

Antwerpen
Vleeshuis
Resultaten vooronderzoek
Deel I: analyse gevelmaterialen en
verstevigende proefbehandeling van de zuidgevel

DI : 2010.10536

Bestand : 10-10536 b Antwerpen Vleeshuis

Aanvrager: Origin, Architect Philippe Lemineur

Datum bestelling: 6 september 2010

Uitvoering:

KIK: Departement Labo, Cel Monumenten, Mohamed Rich, Xavier Monfort, **Laurent Fontaine, Roel Hendrickx, Maja Jovanovic, Cinzia Vincentini, Roald Hayen, Ingrid Nijs**

Belgische Geologische Dienst (BGD): Michiel Duser

Bezoeken: 7, 9, 15 en 20 september en 25 oktober 2010

Verslaggeving: Hilde De Clercq en Laurent Fontaine

Datum: 21 maart 2011

Dit verslag mag enkel in zijn geheel worden verspreid. Geen enkele grafiek/afbeelding mag worden overgenomen zonder toestemming van de auteur.

Tenzij anders contractueel vastgelegd behoudt het KIK op exclusieve wijze alle auteursrechten op het onderzoeksgeheel zoals voorzien door de wetgeving.



1. Inleiding

Op verzoek van Architectenbureau Origin werd een vooronderzoek uitgevoerd van de zuidelijke buitengevel gericht op volgende aspecten zoals vermeld in ons voorstel van 17 mei 2010:

- gevelinspectie ter evaluatie van de conserveringstoestand van de natuursteen;
- petrografisch onderzoek natuursteen;
- waterabsorberend vermogen, drooggedrag en poriënstructuur van bouwmaterialen;
- samenstelling mortels;
- verweringskenmerken natuursteen en baksteen; en,
- effect steenverstevigende behandeling.

Tevens was een vocht- en zoutdosering van de bouwmaterialen van een 6-tal zones van de geïnspecteerde buitengevel voorzien. Tijdens de inspectie is dit overbodig gebleken.

Het effect van een behandeling met een biocide wordt voorzien tijdens de modelrestauratie.

De figuren van dit verslag zijn gevoegd aan de bijlage.

2. Monsters en meetzones

Met behulp van een ter beschikking gestelde hoogtewerker werden het derde travee en de toren van de zuidelijke gevel geïnspecteerd.

2.1 Natuursteen en baksteen

Op basis van de gevelinspectie van het derde travee en de toren aan de zuidelijke gevel van het Vleeshuis met behulp van een hoogtewerker en de verschillende geïnspecteerde zones op de begane grond kan worden gesteld dat Ledesteen en Brusseliaanse steen de oorspronkelijk gebruikte natuurstenen zijn. Herstellingen en achtereenvolgende restauratiefasen werden uitgevoerd in Gobertangesteent, Euvillesteen, Savonnières steen en Massangis steen.

Dit onderzoek beperkt zich tot de Ledesteen en de Brusseliaanse steen.

De oorspronkelijke Ledestenen gedragen zich verschillend en lijken enerzijds sterk verweerd en anderzijds onverweerd. Een gelijksoortig gedrag wordt voor de Brusseliaanse stenen geobserveerd. De bedoeling van deze studie is na te gaan wat de oorzaken van het verschillend verouderingsgedrag voor een zelfde steensoort kunnen zijn.

Tevens wordt op diverse plaatsen verlies van oppervlaktematerie van de baksteen vastgesteld, in het bijzonder voor het baksteenmetselwerk onder de dakrand en dit ten gevolge van het ontbreken van een afvoersysteem voor regenwater.

Na de uitgevoerde gevelinspectie werden boorkernen gelicht door een gespecialiseerde externe firma (Beverrent).

Een overzicht van de gelichte stalen is gegeven in figuur 1.

Een overzicht van de gelichte boorkernen is weergegeven in tabel 1. Een illustratie van deze boorkernen en hun locatie is gegeven in de figuren 2 tem 11.

Tabel 1: overzicht van de gelichte boorkernen

Boorkern	Hoogte (m)	Omschrijving
natuursteen		
1 (VH1) (figuur 2)	7.2	Gelig verweerde Ledesteen
2 (VH2) (figuur 3)	6.6	Onverweerde Ledesteen
3 (VH3) (figuur 4)	8.8	Sterk verweerde Ledesteen, bevat grove kwartskorrels
4 (VH4) (figuur 5)	1.3	Onverweerde Brusseliaanse steen
5 (VH5) (figuur 6)	1.0	Verweerde Brusseliaanse steen met afgevallen gipskorst
6 (VH6) (figuur 7)	1.8	Verweerde Brusseliaanse steen met afgeronde kanten
Baksteenmetselwerk		
7 A/B (figuur 8)	1.6	Baksteen/voeg/baksteen combinatie
8 (figuur 9)	1.5	Baksteen/voeg/baksteen combinatie
9 (figuur 10)	1.6	Baksteen/voeg/baksteen combinatie
10 (figuur 11)	1.9	Baksteen/voeg/baksteen combinatie

2.2 mortels

Ter gelegenheid van de gevelinspectie van het derde travee en de toren aan de zuidelijke gevel van het Vleeshuis werden tegelijkertijd de aanwezige morteltypes bestudeerd.

Het overgrote deel van het voegwerk is uitgevoerd met een wat gelige mortel met een grofkorrelige textuur (figuur 12). Voortgaand op de bouwhistorische studie van het studiebureau Origin dateert deze mortel waarschijnlijk van de reinigingswerken van de gevels uit de periode 1969-1970, waarbij het hervoegen van het gevelmetselwerk met een mortelspecie samengesteld uit 2 delen Hydralime, 1 deel kwarts en 1 deel zand werd voorgeschreven. Voortgaand op de huidige technische fiche van dit product, daterend van oktober 2009, is Hydralime een zuivere luchthardende kalk van het type CL 90-S volgens de norm EN 459-1 (bron Lafarge).

Op verschillende plaatsen in de geïnspecteerde geveldelen worden echter ook sporen van een donkere, soms zelfs zwarte mortel teruggevonden (figuur 13). Deze donkere mortel is op meerdere plaatsen aan het buitenoppervlak glad afgestroken, wat aantoont dat deze als voegafwerking zichtbaar was (figuur 14). Uit de analyse van het gevelmetselwerk in het derde travee, tijdens de gevelinspectie met hoogtewerker, blijkt dat deze mortel minstens tot ca. 4 cm diepte reikt en dus eerder als stelmortel is gebruikt. Inspectie van de boorkernen, later gelicht op 20 september 2010, leert dat ook op de begane grond een vergelijkbaar donkere stelmortel is gebruikt voor de buitenste laag van een halve steendikte (figuur 15). De tint van de stelmortel ter hoogte van de kernboringen is in vergelijking wel iets lichter dan de sporen gevonden tijdens de gevelinspectie.

Hoewel ook op de toren aan de zuidgevel sporen van de donkere mortel werden teruggevonden is hier eerder een lichtbeige mortelspecie gebruikt als stelmortel. Het lichten van een staal was echter niet mogelijk gezien de lokatie.

Nadere inspectie van de op de begane grond bereikbare geveldelen van het eerste en tweede travee aan de zuidelijke gevel en de doorgang aan de westzijde van het gebouw, maakte duidelijk dat ook hier een donkere mortelspecie kan herkend worden. In de doorgang, alsook aan de aansluiting van de doorgang met de zuidelijke gevel, werd de donkere mortel wel enkel als voegmortel gebruikt. Onderliggend kan een lichtbeige stelmortel herkend worden.

Van de verschillende mortels werden stalen gelicht tijdens de gevelinspectie op dinsdag 7 september 2010, of nadien ontnomen van de op 20 september 2010 gelichte boorkernen.

Een overzicht van de gelichte mortelstalen wordt gegeven in tabel 2.

Tabel 2: overzicht van de gelichte mortelstalen.

Plaatsaanduiding, omschrijving	Mortelstaal
<i>Zone 1: derde travee aan de zuidgevel</i>	
zwarte stelmortel	1
gele voegmortel	2
fragment zwarte mortel op natuursteen	3
<i>Zone 2: eerste travee aan de zuidgevel</i>	
zwarte voegmortel	4
<i>Zone 3: doorgang aan de westzijde</i>	
zwarte voegmortel	6
beige stelmortel	7
<i>Zone 4: boorkern 7</i>	
donker gekleurde stelmortel van de buitenste laag	8
lichtbeige stelmortel van het achterliggende metselwerk	9

De huidige selectie van mortelstalen is gebaseerd op de gevelinspectie met de hoogtewerker van het derde travee en de toren aan de zuidelijke gevel en een rondgang op de begane grond aan de zuidelijke gevel en de doorgang aan de westzijde van het Vleeshuis. Het is niet uitgesloten dat een nadere inspectie van de overige geveldelen nog andere morteltypes aan het licht zou kunnen brengen.

2.3 verweringskenmerken bouwstenen en effect verstevigende proefbehandeling

De geselecteerde meetzones voor het onderzoek naar de verweringskenmerken van bouwstenen en naar het effect van verstevigende proefbehandelingen zijn beschreven in de punten 4.6 en 4.7.

3. Methodiek

3.1 petrografisch onderzoek natuursteen

Van de gelichte boorstalen werd een slijpplaatje vervaardigd (Logitech PM5 Autolap) dat werd onderworpen aan een petrografisch onderzoek (Axioplan Zeiss, Transmissie). De interpretatie werd uitgevoerd in samenwerking met de BGD (Dr Michiel Duser).

3.2 waterabsorberend vermogen, drooggedrag en poriënstructuur van bouwmaterialen

Van de gelichte boorkernen werd achtereenvolgens de capillaire waterabsorptie en het drooggedrag geanalyseerd.

De capillaire waterabsorptie wordt uitgevoerd volgens de richtlijnen (RILEM-UNESCO 1978, n° II.6). De capillaire waterabsorptiecoëfficiënt wordt afgeleid uit de richtingscoëfficiënt van minstens 5 opeenvolgende punten van het eerste lineair gedeelte van de curve (wateropname uitgedrukt als g per m² in functie van de tijd (sec^{0.5})). Na de capillaire waterabsorptieproef worden de stalen gedurende 48 uren ondergedompeld in gedemineraliseerd water, waaruit de watertoegekankelijke porositeit wordt afgeleid, alvorens de droogproef uit te voeren. De capillaire waterabsorptie werd gemeten aan zowel de voorzijde als de achterzijde van de boorkernen.

Voor de bepaling van het drooggedrag van de stalen worden deze ingepakt in aluminiumfolie op zo'n wijze dat enkel het testvlak vrij is. De eerste 8 uren worden de stalen elk uur gewogen ; vanaf de tweede tot de vijfde dag tweemaal per dag. Het drooggedrag werd enkel gemeten aan de voorzijde van de boorkernen.

Klimatologische omstandigheden van uitvoering: 23°C en 50-55 % RV.

De poriënstructuur wordt geanalyseerd met behulp van Hg-porosimetrie (Micromeritics).

3.3 Samenstelling mortels

Een ingebed mortelstaal wordt onderworpen aan een optisch microscopische analyseprocedure (ZEISS, Axioplan, reflectie). Vervolgens wordt op hetzelfde monster een raster elektronenmicroscopisch onderzoek (Scanning Electron Microscopy, SEM, JEOL) uitgevoerd, waarbij het mortelstaal met een bundel elektronen gebombardeerd wordt. Aan de hand van de teruggestrooide elektronen kan men de samenstelling van het mortelstaal bestuderen. Hierbij kleuren zwaardere bestanddelen lichter, naarmate ze meer elektronen

terugstrooien. Met behulp van de energie-dispersieve X-stralen spectroscopie (EDX) worden vervolgens de samenstellende elementen gedetecteerd en geanalyseerd.

Aanvullend wordt een slijpplaatje vervaardigd dat eveneens aan een microscopisch onderzoek wordt onderworpen (ZEISS, Axioplan, transmissie). Een visuele analyse laat toe om de samenstellende bestanddelen van de mortel te identificeren. De verwerking van de beelden levert bovendien informatie op met betrekking tot de granulometrische kenmerken van de zandfractie.

Tot slot werd een gerichte chemische analyse uitgevoerd, waarbij een mortelstaal in een verdunde HCl-oplossing wordt gebracht. Deze analyse laat toe om de verhouding bindmiddel/zand te kwantificeren.

3.4 Indirecte bepaling van de vorstbestendigheid van bouwmaterialen

De indirecte bepaling van de vorstbestendigheid van bouwmaterialen is gebaseerd op de methode van de GC-factor, die wordt voorgesteld in NBN B27-010.

3.5 Modellerings vochttransport

Met behulp van het modelleringsprogramma "DELPHIN" wordt het vochttransport gesimuleerd van het huidige systeem baksteen-natuursteen-legmortel-voegmortel. Dit geldt eveneens voor de voorspelling van de waterhuishouding van dit geheel aan poreuze materialen voor een aantal nieuw voorgestelde voegmaterialen.

3.6 Verweringskenmerken natuursteen en baksteen

De mechanische verweringskenmerken van bouwstenen worden onderzocht met behulp van het Drilling Resistance Measurement System (DRMS). Tijdens het maken van een boorgat registreert het toestel continu de energie nodig om een boorgat te maken. Het resultaat van deze continue boring is een hardheidsprofiel dat het verloop van de mechanische kenmerken van bouwstenen visualiseert.

3.7 Effect steenverstevigende behandeling

Ter evaluatie van het effect van een steenversteving werd overgegaan tot het uitvoeren van verstevigende proefbehandelingen. Hiervoor werd gebruik gemaakt van een product op basis van ethylsilicaat (75 % oplossing). Het aantal behandelingen bedraagt 2 en 3 elk op zich bestaande uit meerdere bevoeiingen. Minstens één maand na de laatste behandeling wordt het verstevigend effect beoordeeld adh DRMS-metingen. De hardheidsprofielen van punt 3.6 worden als referenties gebruikt.

De behandelingen werden uitgevoerd op 7, 9 en 15 september terwijl de controlemetingen op 25 oktober 2010.

4. Resultaten

4.1 petrografisch onderzoek natuursteen

Steenmonster: **VH2**

Locatie: 3^e travee, 3^e stellingsniveau (figuren 1 en 3)

Identificatie: onverweerde Ledesteen

Verkorte rapportering

Type matrix: calciet (micriet en microspariet)

Type aggregaat: fijn kwartshoudend zand

Verwerkingstructuur: geen

Aanwezigheid aangetoond van: glauconiet, foraminiferen, schelpfragmenten van tweekleppigen, ostracoden, bryozoën, graafgangen van zeewormen

Een microscopisch beeld van het slijpplaatje is weergegeven in figuur 16. Hieruit wordt afgeleid dat de onverweerde Ledesteen hoofdzakelijk bestaat uit een fijn kwartshoudend zand in een matrix van calciet (micriet en microspariet). Het gaat om een zeer homogeen gesteente. Naast fijne subhoekige kwartskorrels komen ook enkele grotere afgeronde kwartskorrels met afmetingen tussen ca. 300 en 500 µm diameter (figuur 17) en glauconieten (de meeste zijn groen tot oranje-bruin van kleur) voor. Een aanzienlijke hoeveelheid aan kleine foraminiferen (o.a. miliolen) is aanwezig. Foraminiferen kunnen volledig geglauconitiseerd zijn. Andere bioclasten als schelpfragmenten van tweekleppigen, ostracoden en bryozoën worden eveneens teruggevonden naast graafgangen van zeewormen.

Steenmonster: **VH1**

Locatie: 3^e travee, 3^e stellingsniveau (figuren 1 en 2)

Identificatie: gelige verweerde Ledesteen

Verkorte rapportering

Type matrix: calciet (micriet en microspariet)

Type aggregaat: fijn kwartshoudend zand en enkele grove kwartskorrels

Verwerkingstructuur: microfissuratie

Aanwezigheid aangetoond van: glauconiet, foraminiferen, schelpfragmenten van tweekleppigen, ostracoden, bryozoën, graafgangen van zeewormen, fecale pellets, kalkkokerworm

Een microscopisch beeld van het slijpplaatje is weergegeven in figuur 18. In vergelijking met de eerder beschreven onverweerde Ledesteen (monster VH2) komen in de gelige verweerde Ledesteen (monster VH1) meer grove afgeronde kwartskorrels voor met afmetingen tussen 0.3 en 1.2 mm in doorsnede. Een groot aantal micro-scheuren komt in de steen voor. Deze scheuren lijken niet gerelateerd aan de textuur van het gesteente (bijvoorbeeld de aanwezigheid van graafgangen van zeewormen, figuur 18). Naast de eerder vermelde bioclasten van de onverweerde Ledesteen (monster VH2) werden een paar nummulieten (grote bentische foraminiferen kenmerkend voor Ledesteen, figuur 19) teruggevonden. Hier

kunnen de foraminiferen gedeeltelijk tot volledig geglauconitiseerd zijn. Verder werden ook fecale pellets tot ca. 1 mm in doorsnede en een kalkkokerworm (type *Serpula*) van ongeveer 1 mm diameter aangetroffen.

De mindere kwaliteit van deze Ledesteen uit zich in de aanwezigheid van microscheuren. Of dit te wijten is aan de grotere heterogeniteit in de sedimentopbouw ten opzichte van het niet verweerde monster is niet geheel duidelijk. De verweringsgraad is matig en vermoedelijk recent van oorsprong. Dit type verwerking is het gevolg van een grotere vorstgevoeligheid en zal in de toekomst verder toenemen.

Steenmonster: **VH3**

Locatie: 2^e travee, 4^e stellingsniveau (figuren 1 en 4)

Identificatie: sterk verweerde Ledesteen met grove kwartskorrels

Verkorte rapportering

Type matrix: calciëet (micriet en microspariet)

Type aggregaat: fijn kwartshoudend zand en grove kwartskorrels

Verweringsstructuur: duidelijke microfissuratie

Aanwezigheid aangetoond van: glauconiet, foraminiferen, schelpfragmenten van tweekleppigen, ostracoden, bryozoën, graafgangen, tandfragment?

Een microscopisch beeld van het slijpplaatje is weergegeven in figuur 20. Net zoals voor de gelige verweerde Ledesteen (monster VH1) komen in VH3 grove kwartskorrels voor met afmetingen tussen 0.3 en 0.9 mm diameter. Deze kunnen in het gesteente verspreid liggen of zich concentreren in bepaalde zones (figuur 20). De aanwezigheid van een zeer groot aantal microscheuren wordt bemerkt die vaak doorheen grove kwartskorrels lopen of deze omringen (figuur 20). Sommige scheuren in de kwartskorrels zijn gevuld met verweringsproducten die vermoedelijk deel uitmaken van een vorig microfissuratieproces. Verder werd een vermoedelijk tandfragment in het slijpplaatje teruggevonden.

Hier gaat het om een verweerde Ledesteen van beduidend mindere kwaliteit dan de gelige verweerde Ledesteen (monster VH1). Het gesteente is rijk aan microscheuren die grove kwartskorrels kunnen breken en losmaken. De aanwezigheid van grove kwartskorrels die gebaarden zijn ten gevolge van een vorige microfissuratie fase verklaart het sterke verweringsgedrag van dit type Ledesteen. Deze complexe verweringsfenomenen zijn mogelijk reeds begonnen vooraleer het materiaal als bouwsteen werd aangewend.

Steenmonster: VH4

Locatie: 4^e travee, begane grond (4^e speklaag) (figuren 1 en 5)
 Identificatie: onverweerde Brusseliaanse steen

Verkorte rapportering

Type matrix: calciet (micriet en microspriet)
 Type aggregaat: fijn zand, meer kalkfossielgruis dan kwartskorrels
 Verwerkingstructuur: geen
 Aanwezigheid aangetoond van: glauconiet, foraminiferen, schelpfragmenten van tweekleppigen, ostracoden, bryozoën

Een microscopisch beeld van het slijpplaatje is weergegeven in figuur 21. De onverweerde Brusseliaanse steen is homogeen van aard en bestaat uit een fijn zand in een matrix van calciet (micriet en microspriet). Het grootste deel van het aggregaat omvat gerolde en gemicritiseerde fragmenten van kalkfossielen die niet nauwkeurig identificeerbaar zijn. De rest betreft voornamelijk kwartskorrels. Fijne glauconieten groen tot oranje-bruin gekleurd zijn in het gesteente verspreid aanwezig naast een aanzienlijke hoeveelheid kleine foraminiferen (o.a. miliolen). Deze laatste zijn meestal weinig tot niet geglauconitiseerd. Voorts worden overige bioclasten als schelpfragmenten van tweekleppigen, ostracoden en bryozoën teruggevonden.

Steenmonster: VH5

Locatie: 4^e travee, begane grond (3^e speklaag) (figuren 1 en 6)
 Identificatie: verweerde Brusseliaanse steen met afgevallen gipskorst

Verkorte rapportering

Type matrix: calciet (micriet en microspriet)
 Type aggregaat: fijn zand, meer kalkfossielgruis dan kwartskorrels
 Verwerkingstructuur: barsten opgevuld door verweringsproducten
 Aanwezigheid aangetoond van: glauconiet, foraminiferen, schelpfragmenten van tweekleppigen, ostracoden, bryozoën

Een microscopisch beeld van het slijpplaatje is weergegeven in figuur 22.

Net zoals voor de onverweerde Brusseliaanse steen (monster VH4) bestaat het aggregaat van deze steen uit een fijn zand met meer kalkfossielgruis dan kwartskorrels. Daarnaast komen enkele grovere slecht gesorteerde kwartskorrels verspreid in het gesteente voor met afmetingen tot ca. 300 µm diameter. De meeste glauconieten zijn oranje-bruin tot zwart getint wat wijst op een sterke verwerking. Op sommigen zones zijn de skeletten van kleine foraminiferen gelimonitiseerd na glauconitisatie. Barsten parallel aan het buitenoppervlakte en onder de afgevallen gipskorst tot ca. 2 mm diepte worden bemerkt. Deze barsten zijn gevuld met verweringsproducten zoals gips (figuur 23).

De verwerking van de glauconieten door atmosferische oxidatie produceert limoniet (ijzeroxides) die het gesteente zal verzwakken. Mogelijk gaat het hier om een steen afkomstig van een te oppervlakkige laag in een groeve en die dus gevoeliger is voor verwerking.

Steenmonster: VH6

Locatie: steunbeer tussen 6^e en 7^e travee, begane grond (figuren 1 en 7)
 Identificatie: verweerde Brusseliaanse steen met afgeronde kanten (meelzakvorm)

Verkorte rapportering

Type matrix: calciet (vooral microspariet)
 Type aggregaat: fijn zand, kalkfossielgruis en kwartskorrels
 Verwerkingstructuur: barsten opgevuld door verweringsproducten
 Aanwezigheid aangetoond van: glauconiet, foraminiferen, schelpfragmenten van tweekleppigen, bryozoën

Een microscopisch beeld van het slijpplaatje is weergegeven in figuur 24. In vergelijking met de eerder beschreven Brusseliaanse stenen (monsters VH4 en VH5) bevat VH6 beduidend meer matrix, voornamelijk bestaande uit microspariet en wat micriet, dan aggregaat, bestaande uit kalkfossielgruis en kwartskorrels. Enkele fijne groene glauconieten die relatief onverweerd zijn komen in het slijpplaatje voor. Net zoals voor de verweerde Brusseliaanse steen met afgefallen gipskorst (monster VH5) komen barsten voor parallel aan het buitenoppervlakte tot ca. 3 mm diepte die in een minder mate gevuld zijn met verweringsproducten zoals gips.

Deze Brusseliaanse steen is eerder homogeen. Vermoedelijk is het hoog kalkgehalte, meer in het bijzonder de aanwezigheid van zeer fijnkorrelige en gemakkelijk oplosbare calciet, een oorzaak van het vergipsingsproces. De sterke blootstellingsomstandigheden van deze steen (figuren 1 en 7) werken stimulerend voor de verweringsprocessen.

4.2 poriënstructuur, waterabsorberend vermogen en drooggedrag van bouwmaterialen*4.2.1 natuursteen***4.2.1.1 Poriënstructuur**

Zowel van de Ledesteen als de Brusseliaanse steen werd de poriënstructuur telkens van een verweerde en een niet verweerde variant bestudeerd. Voor de Ledesteen werden hiervoor respectievelijk boorkernen 2 en 3 gebruikt, voor de Brusseliaanse steen boorkernen 4 en 5.

Van de kernen 2 (niet verweerde Ledesteen) en 3 (sterk verweerde Ledesteen, gekenmerkt door grove kwartskorrels) werden telkens drie kleinere stalen van ca. 1 cm³ (code A, B en C) gelicht voor de analyse van de poriënstructuur door middel van kwikporosimetrie. De individuele resultaten van de stalen A, B en C worden weergegeven in de figuren 25 t/m 30. Figuur 31 vergelijkt vervolgens de partiële poriënverdeling van de 6 verschillende stalen op de Ledesteen in functie van de poriëndiameter, terwijl in figuur 32 de cumulatieve resultaten worden weergegeven. Hierbij komt de maximale waarde (aan de linkerzijde van de grafiek) voor elk staal overeen met de totale toegankelijke porositeit. Deze laatste verschilt weinig voor de onverweerde en de verweerde Ledesteen en varieert doorgaans van 9 tot 11 % met uitzondering van staal C van de niet verweerde kern 2 (14.7 %). Als deze afwijkende waarde buiten beschouwing gelaten wordt, bedraagt de gemiddelde porositeit van de Ledesteen 10.3 ± 0.8%.

Hoewel de totale porositeit onderling weinig verschilt, is de poriënverdeling wel erg verschillend. Zo bevat de niet verweerde Ledesteen een groter aandeel aan fijnere poriën (< 2 à $3 \mu\text{m}$) en komen hierin slechts een klein aantal grotere poriën voor. Bij de verweerde Ledesteen is het aandeel aan grotere poriën duidelijk veel belangrijker. Vermoedelijk zijn de grotere poriën gevormd door verweringsprocessen.

Van de kernen 4 (niet verweerde Brusseliaanse steen) en 5 (sterk verweerde Brusseliaanse steen, waarvan de gipskorst is afgevallen) werden telkens drie kleinere stalen van zo'n 1 cm^3 (codes A, B en C) van de natuursteen gelicht voor de analyse van de poriënstructuur door middel van kwikporosimetrie. De individuele resultaten van de stalen A, B en C worden weergegeven in de figuren 33 t/m 37.

Figuur 38 vergelijkt vervolgens de partiële poriënverdeling van de 6 verschillende stalen op de Brusseliaanse steen in functie van de poriëndiameter, terwijl in figuur 39 de cumulatieve resultaten worden weergegeven. Hierbij komt de maximale waarde (aan de linkerzijde van de grafiek) voor elk staal overeen met de totale toegankelijke porositeit.

De poriënopbouw van de Brusseliaanse steen verschilt sterk van deze van de Ledesteen. Ook tussen de niet verweerde steen en de steen waarvan de gipskorst is afgevallen is hier een opmerkelijk verschil waarneembaar. De niet verweerde Brusseliaanse steen is vrij homogeen van poriënstructuur met een lage, gemiddelde toegankelijke porositeit van $2.7 \pm 0.6\%$ en vooral zeer fijne poriën met een poriëndiameter kleiner dan $0.06 \mu\text{m}$. De totale porositeit van de verweerde Brusseliaanse steen is hoger en bovendien sterk variabel met waarden van 3.7, 7.5 en 9.9%. Deze steen kenmerkt zich door een heterogene structuur en een spreiding in de poriëndiameters, met een belangrijk aandeel aan sterk capillair actieve poriën in de grootteorde van 1 tot enkele micrometer diameter.

4.2.1.2 Capillaire waterabsorptie en droging

Figuren 40 en 41 illustreren de capillaire waterabsorptie curven van de boorkernen natuursteen gemeten respectievelijk aan de voorzijde en de achterzijde. Uit het lineair gedeelte wordt de capillaire waterabsorptie coëfficiënt berekend (tabel 3).

Tabel 3: capillaire waterabsorptie coëfficiënt van de boorkernen natuursteen gemeten aan de voor- en achterzijde.

Boorkern	Capillaire waterabsorptiecoëfficiënt ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{u}^{0.5})$)	
	voorzijde	Achterzijde
1	0.53	0.46
2	0.62	(b)
3	(a)	0.55
4	0.90	(b)
5	0.54	0.59

(a): de voorzijde van kern 3 was ten gevolge van de verwerking te onregelmatig om te worden gemeten.

(b): er wordt nauwelijks een lineair gedeelte in de capillaire waterabsorptie curve vastgesteld.

Voor zowel de Ledesteen als de Brusseliaanse steen vertoont de verweerde steen een lagere absorptiecoëfficiënt dan de gezondere soort. Voor de Ledesteen is dit vergelijkbaar door de

homogene en continue spreiding in capillair actieve poriën die het onderling vochttransport stimuleren. De hoogste waarde wordt gemeten voor de gezonde Brusseliaan (kern 4) gekenmerkt door een fijn poreuze structuur. Het lineaire gedeelte van de curve van deze kern komt in dit geval wel overeen met 7 uren water absorptie terwijl voor de overige dit minstens 47 uren bedraagt. De verweerde Lede steen vertoont een gelijkaardige coëfficiënt als de verweerde Brusseliaan. De waarden bekomen aan de achterzijde zijn van eenzelfde grootte orde als deze aan de voorzijde.

In het drooggedrag, enkel gemeten aan de voorzijde van de kernen, wordt weinig verschil bemerkt tussen de verschillende kernen (figuur 42).

Figuur 43 illustreert achtereenvolgens het capillair waterabsorptiegedrag en het drooggedrag gemeten aan de voorzijde van de kernen 1, 2, 4 en 5. In het bijzonder het staal VH4, gezonde Brusseliaanse steen, neemt zeer snel water op, doch geeft dit slechts traag af. Deze gegevens zullen verder in het verslag gebruikt worden mbt een keuze van een geschikte voeg- en herstmortel.

4.2.2 baksteen-mortel

4.2.2.1 Poriënstructuur

Van boorkernen 7B, 8 en 10 werd zowel van de bakstenen als van de donkergekleurde stelmortel de poriënverdeling onderzocht om het bevochtigings- en drogingsgedrag van het metselwerk beter te begrijpen. Omdat het capillair absorptie- en het drogingsgedrag van kernen 7B en 8 weinig verschillen (zie 4.2.2.2), werd van kern 8 enkel de mortel verder onderzocht. Tegelijkertijd dient het resultaat om richtlijnen op te stellen voor een mogelijke voegmortel voor de restauratie.

Van de kernen 7B en 10 werden telkens twee kleinere stalen van zo'n 1 cm³ (codes 1 en 2) van de baksteen gelicht voor de analyse van de poriënstructuur door middel van kwikporosimetrie. De individuele resultaten van de stalen 7B-2 en 10-2 worden weergegeven in respectievelijk figuren 44 en 45. Figuur 46 vergelijkt de partiële poriënverdeling van de 4 verschillende stalen in functie van de poriëndiameter, terwijl in figuur 47 de cumulatieve resultaten worden weergegeven. Hierbij komt de maximale waarde (aan de linkerzijde van de grafiek) voor elk staal overeen met de totale toegankelijke porositeit. Deze laatste is onderling weinig verschillend en bedraagt ca. 30 tot 35%.

Er is een duidelijk verschil merkbaar in poriënopbouw tussen de bakstenen van kern 7B en kern 10. De baksteen uit kern 10 wordt gekenmerkt door een duidelijk unimodale poriënopbouw, met een plotse scherpe terugval in het aantal poriën met een diameter groter dan de piekwaarde (m.n. 5 µm). De baksteen uit kern 7B wordt daarentegen gekenmerkt door een duidelijk bimodale poriënstructuur, bestaande uit vergelijkbare poriën als kern 10 (iets minder in aantal) maar met daarbovenop ook duidelijk fijnere poriën met diameter tussen ca. 0.05 en 0.5 µm met een maximum rond 0.2 µm. Het aandeel aan zeer fijne poriën is hoog en omvat ongeveer 50% van de totale porositeit. Des te fijner een porie, des te groter is weliswaar de capillaire kracht maar des te trager verloopt tegelijkertijd het absorptieproces. Omdat beide types baksteen een belangrijk aandeel aan poriën bezit van 1 tot enkele micrometer diameter, zullen beiden een uitgesproken capillaire waterabsorptie vertonen. Eventueel slechts op langere termijn (dagen, weken) zal de baksteen van kern 7B met zijn fijne poriënstructuur een duidelijk verschil laten optekenen.

Naast de baksteen, werd ook de poriënstructuur van de mortel geanalyseerd. Ook hier werden van elk van de drie kernen telkens twee kleinere stalen van 1 cm^3 (codes 1 en 2) gelicht voor de analyse van de poriënstructuur door middel van kwikporosimetrie. De individuele resultaten van de stalen 7B-1, 8-2 en 10-1 worden weergegeven in de figuren 48 t/m 50. Figuur 51 vergelijkt vervolgens de partiële poriënverdeling van de 6 verschillende stalen in functie van de poriëndiameter, terwijl in figuur 52 de cumulatieve resultaten worden weergegeven.

De poriënopbouw van de drie verschillende mortels is sterk verschillend. De drie mortelstalen worden gekenmerkt door een groot aandeel aan zeer fijne poriën met een diameter kleiner dan ca. $0.05 \mu\text{m}$ en een maximum rond 0.01 à $0.02 \mu\text{m}$. Het grote verschil situeert zich in de aanwezigheid en het aantal poriën met een diameter groter dan $0.05 \mu\text{m}$. In de mortel van kern 7B komen zo goed als geen grotere poriën voor, bij het mortelstaal van kern 8 zijn dit er reeds aanzienlijk meer en bij kern 10 kan een mooie spreiding van poriën met een diameter tot enkele micrometer waargenomen worden.

De zeer fijne poriën, hier kenmerkend voor de stelmortel, zullen vermoedelijk actief bijdragen in het bevochtigingsgedrag en weinig in het drooggedrag van het metselwerk. De stelmortel neemt immers vrij snel water op doch droogt traag.

Wanneer de poriënstructuur van de bakstenen met deze van de donkergekleurde stelmortel vergeleken wordt, valt op dat de mortel vooral poriën bevat die veel kleiner zijn dan de meeste poriën van de baksteen. De fijne poriën in de mortel zullen langzaam vocht uit de bakstenen opnemen. Eenmaal de fijne poriën in de mortelvoeg gevuld zijn is het weinig waarschijnlijk dat deze vervolgens uitdrogen. De vochtoverdracht van de baksteen naar de mortel stopt dan ook. Slechts naarmate de stelmortel een groot aandeel aan poriën groter dan $0.05 \mu\text{m}$ in doorsnede bevat, zal er een betere uitwisseling van poriënwater kunnen plaatsvinden tussen de beide materialen. De mortelsamenstelling is echter waarschijnlijk sterk variabel met een variabele vochtuitwisseling tot gevolg.

Het absorptie- en drogingsgedrag van de voegmortel is dan ook, zowel in contact naar de buitenlucht als in de uitwisseling met de baksteen, sterk heterogeen.

4.2.2.2 capillaire waterabsorptie en droging

Voor dit onderzoek werden de kernen 7B, 8 en 10 geanalyseerd op hun capillaire absorptie- en drogingsgedrag.

Uit figuren 53 en 54 kan worden bemerkt dat de kernen 7B en 8 een gelijkaardig capillair absorptie- en drooggedrag vertonen. Kern 10 neemt iets sneller water op, maar droogt nadien even goed ook weer sneller uit. Vermoedelijk wordt het verschil hier bepaald door enerzijds de bredere poriënopbouw van de mortel en anderzijds het groter aandeel aan capillair actieve poriën met een diameter van 1 tot enkele micrometer in de bakstenen. De totale porositeit van de baksteen is wat lager, wat mogelijk de lagere hoeveelheid aan geabsorbeerd water verklaart. Tegelijkertijd bevat deze kern iets meer grotere poriën, waardoor toch een betere droging kan plaatsvinden. Desondanks blijft het aandeel aan grote poriën beperkt, zodat het drogingsproces beduidend langzamer verloopt dan de bevochtiging van het metselwerk (figuur 55). Het metselwerk zal bijgevolg gemakkelijk vochtig worden én blijven, met een beduidend verhoogd risico op vorstschade tot gevolg. Dit geldt voor alle boorkernen.

4.3 samenstelling mortel

Mortelstaal:	1
Locatie:	travee 3Z
Identificatie:	zwarte stelmortel
Vermoedelijke datering:	1501-1505 of 1903-1908

Verkorte rapportering

Type bindmiddel:	mengsel kalk-tras
Si-gehalte bindmiddel:	26.9 %, sterk hydraulisch
Type aggregaat:	grof gemalen tras
Bindmiddel/tras verhouding:	ca. 3:1 in vol.e.
Aanwezigheid aangetoond van:	kalkpitten

Deze stelmortel is wat poederig en wordt gekenmerkt door een zwarte tint. Er komen kalkpitten voor meestal met afmetingen van ca. 1 mm in doorsnede, die visueel gemakkelijk te herkennen zijn. Enkele grotere exemplaren met afmetingen tot ca. 4 mm zijn eveneens aanwezig. Een optisch-microscopisch beeld van het mortelstaal is weergegeven in figuur 56 een optisch beeld van het staal voor het slijpplaatje in figuur 57

Een specifiek aggregaat als bijvoorbeeld zand komt niet voor in de mortel. Niettemin wordt een aanzienlijke hoeveelheid aan grof gemalen tras teruggevonden (figuur 58). Deze trasfragmenten hebben een sterke overeenkomst met vulkanische tufsteen afkomstig uit de Duitse Eifel (figuur 59). De teruggevonden trasfragmenten bestaan uit: grote kristallen van kwarts, veldspaten en pyroxeen, delen van de fijnkristallijne grondmassa, xenolieten van de omliggende sedimentaire gesteenten (in het bijzonder zandsteen en leisteen) en puimsteenfragmenten. Voortgaand op de vorm en structuur van de trasfragmenten werd de tras grof gemalen als vulstof (aggregaat) aan het bindmiddel toegevoegd. De verhouding van het bindmiddel tot het tras bedraagt ca. 3:1 in vol.e.

De kartering van de samenstellende elementen in het teruggestrooide elektronenbeeld van de stelmortel is weergegeven in figuur 60. Hieruit kunnen de subhoekige trasfragmenten hoofdzakelijk bestaande uit silicium en aluminium herkend worden. Een gedetailleerde analyse in het bindmiddel toont de aanwezigheid aan van calcium, silicium en aluminium (figuur 61). Het gemiddeld atomair siliciumgehalte bedraagt hier 26.9 %. De aanwezige kalkpitten waren nauwelijks herkenbaar in de kartografie van de samenstellende bestanddelen, zodat het praktisch onmogelijk is om het bindmiddel op zich nauwkeurig te analyseren. Naast grove bevat de mortel immers ook fijne trasfragmenten die de meting van de samenstelling van het bindmiddel sterk beïnvloeden. Het is overigens aan deze fijn gemalen trasfragmenten dat de mortel zijn donkere kleur ontleent. Hoewel het bindmiddel moeilijk exact te analyseren is, betreft het hier duidelijk een sterk hydraulische kalk-tras mortel. De toevoeging van tras, een natuurlijk puzzolaan, verleent immers bij menging met (luchthardende) kalk aan het mengsel hydraulische eigenschappen zodat het ook in contact met water kan uitharden. De tras maakt bijgevolg tegelijkertijd deel uit van het bindmiddel en het aggregaat.

De korrelgrootteverdeling van de trasfragmenten in de stelmortel, afgeleid uit optisch-microscopische beelden van het slijpplaatje, is weergegeven in figuur 62. In totaal werden 50 fragmenten opgemeten. Het aandeel aan fijne trasfragmenten ligt beduidend hoger dan in de grafiek is weergegeven. Deze fijne fragmenten waren echter moeilijk te identificeren en op te

meten. De maximale maat bedraagt ca. 0.65 mm. De trasfragmenten teruggevonden in de stelmortel kunnen volgens de norm NBN B11-011 moeilijk geklasseerd worden.

Deze stelmortel heeft een zeer sterke overeenkomst met het zwarte mortelfragment teruggevonden op een natuurstenen speklaag (mortelstaal 3) en met de donker gekleurde stelmortel uit één van de kernboringen (mortelstaal 8).

Mortelstaal:	2
Locatie:	travee 3Z
Identificatie:	gele voegmortel
Vermoedelijke datering:	20 ^{ste} eeuw

Verkorte rapportering

Type bindmiddel:	luchthardende kalk (en wat cement)
Si-gehalte bindmiddel:	2.8 %, luchthardend
Type aggregaat:	kwartshoudend zand, mengsel van fijn zand en zeer grof zand
Bindmiddel/aggregaat verhouding:	eerder normaal bindmiddelgehalte (1:2 in vol.e.)
Aanwezigheid aangetoond van:	kalkpitten, veldspaten, glauconiet, baksteen- en kalksteenfragmenten

Deze voegmortel wordt gekenmerkt door een gelige tint. Er komen kalkpitten voor met afmetingen tot ca. 1.5 mm in doorsnede, die visueel moeilijk te herkennen zijn. Een optisch-microscopisch beeld van het mortelstaal is weergegeven in figuur 63, een optisch beeld van het staal voor het slijpplaatje in figuur 64.

Het gebruikte zand bestaat hoofdzakelijk uit subafgeronde kwartskorrels met wat veldspaten. Enkele grotere polykristallijne kwartskorrels met afmetingen tot ca. 1 mm komen verspreid in de voegmortel voor. Een aanzienlijke hoeveelheid van gelobde glauconieten met afmetingen rond 100 µm diameter (meestal groen of oranje-bruin van kleur) wordt ook in de voegmortel teruggevonden. Verder werden enkele kleine baksteen- en kalksteenfragmenten (in het bijzonder schelpfragmenten) herkend. De bindmiddel/aggregaat verhouding is eerder normaal (1:2 in vol.e.).

De kartering van de samenstellende elementen in het teruggestrooide elektronenbeeld van de voegmortel is weergegeven in figuur 65 en illustreert de zandfractie bestaande uit voornamelijk kwartskorrels, enkele veldspaten en glauconieten. Een gedetailleerde analyse van het bindmiddel toont de aanwezigheid aan van calcium en in beperkte mate silicium (figuur 66). Het gemiddeld atomair siliciumgehalte van het bindmiddel (gemeten in de kalkpitten) bedraagt 2.8 %. In het slijpplaatje worden verschillende kleine nesten van fasen, die aan portlandiet (kenmerkend voor het gebruik van cement) doen denken, teruggevonden (figuur 64). Vermoedelijk betreft het hier dan ook een luchthardende kalk waar een klein aandeel aan cement werd toegevoegd. Dit kan mede een verklaring zijn voor de talloze krimp-scheuren die kris-kras doorheen de voegmortel lopen.

Het aggregaat van de voegmortel bestaat uit een mengeling van een fijn zand met een kleine hoeveelheid aan grof zand. Het geheel van de mengeling is niet goed gesorteerd. De korrelgrootteverdeling van het fijne zand, afgeleid uit optisch-microscopische beelden van het slijpplaatje, is weergegeven in figuur 67. In totaal werden 292 korrels opgemeten. De

zandfractie kleiner dan 80 μm bedraagt 6.72 m%. De maximale korrelmaat bedraagt ca. 0.33 mm. Het fijne zand kan volgens de norm NBN B11-011 als een fijn zand geklasseerd worden. Het aandeel van grof zand bevat kwartskorrels met een diameter van ca. 0.5 mm tot 1.15 mm.

Mortelstaal:	3
Locatie:	travee 3Z
Identificatie:	fragment van een zwarte mortel op een natuurstenen speklaag
Vermoedelijke datering:	1501-1505 of 1903-1908

Verkorte rapportering

Type bindmiddel:	mengsel kalk-tras
Si-gehalte bindmiddel:	niet bepaald
Type aggregaat:	grof gemalen tras
Bindmiddel/tras verhouding:	visueel vergelijkbaar met deze van mortelstaal 1
Aanwezigheid aangetoond van:	kalkpitten

Het fragment van de zwarte mortellaag op de natuurstenen speklaag, voorafgaand aan het lichten van het staal, is weergegeven in figuur 68. Of het hier gaat om een vroegere invulling van een lacune in de natuursteen of om een restant van een vroegere bepleistering is onduidelijk. Tijdens de gevelinspectie van het 3^e travee aan de zuidelijke gevel werden naast dit fragment in ieder geval verder geen sporen op de natuursteen teruggevonden. De eerste optie lijkt op basis daarvan de meest waarschijnlijke.

De mortel wordt gekenmerkt door een zwarte tint. Er komen kalkpitten voor met afmetingen tot ca. 2 mm in doorsnede, die visueel gemakkelijk te herkennen zijn. De analyse van dit mortelfragment werd beperkt tot een microscopische analyse van een slijpplaatje om de mogelijke overeenkomst met de zwart gekleurde stelmortel van het gevelmetselwerk na te gaan. Een optisch beeld van het mortelstaal voor het slijpplaatje is weergegeven in figuur 69. Er wordt een sterke overeenkomst waargenomen met het mortelstaal van de stelmortel in het gevelmetselwerk (mortelstaal 1). Ook hier werd alleen grof gemalen tras als aggregaat gebruikt, dat zowel in verhouding als samenstelling sterk lijkt op dat van de stelmortel. Bijvoorbeeld hebben de puimsteenfragmenten een sterke overeenkomst met deze teruggevonden in Duitse tufsteen (figuren 70a en 70b). Enkele trasfragmenten met xenolieten van stollingsgesteente vertonen eveneens een sterke overeenkomst (figuren 71a en 71b). Verder wordt een hergebruikt mortelfragment met afmetingen rond 1.5 mm diameter (figuur 71a) aangetroffen dat vergelijkbaar is met de lichtbeige stelmortel uit boorkern 7 (mortelstaal 9). De bindmiddel/tras verhouding is vergelijkbaar met deze bepaald voor de zwarte stelmortel (mortelstaal 1). In het slijpplaatje werden geen niet-gehydrateerde hydraulische restfragmenten teruggevonden. Vermoedelijk gaat hier eveneens om een sterk hydraulische kalk-puzzolaan mortel bestaande uit een mengeling van kalk met tras.

De korrelgrootteverdeling van de trasfragmenten in de mortellaag, afgeleid uit optisch-microscopische beelden van het slijpplaatje, is weergegeven in figuur 72. In totaal werden 150 fragmenten opgemeten. Het aandeel aan fijne trasfragmenten ligt beduidend hoger dan in de grafiek is weergegeven. Deze fijne fragmenten waren echter moeilijk te identificeren en op te meten. De maximale maat bedraagt ca. 0.82 mm. De trasfragmenten teruggevonden in de mortel kunnen volgens de norm NBN B11-011 moeilijk geklasseerd worden.

Mortelstaal: 4

Locatie: travee 1Z

Identificatie: zwarte voegmortel

Vermoedelijke datering: onbekend

Verkorte rapportering

Type bindmiddel: vermoedelijk vergelijkbaar met mortelstaal 6

Si-gehalte bindmiddel: niet bepaald

Type aggregaat: fijn tot gemiddeld grof kwartshoudend zand

Bindmiddel/aggregaat verhouding: eerder hoog bindmiddelgehalte (ca. 2:1 in vol.e.)

Aanwezigheid aangetoond van: kalkpitten, veldspaten, glauconiet, tras-, kalksteen- en houtskoolfragmenten

Een opname van de donker gekleurde voegmortel ter hoogte van de steunbeer aan het eerste travee van de zuidelijke gevel is weergegeven in figuur 73. Deze voegmortel in het 1^{ste} travee aan de zuidelijke gevel is zwart gekleurd en bevat kalkpitten met afmetingen van enkele honderden micrometers tot ca. 1 mm in doorsnede. Een optisch-microscopisch beeld van het mortelstaal voor het slijpplaatje is weergegeven in figuur 74. Net als het fragment van de mortellaag op de natuurstenen speklaag in travee 3Z werd de samenstelling onderzocht adhv een microscopische analyse van een slijpplaatje en dit om de overeenkomst van dit mortelstaal met de stelmortel van het gevelmetselwerk na te gaan.

Uit de analyse van het slijpplaatje is onmiddellijk duidelijk dat deze voegmortel een geheel andere samenstelling kent dan de stelmortel van het metselwerk aan de zuidgevel. Hier is wel gebruik gemaakt van een zand. Dit zand bestaat hoofdzakelijk uit subafgeronde kwartskorrels met wat veldspaten. Glauconieten met afmetingen tot 200 µm komen eveneens voor, net als een paar grove trasfragmenten (xenolieten van zandsteen, puimsteenfragmenten). Verder worden enkele kleine kalksteenfragmenten (waarschijnlijk kleine schelpfragmenten) teruggevonden. Tal van fijne houtskoolfragmenten (meestal fijner dan 100 µm) komen in de voegmortel verspreid voor, waaraan deze voegmortel waarschijnlijk zijn zwarte kleur ontleent. Sommige exemplaren bereiken afmetingen tot ca. 650 µm in doorsnede (figuur 74). De bindmiddel/aggregaat verhouding is eerder hoog (ca. 2:1 in vol.e.). In het slijpplaatje werden geen niet-gehydrateerde hydraulische restfragmenten teruggevonden.

De korrelgrootteverdeling van het gebruikte zand, afgeleid uit optisch-microscopische beelden van het slijpplaatje, is weergegeven in figuur 75. In totaal werden 100 zandkorrels opgemeten. De zandfractie kleiner dan 80 µm is verwaarloosbaar. De maximale korrelmaat bedraagt ca. 0.36 mm. Het zand kan volgens de norm NBN B11-011 niet eenduidig geklasseerd worden. Het grootste deel van de granulometrische curve valt volledig boven de zone gedefinieerd als een fijn zand. Het zand kan dan ook eerder als een fijn tot gemiddeld grof zand omschreven worden.

Deze mortel vertoont een zeer sterke overeenkomst met de zwarte voegmortel gevonden in de doorgang (mortelstaal 6).

Mortelstaal: 6

Locatie: doorgang (westzijde)

Identificatie: zwarte voegmortel

Vermoedelijke datering: onbekend

Verkorte rapportering

Type bindmiddel:	mengsel kalk-tras
Si-gehalte bindmiddel:	24.3 %, hydraulisch
Type aggregaat:	fijn tot gemiddeld grof kwartshoudend zand
Bindmiddel/aggregaat verhouding:	eerder hoog bindmiddelgehalte (ca. 2:1 in vol.e.)
Aanwezigheid aangetoond van:	kalkpitten, veldspaten, glauconiet, tras-, houtskool-, en kalksteenfragmenten

Het metselwerk in de doorgang aan de westzijde van het Vleeshuis wordt gekenmerkt door een lichtbeige stelmortel en een zwarte voegmortel, waarin verschillende witte kalkpitten herkenbaar zijn (figuur 76). In de zwarte voegmortel komen kleine kalkpitten voor met afmetingen van enkele honderden micrometers tot ca. 1 mm in doorsnede naast enkele grotere exemplaren met afmetingen rond 2 mm. Een optisch-microscopisch beeld van het mortelstaal is weergegeven in figuur 77, een optisch beeld van het staal voor het slijpplaatje in figuur 78.

De analyse van het slijpplaatje heeft uitgewezen dat deze voegmortel een geheel andere samenstelling heeft dan de stelmortel van het gevelmetselwerk aan de zuidgevel. Hier is wel gebruik gemaakt van een zand. Dit zand bestaat hoofdzakelijk uit subafgeronde kwartskorrels met wat veldspaten. Glauconieten met afmetingen tot 200 µm (meestal groen tot oranje-bruin van kleur) komen ook voor naast een paar grove trasfragmenten (delen van de fijnkristallijne grondmassa, xenolieten van leisteen, puimsteenfragmenten) en enkele kalksteenfragmenten (bijvoorbeeld schelpfragmenten). De mortel is rijk aan fijn verdeelde houtskoolfragmenten (meestal fijner dan 100 µm). Vermoedelijk zijn ze hier gebruikt als pigment om de zwarte kleur te bekomen. De bindmiddel/aggregaat verhouding is eerder hoog (ca. 2:1 in vol.e.).

De kartering van de samenstellende elementen in het teruggestrooide elektronenbeeld van de voegmortel is weergegeven in figuur 79 en bevestigen de aanwezigheid van een zand voornamelijk bestaande uit kwartskorrels naast enkele trasfragmenten (bijvoorbeeld puimsteenfragmenten) verspreid in de voegmortel. Een gedetailleerde analyse van het bindmiddel toont de aanwezigheid aan van calcium, in mindere mate van silicium en in minieme mate van aluminium (figuur 80). Vermoedelijk is het fijn gemalen tras, toegevoegd aan de (luchthardende?) kalk, verantwoordelijk voor het aandeel aan silicium en aluminium gedetecteerd in het bindmiddel. Het gemiddeld atomair siliciumgehalte van het bindmiddel bedraagt 24.3%. In het slijpplaatje werden geen niet-gehydrateerde hydraulische restfragmenten teruggevonden. Het gaat hier om een hydraulische mortel bestaande uit kalk, tras en zand.

De korrelgrootteverdeling van het gebruikte zand in de voegmortel, afgeleid uit optisch-microscopische beelden van het slijpplaatje, is weergegeven in figuur 81. In totaal werden 300 zandkorrels opgemeten. De zandfractie kleiner dan 80 µm bedraagt 0.82 m%. De maximale korrelmaat bedraagt ca. 0.49 mm. Het zand kan volgens de norm NBN B11-011 niet duidelijk geklasseerd worden. Het laatste deel van de granulometrische curve valt volledig onder de zone gedefinieerd als een gemiddeld grof zand. Het zand kan dan ook eerder als een fijn tot gemiddeld grof zand omschreven worden.

Deze mortel vertoont een zeer sterke overeenkomst met de zwarte voegmortel van het eerste travee van de zuidgevel (mortelstaal 4).

Mortelstaal: 7

Locatie: doorgang (westzijde)

Identificatie: beige stelmortel

Vermoedelijke datering: onbekend

Verkorte rapportering

Type bindmiddel: licht hydraulische kalk

Si-gehalte bindmiddel: 8.9 % (gemeten in de kalkpitten), licht hydraulisch

Type aggregaat: kwartshoudend fijn zand,

Bindmiddel/aggregaat verhouding: eerder hoog bindmiddelgehalte (ca. 4:5 in vol.e.)

Aanwezigheid aangetoond van: kalkpitten, veldspaten, glauconiet, (glaucofaan?)

De zone waar het mortelstaal van de beige stelmortel in de doorgang werd gelicht, is weergegeven in figuur 76.

Deze stelmortel wordt gekenmerkt door een beige tint. Er komen kalkpitten voor met hoofdzakelijk afmetingen kleiner dan 1 mm in doorsnede naast enkele grotere exemplaren tot ca. 3 mm diameter. Een optisch-microscopisch beeld van het mortelstaal is weergegeven in figuur 82, een optisch beeld van het staal voor het slijpplaatje in figuur 83.

Het gebruikte zand bestaat hoofdzakelijk uit subafgeronde kwartskorrels met wat veldspaten. De mortel is rijk aan gelobde glauconieten met afmetingen rond 200 µm diameter (meestal groen of oranje-bruin van kleur) en bevat enkele fijnere varianten met afmetingen tot ca. 100 µm diameter, die op basis van hun optische kenmerken aan glaucofaan doen denken. De bindmiddel/aggregaat verhouding is eerder hoog (ca. 4:5 in vol.e.).

De kartering van de samenstellende elementen in het teruggestrooide elektronenbeeld van de stelmortel is weergegeven in figuur 84 en illustreert de aanwezigheid van kwartskorrels, glauconieten en veldspaten. Een gedetailleerde analyse van het bindmiddel toont de aanwezigheid aan van calcium, in mindere mate van silicium en in minieme mate van aluminium (figuur 85). Het gemiddeld atomair siliciumgehalte van het bindmiddel bedraagt 8.9 %. In het slijpplaatje werden geen niet-gehydrateerde hydraulische restfragmenten teruggevonden. Het gaat hier om een licht hydraulische kalk.

De korrelgrootteverdeling van het gebruikte zand, afgeleid uit optisch-microscopische beelden van het slijpplaatje, is weergegeven in figuur 86. In totaal werden 300 zandkorrels opgemeten. De zandfractie kleiner dan 80 µm bedraagt 4.49 m%. De maximale korrelmaat bedraagt ca. 0.39 mm. Het zand kan volgens de norm NBN B11-011 als een fijn zand geklasseerd worden.

Mortelstaal: 8

Locatie: boorkern 7 (zuidoostelijke toren)

Identificatie: donkergekleurde stelmortel van de buitenste halve steen laag

Vermoedelijke datering: 1501-1505 of 1903-1908

Verkorte rapportering

Type bindmiddel: mengsel hydraulische kalk met tras

Si-gehalte bindmiddel: 42.7 %, eminent hydraulisch

Type aggregaat: grof gemalen tras

Bindmiddel/tras verhouding: ca. 2:1 in vol.e.
Aanwezigheid aangetoond van: kalkpitten, kalksteenfragmenten

De stelmortel van het gevelmetselwerk over de buitenste halve steen wordt gekenmerkt door een donker gekleurde tint (figuur 87). Er komen kalkpitten voor met afmetingen tot ca. 2 mm in doorsnede, die visueel gemakkelijk te herkennen zijn. Een optisch-microscopisch beeld van het mortelstaal is weergegeven in figuur 88, een optisch beeld van het staal voor het slijpplaatje in figuur 89.

Er wordt een sterke overeenkomst waargenomen met het mortelstaal van de stelmortel in het gevelmetselwerk van de zuidgevel (mortelstaal 1). Ook hier werd alleen grof gemalen tras als aggregaat gebruikt, die zowel in verhouding als samenstelling sterk gelijkt op dit van de vernoemde stelmortel. Grote kristallen orthopyroxeen worden teruggevonden (figuur 90) vergelijkbaar met deze aanwezig in de Duitse tufsteen naast een kalksteenfragment (vermoedelijk van Ledesteen of van Brusseliaanse steen). De verhouding van het bindmiddel tot het tras bedraagt ca. 2:1 in vol.e.

De kartering van de samenstellende elementen in het teruggestrooide elektronenbeeld van de stelmortel is weergegeven in figuur 91. Hierin kunnen de subhoekige trasfragmenten, hoofdzakelijk bestaande uit silicium en aluminium, herkend worden. Een gedetailleerde analyse in het bindmiddel toont de aanwezigheid aan van calcium, silicium en aluminium (figuur 91a). Het gemiddeld atomair siliciumgehalte is hoog en bedraagt 42.7 %. Naast grove fragmenten bevat de mortel immers ook diverse fijne trasfragmenten die de meting van de samenstelling van het bindmiddel sterk beïnvloeden. Het is overigens aan deze fijn gemalen trasfragmenten dat de mortel zijn donkere kleur ontleent. De aanwezige kalkpitten zijn moeilijk herkenbaar in de cartografie van de samenstellende bestanddelen, zodat het praktisch bijna onmogelijk is om het bindmiddel op zich nauwkeurig te analyseren (figuur 92b). Hoewel het bindmiddel moeilijk exact te analyseren is, betreft het hier duidelijk een eminent hydraulische kalk-tras mortel. De toevoeging van tras, een natuurlijk puzzolaan, verleent bij menging met (luchthardende) kalk aan het mengsel hydraulische eigenschappen zodat het ook in contact met water kan uitharden. De tras maakt bijgevolg tegelijkertijd deel uit van zowel het bindmiddel als het aggregaat.

De korrelgrootteverdeling van de trasfragmenten, afgeleid uit optisch-microscopische beelden van het slijpplaatje, is weergegeven in figuur 93. In totaal werden 100 aggregaten opgemeten. Het aandeel aan fijne trasfragmenten ligt beduidend hoger dan in de grafiek is weergegeven. Deze fijne fragmenten waren echter moeilijk te identificeren en op te meten. De maximale korrelmaat bedraagt ca. 0.69 mm. De trasfragmenten teruggevonden in de stelmortel kunnen volgens de norm NBN B11-011 moeilijk geklasseerd worden.

Deze donker gekleurde stelmortel van het gevelmetselwerk op de begane grond vertoont een zeer sterke overeenkomst met de zwarte stelmortel (mortelstaal 1) en met het zwarte mortelfragment op de natuurstenen lijst van travee 3Z (mortelstaal 3).

Mortelstaal: 9

Locatie: boorkern 7 (zuidoostelijke toren)

Identificatie: lichtbeige stelmortel van het achterliggend metselwerk

Vermoedelijke datering: 1501-1505

Verkorte rapportering

Type bindmiddel:	licht hydraulische kalk
Si-gehalte bindmiddel:	14.2 %, licht hydraulisch
Type aggregaat:	kwartshoudend fijn zand
Bindmiddel/aggregaat verhouding:	eerder hoog bindmiddelgehalte (ca. 1:1 in vol.e.)
Aanwezigheid aangetoond van:	kalkpitten, veldspaten, glauconiet, baksteenfragmenten

De stelmortel van het dieper gelegen metselwerk wordt gekenmerkt door een lichtbeige tint (figuur 87). Er komen kalkpitten voor met afmetingen tot ca. 5 mm in doorsnede naast kleinere exemplaren van enkele honderden micrometers diameter. Een optisch-microscopisch beeld van het mortelstaal is weergegeven in figuur 94, een optisch beeld van het staal voor het slijpplaatje in figuur 95.

Het gebruikte zand bestaat hoofdzakelijk uit subafgeronde kwartskorrels met wat veldspaten en diverse gelobde glauconieten met afmetingen rond 200 µm diameter (die groen of oranje-bruin van kleur kunnen zijn). Verder worden enkele baksteenfragmenten teruggevonden. De bindmiddel/aggregaat verhouding is eerder hoog (ca. 1:1 in vol.e.).

De kartering van de samenstellende elementen in het teruggestrooide elektronenbeeld van de stelmortel is weergegeven in figuur 96 en illustreert de kwartskorrels, veldspaten en glauconieten. Een gedetailleerde analyse van het bindmiddel toont de aanwezigheid aan van calcium en silicium (figuur 97). Het gemiddeld atomair siliciumgehalte van het bindmiddel bedraagt 14.2 %. In het slijpplaatje werden enkele niet-gehydrateerde hydraulische restfragmenten teruggevonden.

De korrelgrootteverdeling van het gebruikte zand, afgeleid uit optisch-microscopische beelden van het slijpplaatje, is weergegeven in figuur 98. In totaal werden 300 zandkorrels opgemeten. De zandfractie kleiner dan 80 µm bedraagt 9.85 m%. De maximale korrelmaat bedraagt ca. 0.27 mm. Het zand kan volgens de norm NBN B11-011 als een fijn zand geklasseerd worden.

4.4 Indirecte bepaling van vorstbestendigheid van de materialen

Verschillende pistes zijn denkbaar om een kwalitatief en/of kwantitatief oordeel te geven over de vorstbestendigheid van de baksteen, natuursteen en mortel: observatie in situ, directe bepaling in labo of indirecte bepaling in labo. Een directe meting in labo – door proefstukken aan vorst-dooicycli te onderwerpen – veronderstelt het nemen van grote stalen ter plaatse en kan hier dus bezwaarlijk toegepast worden. Ze zou uiteraard ook minder relevant zijn dan de directe observatie. Een indirecte kwantitatieve indicatie kan verkregen worden door interpretatie van enkele karakteristieke parameters van het poriënsysteem, vooral met betrekking tot vochttransport, te beschouwen. Ze is nuttig omdat ze inzicht geeft in het verband met de eigenschappen van het materiaal. We gebruiken hiervoor de methode van de GC-factor, die wordt voorgesteld in NBN B27-010. Als de capillaire absorptiecoëfficiënt A_{cap} wordt uitgedrukt in $[kg/m^2s^{0.5}]$, het capillair verzadigingsvochtgehalte w_{cap} in $[kg/m^3]$ en de totale toegankelijke porositeit in volumefractie $[m^3/m^3]$, dan kan de GC-factor berekend worden als:

$$GC = -14.53 - 0.309\alpha + 0.203S$$

waarin α en S staan voor:

$$\alpha = \frac{A_{cap}}{\Phi} \sqrt{60}; S = \frac{w_{cap}}{1000\Phi}$$

Hoe lager deze GC-waarde, hoe beter het materiaal scoort. De belangrijkste factor is daarbij dat het capillaire verzadigingsvochtgehalte lager moet liggen dan de totale porositeit (lage S), m.a.w. dat er voldoende niet-capillaire poriën zijn om de uitzetting van water bij bevriezen op te vangen. Materialen met hoge verhouding absorptie/porositeit scoren ook beter (hoge α).

De resultaten voor de materialen van het Vleeshuis zijn opgenomen in Tabel 4. De data zijn afkomstig van metingen op de Ledesteen uit kern 2 ('goede steen'), Brusseliaan uit kern 5 ('matig verweerd'), en baksteen en mortel uit kern 10. Uit de berekening volgt dat de trasmortel en de baksteen vorstgevoelig zijn, terwijl de natuursteen intrinsiek vrij goed is. Bij de trasmortel is het grote probleem dat bijna alle poriën met water gevuld geraken indien er voldoende water wordt aangevoerd. De relatief beperkte geobserveerde schade wordt verklaard door de poriedruk van in fijne poriën ($< 0.05 \mu\text{m}$) die een daling van het vriespunt van het aanwezige poriewater veroorzaken. Het resultaat voor de natuursteen is representatief voor de goede steen; de geobserveerde problemen zijn te wijten aan specifieke gebreken die afhangen van de plaats van ontginning en moeilijk als materiaalparameter te vatten zijn.

Tabel 4: berekening van GC-factor voor vorstgevoeligheid van Lede en Brusseliaan steen, baksteen en legmortel (trasmortel).

	Lede	Brusseliaan	baksteen	trasmortel
α	0.526	0.429	3.420	2.977
S	48.9	51.0	80.3	97.4
GC	-4.759	-4.310	0.715	4.321
beoordeling	goed	goed	slecht	zeer slecht

Wat betreft de baksteen wijst deze waarde op een 'vatbaarheid voor schade', die vermoedelijk verergerd wordt door het bestaan van microscheuren in de baksteen tengevolge van lokale inhomogeniteit door samenstelling en het bakproces. Dat kan vermoed worden door de onregelmatige vorm en plaats van de geobserveerde breukvlakken. De vorstgevoeligheid is dus eigen aan het materiaal en kan niet verholpen worden, tenzij door de oorzaak, met name de vochtbelasting, te verminderen.

4.5 Modellerings vochttransport

De evaluatie van de modellering van het vochttransport werden verwerkt in punt 5.

4.6 verweringskenmerken natuursteen en baksteen

De geselecteerde zones voor DRMS-metingen en de betreffende hardheidsprofielen van baksteen en natuursteen zijn weergegeven in de figuren 99 t/m 103. De evaluatie van de hardheidsprofielen is weergegeven in tabel 5.

Tabel 5: evaluatie van de hardheidsprofielen (DRMS)

Zone	Aard ondergrond	Nummer	Evaluatie hardheidsprofiel
1 (figuur 99)	kalkzandsteen	V1	Goede kwaliteit ; begin barst op 2 mm
		V2	Goede kwaliteit
		V3	Verweerd tot minstens 22 mm
	baksteen	V4	Verweerd tot minstens 16 mm
		V5	Verweerd tot 7 mm
		V6	Verweerd tot 15 mm
2 (figuur 100)	kalkzandsteen	V7	Goede kwaliteit, verwerking tot 2 mm
		V8	Goede kwaliteit ; begin barst op 2 mm
		V9	Goede kwaliteit
		V10	Verweerd tot 10 mm
		V11	Verweerd tot minstens 6 mm
		V12	Verweerd tot 4 mm
	baksteen	V13	Verweerd tot 11 mm
		V14	Verweerd tot 10 mm
3 (figuur 101)	kalkzandsteen	V15	Verweerd tot 3 mm
		V16	Verweerd tot 5 mm
		V17	Verweerd tot 10 mm
	baksteen	V18	Niet verweerd ; onregelmatige structuur
		V19	Verweerd tot 9 mm
4 (figuur 102)	kalkzandsteen	V20	Goede kwaliteit
		V21	Goede kwaliteit
		V22	Verweerd tot 4-5 mm
		V23	Sterk verweerd tot 13 mm
		V27	Licht verweerd tot 4 mm
		V28	Goede kwaliteit
		V29	Verweerd tot 7 mm
	baksteen	V24	Onregelmatige structuur, eventueel verweerd tot 16 mm
		V25	Verweerd tot minstens 7 mm
		V26	Sterk verweerd tot 14 mm
5 (figuur 103)	kalkzandsteen	V33	Goede kwaliteit ; licht verweerd tot 4 mm
		V34	Goede kwaliteit ; buitenste laag van 2 mm zit los
		V35	Sterk verweerd tot 8 mm
		V36	Goede kwaliteit
	baksteen	V30	Verweerd tot 11 mm
		V31	Sterk verweerd tot minstens 17 mm
		V32	Verweerd tot 12 mm

Uit deze resultaten kan doorgaans worden gesteld dat de kalkzandsteen van een eerdere goede kwaliteit is en eventueel een oppervlakteverwering vertoont tot maximum 7 mm diepte. Een uitzondering hierop vormen de meetpunten V3, V10, V17, V23 en V35. Deze laatste vertonen over het volledige profiel een beduidend lagere hardheid wat wijst op een verschil in kwaliteit van de kalkzandsteen.

De meeste geteste bakstenen zijn verweerd aan het oppervlak tot een diepte die varieert van van 7 tot 17 mm.

In punt 4.7 zal het effect van een verstevigende proefbehandeling op de hiervoor geselecteerde zones worden nagegaan.

4.7 effect van verstevigende proefbehandeling

De verstevigende proefbehandelingen werden uitgevoerd door een 75 % commercieel product op basis van ethylsilicaat aan te brengen dmv spray-flow. Dit betekent dat het product wordt aangebracht tot er zich aflopers vormen van minstens 10 cm lengte. Binnen hetzelfde uur wordt dit herhaald (bevloeiingen aangebracht nat-in-nat). Het geheel maakt deel uit van eenzelfde behandeling. Het aantal behandelingen bedraagt 2 of 3. De tussentijd tussen verschillende behandelingen is minstens 24 uren.

De verbruiken aan verstevigend middel zijn weergegeven in tabel 6. Uit de resultaten kan worden afgeleid dat het verbruik globaal daalt met het aantal behandelingen en het aantal bevloeiingen. Het gemiddelde totaal gecumuleerd verbruik voor 2 behandelingen baksteen en kalkzandsteen bedraagt respectievelijk 5.6 en 2.7 l.m⁻². Dit voor 3 behandelingen bedraagt respectievelijk 6.4 en 4.3 l.m⁻².

De evaluatie van het verstevigend effect is gebaseerd op hardheidsprofielen voor en na de verstevigende proefbehandelingen en werd weergegeven in tabel 7. Hierbij dienen de kurven geïnterpreteerd in hun geheel, maw het verloop van de hardheid, eerder dan in absolute hardheidswaarden. Ten gevolge van verwering van de gebruikte boor voor het uitvoeren van de DRMS-hardheidsmetingen is de absolute gemeten hardheid na behandeling verschillend van deze voor behandeling.

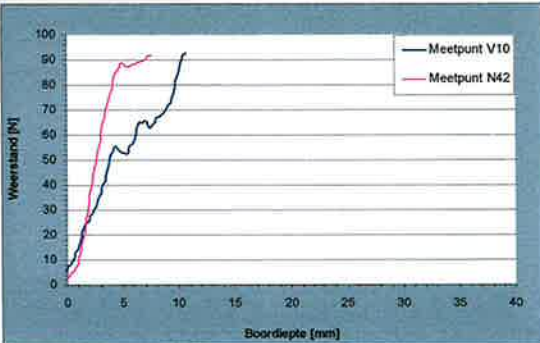
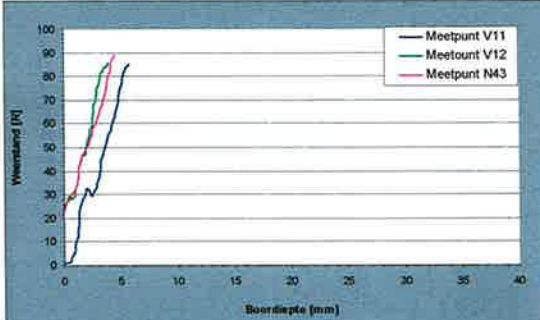
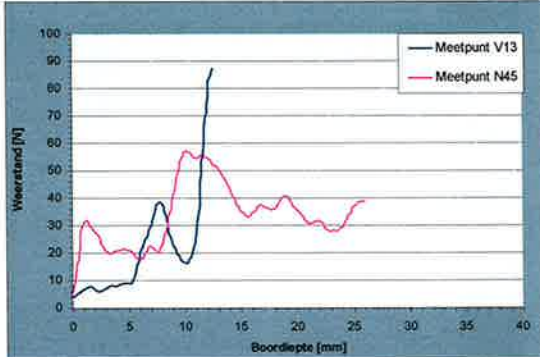


Tabel 6: verbruiken verstevigend middel (l.m⁻²)

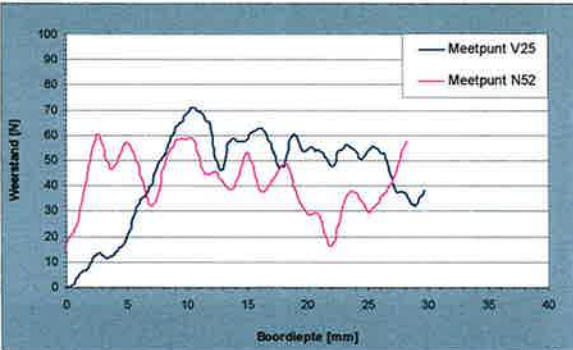
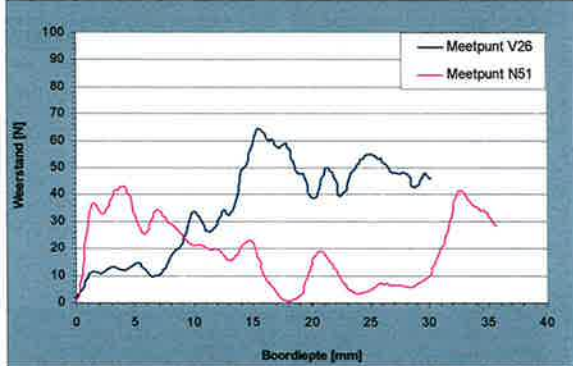
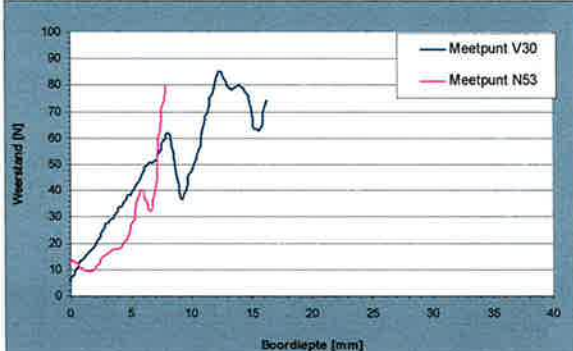
zone	aard ondergrond	oppervlak m ²	behandeling bevoeiing	Verbruik (l/m ²)										
				1			2			3				
				1	2	totaal	1	2	totaal	gecumuleerd verbruik 2 behandelingen	1	2	totaal	gecumuleerd verbruik 3 behandelingen
1	baksteen	0.012		1.67	1.67	3.33	1.67	0.42	2.08	5.42	1.67	1.25	2.92	8.33
	Kalkzandsteen	0.019		0.79	1.32	2.12	0.53	0.26	0.79	2.91				
2	baksteen	0.005		3.13	4.17	7.29	2.08	1.04	3.13	10.42				
	kalkzandsteen	0.058		0.60	0.60	1.20	0.68	0.77	1.45	2.65	0.85	0.68	1.54	4.19
3	kalkzandsteen	0.059		0.42	0.51	0.93	0.84	0.59	1.43	2.36	0.84	0.76	1.60	3.96
4	baksteen	0.036		1.10	0.96	2.06	0.55	0.41	0.96	3.02	0.82	0.69	1.51	4.53
	kalkzandsteen	0.040		1.25	0.50	1.75	0.63	0.63	1.25	3.00	1.13	0.75	1.88	4.88
5	kalkzandsteen	0.044		0.57	0.79	1.36	0.91	0.34	1.25	2.61				
	baksteen	0.031		0.79	0.79	1.59	0.79	0.95	1.75	3.33				
		gemiddeld verbruik baksteen				3.6			2.0	5.6			6.4	
		gemiddeld verbruik kalkzandsteen				1.5			1.2	2.7			4.3	

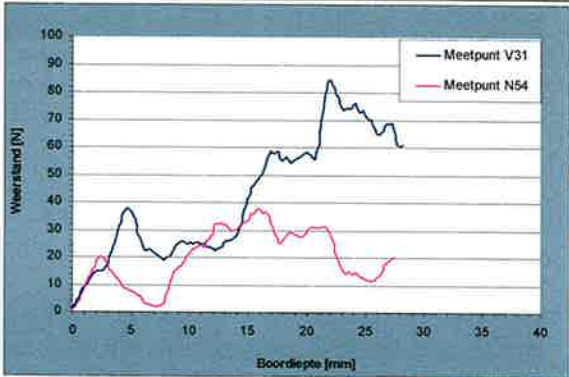
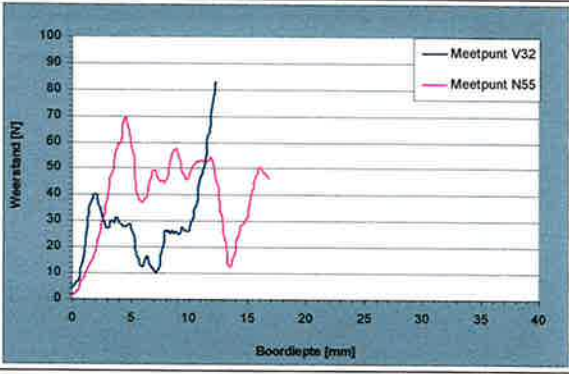
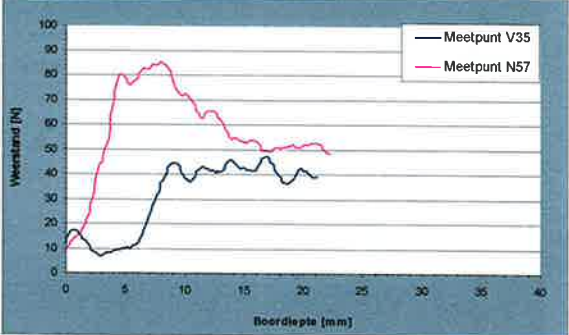
Tabel 7: evaluatie van het verstevigend effect gebaseerd op hardheidsprofielen voor (blauw en eventueel groen) en na (roos) verstevigende proefbehandelingen.

zone	ondergrond	Aantal behandelingen	hardheidsprofielen	evaluatie
1	kalkzandsteen	2		Het verstevigend effect mag als voldoende worden beschouwd.
1	baksteen	3		Een verstevigend effect wordt duidelijk gemeten doch lijkt onvoldoende. Het gebruik van een 100% oplossing ethylsilicaat voor op z'n minst de laatste behandeling is hier aangewezen.
1	baksteen	3		Het verstevigend effect mag als voldoende worden beschouwd. De buitenste 3 mm zijn nog licht verveerd. Het gebruik van een 100% oplossing ethylsilicaat voor op z'n minst de laatste behandeling is hier aangewezen.

2	kalkzandsteen	3		Het verstevigend effect mag als voldoende worden beschouwd.
2	kalkzandsteen	3		Een lichte verbetering van minstens de buitenste 2 mm wordt bekomen.
2	baksteen	2		Verstevigend effect is onvoldoende. 2 tot 3 behandelingen met een product op basis van 100% oplossing ethylsilicaat is hier aangewezen.

2	baksteen	2		Weinig verstevigend effect. 3 behandelingen met een product op basis van 100% oplossing ethylsilicaat is hier aangewezen.
3	kalkzandsteen	3	Meetpunt 16	Vanaf het begin van de meting wordt de meetlimiet (100N) behaald wat wijst op geen oppervlakteverwerking
3	kalkzandsteen	3		Er wordt een duidelijk verstevigend effect gemeten dat evenwel onvoldoende lijkt. Het gebruik van een 100% oplossing ethylsilicaat voor op z'n minst de laatste behandeling is hier aangewezen.
4	kalkzandsteen	3		Duidelijk een verstevigend effect van de verweerde oppervlaktelaag. De buitenste 3 mm zijn na behandeling nog licht verweerd. Het gebruik van een 100% oplossing ethylsilicaat voor op z'n minst de laatste behandeling is hier aangewezen.

4	baksteen	3		Zeer goed consoliderend effect.
4	baksteen	3		Ondanks de onregelmatige structuur is het consoliderend effect zeer goed.
5	baksteen	2		Onvoldoend verstevigend effect. Het gebruik van een 100% oplossing ethylsilicaat voor op z'n minst de laatste behandeling is hier aangewezen.

5	baksteen	2		Er wordt duidelijk een verstevigend effect gemeten dat echter onvoldoende is. Een bijkomende behandeling en het gebruik van een 100% oplossing ethylsilicaat is hier aangewezen.
5	baksteen	2		Zeer goed verstevigend effect.
5	kalkzandsteen	2		Goed verstevigend effect. De buitenste 2 mm lijkt onvoldoende verstevigd. Eventueel is hier tevens sprake van een lichte overconsolidatie van de zone tussen 3 en 13 mm.



5. Besluit

Het laboratorium van het KIK, cel Monumenten, heeft een onderzoek uitgevoerd naar de petrografische en materiaal-technische kenmerken van de bouwmaterialen van de geïnspecteerde gevel, zijnde de zuidgevel, van het Vleeshuis te Antwerpen als basis voor het definiëren van wetenschappelijk verantwoorde modelrestauratieprocedures.

In dit besluit wordt vooreerst een uiteenzetting gegeven van de aard van de bouwmaterialen. Vervolgens zal worden overgegaan tot een algemeen restauratie-advies met betrekking tot de keuze van de mortelmaterie en verstevigende proefbehandeling.

5.1 aard van de bouwmaterialen

5.1.1 Natuursteen

Er is geen fundamenteel verschil in petrografische samenstelling tussen verweerde en onverweerde stenen. Mogelijk vertonen verweerde stenen een hogere graad van heterogeniteit in de sedimentopbouw (grotere variatie in korrelgrootte, scheiding van kwartsrijk en kalkrijk of kleihoudend sediment door bioturbaties), maar deze verschillen accentueren de verweringsverschijnselen eerder dan dat ze er de oorzaak van zijn.

De verwerking van sommige Ledestenen is voornamelijk gerelateerd aan slechte mechanische eigenschappen: microscheuren die het gesteente kwetsbaar maken. Bovendien worden grove kwartskorrels, omringd door microscheuren, gemakkelijk losgemaakt. Microscheuren zijn in sommige gevallen duidelijk recent, mogelijk geïnduceerd door de boring in een steen die al verzwakt was, of alleszins ontstaan na plaatsing. Maar er zijn ook stenen met opgevulde scheuren, die wijzen op een vroegere generatie. Waarschijnlijk gaat het hier om stenen waarvan de zachte korst onvoldoende was verwijderd of die van oorsprong reeds verweerd waren; dus stenen van slechte kwaliteit die toevallig naast kwalitatief betere varianten zijn aangewend.

Ledestenen die intern sterk aangetast zijn en diverse microscheuren bevatten, zoals deze van steenmonster VH3, en met zichtbare grove korrelstructuur, worden best vervangen. Een product op basis van ethylsilicaat (zie punt 5.2.2) is niet in staat het barstennetwerk te herstellen. Ook na consolidatie wordt voor deze stenen schade verwacht.

Oppervlakteparallele scheurvorming, gekoppeld aan gipskristallisatie, lijkt zich sterker te ontwikkelen in Brusseliaanse steen, die een hoger kalkgehalte bezit. De meer blootgestelde plaats waar dergelijke stenen werden aangewend heeft soms het verwerkingseffect versterkt.

Voor de beide types te behouden kalkzandstenen dienen loszittende oppervlaktelagen zorgvuldig verwijderd. In geval van een belangrijk materiaalverlies dat enerzijds als esthetisch storend wordt ervaren of anderzijds een continu afwateringspatroon verhindert, kan worden geopteerd voor het gebruik van een herstellmortel waarvan de aard besproken wordt in punt 5.3.1.

5.1.2 Mortels

Een samenvatting van de resultaten van de onderzochte mortels is weergegeven in tabel 8.

Tabel 8: samenstelling onderzochte mortels.

Mortelstaal	Type bindmiddel	Type aggregaat	Bindmiddel/aggregaat verhouding (in vol.e.)
1	sterk hydraulisch, kalk-tras mengsel	grof gemalen tras	ca. 3:1
2	luchthardende kalk met vermoedelijk cement	kwartshoudend, mengsel fijn zand met zeer grof zand	normaal (1:2)
3	kalk-tras mengsel	grof gemalen tras	visueel vergelijkbaar met deze van mortelstaal 1
4	kalk-tras mengsel	kwartshoudend, fijn tot gemiddeld grof zand	eerder hoog (ca. 2:1)
6	hydraulisch, kalk-tras mengsel	kwartshoudend, fijn tot gemiddeld grof zand	eerder hoog (ca. 2:1)
7	licht hydraulische kalk	kwartshoudend fijn zand	eerder hoog (ca. 4:5)
8	eminent hydraulische kalk-tras mengsel	grof gemalen tras	ca. 2:1
9	licht hydraulische kalk	kwartshoudend fijn zand	eerder hoog (ca. 1:1)

De zwartgekleurde mortelstalen nrs. 1 (stelmortel/voegmortel van het baksteenmetselwerk gelicht in een hoger gelegen zone in het derde travee aan de zuidelijke gevel), 3 (fragment op een natuurstenen speklaag) en 8 (stelmortel van het baksteenmetselwerk tot een diepte van een halve baksteen vanaf het oppervlak aan de zuidoostelijke toren op grondniveau (ca. 1.5 m hoogte)) vertonen een zeer sterke overeenkomst. Het betreft hier een mengeling van kalk met een grof gemalen tras, afkomstig van een vulkanische tufsteen uit de Duitse Eifel in een verhouding van 2 à 3 volumedelen kalk per volumedeel tras. Zand werd hier niet aan de mortelsamenstelling toegevoegd. Naast de grof gemalen trasfragmenten, komt vermoedelijk ook een aanzienlijk aandeel aan zeer fijne trasfragmenten voor, waaraan de mortel vrijwel zeker zijn zwarte tot donkergrijze kleur ontleent. De aanwezigheid van de fijne trasfragmenten beïnvloedt echter sterk de meting van de hydrauliciteit (aan de hand van het atomair siliciumgehalte) in het bindmiddel, zodat de hydrauliciteit van de gebruikte kalk niet achterhaald kan worden.

Een dergelijke mortelsamenstelling kan in principe reeds in het begin van de 16^{de} eeuw zijn toegepast. Het lijkt echter meer waarschijnlijk dat deze mortel gelinkt is met de restauratiewerken van het begin van de 20^{ste} eeuw. De bouwhistorische studie van het studie bureau Origin vermeldt tevens dat tijdens deze restauratiewerken op een bepaald ogenblik 105500 papestenen zijn geleverd en dat deze vermoedelijk zijn gebruikt voor de werken aan de gevel. Uitgaande van de vervanging van het buitengevelmetselwerk over een

dikte van een halve steen, lijkt dit aan te geven dat zo goed als alle gevels destijds volledig zijn vervangen.

Ook de twee andere zwartgekleurde mortelstalen nrs. 4 (voegmortel gelicht aan de steunbeer in het eerste travee van de zuidelijke gevel) en 6 (voegmortel in de westelijke doorgang onder het gebouw) vertonen onderling een sterke overeenkomst. Het betreft hier een mortel op basis van kalk met een fijn tot middelgrof zand, naast zowel grof als fijn gemalen tras. Het aandeel grof gemalen tras is kleiner dan bij de eerst vernoemde donkergekleurde mortelstalen. Gezien de rijkdom aan fijn verdeelde houtskoolfragmenten werd vermoedelijk een hydraulische kalk gebruikt. De houtskoolfragmenten hebben hier eerder de rol van additief/vulstof en zijn tevens bepalend voor de donkere kleur van de mortel en niet zozeer het fijn gemalen tras. De verhouding tussen het bindmiddel en het zand bedraagt ongeveer 2 volumedelen kalk per volumedeel zand.

Deze mortel verschilt duidelijk van de donkergekleurde mortel, die aan de zuidelijke gevel is teruggevonden. Het gaat hier vermoedelijk om een aparte bouwfase, die evenwel niet uitsluit dat deze (andere) mortel eveneens tijdens de restauratiewerken aan het begin van de 20^{ste} eeuw is gebruikt. Een exacte chronologie van deze mortel kan echter niet gegeven worden.

De beige legmortel nr. 9 (stelmortel van het dieper gelegen baksteenmetselwerk aan de zuidoostelijke toren op grondniveau (ca. 1.5 m hoogte)) is vrijwel zeker de originele stelmortel uit de 16^{de} eeuw. Er wordt een sterke overeenkomst genoteerd met de stelmortel van staal nr. 7 uit de westelijke doorgang onder het gebouw. Het betreft hier een mortel op basis van een licht hydraulische kalk gemengd met een fijn zand in verhouding van ongeveer 1 volumedeel kalk per volumedeel zand.

De gelige voegmortel van de zuidgevel (staal nr. 2) verwijst, tot slot, duidelijk naar de restauratiewerken uit de periode 1969-1970. Het betreft hier een mortel op basis van een luchthardende kalk met vermoedelijk een kleine toevoeging van cement, gemengd met twee types zand, m.n. een fijn en een grof zand. De verhouding bindmiddel/zand bedraagt ca. 1:2 in vol.e. De mortelsamenstelling vertoont een duidelijke verwijzing naar de destijds voorgeschreven samenstelling, met in de eerste plaats vooral het bindmiddel en de menging van twee types zand. De teruggevonden voegmortel is wel rijker aan granulaten. Ook de vermoedelijke toevoeging van het beperkte aandeel aan cement stemt niet overeen met de huidig gekende mortelsamenstelling. De mogelijkheid bestaat evenwel dat de samenstelling in de loop van de jaren is gewijzigd, of dat het cement op de werf zelf werd toegevoegd om sneller een harde mortel te bekomen. In ieder geval dient opgemerkt te worden dat deze voegmortel in een te dunne laag en niet diep genoeg is aangebracht.

5.2 restauratie-advies

Het hierna volgend restauratie-advies steunt op een duurzaam behoud van de baksteen en de natuursteen waarbij de (voeg)mortel een **opofferende functie** verleent aan het geheel van het metselwerk.

De uitgangspositie is hierbij reeds moeilijk gezien de vorstgevoeligheid van de baksteen (zie illustratie). Het geformuleerde advies is dan ook gebaseerd op het formuleren van omstandigheden waarbij de baksteen maximaal ontlast wordt van vocht en de kans op schade

minimaal is. Het geven van een garantie dat in de toekomst geen schade zal optreden aan het baksteenmetselwerk is, gezien zijn lage vorstbestendigheid, niet mogelijk.

Ter beperking van de vochtbelasting op zich dient vooreerst rekening gehouden met een aantal cruciale en structurele aspecten:

- het **gezond** maken van het metselwerk, vrij van scheuren en gaten, zodat een zogenaamd continu afwateringspatroon wordt bekomen en het metselwerk geen hiaten vertoont waarlangs vocht massaal kan binnendringen
- het beperken van de vochtbelasting in het algemeen. Het schadeproces wordt in het bijzonder waargenomen op sterk aan regen belaste zones zoals het bovendeel onder de dakrand. **In dit geval is het dus ten sterkste aangeraden het gebouw te voorzien van een dakgoot.** Simulaties hebben aangetoond dat de vochtbelasting op het hoogste gedeelte van het metselwerk daalt tot 10% van de huidige waarde indien een efficiënt afvoersysteem wordt aangebracht voor hemelwater dat op de dakbedekking terecht komt.
- Voorts kan uit de simulatie worden afgeleid dat het aanbrengen van een **binnenisolatie** resulteert in een afkoeling van het metselwerk en verdieping van het vorstfront aan de buitenzijde enerzijds en een verhoging van de vochtbelasting van de buitengevels in het algemeen. Hoe hoger de isolatiewaarde, hoe sterker de afkoeling en de vochtbelasting van de buitenzijde van het metselwerk. Zowel een daling van de temperatuur als een verhoging van het vochtgehalte zal vorstgevoeligheid in de hand werken.



Illustratie: Typisch schadebeeld van afgebroken stukken baksteen door vorst.

5.2.1 voegmateriaal

Het materiaal-technisch onderzoek heeft uitgewezen dat de aan de zuidgevel eind jaren '60 aangebrachte voegmortel doorgaans zeer dun is (slechts enkele millimeters dikte) en op diverse plaatsen allerlei lacunes en barsten vertoont. De onderliggende, donkergekleurde stelmortel is echter fijnporeus, zodat regen langs de bestaande barsten en lacunes in de voegmortel vlot in de achterliggende stelmortel zal worden opgenomen.

De stelmortel zal gezien zijn capillair krachtige kenmerken vlot vocht onttrekken uit de natte baksteen. Deze stelmortel droogt vervolgens zeer traag uit en draagt als dusdanig weinig bij tot het algemene droogproces van het baksteenmetselwerk in zijn geheel.

Voor de restauratie lijkt het aangewezen de erg grofkorrelige en eerder “moderne” voegmortel aangebracht tijdens de laatste restauratiefase te verwijderen. Deze beantwoordt nauwelijks aan het historische karakter van het gebouw. Alle andere mortels bevatten veel fijnere granulaten, zo ook de lichtbeige stelmortel dieper in de muur.

Op basis van dit onderzoek lijkt het aangewezen over te gaan tot het hervoegen van de buitengevels en dit gebruik makende van een mortel die voldoende fijne poriën heeft om het vocht uit de baksteen en de natuursteen te trekken, die tegelijkertijd voldoende dampopen en waterdoorlatend is om snel genoeg te drogen. In de context van een modelrestauratie, worden twee pistes voorgesteld in punt 5.3.1.1.

Teneinde de vochtbelasting van de baksteen te beperken, wordt aangeraden dat de diepte van de voeg 2 cm bedraagt. Dunnere voegen zullen in de toekomst worden afgestoten gezien de hoge waterretentiekenmerken van de achterliggende stelmortel. Simulaties hebben dan weer aangetoond dat diepere voegen tijdens regenperiodes zullen resulteren in een verminderd vochttransport van de baksteen naar de stelmortel toe. Hierdoor zal de vochtbelasting van de baksteen toenemen met een hogere kans op vorstschade tot gevolg.

Tot slot dient gemeld dat de huidige analyse van de mortelstalen zich beperkt tot de zuidelijke gevel en de westelijke doorgang onder het gebouw. Het valt niet uit te sluiten dat een nadere gevelinspectie van de andere geveldelen nog andere morteltypen en/of bijkomende informatie met betrekking tot de historie van het gebouw aan het licht zou kunnen brengen.

5.2.2 verstevigende behandeling

Op basis van een evaluatie van het geheel, en mits onze ervaring met verstevigende proefbehandelingen, kan worden gesteld dat voor 12 van de 16 meetpunten gelegen op baksteen of kalkzandsteen een tweemaalige behandeling, uitgevoerd nat-in-nat en gebruik makende van een 100% product op basis van ethylsilicaat, technisch aangeraden wordt. Voor de overige 4 punten waarvan het merendeel zich bevindt op baksteen die doorgaans sterker verweerd is zullen 3 behandelingen met een 100% product een beter resultaat geven. Voor diverse zones van in het bijzonder de kalkzandsteen zijn 3 behandelingen niet nodig en bestaat het risico op overconsolidatie.

Het gebruik van een 100% oplossing ipv een 75% zal door het verschil in viscositeit resulteren in een lagere impregnatiediepte. Gezien voor slechts 10% van de meetpunten de verweringsdiepte van de bouwstenen hoger is dan 15 mm worden, mits het zorgvuldig respecteren van de behandelingswijze NAT-IN-NAT, geen problemen verwacht met betrekking tot een onvoldoende penetratiediepte. Meerdere bevoeiingen of een behandeling uitgevoerd nat-in-nat bevordert namelijk de indringdiepte.

5.3 Modelrestauratie

5.3.1 Mortel

5.3.1.1 Voegmortel

Op basis van dit onderzoek lijkt het aangewezen over te gaan tot het hervoegen van de buitengevels met een mortel die voldoende fijne poriën heeft om het vocht uit de baksteen en natuursteen te onttrekken, en die tegelijkertijd voldoende dampopen en waterdoorlatend is om snel genoeg te drogen. In de context van een modelrestauratie, kunnen twee pistes voorgesteld worden om dit doel te bereiken:

1. een klassieke fijnere voegmortel op basis van een goed gesorteerd, fijn zand (maximale korrelmaat van ca. 1 mm) en een licht tot matig hydraulische kalk type NHL 2 of 3.5 volgens EN 459-1. Een mengverhouding van 1 volumedeel hydraulische kalk op 2 tot 3 volumedelen zand levert hierbij naar alle waarschijnlijkheid een mortel op die enerzijds redelijk fijne poriën bezit, zodat vochttransport vanuit de baksteen naar de mortelvoeg kan plaatsvinden, en anderzijds een aandeel aan grotere poriën die het uitdrogen van het metselwerk bevorderen.
2. een mortel die een gehalte aan grote poriën bevat door een open korrelstructuur van het zand gecombineerd met een laag gehalte aan bindmiddel. Dergelijke open korrelstructuur kan bereikt worden door zand van uniforme grootte en eerder ronde korrels te gebruiken. Een mengverhouding van 1 volumedeel bindmiddel op 3 tot 5 volumedelen zand kan als richtwaarde gelden. Het is in dit geval nodig om een sterker bindmiddel te gebruiken, hetzij NHL 5 (of hoger) of een combinatie van kalk met cement.

Bij een modelrestauratie kan de efficiëntie van het droogproces in situ en eventueel in bijkomende laboproeven gecontroleerd worden.

5.3.1.2 Herstmortel

Voor wat betreft de aard van de mortel voor de herstelling van de natuursteen, kan hetzelfde principe in acht genomen worden als voor de aard van de nieuwe voegmortel. De herstmortel moet voldoende fijne poriën bevatten om het vochttransport van de natuursteen naar de herstmortel mogelijk te maken, maar tegelijkertijd moet het vochttransport vanuit de herstmortel naar de nieuwe voegmortel eveneens onderhouden worden opdat zowel de steen als de herstmortel (in die volgorde) snel kunnen drogen. In de context van de modelrestauratie, kunnen daarbij eveneens twee pistes voorgesteld worden:

1. toepassing van een zinkoxidemortel, aangepast aan het type natuursteen. Zinkoxidemortels worden zeer frequent toegepast voor de realisatie van steenherstellingen, zodat het aangewezen is om de ervaring op dit vlak aan te wenden en de prestaties van deze mortel te vergelijken met de klassieke kalkmortel op het

vlak van het vochttransport tussen de herstmortel, de natuursteen en de nieuwe voegmortel.

2. een klassieke kalkmortel zoals voorgesteld voor de voegmortel (1^{ste} optie), waarbij weliswaar een iets minder rijke kalkmortel (ca. 1 volumedeel hydraulische kalk op 3 tot 4 volumedelen zand) wordt voorgesteld. Dit om het vochttransport tussen de herstmortel en de nieuwe voegmortel preferentieel in de richting van de nieuwe voegmortel te laten plaatsvinden.

De 2^{de} optie voor de voegmortel is niet aangewezen als mortelmaterie voor de herstelling van natuursteen, omdat de oppervlaktetextuur van de open poreuze mortel niet is aangepast aan het steenoppervlak.

Net als bij de voegmortel, kan ook hier de efficiëntie van het droogproces in situ en in bijkomende laboproeven gecontroleerd worden bij de modelrestauratie.

5.3.2 verstevigende behandeling

Voor de modelrestauratie wordt aangewezen te opteren voor 2 verstevigende behandelingen met een product op basis van ethylsilicaat waarbij, gezien de hogere viscositeit van een 100% oplossing tegenover een 75% oplossing, gerekend wordt op een verbruik van 4.5 tot 5 l.m⁻² voor de baksteen en 2 l.m⁻² voor de kalkzandsteen. Dit verbruik kan tijdens de modelrestauratie nauwer gedefinieerd worden. Voor de eigenlijke uitvoering is het hierbij zeer belangrijk de bestelling alsook de levering van de berekende hoeveelheid product te controleren.

5.3.3 biologische contaminatie

Het effect van een behandeling met een biocide zal mee opgenomen worden in de modelrestauratie.

