeerders vermindert de waterbehoefte en daarmee uiteindelijk de krimp van de mortel, terwijl ook de vorstbestandheid wordt verbeterd.

Een voorbeeld van toeslagstoffen zijn pigmenten. Deze worden toegevoegd om de kleur van de mortel aan te passen om die van de ondergrond. Natuurlijke pigmenten hebben de voorkeur boven industriële pigmenten; de laatste zijn vaak te intens van kleur, wat het vervolgens moeilijk maakt de natuurlijke kleur van de steen te reproduceren.²³

Hoe dan ook is het afstemmen van de kleur van de mortel op die van de steen een moeilijk klus, omdat de kleur van de natte mortel anders is dan die van de verharde mortel. Daarnaast kan de kleur van de mortel met de tijd veranderen, mede door instabiele pigmenten.

3.3.4 Laagdikte

De laagdikte van een reparatie is in de eerste plaats afhankelijk van de aantastingsdiepte. Daarbij gaat het om de diepte vanaf het oppervlak tot de nog gezonde steen. Wanneer de aantasting erg diep is zal de mortel vaak in meerdere lagen, van maximaal 15-20 mm, moeten worden gewerkt. Moeten verschillende lagen worden toegepast dan kan gekozen worden voor een per laag verschillende grootte van het aggregaat. De diepst gelegen laag heeft daarbij het meest grove aggregaat. Dit vermindert het risico van krimp(scheuren) in de mortel.

Soms, bij dikkere en dus zwaardere reparaties, wordt door mortelproducenten geadviseerd om de mortel te bevestigen met verankering (RVS, brons, kunststof, messing of glasfiberstaven, ook afhankelijk van het type mortel).

3.4 Van eigenschappen tot eisen

Er zijn diverse publicaties die (vooral) technische eisen geven waaraan steenreparatiemortels dienen te voldoen. Hierna volgt een kort overzicht van enkele belangrijke bronnen.

Het WTA Merkblatt 3-11-97/D²⁴ : Steineranzung mit Restauriermörteln stelt eisen aan:

- E-Modulus
- Druksterkte
- Capillaire wateropname
- Waterdampdiffusieweerstand
- Thermische / hygrische uitzetting

De gestelde eis is simpel en gelijk voor alle technische eigenschappen: deze moeten kleiner of gelijk zijn aan die van de steen. Ook kleur en textuur moeten vrijwel gelijk aan die van de steen zijn.

Omdat er geen mate van acceptabele afwijking is aangegeven, en daarbij de relatieve betekenis van elke eis afhankelijk is van de situatie, kunnen deze richtlijnen de keuze van een geschikte reparatiemortel slechts beperkt ondersteunen.

Sasse & Snethlage stellen in hun publicatie uit 1997²⁵ de volgende technische eisen:

- dynamische E-modulus
- druksterkte
- thermische uitzetting
- waterabsorptiecoëfficiënt (WAC)

- waterdamp diffusieweerstandsgetal
- hechtsterkte

De eisen worden geformuleerd als percentage van de waarde (hoogte) van de betreffende eigenschap van de ondergrond.

Enkele jaren later publiceert Snethlage opnieuw een lijst van eisen aan reparatiemortels²³ waarin deze eisen iets zijn aangepast in vergelijking met de eerdere versie.

Delgado & Grossi²⁶ formuleert eisen voor diverse soorten conserverings-interventies, waaronder steenreparatiemortels, in de vorm van incompatibiliteits-risico's, die nog acceptabel worden geacht. Naast eisen die aan de mortel zelf gesteld worden (zoals bijvoorbeeld goede verwerkbaarheid, genoeg "open time", goed verhardingsgedrag onder droge en natte condities), worden ook compatibiliteitseisen geformuleerd; deze hebben betrekking op verschillende parameters (tabel 2).

Tabel 2: Eisen voor reparatiemortel

Materiaaleigenschappen	Symbol	Reparatiemortel
Dynamische E-modulus	E	≤80%
Druksterkte	β_{CS}	≤60%
Hydrische uitzetting	$\alpha_{hydrisch}$	50-100%
Thermische uitzetting	$\alpha_{thermisch}$	50-150%
Waterabsorptiecoëfficiënt	W	50-100%
Waterdamp diffusieweerstandsgetal	μ	50-100%
Pull-off sterkte	β_{POS}	0,5-0,8*

*)voor deze eigenschap wordt door de auteurs geen eenheid gegeven.²³

Deze aanpak is interessant omdat er een bepaalde waarde of gewicht aan de verschillende factoren wordt gegeven. De som van alle "scores" voor de verschillende eisen (hier genoemd "compatibiliteitsindicatoren") geeft een totale beoordeling van de compatibiliteit van de mortel en maakt de vergelijking tussen verschillende mortels eenvoudiger.

Isebaert et al, 2014²⁷ (tabel 3), maakt gebruik van het werk van Snethlage^{23, 28}, past sommige eisen aan (of vervangt deze door een algemeen “vergelijkbaar met die van de steen”) en voegt eisen toe over de totale porositeit (> 80% van die van de steen) en poriegrootteverdeling (vergelijkbaar met die van de steen). De korrelgrootteverdeling en minerale componenten van de mortel worden ook genoemd, maar hieraan worden geen eisen gesteld. Als laatste wordt het gedrag van de mortel in verouderingstesten (alleen met betrekking tot biologisch groei) genoemd; de mortel dient op een vergelijkbare manier als de steen te verouderen.

Tabel 3: Beoordeling van de compatibiliteit van reparatiemortels

Criteria	Compatibiliteitsindicatoren	Compatibiliteitsrisico's (beoordelingsscore) ^a
Chemische en mineralogische compositie	Type bindmiddel (S & R)	Soortgelijk → 0 Verschillend → 10
	Type aggregaat (S & R)	Soortgelijk → 0 Verschillend → 5
Open porositeit	Porositeit (S & R)	[0,9N _s < Nr < 1,1N _s] → 0 [0,7N _s < Nr < 0,9N _s] → 5 [Nr < 0,7N _s] → 10
Visuele eigenschappen	Totaal kleurverschil (ΔE^*) (S & R)	Lager dan 3 → 0 Tussen 3 en 5 → 5 Hoger dan 5 → 10
Thermische eigenschappen	Thermische uitzettings-coëfficiënt (ϵ) (S & R)	[0,9 $\epsilon_s \leq \epsilon_r \leq 1,1\epsilon_s$] → 0 [1,1 $\epsilon_s \leq \epsilon_r \leq 1,5\epsilon_s$] → 5 [$\epsilon_r \geq 1,5\epsilon_s$] → 10
Mechanische eigenschappen	Treksterkte	Waarden verschillend bij minder dan 10% → 0
	Druksterkte	Waarden tussen 10 en 50% hoger → 5
	Elasticiteitsmodulus (S & R)	Waarden hoger dan 50% → 10
Waterabsorptie gedrag	Waterabsorptiecoëfficiënt	Waarden verschillend bij minder dan 10% → 0
	Waterdampdoorlaatbaarheid	Waarden tussen 10 en 50% hoger → 5
	Drogingsindex (S & R)	Waarden hoger dan 50% → 10
Aanwezigheid van zouten	Zoutgehalte (S)	Vrij van zouten → 0 Schaarse aanwezigheid van zouten → 5 Zwaar beladen met zouten → 10

S, ondergrond; R, reparatiemortel

^aDe beoordeling wordt getypeerd voor 0, 5 en 10 als referenties voor lage, gemiddelde en hoge risico's, echter elke waarde tussen 0 en 10 kan worden toegepast.

Daarenboven stellen Isabaert et al een volgorde voor, waarin eigenschappen achtereenvolgens bepaald zouden moeten worden (tabel 4). De volgorde geeft ook het belang van de eigenschap aan bij het bepalen van de mortelcompatibiliteit: eigenschappen met een hogere rangschikking zijn volgens de auteur van meer belang. Het is onduidelijk waarom bijvoorbeeld de korrelgrootteverdeling, die als 1 wordt gerangschikt, met een (c), een waarde van minder belang, in de eisen wordt aangegeven. Op deze manier is het volgens de auteurs mogelijk in het beginstadium de belangrijkste eigenschappen te testen, zo nodig de samenstelling aan te passen en vervolgens de testen te herhalen totdat een geschikte mortel is gevonden. Dit alles natuurlijk bekeken binnen een optimale situatie, waarbij de mortel zelf wordt samengesteld en er voldoende budget en tijd beschikbaar is.

Tabel 4: Kritische eigenschappen in de ontwikkeling van een reparatiemortel.²⁷

Rangschikking	Eigenschap	Symbol	Testmethode	Aanbeveling	
1	Korrelgrootteverdeling	-		c	(b)
1	Minerale componenten	-		c	(b)
2	Waterabsorptiecoëfficiënt	WAC	EN 1015-18	50-100%	(a)
2	Waterdampdiffusieweerstand	μ		50-100%	(a)
2	Porositeit (open, totaal)	$P\%$	EN 1936	> 80%	(b)
2	Poriegrootteverdeling		micro-CT	d	(b)
3	Kleurverschil	ΔE	CIE L a b	50-150% [100%]	(b)
4	Dynamische E-modulus	Edyn	UPV	20-100% [60%]	(a)
4	Adhesie	R_a	EN 1015-12	0,5-0,8%	(a)
5	Thermische uitzettingscoëfficiënt	α	TMA	50-150% [100%]	(a)
5	Hygrische uitzettingscoëfficiënt	H		d	(b)
6	Druksterkte	R_c	EN 1015-11	20-100% [60%]	(a)
6	Treksterkte	R_t	EN 105-11	c	(b)
7	Verouderingstesten	-		d	(b)

Waarden tussen haakjes geven de aanbevolen waarde na 1 jaar aan (a) waarden uit (Sasse & Snethlage 1997); (b) Waarden voorgesteld door de auteurs. (c) Waarden van minder belang. (d) De waarde is vergelijkbaar met die van de steen.

3.5 Overzicht eigenschappen stenen en kant-en-klare reparatiemortels

Omdat de gewenste eigenschappen van de steenreparatiemortel in principe zoveel mogelijk zouden moeten worden afgestemd op de eigenschappen van de te repareren steen, worden hierna tabellen gegeven, die zoveel mogelijk eigenschappen van respectievelijk steentypen en van kant-en-klare reparatiemortels bevatten.

Tabel 5: Eigenschappen van enkele typen natuursteen (bronnen: SBR-publicatie 9²⁹, MDCS³⁰, Camerman (1957)³¹, WTCB (1970)³², Dubelaar & Nijland (2016)³³, Dubelaar & Tolboom (2004)³⁴, Nijland et al. (2005)³⁵, Pierres et Marbres de Wallonie (s.a.)³⁶, Van Hees (2000)³⁷

	Dichtheid (soortelijke massa) kg/m ³	Porosi- teit	WAC *** (kg/m ² h ^{1/2})	Druksterkte (N/mm ² , droog)	Statisch E modulus x10 ⁹ (Pa)	Dyn. E modulus (N/mm ²)	Thermische uitz. coëff. mm/(m.K)	Hygri- sche krimp ‰
Hardsteen	2687-2750	0,3	Zeer laag	158	87		0,005-0,009	0,04-0,26
Marmar	2750	<1	Zeer laag		60		0,004-0,007	idem
Travertijn	2400		laag		65		0,004-0,005	
Lede en Go- bertange	2305-2513	6-15	4-6	65-75				
Bentheimer	2640-2650	20-26	9-16	47-79	8-12			
Obernkirche- ner	2650-2660	16-21	0,5-1	70-94	-			
Udelfanger	2610-2660	18-27		52				
Euville	2098-2540	7-18	3	12-43		20		
Savonnières	1589-2120	23-40	0,5-2,5	9-30				
Tufsteen (Römer)	2170-2510	35-50	10,2-19,2	5-9		2,8-5,2	7,8 10 ⁻⁶ K	235 um/m
Tufsteen (Weibern)	2430-2540	40-47	9,6	11-16		5,4-5,8	10 10 ⁻⁶ K	450 um/m
Tufsteen (Ettringer)	2360-2570	30-43	3	22-31		8,1-9,8	10 10 ⁻⁶ K	280 µm/m
Mergel	1300	50	200	5-35			0,004-0,006	
Baksteen klinkers	2100		<15		5-10		0,005-0,007	0,05-0,20
Baksteen Rood-boeren- grauw	1300-1700	10-40	25-30	10-60	1-7		0,005-0,007	0,15-0,30
Kalk- zandsteen	2000		5-11		7-10		0,01-0,012	0,25-0,7

Tabel 6: Overzicht steenreparatiemortels, zoals (inter)nationaal op de markt aangeboden (gebaseerd op Van Hees (2016)³⁸ en Valek et al. (2017)²²)

Producent toepassing	bindmiddel	soort. massa (kg/m ³)	porositeit [%]	WAC (kg/m ² h ^{1/2})	Druksterkte (N/mm ²)	E-modulus x 10 ⁹ (Pa)	therm.uitz. coeff. [mm/m.K]	Krimp ‰ (mm/m)
Jahn M70 zand- en kalksteen	waarsch. cement	1500	-	6,8	10-18	10-14 (dyn)	0,004-0,016	-
Jahn M100 terracotta	waarsch. cement	1700	-		18-25	14-20 (dyn)	0,004-0,016	-
Remmers SK zand- en baksteen beton	waarsch. cement	1700	-	-	8-13	8	-	0,7
Remmers AC a3 zandsteen	acrylaat			3,6	6,1	5,6 (dyn)		
St. Astier Lithomex	nat. hydr. kalk				7,3	7,7		
Acqua Petra C	cement				20-30			
Aqua Petra E	epoxy				35-65			
Bridevaux zandsteen	luchtkalk, trascinement, additieven (<5% van bindm.)		40	12,4	4,8	1,1		
Bridevaux zandsteen	luchtkalk, wit cement, additieven (<5% van bindm.)		40-45	12,4	7,6-11,2	4,1-6,7		
Sika beton mortel steen	epoxy	2000			77			
Monulit natuursteen baksteen	zinkoxide	2150			6-12,5	8,5-16 15-24 (dyn)	0,008	0,01
Krusemark Mineros 2000 natuursteen			40	0,85	9,1	2,2 7,6 (dyn)		

3.6 Bespreking

Uit dit overzicht kan worden geconcludeerd dat voor een compatibele reparatiemortel de eigenschappen van de mortel en die van de ondergrond vergelijkbaar moeten zijn. Omdat dit vaak niet volledig mogelijk is, komen de volgende vragen naar voren:

- Hoe groot mag de afwijking voor elke van deze eigenschappen zijn, dat wil zeggen welke kwantitatieve eisen moeten worden gesteld aan de eigenschappen van de mortel in vergelijking met die van de ondergrond;
- Wanneer niet aan alle eisen kan worden voldaan, welke zijn de belangrijkste? En hoe kan op basis van deze rangorde een keuze gemaakt worden?

Deze vragen zijn voor een deel beantwoord in de literatuur door voorstellen voor waarden en rangorde te formuleren (tabel 5&6).

Waar de literatuur met betrekking tot eisen aan reparatiemortels beperkt is, is voor zover de auteurs van dit rapport bekend, onderzoek om de geformuleerde criteria en eisen in de praktijk of in het laboratorium te valideren ook niet beschikbaar. De voorgestelde waarden komen niet uit gericht en systematisch onderzoek, maar zijn het resultaat van op zich waardevolle en jarenlange ervaring, waarvan echter helaas weinig gepubliceerd is. Het huidige onderzoek wil deze lacune deels invullen, door het gedrag van de mortels in het laboratorium en in de praktijk te onderzoeken en zo veel mogelijk te vergelijken met de gestelde eisen (zie § 4-5).

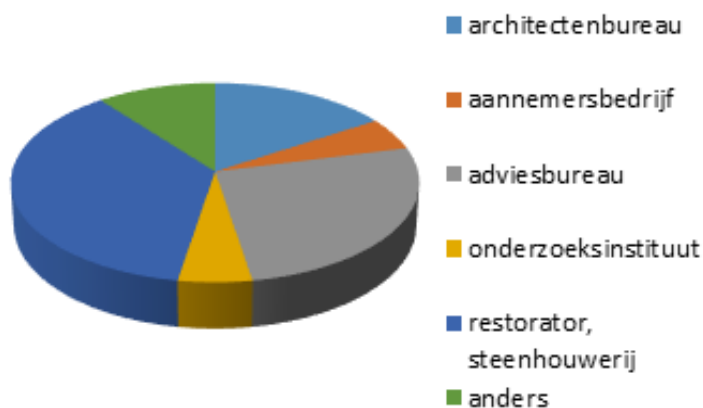
4.1 Algemeen

Dit deel van het onderzoek naar steenreparatiemortels heeft tot doel om meer inzicht te krijgen in het gebruik en het gedrag van steenreparatiemortels in de praktijk. Waarvoor worden steenreparatiemortels vooral gebruikt? Hoe worden ze toegepast? Welke mortels zijn in de praktijk gebruikt? Wat zijn de criteria geweest voor hun keuze? En wat zijn de prestaties van de mortels? Het verzamelen en de bestuderen van casuïstiek helpt bij het beantwoorden van deze vragen. Er zijn verschillende methoden gebruikt om ervaringsgegevens uit de praktijk te verzamelen. Er is archief- (archief van Rijksdienst voor het Cultuur Erfgoed) en literatuuronderzoek uitgevoerd naar het gebruik van reparatiemortels in de laatste decennia. Daarnaast is er een enquête uitgezet onder partijen die regelmatig verantwoordelijk zijn voor of betrokken zijn bij de uitvoering van projecten waarbij natuursteen- of baksteen-metselwerk wordt hersteld. De enquête is in sommige gevallen ondersteund met een interview of ingevuld door de onderzoekers op basis van een interview. De enquête heeft ook informatie over casussen van toepassing van reparatiemortels geleverd. Daarnaast zijn door onderzoekers diverse projecten bezocht om een beter beeld te krijgen van hoe reparatiemortels in het verleden zijn toegepast en hoe deze zich in de loop van de tijd gedragen in termen van comptabiliteit en duurzaamheid. In paragraaf 4.2 worden de meeste relevante resultaten van de enquête weergegeven en besproken. In paragraaf 4.3 wordt de casuïstiek, zoals verzameld via archief- en literatuuronderzoek en enquête in kaart gebracht en besproken. Daarnaast wordt met foto's een beeld gegeven van goede en minder goede compatibiliteit van toepassing van reparatiemortels in de praktijk.

4.2 Enquête

Binnen de samenwerking Monumentenkennis is onderzoek verricht naar het gebruik en de prestatie van reparatiemortels voor natuursteen en baksteen in Nederland. In dat kader is een enquête uitgezet met als doel informatie te verzamelen over praktijkervaringen met verschillende soorten kant-en-klare en zelf-samengestelde reparatiemortels. De enquête is op het volgende webadres te vinden https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSf4zJJTF4IDMROkEXmO_Pdns9Uyp0gt7HemtX1nqj1aIHdtZA/viewform.

Werkomgeving deelnemers enquête



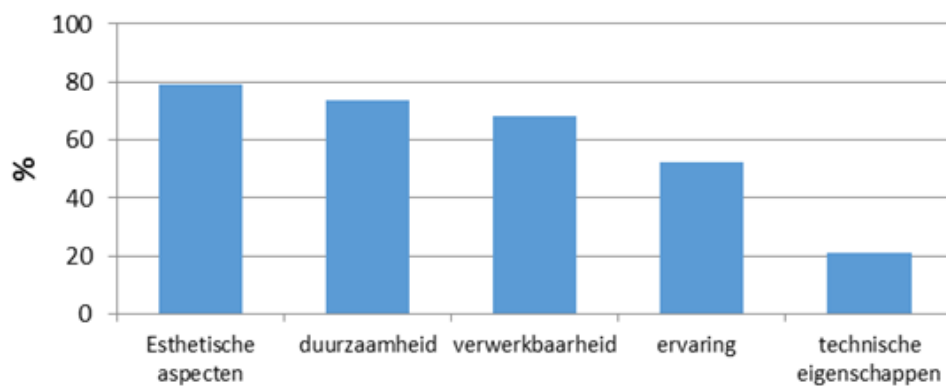
Figuur 12: Werkomgeving van de deelnemers van de enquête

Ervaring met reparatiemortels



Figuur 13: Aantal geënquêteerde (in procenten) dat ervaring heeft met een bepaalde type producten.

Keuzecriteria voor type reparatiemortel



Figuur 14: Criteria voor het kiezen van reparatiemortel, zoals aangegeven door de geënquêteerden.

4.2.1 *Geënquêteerde*

De enquête is ingevuld door 19 mensen die werkzaam zijn bij een architectenbureau, advies-/ onderzoeksinstelling, aannemersbedrijf, restaurator/steenhouwerij of ander soort instelling (leverancier/ Rijksvastgoedbedrijf). De verdeling over deze groepen is weergegeven in onderstaand cirkeldiagram. Ze hebben overwegend meer dan 15 jaar ervaring in de restauratie en zijn zeer regelmatig betrokken bij herstel of advies (figuur 12).

4.2.2 *Producten*

De enquête heeft gericht gevraagd naar de ervaringen met drie producten die in de afgelopen decennia regelmatig zijn en worden gebruikt, namelijk Jahn M70, Monulit en Remmers restauratiemortel. Ook is gevraagd naar ervaringen met zelf-samengestelde mortels en naar ervaringen met andere prefabmortels. De meeste ervaringen blijken te zijn opgedaan met (in afnemende volgorde): Jahn, zelf-samengesteld, Monulit en Remmers (zie § 4.2.4) voor de samenstelling en de eigenschappen van deze reparatiemortels). Naast deze vier mortels hebben de geënquêteerden ook ervaring met andere typen reparatiemortels. Zo is er ook gewerkt met andere mortels van Jahn en Remmers, zoals respectievelijk M100 baksteenherstelmortel en Remmers Grondeermortel, en met mortels van andere fabrikanten: Unilit 65 F Restauratiemortel; KALX KP1040 (Jahn); Keim mortels; Minéros-system 2000, Minéros H+K, Minéros-PZF, RC Amonit; Thor Helical restauratiemortel en met kalkmortels uit Nederland, België, Frankrijk en Duitsland.

4.2.3 *Criteria gebruikt voor de keuze van een reparatie mortel*

Naast de informatie over welke producten regelmatig zijn en worden gebruikt, is interessant om te zien welke criteria het meest bepalend zijn voor de productkeuze.

- De keuze van het type reparatiemortel blijkt vooral te worden bepaald door:
 - Esthetische aspecten van de reparatie
- Duurzaamheid van de uitgevoerde reparatie
- Verwerkbaarheid van de reparatiemortel
- Eigen ervaring met het product

In de vraagstelling werd ook de prijs van de reparatiemortel genoemd maar die is door niemand benoemd, die lijkt dus een ondergeschikte rol te spelen.

Opvallend is dat bij de keuze maar in beperkte mate de technische eigenschappen van het product worden meegewogen. Die technische eigenschappen zijn vooral gebaseerd

op productinformatiebladen (in het geval van prefab mortel) of eigen metingen (voor zelf-samengestelde-mortel). De mate waarin bovenstaande keuzecriteria worden meegewogen is weergegeven in figuur 14.

4.2.4 Toepassing verschillende types reparatiemortels

Binnen de enquête is voor de vier producten gevraagd voor welke situaties en welke materialen men ze toepast.

Jahn

Jahn mortel wordt vooral toegepast voor zand- en kalksteensoorten en baksteen, zowel voor interieur als exterieur. Vaak voor materialen met een wat grovere structuur. Binnen de groep geënquêteerden is Jahn M70 de meest gebruikte reparatiemortel, vroeger aangeduid met de naam Alja M70. Gebruik voor hardsteen wordt enkele keren genoemd, maar het wordt echter ook net zo vaak ontraden voor hardsteen. Meer in het algemeen wordt het niet aangeraden voor compacte kalksteensoorten, marmer, graniet of materialen met een fijne structuur of gepolijst oppervlak.

Monulit

De ervaringen met Monulit zijn niet zo eenduidig. Het wordt meerdere keren genoemd voor gebruikt voor compacte steensoorten zoals hardsteen, kalksteen, graniet; zowel voor het interieur als het exterieur. Het wordt minder gebruikt voor zandsteen en poreuze natuursteensoorten. Enkelen geven aan het juist niet voor hardsteen en kalksteen te gebruiken. En meerdere geënquêteerd geven expliciet aan het helemaal niet (meer) te gebruiken. Ook wordt genoemd dat het beter niet kan worden gebruikt in situaties waar zoutbelasting een negatieve invloed kan hebben en waar bouwfysische verstoringen kritisch zijn. Vermoedelijk wordt met de laatstgenoemde opmerking bedoeld op situaties waar vochttopeenhoping of thermische spanningen tot schade kunnen leiden.

Remmers

Over de Remmers restauratiemortel zijn minder ervaringsgegevens naar voren gekomen. Het wordt gebruikt voor baksteen en de meer poreuze kalk- en zandstenen. Toepassingsmogelijkheden worden wel vergeleken met die van de Jahnmortel. Ook wordt benoemd dat het beter niet kan worden gebruikt voor situaties die bouwfysisch gezien wat kritischer zijn.

Zelf samengesteld

Zelf samengestelde mortels worden voor veel verschillende situaties en materiaal gebruikt. Dat is ook begrijpelijk omdat de samenstelling en daarmee de eigenschappen sterk kan verschillen. Het vaakst worden genoemd het gebruik van een Portland cementmortel voor herstel van hardsteen en kalkmortel voor herstel van baksteen(metselwerk). Zelf samengestelde mortels worden ook gebruikt voor herstel van marmer waarbij gebroken natuursteen als toeslagmateriaal wordt gebruikt. Ze worden zowel buiten als binnen toegepast. En het wordt gebruikt voor situaties waarbij een specifieke kleur nodig is. Gebruik voor moderne betonsoorten en poreuzere zand – en kalksteensoorten ligt minder voor de hand volgens geënquêteerden. Bij de zelf samengesteld mortel is gevraagd of en welke additieven (hulpstoffen) aan reparatiemortels worden toegevoegd. Daarbij zijn de volgende antwoordsuggesties gegeven: luchtbelvormer; hechtingverbeteraar; hydrofobeermiddel; geen additief; weet niet. Er blijkt weinig gebruik te worden gemaakt van hulpstoffen in zelf-samengestelde mortels; negen personen geven aan niks toe te voegen, twee personen noemen een hechtverbeteraar en het gebruik van een luchtbelvormer wordt éénmaal genoemd.

4.2.5 Prestaties mortels

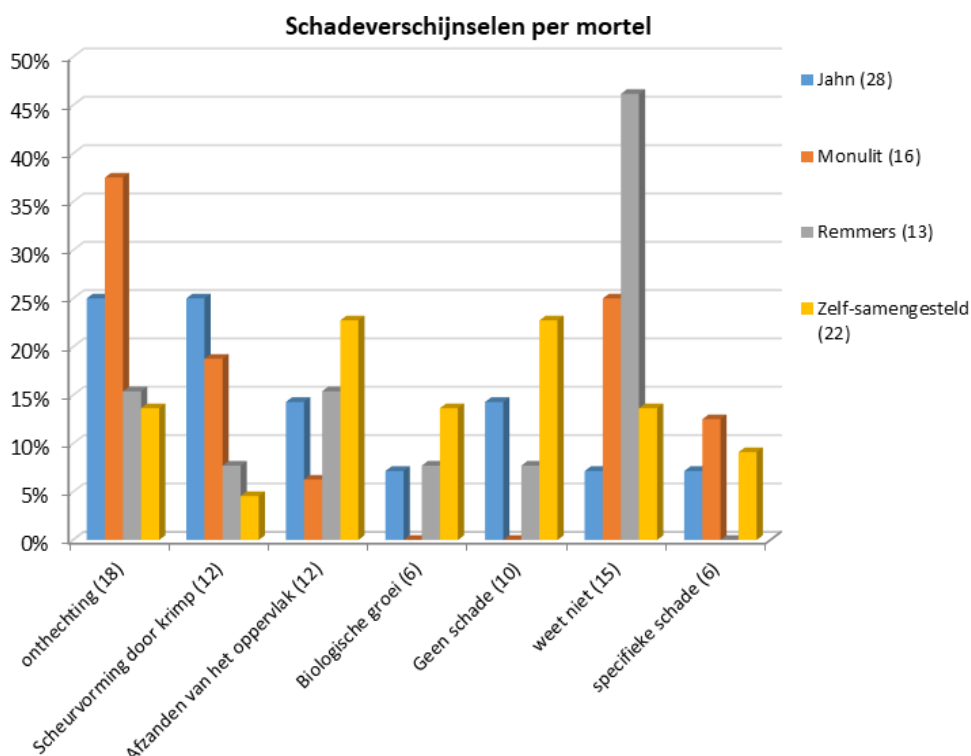
De geënquêteerden hebben ook aangegeven hoe ze vinden dat de mortels presteren. Ze blijken echter maar in een beperkte mate hun werk na verloop van tijd terug te zien.

Schadetypes

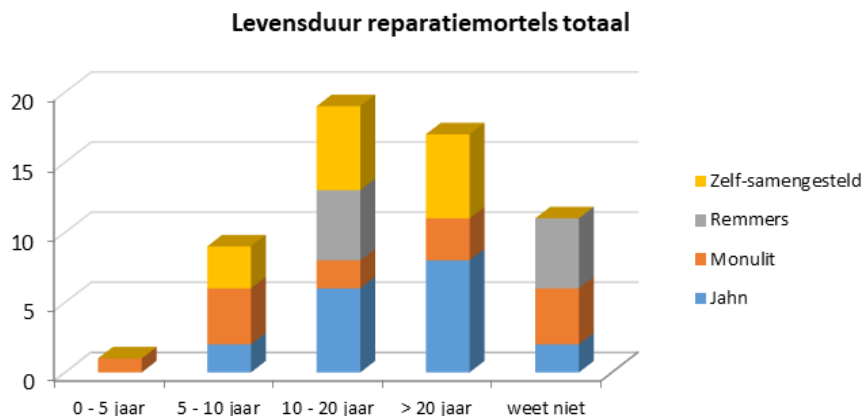
Er is per morteltype gevraagd naar veel voorkomende schadetypes bij oudere toepassingen. De letterlijke vraag was: 'Wat zijn de meest voorkomende schadetypes bij oudere reparaties?'. De opties bij beantwoording waren: onthechting; scheurvorming door krimp; afzanden van het oppervlak; biologische groei; geen schade; weet ik niet en noem andere type schade.

De resultaten zijn verwerkt in figuur 15. Omdat het aantal reacties per mortel nogal verschilt zijn de resultaten weergegeven als percentage. Het aantal reacties waarop het percentage is gebaseerd is per morteltype tussen haakjes weergegeven. Per schadetype is tussen haakjes weergegeven hoe vaak die schade is genoemd. 'Weet niet' betekent dus dat de geënquêteerde geen zicht heeft op hoe de mortel heeft gepresteerd. Voor Jahn reparatiemortel en voor zelf-samengesteld mortels is ten opzichte van de andere twee mortel relatief vaak benoemd dat er geen schade is waargenomen na verloop van tijd. Bij Remmers en Monulit is de onduidelijkheid over schade die naar verloop van tijd kan

voorkomen relatief groot, waarschijnlijk omdat deze mortels in de praktijk minder worden gebruikt. Dat beeld komt overeen met de informatie over de hierna beschreven levensduur van de mortels. Onthechting blijkt het meeste voorkomende schadetype te zijn bij Monulit, terwijl zelf-samengestelde mortels vaker afzanding van het oppervlak vertonen. Voor de verschillende mortels zijn ook enkele specifieke schaden genoemd. Voor Jahn was dat kleur(verschil) en ongelijkmatige verwerking, voor Monulit kleurverlies en zoutuitbloei, voor Remmers geen en voor zelf-samengestelde mortels zijn genoemd vorst-zout-schade en te lage porositeit.



Figuur 15: Schadeverschijnsel per type mortels, zoals aangegeven door de geënquêteerden.



Figuur 16: Levensduur van de verschillende reparatiemortels, zoals aangegeven door de geënquêteerden

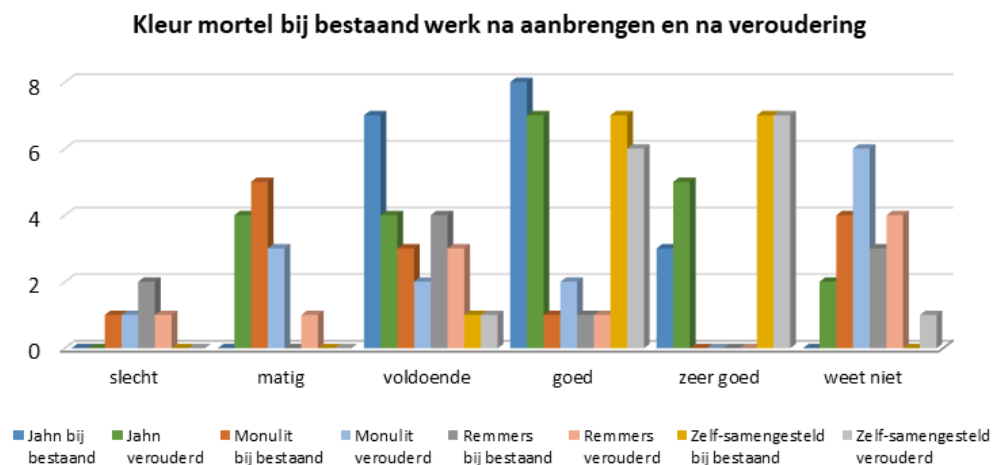
Duurzaamheid (levensduur)

Er is gevraagd naar de mening over de levensduur van een verschillende reparatiemortels; de resultaten zijn weergegeven in figuur 16. Langs de verticale as staat het aantal keren dat een bepaalde levensduur voor een zeker product is genoemd. Uit de antwoorden blijkt dat in de meeste gevallen de levensduur van reparatiemortels tussen 10 en 20 jaar ligt, maar in veel gevallen ook langer dan 20 jaar is. Zoals verwacht is het percentage “weet niet” hoger bij mortels die minder in de praktijk gebruikt zijn.

Kleur

Esthetische aspecten van de reparatie blijken het meest bepalend bij de keuze voor een bepaald type reparatiemortel. Bepalend voor de beleving zijn de kleur van de mortel ten opzichte van het omliggende materiaal en de textuur. De textuur wordt bepaald door de korrelgrootte van de bestanddelen en de wijze van aanbrengen en afwerken.

Gevraagd is hoe de desbetreffende mortel kleurt bij bestaande werk na aanbrengen en droging en hoe de mortel presteert op kleurvastheid op langere termijn. De resultaten zijn weergegeven in figuur 17. Langs de verticale as staat het aantal keren dat een bepaalde beoordeling (bijvoorbeeld ‘matig’) voor een zeker product is gegeven. Het valt op dat zelf-samengestelde mortels vaak zeer goed aan de kleur van de steen kunnen worden aangepast en met de tijd niet verkleuren. Ze gedragen zich qua kleur vastheid beter dan prefab-producten. Op de vraag over de textuur van de verschillende mortels waren de antwoorden niet zo eenduidig.



Figuur 17: Aansluiting van de kleur van mortel bij bestaand werk na aanbrengen en na veroudering

Verwerkbaarheid

Voor de keuze van een reparatiemortel speelt ook de verwerkbaarheid van de verse mortel een rol. De geënquêteerde is gevraagd: “Hoe beoordeelt u de verwerkbaarheid van de ...mortel?” en “Hoe beoordeelt u het gemak van de nabehandeling van de ...mortel?” De verwerkbaarheid van de Jahn mortel en van de zelf-samengestelde mortels werden het positiefst beoordeeld. De verwerkbaarheid van de Jahn en zelf-samengestelde mortels werden door respectievelijk 72% en 67% ervaringsdeskundigen beoordeeld als goed tot uitstekend. En de mate waarin een nabehandeling mogelijk is werd door respectievelijk 50% en 73% beoordeeld als goed tot uitstekend. Deze ervaring wordt bevestigd door het laboratoriumonderzoek (zie § 5). Voor de andere twee mortels zijn de uitkomsten iets minder eenduidig.

4.3 Toepassing in de praktijk

Bij het beoordelen van toepassingen van reparatiemortels in de praktijk zijn grote technische en esthetische kwaliteitsverschillen zichtbaar. Het gebruik van mortel als reparatiemateriaal voor baksteen en natuursteen heeft zich wel bewezen. Bij historische gebouwen kunnen goede, mooie en harmonieus verouderde reparaties worden aangetroffen; reparaties van 30 jaar geleden, maar ook wel van meer dan 100 jaar oud. Reparaties met mortels kunnen echter ook minder geslaagd zijn. In een aantal van die gevallen is de slechte prestatie redelijk makkelijk verklaarbaar: er zijn geen goede keuzen gemaakt ten aanzien van materiaal, toepassing en/of uitvoering. Een mortel is niet in elke situatie even wenselijk of duurzaam en de uitvoering vraagt om goed vakmanschap. Deze onderwerpen zullen in detail worden besproken in § 6.

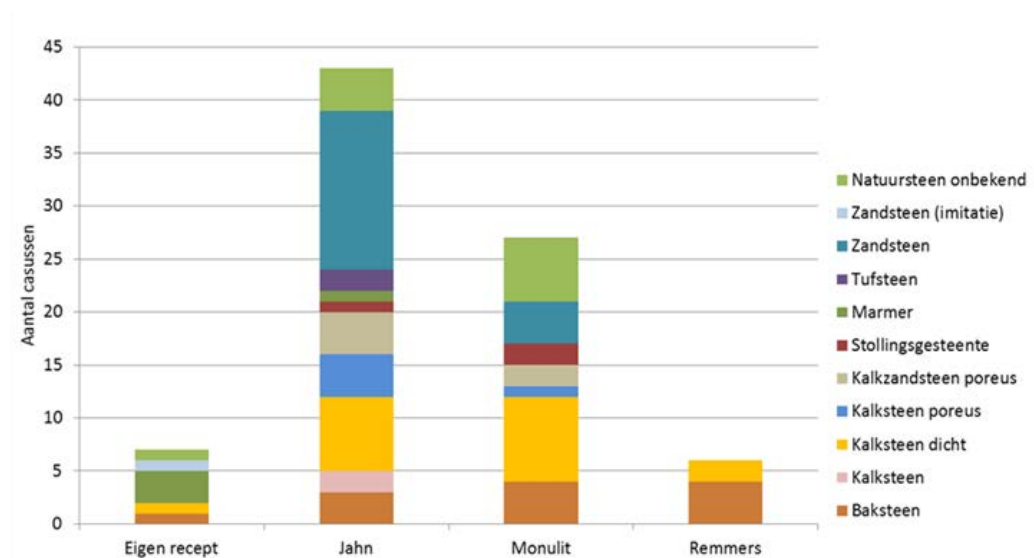
4.3.1 Casuïstiek in kaart

Op verschillende manieren is informatie verzameld over casuïstiek: via de enquête en interviews, via het archief van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed en via ervaringen van betrokken onderzoekers. De verzamelde casuïstiek is ontsloten via een Google-kaart, zie hieronder. Er zijn ruim 160 casussen onderzocht op verschillende criteria, zoals het materiaal (natuursteen of baksteen), de specificatie van het materiaal (hardsteen, tufsteen etc.) en het type reparatiemortel. Het blijkt dat het veelal moeilijk is te achterhalen welke materialen of reparatiemortels zijn gebruikt. Om de resultaten te kunnen vergelijken is ervoor gekozen om casussen waarin het materiaal of type reparatiemortel onbekend is weg te laten in dit overzicht. Vier types reparatiemortels zijn geselecteerd die het meest voorkomen: Jahn, Monulit, Remmers en eigen recepten. De materialen zijn vervolgens

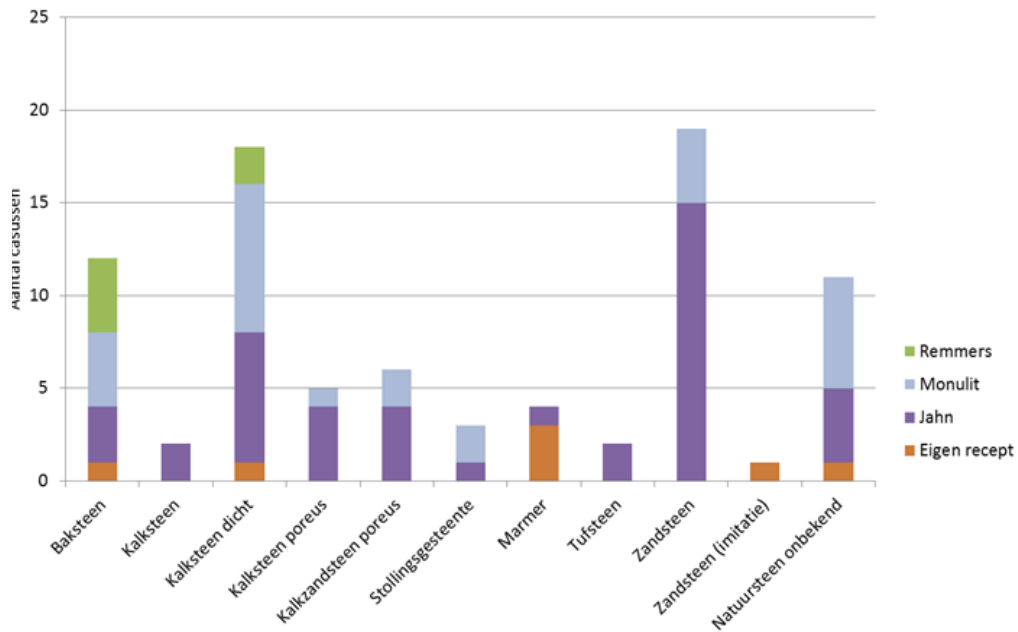
onderverdeeld in 11 groepen:

- Baksteen: Baksteen
- Kalksteen dicht: Hardsteen, Musschel-kalksteen, Naamse Steen, Rouge Royale
- Kalksteen poreus: Avender kalksteen, Euville, Savonnières, Travertijn, Mergel
- Kalksteen: Kalksteen
- Kalkzandsteen poreus: Bamberger kalksteen, Ledestein
- Stollingsgesteente: Bazalt, Drachenfels, Graniet, Hessische diabaas, Trachiet
- Marmer: Marmer, Wit marmer
- Tufsteen: Ettringer tufsteen, Tufsteen, Weiberner tufsteen
- Zandsteen: Asschaffenburg zandsteen, Bentheimer zandsteen, Famenniaan zandsteen, Maulbronner zandsteen, Oberkirchner zandsteen, Rode zandsteen, Schönbrunner zandsteen, Udelfanger zandsteen, Zandsteen
- Zandsteen (imitatie): Zandsteen (imitatie)
- Natuursteen onbekend

Het is nu mogelijk zo'n 80 casussen met elkaar te vergelijken waarvan zowel het materiaal als het type reparatiemortel bekend is. In het algemeen komen casussen met natuursteen verreweg het meest voor (85%). Bij de reparatiemortels komt de toepassing van Jahn het meest voor (50%), gevolgd door Monulit (35%), zie figuur 18. Casussen waarbij Remmers of een eigen recept is gebruikt komen minder voor (15%).



Figuur 18: Aantal casussen per type reparatiemortel, met gespecificeerd bij welke soort materialen het is toegepast.



Figuur 19: Aantal casussen per soort ondergrond materiaal, met gespecificeerd welke typen reparatie materialen zijn toegepast.



Figuur 20: Kaart van reparatiemortels (zie ook link voor een regelmatig geüpdatet versie)
<https://www.google.com/maps/d/edit?mid=1GunTi2VVbNioUiR4Zp9kBBUFAiw&ll=52.75481182055233%2C5.47472515000004&z=8>

In figuur 18 is het aantal casussen per type reparatiemortel weergegeven, met daarbij gespecificeerd bij welke (ondergrond) materialen ze zijn toegepast. Deze zijn opgenomen in de Google-kaart.

Bij de vergelijking van het type reparatiemortels met de specificatie van het materiaal is te zien dat Remmers wordt vaker toegepast op baksteen en dichte kalkstenen, terwijl eigen recepten, Jahn en Monulit bij zowel baksteen als diverse typen natuurstenen worden gebruikt. Wanneer naar de combinatie type ondergrond en type reparatiemortels wordt gekeken, (zie figuur 19) is te zien dat Jahn het meest wordt toegepast bij zandsteen, poreuze kalksteen en kalkzandsteen. Bij dichte kalkstenen komt het gebruik van Monulit het meest voor. Bij tufsteen is alleen het gebruik van Jahn bekend en bij marmer worden vooral eigen recepten gebruikt.

De hierboven beschreven conclusies komen grotendeels overeen met de resultaten van de ingevulde enquête (paragraaf 4.2). De verzamelde casuïstiek is ontsloten via een Google-kaart die via de link kan worden bekeken (figuur 20). Per casus wordt, afhankelijk van de beschikbaarheid, informatie gegeven over het object, waar de mortel is toegepast, welk materiaal is gebruikt, wanneer en wat de bron van de informatie is.

De verzamelde casuïstiek ligt voor een groot deel in het midden en westen van Nederland. Deze verdeling is natuurlijk niet representatief voor het gebruik van mortels in Nederland; ook in Groningen, Zeeland en Limburg worden reparatiemortels gebruikt.

4.3.2 *Casuïstiek in beeld*

De onderzoekers hebben een aantal objecten bezocht. Hierna wordt aan de hand van foto's een beeld gegeven van het gebruik in de praktijk. In deze paragraaf wordt aan de hand van een aantal voorbeelden in beeld gebracht met welk doel en op welke wijze reparatiemortels in de praktijk worden gebruikt.

Op hoofdlijnen zou het gebruik in drie groepen ingedeeld kunnen worden:

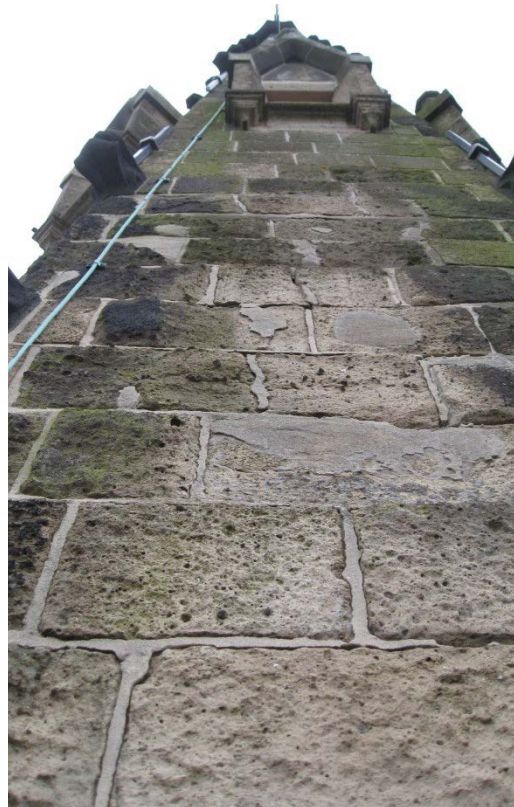
1. Vooral functioneel. De reparatie voorkomt verdergaand verval
2. Vooral esthetisch. Verbeteren van de uitstaling
3. Combinatie van functioneel en esthetisch

Daarnaast wordt een beoordeling gegeven over de duurzaamheid en compatibiliteit van de reparatiemortels in hun specifiek situatie, op basis van visuele inspectie.

De resultaten van deze inspecties dragen bij aan het formuleren van aangepaste richtlijnen voor het kiezen van geschikte reparatiemortels.



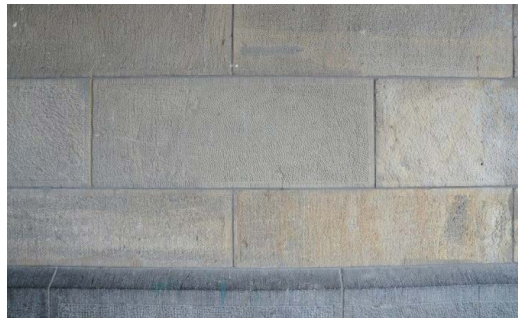
Figuur 21: Toren van de Oude Kerk te Delft



Figuur 22: Diverse oude reparaties aan de torenspits van de Oude Kerk in Delft. Jahnmortel op baksteen, circa 20 jaar oud (links) en Jahnmortel op tufsteen (rechts)

Torenspits van de Oude Kerk in Delft.

Bij de torenspits zijn reparatiemortels, vooral Jahn, gebruikt om baksteen en tufsteen te herstellen. Het is vooral functioneel gebruik van mortel om de technische staat van de spits te verbeteren om indringing van neerslag te verminderen. De mortels zijn aangebracht bij de restauratie in 1995³⁹ en hebben zich goed gehouden. De kleur van de baksteenreparatie is goed afgestemd op de kleur van de baksteen. Het morteloppervlak heeft geen bijzondere afwerking. Bij de tufsteen tekenen de lichtere reparaties af ten opzichte van de donker en groen verkleurde tufsteen. Het is de vraag in welke mate het zichtbaar of storend was vanaf maaiveldniveau.



Figuur 23: Amsterdam, hoofdgebouw centraal station met diverse oudere mortelreparaties.

Stationsgebouw NS in Amsterdam

Bij het hoofdgebouw van het centraal station in Amsterdam zijn verschillende soorten zandsteen gebruikt, zoals Udelfanger, Obernkirchener, Heilbronner en Bollendorfer. Later is voor herstel ook een Franse kalksteen, Massangis (Vaurion), gebruikt die, na kleuring, een vergelijkbare uitstraling heeft als zandsteen. De plint is van blauwe hardsteen. Door de jaren heen zijn er op verschillende momenten reparaties uitgevoerd met verschillende types reparatiemortels. Helaas is niet precies bekend welke soorten zijn toegepast, wel dat Jahn mortel is gebruikt. Op veel plekken in de gevel zitten kleine mortelreparaties. De reparaties op de begane grond verdieping, aan de zuidwestzijde van het hoofdgebouw lijken vooral een esthetisch doel te hebben. Ten opzichte van de grote natuursteen blokken zijn de mortelreparaties relatief klein. Gebruikt van reparatiemortel in deze situatie is goed verklaarbaar omdat daardoor veel oorspronkelijk materiaal en oppervlak behouden blijft. De meeste reparaties zijn zorgvuldig uitgevoerd waarbij veel aandacht is besteed aan het laten aansluiten van de oppervlaktestructuur van de mortel bij de omliggende natuursteen (figuur 23). De mortelreparaties sluiten qua kleur op de meeste plekken nu goed aan bij het omliggende materiaal. Onbekend is echter of dat komt door de juiste kleur en passende veroudering van de reparatiemortel of doordat plekken naderhand zijn gepatineerd (bijgekleurd). In 1991 is namelijk een deel van de reparatieplekken gepatineerd met Aerosilicaat van Jahn.⁴⁰

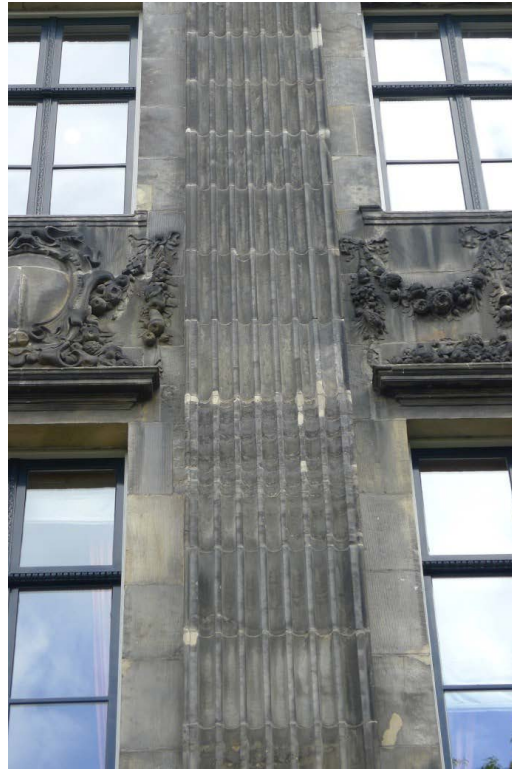
Bij de reparaties in de blauwe hardsteen plint valt op dat deze zo minimaal mogelijk zijn uitgevoerd en zo veel mogelijk de natuurlijk gevormde randen van de te repareren plekken (verwering of scheuren) volgen. Kleur en textuur sluiten na veroudering goed aan bij het omliggende werk; al is niet uit te sluiten dat de kleur van deze reparaties naderhand is bijgewerkt.



Figuur 24: Westgevel van het Paleis op de Dam in Amsterdam met diverse typen reparaties. Obernkirchener zandsteen met inboetingen (linksboven), inboeting die met retouches is aangepast aan het omliggende materiaal (rechtsboven) en Obernkirchener met reparatiemortel (links- en rechtsonder).

Paleis op de Dam in Amsterdam

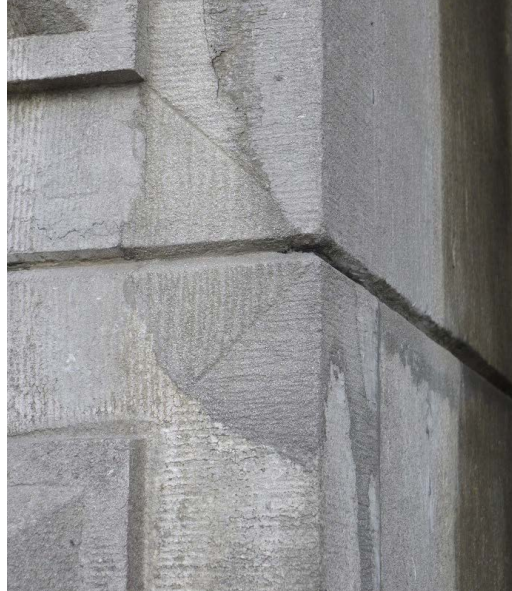
De gevels van het paleis bestaan voor ongeveer driekwart uit Obernkirchener zandsteen en voor een kwart uit Bentheimer zandsteen. Bij de laatste restauratie van 2009 tot 2011 zijn de gevels zorgvuldig hersteld. Onderstaande foto's geven een beeld van de plint van de westgevel (Nieuwezijds Voorburgwal). Daarbij zijn drie soorten reparaties zichtbaar: inschieten van blokjes natuursteen, reparaties met mortel en het ontstoren van de gevel met retouches. De mortelreparaties zijn allemaal of voor het overgrote deel van de laatste restauratie en zijn uitgevoerd met een Jahnmortel. Ze zijn vooral gebruikt om de randen van de blokken te herstellen en dienen vooral een esthetisch doel. Er zijn twee kleuren mortel gebruikt, al dan niet gemengd en alle reparaties zijn naderhand bijgekleurd met krijt en gefixeerd met kiezelzure ester. Figuur 24 brengt goed in beeld hoe de reparaties met natuursteen zich verhouden tot de reparaties met mortel. En ook van het effect van retouches op de beleving van de gevel. Ze zorgen voor meer eenheid in de gevel.



Figuur 25: Voorgevel van het Trippenhuys in Amsterdam, Bentheimer zandsteen met mortelreparaties (links) en inboeting met natuursteen met daarnaast een hoek die hersteld is met mortel (rechts).

Trippenhuis in Amsterdam

Het Trippenhuis in Amsterdam is een van de laatste voorbeelden van het Hollands classicisme in Amsterdam. Het is gebouwd tussen 1660 en 1662. De voorgevel van Bentheimer zandsteen met een fijne frijnslag heeft in de loop der tijd een voor dit type zandsteen karakteristieke donkere verweringskleur gekregen. In 1990 zijn over de gehele gevel op diverse plaatsen reparaties uitgevoerd met Jahn M60 reparatiemortel.⁴¹ De mortel is door de verwerker met pigment op kleur gebracht. De kleur van de reparaties is ook na uitharding nog bijgewerkt. Ook zijn reparaties uitgevoerd door stukjes zandsteen in te boeten. Het oppervlak van de mortelreparaties is afgewerkt met een imitatie frijnslag waardoor ze minder opvallen. De meeste reparaties lijken zich na circa 28 jaar technisch goed te houden.



Figuur 26: Voorgevel van de Sint-Nicolaaskerk in Amsterdam met mortelreparaties. Gevel van Aschaffenburg zandsteen met reparaties met Monulit uit de periode 1994-1996 (boven) en plint van de R.K. Nicolaaskerk, hardsteen met Monulit reparaties (midden en onder)

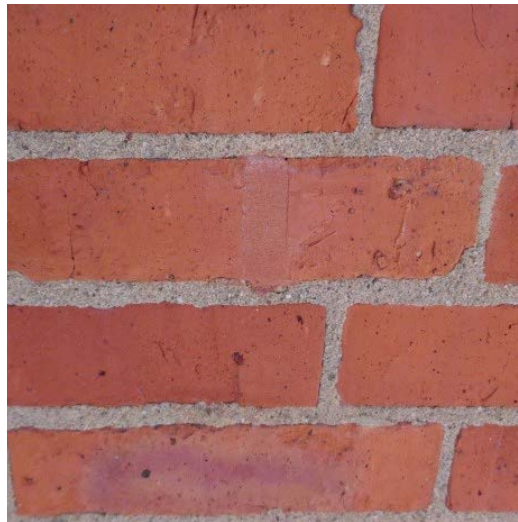
R.K. Nicolaaskerk in Amsterdam

De rooms-katholieke Sint-Nicolaaskerk in de binnenstad van Amsterdam is gebouwd tussen 1884 en 1887. Het exterieur van de kerk, in Italiaans barokke stijl, is onder meer gerestaureerd tussen 1966 en 1973 en eind jaren 90. De gevel is opgebouwd uit baksteen, Aschaffenburg zandsteen en hardsteen voor de plint. Zowel de zandsteen als de hardsteen zijn tussen 1994 en 1996 hersteld met een Monulit reparatiemortel.⁴² Lastig bij de uitvoering was dat er veel variatie zat in de kleur van de zandsteen; de kleur van de mortel is daarom aangepast met pigmenten. De reparaties lijken een technische en esthetische functie te hebben. Bij de Aschaffenburg zandsteen tekenen de reparaties zich nu que kleur duidelijk af (zie figuur 26) maar lijken technisch nog te voldoen.

In de hardstenen plint zijn de Monulit reparaties beter te beoordelen. Van dichtbij is Monulit herkenbaar aan de witte korreltjes (kalksteen) in de grijze mortel. Bij het herstel van de hardsteen is de reparatie zo klein mogelijk gehouden en is de vorm van de schade zo veel mogelijk gevolgd. De oppervlaktestructuur van de mortel is aangepast aan het omliggende werk, zo is deze plaatselijk voorzien van een imitatie frijnslag. Ook qua kleur sluit het voldoende aan. Esthetisch gezien geven de reparaties een beeld dat, zeker van enige afstand bekeken, voor veel mensen acceptabel zal zijn. Technisch gezien voldoen de meeste reparaties na ruim twintig jaar nog redelijk, al is de mortel bij enkele reparatie op delen van het hechtvlak onthecht of 'losgekrompen'.



Figuur 27: Gevel aan de Raadhuisstraat-Keizersgracht met storende mortelreparaties van baksteen



Figuur 28: Gevel van Het Schip in Amsterdam met nagenoeg onzichtbare reparaties van baksteen met Jahn-mortel, kort na uitvoering

Amsterdam, gebouw aan de Raadhuisstraat-Keizersgracht en Het schip

Twee voorbeelden van herstel met reparatie mortel van bakstenen gevel in Amsterdam. Bij de eerste gevel zijn de reparaties duidelijk zichtbaar (figuur 27) en bij de gevel van Het Schip in Amsterdam zijn ze van dichtbij nauwelijks en vanaf de openbare weg niet zichtbaar (figuur 28). Het resultaat staat of valt bij en zorgvuldige uitvoering en een juiste keuze van type en kleur reparatiemortel.

Tussen 2015 en 2018 zijn het interieur en exterieur van Het Schip grondig en zorgvuldig gerestaureerd. Daarbij zijn ook de gevels minutieus hersteld. Grotere en meer constructieve schaden zijn hersteld door het inboeten van bakstenen. Kleinere vooral esthetische schaden zijn hersteld met behulp van Jahn steenreparatiemortel. De mortelreparaties sluiten zowel qua structuur als kleur bijna naadloos aan op de baksteen.



Figuur 29: Het dwarstransept van de Domkerk in Utrecht. Geveldeel en basement van rode zandsteen en hoekblokken van ledesteen, hersteld met reparatiemortel.

Dwarstransept Dom in Utrecht

Van de grote gotische kerk die in het centrum van Utrecht werd gebouwd vanaf 1254 resteren tegenwoordig alleen nog het koor, het dwarsschip en de toren.

De basementen van de pijlers van het dwarsschip van de Domkerk zijn opgebouwd uit rode zandsteen. De hoekblokken van de pijler in de gevel zijn van Ledesteen. Typisch voor Ledesteen is de zogenaamde 'meelzak' vormige verwerking, waarbij de hoeken van de blokken afgerond raken.

In de jaren '80 zijn aan het schip verschillende soorten herstel uitgevoerd met Alja M70 van de firma Jahn.¹⁷ Waarschijnlijk zijn daarmee zowel de ledesteen hoekblokken aangeheeld als de basementen van rode zandsteen, zie figuur 29.

De reparaties zijn technisch nog in redelijk goede conditie. Bij de hoekblokken onderscheid de reparatiemortel zich (inmiddels) qua kleur wel duidelijk van de Ledesteen. Bij het basement zijn natuursteen en reparaties samen gelijkmatig verweerd en valt de kleur van de mortel minder uit de toon.

De mortelreparaties aan het basement zijn typerend voor veel situaties. Beschadiging aan grotere geprofileerde stukken natuursteen die vaak vooral om esthetische redenen worden hersteld met reparatiemortel. Door de vorm is herstel met mortel eenvoudiger en sneller uit te voeren dan herstel met natuursteen.



Figuur 30: Voorgevel in van een negentiende-eeuws winkel-woonhuis in Amsterdam. Natuurstenen waterlijst met oudere mortelreparties.

Amsterdam, Nieuwezijds Voorburgwal

Een gevel van een winkel-woonhuis in oudhollandse neorenaissancestijl. Ontworpen door architect Bleys en gebouwd in 1886. In het verleden zijn diverse elementen gerepareerd met reparatiemortel. Onder andere de natuurstenen kozijnen en spekbanden (fig. 30 links) en de waterlijsten (fig. 30 rechts). De gevel werd geïnspecteerd omdat stukken mortel op de openbare weg vielen en ook tijdens de inspectie kwamen grote delen mortel los. Dergelijke overhangende en kwetsbare reparaties brengen risico's met zich mee, zeker als bij het aanbrengen geen verankeringen zijn gebruikt.



Figuur 31: Atlantic huis in Rotterdam, 'borstweringen' die over de volledige breedte zijn afgewerkt met mortel.



Figuur 32: Natuurstenen elementen met mortelreparaties van de grote kerk in Breda.

4.3.3 *Rotterdam, Atlantic huis*

Het Atlantic Huis is ontworpen door architect P.G. Buskens in art-decostijl en gebouwd tussen 1928 en 1930 ; het is één van de eerste bedrijfsverzamelgebouwen in Nederland. In het verleden zijn de natuurstenen 'borstweringen' aan de bovenzijde over grote oppervlakken afgewerkt met mortel, zie figuur 31. Een typisch voorbeeld van een meestal weinig duurzame toepassing van reparatiemortel

4.3.4 *Breda, de Grote of Onze-Lieve-Vrouwekerk*

Midden jaren negentig zijn natuurstenen elementen van de vijftiende-eeuwse kerk, zoals deze kruisbloemen van zandige kalksteen (Ledesteen), vermoedelijk uit de bouwtijd, hersteld met een reparatiemortel. Het doel van de architect van de reparaties was om de oorspronkelijk natuursteen te beschermen met een soort 'paraplu' van mortel (het gebruik van reparatiemortel werd beschouwd als tijdelijke maatregel voor een periode van 20 jaar).⁴³ In 2005, circa acht tot tien jaar na het aanbrengen van de mortel, kwamen bepaalde reparaties weer los, zie figuur 32. Andere mortelreparaties uit de jaren negentig bleken overigens nog wel in goede staat. De reparaties waren uitgevoerd in Monulit. Het is de vraag of deze reparatie goed is uitgevoerd, of Monulit voldoende compatibel is en of dergelijke kwetsbare en door weer en wind belaste onderdelen zich goed lenen voor herstel met reparatiemortel.

4.4 Bespreking en conclusies

Uit de casuïstiek, verzameld door archiefonderzoek, enquêtes, interviews, bezoek aan case-studies en eigen ervaring van de onderzoekers blijkt dat reparatiemortels het meest worden gebruikt voor het herstel van natuursteen. Voor baksteen worden reparatiemortels minder vaak gebruikt, mogelijk omdat beschadigd baksteen meestal makkelijker en goedkoper kan worden vervangen. Daarnaast kan het gebruik van reparatiemortels bij natuursteen ook worden verklaard doordat het vaak meer decoratieve elementen betreft of beeldhouwwerk waaraan meer cultuurhistorische waarden zijn verbonden. Behoud van oorspronkelijk materiaal inclusief een mogelijk aanwezige oppervlaktebewerking, speelt dan een grotere rol. Ook kunnen de kosten voor het vervangen van dergelijke elementen relatief hoog zijn ten opzichte van plaatselijk herstel met een reparatiemortel.

Een ander voordeel van reparaties met mortel ten opzichte van inboeten (inschieten) van een stukje natuursteen is dat makkelijker de vaak onregelmatige vorm van de schade kan worden gevolgd waardoor de reparatie relatief klein kan blijven. Daarnaast kan een reparatie met mortel, anders dan natuursteenvervanging, vanuit een hoogwerker uitgevoerd worden.

Reparaties die vooral om esthetische redenen worden uitgevoerd kunnen ook technisch wel een positief effect hebben. Ze kunnen vochtindringing beperken en daardoor verder verval vertragen en zo bijdragen aan het behoud van het oorspronkelijke natuursteen. Echter, als de mortel qua technische eigenschappen onvoldoende compatibel is, kan het ook een negatief effect hebben op de instandhouding.

Door veroudering, verkleuring, vervuiling of het ontstaan van patina kan de beleving van de reparatie wel veranderen. Reparatie kunnen zich sterker gaan aftekenen of juist minder gaan opvallen. Van invloed daarbij is ook of is gerepareerd met op kleur gebrachte mortels (met pigment of met toeslagstoffen) of dat reparaties zijn geretoucheerd. Oudere reparaties die technisch nog voldoen maar qua kleur storend zijn gaan afwijken, kunnen relatief eenvoudig worden geretoucheerd, wat in de praktijk ook wordt gedaan. Naast de kleur van de reparatie is ook de oppervlaktestructuur, de wijze van afwerken en de mate waarin die aansluit bij het omliggende materiaal, heel belangrijk voor de beleving. De kleur van reparaties kan naderhand relatief makkelijk worden aangepast, de oppervlaktestructuur echter niet.

Er zijn gunstige en duidelijk minder gunstige toepassingen te onderscheiden. Vooral ten aanzien van de plek van de reparatie in de gevel, bijvoorbeeld in het vlak of aan de onderzijde van een waterlijst.

Weinig duurzaam blijken reparaties te zijn waarbij grote vlakken, evenwijdig aan het oppervlak, worden gevuld of aangesmeerd met mortel. Zeker in situaties waar blokken met staand leger zijn toegepast en waar ook sprake is van delaminatie. Ook risicovol zijn overhangende, uitkragende reparaties, zoals waterlijsten. Reparaties van traptreden met mortel gaan meestal ook niet lang mee.

Uit het onderzoek blijkt dat indien reparaties zorgvuldig worden uitgevoerd met een goed passende mortel ze vrij lang mee kunnen gaan, meer dan 20 jaar en geregeld ook aanzienlijk langer. Esthetisch gezien kunnen ze ook een bevredigend resultaat geven.

5.1 Algemeen

In de restauratiepraktijk worden vaak kant-en-klaar reparatiemortels gebruikt. Terwijl morteleigenschappen (en de manier waarop deze met de eigenschappen van de ondergrond afgestemd zijn) van primair belang zijn om het gedrag van de mortel in de praktijk te bepalen, is er van kant-en-klaar mortels vaak weinig bekend. In de productbladen zijn slechts enkele eigenschappen aangegeven en deze zijn niet altijd de meeste relevante om het gedrag van de mortels te kunnen voorspellen (zie ook tabel 7). Daarnaast geeft niet elk productblad dezelfde eigenschappen aan, of zijn deze gemeten volgens verschillende (standaard)procedures. Al deze factoren maken het moeilijk voor de gebruiker om een mortel te kiezen op basis van zijn eigenschappen; de keuze wordt dus vaker slechts op basis van ervaring gemaakt, zonder de ondersteuning van wetenschappelijk onderbouwde criteria. Onderzoek naar prefab restauratiemortels heeft daarnaast laten zien dat ze lang niet altijd de verwachte samenstelling hebben.

Om meer inzicht te krijgen in de eigenschappen en dus het gedrag van dergelijke kant-en-klare reparatiemortels is een laboratoriumonderzoek opgezet; dat wordt in dit deel van het rapport beschreven.

Tabel 7: Geselecteerde relevante eigenschappen en eisen

Eigenschap	Eisen (in relatie met de eigenschappen van de steen)	Referentie
Waterabsorptiecoëfficiënt.	50-100%	Snethlage 2011 ²³
Droging	Vergelijkbaar met ondergrond	auteurs
Open porositeit	> 80% van die van de ondergrond	Isebaert et al. 2014 ²⁷
Poriegrootteverdeling	vergelijkbaar met ondergrond	Isebaert et al. 2014 ²⁷
Dynamische E modulus	< 80%	Snethlage 2011 ²³
Druksterkte	< 60%	Snethlage 2011 ²³
Hechting	Breuk in de mortel of aan de grens of in de mortel bij een zo hoog mogelijk kracht	auteurs
Hygrische uitzetting	50-100%	Snethlage 2011 ²³

*)aangepast op andere maat proefstukken

Als eerste is, op basis van eigen kennis en literatuuronderzoek (zie § 2), een keuze gemaakt van de eigenschappen die relevant zijn om de compatibiliteit en duurzaamheid van een reparatiemortel te kunnen voorspellen. Daarnaast zijn ook eigenschappen geselecteerd die vaak in productbladen worden opgegeven, om daarmee een vergelijking te kunnen maken.

Deze eigenschappen zijn bepaald voor een selectie van vier reparatiemortels, gekozen uit de meest gebruikte kant-en-klare producten in de Nederlandse restauratiepraktijk (zie § 3 van dit rapport). De resultaten van het laboratoriumonderzoek worden geëvalueerd op basis van de eisen voor compatibiliteit en duurzaamheid die eerder zijn gegeven in § 2 van dit rapport.

5.2 Selectie van te meten eigenschappen

Compatibiliteit is de belangrijkste eis voor reparatiemortels. Een mortel is compatibel als deze geen schade (in brede zin, zowel technisch als esthetisch en historisch) veroorzaakt aan de bestaande materialen en tegelijkertijd zo duurzaam als mogelijk is in de gegeven situatie. Compatibiliteitseisen omvatten, naast esthetische eisen (die in dit deel van het onderzoek niet onderzocht zijn), ook technische eisen, dat wil zeggen eisen met betrekking tot fysische, chemische en mechanische eigenschappen. In § 2 is een overzicht gegeven van de eigenschappen die in de literatuur als relevant worden beschouwd voor het bepalen van de compatibiliteit van reparatiemortels. Dit zijn lang niet altijd dezelfde eigenschappen als die in de productbladen van de producent worden vermeld.

In dit deel van het onderzoek is een keuze uit de relevante eigenschappen gemaakt en zijn deze op een selectie van kant-en-klare mortels bepaald; voor elke van deze eigenschappen zijn op basis van de beschikbare literatuur en eigen ervaring, eisen vastgesteld (tabel 7). Hieronder wordt de keuze van deze eigenschappen toegelicht.

Van de fysische eigenschappen is het gedrag met betrekking tot vochttransport één van de meest relevante. De capillaire waterabsorptie en het drogingsgedrag, in vergelijking met die van de ondergrond, zijn van groot belang. Een reparatiemortel die de droging aanzienlijk vertraagt, zal het risico op vochtgerelateerde processen (biologische groei, zout- en vorstschade) verhogen. Het is van belang om te realiseren dat het waterdamptransport (in productbladen vaak aangegeven als waterdampdiffusieweerstand (μ) geen compleet beeld geeft van het drogingsproces en dus misleidend kan zijn. Een materiaal droogt in twee fasen: een eerste, snelle fase waarin het drogingsfront zich aan het oppervlak bevindt en droging via vloeibaar watertransport plaatsvindt, en een tweede, tragere

fase, waarin het drogingsfront zich in het materiaal terugtrekt en droging alleen nog door waterdamptransport plaatsvindt. Bij hoge vochtgehalten in het materiaal is de eerste fase het meest van belang. De volledige drogingscurve geeft dus een veel completer beeld dan alleen het meten van de waterdampdiffusieweerstand μ . Om deze reden is besloten om de drogingscurve in plaats van de waterdampdiffusieweerstand μ te bepalen.

Capillaire absorptie en droging worden voornamelijk door de poriestructuur van een materiaal bepaald. Deze kan voor een deel onderzocht worden door de porositeit en de poriegrootteverdeling te meten met behulp van verschillende methodes (immersie, hygroscoopische adsorptie, microscopie) en technieken (kwikporosimetrie, MIP). Parameters als tortuositeit van de poriën zijn ook relevant voor het vochttransport, maar moeilijk te bepalen; ze worden zelden gemeten en vermeld.

Andere fysische eigenschappen die van belang zijn voor de compatibiliteit van een reparatiemortel zijn de initiële krimp en de hygrische uitzetting van de mortel. Met initiële krimp wordt de krimp bedoeld die direct na het aanbrengen van de mortel plaatsvindt; deze wordt sterk beïnvloed door de wateropname van de ondergrond, dus door vochtgehalte, porositeit en poriegrootte daarvan in vergelijking met die van de mortel. Een te hoge krimp kan scheurtjes veroorzaken (vaak geconstateerde schade in reparatiemortels, zie ook §3). Initiële krimp is moeilijk te meten en wordt, waarschijnlijk door deze reden, in de literatuur niet vaak bij de relevante eigenschappen genoemd. Daarom is besloten deze eigenschap in dit onderzoek niet te bepalen.

Hygrische uitzetting, dat wil zeggen het uitzetten van een materiaal onder invloed van zijn vochtgehalte bij verschillende RV's, wordt relevant op het moment dat deze erg verschillend is van die van de ondergrond. De hygrische uitzetting bij 20 °C tussen 30% en 95% RV en na verzadiging van de mortels in water is in dit project onderzocht.

Thermische uitzetting is voor het Nederlandse klimaat als zijnde van minder invloed op het gedrag van de mortels ingeschat en dus niet onderzocht.

Naast fysische eigenschappen zijn mechanische eigenschappen van de mortel van belang voor de compatibiliteit. Aangezien een reparatiemortel bijna nooit een constructieve functie heeft, is de mechanische sterkte van de mortel niet echt relevant. Niettemin, omdat buig- en druksterkte makkelijk te meten zijn, wordt deze eigenschappen vaak aangegeven in productbladen. Daarom is besloten om ook in dit onderzoek de buig- en druksterkte te meten, om de waarden met de opgegeven waarden in de productbladen te vergelijken.

Meer relevante mechanische eigenschappen, die het gedrag van de reparatiemortel medebepalen, zijn de (dynamische) E-modulus en de hechting van de mortel aan de ondergrond. Deze eigenschappen zijn dus onderzocht in dit project. De hechting van de mortels is gemeten op twee kalksteenondergronden met zeer verschillende porositeit, poriegrootte en ruwheid van het oppervlak.

5.3 Materialen en methoden

5.3.1 Typen reparatiemortels

Vier kant-en-klare reparatiemortels zijn gekozen uit de meeste gebruikte in het Nederlandse restauratiepraktijk, zoals naar voren gekomen uit de enquête en case-studies (zie § 3 van dit rapport):

- Remmers Restauratiemortel (code R): “een kant-en-klare, fabrieksmatig samengestelde mortel uit minerale bindmiddelen en natuursteengranulaat opgebouwd”.⁴⁴
- Jahn Natuursteenherstelmortel type is 0012/F/100 (code J): “zuiver mineraalgebonden 1-component mortel en speciaal ontwikkeld voor het restaureren van natuursteenelementen”.⁴⁵
- Monulit (code MT): deze mortel “is opgebouwd uit natuursteen en een mineraal bindmiddel. Het bindmiddel is een anorganisch polymeer, dat tijdens het afbindingsproces ontstaat ingevolge de reactie van de poedervormige basismassa met de ingemengde verhardervloeistof”.⁴⁶
- Mineros Antrag (code MS): voor dit product wordt door de leverancier geen technisch productblad geleverd.

Alle mortels kunnen in verschillende kleuren en korrelgrootte (van de toeslag) worden geleverd door de producent. Voor dit onderzoek is voor alle mortels een variant gekozen met maximale korrelgrootte van 5 mm en met een neutrale (beige) kleur.

De technische productbladen geven geen of weinig informatie over het type bindmiddel en toeslag. Ook de eigenschappen die door de producenten worden gegeven in de technische bladen zijn verre van compleet en niet altijd duidelijk; ook wordt de procedure die gebruikt is voor het bepalen van de waarden vaak niet genoemd (zie tabel 8).

Tabel 8: Eigenschappen opgegeven door de leveranciers van de mortels. Het vraagteken geeft aan dat de meetmethode niet vermeld is. De (soms onduidelijk) terminologie gebruikt in de tabel komt uit de infobladen.

Eigenschap	Remmers Restauratie-mortel	Jahn Natuursteenherstelmortel	Monulit	Mineros Antrag
Soortelijk gewicht [kg/dm ³]	x	x	x	
Gemiddelde poriediameter [µm]			x	
Korrelgrootteverdeling		x		
Waterabsorptiecoëfficiënt			x (Rilem II 4)	
Vrijwillige wateropname [%]		x (?)		
Capillaire wateropname (w waarde) [-]		x (?)		
Watermengfactor [ml/kg]	x	x		
Droogsnelheid [g/m ² /uur]			x (?)	
Thermische uitzettingscoëfficiënt [µm/m°C]			x (?)	
Druksterkte [N/mm ²]	x (?)	x (?)	x (?)	
Buigtreksterkte [N/mm ²]		x (?)	x (?)	
Hechtsterkte [N/mm ²]	x (?)			
Dyn. E modulus [N/mm ²]		x (?)	x (?)	
E modulus [N/mm ²]	x (DIN 1048)			
Krimp [%]	x (DIN 52450)		x (?)	
Lineaire uitzettingscoëfficiënt [%]		x (?)		
Hydraulische uitzettingscoëfficiënt		x (?)		
Waterdampdoorlaatbaarheid [-]		x (?)		
Verwerkingsduur [min]			x	
Doorharding [min]			x	

5.3.2 Aanmaken van de mortel

De mortels zijn aangemaakt volgens de aanwijzingen die gegeven worden in de technische bladen. Mortels R, J en MS zijn met kraanwater gemengd (120 seconden mengen, 30 seconden wachten en dan weer 60 seconden mengen). Er is een hoeveelheid water gebruikt die genoeg was om een verwerkbaarheid tussen 160 en 170 mm, gemeten volgens NEN-EN 413-2:2016⁴⁷, te bereiken (figuur 33). Mortel MT is met de bijbehorende aanmaakvloeistof (een watergebaseerde dispersie) gemengd in de dosering die door de producent is aangegeven. In het geval van mortel MT was het niet mogelijk om de verwerkbaarheid te bepalen, omdat de mortel te snel hard werd. De hoeveelheid gebruikt water of aanmaakvloeistof en de verwerkbaarheid van de verse mortels is in tabel 9 samengevat. De mortels zijn in meerdere batches gemaakt; de verwerkbaarheid is alleen de eerste keer gemeten; daarna is altijd dezelfde hoeveelheid water of aanmaakvloeistof gebruikt.



Figuur 33: Meten van de verwerkbaarheid van de mortel volgens NEN-EN 413-2:2016

Tabel 9: Water- of vloeistofbehoefte en verwerkbaarheid van de mortels

Reparatiemortel	Waterbehoefte (ml/kg)	Verwerkbaarheid (mm)
R	170	16
J	267	15,7
MT	226*	Niet meetbaar
MS	97	15,6

*)aanmaakvloeistof in plaats van water

5.3.3 Maken van de proefstukken

Er zijn verschillende typen proefstukken gemaakt, te gebruiken voor de verschillende testen (tabel 9). De proefstukken voor het meten van de mechanische sterkte en statische en dynamische E- modulus, zijn in metalen mallen gemaakte prisma's (proefstukken type a). Alle andere proefstukken zijn op een poreuze ondergrond gemaakt. Dit omdat onder andere de porositeit en de poriegrootteverdeling van de mortel door de initiële opzuiging van de ondergrond worden beïnvloed.⁴⁸ Proefstukken die gemaakt zijn in niet-absorberende mallen zijn dus minder representatief voor deze eigenschappen van de mortels in de praktijk. De mortelproefstukken voor het meten van het vochttransport en het bestuderen van de microstructuur eigenschappen (proefstukken type b) zijn op een baksteen ondergrond gemaakt (figuur 34). De proefstukken voor het meten van de hechting (proefstukken type c1) en de hygrische uitzetting (proefstukken type c1) zijn op twee ondergronden met verschillende totale porositeit en poriegrootte en ruwheid van het oppervlak gemaakt, om

het effect van de ondergrond op de hechting te kunnen evalueren. Maastricht kalksteen (vaak als 'mergel' aangeduid, een zuivere kalksteen met ongeveer 50% open porositeit en poriën van ongeveer 40 µm diameter) en Migné (een zuivere kalksteen met ongeveer 29 % open porositeit en poriën in de orde van grootte van 0,5 -2 µm diameter)⁴⁹ zijn gebruikt als ondergronden.

In het geval van proefstukken type b en c1 is de mortel aangebracht met een dikte van 2 cm op de ondergrond; een dunne laag papier is gebruikt tussen de ondergrond en de mortel om het losmaken van de mortellaag, een paar dagen na het storten, makkelijker te maken.

De mortel voor het meten van de hechting (proefstukken type c2) is zonder papier met een dikte van 2 cm op de ondergrond aangebracht.

Na het verharden zijn uit de type b proefstukken kleinere monsters gezaagd om deze te gebruiken voor de verschillende testen en het microscopisch onderzoek. Tabel 10 geeft de verschillende types en maten proefstukken aan.

Mortelproefstukken type a en b zijn onder gecontroleerde laboratoriumomstandigheden gedroogd: de proefstukken zijn na storten enkele dagen onder plastic bewaard; daarna zijn ze in een klimaatkast bij 20 °C en 95% RV gelegd gedurende 28 dagen tot het uitvoeren van de testen. Een deel van de proefstukken type b is, na enkele dagen onder plastic, buiten, op een beschutte plek op het dak van het laboratorium, bewaard (figuur 35), om het mogelijke effect van buitencondities op de eigenschappen van de mortel te kunnen onderzoeken.

Proefstukken type c1 en c2 zijn, na enkele dagen onder plastic, buiten op een beschutte plek bewaard tot het moment van het testen.

Tabel 10: Types proefstukken en hun maten

Proefstuk	Materiaal	Maat [mm]	Curing
Type a	Mortel	160 x 40 x 40	Enkele dagen onder plastic, daarna bij 20°C 95%RV
Type b	Mortel, oorspronkelijk gemaakt op baksteen ondergrond en dan losgehaald	210 x 100 x 20	Enkele dagen onder plastic, daarna bij 20°C 95%RV of buiten beschut
Type c1	Mortel, oorspronkelijk gemaakt op Maastricht en Migné kalksteen ondergrond en dan losgehaald	160 x 20 x 20	Enkele dagen onder plastic, daarna buiten beschut
Type c2	Mortel op Maastricht en Migné kalksteen ondergrond	160 x 80 x 20	Enkele dagen onder plastic, dan buiten beschut



Figuur 34: Maken van proefstukken type b op baksteen ondergrond.



Figuur 35: Expositie buiten beschermt op dak TNO-laboratorium.

5.4 Test- en analysemethoden

Alle metingen uitgevoerd op de proefstukken worden hieronder beschreven.

5.4.1 Microscopisch onderzoek (PFM)

Het onderzoek is uitgevoerd door polarisatie-en-fluorescentiemicroscopie op drie monsters per type mortel: één monster verhard in de klimaatkamer (28 dagen) en twee monsters verhard buiten beschut, na 28 dagen en circa één jaar.

Voor het PFM-onderzoek zijn deelmonsters genomen van ca. 2 x 3 cm. Deze zijn gedroogd en nogmaals onder vacuüm geïmpregneerd met een UV-fluorescerende hars. Hierdoor zijn holtes, scheurtjes, en, door de UV-fluorescentie, variaties in capillaire porositeit zichtbaar. Vervolgens zijn de blokjes planparallel gezaagd en geslepen en gepolijst tot een dikte van 25 à 30 µm. Daardoor zijn ze geschikt voor doorvallend-lichtmicroscopie. Met behulp van polarisatie-en-fluorescentie-microscopie (PFM) kunnen vervolgens samenstelling, microstructuur en eventuele verandering daarin en/of aantastingen daarvan bestudeerd worden. Voor nadere toelichting op deze techniek, zie ⁵⁰.

Een overzicht van de onderzochte proefstukken en slijpplaten wordt gegeven in tabel 11.

Tabel 11: Bestudeerde slijpplaten

Mortel type	Curing
R	Laboratorium 1 maand
R	Buiten 1 maand
R	Buiten 12 maanden
J	Laboratorium 1 maand
J	Buiten 1 maand
J	Buiten 12 maanden
MT	Laboratorium 1 maand
MT	Buiten 1 maand
MS	Laboratorium 1 maand
MS	Buiten 1 maand
MS	Buiten 12 maanden

5.4.2 Porositeit en poriegrootteverdeling gemeten met kwikporosimetrie (MIP)

Uit proefstukken type a zijn kleine monsters van ongeveer 1 cm³ gehakt voor het meten van de open porositeit en poriegrootteverdeling door middel van kwikporosimetrie (MIP). Voor elke type mortel zijn 2 monsters gemeten.

Kwikporosimetrie is gebaseerd op het feit dat kwik een zogenaamde 'non-wetting' vloeistof is (met een contacthoek > 90 °). Een dergelijke vloeistof kan alleen onder druk in de

poriën van een (bouw)materiaal dringen. Het totale volume van kwik dat in een monster dringt is, afhankelijk van de uitgeoefende druk; bij hogere druk kan kwik in kleinere poriën dringen. Het drukverloop is dus een maat voor de poriegrootteverdeling. De testprocedure bestaat uit het plaatsen van de monsters (ongeveer 1 cm³ materiaal) in een houder (penetrometer) die met kwik gevuld wordt. Daarna wordt de druk stapsgewijs verhoogd en het volume van de kwik die in het monster dringt bij de verschillende drukken gemeten. Op basis van deze waarden en, verondersteld dat de poriën cilindrisch zijn, wordt de grote van de poriën berekend volgens de Washburn vergelijking:

$$r = -2\gamma \cos\theta/p$$

waarin

r: de radius (straal) van de porie

γ : de oppervlaktespanning van kwik

θ : de contacthoek tussen kwik en het materiaal

p: de uitgeoefende druk.

De metingen zijn uitgevoerd met een Micrometrics Autopore IV9500. Met dit instrument zijn poriën met een diameter tussen 0,007 en 366 μm te meten. Hierbij moet de kanttekening worden geplaatst dat deze methode eigenlijk niet de diameter van de poriën maar de diameter van de toegang tot de poriën meet en dat deze kleiner kan zijn dan de diameter van de poriën zelf door het zogenaamde flessenhalseffect.

5.4.3 Vochttransporteigenschappen

De capillaire waterabsorptie van de mortels is gemeten in drievoud op 50 x 50 x 20 mm monsters gezaagd uit proefstukken type a. De proefstukken zijn aan de zijanten met een epoxyhars dichtgesmeerd om absorptie en droging via deze zijden te vermijden. De proefstukken zijn met hun 50 x 50 mm zijde, die oorspronkelijk in contact was met de baksteen, in water gezet en het niveau van het water is tijdens de test constant gehouden op 2 mm boven de onderkant van de proefstukken. Het gewicht van de proefstukken is met regelmatige tijdsintervallen gemeten tot de proefstukken een constant gewicht hadden bereikt. De metingen zijn bij 20 °C 50 % RV uitgevoerd. De waterabsorptiecoëfficiënt (WAC) is vervolgens berekend als de helling van het eerste, lineaire deel van de absorptiecurve.

Na verzadiging van de proefstukken, is hun gewicht boven en onder water gemeten en zijn het soortelijke gewicht (D) en de porositeit (P) als volgt berekend:

$$D \text{ [kg/dm}^3\text{]} = 1000 * m_d / (m_a - m_w)$$

$$P \text{ [vol\%]} = 100 * (1 - D / 2650)$$

waarin:

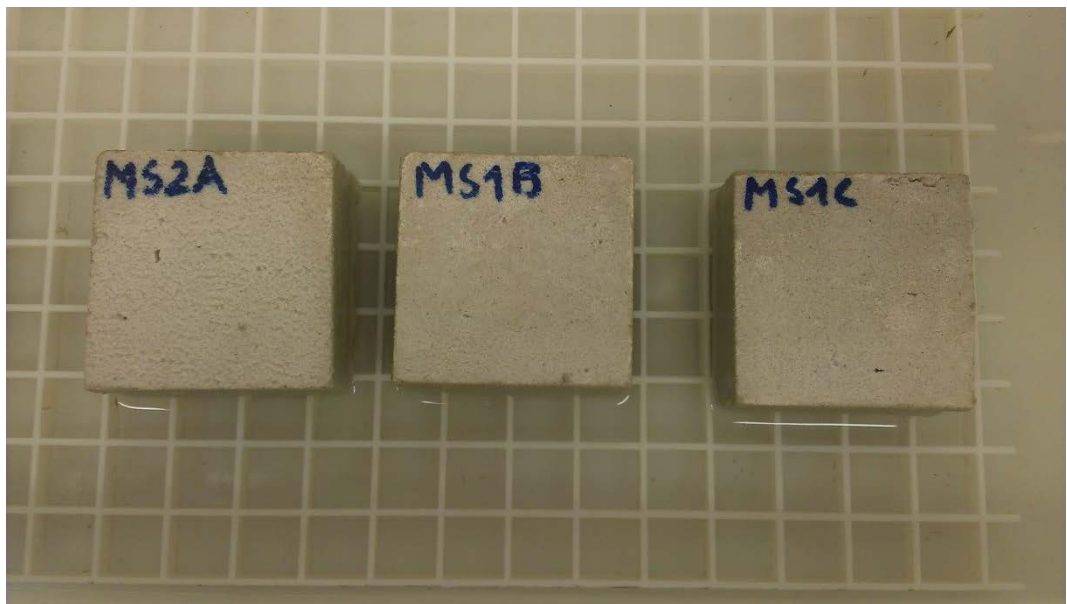
m_d = gewicht droog monster

m_a = gewicht verzadigde monster boven water

m_w = gewicht verzadigde monster onder water

en waar 2650 kg m^{-3} is dichtheid van een steenachtige bouw materiaal zonder poriën

De onderkant van de proefstukken (dat wil zeggen de zijde die in contact met water was tijdens de absorptie) is dan met dampdichte tape afgesloten (zodat de monsters alleen via het bovenoppervlak konden drogen), en de proefstukken zijn in een klimaatkamer bij $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 50 % RV gedroogd en op regelmatige tijdstippen gewogen om de drogingsnelheid te meten.



Figuur 36: Capillaire waterabsorptie metingen.

5.4.4 Hygrische uitzetting

De hygrische uitzetting, dat wil zeggen de uitzetting door vochtopname en -afgave, is bepaald op proefstukken type c1 (mortelbalken van 160 x 40 x 20 mm) door middel van een dilatometer van het merk Solertron met een precisie van 0,001 mm. Voor elke type mortel zijn 6 proefstukken gemeten, 3 gemaakt op Mergel en 3 op Migné kalksteen.

De proefstukken zijn eerst geconditioneerd in een klimaatkast bij 20 °C 30 % RV tot ze een constant gewicht hadden bereikt; hun gewicht en lengte is gemeten en gebruikt als referentie. Vervolgens is de RV stapsgewijs verhoogd naar 50, 65, 80 en 95% RV, terwijl de temperatuur constant is gehouden. Na enkele dagen conditionering bij een bepaalde RV, is het gewicht van de proefstukken en hun lengte geregistreerd. De hygrische uitzettingscoëfficiënt is als volgt berekend:

$$e_{h_{h1-h0}} = [1000 * (L_{h1} - L_{h0})] / L_{h0}$$

waarin:

$e_{h_{h1-h0}}$ hygrische uitzettingscoëfficiënt tussen conditie h0 en h1 in $\mu\text{m mm}^{-1}$

L_{h1} lengte in μm bij conditie h1

L_{h0} lengte in μm bij conditie h0

5.4.5 Hechting

De hechting van de reparatiemortels is gemeten op proefstukken type c2, dat wil zeggen mortel op ondergrond van Mergel en Migné kalksteen. Na 1 en 3 maanden buitenexpositie zijn de proefstukken getest. De trekkoppen (50 x 50 cm) zijn met een tweecomponentenlijm (X 60 van HBM) aan de mortellaag gelijmd en de mortel is rondom de trekkoppen ingeslepen; daarna is de kracht aangebracht met een snelheid van 25 N s⁻¹ tot de kop losgetrokken is. Voor elke mortel/ondergrondcombinatie en testmoment zijn meerdere testen uitgevoerd. De resultaten van de test worden geëvalueerd op basis van:

- de locatie van het breukvlak (dat wil zeggen het vlak waar het proefstuk breekt)
- de trekkracht waarbij de mortel loslaat of het proefstuk breekt

5.4.6 Dynamische E-modulus

De dynamische E-modulus (E_{dyn}) van de mortels op 28 dagen is bepaald op minimaal 5 balkjes van 40 x 40 x 160 mm per type mortel. De metingen zijn uitgevoerd door middel van een UPV (ultrasone geluidssnelheid) instrument (TICO van Proceq) (figuur 37). De metingen zijn gedaan op proefstukken die 28 dagen bij 20 °C 95% RV waren geconditioneerd en dan verzadigd met water.

De snelheid V [m/s] is gemeten en de E_{dyn} [GPa] is op basis van de volgende vergelijkingen berekend:

$$V = \sqrt{\frac{E_{dyn}(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Waar:

ν [-]= dynamic Poisson ratio (in dit geval is een waarde van 0,2 genomen)

ρ [Kg/m³]= density

$$M = \rho V^2$$

en

$$M = E_{dyn}(1-\nu) / (1+\nu)(1-2\nu)$$

5.4.7 Buigtrek- en druksterkte

De druk- en buigtreksterkte van de mortels op 28 dagen zijn bepaald op 5 balkjes van 40 x 40 x 160 mm per type mortel. Omdat een cementmortel normaal onder water verhardt en dus verzadigd wordt getest, zijn de proefstukken (opgeslagen bij 20 °C / 95 % RV) ook gedurende 48 uur met water verzadigd voor het uitvoeren van de metingen. Van de balkjes is eerst de buigtreksterkte bepaald, waarna van een van de helften de druksterkte is bepaald. De metingen zijn uitgevoerd conform NEN-EN 196-1:2016. Voor de 3-lijns buigproef wordt het balkje opgelegd op twee rollen met een hart-op-hart-afstand van 100 mm. Een derde rol in het midden drukt het midden van het balkje naar beneden tot het bezwijkt. De belasting is aangebracht met een snelheid van 50 N s⁻¹, met een voorbelasting van 25 N. De kracht op de middelste rol wordt continue gemeten. Hieruit kan vervolgens de bezwijkspanning (maximale trekspanning onderin het balkje) berekend worden. Voor de drukproef wordt het halve balkje tussen twee stalen vlakken (met een drukvlak van 40 x 40 mm) geplaatst en samengedrukt tot het bezwijkt. De kracht wordt ook hier continu gemeten. Hieruit kan vervolgens de bezwijkspanning berekend worden.

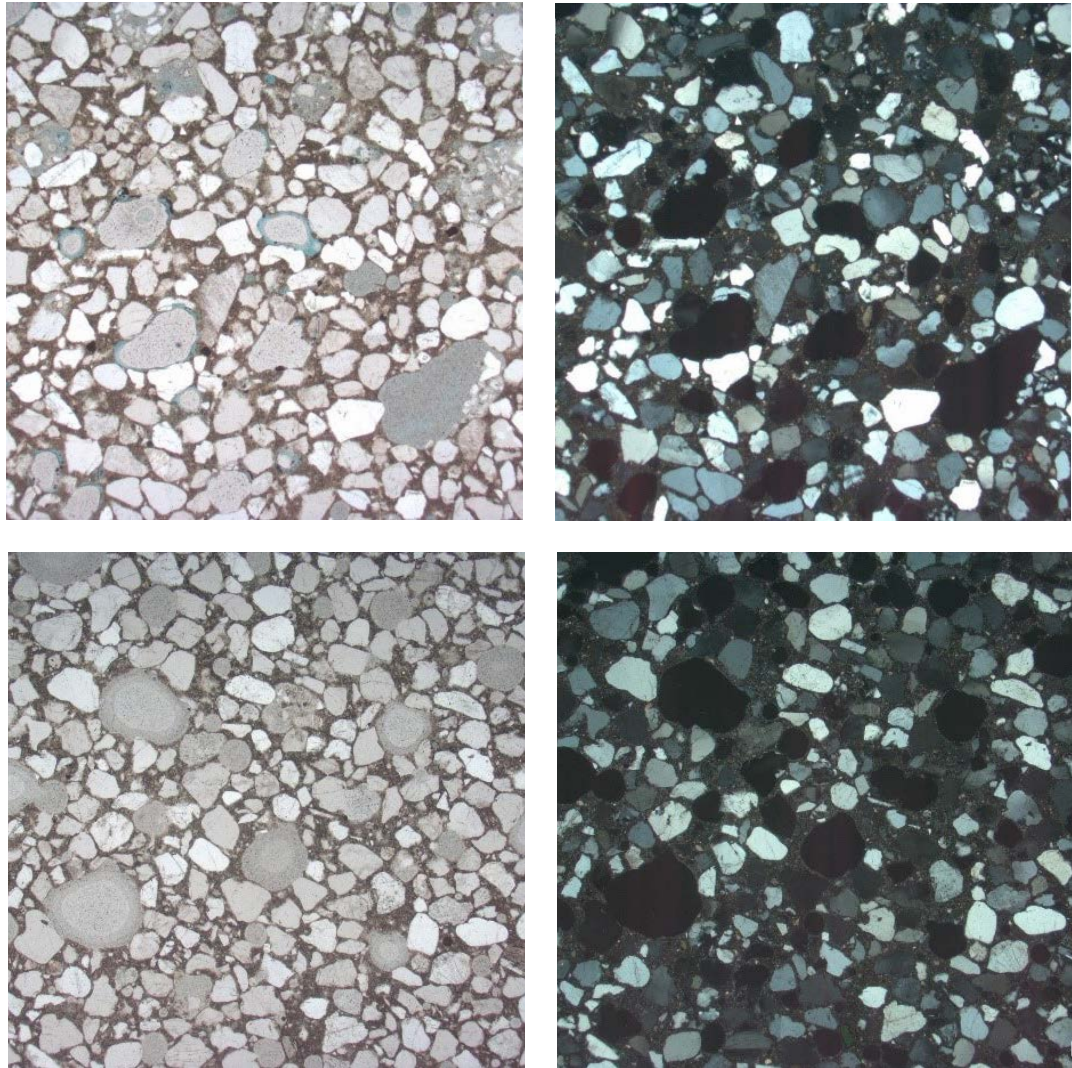


Figuur 37: Kalibreren van het ultrasoon meetapparaat

5.5 Resultaten

5.5.1 Polarisatie-en-fluorescentiemicroscopie (PFM)

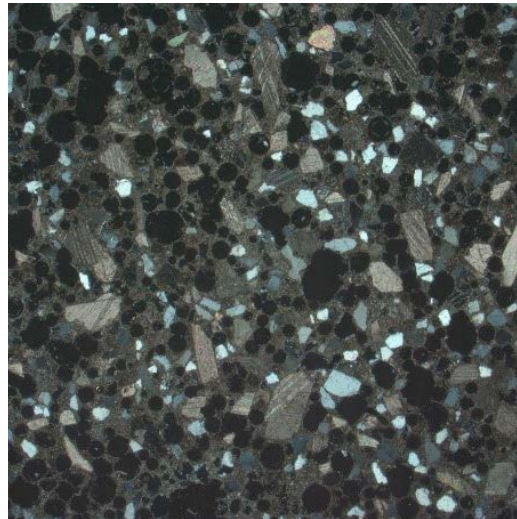
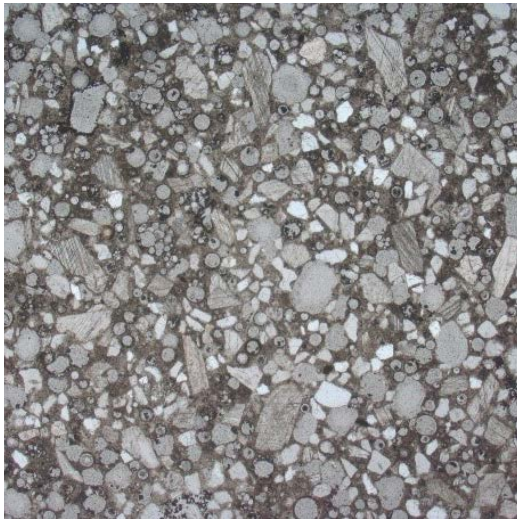
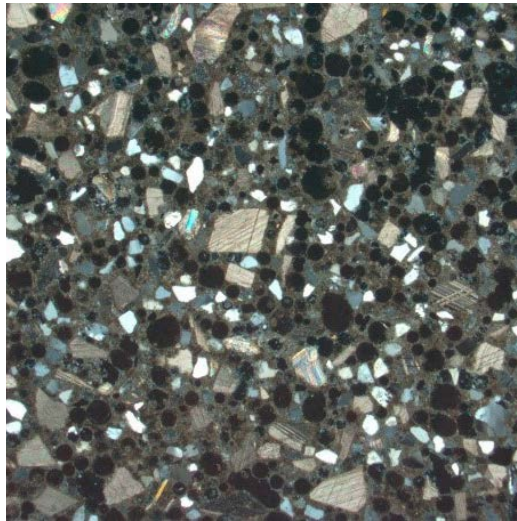
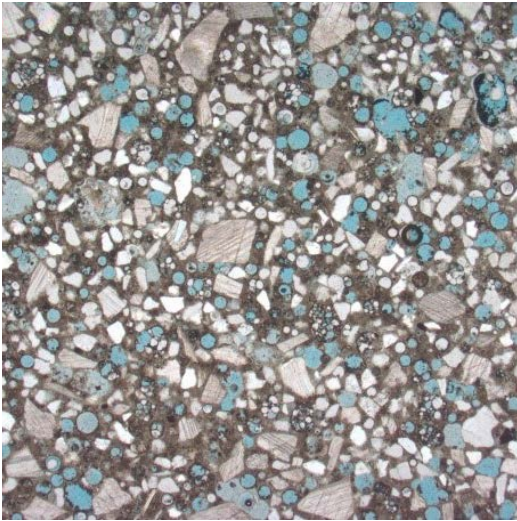
Het PFM-onderzoek is uitgevoerd op monsters verhard aan de buitenlucht (maar wel beschermt), op een ouderdom van 28 dagen en ongeveer één jaar (m.u.v. reparatiemortel MT). Een overzicht van de microstructuur van alle mortels bij deze ouderdommen wordt gegeven in figuren 38-42.



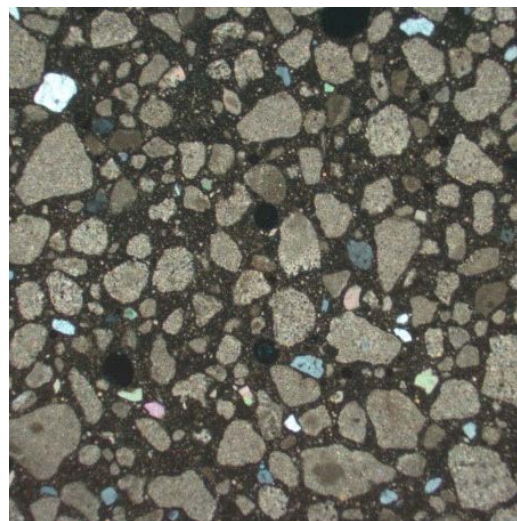
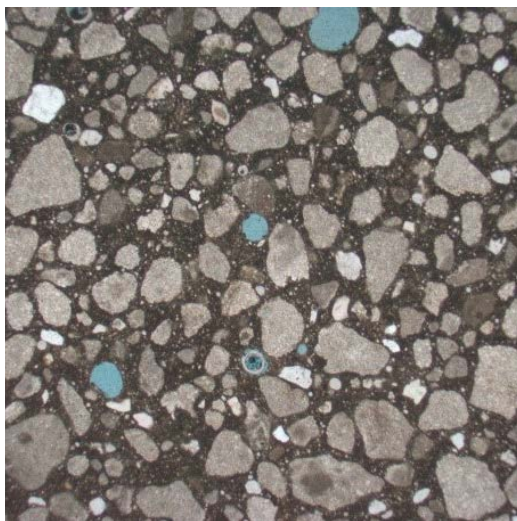
Figuur 38: Reparatiemortel R.

Figuren 38-42

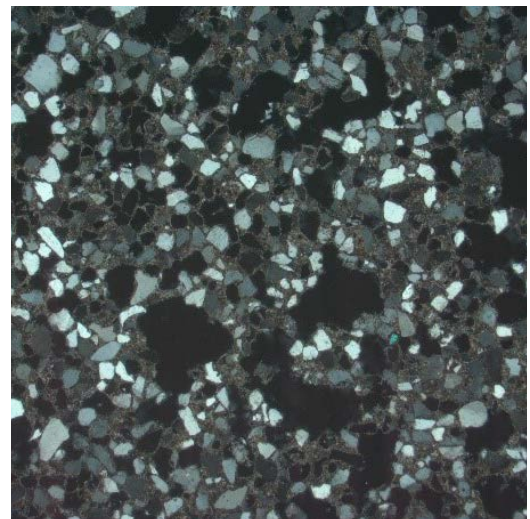
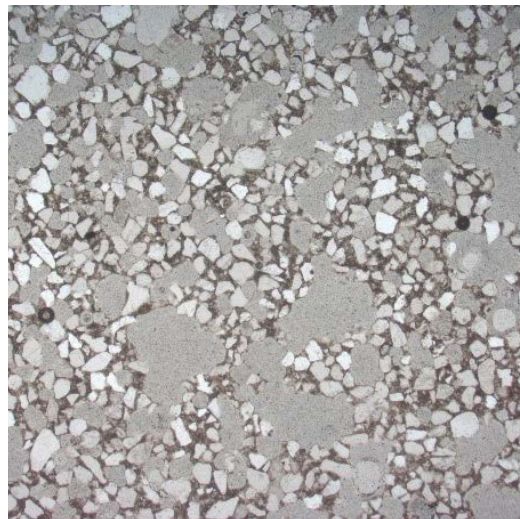
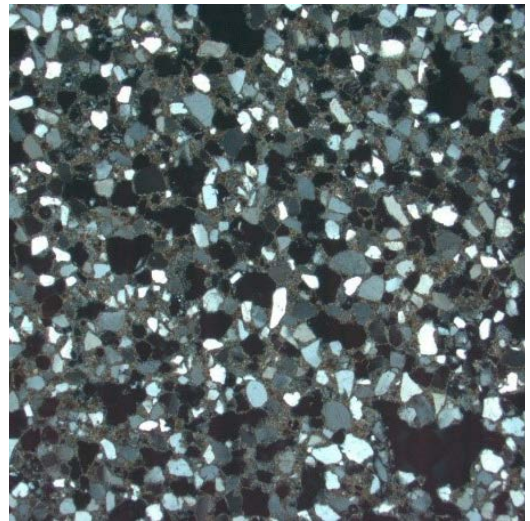
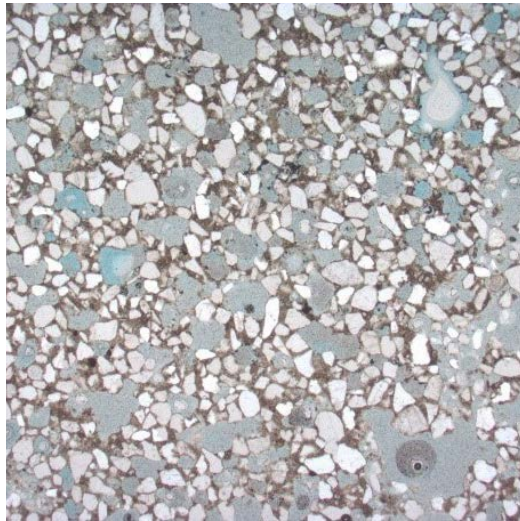
Microfoto's met overzicht van de microstructuur van de reparatiemortels na 28 dagen en circa één jaar na verharding buiten beschut (mortels J, R, MS, ZS) respectievelijk 28 dagen binnen in een klimaatkamer (mortel MT). Voor alle mortels geldt dat de bovenste foto's na 28 dagen zijn en de onderste na één jaar (m.u.v. mortel MT). Daarnaast is de linker foto steeds met parallel, de rechter met kruislings gepolariseerd licht genomen. Merk tevens op dat de slijpplaten van 28 dagen wel, die van één jaar niet geïmpregneerd zijn.



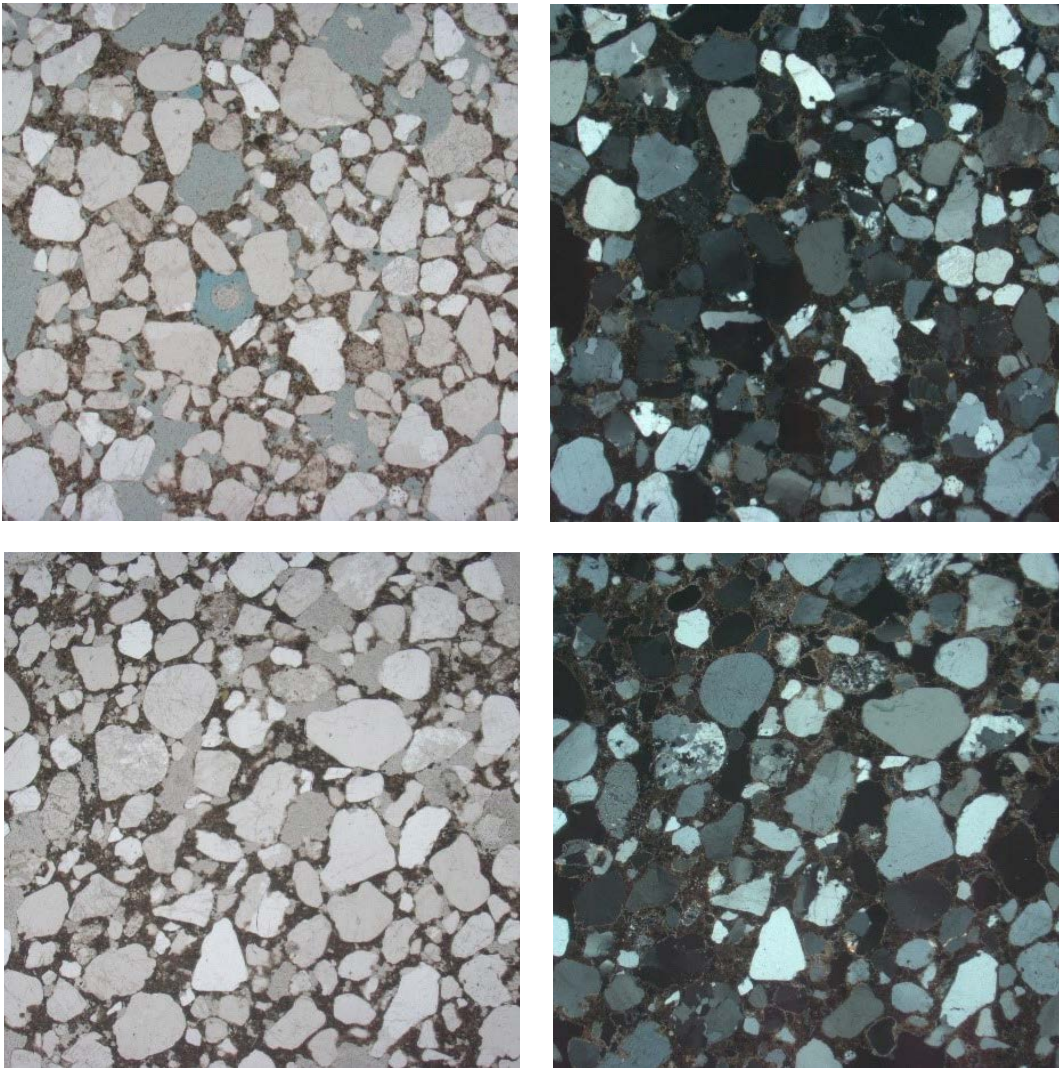
Figuur 39: *Reparatiemortel J.*



Figuur 40: *Reparatiemortel MT.*



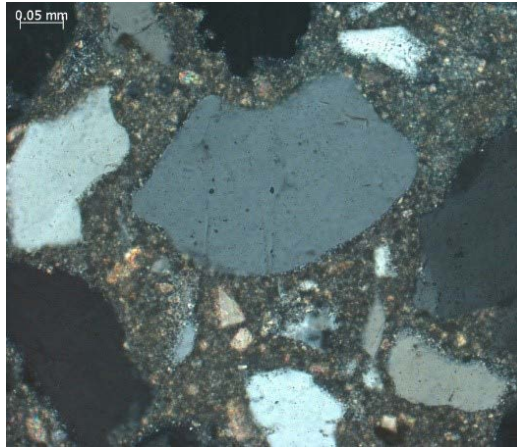
Figuur 41: Reparatiemortel MS.



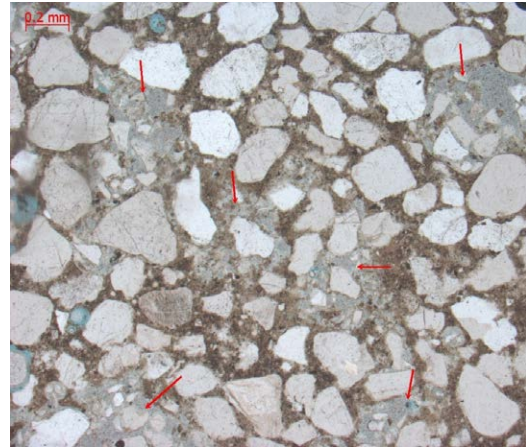
Figuur 42: Referentiemortel.

Reparatiemortel R

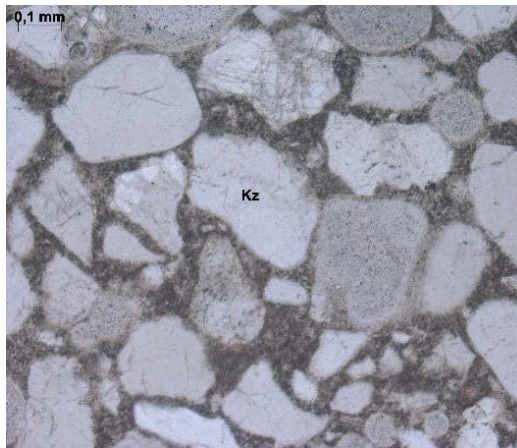
Mortel R heeft een bindmiddel op basis van fijn Portland cement waaraan kalksteenmeel is toegevoegd (figuur 43). Mogelijk gaat het om wit Portland cement. Er lijkt amper ferriet (C_4AF) aanwezig te zijn. Als toeslag is afgerond kwartzand gebruikt (figuur 45). De zichtbare porositeit wordt geschat op circa 15%. Er is amper sprake van ingevangen lucht maar er zijn grote verdichtingsholtes aanwezig (figuur 38), die soms leiden tot een gebrek aan samenhang (figuur 44). Bij curing buiten is na circa één jaar alleen de rand gecarbonateerd.



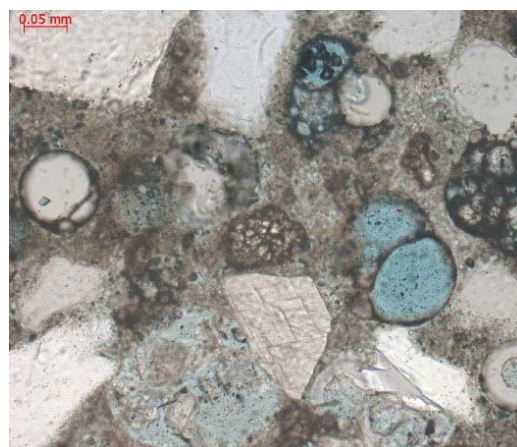
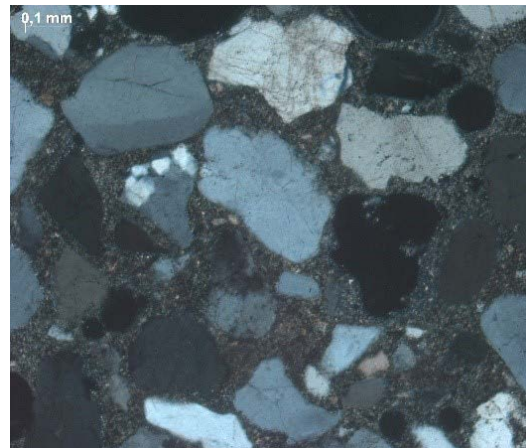
Figuur 43: Microfoto van detail van de bindmid-delmatrix van reparatiemortel R, met daarin kalk-steenmeel (28 dagen, verharding buiten; kruislings gepolariseerd licht).



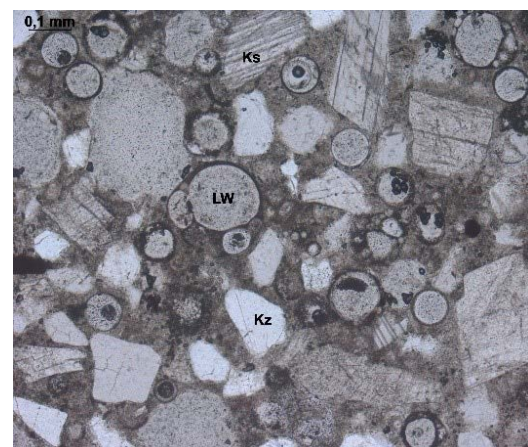
Figuur 44: Microfoto van de microstructuur van repa-ratiemortel R, met lokaal gebrek aan samenhang (28 dagen, verharding buiten; parallel gepolariseerd licht).



Figuur 45: Microfoto van de toeslag (Kz – kwartzand) in reparatiemortel R (links parallel, rechts kruislings gepolariseerd licht).



Figuur 46: Microfoto van reparatiemortel J met in het midden een cluster C_2S (28 dagen, verharding buiten; parallel gepolariseerd licht).



Figuur 47: Microfoto van de toeslag (Ks – gebroken marmor, Kz – kwartzand, LW - lichtgewichttoeslag) in reparatiemortel J (links parallel, rechts kruislings gepolariseerd licht).

Reparatiemortel J

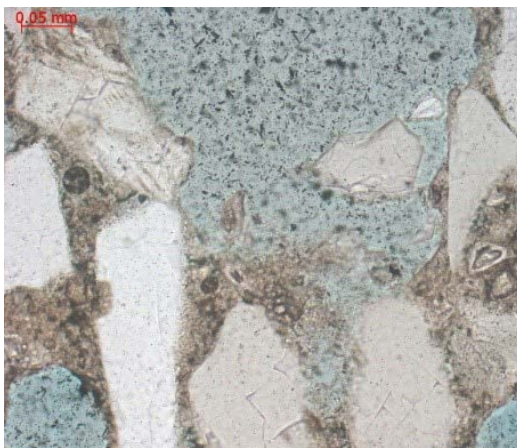
De mortel J is vervaardigd op basis van een bindmiddel van kalk met daarin hydraulische componenten, C_2S (figuur 46) en mogelijk C_3S . Waarschijnlijk gaat het om een mengsel van kalk en Portland cement dan wel een hydraulische kalk. Als toeslag zijn lichtgewicht toeslagmateriaal (geëxpandeerde klei), gebroken marmer en wat afgerond kwartszand toegepast (figuur 47). Reeds op 28 dagen is de mortel volledig gecarbonateerd. De zichtbare porositeit wordt geschat op 5%. Ronde luchtholtes (ingevangen lucht) komen amper voor, maar er zijn redelijk veel onregelmatige verdichtingsholtes aanwezig (figuur 39). Daarnaast is een (grotendeels gesloten) porositeit van circa 10% aanwezig in de vorm van holtes in de lichtgewichttoeslag.

Reparatiemortel MT

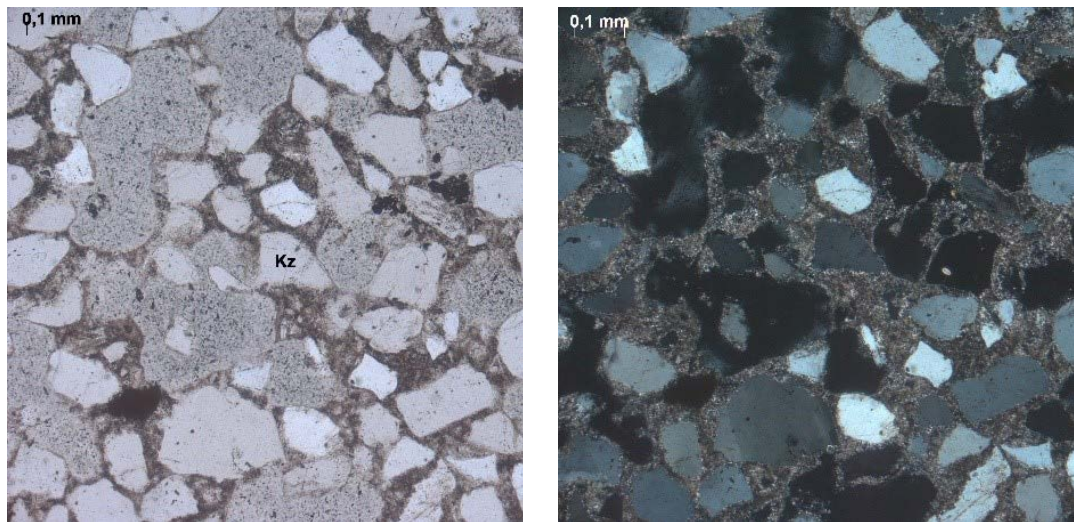
De zichtbare porositeit in de vorm van ingevangen lucht wordt geschat op circa 1% (figuur 40). Als toeslag is vrij goed afgerond kalksteenzand gebruikt. Met de interpretatie van het verhard bindmiddel bestaat geen ervaring; er lijken geen niet gereageerde bindmiddelbestanddelen aanwezig te zijn.

Reparatiemortel MS

De mortel is vervaardigd met een bindmiddel dat zowel C_2S als C_3S bevat (figuur 48), hetgeen duidt op het gebruik van Portland cement. Als toeslag is afgerond kwartszand gebruikt (figuur 49). Ronde luchtholtes (ingevangen lucht) komen amper voor, maar er zijn veel onregelmatige verdichtingsholtes aanwezig (figuur 41). De porositeit wordt geschat op 30%. De mortel is na 28 dagen gecarbonateerd.



Figuur 48: Microfoto met detail van het bindmiddel van reparatiemortel MS, met daarin zowel C_2S als C_3S (28 dagen, verharding buiten; parallel gepolariseerd licht).



Figuur 49: Microfoto van de toeslag (Kz – kwartzand) in reparatiemortel MS (links parallel, rechts kruislings gepolariseerd licht).

5.5.2 Porositeit en poriegrootteverdeling gemeten met kwikporosimetrie (MIP)

De open porositeit en poriegrootteverdeling, zoals gemeten met behulp van kwikporosimetrie (MIP), worden in figuur 50 gegeven. Voor elke mortel zijn 2 metingen uitgevoerd, die vergelijkbaar resultaten gaven. In de grafiek worden (voor een betere leesbaarheid) de resultaten van één meting voor elke mortel gegeven.

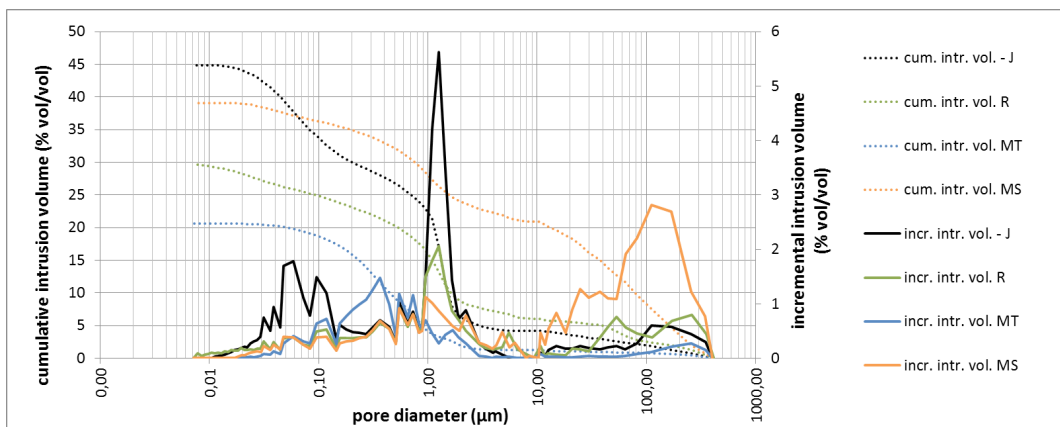
Repartiemortel J toont de hoogste open porositeit (45 vol%), met het grootste deel van de poriën tussen 0,02 en 0,1 μm en 1 en 2 μm . De poriën tussen 0,02 en 0,1 μm komen, voor een deel uit de porositeit in het bindmiddel en, zeer waarschijnlijk, voor een grote deel uit het lichtgewicht toeslagmateriaal. Zoals door de PFM-onderzoek aangetoond heeft deze repartiemortel een lichtgewicht toeslag, waarschijnlijk korrels van geëxpandeerd klei, zoals voor andere mortels van deze producent eerder aangetoond⁵¹; de diameter van deze korrels varieert tussen 50 en 100 μm . Dit suggereert dat bij hoge druk deze korrels door kwik ingedrukt kunnen worden, of via kleine poriën in de wanden of omdat de korrels door de druk kapotgaan. Het grote porievolume gemeten tussen 0,02 en 0,1 μm is dus waarschijnlijk voor een deel een artefact van de meettechniek. De gemeten open porositeit kan hierdoor iets overschat zijn. Het grote volume van poriën tussen 1 en 2 μm bevordert capillaire absorptie en transport.

Reparatiemortel MS heeft een open porositeit van 39 vol% met poriën in de hele range van grootte en een grote hoeveelheid poriën groter van 10 μm . Deze hoge porositeit bevestigt de open structuur geobserveerd met PFM.

Reparatiemortel R heeft een open porositeit van 30,5 vol%, met de meeste poriën tussen

1 en 2 μm diameter; kleinere en grovere (tussen 50 en 300 μm) poriën zijn ook aanwezig. De poriën tussen 1 en 2 μm komen waarschijnlijk door het niet volledig invullen van de ruimte tussen toeslagkorrels; de kleinere poriën zijn toe te schrijven aan de porositeit in het bindmiddel, de grovere poriën aan het niet genoeg verdichten van de mortel tijdens het aanbrengen.

Reparatiemortel MT heeft de laagste open porositeit (20,5 vol%) van de gemeten mortels. De poriegrootteverdeling is unimodaal, met de meeste poriën tussen 0,1 en 1 μm . De erg grove poriën (> 100 μm) zichtbaar in de slijpplaten zijn niet door MIP gemeten: dit kan komen door het feit dat of ze niet aanwezig zijn in de monsters gemeten door MIP (de monsters zijn zodanig klein dat dit kan gebeuren) of doordat ze zo groot zijn dat ze buiten het meetbare gebied vallen.



Figuur 50: Poriegrootteverdeling en open porositeit van de reparatiemortels zoals gemeten door kwik porosimetrie.

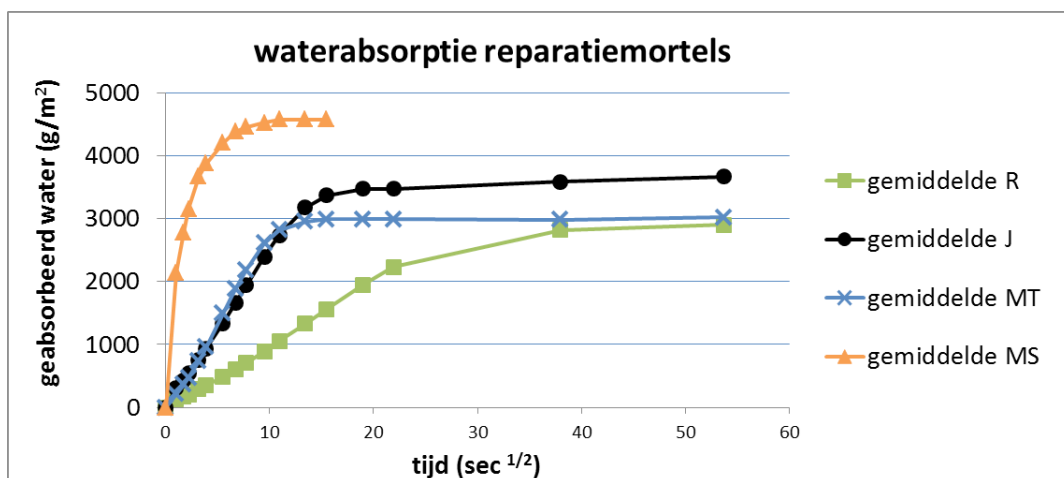
5.5.3 Waterabsorptie en droging

De capillaire waterabsorptie van de mortels wordt in figuur 51 gegeven.

De waterabsorptiecoëfficiënt, het capillaire watergehalte, het soortelijke gewicht en de porositeit van de mortels worden in tabel 12 gegeven.

De MS mortel heeft de snelste capillaire waterabsorptie ($WAC\ 1412\ \text{g m}^{-2}\ \text{sec}^{-1}$). Dit kon verwacht worden op basis van de poriegrootteverdeling, omdat deze mortel meer grove capillaire poriën bevat (tussen 10 en 100 μm) dan de andere mortels; het grote volume van poriën in deze range zorgt voor snelle en hoge capillaire wateropname.

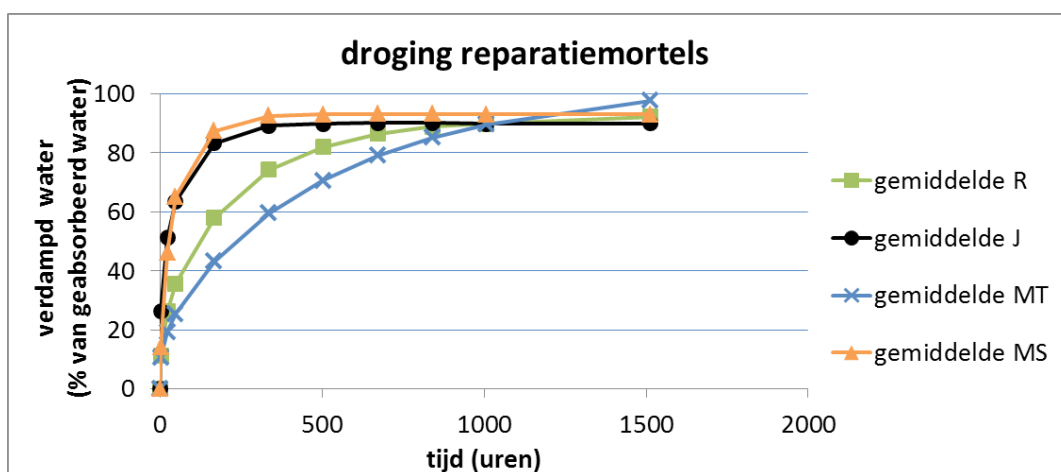
Mortels MT en J hebben een vergelijkbare WAC. Mortel R heeft de traagste waterabsorptie van alle mortels; het verschil tussen mortel R in vergelijking met mortels J en MS is te verklaren uit de MIP resultaten: mortel R heeft een lagere open porositeit en minder grove



Figuur 51: Capillaire waterabsorptie van de reparatiemortels (elke curve is het gemiddelde waarde van 3 metingen).

Tabel 12: Waterabsorptiecoëfficiënt, capillair watergehalte, soortelijk gewicht en porositeit van de reparatiemortels.

Reparatiemortel	WAC [g/(m ² sec ^{0.5})]	Watergehalte bij verzadiging door capillariteit [gew %]	Soortelijk gewicht [kg/m ³]	Porositeit (door immersie) [vol%]	Open porositeit (door MIP)
R	102	8,9	1714	35,3	30,5
J	217	13,7	1350	49,1	45
MT	275	6,3	2303	13,1	20,5
MS	1412	17,6	1386	47,7	39



Figuur 52: Droging reparatiemortels.

capillaire poriën die voor snelle absorptie zorgen. De reden waarom mortel R trager dan mortel MT absorbeert is niet direct op basis van de MIP resultaten te verklaren: de grovere poriën en een hogere open porositeit van mortel R in vergelijking met mortel MT zouden voor een snellere waterabsorptie moeten zorgen. De reden voor de tragere waterabsorptie van mortel R zou in een verschil in het porienetwerk (kronkeligheid, verbinding kleine en grove poriën) te verklaren kunnen zijn. Gelet de samenstelling van de mortel (Portland cement en kwartszand) is een andere contacthoek tussen water en de poriën en dus andere capillaire krachten niet waarschijnlijk als oorzaak, tenzij aan de mortel (met PFM niet zichtbare) (organische) hulpstoffen zijn toegevoegd die hier voor verantwoordelijk zijn.

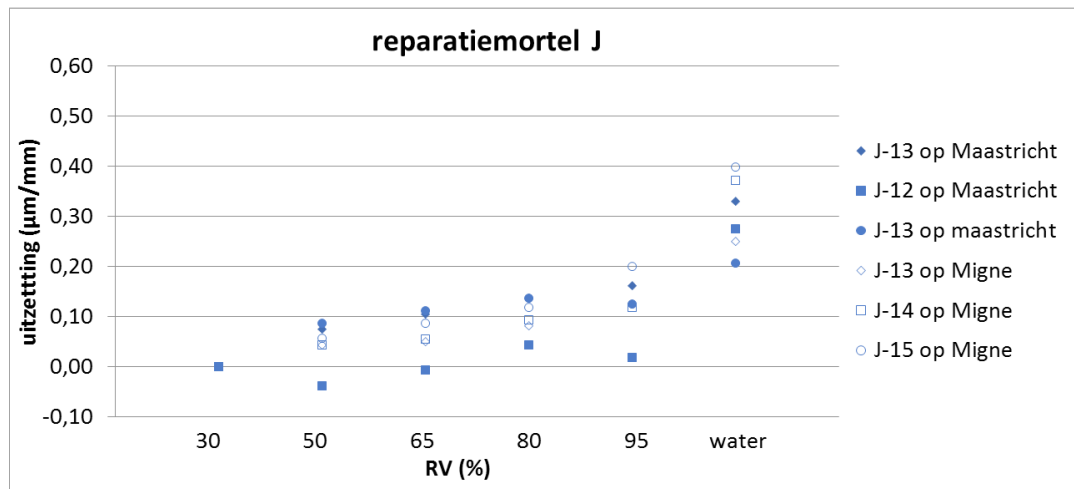
Het soortelijk gewicht van de mortels varieert tussen 1350 kg/m^3 (mortel J, met lichtgewichttoeslag) en 2303 kg/m^3 (mortel MT). De porositeit gemeten door immersie varieert tussen 13,1 en 29,1 vol%. De porositeit gemeten door immersie is, met uitzondering van mortel MT, altijd hoger dan de open porositeit gemeten door MIP. Dit kan komen door de aanwezigheid van poriën grover dan $366 \mu\text{m}$, dus buiten het gebied gemeten door MIP; PFM laat de aanwezigheid van dergelijke poriën zien.

De drogingscurves van de mortels worden in figuur 52 gegeven. Mortels MS en J tonen een vergelijkbare drogingsnelheid; hun drogingscurves voldoen aan het verwachte patroon: eerst een lineaire, snelle afname van het gewicht (droging door vloeibaar watertransport) gevolgd door een tragere droging (terugtrekkend drogingsfront en droging door waterdamptransport). Deze twee fasen zijn minder duidelijk te onderscheiden bij mortels R en MT. Mortel MT droogt met een snelheid die niet veel in de tijd verandert, zelfs niet wanneer bijna 100% van het geabsorbeerd water is verdampt. De reden hiervoor is onduidelijk en zou in het afwijkende type bindmiddel (dit zou een andere contacthoek met water kunnen hebben) en/of in de poriestructuur van de mortel kunnen liggen .

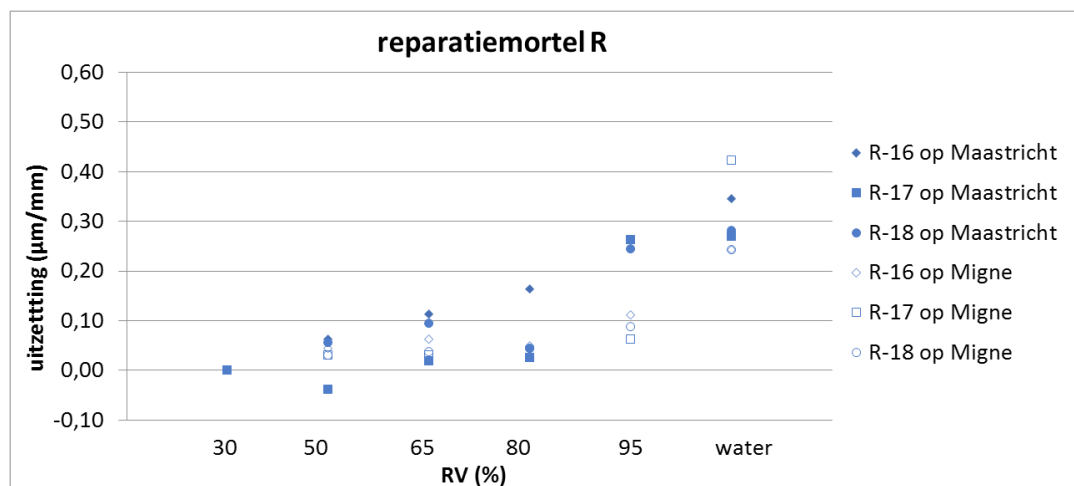
5.5.4 Hygrische uitzetting

De hygrische uitzetting van de mortels (proefstukken type c1, gemaakt op Maastricht en Migné kalksteen ondergronden) wordt in figuren 53-56 gegeven.

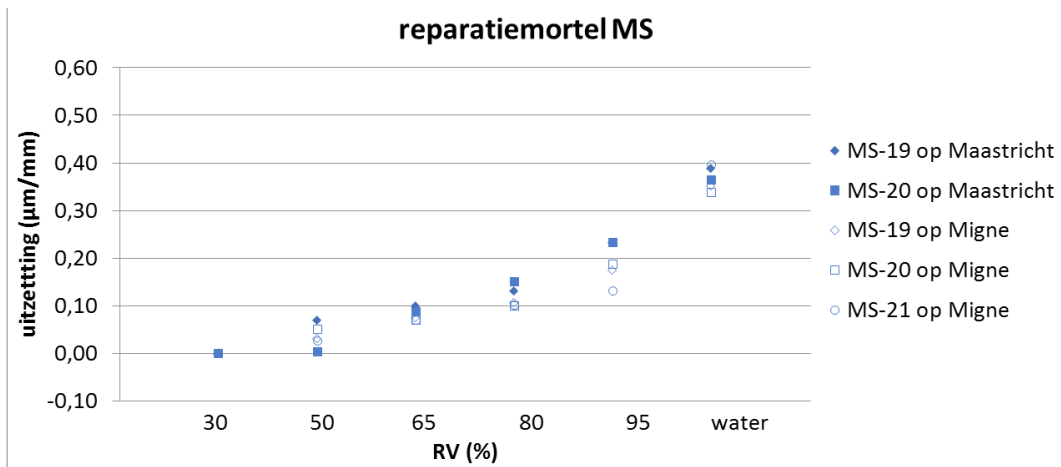
De spreiding van de data is erg groot; er is geen duidelijk verschil gevonden tussen de uitzetting van dezelfde mortel aangebracht op twee verschillende ondergronden (figuren 57-58). Zoals te verwachten, wordt de uitzetting hoger bij hogere RV en nog hoger bij onderdompeling in water.



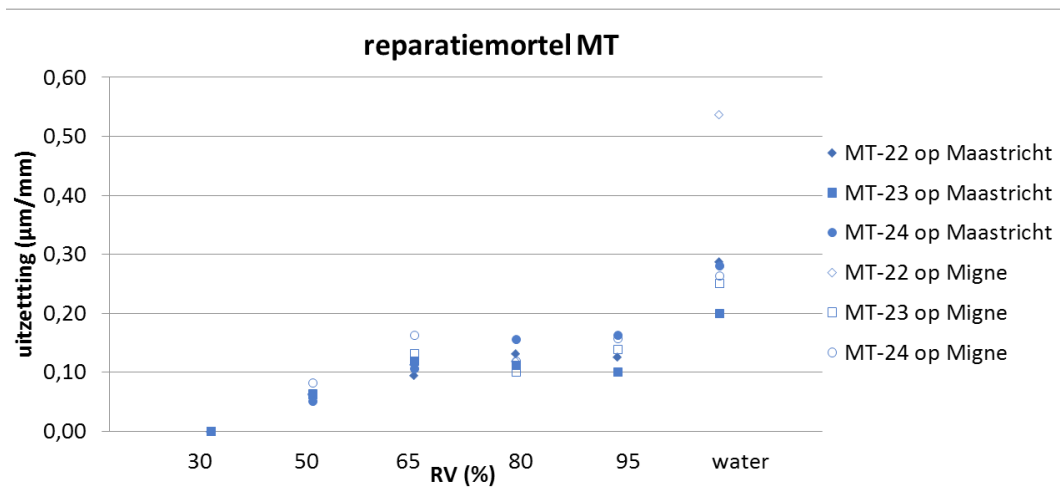
Figuur 53: Hygrische uitzetting van reparatiemortel J, oorspronkelijk aangebracht op Maastricht en Migné ondergrond.



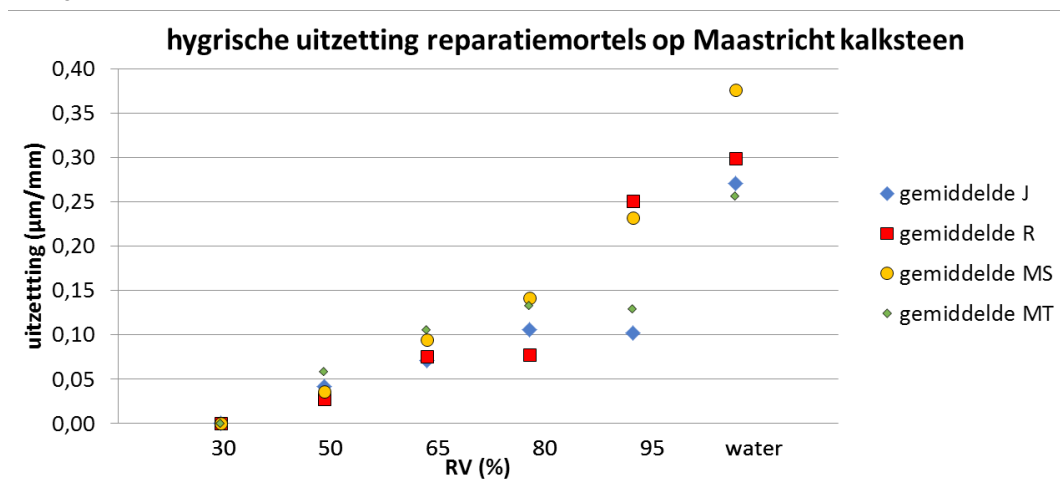
Figuur 54: Hygrische uitzetting van reparatiemortel R, oorspronkelijk aangebracht op Maastricht en Migné ondergrond.



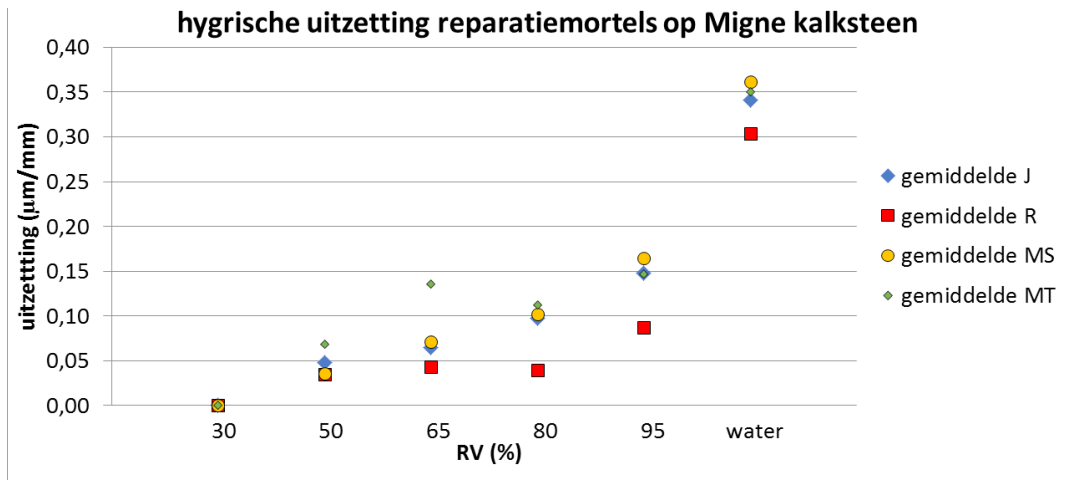
Figuur 55: Hygrische uitzetting van reparatiemortel MS, oorspronkelijk aangebracht op Maastricht en Migné ondergrond.



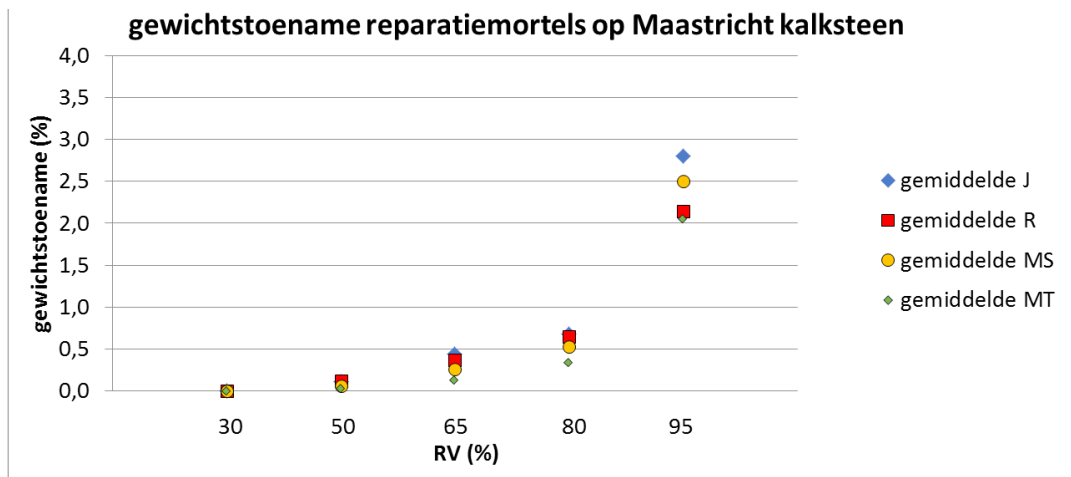
Figuur 56: Hygrische uitzetting van reparatiemortel MT, oorspronkelijk aangebracht op Maastricht en Migné ondergrond.



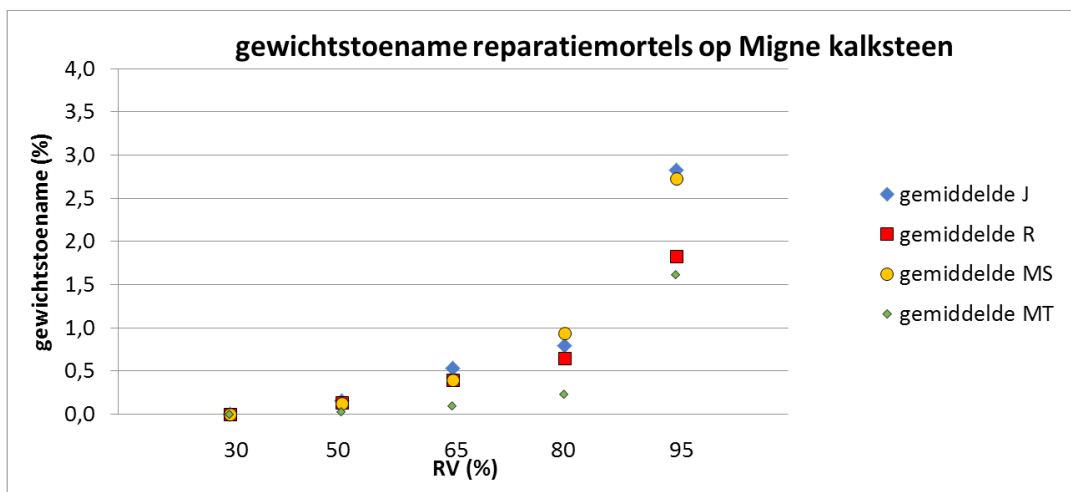
Figuur 57: Gemiddelde hygrische uitzetting van reparatiemortels, oorspronkelijk aangebracht op Maastricht ondergrond.



Figuur 58: Gemiddelde hygrische uitzetting van reparatiemortels, oorspronkelijk aangebracht op Migné ondergrond.



Figuur 59: Gemiddelde gewichtstoename van reparatiemortels, oorspronkelijk aangebracht op Maastricht ondergrond.



Figuur 60: Gemiddelde gewichtstoename van reparatiemortels, oorspronkelijk aangebracht op Migné ondergrond.

De gewichtstoename van de reparatiemortels tussen 30 % en 95 %RV wordt in figuren 58-59 gegeven. De gewichtstoename van de mortels bij 95 %RV varieert tussen 1,6 en 2,9 %; mortels J en MS tonen de hoogste gewichtstoename.

5.5.5 Hechting

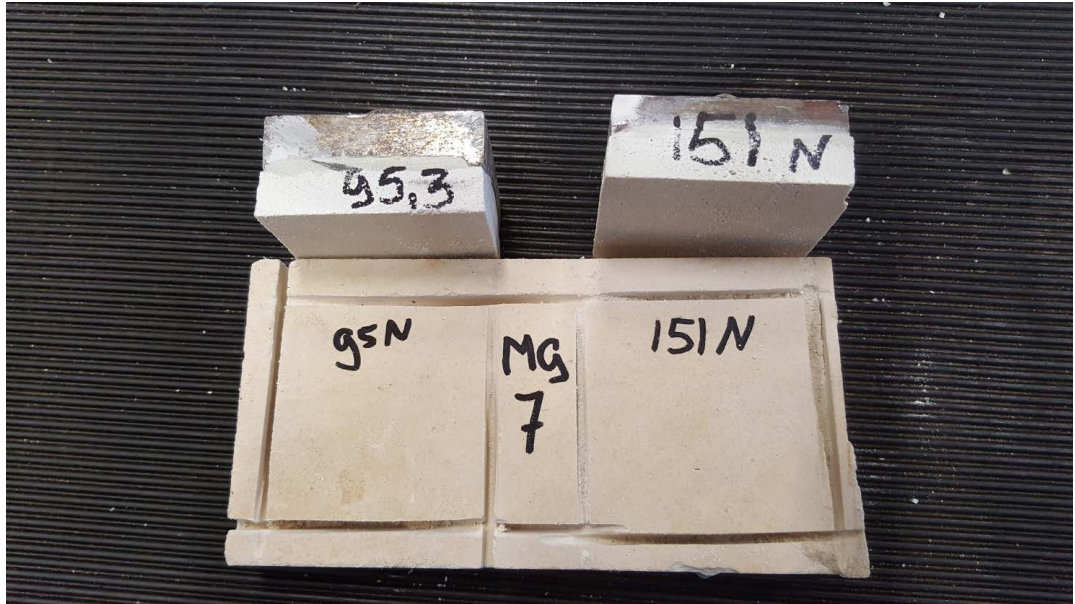
De hechting van de reparatiemortels aan de ondergrond (Maastricht en Migné kalksteen) is na 1 en 3 maanden buitenexpositie gemeten op proefstukken type c2. In tabel 13 zijn de resultaten samengevat. Niet alle proefstukken konden getest worden: in sommige gevallen kwam de mortel al los tijdens het voorbereiden van het proefstuk voor de test. De resultaten worden beoordeeld op basis van:

- het breukvlak (de locatie waar het proefstuk kapot gaat);
- de trekkracht waarbij de mortel loslaat.

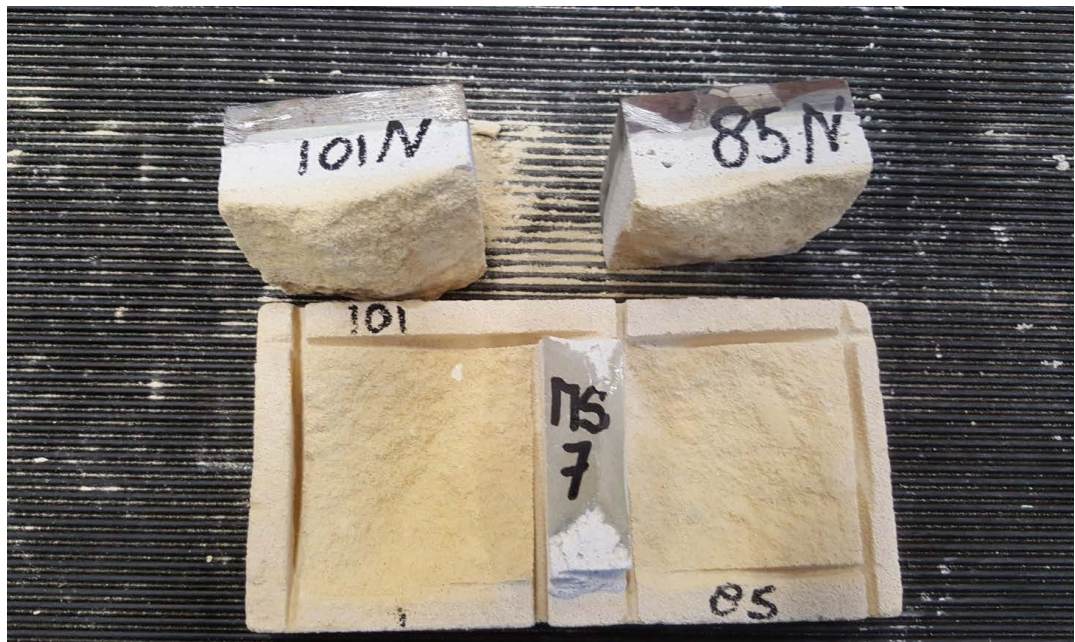
In een ideale situatie vindt breuk plaats op de grens tussen mortel en ondergrond of in de mortel zelf en komt de mortel los bij een hoge trekkracht. Een te sterke hechting van de mortel aan de ondergrond kan, afhankelijk van de sterkte van de ondergrond en de mortel, leiden tot breuk in de ondergrond en dus tot schade aan het originele materiaal.

Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Er is een erg grote spreiding van de resultaten, zelfs tussen testen uitgevoerd op hetzelfde proefstuk. Dit geeft aan dat een groter aantal van testen nodig is om met meer zekerheid conclusies te trekken.
- De mortels aangebracht op de Migné kalksteen komen meestal los op het hechtvlak tussen mortel en ondergrond (figuur 61). Dit was te verwachten door de fijnere en gladdere structuur van deze steen die hierdoor tot minder sterke hechting leidt. Dit bezwijkbeeld kan positief zijn als het loskomen van de mortel bij een voldoende hoge trekkracht plaatsvindt. Dit was echter niet altijd het geval; in sommige proefstukken kwam de mortel zelfs al los tijdens het inslijpen of vastzetten van het proefstuk.
- Van de mortels aanbracht op Migné kalksteen vertoont mortel MT de sterkste hechting; de hechting is in dit geval eigenlijk te sterk: dit is de enige mortel waarbij breuk in de Migné plaatsvindt. Mortel R heeft de laagste hechtsterkte. Deze is zo laag dat de mortel vaak loskwam tijdens het inslijpen of vastzetten van de trekkoppen.
- In het geval van de mortels aangebracht op de Maastricht kalksteen vindt de breuk vaak plaats in de ondergrond (figuur 62), zelf bij zeer lage trekkrachten (F_{max} 21 N). Dit komt waarschijnlijk (mede) door het ruwe oppervlak van deze grof poreuze steen (die tot een sterke hechting leidt) en door zijn erg lage eigen sterkte (de druksterkte van deze steen ligt veelal tussen 3 en 5 MPa.⁵²



Figuur 61: Wijze van breken van mortel MS op Migné kalksteen, getest na 1 maand: het breukvlak bevindt zich op de grens tussen ondergrond en reparatiemortel.



Figuur 62: Wijze van breken van mortel MS op Maastricht kalksteen, getest na 1 maand: het breukvlak bevindt zich in de natuursteen.

Tabel 13: Resultaten van de hechtingsmetingen

tijd	ondergrond	mortel	F max (N)	bezwijkbeeld
na 1 maand	Maastricht	R	112	hechtvlak/ondergrond
		J	> 155	ondergrond in stukken
		J	263	hechtvlak
		MS	85	100 % door ondergrond
		MS	101	100 % door ondergrond
		MT	37	hechtvlak en ca 40% ondergrond
		MT	134	100 % door ondergrond
	Migné	J	86	hechtvlak
		R	24	hechtvlak
		MS	151	hechtvlak
		MS	95	hechtvlak
		MT	> 970	hechtvlak
MT		497	hechtvlak en ca 30 % door ondergrond	
na 3 maanden	Maastricht	J	101	hechtvlak en ca 50% ondergrond
		J	52	hechtvlak
		J	200	ondergrond
		MS	222	ondergrond
		MS	21	ondergrond
		MS	227	ondergrond
		MS	145	hechtvlak en ca 20 % ondergrond
		MT	145	hechtvlak en ca 30% door ondergrond
	MT	239	hechtvlak en ca 30% door ondergrond	
	Migné	J	148	hechtvlak
		J	169	hechtvlak
		MS	68	hechtvlak
MS		124	hechtvlak	
MT		637	ondergrond	
MT		279	hechtvlak en 90% ondergrond	

5.5.6 Buigtrek- en druksterkte

De buigtrek- en druksterkte zijn op tenminste 5 proefstukken per type mortel gemeten. De proefstukken zijn vooraf met water verzadigd.

De gemiddelde waarden en de standaardafwijking worden in tabel 14 samengevat. Mortel MT is het sterkste van de geteste mortels: zijn buigsterkte en druksterkte zijn ongeveer respectievelijk 2,5-3 keer en tot 4 keer de sterkte van de andere mortels; mortels J en MS hebben de laagste mechanische sterkte.

Tabel 14: Buig- en druksterkte.

mortel	Buigsterkte-gemiddeld (standaardafwijking)	Druksterkte - gemiddeld (standaardafwijking)
	[N/mm ²]	[N/mm ²]
J	2,30	5,45
R	3,38	7,37
MT	5,56	19,54
MS	2,49	4,67

5.5.7 Dynamische E-modulus

De dynamische E-modulus is gemeten na verzadiging van de proefstukken onder water en berekend zoals in § 4.6 aangegeven. De gemiddelde waarden zijn samen met de standaardafwijking en het vochtgehalte bij het moment van het meten in tabel 15 aangegeven.

Tabel 15: Gemiddelde dynamische E-modulus en vochtgehalte van de mortel; de standaardafwijking is tussen haakjes aangegeven

Type mortel	Na 28d curing en verzadiging in water	
	E _{dyn} [GPa]	MC [gew%]
J	20,26 (0,26)	21,45
R	31,84 (0,51)	14,76
MT	58,81 (1,21)	10,67
MS	23,17 (1,31)	17,23

Jahn-mortel toont de laagste E_{dyn}. Monulit-mortel heeft een erg hoge waarde (2-3 keer zo hoog als de andere mortels). Dat betekent dat deze mortel veel stijver is dan de andere mortels en bevestigt de resultaten uit de mechanische testen.

5.6 Bespreking en conclusies

Een compatibele reparatiemortel zou duurzaam genoeg moeten zijn, maar tegelijk op de lange termijn zelf-opofferend. Dit betekent dat de morteleigenschappen zo dicht mogelijk bij die van de te repareren steen moeten liggen (zie ook § 3&6). De morteleigenschappen zijn vergeleken met de gestelde eisen (tabel 16) om de compatibiliteit van de onderzochte mortels te kunnen beoordelen op deze criteria. Ten slotte zijn de gemeten waarden, voor zo ver mogelijk, vergeleken met de waarden opgegeven door de producent. Bij het vergelijken van de onderzoeksresultaten met de waarden opgegeven door de producent, wordt vrij snel duidelijk dat slechts enkele parameters kunnen worden vergeleken: de parameters gemeten door de producenten zijn niet altijd duidelijk benoemd en de meetmethode wordt bijna nooit vermeld.

De waarden van de soortelijke massa, gemeten in dit onderzoek zijn redelijk vergelijkbaar met die aangegeven door de producent in de technische bladen. De druksterkte gemeten in dit onderzoek is in het geval van Jahn en Remmers-mortels lager dan wat wordt opgegeven door de producenten; in het geval van Monulit is dit andersom. Deze verschillen kunnen ook zijn ontstaan omdat het onbekend is op welk moment (na hoeveel dagen curing, bij welke temperatuur en RV-omstandigheden) en bij welke condities (droog, nat, verzadigd) de metingen door de producent zijn uitgevoerd. Hetzelfde geldt voor de E_{dyn} , die in dit onderzoek altijd veel hoger uitkomt dan de waarde opgegeven door de producent.

Tabel 16: Vergelijking tussen de resultaten van dit onderzoek (in zwart) en de waarden aangegeven in de technische bladen van de producten (in rood).

Producent toepassing	Soort. massa [kg/m ³]	Capillaire water opname	Druksterkte [N/mm ²]	E_{dyn} modulus GPa
Jahn M70 0012/F/100	1400	15	10-15	9-12
	1350	12,9	5,45*	20*
Remmers Restauratie-mortel	1700	-	<8-13	6-11
	1714	8,5	7,37*	31,8*
Monulit natuursteen baksteen	2150-2200		6-13	15-24
	2303	6,2	19,54*	59*
Mineros Antrag				
	1386	16,11	4,67*	23,2

*) Bij 28d in verzadigde toestanden

Er kan worden geconcludeerd dat de eigenschappen en waarden opgegeven door de producenten vaak onduidelijk en onvolledig zijn, waarbij het onmogelijk is om tot een beoordeling van de technische compatibiliteit te komen zonder een uitgebreid onderzoek (op ondergrond en mortel) uit te voeren. Het is dus wenselijk dat de producenten de relevante eigenschappen van de mortels meten volgens bepaalde overeengekomen, standaardnormen en deze duidelijk vermelden in hun informatiebladen.

Voor wat compatibiliteit betreft, deze kan alleen worden beoordeeld door een vergelijking te maken met de eigenschappen van de ondergrond. In dit geval proberen wij conclusies te trekken over de compatibiliteit van de geteste reparatiemortels met twee kalksteensoorten die sterk in porositeit en poriegrootte (en dus waterabsorptievermogen en snelheid) verschillen: Mergel en Migné. De beoordeling wordt gedaan op basis van de eigenschappen en grenswaarden genoemd in tabellen 17-18.

Uit de vergelijking (tabellen 17-18) wordt het volgende duidelijk:

- Droging en poriegrootteverdeling zijn niet in één waarde uit te drukken. Dit maakt het moeilijk om deze eigenschappen van de ondergrond en mortel met elkaar te vergelijken.
- Geen van de geteste mortels voldoet tegelijkertijd aan alle eisen. In het geval van de sterk absorberende Maastrichts kalksteen, zal het bijna onmogelijk zijn een (kant-en-klare) mortel te vinden die aan de eisen m.b.t. de waterabsorptiecoëfficiënt voldoet. Dit komt ook door de onvermijdbare aanwezigheid van kleine poriën in de mortel die het watertransport vertragen. Om de keuze van een geschikte reparatiemortel te vergemakkelijken zou het dus wenselijk zijn, om aan elke eis, afhankelijk van het effect i.v.m. compatibiliteit, een rangorde te geven. Dit kan ook door de specifieke situatie bepaald zijn.
- Sommige eisen zijn gerelateerd aan elkaar (bijvoorbeeld de WAC, porositeit en poriegrootteverdeling). De vraag is of het mogelijk is om enkele van deze eisen als optioneel te beschouwen en/of alternatieve, simpelere testmethoden te vinden om de compatibiliteit te beoordelen.

Om de validiteit en relevantie van de (nu op basis van literatuur en eigen ervaring) gestelde eisen beter te kunnen beoordelen zouden verouderingstesten nodig zijn.

Tabel 17: Compatibiliteit van de onderzochte reparatiemortels met Maastricht kalksteen op basis van de gedefinieerde eisen

Eigenschap	Eisen (in relatie met de eigenschappen van de steen)	Maastricht kalksteen	J	R	MT	MS
Waterabsorptiecoëfficiënt [g/(m ² s ^{1/2})]	50-100%	3400	217	102	275	1412
Droging	Vergelijkbaar of sneller dan ondergrond *					
Open porositeit (vol%)	> 80% van die van de ondergrond	50	45	30,5	20,5	39
Poriegrootte-verdeling	vergelijkbaar met ondergrond *	Unimodal, 40µm				
Dynamische E-modulus [GPa]	< 80%	?	20	31,8	59	23,2
Druksterkte {N/mm ² }	< 60%	5-35	5,45	7,37	19,54	4,67
Hechting	Breuk in de mortel of aan de grens met een zo hoog mogelijk kracht	n.v.t.	Breuk in ondergrond	Breuk in ondergrond	Breuk in ondergrond	Breuk in ondergrond
Hygrische uitzetting [%]	50-100%	0,39	0,27	0,30	0,26	0,38

Tabel 18: Compatibiliteit van de onderzochte reparatiemortels met Migne kalksteen op basis van de gedefinieerde eisen

Eigenschap	Eisen (in relatie met de eigenschappen van de steen)	Migne kalksteen	J	R	MT	MS
Waterabsorptiecoëfficiënt [g/(m ² s ^{1/2})]	50-100%	255 ⁵³	217	102	275	1412
Droging	Vergelijkbaar of sneller dan ondergrond *					
Open porositeit (vol%)	> 80% van die van de ondergrond	28,5	45	30,5	20,5	39
Poriegrootte-verdeling	vergelijkbaar met ondergrond *	Unimodaal, 0,5-2µm				
Dynamische E-modulus [GPa]	< 80%	?	20	31,8	59	23,2
Druksterkte {N/mm ² }	< 60%	?	5,45	7,37	19,54	4,67
Hechting	Breuk in de mortel of aan de grens met een zo hoog mogelijk kracht	n.v.t.	Aan hechtvlak	Aan hechtvlak	In ondergrond	Aan hechtvlak
Hygrische uitzetting [%]	50-100%	0,02	0,34	0,30	0,36	0,35

*) Droging en poriegrootteverdeling zijn niet in één waarde uit te drukken; een vergelijking is dus niet direct mogelijk.

Het onderzoek had als doelen: (i) een beeld te krijgen van het historische en huidige gebruik van reparatiemortels in de praktijk, (ii) hun eigenschappen en gedrag in termen van compatibiliteit en duurzaamheid en (iii) verbeterde criteria te formuleren om mensen werkzaam in de conserveringspraktijk te helpen bij:

1. het beslissen wel of niet een steenreparatiemortel te gebruiken
2. het kiezen van een geschikte steenreparatiemortel, d.w.z. een die compatibel met de ondergrond is.

Uit de bezochte cases in de praktijk blijkt dat reparatiemortels het meest worden gebruikt voor het herstel van natuursteen, minder vaak voor het herstel van baksteen. De technische en esthetische compatibiliteit van de reparatiemortels variëren. Er zijn veel gevallen waar de reparatiemortels vrij lang mee kunnen gaan, meer dan 20 jaar en ook aanzienlijk langer. Ook esthetisch gezien kunnen ze een bevredigend resultaat geven, vooral als naast de kleur ook de textuur van de reparatie goed aansluit bij het oorspronkelijk werk. Uit de praktijk bleek dat het goed toepassen van reparatie mortels veel kennis, ervaring en vakmanschap vereisen.

Sommige factoren bleken zeer relevant te zijn om de duurzaamheid van de mortel te bepalen. Deze aspecten worden in de volgende paragrafen geïnterviewd en besproken.

Wel of niet een steenreparatiemortel te gebruiken

Voordat een steenreparatiemortel kan worden gekozen, moet eerst worden overwogen of in de specifieke situatie het toepassen van een steenreparatiemortel de voorkeur heeft boven andere oplossingen, zoals het inboeten van nieuwe natuursteen of baksteen of zelfs geen interventie. Bij deze overweging komen verschillende aspecten aan bod: het doel van de interventie, de functie van de steen in zijn context, de omgevingscondities en belastingen etc. In tabel 19 worden, op basis van ervaring van de auteurs en van de geïnterviewde experts, situaties geïdentificeerd waarbij het risico van falen van een reparatiemortel hoger wordt geacht dan gemiddeld. In sommige gevallen worden suggesties gedaan om de risico's in een specifieke situatie te vermijden of te verminderen. Het optreden van (meerdere van) deze situaties kan ook een reden zijn om geen steenreparatiemortels toe te passen.

Tabel 19: Toepassingen die het risico van falen van een reparatiemortel kunnen vergroten

		Situaties die risicovol zijn	Suggesties om het risico van falen te vermijden ofwel verminderen
veiligheid		De reparatiemortel kan bij falen een veiligheidsrisico met zich meebrengen	Geen mortel toepassen OF de reparatiemortel extra aan de ondergrond te bevestigen, b.v. met koperen pennetjes EN/OF de staat van conservering van de reparatiemortel regelmatig controleren
gebruik		De reparatiemortel moet een mechanische belasting kunnen dragen (incl. overhangende en uitkragende reparaties)	Geen mortel toepassen OF de reparatiemortel extra aan de ondergrond te bevestigen EN/OF een reparatiemortel met een hoge mechanische sterkte toe te passen
reparatie	omvang van de reparatie	Vlakvullende reparatie (80-100% van het oppervlak van steen/baksteen blok),	Geen mortel toepassen OF extra aandacht aan de compatibiliteitseisen besteden OF reparatiemortel extra aan de ondergrond te bevestigen
	vorm van de reparatie	De reparatie loopt op nul uit	Geenmortel toepassen OF de vorm van de reparatie gunstiger te maken
	dikte van de reparatie	De reparatie is meer dan 20 mm dik	Geen mortel toepassen OF de reparatie extra aan de ondergrond te bevestigen, b.v. met koperen pennetjes, en te wapenen om krimp tegen te gaan
ondergrond	type ondergrond	Het gaat om een moeilijk te repareren ondergrond, qua fysische en/of esthetische eigenschappen (b.v. tufsteen) figuur 2	Geen mortel toepassen OF extra aandacht aan de compatibiliteitseisen besteden
	schade ondergrond	De ondergrond vertoont afschilfering, delaminatie of exfoliatie	Geen mortel toepassen OF de ondergrond tot op de gezonde steen weg hakken
omstandigheden	zoutbelasting	De ondergrond heeft een hoge zoutbelasting en/of vertoont zoutschade	Geen mortel toepassen OF de ondergrond ontzouten EN/OF extra aandacht aan de technische compatibiliteitseisen besteden
	vochtbelasting	De ondergrond heeft een erg hoge vochtbelasting	Geen mortel toepassen OF de vochtbron aan te pakken EN/OF extra aandacht aan de technische compatibiliteitseisen besteden

Kiezen van een geschikte reparatiemortel

Wanneer overwogen wordt om een steenreparatiemortel toe te passen, moet gezocht worden naar een mortel die compatibel is met de ondergrond en tegelijkertijd zo duurzaam mogelijk is.

Compatibiliteit omvat zowel esthetische als technische eisen.

Voor wat betreft de esthetische compatibiliteit worden de eisen voornamelijk gesteld aan kleur en textuur van de mortel. Deze eigenschappen moeten gekozen worden in afstemming met die van de ondergrond; vanwege ethische redenen moet het tegelijkertijd duidelijk blijven dat het een reparatie is en niet het originele materiaal. Het blijft dus moeilijk eenduidige grenswaarden te koppelen aan esthetische eisen, zoals bijvoorbeeld een maximale afwijking van de kleur van de mortel met die van de ondergrond. Daarnaast blijft bij elke esthetische beoordeling een subjectieve component bestaan, zoals ook blijkt uit onderzoek naar de beleving van interventies (inclusief mortels) aan natuursteen.^{54, 55} Daarnaast zullen mortel en steen vrijwel altijd verschillend verouderen, waardoor de esthetische eigenschappen met de tijd meer of minder uiteen kunnen gaan lopen. Overigens kan een kleurverschil dat ontstaat kan vrij eenvoudig worden geretoucheerd, een verschil in textuur niet.

Naast enkele eisen die aan de steenreparatiemortel zelf kunnen worden gesteld (de mortel moet een minimale sterkte hebben om een mogelijke belasting te kunnen weerstaan), hebben de meeste technische eisen betrekking op de compatibiliteit met de bestaande ondergrond. De belangrijkste aspecten van technische compatibiliteit zijn:

- Vochttransport: de mortel moet de droging van de ondergrond zo min mogelijk vertragen; tegelijkertijd moet deze niet sneller dan de ondergrond vocht absorberen. Uit dit onderzoek blijkt de noodzaak om simpelere testen te ontwikkelen, bij voorkeur op ondergrond/mortel combinaties, om het voldoen van de mortel aan deze eisen makkelijker in de praktijk te kunnen beoordelen, dan in bestaande richtlijnen voorgesteld.
- Hechting: de mortel moet, bij het loskomen, de ondergrond niet beschadigen; daarnaast moet de mortel een goede hechting met de ondergrond hebben, d.w.z. pas loskomen bij een zo hoog mogelijk kracht.
- Elasticiteitsmodulus: de reparatiemortel moet meer flexibel zijn dan de ondergrond om geen belemmering voor vervorming van de ondergrond te zijn. Dit betekent dat de reparatiemortel een lagere E-modulus moet hebben dan de ondergrond.
- Hygrische en thermische uitzetting: de thermische uitzetting is in het geval van anorganische bindmiddelen laag, en dus niet erg relevant. De hygrische uitzetting moet zo veel mogelijk in de buurt van die van de ondergrond komen (50-150% [6]). De initiële krimp staat niet expliciet in bestaande richtlijnen. Toch is het belangrijk deze ook in de beoordeling mee te nemen aangezien hij kan leiden tot falen op jonge leeftijd.
- Chemische compatibiliteit: de reparatiemortel mag geen oplosbare zouten of andere schadelijke componenten bevatten en niet tot het ontstaan van schadelijke componenten leiden door een reactie met de ondergrond.

In de bijlage van dit rapport worden vragen die vaak voorkomen in het beslissingsproces met betrekking tot reparatiemortels beantwoord, op basis van bovengenoemde criteria. Het kan worden opgemerkt dat het moeilijk kan zijn om tot de keuze van een compatibele reparatiemortel te komen op basis van de eisen uit de literatuur. Hiervoor zijn verschillende redenen, waaronder het grote aantal eigenschappen van ondergrond en reparatiemortel die volgens de belangrijkste bronnen bekend zouden moeten zijn om tot een keuze te komen.

In een vervolgonderzoek is het wenselijk om:

- enkele eenvoudige testen te ontwikkelen om de compatibiliteit van de reparatiemortels te bepalen.
- de aangegeven eisen verder te valideren door onderzoek naar hun effect op de duurzaamheid van de mortel, zowel met versnelde testen in het laboratorium als door inspecties in de praktijk.

- 1 Danesi, A., Gambardella S., Materials and techniques used in the 17th century restoration of sculptures from the antiquities collection of the palazzo Lancellotti ai Coronari. In: Barbanera, M., Freccero, A., Art, Conservation, Science. The Lancellotti Collection Project, Rome, 2005
- 2 <https://www.deutsche-digitale-bibliothek.de/item/NRSWJNSSRSSTWENKC6H-3MEEHGD44TCIA>, geraadpleegd op 22 juni 2018
- 3 Chau, C.K., Li, Z., Microstructures of magnesium oxychloride Sorel cement. Advances in Cement Research 20, 2008, pp. 85-92
- 4 Eckel, E.C., Cement, limes and plasters; their materials, manufacture and properties. 3rd ed., herdruk: 2005, Donhead, Shaftesbury, 1928, pp. 163-171
- 5 A. et A., Varia, In: De Opmerker, 17 maart 1888
- 6 Sorrell, C., Suggested chemistry of zinc oxychloride cements. Journal of the American Ceramic Society 60, 1977, pp. 217-220
- 7 Nicholson, J.W., Tibaldi, J.P., Formation and properties of cements prepared with zinc oxide and aqueous solutions of zinc nitrate. Journal of Materials Science 27, 1992, pp. 2420-2422
- 8 Algemeen Dagblad, 15 juni 1915
- 9 Maandblad Amstelodamum, 2, 1915, p. 81
- 10 Weissman, W.A., Maandblad Amstelodamum, 2, 1915, p. 11
- 11 Maandblad Amstelodamum, 2, 1915, p. 55
- 12 Nijland, T.G., Quist, W.J., TNO-rapport - Historische oppervlaktebehandelingen voor de conservering van steenachtige materialen (natuursteen, beton, metselwerk) in Europese context, 2018
- 13 Persoonlijke communicatie H. Tolboom, 2018
- 14 Limburger Koerier, De 28ste Jaarbeurs. Bouwmaterialen., 18 maart 1933
- 15 Veen, van der, Mededeeling no. 3563, 1 oktober 1927
- 16 St. Jan, 's Hertogenbosch: pandsdossier Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Verslag van de bouwvergadering no. 30, 24 november 1971
- 17 Hoogevest, T. van, Uitgevoerde werkzaamheden. In: Restauratie Vijf Hervormde Binnenstadskerken in Utrecht, Jaarverslag 1982-1983-1984, 1985, pp. 19-94

- 18 Hoogevest, T. van, Uitgevoerde werkzaamheden. In: Restauratie Vijf Hervormde Binnenstadkerken in Utrecht, Jaarverslag 1985-1986 -1987, 1988, pp. 19-90
- 19 Balen, K. Van, Papayianni, I., Hees, R.P.J. van, Binda, L., Waldum, A., RILEM TC 167-COM: 'Characterization of old mortars with respect to their repair', Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars, *Materials and Structures*, 38(8), 2005, pp. 781-786
- 20 R.P.J. van Hees, L. Pel, B. Lubelli, Towards compatible repair mortars for masonry in monuments, in: *Proceedings of the 5th Int. Symp. on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin - Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities*, Galan and Zezza (eds), Seville, Spain, 2000, Swets & Zeitlinger 2002, Lisse, pp. 371-375
- 21 Arnold, A., Zehnder, K., Salt weathering on monuments. In: Zezza, F. (red), *The conservation of monuments in the Mediterranean Basin*, Bari, 1989
- 22 Válek, J., Hughes, J.J., Pique, F., Gulota, D., Hees, R. van, Papayiani, I., Velosa, A., *Functional Requirements for Surface Repair Mortars for Historic Buildings*, Draft RILEM publication, Technical Committee 243-SGM, december 2017
- 23 Snethlage, R., Stone conservation. In Siegesmund, S., Snethlage, R., *Stone in Architecture: Properties, Durability*, 2011
- 24 WTA Merkblatt 3-11-97/D: Natursteinrestaurierung nach WTA III: Steiner Ergänzung mit Restauriermörteln und Steiner Ganzstoffen
- 25 Teutonico, J.M., Charola, A.E., De Witte, E., Grasegger, G., Koestler, R.J., Laurenzi Tabasso, M., Sasse, H.R., Snethlage, R., Group Report 'How Can We Ensure the Responsible and Effective Use of Treatments (Cleaning, Consolidation, Protection)?'. In: Baer, N.S., Snethlage, R. (red), *Report of the Dahlem Workshop on 'Saving our architectural heritage: the conservation of historic stone structures.'*, John Willey & Sons Ltd, Chichester, 1997, pp. 293-313
- 26 Delgado Rodrigues, J., Grossi, A., Indicators and ratings for the compatibility assessment of conservation actions, *Journal of Cultural Heritage* 8, 2007, pp. 32-43
- 27 Isebaert, A., Parys, L. Van, Cnudde, V., Composition and compatibility requirements of mineral repair mortars for stone, *Construction and Building Materials* 59, 2014, pp. 39-50
- 28 Sasse, H.R., Snethlage, R., Methods for the Evolution of stone conservation treatments. In: Baer, N.S., Snethlage, R. (red), *Report of the Dahlem Workshop on 'Saving our architectural heritage: the conservation of historic stone structures.'*, John Willey & Sons Ltd, Chichester, 1997, pp. 223-24

- 29 SBR-Publikatie 9, Eigenschappen van Bouw- en Isolatiematerialen, 1994
- 30 <http://mdcs.monumentenkenis.nl/wiki/page/20/waterabsorption-coefficient>, geraadpleegd op 5 december 2018
- 31 Camerman, C., Beschrijving en gebruik in België en in Nederland van de Franse witte steen. Hayez, Brussels, 1957, 100 p.
- 32 WTCB, Witte natuursteen. Technische Voorlichting 80, 1970, 107 p.
- 33 Dubelaar, C.W., Nijland, T.G., Early Cretaceous Obernkirchen and Bentheim Sandstones from Germany used as dimension stone in the Netherlands: geology, physical properties, architectural use and comparative weathering. In: Přikryl, R., Török, Á., Gómez-Heras, M., Miskovsky K., Theodoridou, M. (red), Sustainable Use of Traditional Geomaterials in Construction Practice. Geological Society London Special Publication 416, 2015, pp. 163-181
- 34 Dubelaar, C.W., Tolboom, H.J., Technisch onderzoek aan natuursteen (1). De Udel-fanger zandsteen. PIM (18), 2004, 12 p.
- 35 Nijland, T.G., Hees, R.P.J. van, Brendle, S., Goedeke, H.K., Tufsteen. Deel 2: Invloed van vocht op de duurzaamheid van 'Rheinische' tuf. Praktijkboek Instandhouding Monumenten 21(15), 2005, 12 p.
- 36 Pierres et Marbres de Wallonie, Technische fiche Arduin - Belgische blauwe hardsteen, s.a.
- 37 R.P.J. van Hees, J.A. Larbi, The conservation of the sculpture work of the national monument in Amsterdam, in: V. Fassina ed., Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice, June 2000, Volume 1, pp. 523-531
- 38 Hees, R.P.J. van, Lubelli, B., Keuze van steenreparatiemortels voor historische gebouwen: geen eenvoudige zaak. In: Nijland, T. (red), Syllabus Symposium MonumentenKennis: Kennis van de Gevel, december 2016, pp. 47-57
- 39 Notitie architectenbureau Veldman Rietbroek Smit (2017)
- 40 Persoonlijke communicatie T. Snoep (Snoep en Vermeer natuursteenwerken)
- 41 Persoonlijke communicatie HJ Tolboom
- 42 Persoonlijke communicatie HJ Tolboom
- 43 Quist, W.J., Vervanging van witte Belgische steen : materiaalkeuze bij restauratie, Proefschrift, 2011, 325 p.
- 44 Remmers, Technische merkblad Remmers Restauratiemortel, geraadpleegd 8 juni 2016

- 45 Jahn, Technische merkblad Jahn Natuursteenherstelmortel, geleverd met het product, 2016
- 46 Rewah, Technische merkblad Monulit, geraadpleegd op 8 juni 2016
- 47 NEN EN 413-2, Metselcement - Deel 2: Beproevingmethode, 2016
- 48 Wijffels, T.J., Hees, R.P.J. van, The influence of the loss of water of the fresh mortar to the substrate on the hygric characteristics of so-called restoration plaster, in "Proceeding of the Int. Workshop on Urban Heritage and Building maintenance VII, 2000, pp. 49-54
- 49 Borsoi, G., Lubelli, B., Hees, R.P.J. van, Veiga, R., Santos Silva, A., Colla, L., Fedele, L., Tomasin, P., Effect of solvent on nanolime transport within limestone: How to improve in-depth deposition, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 497, 2016, pp. 171-181
- 50 Nijland, T.G., Larbi, J.A., Microscopic examination of deteriorated concrete. In: Maierhofer, C., Reinhardt, H.W., Dobmann, G. (red), *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures. Vol. 1: Deterioration processes and standard test methods*. Woodhead, Oxford, 2010, pp.137-179.
- 51 Lubelli, B., Sodium chloride damage to traditional building materials, Proefschrift, TU Delft, 2006, 168 p.
- 52 Hees, R.P.J. van, Nijland T.G., Assessment of the state of conservation of a Middle Neolithic flint mine in Maastricht limestone, *Heron*, 54 (4), 2009, pp. 227–250.
- 53 Witte, E. de, (red), Salt Compatibility of Surface Treatments, eindrapport EU project SCOST, Contract n. ENV4-CT98-0710, 305 p.
- 54 Quist, W., Hees, R.P.J. van, Naldini S., Nijland T. G., De beleving van schade en reparaties aan natuursteen, *Prakt. Instandhouding Monum.*, 30 (13), 2007, 15 p.
- 55 Quist, W.J., de Kock, T., Nijland, T.G., Hees, R.P.J. van, Cnudde, V., Conservering van witte steen: verbetering of verspilde moeite? De beleving van interventies in Vlaanderen en Nederland, *Geol. Surv. Belgium Professional* 316, 2014, pp. 5-14

1. Welk doel willen we bereiken met de steenreparatie?

Mogelijkheden zijn functioneel herstel, esthetisch herstel, het behouden van de 'leesbaarheid' of het stoppen van verval. Een eerste afweging kan daarbij overigens zijn of er überhaupt wel een ingreep nodig is. Zo ja, dan kan worden overwogen of die ingreep in het licht van het geformuleerde doel het best kan worden bereikt door het gebruik van een reparatiemortel of dat steenvervanging toch meer op zijn plaats is. Afhankelijk van het doel, de voorhanden zijnde ondergrond en de omstandigheden moet men daarbij overwegen of dat doel realistisch gesproken haalbaar is met de toepassing van een steenreparatiemortel. De navolgende vragen en antwoorden kunnen bij die afweging helpen.

2. Wanneer en waarom te kiezen voor een steenreparatiemortel?

En wanneer voor steenvervanging?

Kiezen voor steenreparatie kan worden ingegeven door het ontbreken van de originele steensoort, door hoge kosten van steenvervanging of door het feit dat het aangetaste deel relatief klein van omvang is in relatie tot het steenblok of stenen onderdeel dat anders vervangen zou moeten worden. Ook kan het zijn dat de bewuste ondergrond of de vorm van aantasting het gebruik van een reparatiemortel minder aantrekkelijk of wellicht zelfs onmogelijk maakt.

3. Welke schadetypen zijn te repareren met een reparatiemortel?

Bij schadetypen die kunnen worden gerepareerd met behulp van een steenreparatiemortel gaat het om:

- mechanische beschadigingen (afgestoten hoeken of onderdelen, sneeën, perforaties, afgeboorde delen...) (figuur 63 links)
- oppervlakkige verwerking van (gedeelten van) baksteen of natuursteen: verpoederen, verkrumelen, afzanden, erosie-achtige verschijnselen (zoals selectieve verwerking en alveolaire aantasting) vanaf het oppervlak (figuur 63 midden) ; in dergelijke gevallen dient men eerst al het loszittende materiaal te verwijderen
- laagvormige schades kunnen worden aangepakt, nadat eerst de laagjes tot op de gezonde steen zijn verwijderd (figuur 63 rechts).



Figuur 63: Afgestoten hoek, selectieve vertering, laagvorming (exfoliatie)

4. Zijn er veiligheidsrisico's bij het toepassen van een steenreparatiemortel en wanneer of onder welke omstandigheden is dat het geval? Wordt de reparatie misschien op de langere duur gevaarlijk?

Gevaar voor de veiligheid van bijvoorbeeld passanten kan bestaan bij de toepassing van steenreparaties aan een gevel of aan beelden op hoogte, wanneer bij losraken van de reparaties passanten zouden kunnen worden getroffen door de vallende stukken mortel. Ook omvangrijke, uitstekende, aanvullingen aan beelden, die een aanzienlijk statisch moment ter plaatse van het hechtvlak kunnen veroorzaken, maken extra aandacht noodzakelijk. In dergelijke gevallen dient te worden overwogen de reparatiedelen extra mechanisch aan de ondergrond te bevestigen, bijvoorbeeld door middel van doken.

5. Hoe een reparatiemortel te kiezen?

5a. Wat zijn de voornaamste eigenschappen van steenreparatiemortels? En welke eisen moeten daaraan worden gesteld?

De belangrijkste eigenschappen van een steenreparatiemortel zijn:

- esthetisch: kleur, textuur en structuur
- fysisch: porositeit (waterabsorptie en drooggedrag) en hygrische en thermische uitzetting en krimp
- chemisch: chemisch-mineralogische samenstelling (vergelijkbaar met c.q. compatibel met de ondergrond)
- mechanisch: stijfheid (sterkte) en hechting

De hieraan te stellen technische eisen zijn gerelateerd aan de eigenschappen van de te repareren ondergrond; tabel 7 (pagina 63) geeft die eisen in de vorm van een percentage van de waarde van de betreffende eigenschap voor de ondergrond. Op basis van deze uitgangspunten kan ofwel gekozen worden voor een kant-en-klare reparatiemortel dan wel

voor het zelf samenstellen van een geschikte mortel. In dit laatste geval, zal de volgorde van werken in het keuzeproces normaal gesproken zijn:

- vaststellen van het type beschadiging, het probleem en de oorzaak
- vaststellen van het ondergrondmateriaal (steentype) en de technische eigenschappen
- benoemen van de eisen
- keuze van het type bindmiddel (tabel 1, pagina 21)
- vaststellen aggregaat-type en korrelgradering
- bepalen verdere eigenschappen (tabel 7, pagina 63) en toetsing aan de eigenschappen van de ondergrond
- maken van proefvlakjes met een selectie van mortels, gekozen op basis van een eerste toetsing van eisen (denk ook aan verwerkbaarheid)
- definitieve keuze

In geval van kant-en-klare reparatiemortels kan met behulp van de tabellen over eisen een aantal mogelijke producten worden geselecteerd en kunnen enkele van de genoemde stappen worden overgeslagen of beperkt, dan wel worden gebaseerd op beschikbare productbladen.

5b. Steenreparatiemortel: zelf samenstellen of 'kopen op de markt'?

Het zelf samenstellen heeft als voordeel dat een mortel kan worden ontworpen die qua gedrag zo goed mogelijk aansluit op de oorspronkelijke steen; daarbij valt te denken aan zowel de keuze van het bindmiddel als de korrelgrootte en kleur van de samenstellende deeltjes als de resulterende poriegrootteverdeling. Een mogelijkheid daarbij is de typische korrelgrootte van het oorspronkelijke materiaal te bepalen en uit een combinatie van dat materiaal met een geschikt bindmiddel een zowel technisch als esthetisch compatibele reparatiemortel samen te stellen.

Het gebruik van een kant-en-klaar product heeft als groot voordeel de constante kwaliteit en de ervaring en garanties van de fabrikant.

5c. Welke steenreparatiemortel is geschikt voor welke ondergrond?

Steenreparatiemortels worden in Nederland (en de EU) op de markt gebracht door fabrikanten als Remmers, Jahn, Monulit, etc.

Bij de keuze van een kant-en-klaar product is het verstandig als eerste stap te kijken naar het bindmiddel. Het bindmiddel bepaalt in hoge mate sterkte, stijfheid en hechting. Vervolgens wordt door vergelijking tussen eigenschappen van de ondergrond en van de mortels een aantal mogelijke producten geselecteerd en op proefvlakjes geprobeerd.

6. Welke kant-en-klare steenreparatiemortels zijn geschikt voor in Nederland veel toegepaste natuursteensoorten?

Het is moeilijk hier een eenduidig antwoord op te geven. De productbladen van de diverse producenten geven vooralsnog helaas geen eenduidige en zeker geen vergelijkbare informatie. Door zo goed mogelijk de eigenschappen van mortels en steen onderling te vergelijken kan een eerste selectie worden gemaakt, waarna middels proefvlakken tot de uiteindelijke keuze kan worden besloten.

7. Hoe kan (het best) rekening worden gehouden met de esthetische kant van steenreparatie en wat te doen vanuit ethisch oogpunt?

Rekening houden met de esthetisch kant, kan gebeuren door:

Te letten op kleur en textuur, waarbij de kleur in de eerste plaats bepaald wordt door de keuze van bindmiddel en toeslagmateriaal. Eventueel kan door toevoeging van pigmenten de kleur verder worden aangepast.

De juiste textuur komt met name tot stand door het toeslagmateriaal qua samenstelling en grootte af te stemmen op de ondergrond. Verder kan door bewerking van het oppervlak, bijvoorbeeld een randslag zoals aanwezig op de natuursteen, worden aangebracht.

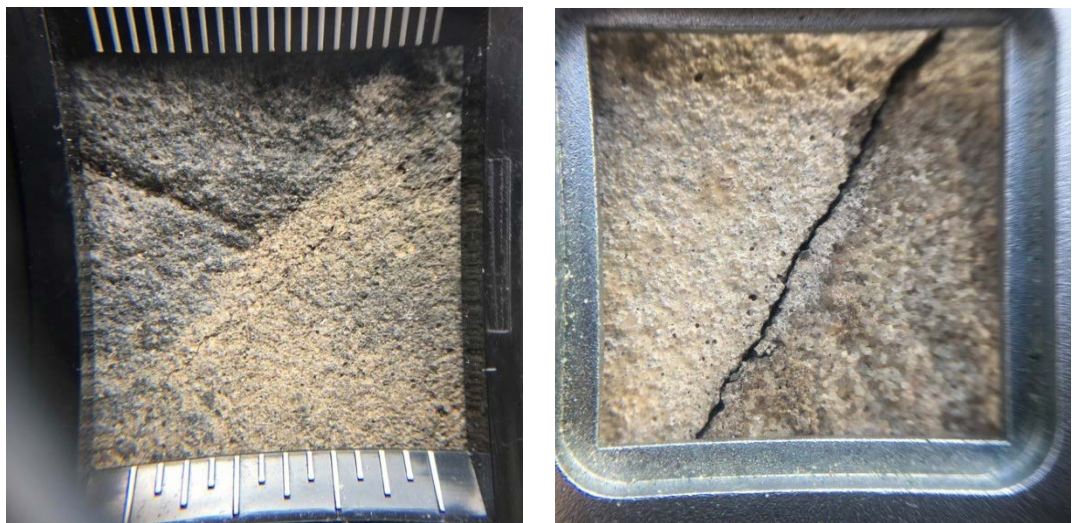
Rekening houden met ethische kant betekent op enigerlei wijze duidelijk laten uitkomen dat het om een aanvulling gaat en niet om het oorspronkelijke materiaal. Daarvoor kan bijvoorbeeld juist gekozen worden voor een iets afwijkende oppervlakteaafwerking c.q. – bewerking.



Figuur 64: Mortel voorzien van typische randslag voor zandsteen.

8. Hoe lang gaat een steenreparatiemortel mee?

De meeste mortelreparaties hebben een levensduur van maximaal 30 jaar. Daarna begint de aansluiting op de bestaande steen vaak gebreken te vertonen: krimpscheurtjes, die zich steeds verder openen of die door afzanden van de reparatiemortel ter plaatse van de aansluiting wijder worden. Het is verstandig de reparatie te vervangen op het moment dat de gebreken bij de aansluiting gaan leiden tot een hogere waterpenetratie, omdat dat laatste veelal de inleiding vormt tot een snelle toename van de degradatie.

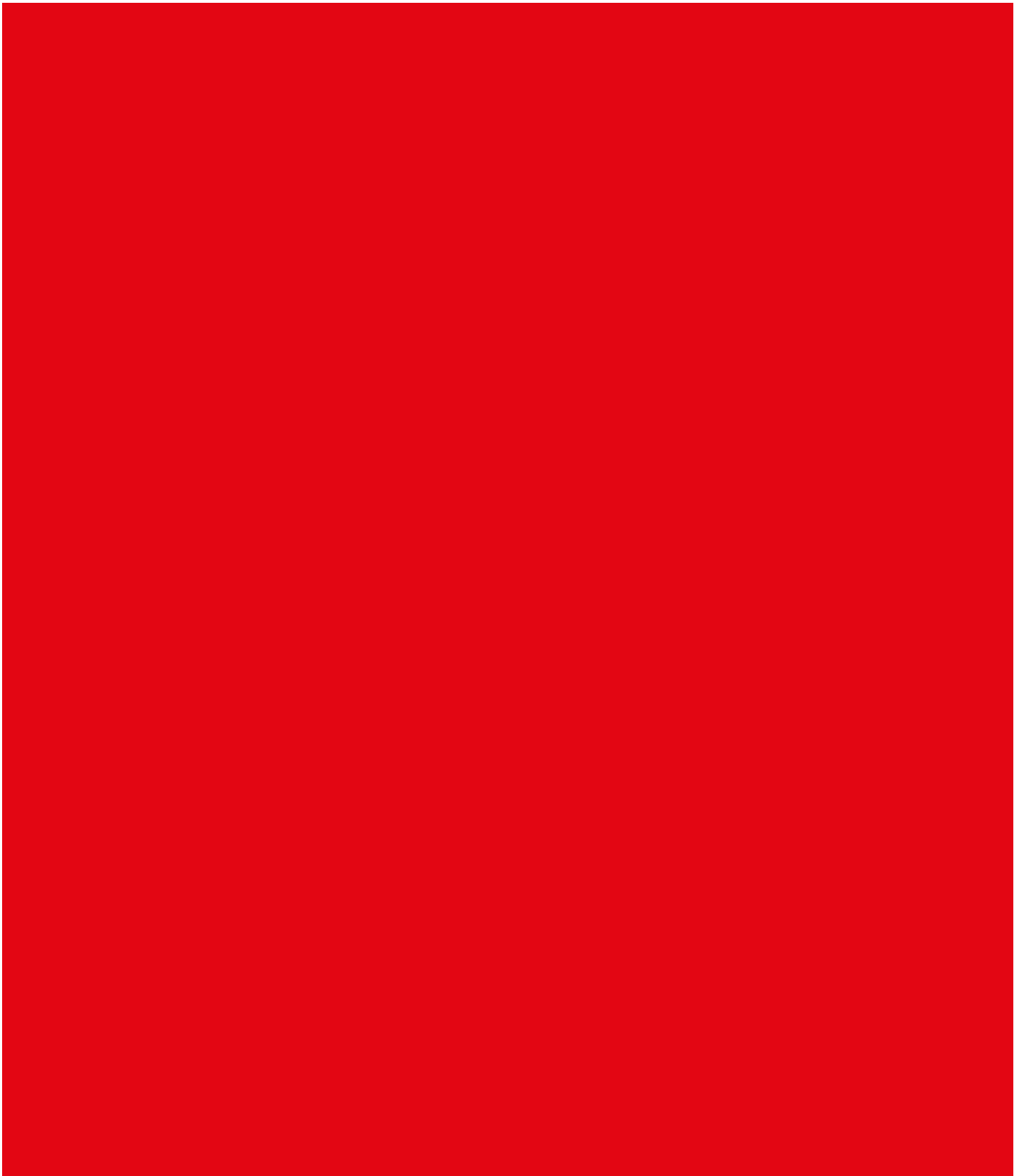


Figuur 65: Beginnende en verder ontwikkelde krimpscheur.

9. Wat te doen met bestaande (oude) steenreparaties? Wanneer ze te vervangen? Wanneer ze te behouden of zelfs te conserveren?

Normaal gesproken zal een oudere steenreparatiemortel, die ook gebreken vertoont, worden vervangen.

Een enkele keer komt het voor dat een reparatiemortel langer dan 30 jaar intact blijft. In dat geval of bij reparaties die bijzonder van samenstelling zijn (en gedocumenteerd) verdient het overweging de reparatie te conserveren.



Technische Universiteit Delft - Faculteit Bouwkunde
Afdeling Architectural Engineering + Technology
Sectie Heritage & Architecture

Julianalaan 134 | 2628 BL Delft

