

DIESTIAAN IJZERZANDSTEEN: DE ERFGOEDSTEEN VAN HET HAGELAND

ROALD HAYEN¹, LAURENT FONTAINE¹, HILDE DE CLERCQ¹,
MARLEEN DE CEUKELAIRE² & THOMAS VAN DRIESSCHE³

- 1 Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium, Jubelpark 1, 1000 Brussel. E-mail: Roald.Hayen@kikirpa.be
- 2 Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, Jennerstraat 13, 1000 Brussel
- 3 Agentschap Onroerend Erfgoed, Koning Albert II-laan 19 bus 5, 1210 Brussel

SAMENVATTING. Een donkerbruine, ijzerhoudende zandsteen tekent het landschap en de karakteristieke architectuur van het Hageland, het oostelijk deel van de provincie Vlaams-Brabant. Deze regio wordt gekenmerkt door een heuvelachtig landschap, waar in Romeinse tijden op de zuidelijk gerichte flanken al wijn werd verbouwd. Op de talrijke heuveltoppen, stille getuigen van versteende zandbanken in de Laat-Miocene zee die het landschap in lang vervlogen tijden overspoelde, komen donkerbruine lagen van ijzerzandsteen voor. Al sinds de Middeleeuwen werd deze steen voor lokaal gebruik ontgonnen.

De ijzerzandsteen is zeer heterogeen en gevoelig voor verwerking. Over het algemeen betreft het een bouw materiaal met een lage druksterkte, zeker in vergelijking met Gobertange, Lede- of Doornikse steen. De hedendaagse restauratie van deze karakteristieke architectuur wordt geconfronteerd met diverse problemen: natuursteenherstelling is omwille van de donkere kleur minder evident en vaak niet duurzaam, beschikbare reserves zijn zeer beperkt en er zijn geen actieve steengroeves. Een maximale conservering van het authentieke materiaal, geheel in overeenkomst met het Charter van Venetië overigens, dient daarom vaak vooropgesteld.

Materiaaltechnisch onderzoek van ijzerzandsteen, gelicht uit gesteentelagen in vijf sites, was noodzakelijk om de wisselende kenmerken van deze natuursteen beter te interpreteren vanuit zijn geologische diversiteit, teneinde de inzetbaarheid als bouw materiaal te kunnen evalueren. Bovendien werd bestudeerd in hoeverre een mogelijke steenverstevigende behandeling door middel van ethylsilicaat (TEOS) van ijzerzandsteen tot een verbetering van zijn duurzaamheid zou kunnen leiden.

SLEUTELWOORDEN: Diestiaan ijzerzandsteen, gotiek, Demerstreek, materiaaltechnisch onderzoek, mineralogische opbouw, druksterkte, porositeit, vorstbestendigheid, (steen)versteviging.

ABSTRACT. Diest ferruginous sandstone, heritage stone of the Hageland. A dark-brown ferruginous sandstone characterizes the landscape and the typical architecture of the Hageland, the eastern part of the Belgian province Flemish Brabant. The landscape of this region is recognised by an alternation of hills. The southern flanks of these hills are well-suited for cultivating wine, something the Romans already learned some two thousand years ago. On these numerous hill tops, the silent witnesses of petrified shoals from the Diestian sea which overran the landscape long ago, dark-brown layers of ferruginous sandstone occur. Already in the Middle Ages, this stone has been quarried for local use.

This ferruginous sandstone is however very heterogeneous and sensitive to weathering. In general, it is considered a rather weak building material, especially in comparison with other typical local building materials such as Gobertange, Lede or Tournais stones. However, the restoration of this characteristic architecture is nowadays confronted with various problems: the use of repair mortars is because of the dark color less evident and often not durable, available reserves are restricted and there are actually no active quarries. A maximal conservation of the authentic material, fully in agreement with the Charter of Venice, is hence often required as a premise. Material-technical research of ferruginous sandstone, retrieved from sedimentary beds from five locations, was deemed necessary to describe the varying characteristics of this stone within its geological context in order to evaluate the possibility to use the material for restoration purposes. In addition, the effect of a consolidation treatment of the ferruginous sandstone with ethylsilicate (TEOS) to ameliorate its durability was examined.

KEYWORDS: Diest ferruginous sandstone, Gothic architecture, Demer region, material-technical research, mineralogical composition, compressive strength, porosity, frost resistance, consolidation.

1. Inleiding

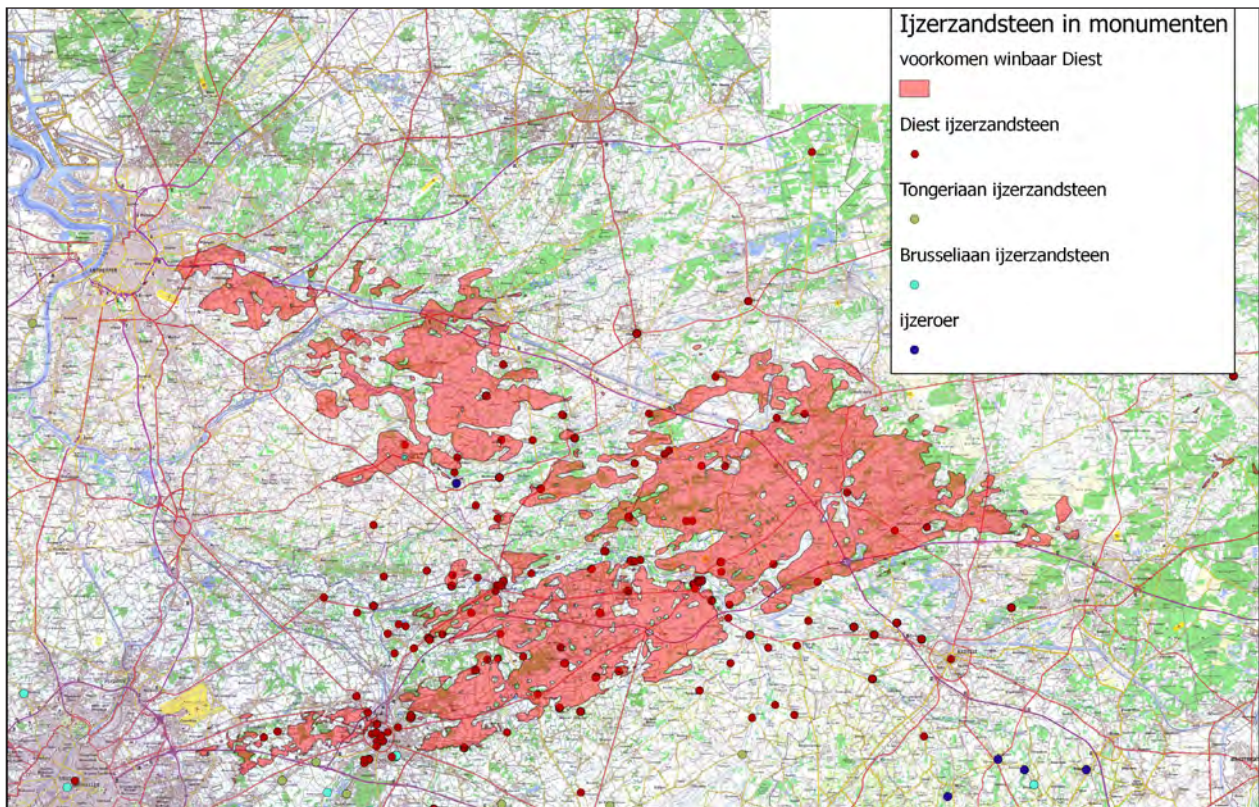
Diestiaan ijzerzandsteen is een donkerbruine, ijzerhoudende zandsteen die de laatgotische architectuur van het Hageland, het oostelijk deel van de provincie Vlaams-Brabant, typeert. Het verspreidingsgebied van deze ijzerzandsteen wordt gevormd door de heuvels van het Hageland en hun uitlopers naar de Zuiderkempen en de Brabantse leemstreek (Figuur 1) (Dusar et al., 2009), wat min of meer overeenkomt met het gebied waarbinnen deze ijzerzandsteen dominant in bouwwerken werd gebruikt.

2. Vormingsgeschiedenis van Diestiaan ijzerzandsteen

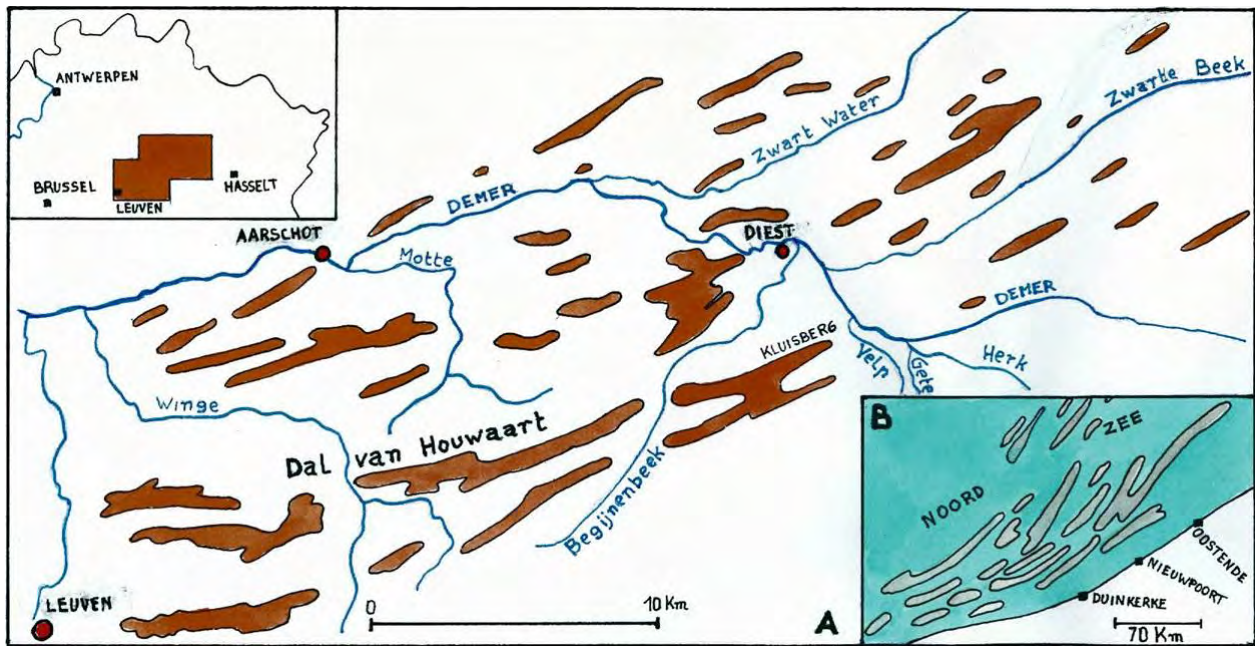
De Hagelandse heuvels en hun uitlopers zijn ontstaan uit zandbanken die tijdens het Laat Mioceen (ca. 6 miljoen jaar geleden) gevormd werden in de zogenaamde Laat-Miocene zee (in een Belgische context ook gekend als de Diestiaanzee). Het einde van het Mioceen, een etage van het Neogeen (het bovenste deel van het geologisch tijdvak dat voorheen Tertiair genoemd werd), werd gekenmerkt door een zeetransgressie. Deze transgressie werd indirect veroorzaakt door de noordwaartse beweging van het Afrikaanse continent in deze periode, waardoor de Straat van Gibraltar afgesloten werd. De Middellandse Zee werd hierdoor een binnenzee. In het warme, droge klimaat oversteeg de verdamping van het zeewater er de aanvoer door neerslag en rivieren,

waardoor het zeeniveau hier spectaculair daalde. Deze gebeurtenis staat bekend als de ‘Messiniaanse zoutcrisis’. Het verdampte water sloeg elders neer, waardoor het oceanpeil wereldwijd met naar schatting 15 m steeg (Gullentops & Broothaers, 1996). Daardoor rukte de zogenaamde Laat-Miocene zee op en kwamen grote delen van onze streken onder de zeespiegel te liggen (Figuur 2). De kustlijn strekte zich uit van Saint-Omer over Roubaix, Edingen, Tienen tot voorbij Hasselt (Van Campenhout, 2009). Parallel aan de kustlijn ontstonden verschillende zandbanken, vergelijkbaar met de zandbanken voor onze huidige kust. Het sedimentatiemateriaal in de zandbanken, aangevoerd door de rivieren die langs de kustlijn in zee uitmondden, bestond uit een glauconiethoudend grofkorrelig zand.

Zo'n 5 miljoen jaar geleden trok de zee zich echter vrij snel terug, vermoedelijk doordat de Straat van Gibraltar opnieuw doorbrak en het peil in de Middellandse Zee en de oceaan zich stabiliseerde (Gullentops & Broothaers, 1996). Door de snelle regressie van de kustlijn worden de zandbanken in de Laat-Miocene zee van erosie bewaard. In het warme klimaat ontwikkelde zich op de zandbanken vervolgens geleidelijk aan een vegetatie, die aanleiding gaf tot het ontstaan van een zure bodem. Donkergroen glauconiet uit bovenliggende verweringslagen werd door oxidatie omgezet tot een donkerbruin limoniet. Het daarin aanwezige ijzer loogde uit en sloeg neer in de daaronder liggende lagen. Door deze processen werden de zandkorrels aaneengekit en ontstonden in de onderliggende lagen ijzerzandsteenbanken (Figuur 3).



Figuur 1. Verspreidingsgebied van de Formatie van Diest (rode zone) en plaatsen waar de ijzerzandsteen in monumenten werd gebruikt.



Figuur 2. Hagelandse heugelruggen, analogie met zandbanken Noordzee. Ref. Geologische fietsroute Halen (Limburgs Hageland), naar Gullentops



Figuur 3. Voorbeeld van een dagzomende ijzerzandsteenbank in het Gasthuisbos te Pellenberg.

Gedurende de voorbije 5 miljoen jaar is vervolgens het landschap verder opgestuwd. Erosie door wind en regen heeft in de tussentijd de zachtere zandlagen tussen de zand(steen)banken in verwijderd, waardoor het kenmerkende heuvelachtig landschap is ontstaan. De heuveltoppen, gevormd door de zandsteenbanken, ook wel getuigeheuvels genoemd, bepalen zo het landschap van het Hageland, de Vlaamse Ardennen en het Heuvelland van Oost- en West-Vlaanderen.

Naast de Formatie van Diest (Diestiaan ijzerzandsteen) komt ijzerzandsteen ook voor in de Formaties van Poederlee (Poederlee ijzerzandsteen, Boven-Plioceen), van de Tongeren Groep (Tongeren ijzerzandsteen, Onder-Oligoceen, ca. 36 miljoen jaar geleden) en van Brussel (Brusseliaan ijzerzandsteen, Midden-Eoceen,

ca. 45 miljoen jaar geleden) (Van Campenhout, 2009). Door hun verschillende ontstaansgeschiedenis, waardoor enerzijds het sedimentatiemateriaal een andere oorsprong kent en anderzijds de omstandigheden van hun genese verschillend zijn, is hun samenstelling vaak erg verschillend aan deze van Diestiaan ijzerzandsteen. Brusseliaan ijzerzandsteen bevat, onder andere, geen tot zeer weinig glauconiet, terwijl de aanwezigheid van mangaan vaak resulteert in een wat paarsere tint. Tongeriaan ijzerzandsteen, daarentegen, is ontstaan uit een fijner zand, waarin zowel muscoviet (glimmerplaatjes), kwartskeitjes als veldspaatkorrels voorkomen (Van Schaeybroek, 2008).

3. Van karakteristiek bouwmateriaal in de 'Demergotiek' tot probleemsteen in de restauratie

Het heuvelachtige Hageland wordt door zijn geologische ontstaansgeschiedenis gekenmerkt door een opeenvolging van zuid tot zuidoostelijk gerichte heuvelruggen, waarop reeds in Romeinse tijden aan wijnbouw werd gedaan. Een traditie die de laatste jaren nieuw leven werd ingeblazen. De ontstaansgeschiedenis van de Diestiaan ijzerzandsteenbanken bepaalt daardoor niet alleen het landschap, maar heeft tevens aanleiding gegeven tot een cultuur-historische verbintenis die tot op de dag van vandaag doorleeft. Een cultuurverwantschap die zich ook heeft vertaald in de lokale architectuur (Bos & Gullentops, 1990, Doperé et al., 2003).

Het gebruik van ijzerzandsteen als bouwsteen gaat terug tot de Romeinse aanwezigheid in onze streken. Tussen

1979 en 1983 werd op het Stenen Kruis in Bierbeek de kelder van een Romeinse villa uit de 2^e eeuw blootgelegd, die volledig bestond uit regelmatig gekapte ijzerzandsteenblokken. Het ging hier vermoedelijk echter om Brusseliaan of Tongeriaan ijzerzandsteen (Deweerd, 1980; Deweerd & Provoost, 1982; Bos & Gullentops, 1990; Duser et al., 2009). Ook in Rotselaar is een Romeinse villa gevonden waar de fundamenteën uit een plaatselijk ontgonnen ijzerzandsteen zijn opgebouwd (Middelbergpark, 2009).

Het gebruik van stenen architectuur, zowel baksteen als natuursteen, geraakt tijdens de Gallo-Romeinse periode in verval. Vanaf de 10-11^e eeuw keert evenwel het gebruik ervan in onze streken terug. De vroegst gekende voorbeelden van het gebruik van ijzerzandsteen als bouwsteen dateren uit de 11^e eeuw. Vandaag bestaan er nog twee vroeg-romaanse kerken waarvan de toren volledig in ijzerzandsteen is opgetrokken: de Sint-Catharinakerk in Kortrijk-Dutsel (Figuur 4) en de Onze-Lieve-Vrouw-Geboortekerk in Oostham. Ook de Sint-Willibrorduskerk in Meldert was tot voor kort nog een getuige van deze vroeg-romaanse periode. Deze toren is helaas op 7 juli 2006 ingestort. Bij alle drie de torens werd steeds gebruik gemaakt van zogenaamde ijzerschollen, eerder dunne (2 tot 3 cm dikke) bruinzwarte limonietconcreties die op de heuveltoppen haast voor het rapen lagen. Ook de toren van de Sint-Martinuskerk in Beek bij Bree is grotendeels uit dergelijke ijzerschollen opgetrokken.



Figuur 4. Vroeg-romaanse Sint-Catharinakerk in Kortrijk-Dutsel, waarvan de toren volledig in ijzerschollen uit de onmiddellijke omgeving is opgetrokken.

Grote, regelmatig gehouwen blokken ijzerzandsteen geraakten pas echt in gebruik vanaf de 12^e eeuw. Dergelijke steenblokken vergden immers de exploitatie van 'echte' steengroeven, waarbij ijzerzandsteenbanken op relatief grote diepte werden ontgonnen. Ook dan blijft het zogenaamd kistwerk in voege, waarbij de muuropbouw bestaat uit gevelparementen in regelmatig gehouwen steenblokken met tussenin een

kernmetselwerk in mortel en ijzerschollen (Callebaut, 1982). Later wordt voor het kernmetselwerk ook regelmatig baksteen gebruikt.

Door het gebruik van de ijzerzandsteen ontwikkelt zich in de Demerstreek geleidelijk aan een kenmerkende architectuur, soms ook wel 'Demergotiek' genoemd. Omdat het hier geen aparte architecturale stroming betreft, wordt deze term door hedendaagse kunst- en architectuurhistorici echter niet meer gebruikt. De belangrijkste kenmerken van deze lokale architectuur zijn zuilen en halfzuilen zonder kapitelen, brede blindnissen in de benedenmuur van de koorapsis en de regelmatige afwisseling van ijzerzandsteen en witsteen, vaak Ledesteen, Brusseliaan of Gobertange steen, in het gevelmetselwerk (Figuur 5). De moeilijkheid tot het behouwen van ijzerzandsteen ligt waarschijnlijk aan de basis van de uitvoering van bepaalde architecturale details (Doperé et al., 2003). Het gebruik van ijzerzandsteen is evenwel dominant, daar de ingevoerde witsteen uit de naburige regio's duurder is dan de lokaal ontgonnen ijzerzandsteen. Er zijn ongeveer 30 kerken uit deze periode bekend.



Figuur 5. Een zeer kenmerkend voorbeeld van de lokale architectuur in de Demerstreek is de Onze-Lieve-Vrouwekerk te Aarschot. IJzerzandsteen werd hier in het gevelparement gebruikt in combinatie met witstenen speklagen in Gobertangestein.

Naast religieuze architectuur, geraakt in de late middeleeuwen het gebruik van ijzerzandsteen meer en

meer ingeburgerd bij burgerlijke bouwwerken zoals kastelen, burchten, donjons, stadsmuren, poorten, lakenhallen en boerderijen. Hoewel ijzerzandsteen vaak in combinatie met bak- en witsteen wordt toegepast en doorgaans beperkt blijft tot de onderbouw en de funderingen.

Vanaf ca. 1500 daalt het gebruik van ijzerzandsteen, zowel in de religieuze als profane architectuur. Voor de bouw van de laatgotische kerkgebouwen gaat de voorkeur uit naar witsteen. Wanneer ijzerzandsteen toch gebruikt wordt, doorgaans binnen, wordt deze zoals toen gebruikelijk was in het interieur afgewerkt met een bepleistering. Ook in de burgerlijke bouwwerken neemt het gebruik van ijzerzandsteen af ten voordele van baksteenmetselwerk, dat de overhand krijgt. Alleen voor utiliteitsconstructies die blootgesteld zijn aan stromend water, zoals watermolens, sluizen, kaaimuren en brugpijlers, wordt ijzerzandsteen nog geregeld gebruikt. Een mooi voorbeeld hiervan zijn de recent gerestaureerde 's Hertogenmolens te Aarschot, die dateren uit de 16^e eeuw (Figuur 6). Tegen het begin van de 19^e eeuw wordt ijzerzandsteen echter ook in deze werken vervangen, ditmaal door blauwe hardsteen.



Figuur 6. 's Hertogenmolens te Aarschot na de recente restauratie.

Aan het begin van de 19^e eeuw lijkt alle commerciële exploitatie van ijzerzandsteen verdwenen. Lokale, tijdelijke ontginningen zijn evenwel niet uitgesloten. Dit alles verandert naarmate de vraag naar ijzerzandsteen aan het eind van de 19^e eeuw opnieuw toeneemt voor de vervanging van verweerde Diestiaan ijzerzandsteen van onder meer de Onze-Lieve-Vrouwekerk te Aarschot, de Maagdentoren te Zichem en de Sint-Sulpitius- en de Sint-Janskerken te Diest. Groeves zoals de Wijngaardberg te Wezemaal en het Steenkot te Kelbergen worden om die redenen heropend (Regionaal Landschap Noord-Hageland, 2007).

In de restauratie is deze ijzerzandsteen over het algemeen gekend als een erosiegevoelig, heterogeen

bouwmateriaal wat vaak resulteert in een zeer gevarieerd schadebeeld (Figuur 7). Sommige steenblokken vertonen op het eerste zicht zo goed als geen schade, terwijl de naburige steen sterk verpoederd is en soms tot meerdere centimeters diepte is verdwenen. Ook binnen eenzelfde steenblok kunnen dergelijke variaties optreden waarbij zachtere lagen over een grote diepte volledig eroderen en harde limonietlagen of -concreties nog het originele oppervlak aflijnen. De oorzaak van de schade kan zeer divers zijn, bijvoorbeeld door de inwerking van vorst, zouten of wind, maar heeft steeds te maken met de verlaagde samenhang van de ijzerzandsteen ten opzichte van zijn oorspronkelijke verkittingsgraad.

Ijzerzandsteen kent bovendien twee specifieke schade-phenomenen: de aantasting door metselbijen en de afstoting van een oppervlaktekorst. Zachte ijzerzandsteenvarianten zijn hierbij een geliefde materie waarin metselbijen graafgangen maken om hun eieren in te leggen (De Clercq et al., 2010a). Daarnaast is de ijzerzandsteen bij metselbijen allicht ook sterk in trek omwille van zijn donkere kleur, waardoor deze de zonnewarmte beter opneemt. Het verschijnsel van de vorming en het vervolgens afstoten van een oppervlaktekorst is reeds op verschillende monumenten waargenomen. Bij deze korstvorming treedt er vermoedelijk een migratie op van het ijzerhoudende bindmiddel uit een onderliggende zone naar de oppervlakte (Cnudde et al., 2011). Door de uitloging van het bindmiddel uit die zone, verzwakt deze en kan de hardere oppervlaktelaag worden afgestoten (De Clercq et al., 2010b). Verder onderzoek naar de ontstaansgeschiedenis van dergelijke korsten is echter noodzakelijk evenals de condities waaronder dit fenomeen optreedt en in hoeverre dit van wekerende aard is.

Daarenboven wordt door een steenverstevigende behandeling van ijzerzandsteen, in geval van verzanding, niet steeds het gewenste effect bekomen (De Clercq et al., 2010b). De reden daartoe is tot op heden niet gekend. Het in Diestiaan ijzerzandsteen opgetrokken erfgoed wordt hierdoor nog sterker bedreigd, zeker voor die gevallen waar al in sterke mate oppervlakttemateriaalverlies is opgetreden en waarvoor bijgevolg vervanging de enige optie is. Restauraties worden dan ook veelal uitgesteld gezien de beperkte beschikbaarheid van vervangsteen. Actieve ontginningen zijn niet meer bestaande en de beperkte ijzerzandsteenreserves die sommige bouwondernemers en materiaalhandelaars nog ter beschikking hebben, zijn veelal onbruikbaar als bouwmateriaal. Wat het aspect “vervanging” betreft, wordt vaak beroep gedaan op alternatieve ijzerzandsteensoorten waarvan de aard en de esthetiek afwijken van de authentieke bouwsteen. Een vaak gebruikte vervangsteen is Brusseliaan ijzerzandsteen, die doorgaans een wat valere, paarse schijn vertoont (Van Campenhout, 2009). Brusseliaan ijzerzandsteen is echter de enige steensoort

die vandaag nog ontgonnen wordt, meer bepaald te Chaumont-Gistoux, weliswaar als nevenactiviteit naast de ontginning van zand (Van Schaeybroeck, 2008). In andere gevallen wordt gebruik gemaakt van rode zandsteen uit Duitsland en Frankrijk, gekend als

Bontzandsteen of Vogezenzandsteen (Trias). Maar ook deze steen kan de kleur van de Diestiaan ijzerzandsteen slechts moeilijk benaderen (Figuur 8). Deze zandsteen is immers veel roder van tint daar het ijzeroxide hier in de vorm van hematiet voorkomt (Dusar et al., 2009).



Figuur 7. Enkele voorbeelden van kenmerkende schadebeelden aan metselwerk in Diestiaan ijzerzandsteen. **A.** begijnhofkerk Sint-Catharina te Diest, **B.** Onze-Lieve-Vrouwekerk te Diest, **C.** Sint-Catharinakerk te Kortrijk-Dutsel en **D.** Maagdentoren te Zichem.



Figuur 8. Voorbeeld van het gebruik van Bontzandsteen bij de restauratie van het portaal van de Sint-Hubertuskerk te Schaffen.

4. Studie van de geologische en bouwtechnische kenmerken van Diestiaan ijzerzandsteen

Om de geologische en de bouwtechnische kenmerken van ijzerzandsteen in kaart te brengen werd in opdracht van de Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON) en in samenwerking met de Belgische Geologische Dienst (KBIN-BGD) een reeks boringen uitgevoerd op 4 sites: de Roeselberg te Herent, het Gasthuisbos te Pellenberg, de Beninksberg te Wezemaal en de Middelberg te Rotselaar. Afhankelijk van de site werden steenbanken tot ca. 21 m diepte

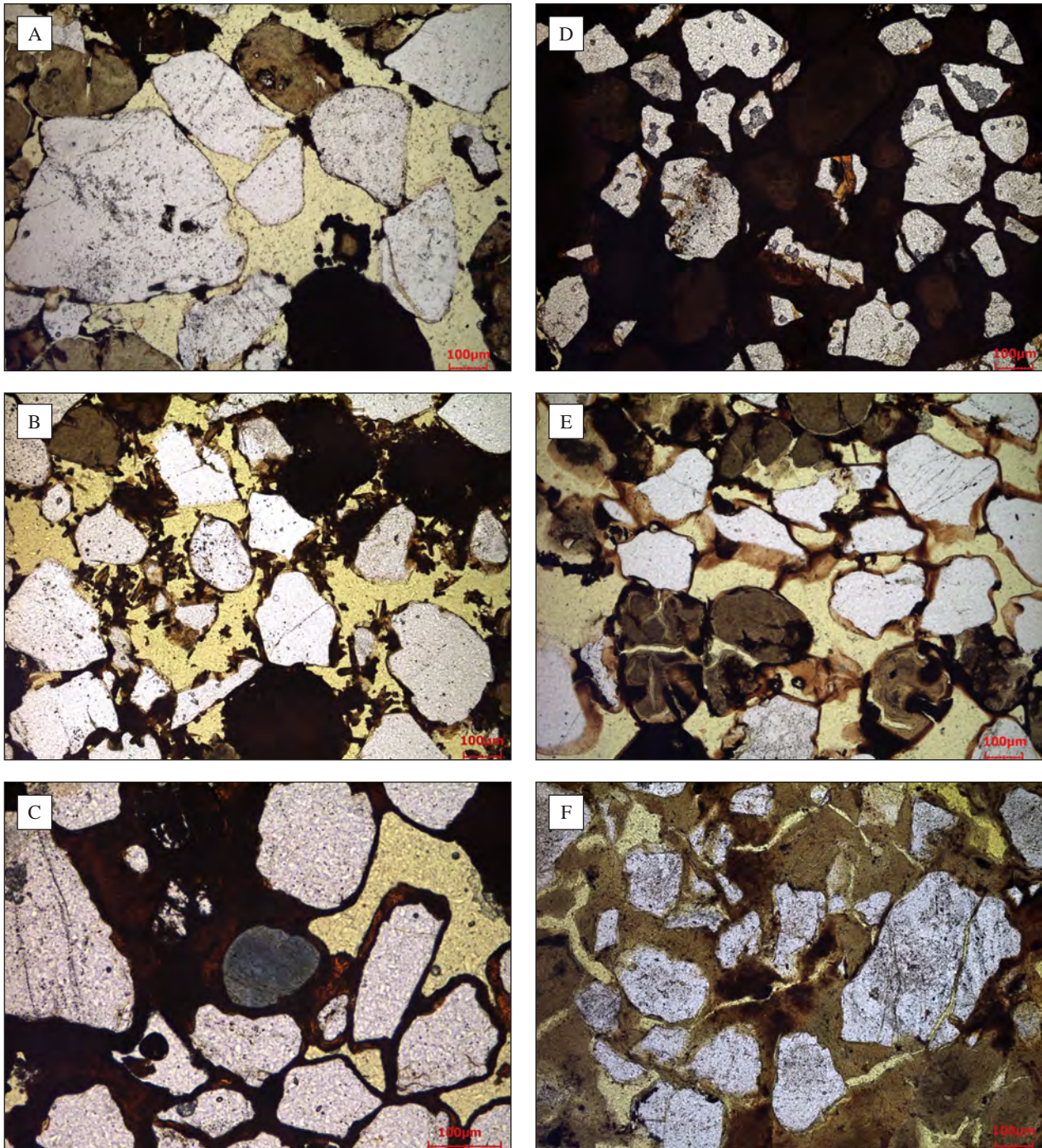
aangeboord. Verder werd in samenwerking met het Agentschap Wegen en Verkeer materiaal bekomen afkomstig van de Langenberg te Diest, en dit gezien in het kader van geplande wegeniswerken waarbij een deel van het talud met ijzerzandsteenbanken zal worden afgegraven.

Het onderzoek van de ijzerzandsteen uit deze boorkernen had tot doel de mineralogische kenmerken en de bouwtechnische kwaliteit, meer bepaald de porositeit, de densiteit, de mechanische sterkte en de vorstbestendigheid te evalueren alsook hun onderlinge verbanden. De studie werd uitgevoerd door het Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK) in samenwerking met het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB).

4.1. Snelheid van ultrasone geluidsgolven

Vooreerst werd de mogelijkheid onderzocht of een in-situ kwaliteitsbeoordeling van ijzerzandsteenbanken mogelijk is op basis van een reeks eenvoudige terreinmethoden. De snelheid van ultrasone geluidsgolven doorheen de natuursteen werd daarbij als mogelijke terreinmethode geëvalueerd. Deze methode wordt reeds regelmatig gebruikt voor de kwaliteitsbeoordeling van natuursteen in het algemeen. De geluidssnelheid wordt immers bepaald door de dichtheid en de opbouw van de natuursteen en zijn bestanddelen. Het resultaat van een geluidssnelheidsmeting is echter afhankelijk van een aantal factoren, onder andere de vochtigheid en de uitvoeringsmethodiek, zodat het resultaat steeds met de nodige omzichtigheid dient geïnterpreteerd te worden.

Op het beschikbare materiaal werden onder gecontroleerde omstandigheden (na droging gedurende minstens 3 weken bij een temperatuur van ca. 20°C en een relatieve luchtvochtigheid van ca. 60%) in totaal bijna 4000 geluidssnelheidsmetingen uitgevoerd, waardoor een statistische verwerking van de gegevens mogelijk werd. Voor de voorbereiding en de afmetingen van de stalen werd daarbij omwille van praktische aard afgeweken van de norm EN 14579, Beproevingmethoden voor natuursteen - Bepaling van de voortplantingssnelheid van geluid. De omvang van het beschikbare staalmateriaal liet immers niet toe dit in de beschikbare oven bij $40 \pm 5^\circ\text{C}$ te drogen. Gezien de bepaling van de ultrasone geluidssnelheid werd benaderd vanuit een verkennend, niet-destructief standpunt, werden de metingen gerealiseerd op de boorkernen (diameter ca. 10 cm) zoals deze uit de ondergrond werden gelicht. De voortplantingssnelheid van de geluidsgolven werd daarom in functie van het diepteprofiel van de kernboring (telkens over een afstand van een centimeter) opgemeten en dit volgens twee orthogonale richtingen parallel aan de diameter van het cilindervormige proefstuk.



Figuur 9. A. Microkristallijne aggregaten in een zwak geconsolideerde ijzerzandsteen (staal H1/1B afkomstig van de Roeselberg te Herent, code slijpplaatje X1137). Het limonietcement (zwartgekleurd) komt voor als geïsoleerde neerslag onder de vorm van contactpunten tussen de zandkorrels.

B. Kristallieten in een zwak geconsolideerde ijzerzandsteen (staal P2/3A afkomstig van het Gasthuisbos te Pellenberg, code slijpplaatje X1153). Limonietkristallieten (zwartgekleurd) hebben zich ontwikkeld vanuit de randen van de zandkorrels (geïsoleerde neerslagen).

C. Limonietkorsten (diep roodgekleurd) in een goed geconsolideerde ijzerzandsteen (staal H1/3A afkomstig van de Roeselberg te Herent, code slijpplaatje X1139). De enkellagige korsten omringen de zandkorrels volledig (continue neerslag). Midden in het beeld komt een toermalijnkorrel voor.

D. Dicht limonietcement (zwartgekleurd) in een goed geconsolideerde ijzerzandsteen (staal D/5.1B afkomstig van de Langenberg te Diest, code slijpplaatje X1271). Zandkorrels zijn volledig gecementeerd door limoniet dat zowel de rol van contactcement als van poriëncement vervult.

E. Bruine films (helder cement) rondom de zandkorrels in een zwak geconsolideerde ijzerzandsteen (staal W3/4A afkomstig van de Beninksberg te Wezemaal, code slijpplaatje X1161). Plaatselijk vertonen de bruine films de kenmerken van een microstalactitisch cement (grotere dikte op het stratigrafisch onderste gedeelte van de zandkorrels).

F. Glauconietcement (helder cement) in een goed geconsolideerde ijzerzandsteen (zelfde staal als in beeld D). Het glauconietcement is groen en vervult de rol van poriëncement. Talrijke krimp-scheuren kunnen in het glauconietcement herkend worden.

De geluidssnelheid in ijzerzandsteen varieert tussen ca. 400 m/s voor een weinig geconsolideerd ijzerzand tot meer dan 3500 m/s voor de best geconsolideerde ijzerzandsteen. De foutenmarge op de meetresultaten bedraagt hierbij 17.5 m/s en is bijgevolg beduidend lager dan de gemeten verschillen als gevolg van de natuurlijke heterogeniteit en de gelaagdheid van de ijzerzandsteen. Door middel van de geluidssnelheid kan overigens over het algemeen het groefleger van de ijzerzandsteen bepaald worden, zelfs wanneer dit visueel niet herkenbaar is: de richting loodrecht op het groefleger wordt gekenmerkt door een beduidend lagere geluidssnelheid.

4.2. Petrografische opbouw

Diestiaan ijzerzandsteen is een donkerbruine ijzerhoudende zandsteen, ontstaan door het samenkneden van een glauconiethoudend zand, met een soms groene schijn afhankelijk van de aanwezigheid van onverweerd glauconiet. In de ijzerzandsteen komen ijzerconcreties voor onder de vorm van limonietlagen en -ringen, evenals bioturbaties veroorzaakt door de activiteit van zeeorganismen tijdens de fase van sedimentatie. IJzerzandsteen bestaat uit een mengeling van zandpartikels (kwarts- en glauconietkorrels) en een ijzerhoudend bindmiddel dat voor de samenhang van de zandkorrels zorgt (het limonietcement).

De kenmerken van de zandfractie worden beschreven aan de hand van de korrelgrootte, de sorteringsgraad, de verhouding kwarts tot glauconiet en de verweringsgraad van het glauconiet.

Microscopisch onderzoek van slijpplaatjes heeft uitgezonden dat het cement in verschillende vormen voorkomt. Op basis van de kleur onder de microscoop in niet-gepolariseerd doervallend licht kunnen twee types cement herkend worden: een donker cement (zo goed als opaak) en een helder cement (transparant of doorschijnend).

Het donker cement is het meest voorkomend. In het kader van dit onderzoek wordt enkel het donker cement als limoniet omschreven. Dit is echter een eerder vage term die verwijst naar een mengeling van ijzeroxiden en hydroxiden zonder meer informatie te geven over de zuiverheid, de exacte chemische en mineralogische samenstelling, de kristalliniteit en het eventuele kleigehalte. Het limonietcement kan onder verschillende vormen voorkomen: i) microkristallijne aggregaten, ii) kristallieten, iii) dunne (enkellagige) tot dikke (meerlagige) korsten en iv) een dicht cement. In diezelfde volgorde neemt tevens de opvullingsgraad van de poriënruimte toe.

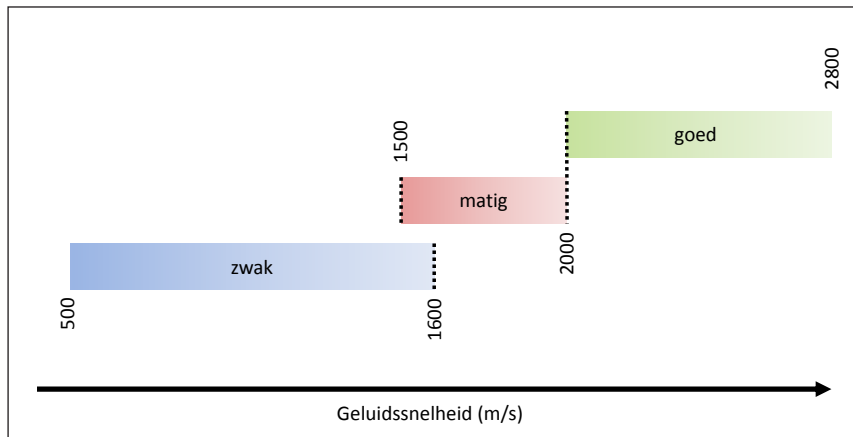
Het helder cement kan voorkomen als: i) bruine films van kleiige aard rondom de zandkorrels, ii) amberkleurige vlekken, blokken en korsten en iii) een dicht glauconietcement. In figuur 8 wordt een overzicht weergegeven van de verschillende cementatievormen. Tussen de beschreven cementatievormen zijn steeds overgangen mogelijk en kan het cement tussen de zandkorrels op verschillende manieren voorkomen. Er is mogelijk sprake van een

diagenetische opeenvolging tussen bepaalde cementatievormen. Zo kan bijvoorbeeld de ontwikkeling van microkristallijne aggregaten leiden tot de vorming van een dicht cement. Dit aspect werd echter niet verder bestudeerd in het kader van dit onderzoek.

De petrografische studie en in het bijzonder de microscopische analyse van de kenmerken van het cement tussen de zandkorrels maken het mogelijk een algemene beoordeling te geven van de consolidatiegraad van ijzerzandsteen volgens een indeling in 3 categorieën: zwak, matig en goed geconsolideerde zandsteen. De indeling in 3 categorieën werd semi-kwantitatief bepaald aan de hand van visuele waarnemingen en schattingen op basis van slijpplaatjes.

Uit de petrografische studie worden volgende bevindingen afgeleid:

1. Een goede consolidatie van de ijzerzandsteen is het gevolg van een continue neerslag van het cement rondom de zandkorrels en een globaal hoog cementgehalte (van 10 tot meer dan 20%). Zwak geconsolideerde zandsteen wordt daarentegen gekenmerkt door een globaal laag cementgehalte (doorgaans minder dan 5% tot maximaal 10%), bestaande uit geïsoleerde eilanden van cementneerslag. Matig geconsolideerde ijzerzandsteen vertoont tot slot kenmerken die zich hier tussenin bevinden, met name een discontinue neerslag rondom de zandkorrels met een globaal gemiddeld cementgehalte variërende van 5 tot 15%.
2. Omdat het cement de poriënruimte vult, daalt de macroporositeit (poriën groter dan ca. 100 µm) bij toenemend cementgehalte en bijgevolg toenemende consolidatiegraad. Zowel de totale macroporositeit, de gemiddelde grootte van de macroporiën alsook de connectiviteit tussen de macroporiën nemen af met toenemende consolidatiegraad.
3. De ijzerzandsteenstalen onderzocht in deze studie bevatten doorgaans een zandfractie bestaande uit middelgrote zandkorrels. Algemeen kan echter gesteld worden dat het zand in ijzerzandsteen een veel gevarieerdere samenstelling kent van fijn tot middelgroot.
4. De zandfractie bestaat hoofdzakelijk uit kwarts- en glauconietkorrels en dit in een verhouding kwarts/glauconiet van ca. 3:2 voor een ruime meerderheid (2/3) van de stalen. De resterende groep stalen bevat doorgaans en bij benadering een gelijke hoeveelheid aan kwarts en glauconiet. Andere mineralen komen slechts sporadisch voor.
5. De verweringsgraad van het glauconiet varieert van weinig, over matig tot sterk, waarbij een min of meer gelijke spreiding over deze verschillende verweringsgraden wordt vastgesteld. Er is een zekere tendens waarneembaar in de zin van een hoger percentage aan sterk verweerde glauconiet bij sterker geconsolideerde ijzerzandsteen en omgekeerd.



Figuur 10. Klasse-indeling voor de consolidatiegraad bepaald op basis van microscopische cementanalyse en overeenkomstige geluidssnelheidsintervallen.

Voornamelijk grotere glauconietkorrels lijken aan vertering onderhevig te zijn. Hierbij moet echter opgemerkt dat de glauconietkorrels in eenzelfde staal Diestiaan ijzerzandsteen een verschillende herkomst kunnen hebben: pas gevormd glauconiet op de zeebodem (fris) en/of reeds verweerd glauconiet afkomstig, net als het kwarts, uit erosiemateriaal van het continent, en gevormd tijdens vroegere geologische periodes.

Uit de petrografische studie kan worden afgeleid dat een in situ beoordeling van de geschiktheidsklasse als bouwsteen, op empirische wijze bepaald door het betikken van het proefstuk met een hamer, een ruwe doch redelijk betrouwbare indicatie van de consolidatiegraad geeft. Helemaal sluitend is deze beoordeling evenwel niet, onder meer omdat de empirische beoordeling doorgaans wordt uitgevoerd op een brokstuk in zijn geheel, dit terwijl inherente heterogeniteitskenmerken van de ijzerzandsteen tot lokaal grote verschillen in consolidatiegraad kunnen leiden. Ook de vergelijking van de consolidatiegraad met de geluidssnelheid levert eenzelfde tendens op, zonder volledig exclusief te zijn in de beoordeling van de consolidatiegraad. Toch kan een klasse-indeling voor de consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid voorgesteld worden (Figuur 10).

4.3. Materiaaltechnische kenmerken

4.3.1. Poriënstructuur

In totaal werden van 58 proefstukken, verspreid over de 5 sites, de volumieke massa en de totale watertogankelijke porositeit door middel van vacuümverzadiging bepaald volgens de norm EN 1936, Beproevingmethoden voor natuursteen - Bepaling van de werkelijke dichtheid en de schijnbare dichtheid en van de totale poreusheid en open poreusheid. De totale porositeit varieert van 22.0 tot 44.9 vol%, met een gemiddelde waarde van 31.1 ± 4.8 vol%. Hoewel ijzerzandsteen een eerder inhomogeen materiaal is, samengesteld uit diverse bestanddelen in een onderling

variërende verhouding en met elk een verschillende dichtheid, werd desondanks toch een goede correlatie vastgesteld tussen de schijnbare volumieke massa (ρ_b) en de totale watertogankelijke porositeit (p_0) (de lineaire correlatiecoëfficiënt bedraagt 96.2%). Volgende conversieformule kan worden vooropgesteld:

$$p_0 (\text{vol}\%) = -0.0264 \rho_b (\text{kg/m}^3) + 85.5$$

Uit de correlatie tussen de gemiddelde geluidssnelheid en de totale watertogankelijke porositeit kan worden afgeleid dat naarmate de porositeit daalt, de gemiddelde geluidssnelheid toeneemt. De correlatie tussen deze grootheden is niet uitstekend, maar toch significant.

Naast de totale watertogankelijke porositeit werd de poriënverdeling tevens bestudeerd door middel van kwikporosimetrie. De analyse werd voorlopig om praktische redenen beperkt tot de stalen afkomstig van de Langenberg te Diest, die echter - achteraf gezien - een eerder coherent geheel vormen waarbij zwak en goed geconsolideerde ijzerzandsteen minder voorkomen. De resultaten tonen aan dat gemiddeld genomen de totale porositeit afneemt met toenemende consolidatiegraad, zoals kon worden verwacht. Er is echter een duidelijk continuüm waarneembaar tussen de verschillende consolidatiegraden, waarbij de maximale enveloppecurve voor de poriënverdeling voor een zwakker geconsolideerde ijzerzandsteen overlapt met de minimale enveloppecurve voor een iets beter geconsolideerde ijzerzandsteen.

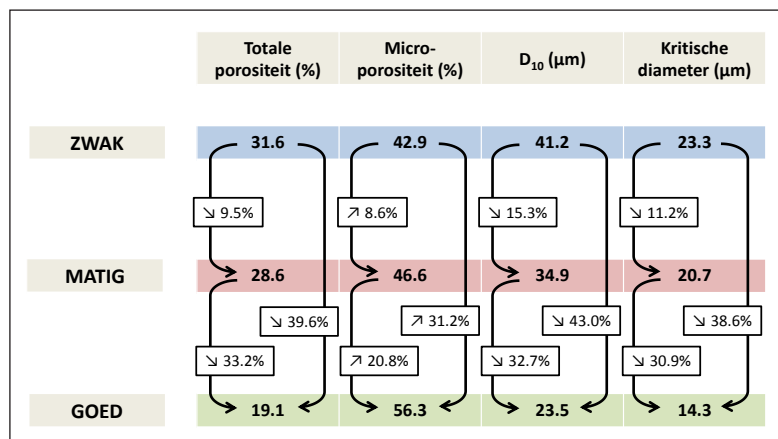
De daling van de totale porositeit in goed geconsolideerde ijzerzandsteen komt overeen met een stijging van de microporositeit (het aandeel aan poriën kleiner dan $5 \mu\text{m}$), een vermindering van de parameter d_{10} (de poriëndiameter die verondersteld wordt overeen te komen met het punt waarbij de natuursteen een verzadigingsgraad van 90% bereikt bij vacuümverzadiging met water), en een vermindering van de kritische poriëndiameter (de poriëndiameter die overeenkomt met de steilste helling in de curve van de cumulatieve porositeit in

functie van de poriënverdeling) (Figuur 11). Natuursteen met een aandeel aan microporositeit lager dan 30% wordt over het algemeen als duurzaam omschreven, terwijl het risico op vorstschade voor natuursteen met een aandeel aan microporositeit hoger dan 90% en/of een d_{10} -waarde lager dan 2.5 μm als significant wordt beschouwd (Ingham, 2008). Met een gemiddelde microporositeit tussen 42.9 en 56.3 vol% kunnen daarom zowel zwak, matig als goed geconsolideerde Diestiaan ijzerzandsteen bijgevolg noch als 100% duurzaam, noch als 100% niet duurzaam worden beschouwd. De gemiddelde d_{10} -waarde van de verschillende types ijzerzandsteen is bovendien gelegen tussen 23.5 en 41.2 μm en bijgevolg boven de vermelde limietwaarde waardoor het risico op vorstschade verwaarloosbaar zou zijn.

Op basis van deze resultaten kan worden vermoed dat voor zowel zwak, matig als goed geconsolideerde Diestiaan ijzerzandsteen een redelijke vorstbestendigheid mag worden verwacht. Dit resultaat is echter gebaseerd op gemiddelde waarden. Individuele resultaten kunnen hiervan sterk afwijken. De literatuurwaarden zijn bovendien gebaseerd op andere types natuursteen dan ijzerzandsteen, zodat als gevolg van verschillen in mineralogische samenstelling een afwijkend gedrag mogelijk is.

4.3.2. Druksterkte

De druksterkte werd bepaald volgens de norm EN 1926, Beproevingmethoden voor natuursteen - Bepaling van de eenassige druksterkte, en varieert tussen 2.1 en 37.2 MPa met een gemiddelde waarde van 14.0 ± 9.9 MPa. De proeven werden, overeenkomstig de norm, uitgevoerd op in totaal 37 kubusvormige proefstalen met een ribbe van 50 ± 5 mm (23 stalen) of 70 ± 5 mm (14 stalen). Slechts één proefstuk viel buiten deze toleranties. De stalen werden vooraf gedroogd bij $70 \pm 5^\circ\text{C}$ tot een constant gewicht en daarna belast tot breuk bij een belastingsnelheid van 0.34 MPa/s in de richting loodrecht op het groefleger. De proefstukken vertoonden in vele gevallen gebreken als luchtholtes, afgebroken hoeken, scheuren, etc. Dit is evenwel eigen aan dit natuurgesteente. De spreiding op de resultaten is, zoals kon worden verwacht gezien de heterogene kenmerken, zeer groot. De resultaten zijn echter geheel in overeenstemming met beschikbare literatuurwaarden voor de druksterkte van ijzerzandsteen afkomstig van zowel monumenten als groeves (Tabel 1).



Figuur 11. Gemiddelde waarden voor 1) de totale porositeit (vol%), 2) de microporositeit (% van de totale porositeit met poriën < 5 μm), 3) de gemiddelde poriëndiameter in μm waarvoor de eerste 10% van de poriën met kwikintrusie wordt gevuld (d_{10}) en 4) de kritische poriëndiameter in μm (de poriëndiameter die overeenkomt met de steilste helling in de cumulatieve poriënverdeling) voor zwak, matig en goed geconsolideerde ijzerzandsteen.

Tabel 1. Overzichtstabel van beschikbare literatuurwaarden voor de druksterkte van ijzerzandsteen, afkomstig van zowel monumenten als groeves (in cursief aangeduid).

Bron	Herkomst	Aantal Stalen	Druksterkte (MPa)
Triconsult, 2007	Sint-Eustachiuskerk (Zichem)	19	2.5
Van Campenhout, 2009	Maagdentoren (Zichem)	15	6 - 17
	<i>Middelberg (Rotselaar)</i>	4	5 - 15
	<i>Weefberg (Averbode)</i>	24	10 - 23
Bourel, 2010	Sint-Willibrorduskerk (Meldert)	10	7.2 ± 5.3
Dreesen et al., 2010	<i>Kepkensberg (Tessenderlo)</i>	9	17.0 ± 4.4
De Schutter & De Pauw, 2010	<i>Roeselberg (Herent)</i>	10	6.4 ± 2.6
Hayen & De Clercq, 2011	Maagdentoren (Zichem)	10	5.9 ± 1.5

Het belang van de druksterkte van bouwmaterialen in historische gebouwen wordt in het kader van restauraties echter vaak overschat. De draagstructuur van monumentale constructies, specifieke elementen als kolommen, gewelfbogen, luchtbogen, en dergelijke buiten beschouwing gelaten, wordt over het algemeen gekenmerkt door een zeer grote dwarsdoorsnede. Hierdoor is, zelfs rekening houdende met de vaak grote hoogte van dergelijke gebouwen, de uiteindelijke druk per oppervlakte-eenheid in het metselwerk doorgaans zeer laag, ook wanneer wordt aangenomen dat in oorspronkelijk meerschallig metselwerk de belasting enkel door het binnen- en buitenparement wordt gedragen. Rekening houdend met het feit dat i) deuren raamopeningen, trapgangen, etc. leiden tot lokale spanningsconcentraties in het metselwerk, ii) ijzerzandsteen, net als andere bouwmaterialen, onderhevig is aan kruip waardoor over zeer lange tijd (soms zelfs meerdere eeuwen) schade zich kan opstapelen met een afname van de sterkte tot gevolg en iii) ook het vochtgehalte een belangrijke invloed uitoefent op de druksterkte van de ijzerzandsteen met een daling van de sterkte naarmate het vochtgehalte toeneemt (Bourel, 2010) lijkt een druksterkte van ca. 10 MPa voor de meeste toepassingen in opgaand metselwerk ruim voldoende.

Voor sterk belaste bouwelementen zoals kolommen, gewelfbogen en luchtbogen dient de bepaling van de noodzakelijke druksterkte geval per geval bekeken te worden. Echter ook voor deze toepassingen lijkt het mogelijk om geschikt ijzerzandsteenmateriaal te vinden.

Bij dit alles dient evenwel opgemerkt te worden dat bij een restauratie in vele gevallen de vervangsteen niet onder druk belast wordt. Immers wanneer een enkele steen of een deel van een gevelvlak wordt vervangen en nieuw inboetwerk wordt aangebracht, zal deze nieuwe invulling alleen maar onder druk komen te staan wanneer het metselwerk eromheen vervormt. Meestal heeft de structuur zich reeds gezet, zodat de feitelijke belasting op de invulling zo goed als verwaarloosbaar is. De druksterkte voor een invulling in een bestaande structuur is bijgevolg minder cruciaal. In principe komt hiervoor ijzerzandsteen met een lage druksterkte (kleiner dan 10 MPa) in aanmerking. Tijdens het onderzoek werd echter vastgesteld dat ijzerzandsteen gekenmerkt door een druksterkte lager dan 5 MPa, over het algemeen zeer zacht was en gemakkelijk kon gekrast worden. Op vandalisme na, is dit geen beperking voor een toepassing in een binnenomgeving. Buiten echter, waar het steenoppervlak onderhevig is aan erosie door weer en wind en aan toevallige mechanische belasting (bijvoorbeeld door schade als gevolg van het parkeren van fietsen), is het gebruik van dergelijke ijzerzandsteen niet aangewezen. Hier volstaat evenwel een visuele evaluatie van de ijzerzandsteen, eventueel aangevuld met

in situ geluidssnelheidsmetingen uitgevoerd in droge klimaatomstandigheden, om de kwaliteit indicatief te beoordelen.

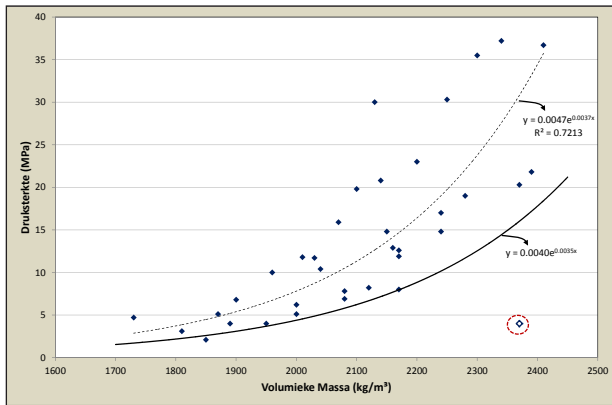
De vraag stelt zich uiteraard of de druksterkte op basis van andere materiaaleigenschappen kan worden ingeschat. Intuïtief kan worden verondersteld dat een materiaal van onderling vergelijkbare samenstelling met een hogere dichtheid (lagere porositeit), een hogere druksterkte zal vertonen. In de realiteit zal dit evenwel enkel het geval zijn wanneer het materiaal homogeen is over het volume van het proefstuk. Heterogeniteiten, zoals bijvoorbeeld limonietlagen of holtes, zullen tijdens de drukproef immers aanleiding geven tot lokale spanningsconcentraties, waardoor het falen van het proefstuk vaak bespoedigd wordt. Gezien het veelvuldig voorkomen van heterogene zones in ijzerzandsteen wordt verwacht dat de correlatie tussen de dichtheid en de druksterkte zwak is, hetgeen ook uit de meetresultaten kan worden afgeleid. Alle meetpunten samen genomen is er sprake van een zekere trend tot toename in druksterkte voor een hogere dichtheid hoewel de puntenwolk een brede spreiding vertoont (Figuur 12). Het verband tussen dichtheid en druksterkte lijkt eerder gekenmerkt door een exponentieel verloop. Bij de evaluatie van de meetresultaten valt op dat één meetpunt ver buiten de puntenwolk gelegen is. Dit meetresultaat werd dan ook verder niet in rekening gebracht. Mogelijk is hier bij de verwerking van de resultaten een fout ingeslopen, die niet meer te achterhalen valt.

Voor alle toepassingen waar de druksterkte een cruciale materiaaleigenschap is, kan men opteren voor een veilige karakterisering op basis van volgende ondergrens:

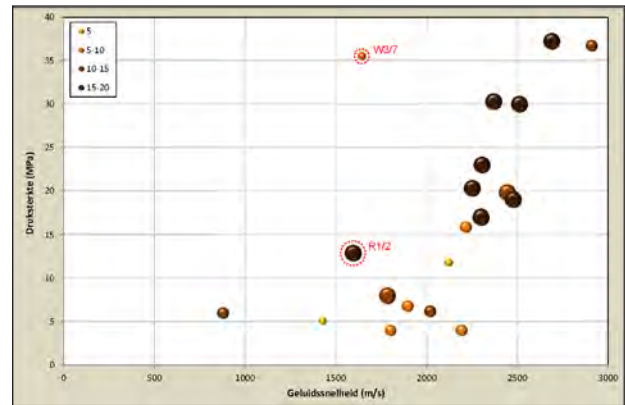
$$f_c \text{ (MPa)} = 0.004 e^{0.0035 \rho_s \text{ (kg/m}^3\text{)}}$$

Daar alle meetwaarden boven deze curve liggen, is de werkelijke druksterkte in elk geval hoger dan deze berekende waarde zodat dit een veilige inschatting is. Het nadeel van deze benadering is evenwel dat heel wat ijzerzandsteen op het vlak van druksterkte bijgevolg te laag wordt ingeschat en hierdoor eventueel onderbenut blijft.

Er kan voorts een verband gelegd worden tussen de petrografische kenmerken en de druksterkte: een positieve correlatie is merkbaar tussen de consolidatiegraad (bepaald op basis van het cementgehalte en de globale verdeling van het limonietcement) en de druksterkte van ijzerzandsteen (Figuur 13). Een goed geconsolideerde ijzerzandsteen (gekenmerkt door een continue neerslag van het limonietcement) levert een hoge druksterkte op. Een druksterkte van minimaal 15 MPa kan op basis van de huidige resultaten verwacht worden.



Figuur 12. Correlatie tussen de volumieke massa (kg/m^3) en de druksterkte (MPa) ($n = 37$). De volle lijn geeft de ondergrens van de meetwaarden weer op basis waarvan een minimale druksterkte kan afgeleid worden.



Figuur 13. Vergelijking tussen de gemiddelde geluidssnelheid (m/s), de druksterkte (MPa) en de petrografische kenmerken (de kleur verwijst naar het gehalte aan limonietcement; de grootte naar de verdeling van de limonietneerslag, m.n. klein = geïsoleerde neerslag, medium = discontinue neerslag en groot = continue neerslag) van 20 onderzochte stalen ijierzandsteen.

Eén staal vertoont hierbij een sterk afwijkend gedrag, met name een staal afkomstig van de Roeselberg te Herent (staal R1/2). Hoewel het hier een goed geconsolideerde ijierzandsteen betreft, gekenmerkt door een hoog cementgehalte (15-20%) en een continue limonietneerslag rondom de zandkorrels, worden zowel een lage geluidssnelheid als een lage druksterkte (13 MPa), lager dan gemiddeld te verwachten, gemeten. Het petrografisch onderzoek heeft echter uitgewezen dat dit staal microscheuren vertoont, vermoedelijk als gevolg van reeds aanwezige vorstschade in de ijierzandsteen (vorstschade die vermoedelijk dateert van het einde van de laatste ijstijd toen de bovenste lagen van de ijierzandsteenbanken regelmatig aan vorst-dooi cycli werden blootgesteld). De aanwezigheid van de microscheuren is dan ook vermoedelijk de oorzaak van de lagere druksterkte van dit anders kwaliteitsvolle materiaal.

Ondanks een laag gehalte aan en een discontinue neerslag van het limonietcement vertonen enkele stalen ijierzandsteen toch een hoge druksterkte. Dit is uitgesproken het geval voor het staal W3/7 (gemiddelde geluidssnelheid 1642 m/s en druksterkte 35.5 MPa), afkomstig van de Beninksberg te Wezemaal. Hierbij dient bemerkt dat, hoewel de stalen nauwgezet geselecteerd werden, het staal voor petrografisch onderzoek gelicht werd aan de rand van de kern bestemd voor de

uitvoering van de drukproef. Zeker in geval van heterogene ijierzandsteenkernen kan dit aanleiding geven tot verschillende resultaten. Er kan bijgevolg worden vermoed dat het fragment gebruikt voor het maken van het slijpplaatje minder limonietcement bevat dan het resterend deel gebruikt voor de bepaling van de druksterkte.

4.3.3. Vorstbestendigheid

De vorstbestendigheid van ijierzandsteen werd experimenteel bepaald volgens de Europese norm EN 12371, Beproevingmethoden voor natuursteen - Bepaling van de vorstbestendigheid. Deze norm beschrijft de uitvoering van een reeks vorst-dooi cycli op vooraf met water verzadigde proefstukken, bekomen na onderdompeling gedurende 48 uur onder atmosferische druk. Elke vorst-dooi cyclus beslaat 24 uren en bestaat uit een vriesfase waarbij gedurende 6 uur de temperatuur in de kern van het proefstuk daalt tot -8°C , gevolgd door een dooiperiode van 18 uur (door onderdompeling in water op een temperatuur van 20°C). Het voordeel van deze Europese norm over de oude Belgische norm is dat de mogelijke toepassingen waarin het onderzochte materiaal kan gebruikt worden, achteraf worden bepaald op basis van het aantal behaalde vorst-dooi cycli en niet vooraf dient te worden vastgelegd (Tabel 2).

Tabel 2. Interpretatieschema voor de evaluatie van de vorst-dooi cycli volgens de norm EN 12371

Toepassing	Aantal cycli dat minimaal behaald dient te worden volgens EN 12371
Bestrating en vloerbedekking	140
Elementen in contact met de grond (ook de plintzone)	140
Opgaande, niet verticale delen of delen die uit het gevelvlak springen (vensterbanken, kroonlijsten, beeldhouwwerk, balustrades, ...)	84
Massief (verticaal) metselwerk	70
Dunne geventileerde gevelbekleding	14

De norm beschouwt een proefstuk als ‘gebroken’ indien aan één van volgende voorwaarden voldaan is: i) wanneer de visuele beoordeling van de schade een waarde 3 bereikt volgens een in de norm omschreven beoordeling. Een waarde 3 wordt toegekend indien één of meerdere van volgende fenomenen wordt vastgesteld: het verschijnen van scheurtjes breder dan 0.1 mm, het verschijnen van gaten of het loskomen van fragmenten groter dan 30 mm²; ii) wanneer de vermindering van dynamische elasticiteitsmodulus groter dan of gelijk is aan 30% ($-\Delta E > 30\%$); of iii) wanneer de vermindering van het schijnbare volume groter is dan 1%. In de praktijk wordt dit laatste criterium echter niet meer gehanteerd, omdat het uit ervaring ondergeschikt is gebleken aan de vorige twee criteria. Bovendien kan ook het eerste criterium in het geval van ijzerzandsteen als ondergeschikt beschouwd worden. Een heterogene zone in de natuursteen kan immers leiden tot een plaatselijk materiaalverlies, dat vaak best als aanvaardbaar kan beschouwd worden gezien het algehele uitzicht van ijzerzandsteen. Een verlies aan samenhang van de ijzerzandsteen als gevolg van een sterke scheurvorming, af te leiden uit het verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus, is daarentegen problematisch en zondermeer een bepalend criterium voor de beoordeling van de vorstbestendigheid van deze natuursteen.

De proefresultaten zijn zeer gevarieerd, waarbij voor alle types consolidatiegraad de ijzerzandsteen op het vlak van vorstbestendigheid van zwak tot zeer goed scoort (Tabel 3).

Tabel 3. Overzicht van het aantal stalen ijzerzandsteen dat het vooropgestelde aantal vorst-dooicycli doorstond en dit in functie van hun consolidatiegraad, waarbij een verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus van maximaal 30% als criterium werd gehanteerd. Een score van nul cycli duidt aan dat het staal faalde vooraleer 14 vorst-dooicycli werden voltooid.

Consolidatiegraad	Aantal voltooide vorst-dooicycli tot $-\Delta E > 30\%$				
	0	14	56	70	140
zwak	1	1	0	0	3
matig	1	1	1	0	2
goed	1	0	2	0	5

Het is evenmin mogelijk om enige correlatie te bekomen tussen de vorstbestendigheid en bijvoorbeeld de geluidssnelheid, de volumieke massa, de totale porositeit of de petrografische kenmerken van de ijzerzandsteen. Alhoewel een groot deel van de geteste proefstukken een redelijke tot zeer goede vorstbestendigheid vertoont, wordt voor elk type consolidatiegraad (zwak, matig en goed) vorstgevoelig ijzerzandsteenmateriaal vastgesteld. In tegenstelling tot de eerste criteria afgeleid uit literatuurgegevens met betrekking tot de verdeling van de poriëndiameter, blijkt dat een goede vorstbestendigheid geen algemeen kenmerk is van ijzerzandsteen. Gezien tevens ijzerzandsteenstalen,

waarvan uit de gemeten poriënstructuur volgens deze literatuurgegevens een zekere vorstbestendigheid kon worden vermoed, experimenteel vorstgevoelig blijken, is op z'n minst een aanwijzing dat de beschikbare literatuurwaarden voor de theoretische benadering van vorstbestendigheid niet geheel van toepassing zijn voor ijzerzandsteen. Bijkomend onderzoek om de relatie tussen poriënstructuur en vorstbestendigheid te beoordelen is daarom aangewezen, waarbij rekening wordt gehouden met mogelijk meer extreme poriënverdelingen.

4.3.4. Steenverstevigende behandeling

Op basis van de hardheidsmetingen, uitgevoerd door middel van het Drilling Resistance Measurement System (DRMS) (Vicentini et al., 2012; De Clercq & Dusar, 2011, De Clercq et al., in druk), werden de verschillende stalen van ijzerzandsteen in 6 klassen onderverdeeld: laag, laag tot matig, matig, matig tot hoog, hoog en heterogeen. Het merendeel van de fragmenten behoort echter tot de klasse laag (ruim de helft van het aantal stalen) of heterogeen (ongeveer een kwart).

Uit de vergelijking van de consolidatiegraad, afgeleid uit de resultaten van de geluidssnelheidsmetingen, met de algemene hardheidskenmerken bekomen aan de hand van resultaten van DRMS-metingen kan worden afgeleid dat stalen gekenmerkt door een lage hardheid, doorgaans zwak tot matig geconsolideerd zijn. Ijzerzandsteen met een gemiddeld hogere consolidatiegraad vertoont sterk uiteenlopende hardheidsprofielen, waarbij het merendeel echter gekenmerkt wordt door een heterogene hardheid.

Om de kunstmatige versterking van ijzerzandsteen te bestuderen, werd een behandeling met een oplossing van ethylsilicaat (TEOS) geëvalueerd. Het versterkend product werd hierbij aangebracht door capillaire absorptie, waarbij het te behandelen oppervlak gedurende 10 seconden tot 1 mm diep in een oplossing van ethylsilicaat werd gebracht. Deze behandeling werd tot drie maal herhaald met een tussentijd van minimaal 24 uur. Het gebruikte consolidatiemiddel is een 100 % product op basis van ethylsilicaat (Rewah ARTISIL SVS 100) of een met terpentijn verdunde oplossing van datzelfde product (75 g% ethylsilicaat). De keuze voor dit product en de gebruikte verdunningen is gebaseerd op een jarenlange ervaring in het gebruik van deze werkwijze voor de uitvoering van steenverstevigende behandelingen en de resultaten van de initiële hardheid van de onbehandelde proefstalen. Het steenverstevigend effect werd beoordeeld op basis van een vergelijking van de hardheidsprofielen voor en na proefbehandeling, gerelateerd aan de productopname en het percentage aan droge stof. Een (mogelijk) steenverstevigend effect wordt waargenomen voor ongeveer de helft van de behandelde stalen. De diepte van het versterkend effect varieert sterk, van 1 tot 12 mm. De gemiddelde diepte van de versterkte zone bedraagt echter slechts 4 mm.

Het polymerisatieproces van TEOS werd tevens met FTIR opgevolgd aan de hand van de evolutie van de absorptiebanden van organische groepen, typerend voor de aanwezigheid van niet gereageerde ethoxy-groepen van TEOS. Concreet kan uit deze resultaten worden afgeleid dat een duidelijke correlatie tussen het verbruik/de hoeveelheid uitgehard product en het verstevigend effect niet eenduidig is.

Wat de invloed van de aard van de behandeling betreft (het gebruik van een 100% of een tot 75% verdunde oplossing en het aantal behandelingen), kan worden gesteld dat minder positieve resultaten worden bekomen in geval van een 75% product. Bij toepassing van deze laatste oplossing wordt evenwel een duidelijke invloed opgemerkt van het aantal behandelingen op het verstevigend effect. Drie behandelingen verhogen merkbaar het aandeel aan stalen dat een verstevigend effect vertoont in vergelijking met de toepassing van slechts twee behandelingen. Een gelijkaardige invloed wordt niet bekomen voor het 100% product.

5. Conclusie

Dit onderzoek, uitgevoerd door het KIK en het WTCB in opdracht van de Vlaamse overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, ALBON (Onderzoeksproject VLA11-4.1, *Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen*, Hayen et al., 2013), resulteerde in een gedetailleerde petrografische, bouwfysische en bouwmechanische beschrijving van de Diestiaan ijzerzandsteen op basis van materiaal gelicht in 5 typelocaties in het Hageland.

De petrografische studie van de ijzerzandsteen heeft de verschillende samenstellende bestanddelen in kaart gebracht, waaruit een consolidatiegraad voor de natuursteen kon worden afgeleid. Deze consolidatiegraad kan op een redelijk betrouwbare wijze geschat worden op basis van geluidssnelheidsmetingen, weliswaar uitgevoerd onder gecontroleerde omstandigheden.

De consolidatiegraad kon tevens in verband gebracht worden met de druksterkte. Een goed geconsolideerde ijzerzandsteen kan doorgaans voor de meest uiteenlopende toepassingen als bouwsteen ingezet worden, zelfs wanneer de druklast toeneemt. Enkel voor zeer sterk belaste toepassingen, zoals kolommen en gewelfbogen, is een betere evaluatietechniek noodzakelijk. Hiervoor is verder onderzoek naar de mineralogische samenstelling van de ijzerzandsteen aangewezen.

Wat de vorstbestendigheid betreft, vertoont de ijzerzandsteen erg wisselende resultaten. Bovendien kan de vorstbestendigheid niet in verband gebracht worden met de overige materiaalkenmerken. Alleen de poriënstructuur lijkt enig verband te tonen met de mogelijke

vorstgevoeligheid van goed geconsolideerde ijzerzandsteen, maar ook hier is verder onderzoek vereist.

Een behandeling van ijzerzandsteen door middel van een oplossing op basis van ethylsilicaat leidde slechts in de helft van de gevallen tot een verstevigend effect. De diepte van het verstevigend effect varieerde bovendien sterk, maar was over het algemeen eerder beperkt. De meest gunstige resultaten werden bekomen in het geval van 3 behandelingen met een met terpentijn verdunde oplossing (75 g% ethylsilicaat).

De studie toont echter aan dat voor eender welke mogelijke toepassing, zij het binnen of buiten, zij het mechanisch zwaar belast of niet, er op elk van de 5 sites ijzerzandsteen kon gevonden worden die aan de gestelde materiaaltechnische eisen voldoet.

6. Referenties

- Barbier, J., 2006. Geologische fietsroute – Halen. Likona, Hasselt, 64 p.
- Bos, K., & Gullentops, F., 1990. IJzerzandsteen als bouwsteen in en rond het Hageland, Bulletin de la Société belge de Géologie – Bulletin van de Belgische Vereniging voor Geologie, 99-2, pp. 131-151.
- Bourel, E., 2010. Numerieke modellering van tijdsafhankelijk gedrag en faling van monumentale metselwerkstructuren, K.U. Leuven, Eindwerk Departement Ingenieurswetenschappen, Afdeling Bouwkunde, 81 p.
- Broothaers, L., 2003. Geologie van Vlaanderen, een schets. Brussel, Afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie. 10 p.
- Callebaut, D., 1982. De tafelrondmote op de warande te Diest in *Archaeologica Belgica*, 250, Varia IV, pp. 6-18.
- Cnudde, V., Dewanckele, J., Boone, M., De Kock, T., Boone, M., Brabant, L., Duser, M., De Ceukelaire, M., De Clercq, H., Hayen, R., Jacobs, P., 2011. High-Resolution X-Ray CT for 3D Petrography of Ferruginous Sandstone for an Investigation of Building Stone Decay, *Microscopy Research and Technique*, Volume 74, Issue 11, pp 1006-1017
- De Clercq, H., Hayen, R., Cnudde, V., Boone, M., & Duser, M., 2010a. The “Maagdentoren” of Zichem (Belgium): damage assessment of ferruginous sandstone by X-Ray Tomography, proceedings of the 8th International Symposium on the Conservation of Monuments of the Mediterranean Basin, Patras, 31 May-2 June 2010, Volume II, pp 206-219, ISBN: 978-960-8369-66-5
- De Clercq, H., Hayen, R., & Duser, M., 2010b. The “Maagdentoren” of Zichem (Belgium): damage assessment of ferruginous sandstone and strengthening effect

- of consolidation with ethylsilicate (TEOS), proceedings of the 8th International Symposium on the Conservation of Monuments of the Mediterranean Basin, Patras, 31 May-2 June 2010, Volume II, pp 220-235, ISBN: 978-960-8369-66-5
- De Clercq, H., & Dusar, M., 2011. Materiaaltechnische studie van de buitenschil van een middeleeuws monument in ijzerzandsteen: de Maagdentoren in Zichem, Handboek Onderhoud Renovatie Restauratie, Kluwer, V.4, pp. 1-28
- De Clercq, H., Fontaine, L., Hayen, R., & Godts, S., in press. Mechanical properties of bricks of the Coudenberg archaeological site in view of a proper conservation strategy Cons & Management of Archaeological Sites.
- De Schutter, G., & De Pauw, P., 2010. Beproeverslag van drukproeven uitgevoerd op brokstukken opgeraapt op de Roeselberg te Herent, Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Overheid, Afdeling Geotechniek, 5 p.
- Deweerd, T., 1980. Gallo-Romeinse villa te Bierbeek, Hona, 15/3, pp. 39-41
- Deweerd, T., & Provoost, A., 1982. Bierbeek: een Gallo-Romeinse villa, in: Provoost A. (ed.), Het bodemarchief van Oost-Brabant. Le sous-sol archéologique du Brabant oriental, Leuven, pp. 19-21
- Doperé, F., Klinckaert, J., Minnen, B., & Van der Eycken, M., 2003: Brabantse bouwmeesters. Verhalen uit de late Middeleeuwen. Bouwen met ijzerzandsteen in de Demerstreek, Provincie Vlaams Brabant, Leuven, 40 pp.
- Dreesen, R., De Ceukelaire, M., & De Koninck, R., 2010. Natuurlijk voorkomen en karakteristieken van inheemse natuursteen in Vlaanderen – Diestiaan ijzerzandsteen in het Hageland, Studie uitgevoerd in opdracht van ALBON (2010/SCT/R/006), 136 pp.
- Dusar, M., Dreesen, R., & De Naeyer, A., 2009. Natuursteen in Vlaanderen, versteend verleden, Kluwer, Mechelen, 562 p.
- Gullentops, F., & Broothaers, L., 1996. Overzicht van de geologie van Vlaanderen in Delfstoffen in Vlaanderen (Gullentops F. & Wouters L. eds), 198 p.
- Hayen, R., & De Clercq, H., 2011. Materiaal-technisch onderzoek naar een aangepaste herstellmortel voor gevelmetselwerk in Diestiaan ijzerzandsteen, 94 p.
- Hayen, R., Fontaine, L., Berto, T., & De Clercq, H., 2013. Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen. Project VLA11-4.1, uitgevoerd door het Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium en het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf in opdracht van de Vlaamse overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, ALBON, 426 p.
- Ingham, J.P., 2008. Predicting the frost resistance of building stone, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 38, 387-399
- Middelbergpark, 2009, De steen van Rotselaar (<http://www.middelberg.be/geschiedenis/desteevanrotselaar.html>)
- Regionaal Landschap Noord-Hageland, 2007. Groeves met een ijzersterk verhaal: De ijzerzandsteengroeves van het Hageland, Regionaal Landschap Noord-Hageland. 43 p.
- Triconsult, 2007. Sint-Eustachiuskerk te Zichem, voorverslagen: druksterkte metselwerk en endoscopisch onderzoek, intern verslag Triconsult nv
- Van Campenhout, D., 2009. Verleden en toekomst van de exploitatie van ijzerzandsteen uit de Diestiaan als bouwsteen, een geologische studie, K.U. Leuven, Eindwerk Departement Aard- en Omgevingswetenschappen, Afdeling Geologie, 110 p.
- Van Driessche, T., in press. Van goeden koerliken Rotcelaerstone wel ende reynlic ghehouden. De ontginning en het gebruik van ijzerzandsteen in het Hageland van de middeleeuwen tot de 20^e eeuw, Onroerend Erfgoed
- Van Schaeybroeck, E., 2008. IJzerzandsteen, een verloren glorie?, Provinciale Hogeschool Limburg, Eindwerk Departement Architectuur en Beeldende Kunst, 169 p.
- Vicentini, C., Jovanovic, M., & De Clercq, H., 2012. Influence of Extreme Moisture and Salt Load on the Consolidation Properties of TEOS – Part II : Strengthening Effect and Salt Profiles, Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 18, No 2, pp. 71-80