



Koninklijk Instituut voor  
het Kunstpatrimonium

Federaal wetenschapsbeleid  
Jubelpark 1  
BE-1000 BRUSSEL



Wetenschappelijk en Technisch  
Centrum voor het Bouwbedrijf

Lombardstraat 42  
B-1000 BRUSSEL



## Onderzoeksproject VLA11-4.1

### Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen

#### Hoofdrapport

D : 2012.11586

**Aanvrager:** Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON)

**Contactpersoon:** Mevr. Griet Verhaert

**Uitvoering:** Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK)  
Departement labo, Cel monumenten

**Onderaannemer:** Tanaquil Berto, Hilde De Clercq, Laurent Fontaine, Roald Hayen en Ingrid Nijs  
Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB)  
Yves Vanhellemont

**Verslaggeving:** Roald Hayen, Laurent Fontaine, Tanaquil Berto en Hilde De Clercq

**Datum:** 30 september 2013

**Referentie:** Hayen R., Fontaine L., Berto T. en 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 blz.

## Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	3
2.	Opbouw van het onderzoek .....	5
3.	Beschrijving ijzerzandsteenmateriaal, geschiktheidsklasse, geluidssnelheid en selectie van de stalen.....	7
4.	Petrografische studie .....	16
5.	Beschrijving van de bouwmechanische en bouwfysische kenmerken .....	18
5.1.	Evaluatie van de hardheid en de mogelijkheid tot steenversteving.....	18
5.2.	Evaluatie van de schijnbare volumieke massa en porositeit .....	20
5.2.1.	Schijnbare volumieke massa .....	20
5.2.2.	Totale watertogankelijke porositeit.....	21
5.2.3.	Poriënverdeling.....	24
5.3.	Evaluatie van de druksterkte .....	26
5.4.	Evaluatie van de vorstbestendigheid.....	29
6.	Technische fiche voor ijzerzandsteen .....	33
6.1.	Vergelijking van de materiaalkenmerken van ijzerzandsteen met overige types natuursteen en beschikbare literatuurwaarden .....	33
6.2.	Technische fiche .....	35
7.	Kwaliteitscriteria .....	36
7.1.	Het belang van de druksterkte.....	36
7.2.	De vochtbalans van het metselwerk in zijn context.....	38
7.3.	De noodzaak voor vorstbestendige ijzerzandsteen.....	38
8.	Synthesetabellen van de materiaalkenmerken in functie van de typelocatie .....	39
8.1.	Roeselberg (Herent) .....	40
8.2.	Gasthuisbos (Pellenberg) .....	42
8.3.	Beninksberg (Wezemaal) .....	44
8.4.	Middelberg (Rotselaar) .....	47
8.5.	Langenberg (Diest) .....	49
9.	Terreinmethode.....	52
10.	Algemene conclusie.....	54
11.	Perspectieven voor verder onderzoek .....	56



## 1. Inleiding

In het Hageland komen talrijke NO-ZW-georiënteerde heuvels voor die versteende ijzerzandsteenbanken bevatten. Deze ijzerzandsteen behoort tot de Formatie van Diest en wordt gekenmerkt door een grote diversiteit aan samenstelling, kwaliteit en duurzaamheid. De Diestiaan ijzerzandsteen werd in het Hageland in talrijke monumentale bouwwerken gebruikt, wat leidde tot een typische bouwstijl in de late middeleeuwen: de Demergothiek.

Tot vandaag werden de aspecten kwaliteit en duurzaamheid van de Diestiaan ijzerzandsteen doorgaans benaderd vanuit een visuele beoordeling van de conserveringstoestand enerzijds en individuele materiaal-technische vooronderzoeken, veelal uitgevoerd in het kader van de mogelijkheid tot een conserverende behandeling, anderzijds, eventueel aangevuld met een eerder beperkte en niet systematische evaluatie van de petrografische kenmerken. Technische kwaliteitscriteria gesteund op fysische en mechanische kenmerken, en hun verband met de mineralogische kenmerken, noodzakelijk als indicatie voor het aspect bruikbaarheid als bouwsteen in functie van de toepassing (parement, plint, druiplijst, deksteen, ...) zijn tot heden onbestaande.

Steeds meer worden monumenten, opgetrokken in Diestiaan ijzerzandsteen, geconfronteerd met een belangrijk oppervlaktemateriaalverlies enerzijds en de technische moeilijkheid tot de realisatie van een conserverende behandeling in geval van sterke verzanding anderzijds waaruit de noodzaak tot vervanging volgt. Wat het aspect “vervanging” betreft wordt dit erfgoed bovendien geconfronteerd met de problematiek van beperkt beschikbare reserves waardoor vaak beroep dient gedaan op alternatieve ijzerzandsteensoorten waarvan de aard en de esthetiek afwijkt van de authentieke bouwsteen.

Dit verslag beschrijft de resultaten van een onderzoek uitgevoerd naar de geologische en de materiaal-technische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen met als doel de inzet ervan in de restauratie van historische gebouwen te evalueren. Dit onderzoek werd uitgevoerd door het Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK), met het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB) als onderaannemer, in opdracht van de Vlaamse Overheid, departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON).

Op basis van de studie van de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) en de Belgische Geologische Dienst (BGD) naar het natuurlijk voorkomen van de Diestiaan ijzerzandsteen (Dreesen et al. 2010<sup>1</sup>), het archiefonderzoek van het Agentschap Onroerend Erfgoed en overleg met het Agentschap Natuur en Bos en het Agentschap Wegen en Verkeer werden voorafgaand aan huidig onderzoek door de aanvrager 5 typelocaties geselecteerd om kernboringen uit te voeren. Het lichten van de boorkernen te Herent, Pellenberg, Rotselaar en Wezemaal (zie verder) vond plaats in het voorjaar van 2011 terwijl voor Diest dit plaatsvond tijdens de uitvoering van huidig onderzoek, meer bepaald in het najaar van 2012. De boorkernen gelicht van de vier eerste sites waren voorafgaandelijk door de BGD beschreven in termen van “geschiktheids- of kwaliteitsklasse” gaande van klasse I (solide ijzerzandsteen) tot III (weinig cohesief ijzerhoudend zand of klei). De boorkernen van de 5 geselecteerde locaties werden door de opdrachtgever ter beschikking gesteld voor het onderzoek.

---

<sup>1</sup> 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 door VITO in opdracht van de Vlaamse overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen.

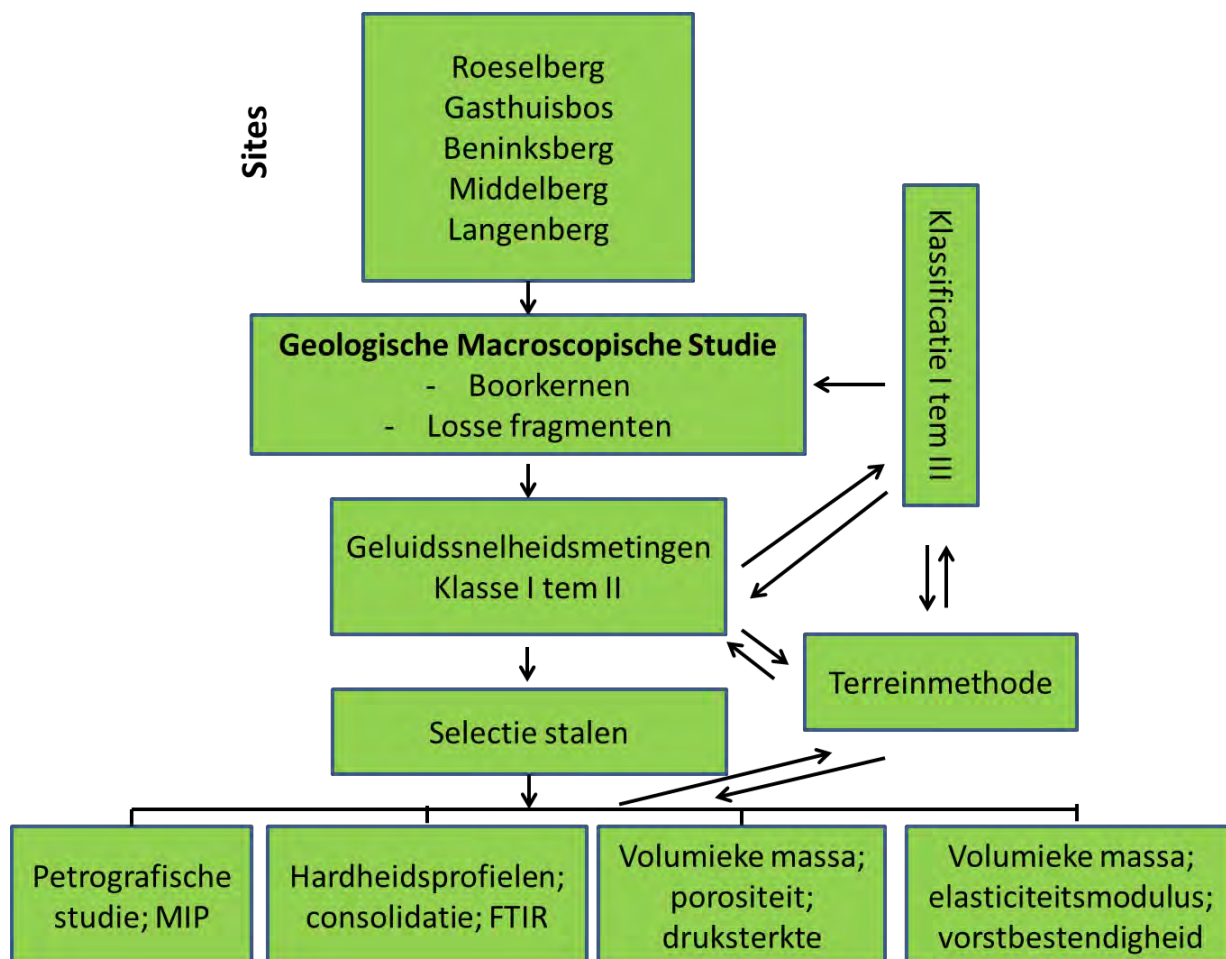
Het doel van deze studie is de karakterisering van de Diestiaan ijzerzandsteen afkomstig van de 5 sites teneinde de geschiktheid ervan als bouwsteen te evalueren.

Daarnaast omvatte de opdracht het formuleren van een hypothese over het geologisch voorkomen van lagen van bouwtechnisch geschikte ijzerzandsteen in de heuvels van het Hageland. De geologische studie van de boorkernen van de Diestiaan ijzerzandsteen diende daarom inzicht te verwerven in het voorkomen van ijzerzandsteenbanken en de materiaal-technische kenmerken van de ijzerzandsteen in detail in kaart te brengen. De correlatie tussen de verschillende resultaten diende bovendien een duidelijk beeld te geven van het voorkomen van banken van bouwtechnisch geschikte ijzerzandsteen zodat het mogelijk wordt om ook op andere locaties waar Diestiaan ijzerzandsteen voorkomt inzicht te verwerven in de mogelijke toepassing ervan bij de restauratie van historische gebouwen.

Het onderzoek werd opgevolgd en bijgestuurd door een stuur- en klankbordgroep waarin experts van de Vlaamse overheid (Departement LNE - Afdeling ALBON, Departement Mobiliteit en Openbare Werken (MOW) - Afdeling Geotechniek, Agentschap voor Natuur en Bos (ANB), Agentschap Wegen en Verkeer (AWV) en Agentschap Onroerend Erfgoed), de Belgische Geologische Dienst (BGD), het Regionaal Landschap Noord-Hageland, het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB), de Universiteit Gent (UGent), de Katholieke Universiteit Leuven (KULeuven), de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) en het KIK vertegenwoordigd waren.

## 2. Opbouw van het onderzoek

Het onderzoek naar de geologische en bouwtechnische kenmerken van Diestiaan ijzerzandsteen werd opgedeeld in verschillende werkpakketten en is gebaseerd op het voorstel opgemaakt door de aanvrager. Het onderzoeksconcept is weergegeven in figuur 1. MIP (Mercury Intrusion Porosimetry) en FTIR spectroscopie (Fourier Transformatie Infrarood spectroscopie) waren aanvankelijk niet voorzien in het onderzoeksconcept. Deze technieken werden bijkomend uitgevoerd, respectievelijk op voorstel van de klankbordgroep en op eigen initiatief.



*Figuur 1. Structuur van het onderzoek uitgevoerd op de ijzerzandstenen boorkernen afkomstig van de 5 geselecteerde sites.*

*(MIP: Mercury Intrusion Porosimetry, FTIR: Fourier Transformatie Infrarood)*

In een eerste fase werden de boorkernen van de Roeselberg, het Gasthuisbos, de Beninksberg en de Middelberg overgebracht van de carotheek van de BGD naar het laboratorium van het KIK, waar deze visueel bestudeerd en gefotografeerd werden. Daarnaast werden terreinbezoeken afgelegd aan voornoemde sites in het bijzijn van leden van de stuurgroep. Tijdens deze terreinbezoeken werden bijkomende losse stalen gelicht aan de dagzomende ijzerzandsteenbanken en overgebracht naar het KIK.

Materiaal behorende tot de geschiktheidsklasse I t.e.m. II van de boorkernen alsook de losse fragmenten werden gedurende ca. 3 weken in het laboratorium bewaard (ca. T 20°C, RV 60%) zodat deze een evenwichtsvochtgehalte konden bereiken. Vervolgens werd hiervan de geluidssnelheid gemeten. Op basis van de boorbeschrijvingen met toekenning van de geschiktheidsklasse en de resultaten van de geluidssnelheidsmetingen werden de stalen voor nadere karakterisatie van de

ijzerzandsteen geselecteerd, gecodeerd en gefotografeerd. Het resterende materiaal van de boorkernen werd naar de carotheek van de BGD teruggebracht.

De stalen van de Langenberg te Diest werden in de tweede fase van dit onderzoek gelicht en onderzocht. Aan het merendeel van deze stalen werd door het KIK een geschiktheidsklasse toegekend en dit conform aan de methodiek van de BGD toegepast voor de materialen van de 4 overige sites. De gelichte kernen werden eveneens gedurende ca. 3 weken in het laboratorium bewaard (ca. T 20°C, RV 60%) alvorens geluidssnelheidsmetingen en materiaal-technische analyses uit te voeren.

Het materiaal-technisch onderzoek bestaat uit 4 delen: de petrografische studie, de evaluatie van de hardheid door middel van DRMS (Drilling Resistance Measurement System), de bouwmechanische studie en de bouwfysische studie van de ijzerzandsteen.

Voor het petrografisch onderzoek, het eerste deel van dit onderzoek, werden slijpplaatjes gemaakt die vervolgens door middel van optische microscopie werden geanalyseerd om de mineralogische kenmerken van de ijzerzandsteen te beschrijven. Aanvullend werden kwikintrusie-metingen (Mercury Intrusion Porosimetry, MIP) uitgevoerd om de poriënverdeling in functie van de consolidatiegraad, bepaald op basis van de resultaten van het petrografisch onderzoek, nader te bestuderen.

Het tweede deel van het onderzoek omvat de evaluatie van de hardheid van de ijzerzandsteen op basis van DRMS-metingen alsook van het effect van een steenverstevigende behandeling met het doel de zinvolheid ervan op verweerde ijzerzandsteen in monumentale constructies te voorspellen.

De bepaling van de bouwmechanische kenmerken van de ijzerzandsteen, het derde luik van dit onderzoek, is gebaseerd op metingen van de druksterkte, uitgevoerd volgens de Europese Standaardnorm NBN EN 1926 (2006).

De bouwfysische karakterisering van de ijzerzandsteen ten slotte is beperkt tot de evaluatie van de vorstbestendigheid. Voor de vorst-dooi proeven werd de voorkeur gegeven aan de recentere Europese normering boven de Belgische, omdat deze het mogelijk maakt de natuursteen te evalueren in functie van de diverse toepassingen als bouwsteen (dit in functie van het aantal vorst-dooi cycli dat de natuursteen weerstaat).

De uitvoering van de bouwmechanische en -fysische testen wordt voorafgegaan door de bepaling van de schijnbare volumieke massa en de watertogankelijke porositeit. Aanvullend aan de evaluatie van de vorstbestendigheid wordt de dynamische elasticiteitsmodulus bepaald, waarbij een dalende modulus in functie van het aantal vorst-dooi cycli als criterium wordt gehanteerd om schade aan de natuursteen te evalueren.

Aan dit hoofdverslag zijn volgende bijlagen gekoppeld:

- Bijlage I: Geologische macroscopische studie, selectie stalen en overzicht analyses
- Bijlage II: Geluidssnelheidsmetingen
- Bijlage III: Petrografische studie
- Bijlage IV: Petrografische beschrijvingen per slijpplaatje
- Bijlage V: Evaluatie van de hardheid en het effect van een steenverstevigende behandeling
- Bijlage VI: Schijnbare volumieke massa
- Bijlage VII: Porositeit
- Bijlage VIII: Druksterkte
- Bijlage IX: Vorstbestendigheid en dynamische elasticiteitsmodulus
- Bijlage X: Vergelijkende tabel voor de benamingen van de proefstukken

In deze laatste bijlage wordt een overzicht gegeven van de DOV codes van het studiemateriaal en de codes gebruikt voor dit onderzoek.



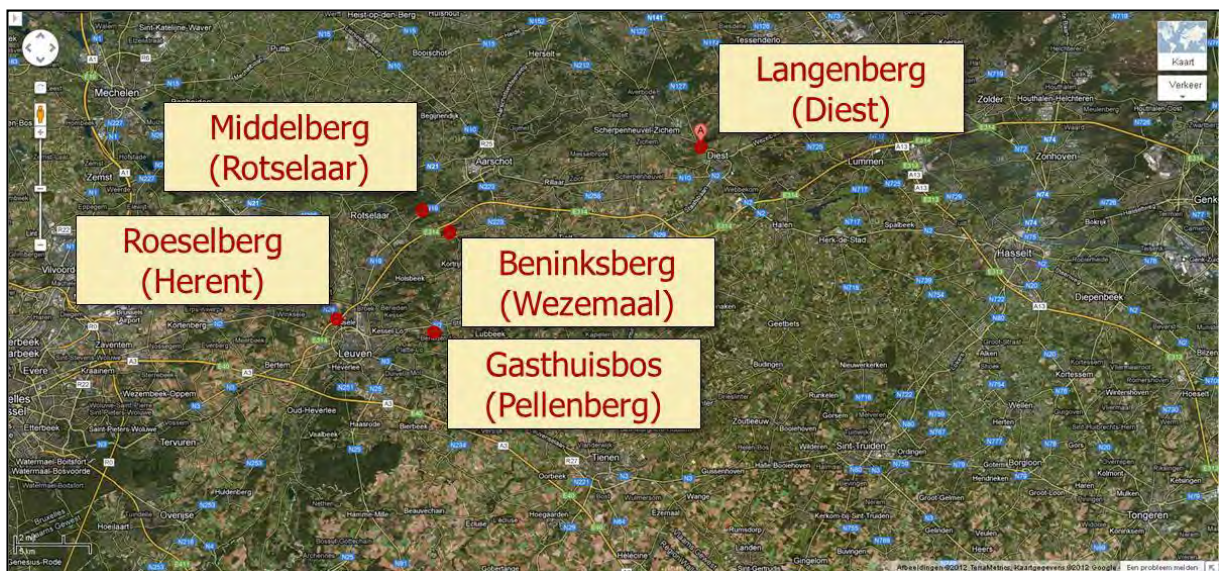
### 3. Beschrijving ijzerzandsteenmateriaal, geschiktheidsklasse, geluidssnelheid en selectie van de stalen

Een overzicht van de onderzochte stalen is weergegeven in bijlage I *Geologische macroscopische studie, selectie stalen en overzicht analyses*. Hierin worden de stalen geïdentificeerd en beschreven en worden de uitgevoerde studies en proeven opgesomd.

Het onderzoek werd uitgevoerd op 5 typelocaties, vastgelegd door de opdrachtgever:

- de Roeselberg te Herent
- het Gasthuisbos te Pellenberg
- de Beninksberg te Wezemaal
- de Middelberg te Rotselaar
- de Langenberg te Diest

De geografische situering van deze locaties is aangeduid in Figuur 2.



Figuur 2: Geografische situering van de 5 typelocaties (bron afbeelding: Google)

Van de eerste 4 typelocaties waren bij aanvang van het onderzoek in totaal 8 gekernde boringen beschikbaar (Tabel 1). Deze boringen werden in 2011 uitgevoerd door SMET-G.W.T. in opdracht van het Departement LNE, afdeling ALBON<sup>2</sup>. De opvolging van de boringen werd verzorgd door de Belgische Geologische Dienst<sup>3</sup>.

Deze werden door de opdrachtgever ter beschikking gesteld en lagen opgeslagen in de carotheek van de BGD. De rapporten van de boorcampagnes en de gedetailleerde boorbeschrijvingen van de boorkernen zijn publiek beschikbaar via <http://dov.vlaanderen.be>. Deze rapporten kunnen via de link in de tabel, gekoppeld aan de benaming van de boring, geraadpleegd worden.

<sup>2</sup> Project VLA10-4.1 *Uitvoeren van gekernde boringen in het voorkomingsgebied van de Diestiaan ijzerzandsteen in het Hageland*. Uitgevoerd door SMET-G.W.T. in opdracht van de Vlaamse overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, ALBON.

<sup>3</sup> Vancampenhout, P., 2011. *Verslag werfopvolging door de Belgische Geologische Dienst van project VLA10-4.1*.

Tabel 1. Overzicht van de vooraf beschikbare gekerde boringen

Boring	Locatie	X	Y	Diepte (m)
<a href="#">VLA10-4.1-B1</a>	Roeselberg (Herent)	172278.50	176202.70	21.65
<a href="#">VLA10-4.1-B2</a>	Gasthuisbos (Pellenberg)	178723.80	174896.50	16.00
<a href="#">VLA10-4.1-B3</a>	Gasthuisbos (Pellenberg)	178753.60	174949.20	20.50
<a href="#">VLA10-4.1-B4</a>	Beninksberg (Wezemaal)	179432.00	181787.80	13.00
<a href="#">VLA10-4.1-B5</a>	Beninksberg (Wezemaal)	179389.30	181774.00	12.15
<a href="#">VLA10-4.1-B6</a>	Beninksberg (Wezemaal)	179379.50	181776.90	11.00
<a href="#">VLA10-4.1-B7</a>	Middelberg (Rotselaar)	178359.00	183628.00	20.50
<a href="#">VLA10-4.1-B8</a>	Middelberg (Rotselaar)	178371.90	183581.40	10.15

Een korte beschrijving van het ijzerzandsteenmateriaal bekomen uit deze kernboringen, aangevuld met een grafische weergave van de betreffende steenlagen of -banken in functie van de diepte in de ondergrond, is voorzien in bijlage I. In sommige gevallen werd een verschil opgemerkt tussen de gedetailleerde boorbeschrijving, die in situ werd opgemaakt onmiddellijk na het lichten van de boorkernen, en de toestand van de boorkernen bij de aanvang van huidig onderzoek: fragmenten die oorspronkelijk als een geheel werden beschreven bleken op het ogenblik van de staalname tijdens dit onderzoek uit twee of meerdere delen te bestaan. Waar relevant werd dit in de beschrijving van de boorkernen in bijlage I opgenomen. De verschillen zijn mogelijks te verklaren door schade opgelopen tijdens het transport van de boorkernen en hun bewaring. Dit laatste in het bijzonder gezien het feit dat voorafgaand aan dit onderzoek de boorkernen in de niet verwarmde opslagplaats aan enkele natuurlijke vorst-dooi cycli waren blootgesteld.

Met uitzondering van de Roeselberg te Herent werden aan alle typelocaties terreinbezoeken afgelegd. Ter gelegenheid van de terreinbezoeken werden bijkomende losse stalen aan de op het terrein zichtbare ontsluitingen gelicht.

De site te Roeselberg werd in het kader van dit onderzoek niet bezocht daar de voorheen zichtbare ontsluiting zich inmiddels achter een betonnen wand, aangebracht door AWV ter stabilisering van het talud, bevindt. De BGD stelde ons evenwel enkele vooraf gelichte stalen ter beschikking (losse fragmenten nrs. 8, 9 en 10, bijlage I), afkomstig van deze ontsluiting.

In het Gasthuisbos te Pellenberg werden ter gelegenheid van het terreinbezoek twee stalen aan de aanwezige ontsluiting gelicht: één aan de noordelijke zijde (P-4, Figuur 3, los fragment nr. 3) en één aan de zuidelijke zijde van de holle weg (P-6, Figuur 4, los fragment nr. 4) gelegen ten noorden van de eerder uitgevoerde kernboringen. Het staal gelicht aan de zuidzijde werd in situ van een hogere kwaliteit ingeschat.

Ook aan de Beninksberg te Wezemaal werden enkele losse fragmenten gelicht en dit aan een ontsluiting in een kunstmatige depressie in het landschap (Figuur 5), waar voorheen vermoedelijk ijzerzandsteen ten behoeve van de winning van ijzererts werd ontgonnen. Het betreft hier twee kleinere fragmenten, meer specifiek losse fragmenten nrs. 1 en 2 (bijlage I). Op deze stalen werd enkel petrografisch onderzoek uitgevoerd. De afmetingen ervan waren immers ontoereikend om hieruit stalen voor o.a. druk- en/of vorst-dooi proeven te verzagen.

Op de Middelberg te Rotselaar werden in de nabijheid van de locaties van de kernboringen sporen van vroegere ontginningsactiviteiten waargenomen. Duidelijk afgetekende ontsluitingen ontbraken echter (los fragment nr. 5). Iets verder naar het oosten (ca. 350 meter) werd evenwel een nog zichtbare ontsluiting langs de rand van de weg vastgesteld (Figuur 6). De kwaliteit van deze ijzerzandsteen was op het eerste zicht eerder laag. Hiervan getuigen de diverse graafgangen van metselbijen in deze zachte ijzerzandsteenlagen. Van twee steenblokken gelegen aan de onderzijde van de ontsluiting werd een fragment gelicht, meer bepaald van een steenblok van een op het eerste zicht zeer goede kwaliteit (Figuur 7, los fragment nr. 6) en van een veel zachter steenblok (Figuur 8,

los fragment nr. 7). De geologische situering van deze stalen ten opzichte van de ontsluiting kon evenwel niet worden bepaald.

Op verzoek van ALBON werden in samenwerking met het AWW aan het noordelijke talud van de Langenberg te Diest, op 18 oktober 2012, in totaal 15 kernen geboord (diameter 11 cm met een maximale lengte van ca. 1.2 m). Een volledige beschrijving van de boorkernen is opgenomen in bijlage I. Daar de boorkernen rechtstreeks in verband stonden tot de ontsluiting werden hier geen bijkomende losse fragmenten onderzocht. De geschiktheidsklasse werd door het KIK in het laboratorium vastgelegd, conform de methodiek van de BGD toegepast voor de boorkernen en de losse fragmenten van de overige sites.

Na conditionering in het laboratorium werd op het ijzerzandsteenmateriaal een maximum aan geluidssnelheidsmetingen uitgevoerd teneinde de resultaten te integreren als kwaliteitscriterium voor de uiteindelijke selectie van de stalen bestemd voor verder onderzoek. In totaal werden bijna 4000 metingen uitgevoerd, waardoor de resultaten op een representatieve manier statistisch konden worden benaderd. Op de boorkernen werd de geluidssnelheid volgens twee orthogonale richtingen gemeten en per cm lengte (volgens de boordiepte). De losse fragmenten werden eerst verzaagd tot stalen met reguliere afmetingen en vorm, waarna de geluidssnelheid langs de verschillende zijden eveneens per cm lengte werd gemeten. Een overzicht van alle resultaten is terug te vinden in bijlage II *Geluidssnelheidsmetingen*.

Uit de resultaten van een foutenanalyse, eveneens weergegeven in deze bijlage, kan worden afgeleid dat de totale fout op de geluidssnelheidsmetingen naar schatting 17.5 m/s bedraagt.

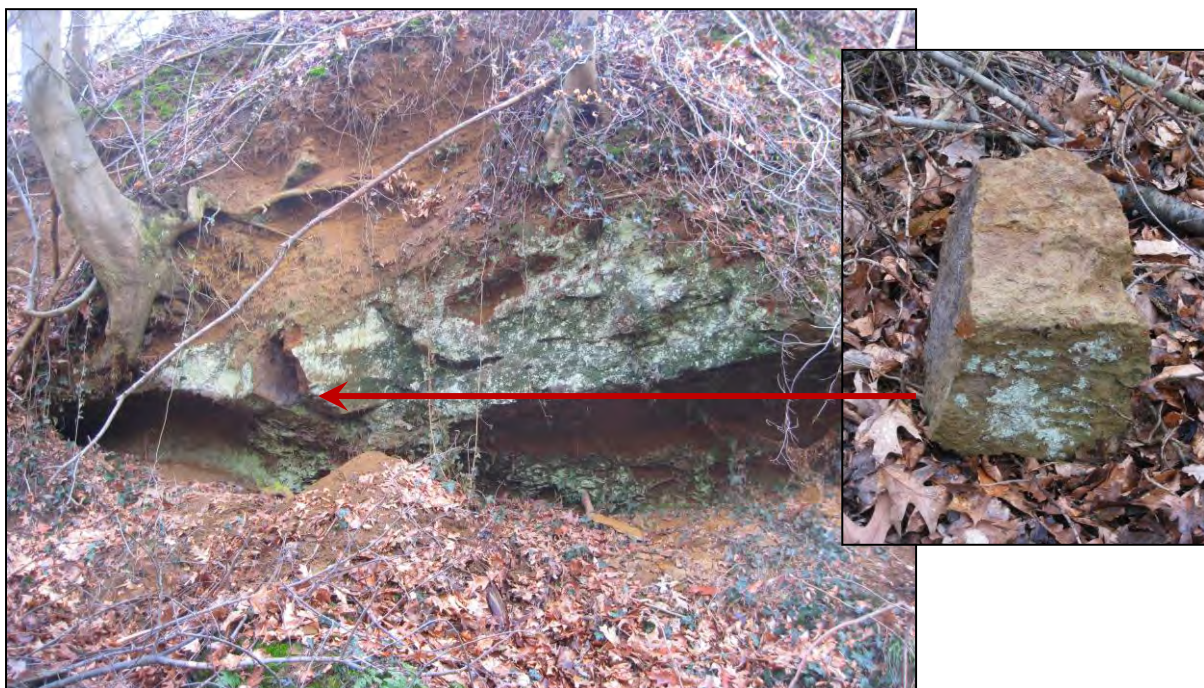
De geluidssnelheid vertoont een zeer grote spreiding (ca. 200 - 3550 m/s), uiteraard gedeeltelijk omdat voor dit onderzoek zowel goede als minder goede kwaliteit aan ijzerzandsteen werd geselecteerd. Sommige zones bevatten bovendien allicht ook de overgang naar een weinig geconsolideerd ijzerzand. De gemiddelde geluidssnelheid over alle metingen bedraagt  $1795 \pm 618$  m/s.

Voor de boorkernen wordt de variatie van de geluidssnelheid volgens de boordiepte vergeleken met de geschiktheidsklasse, zoals vermeld in de gedetailleerde boorbeschrijvingen. Er valt op dat de variatie in de geschiktheidsklasse volgens het boorprofiel zeer vaak beantwoordt aan de lokale variaties in geluidssnelheid (Figuur 9). Wanneer evenwel de gemiddelde waarden van de geluidssnelheid tussen kernen vergeleken worden, is de overeenkomst tussen de geluidssnelheid en de in situ beoordeling van de geschiktheidsklasse niet altijd gelijklopend (Figuur 10).





*Figuur 3. Zicht op de ontsluiting P-4 aan het Gasthuisbos te Pellenberg met aanduiding van de locatie waar het los fragment nr. 3 (inzet rechts) werd gelicht. De locatiekaart voor de ontsluiting P-4 is opgenomen in bijlage I.*



*Figuur 4. Zicht op de ontsluiting P-6 aan het Gasthuisbos te Pellenberg met aanduiding van de locatie waar het los fragment nr. 4 (inzet rechts) werd gelicht. De locatiekaart voor de ontsluiting P-6 is opgenomen in bijlage 1.*





*Figuur 5. Kunstmatige depressie in het landschap net ten zuiden van de kernboringen VLA10-4.1-B5 en VLA10-4.1-B6, waar in het verleden vermoedelijk ijzerzandsteen ten behoeve van de winning van ijzererts werd ontgonnen.*



*Figuur 6. Panoramisch overzicht van de ontsluiting aan de Middelberg te Rotselaar. De detailopname linksonder toont een zone waar metselbijen actief zijn in de zachte zandsteenlagen. De locaties waar de losse fragmenten nrs. 6 en 7 werden gelicht zijn bij benadering aangegeven.*



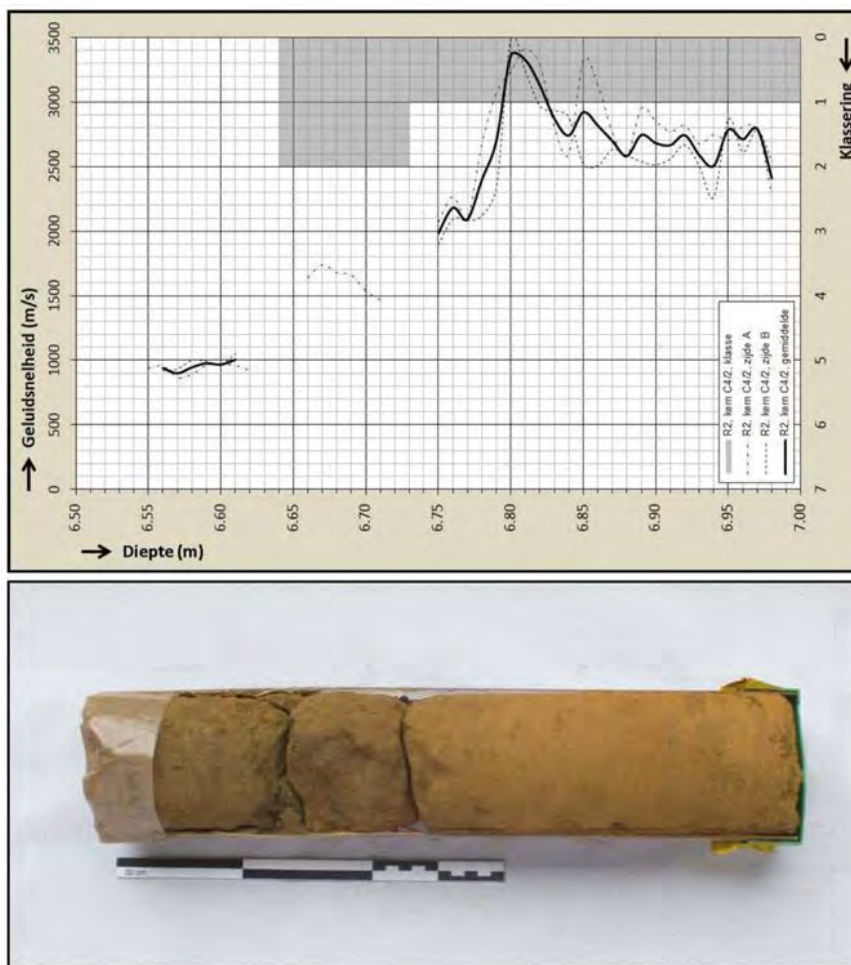


*Figuur 7. Het steenblok teruggevonden aan de Middelberg te Rotselaar, waarvan los fragment nr. 6 werd gelicht.*



*Figuur 8. Het steenblok teruggevonden aan de Middelberg te Rotselaar, waarvan los fragment nr. 7 werd gelicht.*





Figuur 9. Middelberg (Rotselaar), kernboring VLA10-4.1-B8, geluidssnelheid en geschiktheidsklasse van kern C4/2. De verandering in kwaliteitsklasse duidt op een kwaliteitsvermindering aan de linkerzijde van het fragment, wat bevestigd wordt in een overeenkomstige daling van de geluidssnelheid.

Hoewel alle fragmenten in Figuur 10 op basis van de in situ beoordeling in geschiktheidsklasse I zijn ondergebracht zijn grote verschillen in gemiddelde geluidssnelheid tussen de individuele fragmenten merkbaar, alsook lokaal soms sterke variaties binnen eenzelfde fragment. Daar waar de kwaliteitsklasse vastgelegd werd op basis van een globale beoordeling van het fragment, worden over de lengte van het fragment sterk uiteenlopende geluidssnelheden gemeten.

Voor kwaliteitsklasse I worden doorgaans de hoogste geluidssnelheden gemeten (Tabel 2), maar desondanks is er een sterke overlapping van de meetwaarden waarneembaar tussen de klassen I en II (Figuur 11). De gemiddelde geluidssnelheid voor betere kwaliteit aan ijzerzandsteen (klasse I) bedraagt  $2005.9 \pm 588.6$  m/s.

Ijzerzandsteen van geschiktheidsklasse I-II vertoont erg uiteenlopende geluidssnelheden. Het aantal metingen is evenwel eerder gering, omdat relatief weinig fragmenten in deze klasse werden ondergebracht.



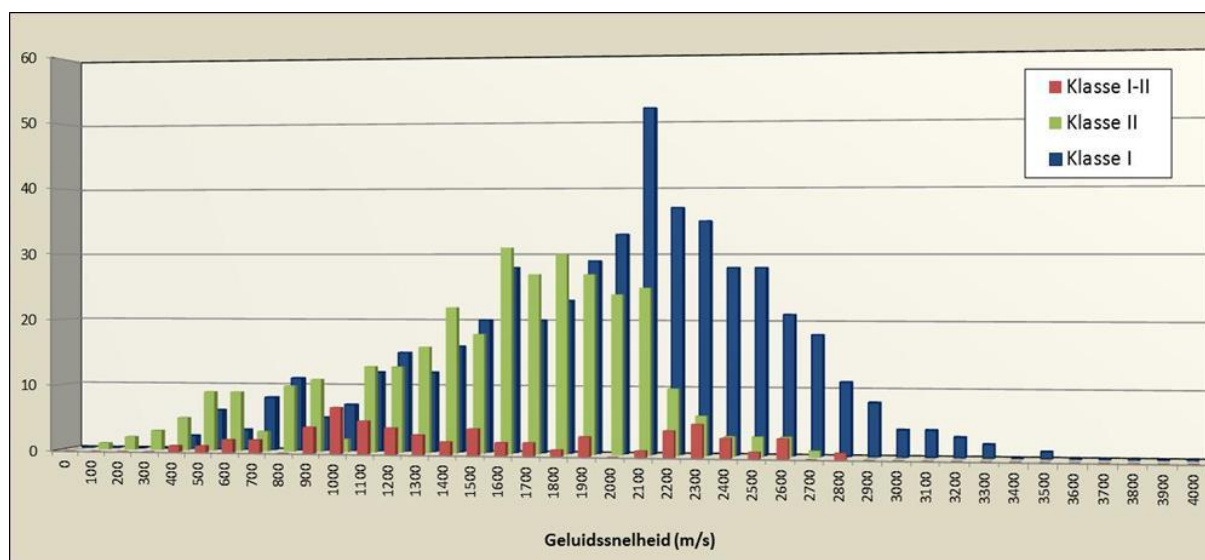
Figuur 10. Roeselberg (Herent), kernboring VLA10-4.1-B1, geluidssnelheid en geschiktheidsklasse van kern C5/2 (boven) en kern C2/1 (onder).

De verschillen zijn vermoedelijk ten dele te wijten aan het feit dat de geschiktheidsklasse slaat op een globale beoordeling van een fragment in zijn geheel, terwijl een geluidssnelheidswaarde een lokaal ijzerzandsteenkenmerk is waardoor plaatselijk sterk afwijkende waarden kunnen bekomen worden. Daarnaast kan later geïntroduceerde schade (transport en/of vorst-dooi cycli in de bewaarplaats) een daling in de kwaliteitskarakteristieken tegenover de in situ beoordeling van de vers geboorde kernen veroorzaakt hebben. Globaal kan gesteld worden dat de in situ indeling in geschiktheidsklassen een eerste beoordeling van de kwaliteit van de ijzerzandsteen mogelijk maakt, maar dat deze niet onfeilbaar is en bijgevolg soms met enige voorzichtigheid dient gehanteerd.

Op basis van de boorbeschrijvingen met toekenning van de geschiktheidsklasse I tot II en de resultaten van de geluidssnelheidsmetingen werden de stalen voor nadere karakterisatie van de ijzerzandsteen gericht geselecteerd. Hierbij werd er bewust voor gekozen om materialen met een zo breed mogelijke variatie in kwaliteit te testen teneinde een globaal beeld van de geologische en bouwtechnische kenmerken van Diestiaan ijzerzandsteen te bekomen.

Tabel 2. Minimum, maximum en gemiddelde geluidssnelheid (m/s) in functie van de geschiktheidsklasse.

Klasse	Geluidssnelheid (m/s)		
	minimum	gemiddelde	maximum
I	471.4	2005.9 ± 588.6	3538.8
I-II	452.5	1590.0 ± 637.8	2819.6
II	198.2	1599.5 ± 521.8	2757.5



Figuur 11. Resultaten van de geluidssnelheidsmetingen uitgevoerd op ijzerzandsteen kernen van geschiktheidsklasse I tot en met II (Y-as = aantal meetwaarden).

## 4. Petrografische studie

De gedetailleerde beschrijving van de methodiek en de bespreking van de resultaten van de petrografische studie van de ijzerzandsteen zijn opgenomen in bijlage III *Petrografische studie*. De modelfiches waarin de petrografische kenmerken van de individuele fragmenten zijn beschreven zijn gebundeld in bijlage IV *Petrografische beschrijvingen per slijpplaatje*.

De petrografische studie werd uitgevoerd aan de hand van een microscopische analyse van het slijpplaatje en omvat een beschrijving van de kenmerken van de zandfractie, het cement tussen de zandkorrels, de intergranulaire porositeit en de globale homogeniteit van het staal.

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 de onderzochte stalen en dit volgens een indeling in 3 categorieën: zwak, matig en goed geconsolideerde zandsteen. De indeling in 3 categorieën moet semi-kwantitatief beschouwd worden omdat deze enkel op visuele waarnemingen/schattingen van slijpplaatjes berust. De stalen zijn homogeen verspreid over deze 3 categorieën wat het resultaat is van de gerichte selectie van verschillende kwaliteiten aan ijzerzandsteen.

Op basis van de petrografische studie kunnen volgende bevindingen worden 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 (minstens 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 kenmerken die zich hier tussenin bevinden.
- 2) Omdat het cement de poriënruimte vult, daalt de macroporositeit bij toenemend cementgehalte en bijgevolg toenemende consolidatiegraad (poriën groter dan ca. 100 µm). Zowel de totale macroporositeit, de gemiddelde grootte van de macroporiën alsook de connectiviteit tussen de macroporiën nemen af met toenemende consolidatiegraad.
- 3) IJzerzandsteen wordt doorgaans gekenmerkt door de aanwezigheid van middelgrof zand.
- 4) Het zand bevat grotendeels kwarts- en glauconietkorrels. Andere mineralen komen slechts sporadisch voor. Het zand van een ruime meerderheid (2/3) van de stalen wordt gekenmerkt door een kwarts/glauconiet verhouding van ca. 3:2. De resterende groep stalen bevat doorgaans en bij benadering een gelijke hoeveelheid aan kwarts en glauconiet.
- 5) De verweringsgraad van het glauconiet varieert van weinig, 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.

Voornamelijk grotere glauconietkorrels lijken aangetast te worden. Hierbij moet rekening gehouden worden met het feit 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 kwarts, uit erosiemateriaal van het continent, en gevormd tijdens vroegere geologische periodes.

Het cement komt in verschillende vormen voor. Op basis van de kleur bepaald aan de hand van een microscopische analyse van het slijpplaatje onder doornvallend licht kunnen twee types cement herkend worden: een donker en een helder.

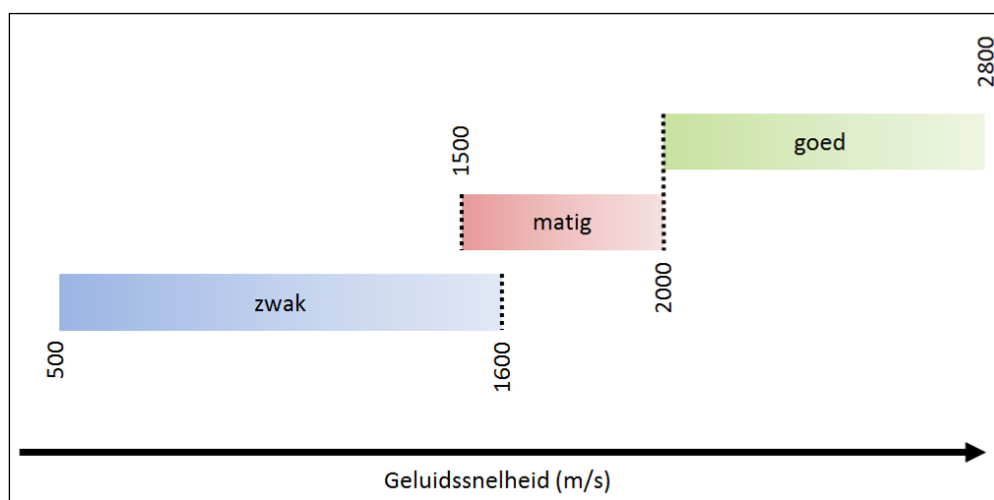
Het donker cement is het meest voorkomend. In het kader van dit onderzoek wordt het donker cement als limoniet omschreven. Dit is een eerder vage term die verwijst naar een mengeling van ijzeroxiden en hydroxiden zonder meer informatie te geven over de zuiverheid, de exacte chemische en mineralogische samenstelling, de kristalliniteitsgraad en het eventueel 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 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.

Uit de petrografische studie kan worden afgeleid dat de in situ beschrijving van de geschiktheidsklasse als bouwsteen een ruwe maar toch redelijk betrouwbare indicatie van de consolidatiegraad geeft. Helemaal sluitend is deze beoordeling evenwel niet, daar een minderheid aan stalen gekenmerkt door een zwakke consolidatiegraad behoort tot geschiktheidsklasse I. Ook de vergelijking van de consolidatiegraad met de geluidssnelheid levert eenzelfde tendens op, zonder volledig exclusief te zijn in de beoordeling van de consolidatiegraad. Enkele verklaringen voor de waargenomen afwijkingen kunnen worden geformuleerd: i) gezien de eerder geringe afmetingen is een slijpplaatje niet altijd representatief, zeker voor erg heterogene ijzerzandsteen, ii) voor de stalen genomen langs de randen van de ijzerzandsteenbanken is de toegeschreven geluidssnelheidswaarde een ruwe schatting bepaald op basis van resultaten van de dichtstbijzijnde metingen en iii) de visuele waarnemingen/schattingen op basis van slijpplaatjes zijn per definitie semi-kwantitatief. Toch kan een klasse-indeling voor de consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid voorgesteld worden (Figuur 12).



*Figuur 12. Klasse-indeling voor de consolidatiegraad bepaald op basis van microscopische cementanalyse en overeenkomstige geluidssnelheidsintervallen.*

## 5. Beschrijving van de bouwmechanische en de bouwfysische kenmerken

### 5.1. Evaluatie van de hardheid en de mogelijkheid tot steenversteving

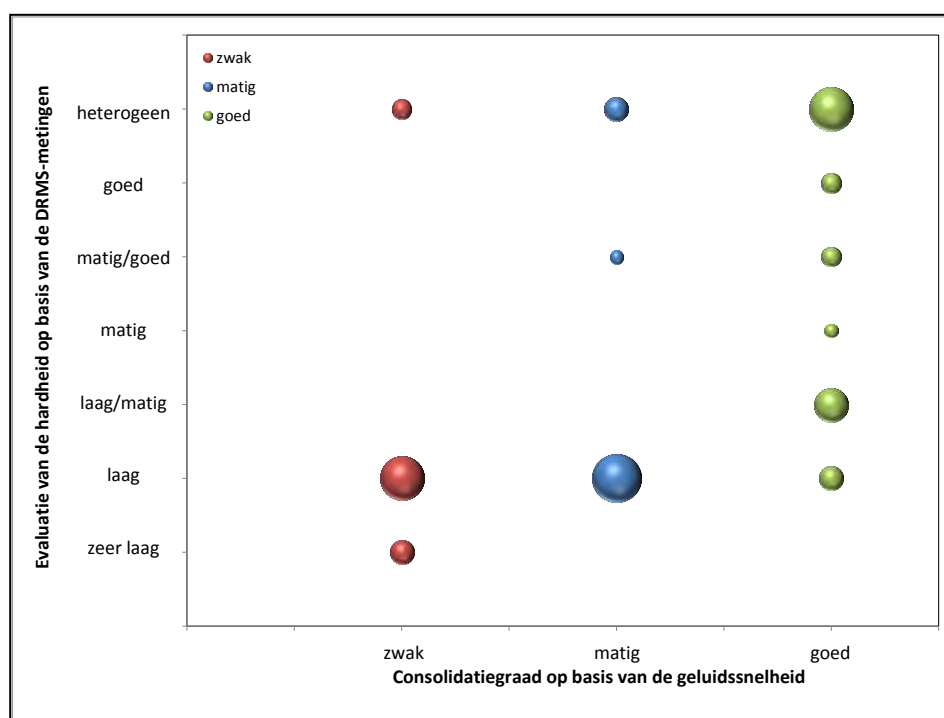
De methodiek voor de bepaling van de hardheid van ijzerzandsteen en van het effect van een steenverstevende behandeling met ethylsilicaat (ETOS) en de betreffende resultaten zijn beschreven in bijlage V *Evaluatie van de hardheid en het effect van een steenverstevende behandeling*.

Op basis van de hardheidsmetingen worden 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 (Figuur 12), met de algemene hardheidskenmerken bekomen door middel van de DRMS-metingen (Figuur 13) 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 gekenmerkt wordt door een heterogene hardheid.

In drie gevallen wordt een hoge geluidssnelheid bekomen, en bijgevolg een goede consolidatiegraad, terwijl de resultaten van de DRMS-metingen wijzen op een lage hardheid.

Een beoordeling van de consolidatiegraad van de ijzerzandsteen op basis van zijn hardheid afgeleid uit DRMS-metingen is dan ook slechts ten dele betrouwbaar.



Figuur 13. Vergelijking van de consolidatiegraad, afgeleid uit de resultaten van de geluidssnelheid, met de hardheid op basis van DRMS-metingen.

De steenverstevende behandeling werd beoordeeld op basis van een vergelijking van de hardheidsprofielen voor en na proefbehandeling, de productopname en het percentage aan droge stof. Het polymerisatieproces van ethylsilicaat (TEOS) werd 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. De hoeveelheid aan uitgeharde SiO<sub>2</sub>-gel, gevormd na polymerisatie, wordt geëvalueerd op basis van het percentage aan droge stof dat in de ijzerzandsteen werd afgezet.

Een (mogelijk) steenverstevigend effect wordt waargenomen voor ongeveer de helft van de behandelde stalen. De diepte van het verstevigend effect varieert sterk, van 1 tot 12 mm. De gemiddelde diepte van de verstevige zone bedraagt slechts 4 mm.

De gemiddelde hoeveelheid steenverstevigend product opgenomen door middel van capillaire absorptie bedraagt per behandeling  $1.68 \pm 1.10$  l/m<sup>2</sup> (100 % oplossing). De hoeveelheid aan geabsorbeerd product varieert echter sterk voor de verschillende stalen als gevolg van de sterke heterogeniteit van de ijzerzandsteen.

Op basis van de FTIR-analyse werd besloten om de DRMS metingen minstens anderhalve maand na de laatste behandeling uit te voeren om een zo goed als volledige polymerisatie van de actieve bestanddelen van TEOS te bekomen.

Voor elk staal is het percentage droge stof, afgezet in de ijzerzandsteen, lager dan theoretisch bepaald op een inerte drager. Deze lagere waarden zijn deels te verklaren door een gewichtsverlies als gevolg van het verkruimelen van de stalen en deels door een gereduceerde polymerisatiesnelheid zodat meer vluchtige TEOS-bestanddelen kunnen verdampen.

Voor geen enkele site wordt een direct verband bekomen tussen verbruik/percentage droge stof en het verstevigend effect. 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. Voor zover de eigenschappen van een verstevigende behandeling uitgevoerd op de gelichte stalen vergelijkbaar zijn met deze bekomen op stalen die onderworpen zijn aan een natuurlijke veroudering, wordt in geval van verwerking gemiddeld een positief verstevigend effect verwacht op ijzerzandsteen typerend voor Pellenberg en Diest, en in mindere mate Rotselaar. Deze verschillen in functie van de herkomst van de ijzerzandsteen kunnen momenteel niet worden verklaard.

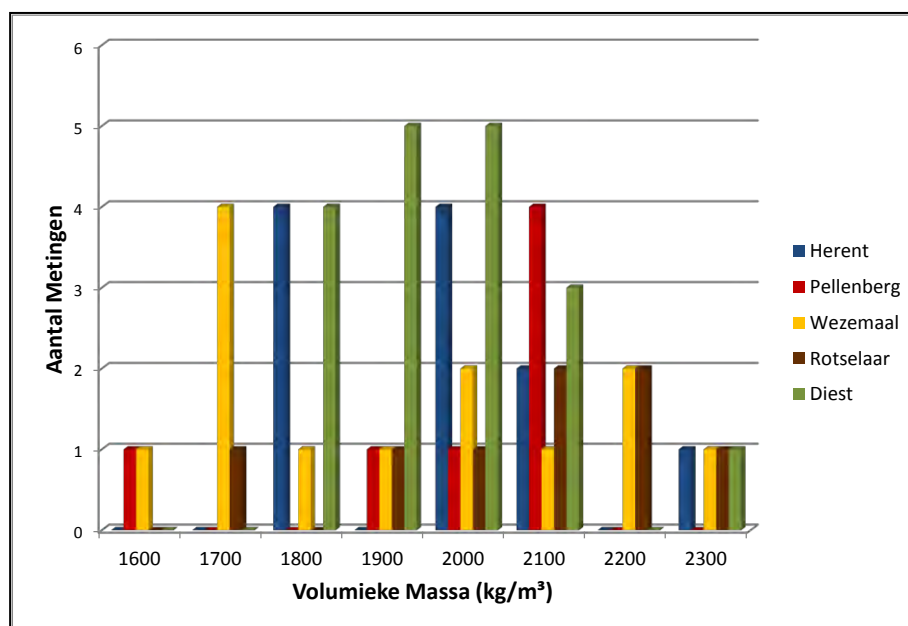
Wat de invloed van de aard van de behandeling betreft (het gebruik van een 100% of een tot 75% verdunde oplossing en het aantal behandelingen), kan worden gesteld dat minder positieve resultaten worden bekomen in geval van een 75 % product. Bij toepassing van deze laatste oplossing wordt evenwel een duidelijke invloed opgemerkt van het aantal behandelingen op het verstevigend effect. Drie behandelingen verhogen merkkelijk het aandeel aan stalen dat een verstevigend effect vertoont in vergelijking met de toepassing van slechts 2 behandelingen. Een gelijkaardige invloed wordt niet bekomen voor het 100% product.

## 5.2. Evaluatie van de schijnbare volumieke massa en porositeit

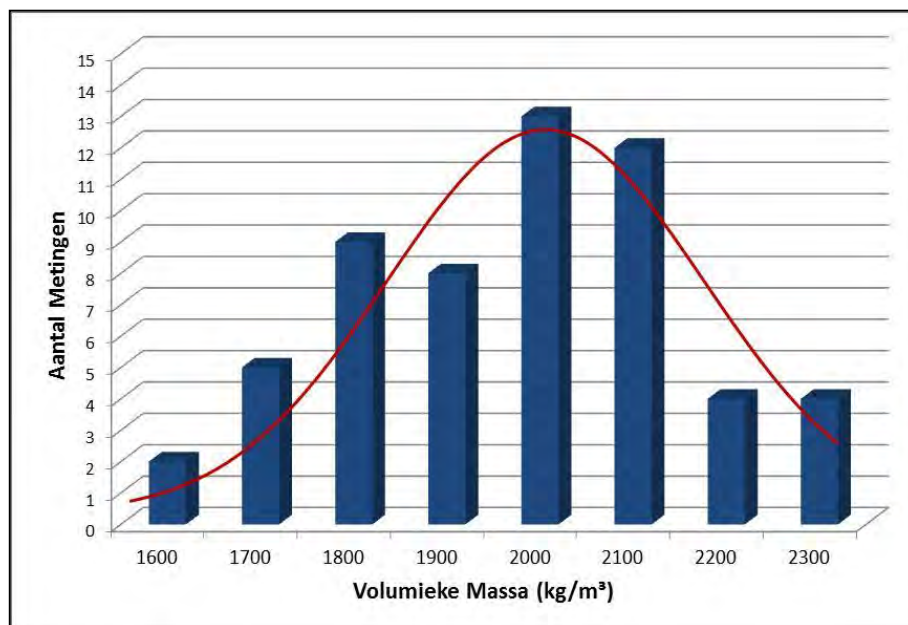
### 5.2.1. Schijnbare volumieke massa

Een overzichtstabel met de resultaten van de volumieke massa ( $\rho_b$ ) is opgenomen in bijlage VI *Schijnbare volumieke massa*. De volumieke massa van de ijzerzandsteen werd bepaald zowel op de proefstukken bestemd voor de evaluatie van de druksterkte als op deze voor de evaluatie van de vorstbestendigheid. De proeven werden uitgevoerd door het WTCB. De beschrijving van de methodologie, de gevolgde normering en de proefresultaten zijn toegevoegd aan bijlage IX *Vorstbestendigheid*.

De volumieke massa van ijzerzandsteen, afgeleid uit 58 proefstukken, varieert van 1670 tot 2410 kg/m<sup>3</sup> met een gemiddelde waarde van 2070 ± 179 kg/m<sup>3</sup>. De spreiding op de resultaten is voor de verschillende sites weergegeven in Figuur 14. Met uitzondering van de stalen gelicht aan de Langenberg, kan worden opgemerkt dat de volumieke massa van de stalen onregelmatig verspreid is over de respectievelijke intervallen. Dit is logisch gezien de stalen bewust geselecteerd werden op basis van verschillen in visuele consolidatiegraad en gemiddelde geluidssnelheid. Deze conclusie geldt tevens voor alle overige materiaalkenmerken, zodat verder geen individuele spreiding van de resultaten per site wordt besproken. Enkel een globale evaluatie van de spreiding op de resultaten toepasbaar voor het geheel van de onderzochte sites zal nog worden opgemaakt (Figuur 15).



Figuur 14. Spreiding van de volumieke massa van de ijzerzandsteen, opgedeeld per site.



Figuur 15. Spreiding van de volumieke massa van ijzerzandsteen ( $n = 58$ ). De gemiddelde volumieke massa bedraagt  $2070 \pm 179 \text{ kg/m}^3$ . De rode curve geeft de bijhorende Gaussiaanse verdeling weer.

### 5.2.2. Totale watertoegankelijke porositeit

Een overzichtstabel met de waarden van de totale watertoegankelijke porositeit ( $p_0$ ) is opgenomen in bijlage VII *Porositeit*. De totale porositeit werd bepaald op dezelfde proefstukken waarvan de volumieke massa werd bepaald. De beschrijving van de methodologie, de gevolgde normering en de proefresultaten zijn toegevoegd aan de bijlage IX *Vorstbestendigheid*.

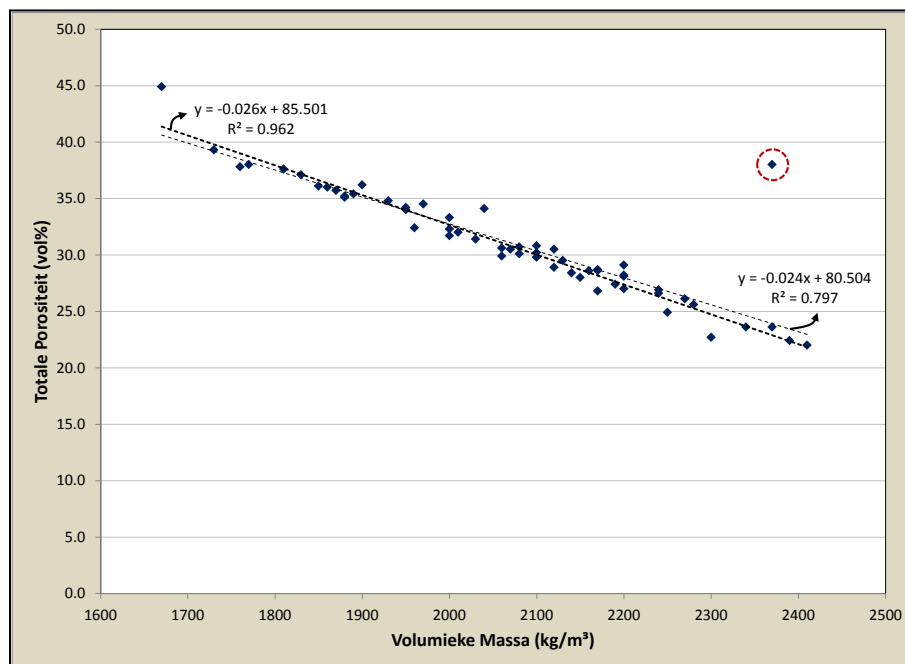
De totale porositeit van de 58 geanalyseerde proefstukken ijzerzandsteen varieert van 22.0 tot 44.9 vol%, met een gemiddelde waarde van  $31.1 \pm 4.8 \text{ vol\%}$ .

Uit de vergelijking van de resultaten van de schijnbare volumieke massa met deze van de totale watertoegankelijke porositeit kan een lineair verband worden afgeleid. Voor relatief homogene materialen is een dergelijk verband te verwachten: hoe meer poriën in een materiaal, hoe groter de open ruimte en bijgevolg hoe lager de densiteit. Bij ijzerzandsteen zou men echter kunnen verwachten dat een dergelijke correlatie aanzienlijk minder uitgesproken is, gezien de zeer grote variatie in samenstelling en structuur. Ijzerzandsteen is immers opgebouwd uit verschillende bestanddelen (kwarts, glauconiet, limoniet, etc.) met elk een eigen kenmerkende densiteit.

Verrassend genoeg blijkt de correlatie tussen beide grootheden bijzonder goed (Figuur 16). Over alle meetresultaten samen wordt een correlatiecoëfficiënt bij lineaire regressie van 79.7% bekomen. Een meting van de Middelberg te Rotselaar (staal R2/1, rood omcirkeld in Figuur 16) vertoont evenwel een zeer sterk afwijkend resultaat. Wanneer dit meetpunt uit de data verwijderd wordt, wordt een zeer goede lineaire correlatie bekomen (correlatiecoëfficiënt 96.2%). Een duidelijke conclusie hier is dat beide materiaaleigenschappen nagenoeg volledig inwisselbaar zijn.

Volgende conversieformule kan daartoe vooropgesteld worden:

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

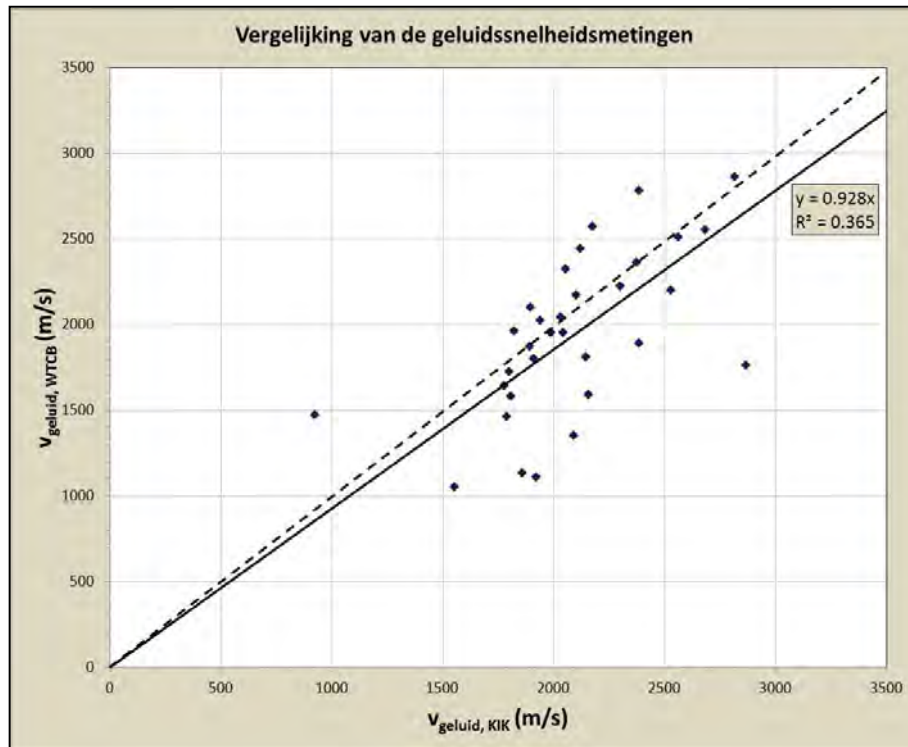


Figuur 16. Correlatie tussen de volumieke massa ( $\text{kg/m}^3$ ) en totale watertoegankelijke porositeit (vol%) bepaald door middel van vacuümsaturatie ( $n = 58$ ).

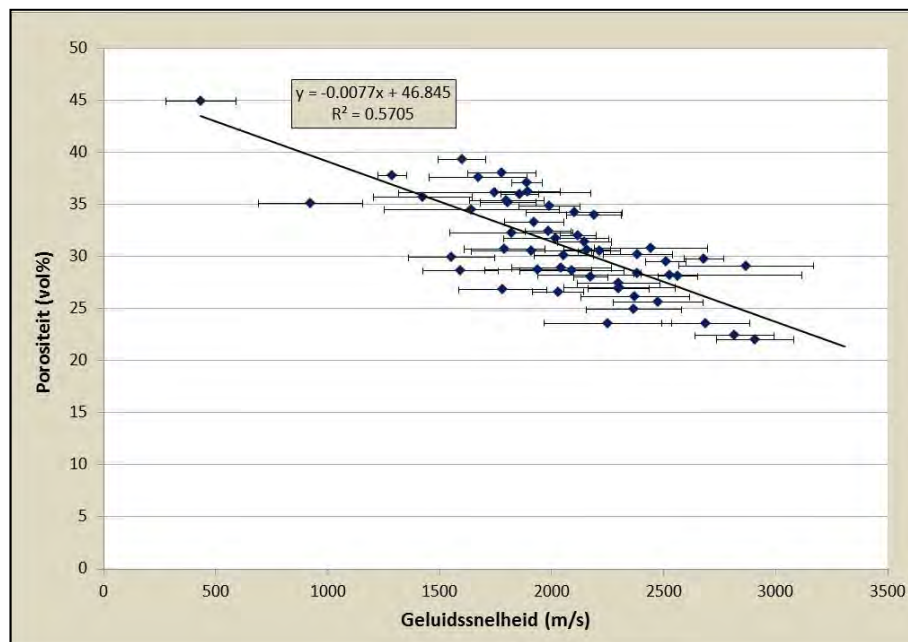
Intuïtief dient een correlatie te bestaan tussen enerzijds de geluidssnelheid en anderzijds de schijnbare volumieke massa, en bijgevolg de totale watertoegankelijke porositeit. Ervaring leert dat de geluidssnelheid in een steen zal toenemen met toenemende compactheid en densiteit. Deze relatie is des te meer uitgesproken voor steensoorten gekenmerkt door een grote homogeniteit. De aanwezigheid van korsten, holtes en scheuren in ijzerzandsteen zal evenwel aanleiding geven tot een aanzienlijke daling van de voortplantingssnelheid van de geluidsgolven, terwijl de invloed op de gemiddelde dichtheid van het proefstuk in verhouding minder belangrijk is.

De vergelijking van de geluidssnelheid met de totale porositeit is hier gebaseerd op de gemiddelde geluidssnelheid bekomen op het betreffende fragment van de boorkernen ( $v_{\text{geluid, KIK}}$ ). De geluidssnelheidsmetingen werden door het WTCB op een vereenvoudigde wijze uitgevoerd, waarbij per verzaagd proefstuk slechts één meting werd gerealiseerd ( $v_{\text{geluid, WTCB}}$ ). De vergelijking van de resultaten bekomen volgens deze twee methodes toont aan dat de correlatie tussen  $v_{\text{geluid, KIK}}$  en  $v_{\text{geluid, WTCB}}$  gering is (Figuur 17). De correlatiecoëfficiënt tussen de statistisch benaderde geluidssnelheid ( $v_{\text{geluid, KIK}}$ ) en de totale porositeit bedraagt 57.1% (Figuur 18) terwijl in het geval van solitaire metingen ( $v_{\text{geluid, WTCB}}$ ) de correlatie opmerkelijk lager is (25.8%). Voor de verdere evaluatie werd dan ook de gemiddelde geluidssnelheid, bepaald zoals beschreven in bijlage II *Geluidssnelheidsmetingen*, gebruikt.

Uit de correlatie tussen de gemiddelde geluidssnelheid en de totale watertoegankelijke porositeit, weergegeven in Figuur 18, kan worden afgeleid dat naarmate de porositeit daalt, de gemiddelde geluidssnelheid toeneemt. De correlatie van 57.1 % is niet uitstekend, maar toch significant. De correlatie wordt ongetwijfeld beïnvloed door de spreiding op de waarden van de geluidssnelheid zoals blijkt uit de grafiek.



Figuur 17. Vergelijking van de geluidssnelheid bepaald op basis van een statistisch gemiddelde van metingen uitgevoerd op boorkernen ( $v_{\text{geluid, KIK}}$ ) met de solitaire meetwaarden bepaald op de verzaagde proefstukken ( $v_{\text{geluid, WTCE}}$ ). De correlatie tussen beide meetresultaten is laag.



Figuur 18. Correlatie tussen de gemiddelde geluidssnelheid (m/s) en de totale porositeit (vol%). De horizontale foutenbalken geven de spreiding op de geluidssnelheidsmetingen weer ( $n = 58$ ).

### 5.2.3. Poriënverdeling

Noch de volumieke massa, noch de totale porositeit zijn eigenschappen die rechtstreeks gelinkt worden aan de kwaliteit van een natuursteen. Algemeen bestaat soms wel de voorkeur om bij steenvervanging minstens materiaal met een enigszins gelijkaardig capillair gedrag als dit van de omringende stenen te gebruiken. Om het capillair gedrag van de natuursteen te beschrijven is niet zozeer de totale porositeit van belang, maar eerder de poriënstructuur. Een overzicht van de verdeling van de poriëndiameter bepaald door middel van kwikinrusie (Mercury Intrusion Porosimetry, MIP) is opgenomen in bijlage VII *Porositeit*.

Uit de resultaten van de poriënstructuur van ijzerzandsteen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad worden gelijkaardige bevindingen afgeleid als deze bekomen uit de petrografische studie (bijlage III *Petrografische studie*), met name dat gemiddeld gezien de totale porositeit afneemt met toenemende consolidatiegraad. Goed geconsolideerde ijzerzandsteen wordt gemiddeld gekenmerkt door een laag poriënvolume. Er wordt evenwel een duidelijk continuüm waargenomen tussen de verschillende consolidatiegraden van ijzerzandsteen, waarbij de maximale enveloppecurve voor een zwakker geconsolideerde ijzerzandsteen overlapt met de minimale enveloppecurve voor een iets beter geconsolideerde ijzerzandsteen (Figuur 19).

De daling van de totale porositeit voor goed geconsolideerde ijzerzandsteen komt overeen met (Figuur 20) 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).

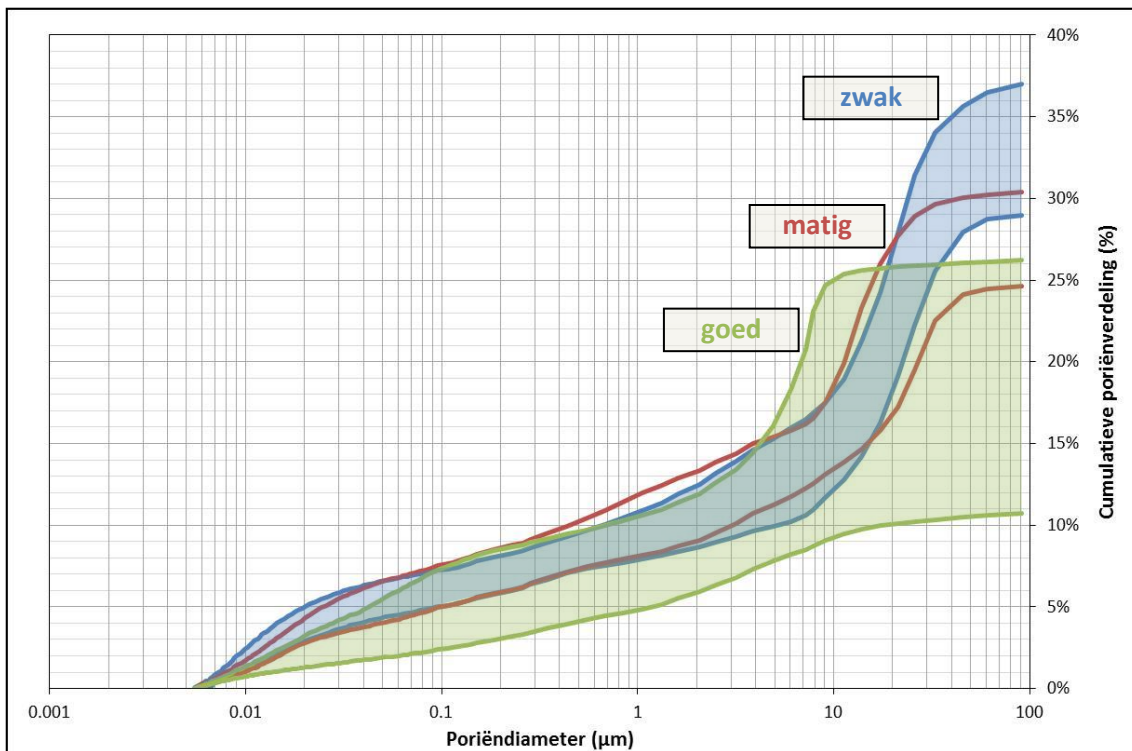
Voor deze kenmerken zijn in de literatuur gegevens te vinden om de mogelijke vorstbestendigheid van natuursteen in te schatten. Natuursteen met een aandeel aan microporositeit lager dan 30% kan over het algemeen als duurzaam omschreven worden, terwijl het risico op vorstschade voor natuursteen met een aandeel aan microporositeit hoger dan 90% en/of een  $d_{10}$ -waarde lager dan 2.5  $\mu\text{m}$  als belangrijk kan worden beschouwd (Ingham, 2008)<sup>4</sup>. Met een gemiddelde microporositeit tussen 42.9 en 56.3 vol% kunnen 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 gelegen tussen 23.5 en 41.2  $\mu\text{m}$  en bijgevolg boven de vermelde limietwaarde waardoor het risico op vorstschade als verwaarloosbaar zou mogen beschouwd worden.

Op basis van deze resultaten kan worden vastgesteld dat zowel voor zwak, matig als goed geconsolideerde Diestiaan ijzerzandsteen een redelijke vorstbestendigheid mag worden verwacht. Dit resultaat is echter gebaseerd op de gemiddelde waarden. Individuele resultaten kunnen hiervan sterk afwijken. Het valt immers op dat enkele stalen (D6/1, D13/3B en D5/1B) van goed geconsolideerde ijzerzandsteen zowel een hoge microporositeit als een lage  $d_{10}$ -waarde vertonen. Hoewel de waarden de kritische waarden vermeld in de literatuur niet overschrijden, is het wel duidelijk dat het risico op vorstschade voor deze stalen hoger moet zijn dan gemiddeld genomen. Tot slot dient hierbij opgemerkt te worden dat de evaluatie enkel gebaseerd is op een studie van de stalen gelicht aan de Langenberg te Diest, waarbij geen zeer extreme waarden worden verwacht. Het materiaal is hier immers vermoedelijk gelicht uit 1 tot max. 3 coherente steenbanken, waarvoor de spreiding op de diverse materiaaleigenschappen relatief gering is in vergelijking tot de totaliteit van het bestudeerde materiaal. Bovendien is de evaluatie van de resultaten gebaseerd op algemene

<sup>4</sup> Ingham J.P., 2008. Predicting the frost resistance of building stone. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 38, 387-399.



literatuurwaarden waarvan de relevantie met betrekking tot een heterogene, eerder complex samengestelde ijzerzandsteen in vraag kan gesteld worden.



Figuur 19. Minimale en maximale enveloppecurves van de cumulatieve porositeit (vol%) in functie van de poriënverdelingen voor zwak, matig en goed geconsolideerde ijzerzandsteen.

	Totale porositeit (%)	Micro-porositeit (%)	D <sub>10</sub> (µm)	Kritische diameter (µm)
<b>ZWAK</b>	31.6	42.9	41.2	23.3
	↘ 9.5%	↗ 8.6%	↘ 15.3%	↘ 11.2%
<b>MATIG</b>	28.6	46.6	34.9	20.7
	↘ 39.6%	↗ 31.2%	↘ 43.0%	↘ 38.6%
	↘ 33.2%	↗ 20.8%	↘ 32.7%	↘ 30.9%
<b>GOED</b>	19.1	56.3	23.5	14.3

Figuur 20. Gemiddelde waarden voor de totale porositeit (vol%), het aandeel aan poriën kleiner dan 5 µm gerelateerd aan de totale porositeit (microporositeit, in %), de gemiddelde poriëndiameter waarvoor 10% van de poriën bij kwikintrusie worden gevuld (d<sub>10</sub>, in µm) en de poriëndiameter overeenkomende met de steilste helling in de curve van de cumulatieve porositeit in functie van de poriënverdeling (kritische diameter, in µm) voor zwak, matig en goed geconsolideerde ijzerzandsteen.

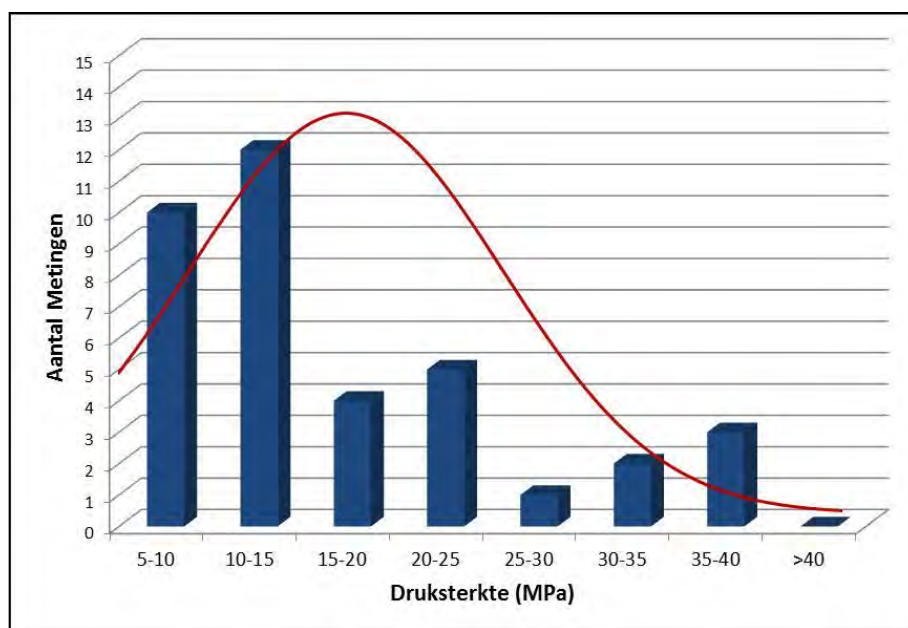
### 5.3. Evaluatie van de druksterkte

Een overzichtstabel met de resultaten van de druksterkte is opgenomen in bijlage VIII *Druksterkte*. De drukproeven werden uitgevoerd door het WTCB. De methodologie, de gevolgde normering en de proefresultaten zijn beschreven in deze bijlage.

De druksterkte van de 37 geanalyseerde stalen ijzerzandsteen varieert van 2.1 tot 37.2 MPa, met een gemiddelde waarde van  $14.0 \pm 9.9$  MPa. De spreiding op de resultaten is, zoals kon worden verwacht gezien de heterogene kenmerken, zeer groot.

De globale verdeling van de resultaten van de druksterkte is weergegeven in Figuur 21. Er werd, met uitzondering van de Langenberg te Diest, geen specifieke opdeling opgemaakt per site daar dit weinig relevant is omdat i) het aantal stalen beproefd op druksterkte per site te laag is om een statistische evaluatie uit te voeren en ii) een brede spreiding in druksterkte optreedt als gevolg van de gerichte selectie van de proefstalen. De gemiddelde waarde van de druksterkte voor de ijzerzandsteen in dit onderzoek geeft bijgevolg een verkeerd beeld gezien een overwicht aan stalen met een lage druksterkte. Beduidend minder dan de helft van het aantal stalen (40%) vertoont een druksterkte van minstens 15 MPa. Ijzerzandsteen met een hoge druksterkte ( $> 30$  MPa) is daarentegen eerder zeldzaam.

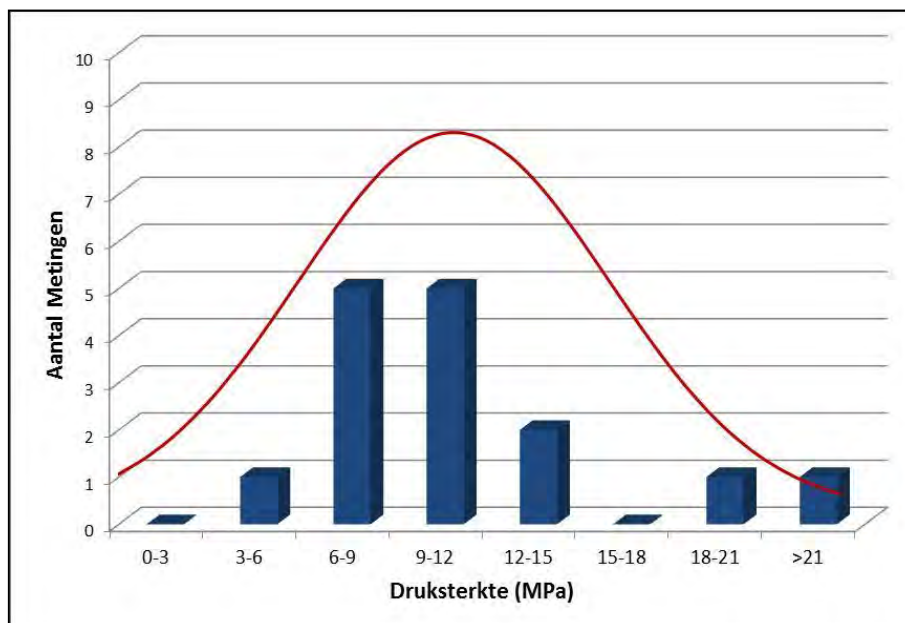
Men dient derhalve enige voorzichtigheid te hanteren bij de algemene beoordeling van de druksterkte voor ijzerzandsteen.



*Figuur 21. Spreiding van de druksterkte van ijzerzandsteen (n = 37). De gemiddelde druksterkte bedraagt  $14.1 \pm 9.8$  MPa. De rode curve geeft de bijhorende Gaussiaanse verdeling weer.*

Van de verschillende sites kan enkel voor de site Langenberg een statistische evaluatie van de druksterkte uitgevoerd worden, daar het aantal stalen beproefd op druksterkte voor die locatie 15 is en dus voldoende voor een statistische benadering. Het resultaat is geïllustreerd in Figuur 22. De gemiddelde druksterkte bedraagt  $11.3 \pm 5.2$  MPa. Globaal genomen wordt de ijzerzandsteen aangetroffen in de ontsluiting aan de Langenberg te Diest bijgevolg gekenmerkt door een behoorlijke druksterkte die de inzet ervan in de meest voorkomende dragende structuren verantwoordt. Uitschieters naar zowel zeer lage als zeer hoge waarden zijn eerder zeldzaam. Voor zover het bestudeerde materiaal representatief is voor het geheel van de steenbanken, is ijzerzandsteen van de Langenberg te Diest doorgaans niet geschikt voor sterk belaste dragende elementen, bvb kolommen of gewelvbogen.





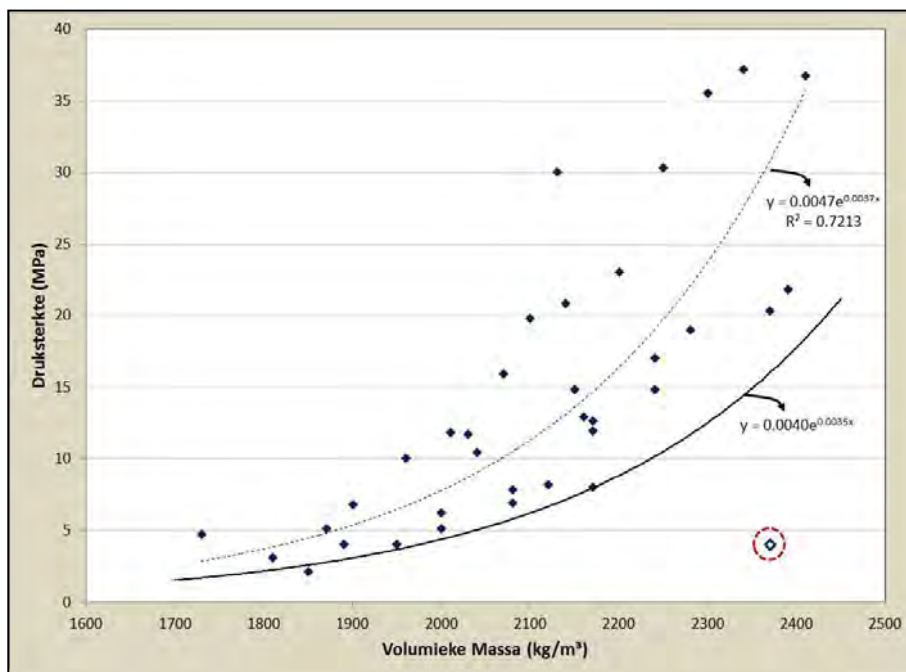
*Figuur 22. Spreiding van de druksterkte van ijzerzandsteen voor de boorkernen gelicht aan de Langenberg te Diest (n = 15). De gemiddelde druksterkte bedraagt 11.1 ± 5.2 MPa. De rode curve geeft de bijhorende Gaussiaanse verdeling weer. Let op de verschillende schaal in vergelijking met deze van Figuur 21.*

Intuïtief kan men veronderstellen 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 limonietkorsten 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, zal dit aanleiding geven tot een eerder zwak verband tussen beide grootheden. Dat blijkt ook uit de evaluatie van de meetresultaten. 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 23). Het verband tussen densiteit en druksterkte lijkt eerder gekenmerkt door een exponentieel verloop. Bij de evaluatie van de meetresultaten valt opnieuw op dat het meetpunt R2/1 ver buiten de puntenwolk gelegen is (rood omcirkeld). Dit meetresultaat werd dan ook verder niet in rekening gebracht.

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

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

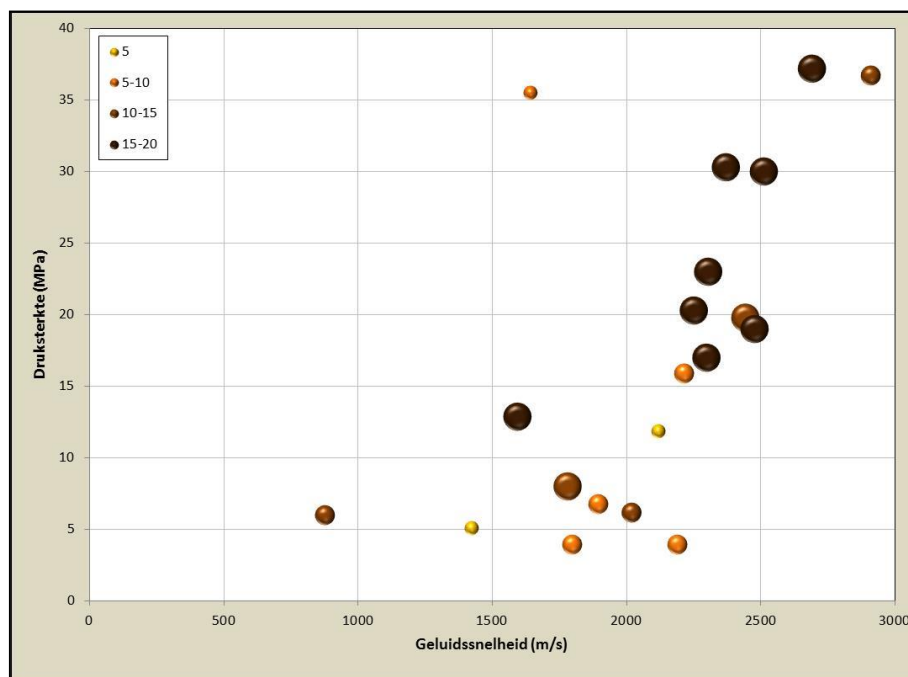
Alle meetwaarden liggen immers boven deze curve (Figuur 23). Uitgaande van de volumieke massa kan men derhalve een ondergrens bepalen voor de te verwachten druksterkte. De werkelijke druksterkte zal dan in elk geval hoger dan deze waarde zijn. Dit is een veilige inschatting. Het nadeel van deze benadering is evenwel dat heel wat ijzerzandsteen op het vlak van druksterkte bijgevolg te laag wordt ingeschat en hierdoor eventueel onderbenut blijft.



Figuur 23. Correlatie tussen de volumieke massa ( $\text{kg/m}^3$ ) 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.

Een vergelijking van alle resultaten toont aan dat er ook een verband kan gelegd worden tussen de mineralogische kenmerken, zoals beschreven op basis van de petrografische analyse in bijlage III *Petrografische studie*, en de druksterkte. Er is een positieve correlatie merkbaar tussen de consolidatiegraad (bepaald op basis van het cementgehalte en de globale verdeling van het limonietcement) en de druksterkte van ijzerzandsteen (Figuur 24). 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.

Eén staal valt hierbij evenwel uit de toon, met name het staal R1/2 dat een goed geconsolideerde ijzerzandsteen betreft met een hoog cementgehalte (15-20%) en een continue limonietneerslag rondom de zandkorrels (Figuur 24). Dit fragment wordt gekenmerkt door zowel een lage geluidssnelheid als een lage druksterkte (13 Mpa), lager dan de gemiddeld te verwachten. Het petrografisch onderzoek heeft echter uitgewezen dat dit staal microscheuren vertoont, vermoedelijk als gevolg van reeds aanwezige vorstschade in de ijzerzandsteen (vorstschade die vermoedelijk dateert van het einde van de laatste ijstijd toen de bovenste lagen van de ijzerzandsteenbanken 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. Het verband tussen de mineralogische beschrijving en de druksterkte wordt derhalve onderschreven.



Figuur 24. Vergelijking tussen de gemiddelde geluidssnelheid (m/s), de druksterkte (MPa) en de mineralogische 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 ijzerzandsteen.

Ondanks een laag gehalte aan en een discontinue neerslag van het limonietcement vertonen enkele stalen ijzerzandsteen toch een hoge druksterkte. Dit is uitgesproken het geval voor staal W3/7 (gemiddelde geluidssnelheid 1642 m/s en druksterkte 35.5 MPa). Hoewel de stalen nauwgezet geselecteerd waren, was het noodzakelijk het staal voor petrografisch onderzoek te lichten aan de randen van de kern bestemd voor het uitvoeren van de drukproef. Zeker in geval van heterogene kernen 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.

#### 5.4. Evaluatie van de vorstbestendigheid

Een overzichtstabel met de resultaten van de vorstbestendigheid is opgenomen in bijlage IX *Vorstbestendigheid*. De proeven werden uitgevoerd door het WTCB. De methodologie, de gevolgde normering en de proefresultaten zijn beschreven in deze bijlage.

De vorstbestendigheid van de ijzerzandsteen werd experimenteel bepaald volgens de Europese norm NBN EN 12371. Deze norm beschrijft de uitvoering van een reeks vorst-dooi cycli op met water verzadigde proefstukken. Na een bepaalde reeks van cycli worden de proefstukken visueel beoordeeld op schade en wordt de dynamische elasticiteitsmodulus bepaald. Daar de afmetingen van de proefstukken niet aan de norm beantwoordden, werd de dynamische elasticiteitsmodulus afgeleid uit de geluidssnelheid ( $v_{\text{geluid, WTCB}}$ ).

In principe worden de vorst-dooi cycli herhaald tot er 'breuk' van het monster optreedt. Een steen wordt beschouwd als 'gebroken' indien aan één van volgende voorwaarden voldaan is:

- wanneer de visuele beoordeling van de schade een waarde 3 bereikt. 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 mm<sup>2</sup>.

- wanneer de vermindering van dynamische elasticiteitsmodulus groter dan of gelijk is aan 30% ( $-\Delta E > 30\%$ ).
- wanneer de vermindering van het schijnbare volume groter is dan 1%. In de praktijk wordt dit criterium momenteel niet meer gehanteerd, omdat het uit ervaring ondergeschikt is gebleken aan de vorige twee criteria. Het is tot hiertoe nooit bepalend geweest om de vorstbestendigheid te beoordelen.

Indien een proefstuk faalt vanaf een aantal vries-dooi cycli wordt het voorgaande aantal behaalde en goed doorstane vorst-dooi cycli toegekend als waarde voor de vorstbestendigheid.

Het verlies aan samenhang van de ijzerzandsteen tijdens de opeenvolgende vorst-dooi cycli, voorafgaand aan het uiteindelijke falen, leidt ontegensprekelijk tot een vermindering van de geluidssnelheid en, tegelijkertijd, tot een afname van de daarvan afgeleide dynamische elasticiteitsmodulus. Alle andere factoren inherent aan de omrekening worden hierbij constant verondersteld over alle vorst-dooi cycli uitgevoerd op een bepaald proefstuk. Het beoordelingscriterium voor de vorstbestendigheid op basis van het verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus ( $-\Delta E > 30\%$ ), kan echter niet zomaar getransponeerd worden naar de waarden bepaald op basis van de geluidssnelheid. Het resultaat wordt immers bepaald door de juistheid van de omrekeningsformule (in functie van de vorm van het proefstuk) en de geschatte materiaaleigenschappen alsook van de verandering van deze eigenschappen als gevolg van de zich ontwikkelende vorstschade. Hoewel een verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus zal optreden, zal niet noodzakelijk een verlies van 30% of meer als criterium moeten gelden.

Ook de nauwkeurigheid waarmee de geluidssnelheid (in dit geval solitaire waarden,  $v_{\text{geluid, WTCB}}$ ) wordt bepaald speelt hier een belangrijke rol. De vergelijking van de geluidssnelheid bepaald op de proefstukken voor de vorst-dooi proeven met de statistisch benaderde waarde van de geluidssnelheid ( $v_{\text{geluid, KIK}}$ ) heeft immers aangetoond dat de spreiding op de solitaire waarden beduidend groter is. Derhalve is ook de spreiding op de waarde bepaald voor de dynamische elasticiteitsmodulus, alsook de daarvan afgeleide  $\Delta E$ -waarde voor de bepaling van de vorstbestendigheid, naar alle verwachtingen groot.

Omwille van deze beperkingen wordt verder geen belang gehecht aan de absolute waarde van de dynamische elasticiteitsmodulus. Bij gebrek aan alternatief blijft het criterium  $-\Delta E > 30\%$  ondanks alle beperkingen gehandhaafd. Hoe dan ook, de omrekening van de geluidssnelheid tot een verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus gebeurt volgens een vaste wijze, zodat  $\Delta E$  eigenlijk alleen het verlies aan geluidssnelheid reflecteert wat het gevolg is van een verlies aan samenhang van het proefstuk door een toename van de vorstschade.

Het interpretatieschema weergegeven in Tabel 3 wordt gehanteerd om resultaten van vorstbestendigheid te interpreteren in functie van de beoogde toepassing.

Tabel 3. Interpretatieschema voor de evaluatie van de vorst-dooi cycli volgens de norm NBN EN 12371

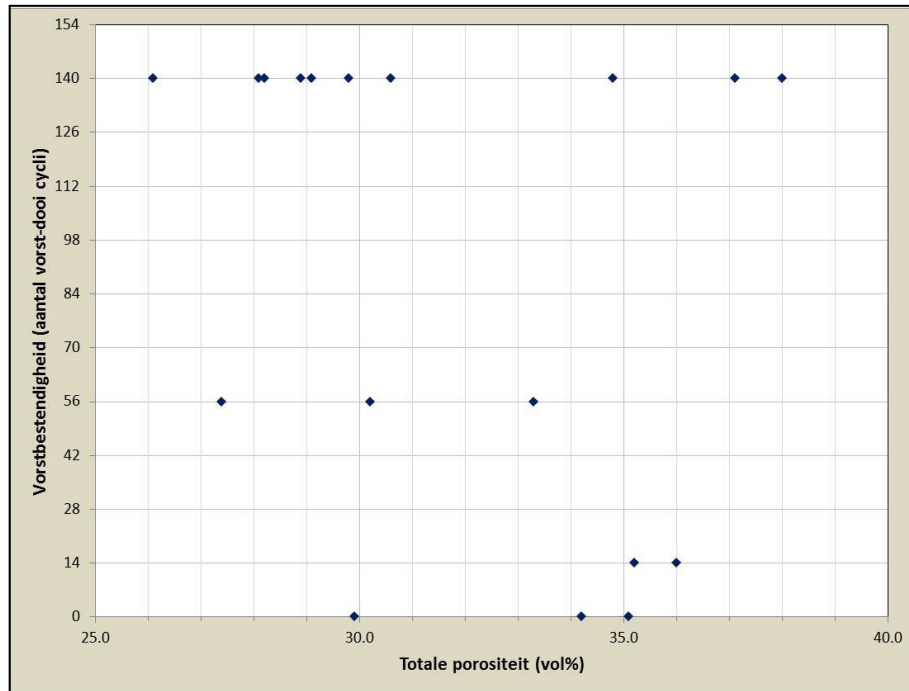
Toepassing	aantal cycli dat minimaal behaald dient te worden volgens NBN EN 12371
Bestrating en vloerbedekking	140
Elementen in contact met de grond (ook de plintzone)	140
Opgaande, niet verticale delen of delen die uit het gevelvlak springen (vensterbanken, kroonlijsten, beeldhouwwerk, balustrades,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

De vergelijking van de proefresultaten voor de vorstbestendigheid met de overige materiaaleigenschappen vertoont een zeer gevarieerd beeld. Het is niet 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. Ter illustratie wordt in Figuur 25 de vorstbestendigheid vergeleken met de totale porositeit. Tussen deze resultaten kan geen enkel verband afgeleid worden.

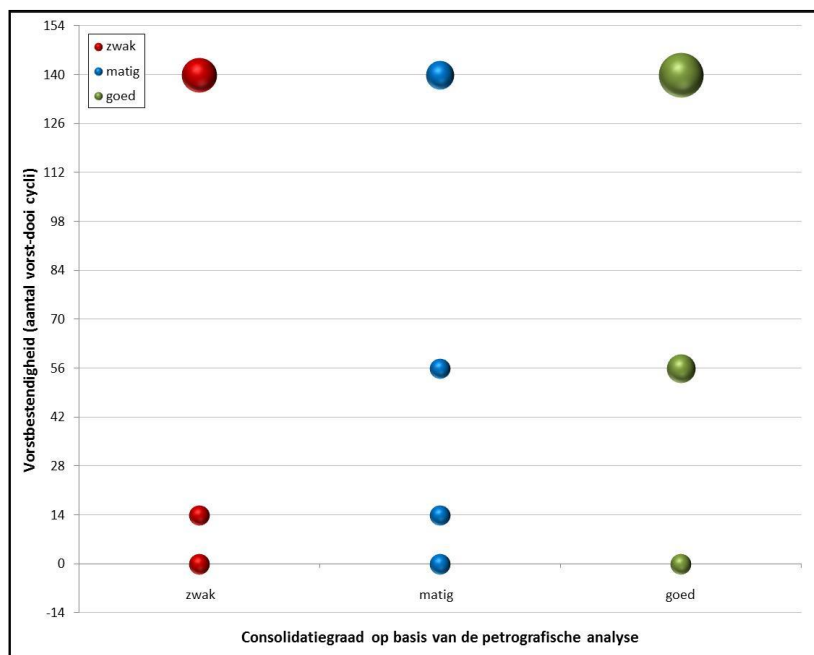
Evenmin wordt een correlatie bekomen tussen de vorstbestendigheid en de consolidatiegraad, zoals vastgelegd op basis van de petrografische analyse (Figuur 26). Sommige zwak geconsolideerde ijzerzandsteenfragmenten vertonen immers een zeer goede vorstbestendigheid, terwijl goed geconsolideerde ijzerzandstenen soms gekenmerkt worden door een zeer lage (soms zo goed als geen) vorstbestendigheid.

Daar vorstschade verband houdt met zowel de mate waarin de steen gevoelig is aan vorst als het vochtgehalte in de steen op het ogenblik dat vorst optreedt, zal de snelheid van droging en vochtopname door de ijzerzandsteen mede een belangrijke factor zijn in de evaluatie van de vorstbestendigheid. Terwijl de vorstgevoeligheid mogelijk verband houdt met de consolidatiegraad van de ijzerzandsteen, wordt de vochtbalans in de steen voornamelijk bepaald door de poriënstructuur. De vochtbalans is hierbij niet gerelateerd aan de totale porositeit, omdat dit niet indicatief is voor de mate waarin capillaire poriën aanwezig zijn.

In tegenstelling tot de eerste indicatie afgeleid uit de analyse van de verdeling van de poriëndiameter en gebaseerd op literatuurgegevens, blijkt dat een goede vorstbestendigheid geen algemeen kenmerk is van ijzerzandsteen. Alhoewel een groot deel van de geteste proefstukken een redelijke tot zeer goede vorstbestendigheid vertoont, toch wordt voor elk type consolidatiegraad vorstgevoelig ijzerzandsteenmateriaal vastgesteld. Omdat ook vorstgevoeligheid wordt afgeleid voor de stalen waarvoor de poriënstructuur werd onderzocht, is dit een aanwijzing dat op z'n minst 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 een mogelijk meer extreme verdeling van de poriëndiameter van ijzerzandsteen.



Figuur 25. Vergelijking van de totale porositeit (vol%) met de vorstbestendigheid (aantal vorst-dooi cycli tot  $-\Delta E > 30\%$ ) ( $n = 19$ ).



Figuur 26. Vergelijking van de consolidatiegraad bekomen op basis van de petrografische analyse met de vorstbestendigheid (aantal vorst-dooi cycli tot  $-\Delta E > 30\%$ ) ( $n = 19$ ). De bolgrootte is een indicatie voor het aantal stalen volgens de gegeven condities.

## 6. Technische fiche voor ijzerzandsteen

### 6.1. Vergelijking van de materiaalkenmerken van ijzerzandsteen met overige types natuursteen en beschikbare literatuurwaarden

In tabel 4 wordt een overzicht gegeven van de materiaalkenmerken van ijzerzandsteen, bekomen uit huidig onderzoek, onderzoek uitgevoerd in het verleden en literatuurgegevens, en van courant gebruikte overige types natuursteen.

*Tabel 4: Literatuurwaarden voor de gemiddelde geluidssnelheid ( $v_{geluid}$ ), volumieke massa ( $\rho_b$ ), totale porositeit ( $p_o$ ) en druksterkte ( $f_c$ ) voor enkele types natuursteen en ijzerzandsteen. Waar beschikbaar werd de gemiddelde waarde met de standaarddeviatie toegevoegd. Het getal tussen haakjes geeft het aantal proefstukken weer waarop de analyses werden uitgevoerd.*

Natuursteen	$v_{geluid}$	$\rho_b$	$p_o$	$f_c$
	(m/s)	(kg/m <sup>3</sup> )	(vol%)	(MPa)
Belgische blauwe hardsteen	5527 ±160	2689	0.31	157.9
Franse Euville Marbrier	2433	2233	15.99	27.5
Franse Massangis Roche Jaune	4419	2301	15.09	61.0
<b>Ijzerzandsteen</b>				
<b>Diestiaan</b>				
Literatuurwaarden <sup>5</sup>		2768 - 3000	22.2 - 32	
Kepkensberg (Tessenderlo) <sup>6</sup>		2212 ± 60 (21)	27.3 ± 1.5 (21)	17.0 ± 4.4 (9)
Maagdentoren (Zichem) <sup>7,8</sup>	1896 ± 742 (2)	2049 ± 16 (2)	28.4 ± 1.9 (2)	6 - 17 (15)
				5.9 ± 1.5 (10)
Middelberg (Rotselaar) <sup>7</sup>	2249 ± 60 (2)	2015 ± 99 (2)	30.9 ± 1.8 (2)	5 - 15 (4)
Roeselberg (Herent) <sup>9</sup>		1906 ± 55 (10)		6.4 ± 2.6 (10)
Sint-Eustachiuskerk (Zichem) <sup>10</sup>				2.5 (19)
Sint-Willibrorduskerk (Meldert) <sup>11</sup>		1791 (6)	36.3 (6)	3.5 ± 1.4 (8)
				7.2 ± 5.3 (10)
Weefberg (Averbode) <sup>7</sup>	2401 ± 96 (3)	2116 ± 59 (3)	27.5 ± 1.2 (3)	10 - 23 (24)
Brusseliaan ijzerzandsteen Chaumont-Gistoux <sup>7</sup>	2334 ± 139 (2)	1950 ± 99 (2)	27.8 ± 2.4 (2)	2 - 12 (12)

<sup>5</sup> De Naeyer A., De Witte E., Dreesen R. en Duser M., *Handboek Onderhoud, Renovatie, Restauratie. Technische fiches van natuursteen gebruikt in België*. II.3 Bouwmaterialen natuursteen, Aflevering 26, Kluwer Documenta, 2006

<sup>6</sup> Dreesen R., De Ceukelaire M. & De Konick R., *Natuurlijk voorkomen en karakteristieken van inheemse natuursteen in Vlaanderen – Diestiaan ijzerzandsteen in het Hageland*, Studie uitgevoerd in opdracht van ALBON (2010/SCT/R/006), maart 2010

<sup>7</sup> Van Campenhout D., *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, 2009

<sup>8</sup> Hayen R. & De Clercq H., *Materiaal-technisch onderzoek naar een aangepaste herstelmortel voor gevelformaatwerk in Diestiaan ijzerzandsteen*, januari 2011

<sup>9</sup> De Schutter G. & De Pauw P., *Beproeverslag van drukproeven uitgevoerd op brokstukken opgeraapt op de Roeselberg te Herent*, Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Overheid, Afdeling Geotechniek, december 2010

<sup>10</sup> Triconsult, *Sint-Eustachiuskerk te Zichem, voorverslagen: druksterkte metselwerk en endoscopisch onderzoek*, intern verslag, 2007

<sup>11</sup> Bourel E., *Numerieke modellering van tijdsafhankelijk gedrag en falen van monumentale metselwerkstructuren*, K.U. Leuven, Eindwerk Departement Ingenieurswetenschappen, Afdeling Bouwkunde, 2010

Het materiaal afkomstig van de Kepkensberg te Tessenderlo werd op basis van vorstproeven, uitgevoerd volgens de inmiddels ingetrokken Belgische norm NBN B17-001, als zeer vorstgevoelig omschreven.



## 6.2. Technische fiche

Op basis van de resultaten van deze studie kan een technische fiche voor Diestiaan-ijzerzandsteen opgesteld worden. Het fiche-concept gebruikt door het WTCB voor de beschrijving van de technische kenmerken van natuursteen, wordt hierbij gehanteerd.

Referentiebenaming	Diestiaan-ijzerzandsteen
Commerciële benaming	-
Type natuursteen	glaucanietrijke ijzerzandsteen
Andere benamingen	-
Vindplaats	heuvels van het Hageland en hun uitlopers naar de Zuiderkempen en de Brabantse leemstreek
Variëteiten	-
Groeve	niet beschikbaar
Geologische ouderdom	Laat Mioceen

### Macroscopische beschrijving

Roestbruine, meestal middelkorrelige, glaucanietrijke zandsteen met ijzerhoudend bindmiddel (limoniet).

### Microscopische beschrijving

De mineralogische samenstelling van de zandfractie wordt sterk overheerst door kwarts- en glaucanietkorrels. Het glaucanietgehalte bedraagt tussen 25 en 50% van de zandfractie. Graafgangen van zeewormen (bioturbaties) kunnen lokaal een sterk afwijkende kwarts/glaucaniet verhouding vertonen. De korrelgrootte kan variëren van fijn tot grof maar vooral middelgrove zandkorrels komen voor. De sorteringsgraad is over het algemeen matig tot goed. De kwartskorrels zijn subhoekig tot afgerond. De glaucanietkorrels kunnen zowel relatief fris (groen), matig verweerd (bruin) als sterk verweerd (zwart) zijn, en dit zelfs op centimeter schaal.

Limonietcement zorgt voor de samenhang van de zandkorrels. Volgens de cementatiegraad vervult het cement zowel de rol van contact- als van poriëncement. Het aandeel aan macroporiën in de grootte-orde van 100 µm daalt met toenemend cementgehalte.

### Technische kenmerken

Kenmerk	Norm	Eenheden	Aantal proefstukken	Proefresultaten*			
				gem.	$\sigma$	E-	E+
Schijnbare volumieke massa	EN 1936	kg/m <sup>3</sup>	57	2070	179	1670	2410
Porositeit	EN 1936	vol%	57	31.1	4.8	22.0	44.9
Druksterkte	EN 1926	N/mm <sup>2</sup>	37	14.0	9.9	2.1	37.2
Vorstbestendigheid	EN 12371		18	variabel van niet tot zeer vorstbestendig			

\* gem. = gemiddelde,  $\sigma$  = standaardafwijking, E- = minimaal te verwachten waarde en E+ = maximaal te verwachten waarde

## 7. Kwaliteitscriteria

Het doel van deze studie bestond uit de karakterisering van Diestiaan ijzerzandsteen teneinde de geschiktheid als bouwsteen te evalueren. De evaluatie van de geschiktheid van een materiaal als bouwsteen wordt echter bepaald door tal van factoren:

- Welke functie zal de natuursteen vervullen?  
De lijst is erg lang, maar voorbeelden zijn dragende elementen, parementsteen, vloerbekleding, plint, kroonlijst, waterlijst, baluster, deksteen, beeldhouwwerk, etc.
- Welk is de te verwachten mechanische belasting?
- Betreft het een toepassing voor binnen of voor buiten?
- Voor een buitentoepassing: Welke oriëntatie heeft de gevel? In hoeverre is het materiaal beschermt tegen regen en wind (in een galerij, in een nis, afgedekt door een loden slab, ...)?
- Zijn er zouten aanwezig? Is er risico op contaminatie door dooizouten?
- Is er risico op vandalisme ( bvb. mechanische beschadiging, ...)?
- Is er een potentieel gevaar voor schade door dieren? Door voertuigen?
- ...

In functie van de toepassing dienen specifieke kwaliteitscriteria gedefinieerd te worden. Het is daarom weinig zinvol om algemeen geldende kwaliteitscriteria vast te leggen en om derhalve vanuit een algemene benadering potentiële reserves aan Diestiaan ijzerzandsteen als bouwsteen te omschrijven. Aan het gebruik van ijzerzandsteen in een binnen- of een buitenparement zijn immers andere eisen gekoppeld, alleen al het belang van de vorstbestendigheid bijvoorbeeld.

Om desondanks deze randvoorwaarden de geschiktheid van de ijzerzandsteen te beoordelen zullen de belangrijkste materiaalkenmerken in functie van de mogelijke toepassingen toegelicht worden. Tegelijkertijd zal aandacht worden besteed aan de mogelijkheid om in situ (terreinmethode) of zo nodig in het laboratorium de kwaliteit van de ijzerzandsteen te beoordelen op basis van een zo eenvoudig mogelijke proefmethodologie. In de eerste plaats lijken daarbij de **esthetiek**, de **druksterkte**, de **vochtbalans** en de **vorstbestendigheid** van de ijzerzandsteen als voornaamste kenmerken naar voren te komen.

De esthetiek (kleur, oppervlaktetextuur, etc.) werd in dit onderzoek niet beoordeeld.

### 7.1. Het belang van de druksterkte

Het belang van de druksterkte voor bouwmaterialen in historische gebouwen wordt in het kader van restauraties zeer 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 uitgeoefend per oppervlakte-eenheid op het metselwerk doorgaans zeer laag, ook wanneer wordt aangenomen dat in oorspronkelijk meerschallig metselwerk de belasting enkel door het binnen- en buitenparement wordt gedragen. Nominale drukspanningen in de grootte-orde van 1 tot 2 MPa zijn normale waarden voor dragend metselwerk.

Meer complexe structuren en veranderingen in het materiaalgedrag dwingen evenwel tot enige voorzichtigheid:

- deur- en raamopeningen, trapgangen, etc. leiden tot lokale spanningsconcentraties in het metselwerk waardoor de drukspanning plaatselijk sterk kan toenemen;
- schade-accumulatie in de materialen leidt op lange termijn tot afname van de druksterkte en bijgevolg tot een verhoging van het risico op falen. Schade-accumulatie kan het gevolg zijn van occasionele verhogingen van het belastingsniveau, bijvoorbeeld onder invloed van een windbelasting

of aardbeving, maar komt even goed voor onder een permanente belasting, doorgaans het eigengewicht van het gebouw. Onder een permanente belasting lager dan de feitelijke druksterkte (ca. 60 tot 70%) kan zich in het metselwerk over zeer lange tijd (soms zelfs meerdere eeuwen) schade opstapelen zodat de sterkte afneemt met het mogelijk falen van de structuur tot gevolg. Dit fenomeen is bekend als kruip van het materiaal. Bovendien werd uit onderzoek uitgevoerd in het verleden afgeleid dat het vochtgehalte een belangrijke invloed uitoefent op de druksterkte van de ijzerzandsteen<sup>12</sup>. Naarmate het vochtgehalte toeneemt, daalt de sterkte van de ijzerzandsteen. Alle testen werden in dit onderzoek uitgevoerd op vooraf geconditioneerde en eerder droge materialen, zodat afhankelijk van de omstandigheden, een correctie noodzakelijk is om de druksterkte van de ijzerzandsteen, toegepast in aan regen blootstaand metselwerk of in een plintzone, in te schatten.

Rekening houdende met al deze invloeden lijkt een druksterkte van ca. 10 MPa voor de meeste toepassingen in opgaand metselwerk daarom ruim voldoende. Meer specifieke, sterker belaste bouwelementen zoals kolommen, gewelfbogen, luchtbogen, etc. zullen een hogere druksterkte eisen. Bij dit alles dient 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 kan hiervoor bijgevolg ijzerzandsteen met een lage druksterkte (< 10 MPa) in aanmerking genomen worden.

De bepaling van de noodzakelijke druksterkte dient voor sterk belaste bouwelementen zoals kolommen, gewelfbogen en luchtbogen, per geval afzonderlijk bekeken te worden. Dit onderzoek heeft uitgewezen dat ook voor deze toepassingen geschikte ijzerzandsteen kan gevonden worden.

De selectie van ijzerzandsteen in termen van zijn bouwmechanische kwaliteit wordt bijgevolg in de eerste plaats bepaald door de toepassing in het gebouw:

- 1) Wanneer het gebruik een hoge druksterkte (> 15 MPa) vereist, dient een goed geconsolideerde ijzerzandsteen gekenmerkt door een continue neerslag van het limonietcement aangewend te worden. Dit vereist een petrografische studie van de steenbank in kwestie. Afhankelijk van eventueel hogere eisen aan de druksterkte zullen bijkomende steekproeven ter bepaling van de gemiddelde druksterkte van de steenbank noodzakelijk zijn;
- 2) Voor opgaand metselwerk dat effectief op druk belast wordt volstaat, zoals aangegeven, een druksterkte van 10 MPa, wat opnieuw het gebruik van een goed geconsolideerde ijzerzandsteen noodzakelijk maakt. De evaluatie van de kwaliteit van de steenbank geschiedt ook hier op basis van petrografisch onderzoek. In situ visuele beoordeling, geluidssnelheidsmetingen en/of de bepaling van de densiteit/porositeit zijn indicatief maar bieden onvoldoende zekerheid om de vooropgestelde druksterkte te garanderen;
- 3) Feitelijk niet belaste toepassingen, zoals een lokale invulling in een bestaande structuur, stellen geen specifieke eisen aan de druksterkte. Principieel komt hiervoor alle beschikbare ijzerzandsteen in aanmerking voor zover deze voldoende cohesie vertoont. Tijdens het onderzoek werd immers vastgesteld dat ijzerzandsteen gekenmerkt door een lage druksterkte (< 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 (bvb schade als gevolg van het parkeren van fietsen), is het gebruik van dergelijke ijzerzandsteen niet aangewezen. Hier volstaat evenwel een visuele evaluatie van de steenbank, eventueel aangevuld met in situ geluidssnelheidsmetingen uitgevoerd in droge klimaatomstandigheden, om de kwaliteit indicatief te beoordelen.

<sup>12</sup> Bourel E., *Numerieke modellering van tijdsafhankelijk gedrag en faling van monumentale metselwerkstructuren*, K.U. Leuven, Eindwerk Departement Ingenieurswetenschappen, Afdeling Bouwkunde, 2010

## 7.2. De vochtbalans van het metselwerk in zijn context

Een ander belangrijk kwaliteitscriterium bij de vervanging van steenblokken in buitengevelmetselwerk is het respecteren van de vochtbalans van het gevelmetselwerk. Vervangstenen kunnen immers de vochtbalans van het gevelmetselwerk verstoren, waardoor lokaal in het metselwerk vocht kan ophopen of, omgekeerd, de droging kan geforceerd worden. Hierdoor kunnen problemen met vorst en/of zouten ontstaan of gestimuleerd worden. De keuze van de vervangsteen dient erop gericht te zijn het authentieke materiaal te beschermen, waardoor deze in functie staat tot de materiaaleigenschappen van het oorspronkelijke gevelmetselwerk. Cruciaal daarbij is de kennis van het materiaalgedrag bij contact met water, meer bepaald hoe snel nemen de gevelmaterialen water op en hoe snel drogen deze nadien uit. Dit alles heeft te maken met de poriënstructuur en vergt laboratoriumonderzoek, meer bepaald kwikporosimetrie, waterabsorptie- en drogingsproeven. De resultaten van deze studie hebben uitgewezen dat de verdeling van de poriëndiameter op basis van de consolidatiegraad binnen een redelijke marge kan geschat worden. Een voorafgaandelijke studie van de geluidssnelheid zal bijgevolg een indicatie geven van de totale porositeit en de poriënstructuur, welke eventueel – afhankelijk van de omringende materialen – zou kunnen volstaan voor een finale beoordeling van de kwaliteit van de ijzerzandsteen.

## 7.3. De noodzaak voor vorstbestendige ijzerzandsteen

De resultaten van de vorstbestendigheid hebben uitgewezen dat voor elk type toepassing (Tabel 3) ijzerzandsteenreserves aanwezig zijn. Er is evenwel geen correlatie waargenomen tussen de consolidatiegraad en de geluidssnelheid enerzijds, en de vorstbestendigheid anderzijds. De studie van de poriënverdeling heeft echter aangetoond dat een evaluatie van de vorstbestendigheid eventueel mogelijk is op basis van enkele indicatoren, bepaald aan de hand van resultaten bekomen met kwikintrusie (kwik(Hg)-porosimetrie). Onze huidige kennis volstaat evenwel niet om voor ijzerzandsteen een sluitend verband te leggen tussen deze indicatoren en de vorstbestendigheid. Bijkomend onderzoek is in dit kader noodzakelijk om op basis van de poriënstructuur de vorstbestendigheid van ijzerzandsteen in te schatten.

In de veronderstelling dat er effectief een verband kan gelegd worden tussen de poriënstructuur en de vorstbestendigheid, kan logischerwijs de evaluatie van de vorstbestendigheid berusten op resultaten bekomen met kwikporosimetrie. Dit is evenwel geen terreinmethode.

Omdat de poriënstructuur tevens gelinkt is aan de waterabsorptiekenmerken van de ijzerzandsteen, kan er gedacht worden aan de invoering van een Karstenpijpmeting als terreinmethode. Ook hier ontbreekt echter nog de methodiek en de kennis om op basis van resultaten van het waterabsorptiegedrag de poriënstructuur te evalueren, en deze te interpreteren in termen van vorstbestendigheid. Daar de introductie van deze mogelijke terreinmethode het resultaat is van de evaluatie van alle proefresultaten, was er in het kader van dit onderzoek evenwel geen tijd meer om deze (in situ) te optimaliseren en te valideren. De beoordeling van de vorstbestendigheid kon immers slechts helemaal op het einde van dit onderzoek voltooid worden.



## 8. Synthesetabellen van de materiaalkenmerken in functie van de typelocatie

Hiernavolgend wordt de kwaliteit van de aanwezige ijzerzandsteen per site kort toegelicht.

Tevens worden alle beschikbare data samengebracht in een tabel per typelocatie. In de tabellen 4 t/m 8 werd volgende informatie gebundeld:

- identificatie van het staal;
- diepte waarop het fragment werd aangeboord (m) in het geval van boorkernen;
- geschiktheidsklasse;
- gemiddelde geluidssnelheid en standaardafwijking (m/s) op basis van de meetreeks uitgevoerd door het KIK;
- consolidatiegraad bepaald op basis van de petrografische analyse;
- beschrijving van het limonietcement, opgedeeld in vorm (g = geïsoleerde neerslag, d = discontinue neerslag en c = continue neerslag) en gehalte;
- macroporositeit (vol%) geschat op basis van de visuele analyse van de slijpplaatjes;
- hardheidsklasse bepaald op basis van de DRMS-metingen;
- schijnbare volumieke massa  $\rho_b$  ( $\text{kg/m}^3$ );
- totale watertoegängelijke porositeit  $p_0$  (vol%) bepaald door middel van vacuümverzadiging;
- druksterkte  $f_c$  (MPa);
- dynamische elasticiteitsmodulus  $E_{\text{dyn}}$  (GPa);
- vorstbestendigheid op basis van het aantal cycli voorafgaand aan het falen van het proefstuk. Er worden telkens twee waarden vermeld. De eerste waarde geeft het moment van falen aan wanneer het verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus meer dan 30% bedraagt, de tweede waarde wanneer de visuele beoordeling van de schade graad 3 bereikt zoals omschreven in de procedure.

De stalen beproefd op druksterkte en vorstbestendigheid kunnen eenvoudig uit elkaar gehouden worden. De stalen bestemd voor de evaluatie van de vorstbestendigheid werden in het blauw gemarkeerd. Eventuele afwijkingen van de norm of relevante data met betrekking tot het ontbreken van bepaalde resultaten worden onderaan de tabel vermeld.

### 8.1. Roeselberg (Herent)

Van de Roeselberg te Herent was slechts één boorkern beschikbaar naast enkele losse stalen. Er was geen informatie beschikbaar met betrekking tot de mogelijke correlatie van de losse stalen met de ijzerzandsteenbanken afgeleid uit de kernboring.

In de boorkern van boring VLA10-4.1-B1 kunnen een 4-tal steenbanken herkend worden. De onderste steenbank (ca. 0.20 m dikte) zit op bijna 14 m diepte en werd niet nader bestudeerd.

De eerste steenbank (ca. 2.65 - 4.05 m diepte) is eerder van een lage kwaliteit. De druksterkte van de ijzerzandsteen is laag (ca. 4 MPa) en bovendien is deze niet vorstbestendig. Dergelijk materiaal zou eventueel voor vervanging in een binnenomgeving in aanmerking genomen kunnen worden, maar is algemeen niet aangewezen voor buitengebruik. Op het eerste zicht lijkt er een overeenkomst te bestaan met het losse fragment H/F8.

De twee volgende steenbanken (ca. 4.55 - 5.41 m en 7.15 - 8.65 m diepte) zijn van een veel betere kwaliteit. De druksterkte bedraagt meer dan 15 MPa en de ijzerzandsteen in deze steenbanken is vorstbestendig. Dit materiaal is breed inzetbaar.

In de zone gaande van de eerste tot de derde steenbank is naar schatting 22% aan bruikbaar materiaal aanwezig (voor de methodologie en berekening zie bijlage III *Petrografische studie*).

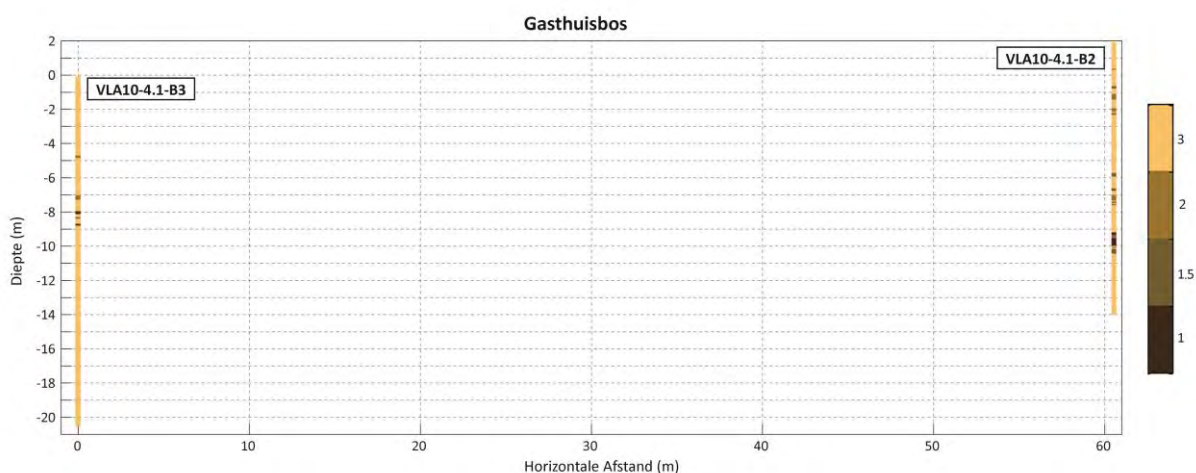
Tabel 5: Overzicht<sup>1</sup> van de resultaten voor de stalen van de Roeselberg te Herent.

Herent, Roeselberg													
Fragment	Diepte (m)	Klasse	V <sub>geluid</sub> (m/s)	Consolidatie- graad	Cement		P <sub>macro</sub> (%)	DRMS	ρ <sub>b</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	p <sub>0</sub> (vol%)	f <sub>c</sub> <sup>2</sup> (MPa)	E <sub>dyn</sub> (GPa)	Vorst (cycli)
					(%)	(%)							
Kernboring VLA10-4.1-B1 (H1)													
H1/1	2.95 - 3.03	I	1424 ± 220	zwak	g	5	17.5-25	laag	1870	35.7	5.1		
	3.03 - 3.14	I	923 ± 232	zwak	g	<5	>25	laag	1880	35.1	20.3	3.2	0 / 0
H1/3	5.42 - 5.54	I	2250 ± 285	goed	c	15-20	5	heterogeen	2370	23.6	17.0		
H1/4	7.22 - 7.32	I	2298 ± 136	goed	c	15-20	5	heterogeen	2240	26.9	15.9		
	7.32 - 7.44	I	2158 ± 103	goed	c	15-20	5	heterogeen	2060	30.6	4.1	140 / 0	
H1/5	7.97 - 8.06	I	2214 ± 94	matig	d	5-10	17.5-25	laag/matig	2070	30.5	15.9		
Losse fragmenten													
H/F8		II	2190 ± 122	matig	d	5-10	17.5-25	laag/matig	1950	34.0	4 <sup>3</sup>		
		II	2101 ± 213	matig	d	5-10	17.5-25	laag/matig	1950	34.2	7.3 / 4.70	7.3 / 4.70	0 / 0
H/F9		I	2510 ± 90	goed	c	15-20	5	matig/hoog	2130	29.5	30		
		I	2563 ± 87	goed	c	15-20	5	matig/hoog	2200	28.1	11.0 / 10.84	11.0 / 10.84	140 / 14
H/F10		I	2043 ± 223	goed	c	15-20	10-17.5	heterogeen	2120	28.9	6.4 / 6.62	6.4 / 6.62	140 / 140

<sup>1</sup> De nodige toelichting bij de informatie in de tabel is opgenomen aan het begin van paragraaf 8 (blz 39).<sup>2</sup> Druksterkte bepaald op kubussen met afmetingen 50 x 50 x 50 mm<sup>3</sup>. De maattolerantie van de zijden bedraagt ± 5 mm.<sup>3</sup> Het proefstuk viel buiten de toleranties voor de vlakheid van de zijvlakken en het parallelisme van de laadvlakken.

## 8.2. Gasthuisbos (Pellenberg)

Van het Gasthuisbos te Pellenberg waren twee boorkernen beschikbaar voor het onderzoek. Beide boorprofielen, met aanduiding van de geschiktheidsklasse, zijn ruimtelijk in verhouding weergegeven in Figuur 27. De horizontale tussenafstand tussen de kernboringen bedraagt 60.5 m. De holle weg, waarin de ijzerzandsteenbanken dagzomen en waarvan twee losse stalen werden gelicht tijdens de terreinbezoeken, bevindt zich in deze figuur naar schatting zo'n 50 tot 60 meter links van boring VLA10-4.1-B3. De losse stalen werden evenwel niet gelicht in het verlengde van het vlak gevormd door beide boorkernen, maar zo'n 150 tot 200 m verder in de holle weg.



*Figuur 27: Ruimtelijke weergave van de kernboringen VLA10-4.1-B2 en VLA10-4.1-B3 met aanduiding van de geschiktheidsklasse.*

Op basis van de resultaten van de eigenschappen van het ijzerzandsteenmateriaal, afkomstig van kernboring VLA10-4.1-B2 (P1), het verst gelegen vanaf de holle weg, komt de beste kwaliteit ijzerzandsteen op grote diepte voor (ca. 11.25 - 11.51 m). De ijzerzandsteen in deze laag wordt gekenmerkt door een hoge druksterkte. Echter de vorstbestendigheid ervan is eerder matig. Op basis van de proefresultaten kan worden opgemaakt dat dit materiaal niet gebruikt mag worden voor massief metselwerk blootgesteld aan wateropname (regen, opstijgend grondvocht, ...), wat de inzetbaarheid van deze ijzerzandsteen sterk beperkt in de restauratie.

In de boorkern van de tweede kernboring VLA10-4.1-B3 (P2), gelicht dichterbij de holle weg, kan deze ijzerzandsteenbank niet herkend worden. Daarentegen lijkt er op het eerste zicht een overeenkomst te bestaan met het fragment gelicht aan de zuidzijde van de holle weg. Uiteraard is dit maar giswerk om te spreken van een correlatie tussen twee lukraak gekozen stalen op een paar honderd meter van elkaar verwijderd.

Voor het overige werd er in beide boorkernen nog wat minder kwalitatieve ijzerzandsteen teruggevonden met een druksterkte tussen 5 en 10 MPa, maar die vermoedelijk niet vorstbestendig is. De fragmenten uit deze zones (fragmenten P1/6 en P2/2) braken immers reeds tijdens de voorbereiding van de proeven als gevolg van een te lage samenhang. Hoewel bijgevolg in het geval van het proefstuk P2/2 geen vorstproef kon worden gerealiseerd, is het redelijk aan te nemen dat de vorstbestendigheid in ieder geval laag zal zijn.

De uiteindelijke hoeveelheid aan bruikbaar materiaal is zeer beperkt en bevindt zich bovendien op grote diepte.



Tabel 6: Overzicht<sup>1</sup> van de resultaten voor de stalen van het Gasthuisbos te Pellenberg.

Pellenberg, Gasthuisbos												
Fragment	Diepte (m)	Klasse	v <sub>geluid</sub> (m/s)	Consolidatie- graad	Cement (%)	p <sub>macro</sub> (%)	DRMS	ρ <sub>b</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	p <sub>0</sub> (vol%)	f <sub>c</sub> <sup>2</sup> (MPa)	E <sub>dynam</sub> (GPa)	vorst (cycli)
Kernboringen VLA10-4.1-B2 (P1) en VLA10-4.1-B3 (P2)												
P1/2	3.52 - 3.63	II	434 ± 156					1670	44.9	<sup>3</sup>		
P1/6	9.23 - 9.32	II	879 ± 315	matig	d	10-15	heterogeen	<sup>4</sup>	<sup>4</sup>	6.0		
P1/7	11.63 - 11.72	I	2368 ± 213	goed	c	15-20	heterogeen	2250	24.9	30.3		
P1/8	11.84 - 11.94	I	2362 ± 144				hoog	1810	37.2		3.6	56 / 0 <sup>5</sup>
P2/2	7.20 - 7.28	II	2019 ± 234	matig	d	10-15	laag	2000	31.7	6.2		
	7.28 - 7.39	II	960 ± 281	zwak	g	<5	laag	<sup>4</sup>	<sup>4</sup>		<sup>6</sup>	<sup>6</sup>
Losse fragmenten												
P/F3		I-II	1783 ± 197	goed	c	10-15	matig/hoog	2170	26.8	8 <sup>7</sup>		
		I-II	1553 ± 191	goed	c	10-15	matig/hoog	2060	29.9		1.8 / 2.20	0 / 0 <sup>8</sup>
P/F4		I	2303 ± 247	goed	c	15-20	hoog	2200	27.0	23		
		I	2299 ± 183	goed	c	15-20	hoog	2190	27.4		8.6 / 9.14	56 / 14

<sup>1</sup> De nodige toelichting bij de informatie in de tabel is opgenomen aan het begin van paragraaf 8 (blz 39).

<sup>2</sup> Druksterkte bepaald op kubussen met afmetingen 50 x 50 x 50 mm<sup>3</sup>. De maattolerantie van de zijden bedraagt ± 5 mm.

<sup>3</sup> Het proefstuk was te weinig samenhangend om een regelmatige kubus uit te verzagen voor de bepaling van de druksterkte.

<sup>4</sup> De volumieke massa en de watertoegankelijke porositeit werden bepaald op het proefstuk vooraleer dit te verzagen tot een regelmatige vorm voor de drukproef. Tijdens deze metingen brak het proefstuk evenwel, zodat de metingen niet konden voltooid worden. Een van de resterende fragmenten kon wel tot een gepast proefstuk herleid worden om de druksterkte te bepalen.

<sup>5</sup> Het proefstuk brak tijdens de metingen volgend op 56 cycli. De ΔE bedroeg op dat ogenblik -12.3%, terwijl de schade als categorie 4 werd omschreven.

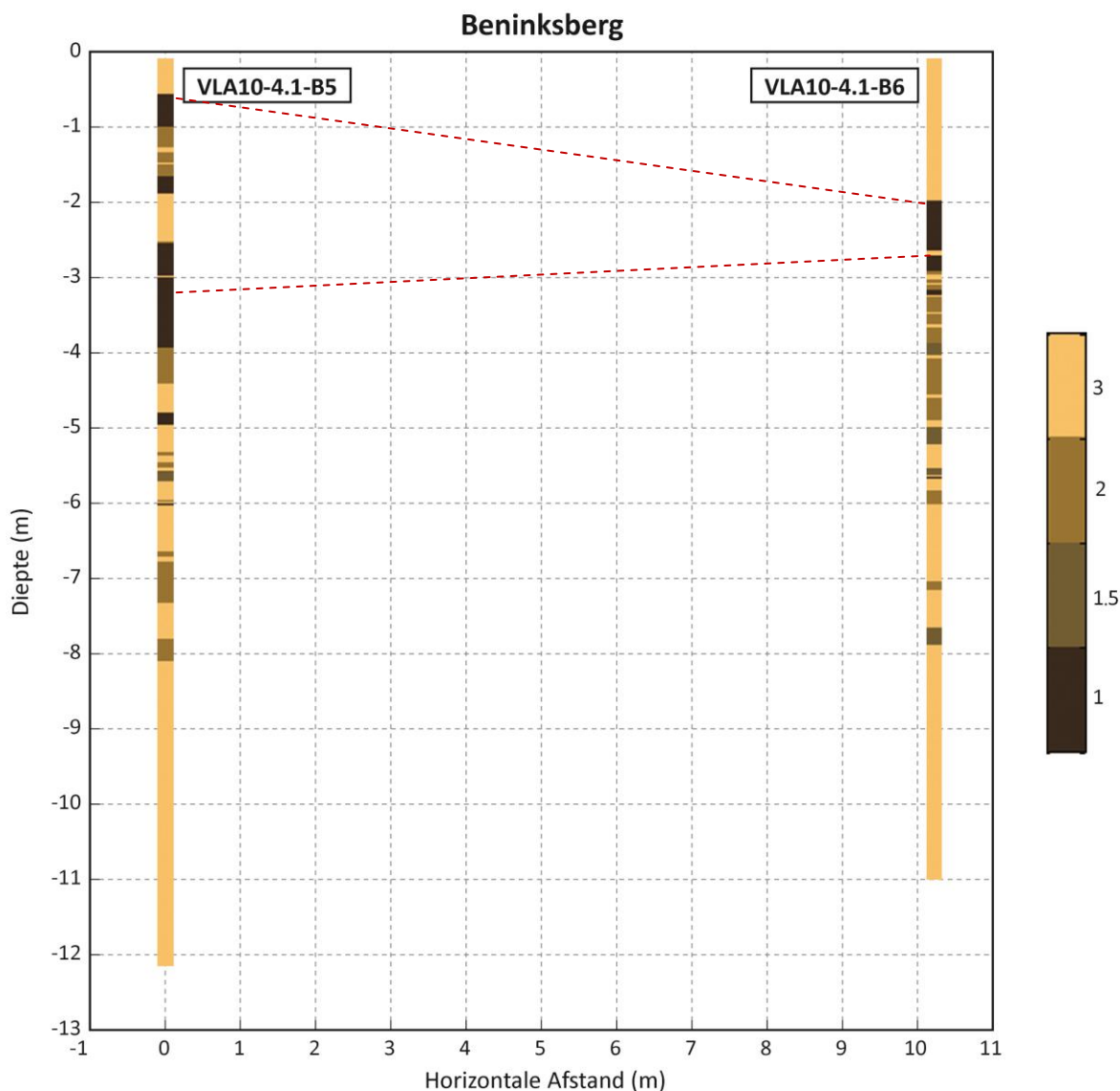
<sup>6</sup> Niet bepaald omdat de steen te weinig samenhang vertoonde (materiaalverlies), gebroken tijdens de voorbereiding.

<sup>7</sup> De hoogte van het proefstuk (43 mm) viel buiten de tolerantie van de genormaliseerde proef.

<sup>8</sup> De ΔE-waarde werd als niet meetbaar beschreven. Het verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus wordt derhalve als meer dan 30% beschouwd.

### 8.3. Beninksberg (Wezemaal)

Voor de site op de Beninksberg te Wezemaal werden in totaal 3 kernboringen uitgevoerd. De eerste kernboring (VLA10-4.1-B4) werd uitgevoerd op enige afstand (ca. 45 m) van de 2 andere (VLA10-4.1-B5 en VLA10-4.1-B6), gelegen op 10.2 m afstand van elkaar. De locatie van de twee laatste kernboringen is ruimtelijk weergegeven in Figuur 28.



*Figuur 28: Ruimtelijke weergave van de kernboringen VLA10-4.1-B5 en VLA10-4.1-B6 met aanduiding van de geschiktheidsklasse. De bovenste zone van beide boorkernen (tussen de beide rode stippellijnen) bevat erg verbrokeld materiaal, vermoedelijk ontstaan als gevolg van de wisselende klimaatomstandigheden aan het eind van de laatste ijstijd.*

De boorkern van de eerste boring VLA10-4.1-B4 (W1) bevat op het eerste zicht weinig bruikbaar materiaal. Helaas kon binnen dit onderzoek de druksterkte van de op het eerste zicht betere steenbank (ca. 4.20 m diepte) niet worden bepaald. De consolidatiegraad op basis van de petrografische studie is evenwel laag, zodat kan verwacht worden dat ook de druksterkte laag is. De

vorstbestendigheid van de ijzerzandsteen is goed. In principe zou dit materiaal dus buiten gebruikt kunnen worden in gevelrestauraties, evenwel voor gevels beschermd van wind en regen.

De als overgangsklasse I-II geklasseerde steenbank, iets dieper gelegen in de heuvel, lijkt ondergewaardeerd. De resultaten van de petrografische studie en de druksterkte wijzen immers op een kwalitatief goede ijzerzandsteen. Ook de geluidssnelheid is vrij hoog, hetgeen een bevestiging is voor goed geconsolideerde zandsteen. Er is evenwel geen informatie beschikbaar omtrent de vorstbestendigheid van deze ijzerzandsteen, omdat de laagdikte van deze steenbank te klein was om naast de drukproef ook nog een vorstproef uit te voeren. De beperkingen liggen hier op het vlak van de afmetingen gelinkt aan de beperkte laagdikte.

De boorkernen van de boringen VLA10-4.1-B5 (W2) en VLA10-4.1-B6 (W3) vertonen op basis van de indeling in geschiktheidsklassen op het eerste zicht onderling weinig overeenkomst. Wel kan met zekerheid gesteld worden dat voor de beide boringen de bovenste ijzerzandsteenbank zich bevindt in de bovenste zone van de formatie van Diest, die tijdens de laatste ijstijd aan de wisselende werking van vorst en dooi werd blootgesteld. Het materiaal gelicht uit deze zone is met name erg verbrokken. In het geval van boring VLA10-4.1-B5 is deze zone opmerkelijk breder en de aanzet van de formatie van Diest bevindt zich tevens dicht bij het oppervlak vergeleken met boring VLA10-4.1-B6. Hierdoor kunnen de steenbanken over de boringen heen toch met elkaar in correlatie gebracht worden.

Uit de resultaten van de kenmerken van het materiaal bekomen uit de beide boringen wordt afgeleid dat net onder deze zone een laag voorkomt met ijzerzandsteen van een hoge kwaliteit: een zeer hoge druksterkte gecombineerd met een goede vorstbestendigheid. Hoewel de geologische context voor beide lagen dezelfde is en de algemene bouwmechanische en –fysische kenmerken een sterke gelijkenis vertonen, duidt de petrografische studie toch op een duidelijk verschillende structurele samenstelling. Dit onderstreept de moeilijkheid om uitspraken te doen betreffende de continuïteit van de zandsteenbanken op basis van de gelichte boorkernen. In tegenstelling tot andere soorten natuursteen, is het verloop van de ijzerzandsteenbanken gekenmerkt door een grillig patroon, waaraan bovendien de variatie aan kwaliteit van de natuursteen binnen eenzelfde bank dient toegevoegd.

Onder deze steenbank komt voor beide kernboringen een zone voor met ijzerzandsteen van wat mindere kwaliteit, zoals tevens kan afgeleid worden uit de geschiktheidsklasse en de gemiddelde geluidssnelheid. Omdat de druksterkte hier beduidend lager is betreft het hier vermoedelijk eerder zwak geconsolideerde ijzerzandsteen. De vorstbestendigheid is over het algemeen goed, zodat het materiaal in deze laag wel geschikt is voor algemene gevelwerken, beschermd van wind en regen. Hoewel deze 3 tot 4 m brede zone over beide kernboringen globaal genomen vergelijkbare kenmerken vertoont, is er geen continuïteit waarneembaar in het verloop van de steenbanken (Figuur 28). Zowel de overgangen tussen de eerder zwak geconsolideerde ijzerzandsteen en het niet geconsolideerd ijzerhoudend zand, als het verloop van de kwaliteit van de ijzerzandsteen kent een grillig patroon, waarin geen duidelijke overeenkomst kan herkend worden. Er is bijgevolg sprake van een globale correlatie tussen beide kernboringen, echter zonder een duidelijke identificatie van het verloop van de ijzerzandsteenbanken.

In de zone van kernboringen VLA10-4.1-B5 (W2) en VLA10-4.1-B6 (W3) van deze site bevindt zich op basis van deze studie ca. 16% bruikbaar materiaal.

Tabel 7: Overzicht<sup>1</sup> van de resultaten voor de stalen van de Beninksberg te Wezemaal.

Wezemaal, Beninksberg													
Fragment	Diepte (m)	Klasse	V <sub>geluid</sub> (m/s)	Consolidatie- graad	Cement		P <sub>macro</sub> (%)	DRMS	ρ <sub>b</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	p <sub>0</sub> (vol%)	f <sub>c</sub> <sup>2</sup> (MPa)	E <sub>dyn</sub> (GPa)	vorst (cycli)
					(%)								
Kernboringen VLA10-4.1-B4 (W1), VLA10-4.1-B5 (W2) en VLA10-4.1-B6 (W3)													
W1/1	3.71 - 3.85	II	1989 ± 136					1930	34.8			5.3	140 / 14
W1/2	4.19 - 4.27	I	1643 ± 390	zwak	g	5	>25	1970	34.5		3		
W1/3	5.63 - 5.71	I-II	2443 ± 254	goed	c	10-15	10-17.5	2100	30.8		19.8		
W2/1	3.26 - 3.34	I	2909 ± 173	goed	d	10-15	10-17.5	2410	22.0		36.7		
W2/2	3.43 - 3.55	I	2527 ± 590					2200	28.2			8.4	140 / 14
W2/3	3.95 - 4.06	II	1890 ± 67	zwak	g	5-10	17.5-25	1830	37.1			5.0	140 / 140
	4.06 - 4.15	II	1672 ± 219					1810	37.6		3.1		
W2/4	7.82 - 7.92	II	1778 ± 153	zwak	g	5-10	17.5-25	1770	38.0			3.8	140 / 84
	7.92 - 8.00	II	1601 ± 106					1730	39.3		4.7		
W3/1	2.47 - 2.55	I	2688 ± 198	goed	c	15-20	<5	2340	23.6		37.2		
W3/3	2.75 - 2.87	I	2384 ± 154					2100	30.2			6.0	56 / 112
W3/5	3.86 - 3.98	I-II	1746 ± 428					1850	36.1		2.1		
W3/7	4.75 - 4.84	II	1642 ± 142		g	5-10	17.5-25	2300	22.7		35.5		

<sup>1</sup> De nodige toelichting bij de informatie in de tabel is opgenomen aan het begin van paragraaf 8 (blz 39).<sup>2</sup> Druksterkte bepaald op kubussen met afmetingen 50 x 50 x 50 mm<sup>3</sup>. De maattolerantie van de zijden bedraagt ± 5 mm.<sup>3</sup> Er kon geen kubus verzaagd worden als gevolg van de aanwezigheid van een ader doorheen de kern.



#### 8.4. Middelberg (Rotselaar)

Van de Middelberg te Rotselaar waren er twee boorkernen beschikbaar.

De resultaten bekomen van de boorkern van boring VLA10-4.1-B7 (R1) wijzen op enkele, eerder dunnere lagen ijzerzandsteen van geschiktheidsklasse I. Het ijzerzandsteenmateriaal gelicht bij de tweede kernboring VLA10-4.1-B8 (R2) wijst op een wat bredere steenbank van klasse I. De kwaliteit van de ijzerzandsteen is goed, maar niet extreem: de consolidatiegraad is variabel en de druksterkte varieert van eerder laag (3.5 MPa) tot bijna 13 MPa. Uit de resultaten van de vorst-dooi proeven wordt daarentegen wel een goede vorstbestendigheid afgeleid. Deze ijzerzandsteen kan bijgevolg breed ingezet worden voor de restauratie van gebouwen. IJzerzandsteen toepasbaar voor zwaar belaste elementen lijkt hier echter op het eerste zicht niet voor te komen.

Een enigszins vergelijkbaar resultaat wordt bekomen op de losse fragmenten die een eind verder naar het oosten werden gelicht. Het ene zachtere fragment R/F7 vertoont een lage consolidatiegraad. De druksterkte kon evenwel niet bepaald worden, doordat het proefstuk brak tijdens de voorbereidende behandelingen, hetgeen op zich reeds een indicatie is van de onvoldoende bouwmechanische kwaliteit van deze ijzerzandsteen. Daarentegen, het andere visueel sterker fragment R/F6 kan als een goed geconsolideerde ijzerzandsteen worden beschreven. De druksterkte is zeer goed. De vorstbestendigheid van dit fragment is uitstekend.

Gezien de locatie waar deze losse fragmenten werden gelicht, is het niet mogelijk om deze ontsluiting te relateren aan de twee kernboringen.

In de zone van kernboringen VLA10-4.1-B7 (R1) en VLA10-4.1-B8 (R2) van deze site bevindt zich op basis van deze studie ca. 12% bruikbaar materiaal.

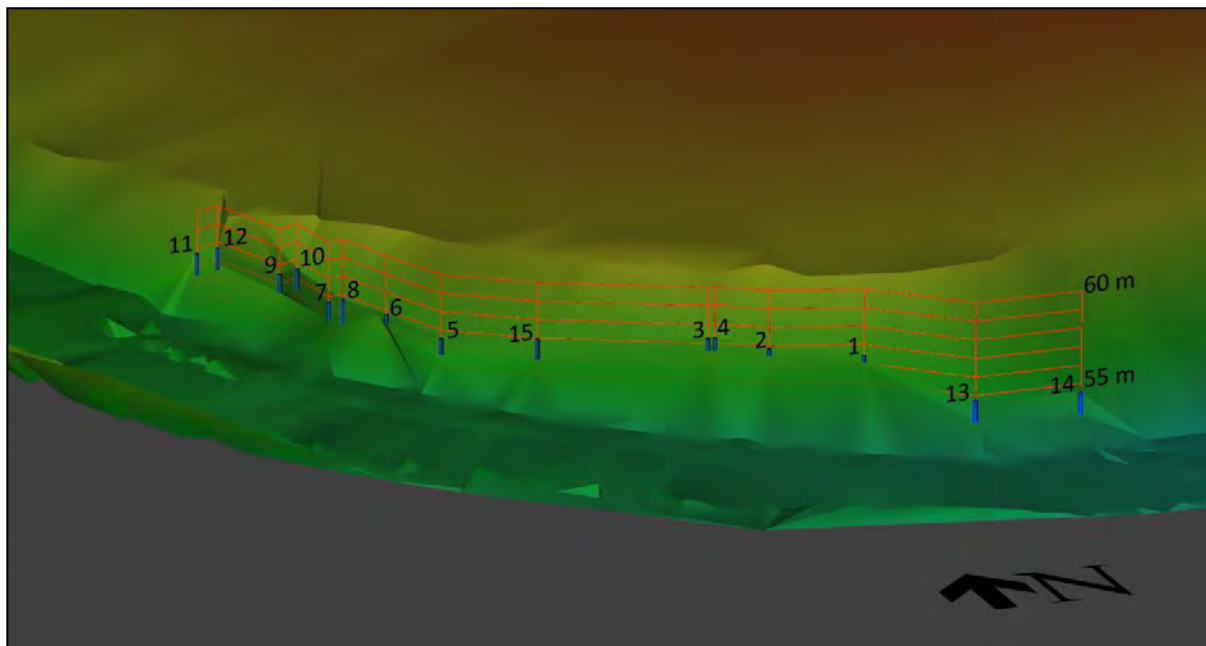
Tabel 8: Overzicht<sup>1</sup> van de resultaten voor de stalen van de Middelberg te Rotselaar.

Rotselaar, Middelberg													
Fragment	Diepte (m)	Klasse	V <sub>geluid</sub> (m/s)	Consolidatiegraad	Cement		P <sub>macro</sub> (%)	DRMS	ρ <sub>b</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	p <sub>0</sub> (vol%)	f <sub>c</sub> <sup>2</sup> (MPa)	E <sub>dyn</sub> (GPa)	vorst (cycli)
						(%)							
Kernboringen VLA10-4.1-B7 (R1) en VLA10-4.1-B8 (R2)													
R1/2	5.93 - 6.02	I	1594 ± 168	goed	c	15-20	5	heterogeen	2160	28.6	12.9		
R2/1	2.37 - 2.47	I	2681 ± 89	zwak	g	5	17.5-25	laag	2100	29.8		10.8	140 / 140
	2.47 - 2.55	I	2285 ± 418					laag	2370	38.0	3.5		
R2/5	6.78 - 6.88	I	2867 ± 301	matig	d	5-10	17.5-25	laag	2200	29.1		5.4	140 / 0
	6.88 - 6.97	I	2674 ± 95					laag	2040	34.1	10.4		
Losse fragmenten													
R/F6		I	2475 ± 200	goed	c	15-20	5	matig	2280	25.6	19		
		I	2372 ± 243	goed	c	15-20	5	matig	2270	26.1		10.0 / 9.17	140 / 84
R/F7		II	1288 ± 65	zwak	g	5	17.5-25	laag	1760	37.8	- <sup>3</sup>		

<sup>1</sup> De nodige toelichting bij de informatie in de tabel is opgenomen aan het begin van paragraaf 8 (blz 39).<sup>2</sup> Druksterkte bepaald op kubussen met afmetingen 50 x 50 x 50 mm<sup>3</sup>. De maattolerantie van de zijden bedraagt ± 5 mm.<sup>3</sup> Proefstuk brak tijdens de voorbereidende behandelingen.

## 8.5. Langenberg (Diest)

Het materiaal van de Langenberg te Diest werd gelicht in een totaal andere context dan de 4 overige typelocaties. Alle kernen werden uit vermoedelijk één tot mogelijk twee steenbanken gelicht, die zich aan de bovenzijde van de Formatie van Diest bevinden. Dit kan worden afgeleid uit de aanwezigheid van sterk verbrokkelend materiaal aan de bovenzijde van de boorkernen 10 en 11 (over een hoogte van ca. 35 cm). Deze verbrokkeling is vermoedelijk ontstaan aan het einde van de laatste ijstijd, toen deze zone – aan de bovenzijde van de Formatie van Diest – in de bodem aan een reeks vorst-dooi cycli werd blootgesteld. Een grafisch overzicht van de ruimtelijke verdeling van de verschillende boorkernen ten overstaan van het talud waaruit ze gelicht werden is weergegeven in Figuur 29.



*Figuur 29: Ruimtelijke weergave van de boorkernen en het talud (met de hoogtelijnen in oranje aangeduid) aan de Langenberg te Diest.*

Op basis van de ruimtelijke spreiding en het verloop van de ijzerzandsteenbanken in het talud kan besloten worden dat de kernen 5 tot en met 12, net als kern 15 tot één en dezelfde steenbank behoren. De relatie van de kernen 1 tot en met 4, alsook van de kernen 13 en 14, tot deze steenbank is minder duidelijk. Uit een visuele beoordeling van het betreffende rechter vrijgelegd gedeelte van het talud ter plaatse kunnen twee steenbanken herkend worden, waarbij de kernen 1 tot en met 4 verband houden met een hoger gelegen steenbank dan deze waartoe de kernen 13 en 14 behoren. Deze laatste twee kernen waren bovendien zichtbaar veel heterogener van samenstelling. Omdat de steenbank aan de linkerzijde van het talud naar alle waarschijnlijk de bovenzijde vormt van de Formatie van Diest bestaat het vermoeden dat deze steenbank doorloopt naar het rechterdeel van het talud, meer bepaald de steenbank waaruit de kernen 1 tot en 4 werden gelicht. Het hoogteprofiel, zoals weergegeven in Figuur 29, lijkt dit niet uit te sluiten. Echter het sterk verbrokkelde materiaal, eigen aan de bovenzijde van de formatie van Diest, ontbreekt hier. Het is evenwel niet uitgesloten dat de steenbank zich in deze zone dieper in het landschap bevond, zodat de bovenzijde ervan niet aan een opeenvolging van vorst-dooi cycli werd blootgesteld, of dat eenvoudigweg de verbrokkelde zone bij het vrijleggen van het talud werd afgegraven. Het verder vrijmaken van het talud tijdens de geplande werkzaamheden zal ongetwijfeld deze hypothese kunnen bevestigen of ontkrachten.

Het verschil in homogeniteit, dat in situ werd opgemerkt, wordt evenwel niet bevestigd door de resultaten van het onderzoek. De ijzerzandsteen kan eerder omschreven worden als een matig geconsolideerde ijzerzandsteen met een gemiddelde druksterkte. Op zich kan dit materiaal ingezet worden voor gevelrestauraties. Alleen voor zwaar op druk belaste toepassingen lijkt dit materiaal niet geschikt. Enig probleem is evenwel de wisselende vorstbestendigheid van het materiaal, waardoor een sterkere erosie kan verwacht worden als gevolg van vorst-dooi cycli.

De inschatting van het percentage aan bruikbaar materiaal is hier weinig relevant, daar de kernboringen uitgevoerd zijn in dagzomende steenbanken zonder rekening te houden met de stratigrafische opbouw van de ijzerhoudende steen- en zandbanken. Van het gelichte materiaal is immers zo goed als alles bruikbaar.

Tabel 9: Overzicht<sup>1</sup> van de resultaten voor de stalen van de Langenberg te Diest.

Diest, Langenberg												
Fragment	Diepte (m)	Klasse	V <sub>geluid</sub> (m/s)	Consolidatiegraad	Cement (%)	P <sub>macro</sub> (%)	DRMS	ρ <sub>b</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	p <sub>0</sub> (vol%)	f <sub>c</sub> <sup>2</sup> (MPa)	E <sub>dyn</sub> (GPa)	vorst (cycli)
Kernboringen												
D3.0	0.05 - 0.20	I	2091 ± 233					2170	28.6	12.6	3.1	
D3.1	0.30 - 0.45	I	1910 ± 268					2120	30.5	8.2	5.5	
D4.0	0.03 - 0.17	I	1940 ± 239					2170	28.7	11.9	7.0	
D4.1	0.30 - 0.54	I	1922 ± 132	matig	d	5-10	17.5-25	2000	33.3		2.0	56 / 56
D6.2	0.25 - 0.39	I	1820 ± 273	goed	c	10-15	10-17.5	2000	32.3	5.1	6.1	
D8.4	0.39 - 0.53	I	2030 ± 114	matig	d	5-10	10-17.5	2240	26.6	14.8	7.4	
D9.2	0.25 - 0.40	II	1894 ± 145	matig	d	5-10	10-17.5	1900	36.2	6.8	6.6	
D9.3	0.65 - 0.80	II	1790 ± 179					2080	30.7	6.9	3.5	
D10.2	0.54 - 0.66	I	2174 ± 77					2150	28.0	14.8	11.2	
D11.1	0.35 - 0.45	I	2816 ± 178					2390	22.4	21.8	15.5	
	0.45 - 0.55	I-II	2383 ± 17					2140	28.4	20.8	13.1	
	0.55 - 0.65	II	2055 ± 133					2080	30.1	7.8	8.9	
D11.2	0.80 - 1.00	II	1806 ± 123	matig	d	5-10	10-17.5	1880	35.2		3.8	14 / 56
D12.3	0.35 - 0.50	I	2119 ± 79	matig	g	5	>25	2010	32.0	11.8	9.5	
D14.0	0.01 - 0.16	I	2147 ± 119					2030	31.4	11.7	5.3	
D14.3	0.65 - 0.80	I-II	1986 ± 102					1960	32.4	10.0	5.9	
D15.2	0.17 - 0.35	I	1857 ± 85					1860	36.0		1.9	- / 0 <sup>3</sup>
D15.3	0.45 - 0.60	II	1799 ± 167	matig	d	5-10	10-17.5	1890	35.4	4.0	4.4	

<sup>1</sup> De nodige toelichting bij de informatie in de tabel is opgenomen aan het begin van paragraaf 8 (blz 39).<sup>2</sup> Druksterkte bepaald op kubussen met afmetingen 70 x 70 x 70 mm<sup>3</sup>, met uitzondering van staal D8.4 (afmetingen 50 x 50 x 50 mm<sup>3</sup>). De maattolerantie van de zijden bedraagt ± 5 mm.<sup>3</sup> Het proefstal brak tijdens de metingen volgend op 14 cycli. De ΔE bedroeg op dat ogenblik -21.7%, terwijl de schade als categorie 4 werd omschreven.



## 9. Terreinmethode

De bouwtechnische kwaliteitsbeoordeling van Diestiaan ijzerzandsteen heeft in de eerste plaats betrekking op i) de druksterkte en ii) de vorstbestendigheid van de bouwsteen. Waar dit onderzoek een positieve correlatie heeft aangetoond tussen de gemiddelde geluidssnelheid, de densiteit, de totale porositeit, de consolidatiegraad op basis van petrografisch onderzoek en een minimaal te verwachten druksterkte, ontbreekt elk eenduidig verband tussen deze materiaalkenmerken en de vorstbestendigheid. Om de vorstbestendigheid van ijzerzandsteen op een eenvoudige wijze te beoordelen lijkt enkel de verdeling van de poriëndiameter in aanmerking te komen, hoewel ook dit verband op basis van de resultaten van dit onderzoek nog niet eenduidig kon worden aangetoond.

Om de **druksterkte** van Diestiaan ijzerzandsteen te beoordelen komen verschillende onderzoekstechnieken in aanmerking. Echter geen enkele ervan lijkt aangewezen als terreinmethode.

- bepaling van de geluidssnelheid: de evaluatie van de gemiddelde geluidssnelheid op basis van een reeks van minstens 10 metingen is de meest voor de hand liggende terreinmethode om de kwaliteit van ijzerzandsteen in-situ te beoordelen, voor zover *telkens* uitgevoerd parallel aan het groefleger. De geluidssnelheid van steenachtige materialen is evenwel afhankelijk van hun vochtgehalte, zodat niet alleen de gemiddelde geluidssnelheid maar ook de actuele vochtigheidsgraad van de ijzerzandsteen zou bepaald moeten worden om een betrouwbare indicatie van de kwaliteit te bekomen. De correlatie tussen het vochtgehalte en de geluidssnelheid, en dit in functie van de kenmerken van de ijzerzandsteen, is tot heden evenwel niet gekend. De inherente heterogeniteit van ijzerzandsteen, die zowel de geluidssnelheid als het vochtgehalte in de natuursteen beïnvloedt, bemoeilijkt sterk de interpretatie van de resultaten bekomen met deze methode. Hoewel de bepaling van de gemiddelde geluidssnelheid in-situ een eerste zeer ruwe indicatie van de kwaliteit zal geven, lijkt enkel de uitvoering van de meting onder gecontroleerde omstandigheden na droging in het laboratorium op proefstukken van reguliere afmetingen (zodat de doorgangsafstand kan worden opgemeten) betrouwbaar.

- bepaling van de consolidatiegraad op basis van DRMS-metingen: de resultaten van de DRMS-metingen hebben uitgewezen dat deze methode niet selectief genoeg is om een (in-situ) kwaliteitsbeoordeling van ijzerzandsteen toe te laten. Een te groot aandeel aan proefstukken wordt als 'zwak geconsolideerd' beoordeeld. Bovendien is er te weinig correlatie tussen dit resultaat en de kwaliteitsbeoordeling op basis van het petrografisch onderzoek, dat een veel betere correlatie vertoont met de druksterkte. Daarnaast stellen zich hier vragen over de praktische uitvoering van deze techniek, gezien enkel stalen met beperkte afmeting kunnen gemeten worden (ong. 5 cm) en van een regelmatige vorm. Rechtstreeks meten op een steenbank stelt dan weer problemen op het vlak van bereikbaarheid van de meetzone gezien het boortoestel opgesteld wordt op een mono- of driepod die op zich gepositioneerd staat op een regelmatig en vast vlak.

Alles in acht genomen is er niet onmiddellijk een betrouwbare in-situ methode voorhanden om de minimaal te verwachten druksterkte van de ijzerzandsteen te evalueren. Enkel de gemiddelde geluidssnelheid lijkt een eerste benadering mogelijk te maken, maar allicht is dit resultaat niet veel verschillend van een zuiver visuele beoordeling van de consolidatiegraad door een geoefend waarnemer. Om echter een betrouwbare indicatie van de druksterkte voor ijzerzandsteen te bekomen is het lichten van stalen en verdere analyse in gecontroleerde omstandigheden aangewezen. Verschillende proefmethoden komen daarbij in aanmerking: i) bepaling van de gemiddelde geluidssnelheid, ii) petrografisch onderzoek, iii) bepaling van de volumieke massa of iv) bepaling van de totale watertoegankelijke porositeit.

Voor de evaluatie van de **vorstbestendigheid** is er, zoals reeds omschreven, niet onmiddellijk een eenvoudige (terrein)methode beschikbaar. De analyse van de verdeling van de poriëndiameter lijkt op basis van het huidige onderzoek het meest hiervoor in aanmerking te komen. Verder onderzoek is

evenwel noodzakelijk om het precieze verband tussen de vorstbestendigheid en de microporositeit enerzijds en de poriënstructuur anderzijds te bepalen. De poriënverdeling van een materiaal wordt doorgaans bepaald aan de hand van kwikintrusie (Hg-porosimetrie). Deze methodiek is geen terreinmethode gezien er tot heden geen portable apparaten bestaan, de metingen niet kunnen uitgevoerd worden op vochtige stalen en de lange meettijd.

De evaluatie van de waterabsorptie van ijzerzandsteen aan de hand van de Karstenpijpmethode, zou als alternatieve terreinmethode in aanmerking kunnen komen. Verder onderzoek is evenwel noodzakelijk om vanuit de kennis van het verband tussen de vorstbestendigheid en de microporositeit/poriënstructuur, de correlatie te leggen met de waterabsorptiekenmerken en bijgevolg de relevantie van de Karstenpijpmethode voor de in-situ evaluatie van de vorstbestendigheid aan te tonen. Uiteraard geldt ook hier het verband tussen het vochtgehalte van de ijzerzandsteen en de resultaten van Karstenpijp metingen dat niet gekend is.

## 10. Algemene conclusie

Dit onderzoek resulteerde in een gedetailleerde petrografische, bouwfysische en bouwmechanische beschrijving van de Diestiaan ijzerzandsteen op basis van materiaal gelicht in 5 typelocaties in het Hageland. Een technische fiche kon hierbij opgesteld worden voor de beschrijving van dit type natuursteen.

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. Hierbij werd het belang aangehaald van gecontroleerde uitvoeringsomstandigheden. Onder meer de invloed van het vochtgehalte werd aangestipt, waardoor de inzet van deze methode als terreinmethode niet evident is. Onder gecontroleerde laboratoriumomstandigheden is het evenwel mogelijk deze methode in te zetten om de kwaliteit van de ijzerzandsteen te beoordelen, en dit voor zover de metingen uitgevoerd zijn op stalen van reguliere afmetingen, parallel aan het groefleger en op een wijze waarbij de resultaten voldoende statistisch benaderd werden.

De consolidatiegraad kon tevens in verband gebracht worden met de druksterkte. Een goed geconsolideerde ijzerzandsteen levert door de band genomen een bouwsteen op die voor de meest uiteenlopende toepassingen kan ingezet worden, zelfs wanneer de druklast toeneemt. Enkel voor zeer sterk belaste toepassingen, zoals kolommen en gewelvbogen, is een betere evaluatietechniek noodzakelijk. Momenteel kan dit alleen mits de uitvoering van drukproeven. De kwantificering van het cementgehalte en de identificatie van het limonietcement, afgeleid uit petrografisch onderzoek, als criterium om tot een beter onderscheid binnen de als goed geconsolideerde ijzerzandsteen te komen, is voorlopig te beperkt. Verder onderzoek is in dit kader nodig om een betere beschrijving van de eigenschappen van dergelijke ijzerzandsteen mogelijk te maken.

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. De inschatting van de vorstgevoeligheid op basis van beschikbare literatuurgegevens stemt evenwel niet overeen met de resultaten van de experimentele vorst-dooi proeven. Bijkomend onderzoek is bijgevolg vereist om de gepaste grenswaarden te definiëren voor dit type natuursteen. Deze benadering biedt tevens een mogelijke piste tot een eenvoudige terreinmethode op basis van een Karstenpijpmeting. Ook op dit vlak is echter bijkomend onderzoek nodig om deze methode te valideren.

Op het vlak van de inzetbaarheid van de ijzerzandsteen in de restauratie van historische gebouwen kan worden besloten dat op de 5 typelocaties steeds materiaal kan worden gevonden dat bruikbaar is. De hoeveelheid aan materiaal, net als de inzetbaarheid ervan voor bepaalde toepassingen, varieert per site. De analyse toont echter aan dat voor eender welke mogelijke toepassing, zij het binnen of buiten, zij het mechanisch zwaar belast of niet, er steeds ijzerzandsteen kan gevonden worden die aan de gestelde materiaaltechnische eisen voldoet.

De analyse van de continuïteit van de steenbanken over de gekerde boringen heen tot in de dagzomende ontsluitingen levert een gevarieerd beeld op. Voor de sites te Herent, Pellenberg en Rotselaar was de afstand tussen de kernboringen en de ontsluiting te groot om een correlatie te realiseren. Daar waar twee kernboringen op relatief korte afstand tot elkaar werden gelicht (Wezemaal) kan evenwel een positieve correlatie worden gevonden tussen de kernboringen op basis van een globale kwaliteitsbeoordeling van de ijzerzandsteen, zonder dat evenwel individuele steenbanken hierin kunnen toegekend worden. Uit dit onderzoek wordt te meer geconcludeerd dat het verloop van de ijzerzandsteenlagen op relatief korte afstand een onregelmatig patroon volgt en eenzelfde laag grote verschillen in materiaalkenmerken kan vertonen. In deze context lijkt het

aangewezen om het verder vrijleggen van de ijzerzandsteenbanken aan de Langenberg te Diest nauw op te volgen om het aantal alsook het diepteverloop van de vermoedelijk twee aanwezige steenbanken in het talud beter geografisch te kunnen inschatten.

## 11. Perspectieven voor verder onderzoek

Zoals kon worden verwacht werd met dit onderzoek geen eindpunt bereikt, maar roept het nieuwe vragen op die perspectieven bieden voor verder onderzoek:

- de kwantificering van het cementgehalte en de identificatie van het limonietcement: enerzijds wordt hierdoor een nauwkeuriger petrografische beschrijving bekomen, anderzijds opent het mogelijkheden om de classificatiemethodiek voor de consolidatiegraad te optimaliseren. Het lijkt niet uitgesloten dat aan de hand van geoptimaliseerd petrografisch onderzoek de druksterkte van ijzerzandsteen nauwkeuriger kan worden geïnterpreteerd, meer bepaald met betrekking tot ijzerzandsteen met een druksterkte van 15 MPa of meer.
- de mogelijkheid tot consolidatie: de evaluatie van het effect van steenverstevigende behandeling heeft aangetoond dat verder onderzoek naar de polymerisatiekenmerken van het steenverstevend product aangewezen is, onder meer door middel van FT-IR spectroscopie om de werkzaamheid van het product op te volgen en dit in functie van de kenmerken van de ijzerzandsteen. Momenteel is nog niet gekend welke factoren (type cement, glauconiet, ...) bepalend zijn voor het welslagen van een verstevigende behandeling.
- de evaluatie van een mogelijke correlatie tussen de poriënstructuur en de vorstbestendigheid: in het kader van dit onderzoek kon het verband tussen de poriënstructuur, bepaald door middel van kwikintrusie, en de vorstbestendigheid vooralsnog niet geëvalueerd worden. De kwikporosimetrie werd voorlopig enkel bepaald op stalen afkomstig van de Langenberg te Diest, waar slechts 3 stalen op hun vorstbestendigheid werden geëvalueerd. Ook de vergelijking van de verdeling van de poriëndiameter met de criteria voor vorstbestendigheid uit de beschikbare literatuur laat nog ruimte voor interpretatie en verder onderzoek.
- de evaluatie van de Karstenpijpmethode als terreinmethode: een mogelijk verband tussen de poriënstructuur en de vorstbestendigheid opent perspectieven voor het gebruik van de Karstenpijpmethode ter beoordeling van de vorstbestendigheid als kwaliteitscriterium van ijzerzandsteen. Verder onderzoek is noodzakelijk om vanuit de kennis van het verband tussen vorstbestendigheid en microporositeit/poriënstructuur, de correlatie te leggen met de waterabsorptiekenmerken en bijgevolg de relevantie aan te tonen van de Karstenpijpmethode, of een gelijkwaardige pijpmethode, als terreinmethode voor de evaluatie van de vorstbestendigheid.
- de studie van het geografisch verloop van de ijzerzandsteenbanken: op basis van het huidig onderzoek kan worden afgeleid dat het verloop van de ijzerzandsteenbanken zeer waarschijnlijk een grillig patroon kent met bovendien sterke kwaliteitsvariaties op beperkte schaal. Dit onderzoek is echter gebaseerd op materiaal bekomen uit enkele kernboringen, die op enige afstand van elkaar gelegen zijn en bijgevolg eerder een lokaal beeld geven van de verticale stratigrafie. Het verder vrijleggen van de ijzerzandsteenbanken aan de Langenberg te Diest biedt hier echter een opportuniteit om meer inzicht te verwerven in het stratigrafisch verloop van de natuursteenbanken.





**Onderzoeksproject VLA11-4.1**

**Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen  
met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen**

**Bijlage I**

**Geologische macroscopische studie, selectie stalen en overzicht analyses**

D : 2012.11586

*Aanvrager:* Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON)

*Contactpersoon:* Mevr. Griet Verhaert

*Uitvoering:* Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK)  
Departement Labo, Cel Monumenten  
*Laurent Fontaine en Roald Hayen*

*Verslaggeving:* Roald Hayen

*Datum:* 30 september 2013

## Inhoudsopgave

1. Introductie .....	3
2. Overzicht van de stalen .....	4
Site I: Roeselberg (Herent) .....	5
Kernboringen .....	6
Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1) .....	6
Losse fragmenten .....	11
Fragment H/F8 .....	11
Fragment H/F9 .....	12
Fragment H/F10 .....	13
Site II: Gasthuisbos (Pellenberg).....	14
Kernboringen .....	15
Kernboring VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1) .....	15
Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2) .....	19
Losse fragmenten .....	24
Fragment P/F3.....	24
Fragment P/F4.....	25
Site III: Beninksberg (Wezemaal).....	26
Kernboringen .....	27
Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1).....	27
Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2).....	31
Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3).....	36
Losse fragmenten .....	41
Fragment W/F1 & W/F2 .....	41
Site IV: Middelberg (Rotselaar) .....	42
Kernboringen .....	43
Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1) .....	43
Kernboring VLA10-4.1-B8 (075W/0390 R2) .....	48
Losse fragmenten .....	52
Fragment R/F5 .....	52
Fragment R/F6 .....	53
Fragment R/F7 .....	54
Site V: Langenberg (Diest).....	55
Kernboringen .....	56
Kernboring D1 .....	59
Kernboring D2 .....	60
Kernboring D3 .....	61
Kernboring D4 .....	62
Kernboring D5 .....	63
Kernboring D6 .....	64
Kernboring D7 .....	65
Kernboring D8 .....	66
Kernboring D9 .....	67
Kernboring D10 .....	68
Kernboring D11 .....	69
Kernboring D12 .....	70
Kernboring D13 .....	71
Kernboring D14 .....	72
Kernboring D15 .....	73

## 1. Introductie

Tabel 1 geeft een overzicht van de geselecteerde stalen per site in functie van de uitgevoerde analyses.

Tabel 1. Overzicht van het aantal geselecteerde stalen in functie van de site en de analyse. Indien op eenzelfde staal meerdere analyses zijn uitgevoerd, wordt het aantal analyses tussen haakjes weergegeven.

Gemeente, Site	Kernboringen [kernen] <sup>1</sup>	Losse fragmenten	Petrografische studie <sup>2</sup>	Vol. massa en porositeit <sup>2</sup>	Druksterkte <sup>2</sup>	Elasticiteitsmodulus <sup>2</sup>	Hardheidsprofiel <sup>2</sup>	Verstevigende proefbehandeling <sup>2</sup>	Vorstbestendigheid <sup>2</sup>	
Herent, Roeselberg VLA10-4.1-B1	1 [4]		7/0/0	4(6)/0/0	4/0/0	2/0/0	6/0/0	6/0/0	2/0/0	
		3	3	3(5)	2	3	3	3	3	
Pellenberg, Gasthuisbos VLA10-4.1-B2 VLA10-4.1-B3	2 [7]		2/1/5	2/0/2	1/0/2	1/0/0	2/5/6	2/5/6	1/0/0	
		2	2	2(4)	2	2	2	2	2	
Wezemaal, Beninksberg VLA10-4.1-B4 VLA10-4.1-B5 VLA10-4.1-B6	3 [11]		3/1/4	5/2/4(6)	3/2/3	2/0/3	3/1/4	3/1/4	2/0/3	
		2	2	0	0	0	0	0	0	
Rotselaar, Middelberg VLA10-4.1-B7 VLA10-4.1-B8	2 [7]		5/0/1	3(5)/0/0	3/0/0	2/0/0	5/1/3	5/1/3	2/0/0	
		3	2	2(3)	1	1	2	2	1	
Diest, Langenberg	15		6/0/6	10/2(4)/4	8/2(4)/3	2/0/1	6/0/6	6/0/6	2/0/1	
		0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Totaal</b>	<b>Kernboringen &gt;</b>	<b>8 [29]</b>	<b>10</b>	<b>29</b>	<b>22(28)</b>	<b>17</b>	<b>10</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>10</b>
	<b>Langenberg, Diest &gt;</b>	<b>15</b>		<b>12</b>	<b>16(18)</b>	<b>13(15)</b>	<b>3</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>3</b>
	<b>Losse fragmenten &gt;</b>		<b>9</b>	<b>6(12)</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	
<b>Gloobaal totaal</b>			<b>50</b>	<b>44(58)</b>	<b>35(37)</b>	<b>19</b>	<b>55</b>	<b>55</b>	<b>19</b>	

<sup>1</sup> Het eerste cijfer geeft het aantal kernboringen weer die werden uitgevoerd, het tweede cijfer [tussen vierkante haakjes] het aantal kernen die uit deze kernboringen werden gelicht voor nader onderzoek. Elke volledige boorkern werd immers opgedeeld in verschillende kernen met een lengte van ca. 75 tot 100 cm voor het transport en de opslag.

<sup>2</sup> De cijfers volgens de verschillende thema's van het onderzoeksproject geven het aantal stalen weer per type onderzoek volgens respectievelijk de klassen I, I tot II en II.

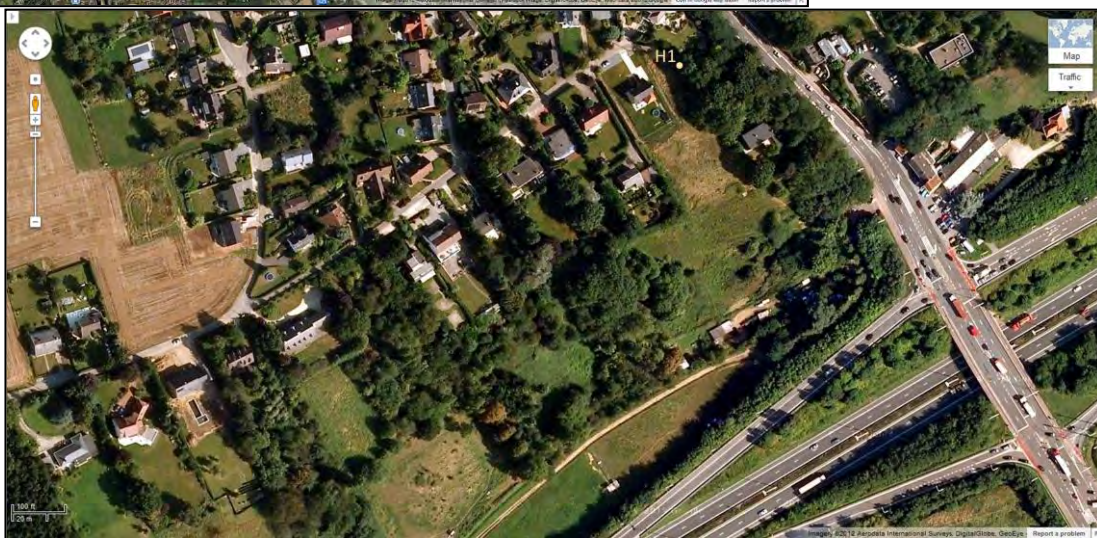
## 2. Overzicht van de stalen

Hiernavolgend wordt per site een overzicht gegeven van de verschillende boorkernen en de losse fragmenten met een volledige beschrijving van de stalen en analyses, inbegrepen een verantwoording van de gemaakte keuzes.

Voor de codering van de stalen wordt verwezen naar bijlage X: *Vergelijkende tabel voor de benamingen van de proefstukken*. Aan de stalen waarop enkel geluidssnelheidsmetingen zijn uitgevoerd werd geen code toegekend.

## Site I

### Roeselberg (Herent)



#### Overzicht

Kernboringen: VLA10-4.1-B1

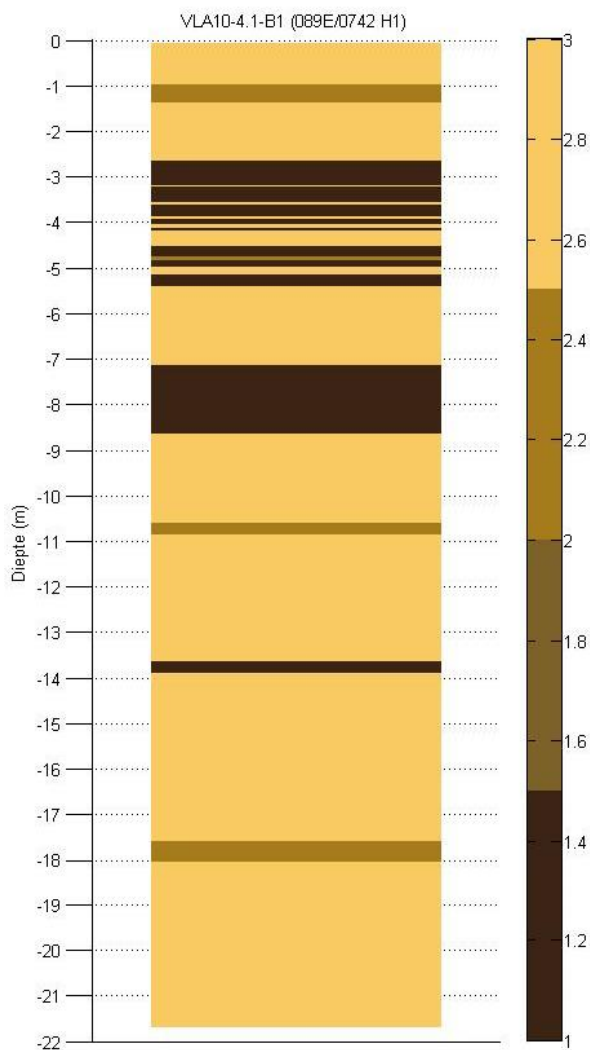
4 kernen werden bemonsterd

Ontsluiting: -

3 losse fragmenten



### Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1)



Op basis van de boorkern van kernboring VLA10-4.1-B1 kunnen een 4-tal steenbanken van goede kwaliteit herkend worden (klasse I).


Kern C2/1 bevat de bovenste zijde van de eerste steenbank (ca. 2.65 - 4.05 m diepte).


Kern C3/2 bevat het merendeel van de tweede steenbank (ca. 4.55 - 5.41 m diepte).

Op grotere diepte (ca. 7.15 - 8.65 m) komt een zeer brede steenbank voor van goede kwaliteit (klasse I). Deze steenbank zit verdeeld over kernen C5/1 en C5/2. Beide kernen worden in het onderzoek opgenomen.


Tenslotte komt op grote diepte (bijna 14 m diepte) nog een dunne laag van goede kwaliteit ijzerzandsteen voor. Gezien de geringe laagdikte en de grote diepte lijkt deze laag minder interessant om aan te boren en wordt het onderzoek beperkt tot de hoger gelegen steenbanken.


*Begeleidende beschrijving bij de figuur:* De figuur geeft een overzicht van de kwaliteit van de ijzerzandsteen in de gekernde boring volgens de beschrijving opgemaakt onmiddellijk na het lichten van de kernen. Dhr. Michiel Duser van de Belgische Geologische Dienst hanteerde bij de beschrijving een klasse-indeling gaande van I tot II met de mogelijkheid om een overgangskwaliteit (I tot II) aan te duiden. De verschillende kwaliteiten zijn in de grafische weergave van de gekernde boring met kleuren aangeduid, waarbij de betere kwaliteit (klasse I) ijzerzandsteen door een donkerbruine kleur wordt weergegeven. Naarmate de kwaliteit afneemt, wordt de kleur lichter tot uiteindelijk een gele tint wordt bekomen voor los samenhangend zand en klei (onafhankelijk of dit ijzerhoudend zand of een andere formatie betreft).

Roeselberg (Herent) Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C2/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	I		2.65	2.70	5	✓							
	I		2.70	2.84	14	✓							
	I	H1/1	2.84	3.18	34	✓	✓ ✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	I		3.18	3.34	16	✓							
	I		3.34	3.53	19	✓							

Roeselberg (Herent) Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C3/2													
	Klasse <sup>1</sup>	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
			4.76	4.79	3								
	I	H1/2	4.79	4.95	16	✓	✓				✓	✓	
	I/II		4.95	5.13	18	✓							
	I		5.13	5.26	13	✓							
			5.26	5.39	13								
	I	H1/3	5.39	5.58	19	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
	I		5.58	5.65	7	✓							

<sup>1</sup> De code I/II geeft weer dat het fragment uit verschillende zones bestaat, gekenmerkt door hetzij kwaliteit I hetzij kwaliteit II.

Roeselberg (Herent) Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C5/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
			7.15	7.18	3								
	I	H1/4	7.18	7.47	29	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	I		7.47	7.69	22	✓							

Roeselberg (Herent) Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C5/2													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	I		7.69	7.89	20	✓							
	I	H1/5	7.89	8.07	18	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
			8.07	8.10	3								
	I		8.10	8.27	17	✓							
			8.27	8.29	2								
	I	H1/6	8.29	8.53	24	✓	✓				✓	✓	



Roeselberg (Herent) Los fragment nr. 8													
	Klasse	Staal	Lengte [cm]	Breedte [cm]	Dikte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid

	H/F8			10-15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
--	------	--	--	-------	---	---	---	---	---	---	---	---



bovenaanzicht



zijaanzicht



zijaanzicht

Roeselberg (Herent) Los fragment nr. 9												
Klasse	Staal	Lengte [cm]	Breedte [cm]	Dikte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid

H/F9				8-10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
------	--	--	--	------	---	---	---	---	---	---	---	---



bovenaanzicht



zij aanzicht

Roeselberg (Herent) Los fragment nr. 10													
	Klasse	Staal	Lengte [cm]	Breedte [cm]	Dikte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid

H/F10					8	✓	✓			✓	✓	✓	✓
-------	--	--	--	--	---	---	---	--	--	---	---	---	---



zijaanzicht

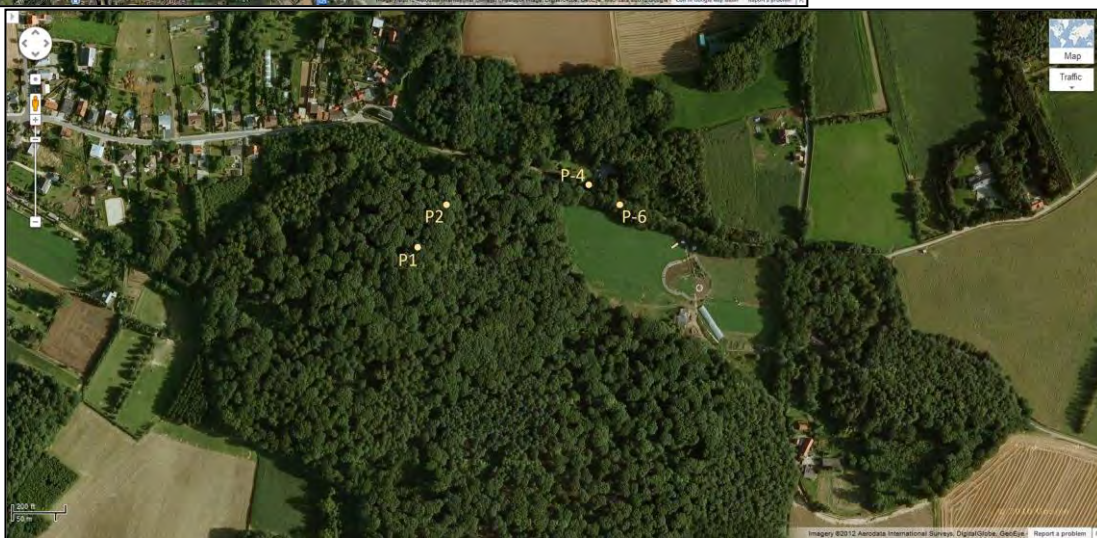


bovenaanzicht



## Site II

### Gasthuisbos (Pellenberg)



#### Overzicht

Kernboringen: VLA10-4.1-B2 en VLA10-4.1-B3

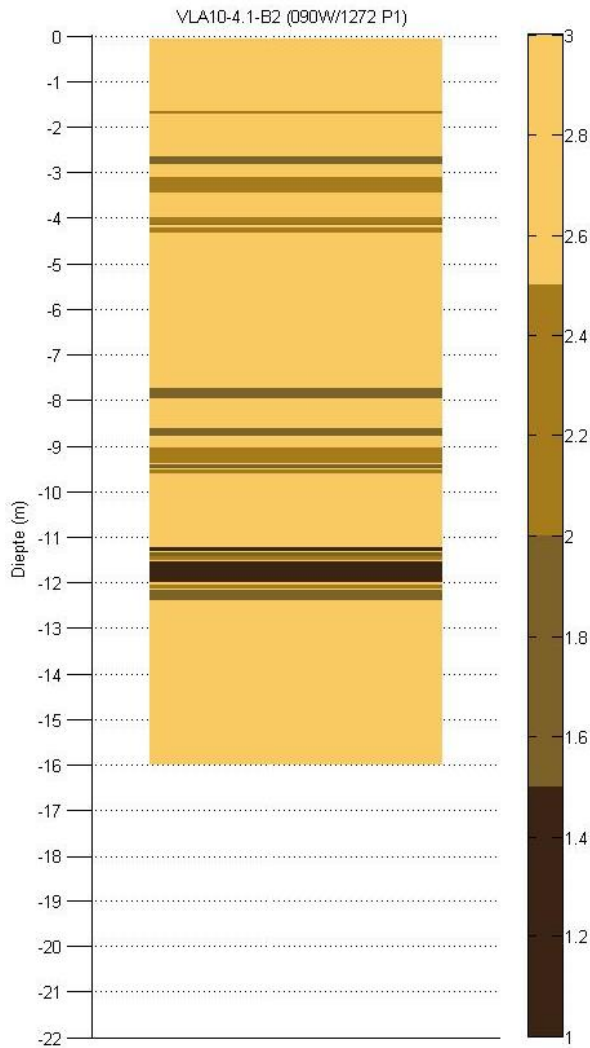
7 kernen werden bemonsterd

Ontsluiting: P-4 (linksonder) en P-6 (rechtsonder)

2 losse fragmenten



### Kernboring VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1)



Op een diepte van 3.30 tot 3.63 m wordt een wat bredere zone van klasse II opgemerkt. De fragmenten zijn opgenomen in kern C2/2 en zijn vrijwel intact volgens de lengtes zoals deze werden opgetekend vlak na het lichten van de boorkern.

Op een diepte tussen ca. 8.60 en 9.60 m komt een wat betere zone voor. Kern C6/1 bevat bovenaan twee fragmenten van klasse I tot II. Aan de onderzijde worden twee fragmenten waargenomen van klasse II met een sterk hellend breukvlak. De dieperliggende zone van klasse I-II en II (kern C6/2) is aan de randen te sterk afgebrokkeld en daardoor minder interessant.


De beste kwaliteit ijzerzandsteen komt voor tussen ca. 11.25 en 11.51 m diepte en is omschreven als klasse I en I-II. De globale lengtes stemmen overeen met de beschrijving van de gekerde boring. De barsten vertonen echter een scherpe helling, zodat de effectieve lengte van de stalen te klein is om bruikbaar te zijn. Kern C8/1 bevat eveneens verschillende goede fragmenten, die evenwel - in vergelijking met de oorspronkelijke boorbeschrijving - in verschillende delen gebroken zijn.



Gasthuisbos (Pellenberg) Kernboring VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1), kern C2/2													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



			3.07	3.25	18								
II			3.25	3.30	5	✓							
II	P1/1		3.30	3.48	18	✓	✓				✓	✓	
II			3.48	3.52	4	✓							
II	P1/2		3.52	3.63	11	✓		✓	✓				
			3.63	3.70	7								
			3.70	3.75	5								
			3.75	3.80	5								
			3.80	4.00	20								

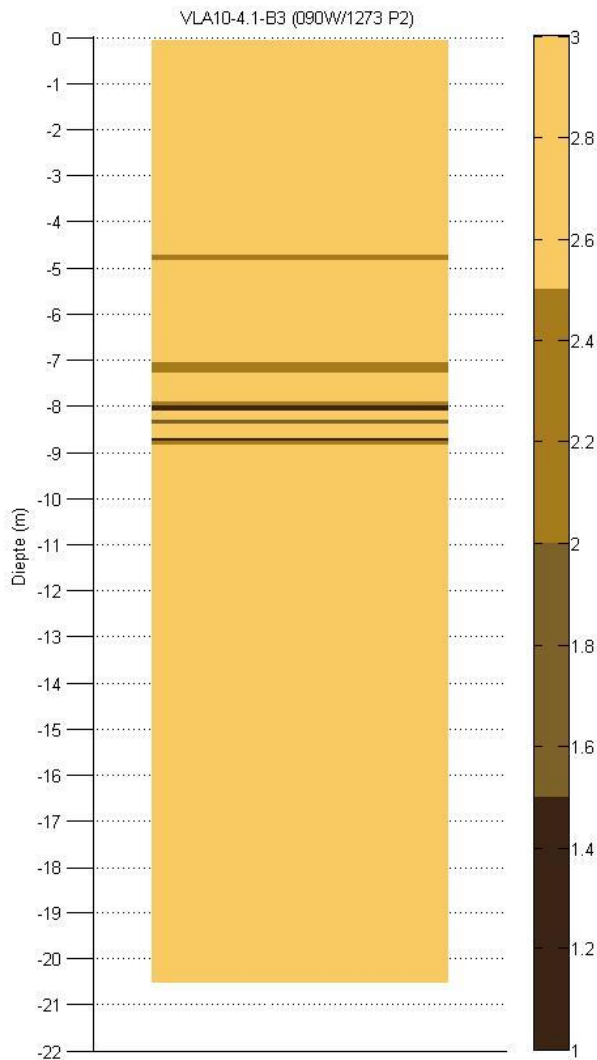
Gasthuisbos (Pellenberg) Kernboring VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1), kern C6/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
			8.50	8.64	14								
	I-II	P1/3	8.64	8.74	10	✓	✓				✓	✓	
	I-II	P1/4	8.74	8.81	7	✓					✓		
			8.81	8.86	5	✓							
			8.86	8.89	3	✓							
			8.89	9.07	18								
	II	P1/5	9.07	9.21	14	✓					✓		
	II	P1/6	9.21	9.37	16	✓	✓	✓	✓		✓		

Gasthuisbos (Pellenberg) Kernboring VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1), kern C8/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



			11.50	11.55	5								
I	P1/7		11.55	11.77	22	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
I			11.77	11.79	2								
I			11.79	11.84	5	✓							
I	P1/8		11.84	12.00	16	✓				✓	✓	✓	✓
			12.00	12.02	2								
II			12.02	12.13	11	✓							
I-II	P1/9		12.13	12.19	6	✓					✓		
I-II			12.19	12.21	2								
I-II	P1/10		12.21	12.26	5	✓					✓	✓	
I-II			12.26	12.37	11	✓							


### Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2)




De boorkern van kernboring VLA10-4.1-B3 bevat globaal weinig materiaal van goede kwaliteit. Enkele, eerder dunnere zones van wisselende kwaliteit kunnen worden onderscheiden.


Kern C5/1 bevat een bredere zone van klasse II. In kern C5/2 komt verder een wat langer fragment voor van wisselende kwaliteit. Aan de bovenste helft van dit fragment wordt klasse II toegekend, de onderste helft klasse I. De onderzijde van het fragment is licht afbrokkelend. Onderaan kern C5/2 is nog een fragment van klasse I tot II aanwezig.

Een laatste fragment werd gelicht uit kern C6. Ook dit fragment wordt gekenmerkt door een wisselende kwaliteit.


Gasthuisbos (Pellenberg) Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2), los fragment uit kern C3/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	II	P2/1	4.73	4.86	13	✓					✓		



Gasthuisbos (Pellenberg) Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2), kern C5/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
			7.00	7.06	6								
	II		7.06	7.12	6	✓							
	II	P2/2	7.12	7.41	29	✓	✓ ✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Gasthuisbos (Pellenberg) Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2), kern C5/2													
	Klasse <sup>1</sup>	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
			7.50	7.63	13	✓							
			7.63	7.68	5	✓							
			7.68	7.92	24								
	II/I	P2/3	7.92	8.24	32	✓	✓ ✓				✓		
			8.24	8.38	14								
	I-II		8.38	8.48	10	✓							

<sup>1</sup> De code I/II geeft weer dat het fragment uit verschillende zones bestaat, gekenmerkt door hetzij kwaliteit I, hetzij kwaliteit II

Gasthuisbos (Pellenberg) Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2), los fragment uit kern C6													
	Klasse <sup>1</sup>	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	I/II	P2/4	8.70	8.84	14	✓					✓		

<sup>1</sup>De code I/II geeft weer dat het fragment uit verschillende zones bestaat, gekenmerkt door hetzij kwaliteit I, hetzij kwaliteit II

Gasthuisbos (Pellenberg) Los fragment nr. 3 (ontsluiting P-4)													
	Klasse	Staal	Lengte [cm]	Breedte [cm]	Dikte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid

I-II	P/F3				25-30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
------	------	--	--	--	-------	---	---	---	---	---	---	---	---



bovenaanzicht



zijaanzicht

Gasthuisbos (Pellenberg) Los fragment nr. 4 (ontsluiting P-6)													
	Klasse	Staal	Lengte [cm]	Breedte [cm]	Dikte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid

I	P/F4				20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
---	------	--	--	--	----	---	---	---	---	---	---	---	---



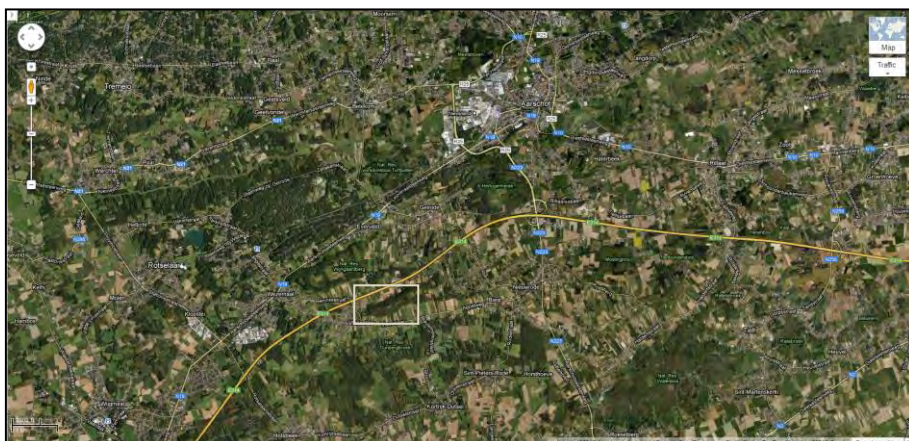
bovenaanzicht



onderaanzicht

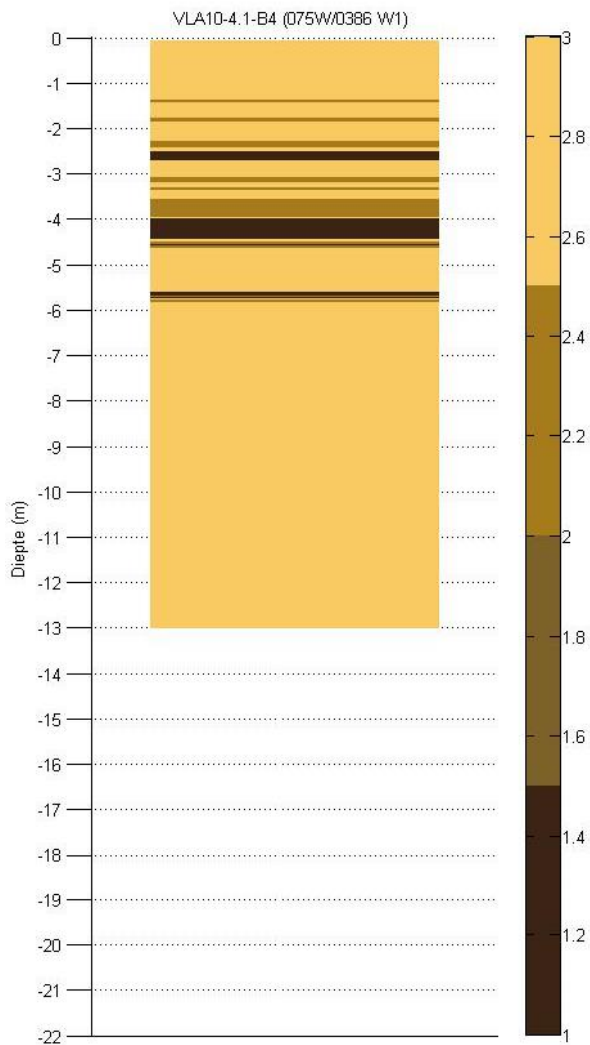


**Site III**  
**Beninksberg**  
**(Wezemaal)**




<b>Overzicht</b>
Kernboringen: VLA10-4.1-B4, VLA10-4.1-B5 en VLA10-4.1-B6 11 kernen werden bemonsterd
Ontsluiting: W-1(a & b) 2 losse fragmenten

### Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1)



Tot een diepte van 3.95 m komen in boorkern VLA10-4.1-B4 vooral kleinere brokstukken voor. Hierin zit weinig bruikbaar materiaal vervat (zowel voor de zones omschreven als klasse I, als deze van klasse II). Alleen aan de onderzijde van deze zone kan een wat groter fragment (kern C2/2) worden teruggevonden.

Vanaf 3.95 m komt een bredere zone van klasse I voor. Verschillende fragmenten van deze zone zitten vervat in kern C3/1. Hun lengte is over het algemeen eerder beperkt. Bovendien is het onderste fragment in deze zone over de langsrichting heen gebarsten. Een enkel fragment van redelijke lengte en klasse I is beschikbaar. Naar onderen toe komt ook nog een fragment van wisselende kwaliteit voor. Het enige grotere fragment in boorkern VLA10-4.1-B4 wordt teruggevonden in kern C4/1. Bij de oorspronkelijke beschrijving van de boorkern werd dit fragment met een wisselende kwaliteit omschreven.

Beninksberg (Wezemaal) Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1), los fragment uit kern C2/2													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	II	W1/1	3.71	3.85	14	✓				✓			✓

**Beninksberg (Wezemaal)**  
 Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1), kern C3/1

	Klasse <sup>1</sup>	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
--	---------------------	-------	---------	---------	-------------	-----------------	-----------------------	--------------------------	-------------	----------------------	------------------	-------------------------------	--------------------




I			3.95	4.01	6	✓							
I			4.01	4.10	9	✓							
I			4.10	4.15	5								
I		W1/2	4.15	4.31	16	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
			4.31	4.34	3								
I <sup>2</sup>			4.34	4.43	9	✓							
			4.43	4.52	9								
II/I/II			4.52	4.64	12	✓							
			4.64	4.81	17								

<sup>1</sup>De code I/II geeft weer dat het fragment uit verschillende zones bestaat, gekenmerkt door hetzij kwaliteit I, hetzij kwaliteit II.

<sup>2</sup>Het onderste fragment van klasse I is over de langsrichting heen gebarsten.

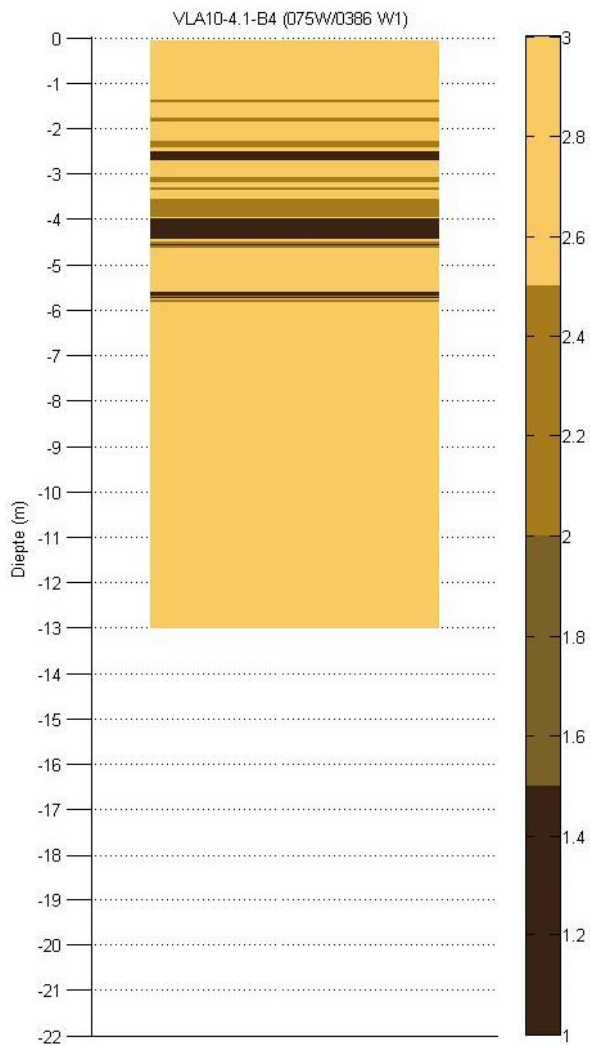


Beninksberg (Wezemaal) Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1), kern C4/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
			5.45	5.59	14								
	I-II	W1/3	5.59	5.81	22	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
			5.81	5.88	7								

Dit fragment wordt van boven naar onder achtereenvolgens omschreven als klasse I / II / I / II.



### Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1)




Tot een diepte van 3.95 m komen in boorkern VLA10-4.1-B4 vooral kleinere brokstukken voor. Hierin zit weinig bruikbaar materiaal vervat (zowel voor de zones omschreven als klasse I, als deze van klasse II). Alleen aan de onderzijde van deze zone kan een wat groter fragment (kern C2/2) worden teruggevonden.

Vanaf 3.95 m komt een bredere zone van klasse I voor. Verschillende fragmenten van deze zone zitten vervat in kern C3/1. Hun lengte is over het algemeen eerder beperkt. Bovendien is het onderste fragment in deze zone over de langsrichting heen gebarsten. Een enkel fragment van redelijke lengte en klasse I is beschikbaar. Naar onderen toe komt ook nog een fragment van wisselende kwaliteit voor. Het enige grotere fragment in boorkern VLA10-4.1-B4 wordt teruggevonden in kern C4/1. Bij de oorspronkelijke beschrijving van de boorkern werd dit fragment met een wisselende kwaliteit omschreven.

Beninksberg (Wezemaal) Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2), kern C3/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



			3.15	3.20	5								
I	W2/1		3.20	3.39	19	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
I	W2/2		3.39	3.55	16	✓				✓			✓
I			3.55	3.61	6	✓							
I			3.61	3.68	7	✓							
I			3.68	3.78	10	✓							
I			3.78	3.83	5	✓							

Beninksberg (Wezemaal) Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2), kern C3/2													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	II	W2/3	3.90	4.37	47	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
			4.37	4.56	19								

Beninksberg (Wezemaal) Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2), kern C5/2													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



			6.70	6.87	17								
II			6.87	7.03	16	✓							
II			7.03	7.18	15								
II			7.18	7.30	12	✓							
II			7.30	7.42	12	✓							
			7.42	7.46	4								
			7.46	7.62	16	✓							

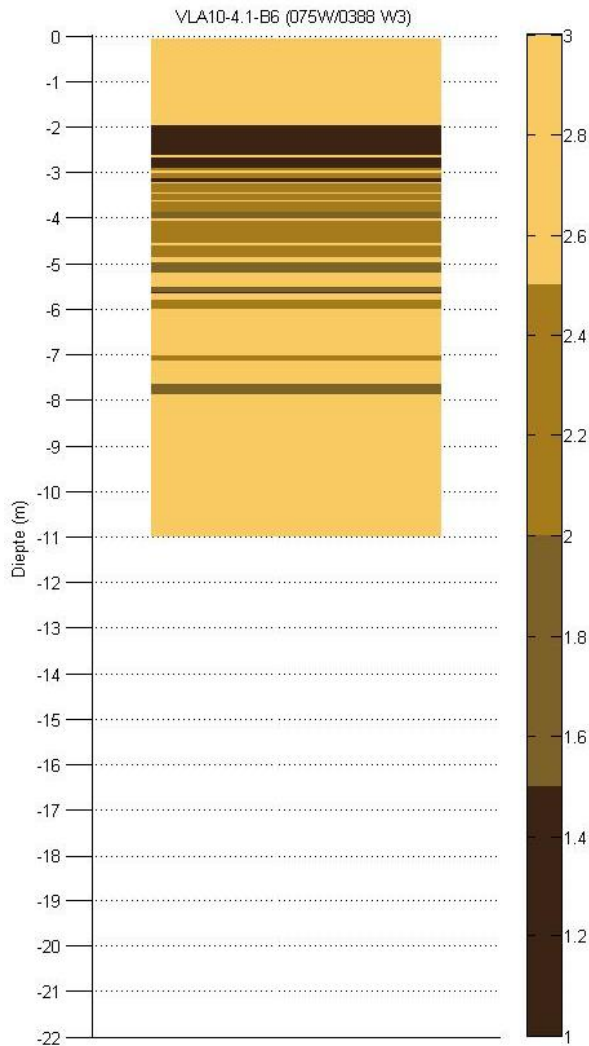
Beninksberg (Wezemaal) Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2), kern C6/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid




			7.65	7.75	10								
			7.75	7.78	3								
	II	W2/4	7.78	8.05	27	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	II		8.05	8.12	7	✓							
			8.12	8.57	45								




### Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3)





Op een diepte van 2.00 tot 2.65 m komt in de oorspronkelijke beschrijving van de boorkern van kernboring VLA10-4.1-B6 een brede zone van klasse I voor. Deze zone is, net als bij de andere boorkernen van deze locatie, echter sterk gebarsten. Uiteindelijk worden vooral eerder kleinere fragmenten waargenomen. Enkel een tweetal grotere fragmenten zijn mogelijk bruikbaar voor een volledig onderzoek (incl. druksterkte en elasticiteitsmodulus). Vanaf ca. 3.00 tot 6.00 m komen verschillende lagen voor van vooral klasse II ijzerzandsteen. Deze zone zit vervat in de kernen C2/2, C3/1 en C3/2. Hierin kunnen verschillende fragmenten met een lengte van ca. 12 tot 20 cm worden teruggevonden.

Beninksberg (Wezemaal) Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3), kern C2/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
			2.00	2.05	5								
	I		2.05	2.13	8	✓							
	I		2.13	2.21	8								
	I		2.21	2.29	8	✓							
	I		2.29	2.33	4	✓							
	I		2.33	2.37	4	✓							
	I		2.37	2.45	8	✓							
	I	W3/1	2.45	2.55	10	✓	✓	✓	✓				
	I	W3/2	2.55	2.66	11						✓	✓	
				2.66	2.69	3							

Beninksberg (Wezemaal) Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3), kern C2/2													
	Klasse <sup>1</sup>	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	I	W3/3	2.75	2.87	12	✓				✓			✓
	I/II		2.87	3.01	14	✓							
	II		3.01	3.12	11	✓							
	II		3.12	3.19	7	✓							
	I		3.19	3.27	8	✓							
	II		3.27	3.29	2								
	II		3.29	3.40	11	✓							

<sup>1</sup>De code I/II geeft weer dat het fragment uit verschillende zones bestaat, gekenmerkt door hetzij kwaliteit I hetzij kwaliteit II.

Beninksberg (Wezemaal) Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3), kern C3/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	II		3.50	3.60	10	✓							
	II		3.60	3.65	5								
	II	W3/4	3.65	3.86	21	✓	✓				✓	✓	
	I-II	W3/5	3.86	3.98	12	✓		✓	✓				
				3.98	4.00	2							
				4.00	4.06	6	✓						
	II		4.06	4.20	14	✓							

Beninksberg (Wezemaal) Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3), kern C3/2													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	II		4.25	4.32	7	✓							
	II		4.32	4.40	8	✓							
	II		4.40	4.57	17	✓							
	II	W3/6	4.57	4.70	13	✓							
	II	W3/7	4.70	4.90	20	✓	✓	✓	✓		✓	✓	

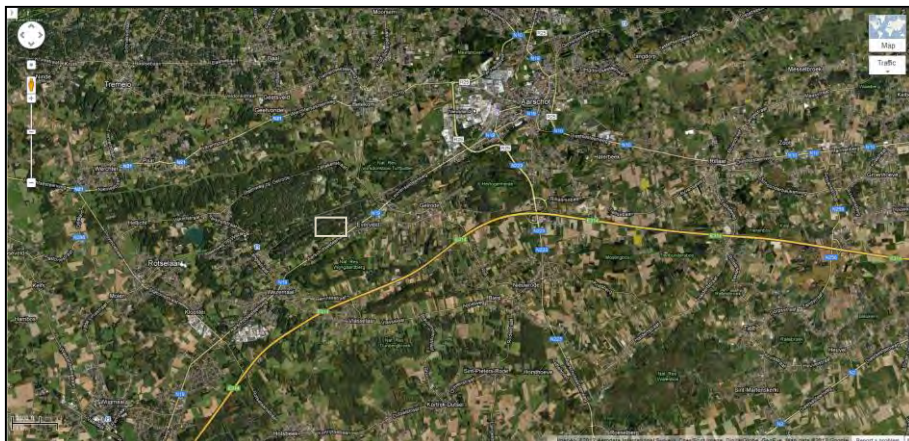


Beninksberg (Wezemaal) Losse fragmenten nrs. 1 & 2													
	Klasse	Staal	Lengte [cm]	Breedte [cm]	Dikte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid

W/F1 (links)							✓						
W/F2 (rechts)							✓						



**Site IV**  
**Middelberg**  
**(Rotselaar)**



**Overzicht**

Kernboringen: VLA10-4.1-B7 en VLA10-4.1-B8

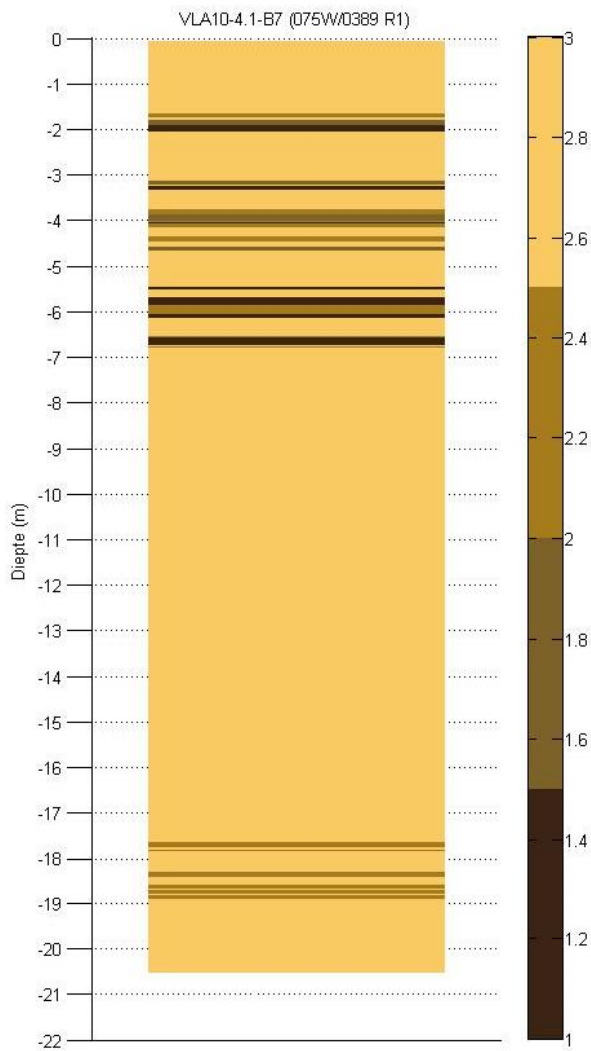
8 kernen werden bemonsterd

Ontsluiting: R-2

2 losse fragmenten



### Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1)



De boorkern van kernboring VLA10-4.1-B7 bevat enkele, eerder dunne lagen van zowel klasse I als klasse II kwaliteit.


De zone van klasse I op een diepte van ca. 2.00 m bevat vooral kleinere fragmenten, die minder geschikt zijn voor verder onderzoek.

Pas vanaf 3.25 m tot een diepte van 4.17 m komen wat bredere steenbanken voor (kern C3/1). Bovenaan in deze zone is een relatief brede laag van klasse I waarneembaar. Naar onderen toe komt vooral klasse I tot II en II voor. Een enkel langer fragment van klasse I tot II werd geselecteerd voor verder onderzoek.

De zone tussen ca. 5.50 en 6.80 m diepte zit vervat in de kernen C4/2 en C5. Een tweetal lagen van klasse I worden in deze zone waargenomen met aan de randen een overgang naar klasse II en tussenin wat ijzerhoudend zand. De lengte van de beschikbare fragmenten is over het algemeen zeer beperkt. Een tweetal grotere fragmenten van klasse I lijken bruikbaar voor verder onderzoek.

Op grote diepte (ca. 17.65 - 19.00 m) komt ook nog wat kwaliteit II ijzerzandsteen voor. Een enkel fragment werd uit deze zone in kern C13/1 gelicht voor verder onderzoek.



Middelberg (Rotselaar) Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1), kern C3/1													
	Klasse <sup>1</sup>	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	I		3.25	3.39	14	✓							
			3.39	3.76	37								
	II		3.76	3.82	6	✓							
	II		3.82	3.85	3								
	I-II	R1/1	3.85	4.04	19	✓					✓	✓	
	II/I		4.04	4.09	5								
	II		4.09	4.17	8	✓							

<sup>1</sup>De code I/II geeft weer dat het fragment uit verschillende zones bestaat, gekenmerkt door hetzij kwaliteit I, hetzij kwaliteit II.


**Middelberg (Rotselaar)**  
 Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1), kern C4/2


	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
--	--------	-------	---------	---------	-------------	-----------------	-----------------------	--------------------------	-------------	----------------------	------------------	-------------------------------	--------------------



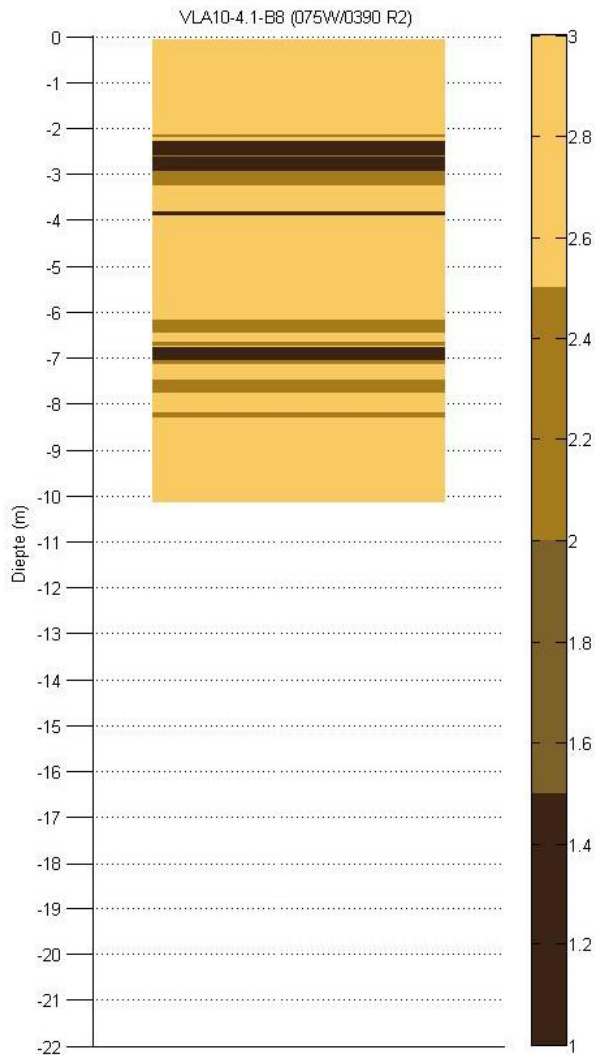
			5.32	5.51	19								
			5.51	5.61	10	✓							
I			5.61	5.69	8	✓							
			5.69	5.85	16								
I			5.85	5.88	3	✓							
I	R1/2		5.88	6.02	14	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
			6.02	6.08	6								
II			6.08	6.20	12	✓							
			6.20	6.30	10								



Middelberg (Rotselaar) Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1), kern C5													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
			6.30	6.57	27								
	I	R1/3	6.57	6.71	14	✓	✓				✓		
	I		6.71	6.77	6	✓							
	II		6.77	6.79	2	✓							
				6.79	6.88	9							


Middelberg (Rotselaar) Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1), los fragment uit kern C13/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	II	R1/4	17.65	17.77	12	✓	✓				✓	✓	

### Kernboring VLA10-4.1-B8 (075W/0390 R2)



Op basis van de boorkern van kernboring VLA10-4.1-B8 wordt op een diepte van ca. 2.30 tot 3.30 m een brede ijzerzandsteenlaag afgeleid waarvan het merendeel bestaat uit klasse I. Naar onderen toe gaat deze evenwel over in klasse II kwaliteit. Deze steenlaag zit vervat in de kernen C1/2 en C2/1. Verschillende fragmenten van zowel klasse I als II met een respectabele lengte kunnen in deze kernen gelicht worden.

Op een diepte tussen ca. 6.20 en 7.80 m komen ook nog enkele steenlagen voor. Min of meer centraal in deze zone komt een relatief brede laag van klasse I kwaliteit voor. Deze laag zit vervat in kern C4/2. In de bovenliggende (kern C4/1) en onderliggende (kern C5/1) zones zitten nog verschillende fragmenten van klasse II met een bruikbare lengte. Deze kernen werden voorlopig niet gebruikt voor verder onderzoek.


Middelberg (Rotselaar) Kernboring VLA10-4.1-B8 (075W/0390 R2), kern C1/2													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	I	R2/1	2.33	2.58	25	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	I		2.58	2.61	3	✓							
	II		2.61	2.65	4	✓							

Middelberg (Rotselaar) Kernboring VLA10-4.1-B8 (075W/0390 R2), kern C2/1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



I			2.65	2.74	9	✓							
I			2.74	2.82	8	✓							
I	R2/2		2.82	2.97	15	✓	✓				✓	✓	
II	R2/3		2.97	3.08	11	✓					✓	✓	
II	R2/4		3.08	3.26	18	✓					✓		
			3.26	3.55	29								



Middelberg (Rotselaar) Kernboring VLA10-4.1-B8 (075W/0390 R2), kern C4/2													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
			6.52	6.65	13	✓							
	II		6.65	6.73	8	✓							
	I	R2/5	6.73	7.00	27	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Middelberg (Rotselaar) Los fragment nr. 5													
	Klasse	Staal	Lengte [cm]	Breedte [cm]	Dikte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid

R/F5												
------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



Middelberg (Rotselaar) Los fragment nr. 6												
Klasse	Staal	Lengte [cm]	Breedte [cm]	Dikte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid

R/F6				20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
------	--	--	--	----	---	---	---	---	---	---	---	---



vooraanzicht



bovenaanzicht

Middelberg (Rotselaar) Los fragment nr. 7													
	Klasse	Staal	Lengte [cm]	Breedte [cm]	Dikte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid

	R/F7				5	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
--	------	--	--	--	---	---	---	---	---	--	---	---	--



bovenaanzicht

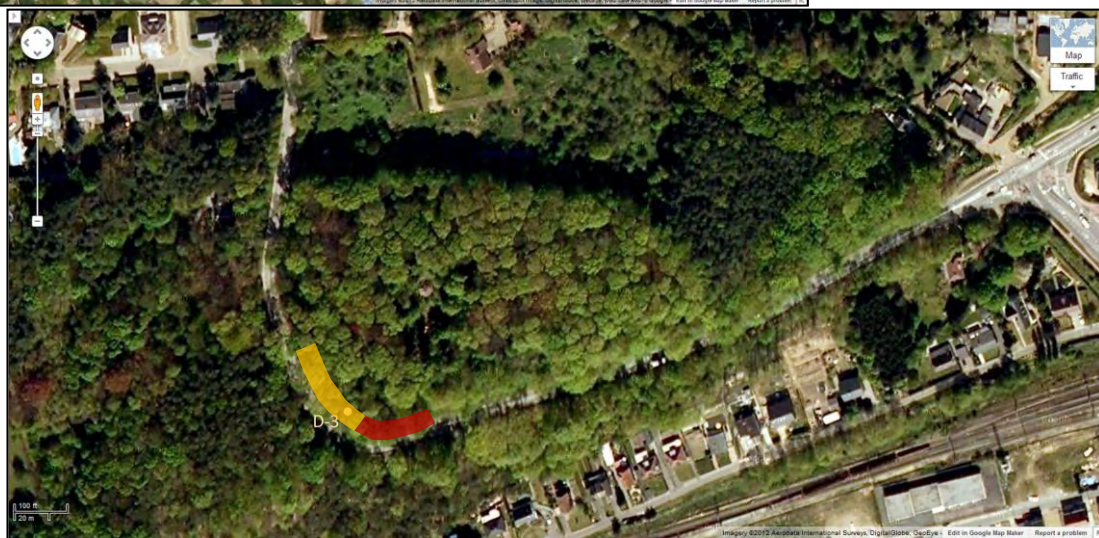


onderaanzicht



## Site V

### Langenberg (Diest)



#### Overzicht

Kernboringen:

15 kernen

Ontsluiting: D-3

geen losse fragmenten





Op vraag van ALBON werd in het kader van deze studie door het Agentschap Wegen en Verkeer (AWV) het noordelijke talud aan de Langenberg te Diest gedeeltelijk vrijgemaakt om de aanwezige steenbanken in ijzerzandsteen tijdelijk toegankelijk te maken. Op 18 oktober 2012 werden vervolgens in de ijzerzandsteen 15 kernen geboord (diameter 11 cm met een maximale lengte van ca. 1.2 m) door de firma Beverrent. De onderstaande tabel geeft een overzicht weer van de geboorde kernen, waarin de totale boordiepte en de totale lengte van de boorkernen zijn opgesomd. In sommige gevallen is de totale lengte van de boorkernen kleiner dan de totale boordiepte doordat delen van boorkernen niet uit het boorgat konden worden gelicht. Dit was het geval voor boorkernen 8 en 12. In andere gevallen is dit verschil vermoedelijk te verklaren door de aanwezigheid van zanderige of zeer weinig geconsolideerde zandsteenlagen, die bij het nat boren verbrokkelen en wegspoelen.

Het fotografisch overzicht op de volgende pagina geeft een overzicht weer van de locaties waar de verschillende kernen in het talud werden geboord. De bovenste reeks opnamen geven de zuidelijke wand van het talud ter hoogte van de knik in de weg weer (rood gemarkeerd op de luchtfoto van vorige pagina). De onderste reeks opnamen geeft de daarnaast gelegen, meer zuidwestelijke wand, van het talud weer (geel gemarkeerd op de luchtfoto). Bij de interpretatie van de hoogte van de steenbanken ten opzichte van de rooilijn van de weg dient opgemerkt dat de weg over deze zone een sterk dalende helling vertoont in oostelijke richting, zeker ter hoogte van de meer zuidelijke wand van het talud. In opdracht van AWV werden de locaties van de boorkernen topografisch opgemeten. De XYZ-coördinaten van elke boorkern zijn opgenomen in onderstaande tabel. Een grondplan met aanduiding van de posities waar de boorkernen werden gelicht is aan het eind van deze paragraaf toegevoegd.

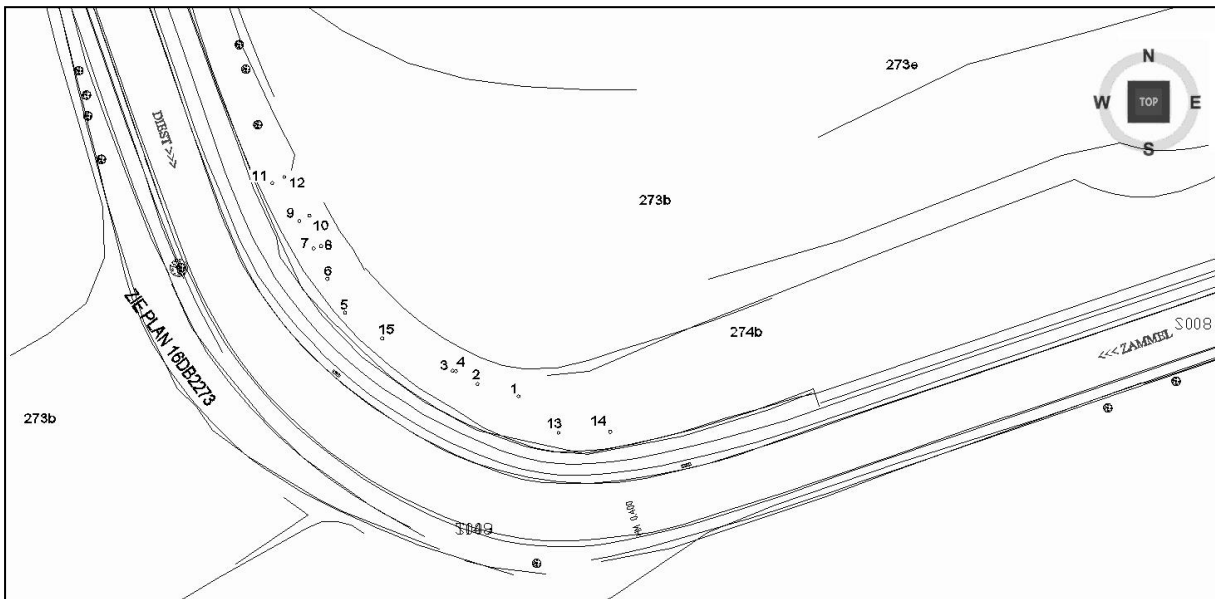
Tabel: Overzicht van de totale boordiepte en lengte van de boorkernen

Kern	X	Y	Z	Boordiepte	Totale lengte boorkern
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	196636.3125	187293.9473	56.4331	0.40	0.23
2	196631.6356	187295.3422	56.8451	0.40	0.19
3	196628.8016	187296.8554	57.2547	0.70	0.63
4	196629.1868	187296.8331	57.2547	0.70	0.55
5	196616.5255	187303.4909	56.5688	0.90	0.52
6	196614.9912	187307.5565	56.8156	0.50	0.41
7	196612.9435	187310.8215	56.7257	1.00	0.82
8	196613.8025	187311.0901	56.7257	1.20	0.73
9	196611.3248	187313.9468	57.4985	1.00	0.98
10	196612.4783	187314.5639	57.4985	1.15	0.94
11	196608.2492	187318.2753	57.6626	- <sup>1</sup>	0.72
12	196609.6019	187318.9687	57.6626	1.20	0.69
13	196640.8769	187289.7973	54.7517	1.20	0.82
14	196646.7726	187289.8971	54.5338	1.20	0.91
15	196620.7624	187300.5514	56.9356	1.10	0.89

<sup>1</sup>De boordiepte werd niet opgemeten voor boorkern 11.

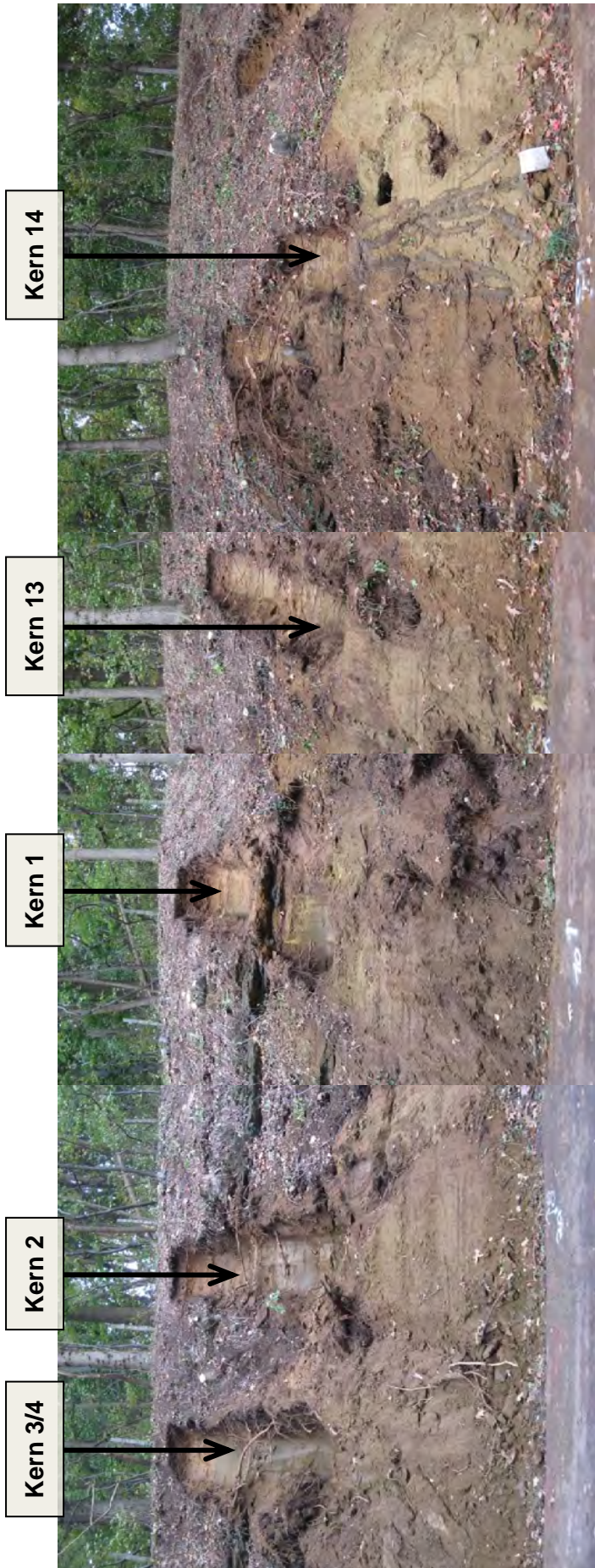
De verschillende fragmenten van elke kern worden gecodeerd aan de hand van de letter 'D' (Diest) gevolgd door achtereenvolgens het nummer van de kern en het volgnummer van het fragment te rekenen vanaf het maaiveld. Het bovenste fragment wordt daarbij aangeduid met het cijfer 0. De verschillende boorkernen en fragmenten werden in-situ genummerd. In sommige gevallen bleek het fragment na aankomst in het labo en na droging in twee delen gebroken. Deze fragmenten zijn in de tabel onder dezelfde code opgenomen. De classificatie werd niet ter plaatse uitgevoerd maar in het

laboratorium door de geoloog van het KIK, en dit volgens de methodiek van Dr. Michiel Duser en enkel op stalen die nader onderzocht zijn.



Grondplan met aanduiding van de locaties waar de boorkernen aan de Langenberg te Diest werden gelicht. Opmeting gerealiseerd door Wegen en Verkeer.








Langenberg (Diest) Kernboring 1													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



	D1.0	0.00	0.04	4	✓								
	D1.1	0.04	0.06	2	✓								
I	D1.2	0.06	0.23	17	✓								

Langenberg (Diest) Kernboring 2													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid
	D2.0		0.00	0.04	4	✓							
			0.04	0.07	3	✓							
	II	D2.1	0.07	0.19	12	✓							



Langenberg (Diest) Kernboring 3													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



I	D3.0	0.00	0.24	24	✓			✓	✓				
I	D3.1	0.24	0.49	25	✓			✓	✓				
I	D3.2	0.49	0.63	14	✓								

Langenberg (Diest) Kernboring 4													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



I	D4.0	0.00	0.18	18	✓		✓	✓					
I	D4.1	0.18	0.55	37	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓

Langenberg (Diest) Kernboring 5													
Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid	



I	D5.0	0.00	0.11	11	✓								
I-II	D5.1	0.11	0.43	32	✓	✓				✓	✓		
	D5.2	0.43	0.52	9	✓								

Langenberg (Diest) Kernboring 6													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



	D6.0	0.00	0.03	3	✓								
I	D6.1	0.03	0.19	16	✓	✓					✓	✓	
I	D6.2	0.19	0.41	22	✓		✓	✓					

Langenberg (Diest) Kernboring 7													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



	D7.0	0.00	0.07	7	✓								
	D7.1	0.07	0.16	9	✓								
II	D7.2	0.16	0.33	17	✓								
II	D7.3	0.33	0.47	14	✓								
II	D7.4	0.47	0.62	15	✓	✓					✓	✓	
I	D7.5	0.62	0.82	20	✓								



Langenberg (Diest) Kernboring 8													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



I	D8.0	0.00	0.12	12	✓								
		0.12	0.16	4	✓								
I	D8.1	0.16	0.23	7	✓								
I	D8.2	0.23	0.30	7	✓								
	D8.3	0.30	0.34	4	✓								
I	D8.4	0.34	0.56	22	✓		✓	✓					
II	D8.5	0.56	0.73	17	✓	✓					✓	✓	

Langenberg (Diest) Kernboring 9													
	Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



	D9.0	0.00	0.06	3+3	✓								
		0.06	0.15	9	✓								
	D9.1	0.15	0.22	7	✓								
II	D9.2	0.22	0.53	31	✓	✓	✓	✓			✓	✓	
II	D9.3	0.53	0.82	29	✓		✓	✓					
II	D9.4	0.82	0.95	13	✓								
	D9.5	0.95	0.98	3	✓								

Boorkern 9 werd volledig doorheen de steenbank geboord, waarvan de onderzijde uit het talud uitstak.

Langenberg (Diest) Kernboring 10													
Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid	



	D10.0	0.00	0.35	35	✓								
I	D10.1	0.35	0.52	17	✓								
I	D10.2	0.52	0.71	19	✓		✓	✓					
I	D10.3	0.71	0.94	23	✓								

De bovenste zone was over een diepte van 35 cm volledig verbrossend. Deze zone komt vermoedelijk overeen met de bovenste zone van de ijzerzandsteen die aan het einde van de laatste ijstijd aan vorst-dooi cycli werd blootgesteld.

Langenberg (Diest) Kernboring 11												
Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid



I-II	D11.1	0.30	0.71	41	✓		✓	✓				
II	D11.2	0.71	1.02	31	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓

Net als in boorkern 10 was ook hier de bovenste zone over een vergelijkbare diepte verbrossend. In tegenstelling tot de vorige boorkern werd het verbrossende materiaal hier niet meegenomen. De aanzet van de boorkern, zoals weergegeven in de foto, bevond zich bijgevolg naar schatting op zo'n 30 cm onder het maaiveld.

Langenberg (Diest) Kernboring 12													
Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid	



	D12.0	0.30	0.36	6	✓								
	D12.1	0.36	0.45	9	✓								
I	D12.2	0.45	0.59	14	✓								
I	D12.3	0.59	0.90	31	✓	✓	✓	✓		✓	✓		
	D12.4	0.90	0.99	9	✓								

Net als in de vorige twee boorkernen was ook hier de bovenste zone over een vergelijkbare diepte verbrokkeld en werd het verbrokkelde materiaal evenmin meegenomen. De aanzet van de boorkern, zoals weergegeven in de foto, bevond zich bijgevolg naar schatting op zo'n 30 cm onder het maaiveld.



Langenberg (Diest) Kernboring 13													
Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid	



I	D13.0	0.00	0.10	10	✓								
I	D13.1	0.10	0.30	20	✓								
II	D13.2	0.30	0.50	20	✓								
I-II	D13.3	0.50	0.70	20	✓	✓				✓	✓		
I	D13.4	0.70	0.82	12	✓								

Langenberg (Diest) Kernboring 14													
Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid	



I	D14.0	0.00	0.21	21	✓		✓	✓					
	D14.1	0.21	0.26	5	✓								
I-II	D14.2	0.26	0.50	24	✓								
I-II	D14.3	0.50	0.91	41	✓		✓	✓					

Langenberg (Diest) Kernboring 15													
Klasse	Staal	Van [m]	Tot [m]	Lengte [cm]	Geluidssnelheid	Petrografische studie	Vol. massa en porositeit	Druksterkte	Elasticiteitsmodulus	Hardheidsprofiel	Proefbehandeling consolidatie	Vorstbestendigheid	



	D15.0	0.00	0.05	5	✓								
II	D15.1	0.05	0.16	11	✓								
I	D15.2	0.16	0.37	21	✓		✓		✓				✓
II	D15.3	0.37	0.71	34	✓	✓	✓	✓		✓		✓	
II	D15.4	0.71	0.89	18	✓								



**Onderzoeksproject VLA11-4.1**

**Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen  
met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen**

**Bijlage II  
Geluidssnelheidsmetingen**

D : 2012.11586

*Aanvrager:* Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON)

*Contactpersoon:* Mevr. Griet Verhaert

*Uitvoering:* Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK)  
Departement Labo, Cel Monumenten  
*Laurent Fontaine en Roald Hayen*

*Verslaggeving:* Roald Hayen en Hilde De Clercq

*Datum:* 30 september 2013

## Inhoudsopgave

1. Opzet .....	3
1.1. Staalname .....	3
1.2. Methodologie .....	4
1.3. Foutenanalyse.....	5
2. Overzicht van de meetresultaten .....	8
Site I: Roeselberg (Herent) .....	9
Kernboringen .....	10
Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1) .....	10
Losse fragmenten .....	15
Fragment H/F8 .....	16
Fragment H/F9 .....	18
Fragment H/F10 .....	20
Site II: Gasthuisbos (Pellenberg).....	21
Kernboringen .....	22
Kernboring VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1) .....	22
Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2) .....	26
Losse fragmenten .....	31
Fragment P/F3.....	32
Fragment P/F4.....	34
Site III: Beninksberg (Wezemaal).....	36
Kernboringen .....	37
Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1).....	38
Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2).....	41
Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3).....	46
Site IV: Middelberg (Rotselaar) .....	51
Kernboringen .....	52
Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1) .....	52
Kernboring VLA10-4.1-B8 (075W/0390 R2) .....	57
Losse fragmenten .....	61
Fragment R/F6 .....	62
Fragment R/F7 .....	64
Site V: Langenberg (Diest).....	65
Kernboringen .....	66
Kernboring D1 .....	66
Kernboring D2 .....	67
Kernboring D3 .....	68
Kernboring D4 .....	69
Kernboring D5 .....	70
Kernboring D6 .....	71
Kernboring D7 .....	72
Kernboring D8 .....	73
Kernboring D9 .....	74
Kernboring D10 .....	75
Kernboring D11 .....	76
Kernboring D12 .....	77
Kernboring D13 .....	78
Kernboring D14 .....	79
Kernboring D15 .....	80



## 1. Opzet

De voortplantingssnelheid van geluidsgolven wordt vaak gehanteerd als een niet-destructieve meetmethode voor de kwaliteitsbeoordeling van natuursteen en/of de studie van mogelijk aanwezige schade (microscheurtjes, bv.). De geluidssnelheid ( $v$ ) doorheen de steen wordt evenwel bepaald door zowel de aard als de toestand van het onderzochte materiaal: o.a. de porositeit, het vochtgehalte, de aard van de natuursteen, etc. Het gebruik van deze analysemethode voor de in-situ kwaliteitsbeoordeling vergt daarom de beschikbaarheid van enerzijds referentiewaarden voor de beoordeling van de kwaliteit van de natuursteen in kwestie, en anderzijds een kalibratiemethode om rekening te houden met het aanwezige vochtgehalte. Beiden ontbreken vooralsnog voor ijzerzandsteen.

De opzet van deze studie is om in de eerste plaats referentiewaarden voor de kwaliteitsbeoordeling van ijzerzandsteen op basis van de geluidssnelheid op te stellen.

Daarbij zal tevens de mogelijke correlatie nagegaan worden tussen de geluidssnelheid en de empirische beoordeling van de ijzerzandsteen vastgelegd tijdens het terreinbezoek (geschiktheidsklasse) aan de sites van Herent, Pellenberg, Wezemaal en Rotselaar. De indeling in geschiktheidsklassen gaat van I (beste kwaliteit) over II (mindere kwaliteit) tot III (zand onvoldoend versteend om als bouwsteen te worden gebruikt, wat in deze studie verder niet in acht genomen wordt) met de mogelijkheid van een overgangskwaliteit (I-II).

Tevens zal de mogelijke correlatie tussen de geluidssnelheid en de verschillende geologische en bouwtechnische kenmerken van de ijzerzandsteen nagegaan worden teneinde het mogelijke gebruik van de geluidssnelheid als kwaliteitscriterium te evalueren.

### 1.1. Staalname

Teneinde de vooropgestelde doelstelling te bereiken, werden alle beschikbare kernen en losse fragmenten maximaal aan geluidssnelheidsmetingen onderworpen (zie Bijlage I *Geologische macroscopische studie, selectie stalen en overzicht analyses*). De resultaten werden aangewend voor de selectie van de stalen bestemd voor verder onderzoek. De geselecteerde stalen vertonen een voldoende spreiding van de gemiddelde geluidssnelheid, alsook variaties van homogeniteit en/of heterogeniteit van de natuursteen (gebaseerd op de variatie van de geluidssnelheid over het proefstuk).

Tabel 1 geeft een overzicht van de uitgevoerde metingen.

Tabel 1. Overzichtstabel van de uitgevoerde metingen

Plaats, Site	Aantal		
	Kernen / Fragmenten	Meetposities	Metingen <sup>1</sup>
<i>Herent, Roeselberg</i>		329	569
VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1)	4	240	480
Losse fragmenten	3	89	89
<i>Pellenberg, Gasthuisbos</i>		395	616
VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1)	3	129	249
VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2)	4	101	202
Losse fragmenten	2	165	165
<i>Wezemaal, Beninksberg</i>		356	721
VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1)	3	55	98
VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2)	4	164	319
VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3)	4	137	304
<i>Rotselaar, Middelberg</i>		292	441
VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1)	4	79	142
VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1)	3	111	197
Losse fragmenten	2	102	102
<i>Diest, Langenberg</i>		811	1551
Boorkernen	15	811	1551
<b>Totaal</b>		<b>2183</b>	<b>3898</b>

<sup>1</sup>Het aantal metingen is niet steeds gelijk aan het dubbele van het aantal meetposities langsheen de boorkernen, omdat op sommige meetposities de metingen slechts in 1 richting konden worden uitgevoerd.

## 1.2. Methodologie

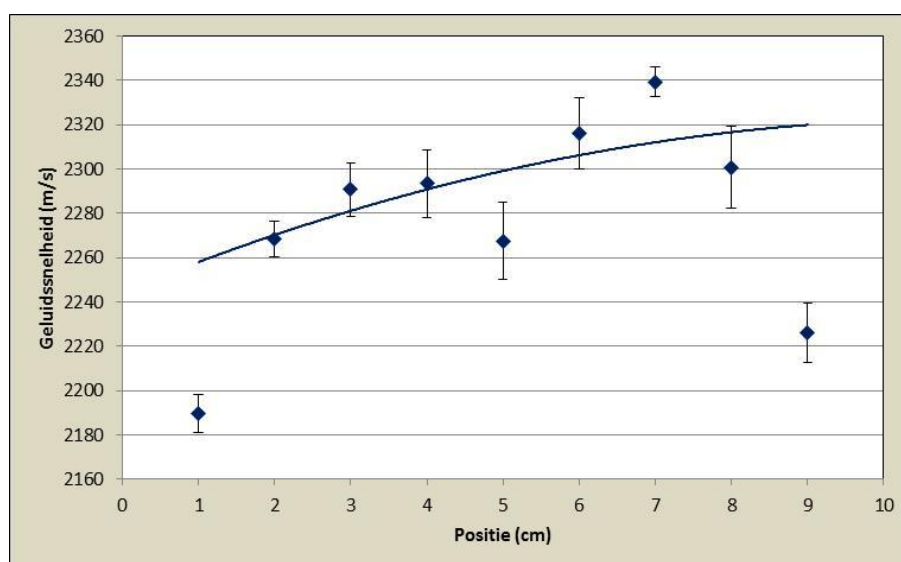
De bepaling van de geluidssnelheid in natuursteen (STEINKAMP, BK-5) is gebaseerd op de opmeting van de doorgangstijd doorheen het materiaal van een ultrasone geluidsgolf over een gekende afstand. De geluidssnelheid doorheen de steen wordt mede bepaald door de aard en de toestand van het onderzochte materiaal: porositeit, vochtgehalte, aard van de natuursteen, microscheurtjes, etc. en kan zo als kwaliteitsbeoordeling voor de homogeniteit en mogelijke schade aan de natuursteen gebruikt worden. De geluidssnelheid wordt uitgedrukt in de standaard SI-eenheden m/s. Voor het uitvoeren van geluidssnelheidsmetingen wordt een geluidsgolf verstuurd door de zender en opgevangen door de ontvanger. Zender en ontvanger zijn hierbij gepositioneerd op tegenover elkaar gelegen zijden van een proefstuk. De geluidssnelheidsmetingen werden op de gekernde boringen uitgevoerd op een diagonale wijze en volgens twee orthogonale richtingen (aangeduid "zijde A" en "zijde B", waarbij de zijde het vlak symboliseert waar de zender op gepositioneerd is en telkens met een tussenafstand van één cm lengte (volgens de boordiepte). Beide meetresultaten zijn in de grafieken opgenomen (zijde A en zijde B), evenals de gemiddelde waarde voor de beide richtingen. De verdere evaluatie van de meetresultaten is gebaseerd op de gemiddelde meetwaarde. Metingen uitgevoerd op losse fragmenten zijn uitgevoerd op verzaagde stalen, zoals voorgeschreven voor de uitvoering van de drukproeven en de experimentele vries-dooiproeven.

### 1.3. Foutenanalyse

Daar de geluidssnelheid afhankelijk is van verschillende factoren eigen aan de omstandigheden waarin de metingen worden uitgevoerd, alsook aan de wijze van uitvoering, werden een aantal maatregelen genomen teneinde de fouten eigen aan de uitvoeringswijze te minimaliseren:

- 1) de stalen werden voorafgaand aan de metingen gedurende ca. 3 weken in het laboratorium (T ca. 20°C, RV ca. 60%) geconditioneerd, zodat de stalen een evenwichtsvochtgehalte bereikten; en
- 2) de metingen werden uitgevoerd door één persoon om de wijze van behandeling (plaatsing van de sensoren, uitgeoefende druk, etc.) zo constant mogelijk te houden.

Ondanks de zorgvuldigheid waarbij de metingen zijn uitgevoerd, blijft een zekere foutenmarge inherent aanwezig. Om de grootte van deze fout in te schatten werd een reeks metingen uitgevoerd op een homogeen referentieblok in ijzerzandsteen van ca. 10 cm x 10 cm x 10 cm, afkomstig van het fragment P/F4. Hiervoor werden op 9 meetpunten gelegen op een lijn evenwijdig aan de rand en telkens in het midden van twee evenwijdige zijden (lijnprofiel), met een onderlinge tussenafstand van 1 cm, telkens 10 metingen gerealiseerd. De metingen werden telkens éénmaal op de opeenvolgende 9 punten uitgevoerd om vervolgens opnieuw te beginnen vanaf het eerste meetpunt. De metingen werden uitgevoerd in een richting parallel aan het groefleger. Een overzicht van de meetresultaten bekomen op het referentieblok is opgenomen in Tabel 2, alsook de gemiddelde waarden en de standaardafwijking per meetpunt en per meetreeks over de verschillende meetpunten heen. De meetresultaten zijn tevens weergegeven in figuur 1.



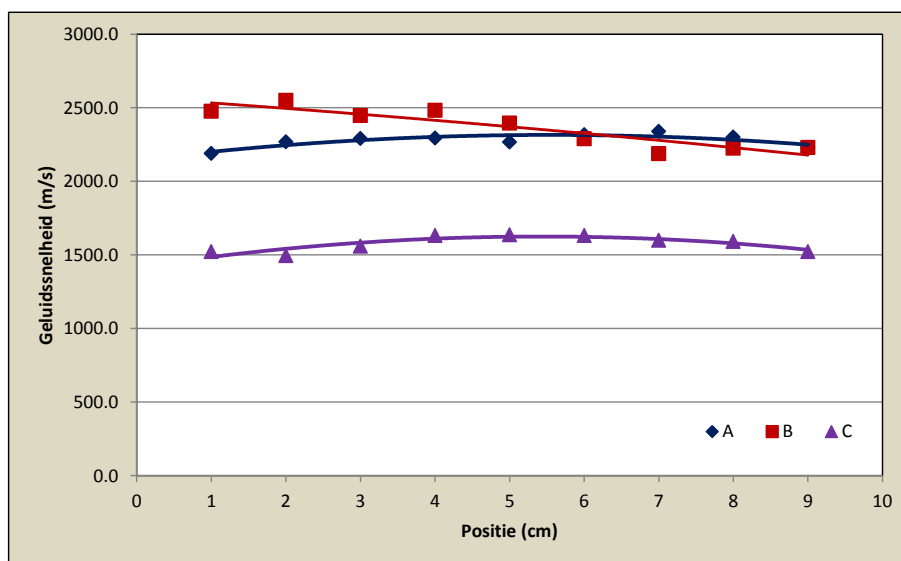
*Figuur 1. Evaluatie van de foutenmarge op de meting van de geluidssnelheid op een referentieblok in ijzerzandsteen. De geluidssnelheid werd op 9 meetpunten gelegen op een lijn evenwijdig aan de rand en in het midden van twee evenwijdige zijden (lijnprofiel) gemeten. De grafiek geeft de spreiding van de geluidssnelheid weer langsheen de meetlijn. De foutenbalken per meetpunt geven de spreiding van de meetresultaten per meetpunt weer. Een regressielijn van secundaire orde is eveneens opgenomen in de grafiek om de spreiding van de geluidssnelheid over de breedte van het referentieblok te illustreren. De uiterste meetwaarden werden hierbij niet in rekening gebracht, omdat deze te dicht tegen het zijoppervlak gelegen zijn.*

Op basis van de metingen kan de foutenmarge worden geschat op 12.9 m/s. Dit resultaat houdt evenwel geen rekening met de fout op de meting van de doorlooptijd. Om de totale foutenmarge op de metingen te schatten dient daarom gekeken te worden naar de gerealiseerde fout op de doorlooptijd, die 0.238  $\mu$ s bedraagt, en deze te combineren met de fout op de afstandsmeting. In de veronderstelling dat de lengte tot op een millimeter nauwkeurig kan worden opgemeten (standaarddeviatie van 0.5 mm), resulteert dit in een totale fout van 17.5 m/s.

Tabel 2. Overzicht van de meetwaarden voor de geluidssnelheid bekomen op een referentieblok van ijzerzandsteen. Langs eenzelfde zijde zijn op 9 meetpunten, 1 cm onderlinge tussenafstand, 10 metingen uitgevoerd van de geluidssnelheid. De tabel vermeldt de gemiddelde waarden van de verschillende metingen op elk individueel meetpunt, evenals de waarden per meetreeks voor de 9 meetpunten.

Evaluatie van de geluidssnelheid (m/s) op een referentieblok in ijzerzandsteen											
Meting >	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Gemiddelde
Punt 1	2177	2182	2197	2187	2192	2197	2182	2197	2202	2182	2189 ± 9
Punt 2	2270	2254	2259	2280	2275	2270	2275	2270	2270	2264	2268 ± 8
Punt 3	2280	2275	2302	2308	2297	2297	2291	2302	2275	2280	2291 ± 12
Punt 4	2270	2275	2291	2286	2291	2313	2308	2302	2313	2286	2293 ± 15
Punt 5	2275	2275	2264	2259	2275	2227	2254	2280	2286	2280	2267 ± 17
Punt 6	2324	2330	2336	2291	2297	2297	2324	2319	2313	2330	2316 ± 16
Punt 7	2341	2353	2347	2336	2336	2330	2336	2341	2336	2336	2339 ± 7
Punt 8	2280	2280	2286	2341	2313	2308	2302	2308	2291	2297	2301 ± 19
Punt 9	2254	2227	2227	2233	2217	2222	2217	2202	2233	2227	2226 ± 13
Gemiddelde	2275 ± 46	2272 ± 51	2279 ± 48	2280 ± 49	2277 ± 46	2273 ± 47	2277 ± 51	2280 ± 50	2280 ± 42	2276 ± 48	

Op het referentiestaal werden tevens metingen uitgevoerd op de twee overige zijden, ook hier telkens in 9 meetpunten. De meetresultaten volgens de verschillende richtingen zijn weergegeven in figuur 2.



*Figuur 2. Vergelijking van de meetwaarden voor de geluidssnelheid volgens de drie onderling orthogonale richtingen van het referentieblok in ijzerzandsteen. Voor zijden A en B zijn de metingen uitgevoerd parallel aan het groefleger, voor zijde C loodrecht hier op.*

De vergelijking van de meetresultaten voor de verschillende richtingen met de meetfout per meetpunt toont duidelijk aan dat deze laatste beduidend kleiner is dan de variatie als gevolg van de natuurlijke heterogeniteit in de ijzerzandsteen. Zeker het verschil in meetwaarde tussen de oriëntatie parallel aan en loodrecht op het groefleger komt duidelijk tot uiting ( $\Delta_{gem} = 788$  m/s), naast dit tussen de beide meetrichtingen parallel aan het groefleger ( $\Delta_{gem} = 144$  m/s), die beduidend hoger zijn dan de meetfout. Dit alles ondanks de keuze van een visueel zeer homogeen staal. De waargenomen verschillen kunnen daarom als significant beschouwd worden.



## 2. Overzicht van de meetresultaten

Hiernavolgend wordt per site een overzicht gegeven van de resultaten van geluidssnelheidsmetingen uitgevoerd op de boorkernen en de losse fragmenten. Voor de codering van de stalen wordt verwezen naar bijlage X: *Vergelijkende tabel voor de benamingen van de proefstukken*.

De resultaten op de boorkernen worden in grafiek weergegeven, geflankeerd door een fotografische opname van de boorkern op dezelfde schaal. Op de boorkernen werd waar mogelijk de geluidssnelheid volgens twee orthogonale richtingen opgemeten. Beiden waarden zijn opgenomen in de grafiek, weergegeven in een dunne stippellijn. De gemiddelde waarde van beide metingen wordt evenwel als criterium gehanteerd en is in dikke volle lijn weergegeven. In de grafiek is tevens de geschiktheidsklasse opgenomen (de grijze balken aan de rechterzijde), zodanig dat de geschiktheidsklasse en de gemiddelde geluidssnelheid hetzelfde verloop (meer naar rechts = hogere kwaliteit) volgen hetgeen de vergelijking vergemakkelijkt.

De resultaten op de losse fragmenten worden in tabel weergegeven, met, voor zover mogelijk, de waarden bekomen volgens de verschillende richtingen. Afhankelijk van de afmetingen en de vorm van het fragment verschilt het aantal metingen per richting. Telkens worden de gemiddelde, de minimale en de maximale geluidssnelheden opgegeven per meetrichting, alsook de oriëntatie (parallel aan of loodrecht op het groefleger). De fotografische opname geeft het staal weer voorafgaand aan het verzagen. De metingen zijn evenwel uitgevoerd op verzaagde stalen. De tabel vermeldt telkens voor welke proef het staal voorbestemd was.

## Site I

### Roeselberg (Herent)



#### Overzicht

Kernboringen: VLA10-4.1-B1

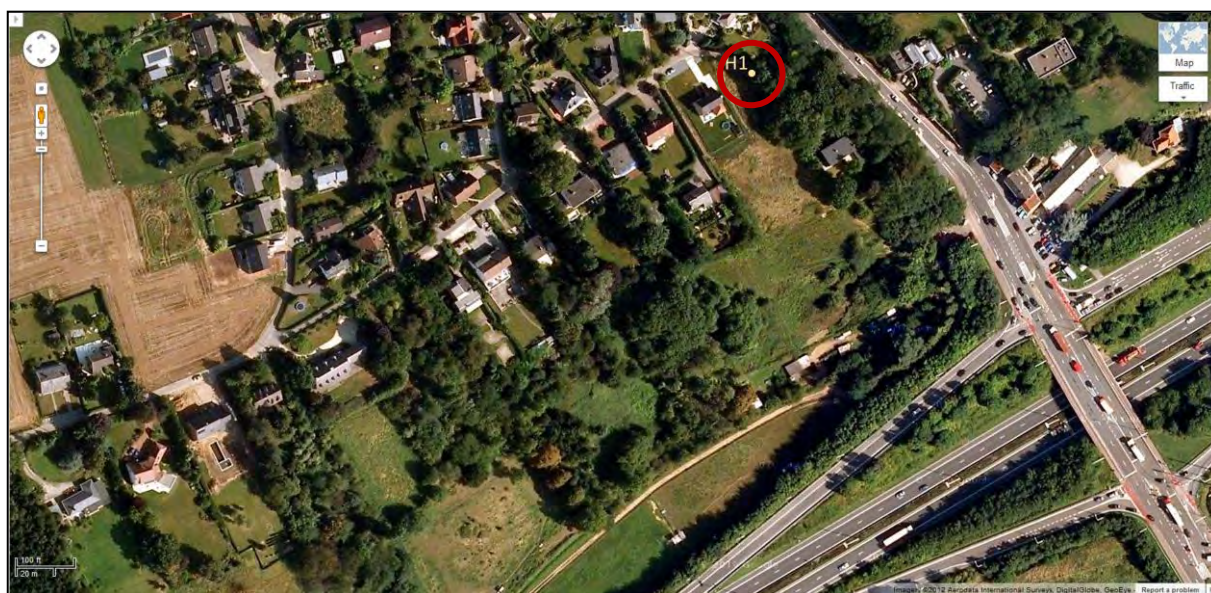
4 kernen

Ontsluiting: -

3 losse fragmenten

## Roeselberg (Herent)

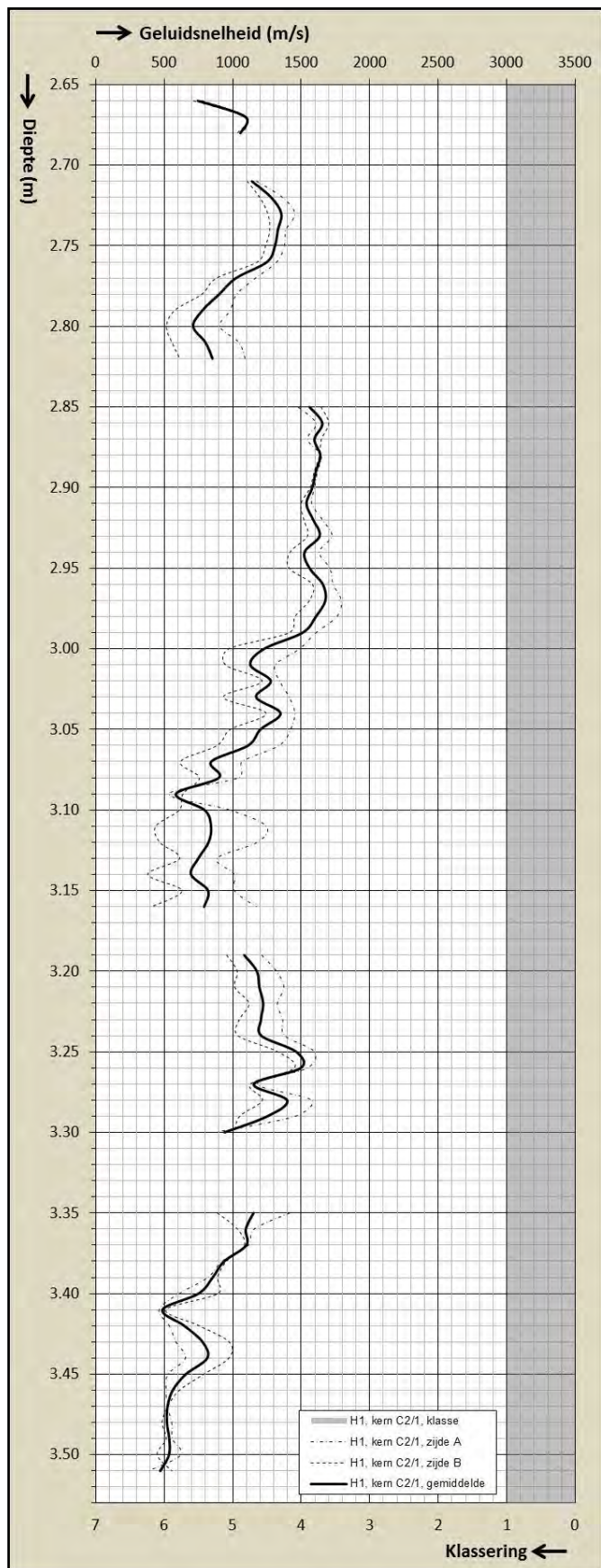
### Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1)





**Roeselberg (Herent)**

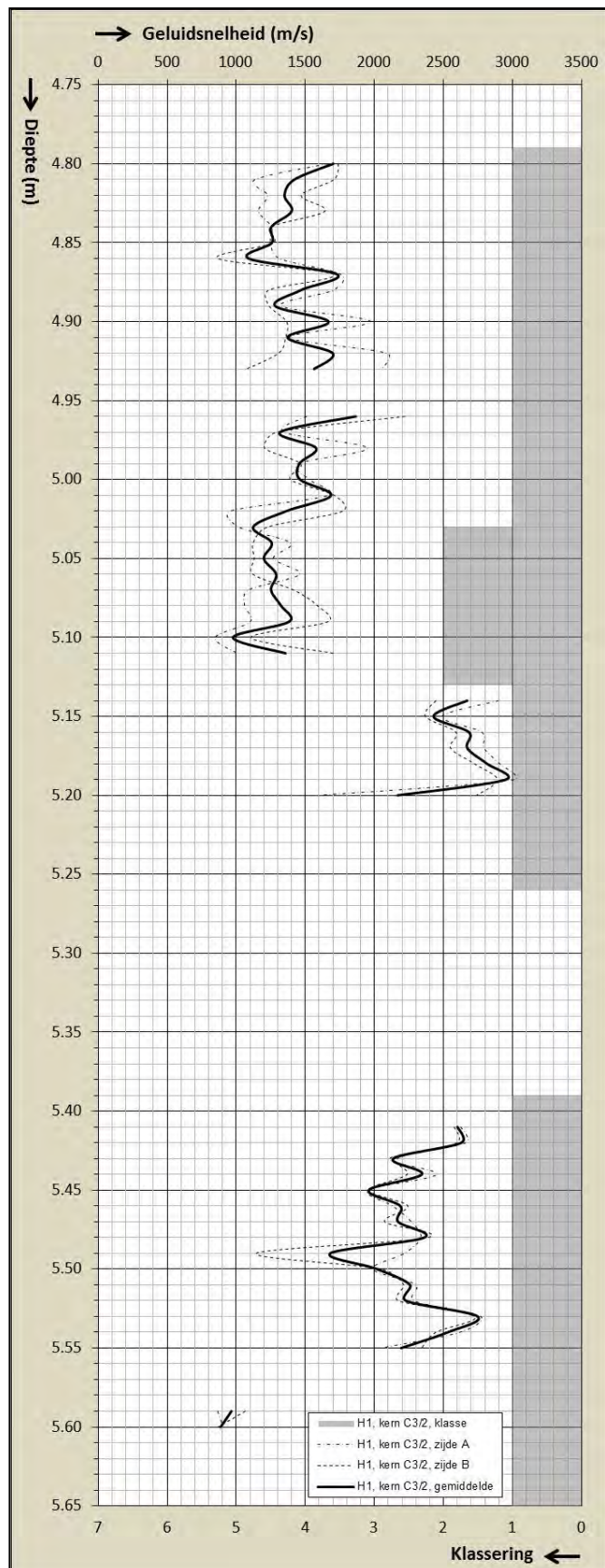
Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C2/1





**Roeselberg (Herent)**

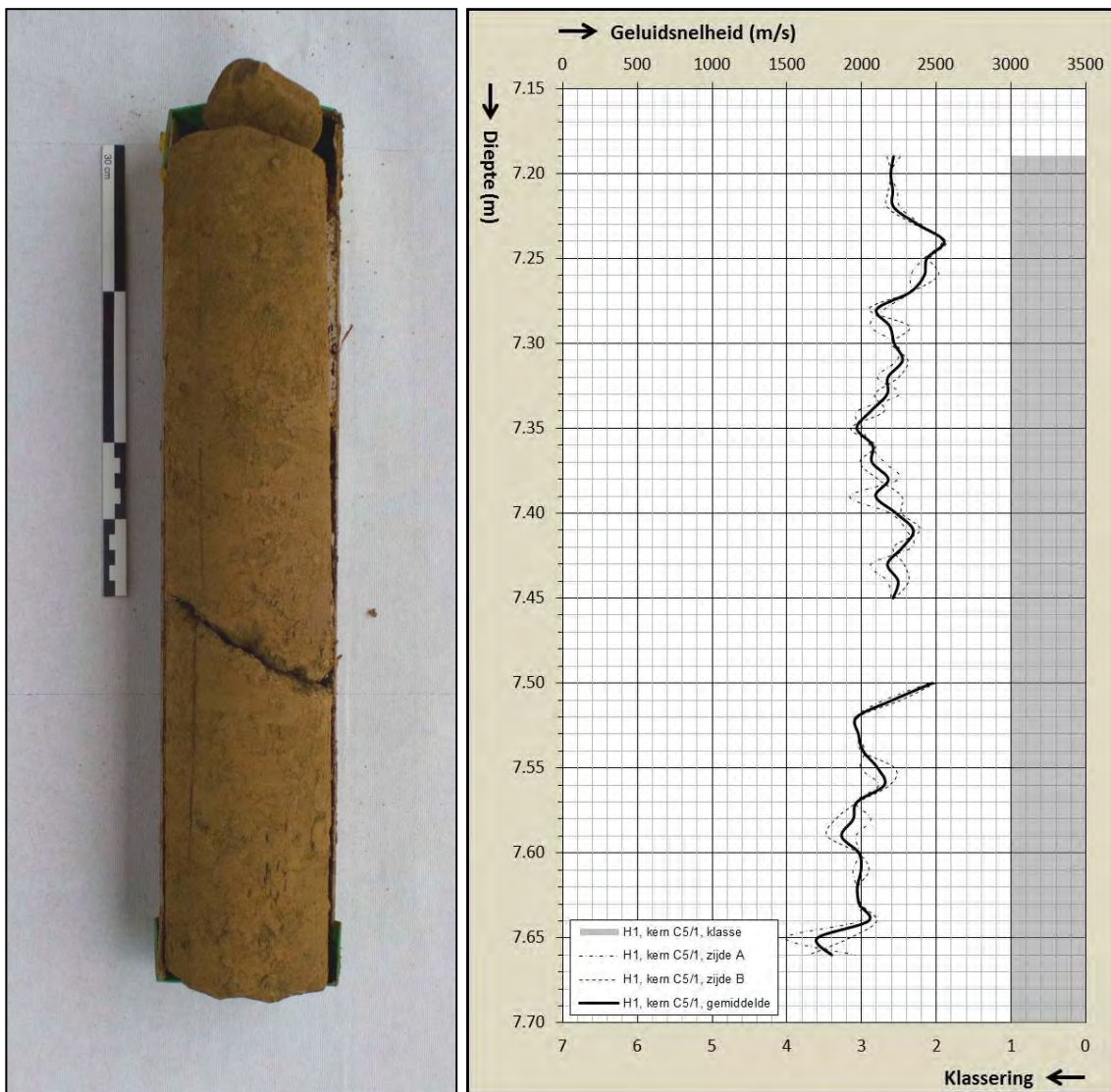
Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C3/2





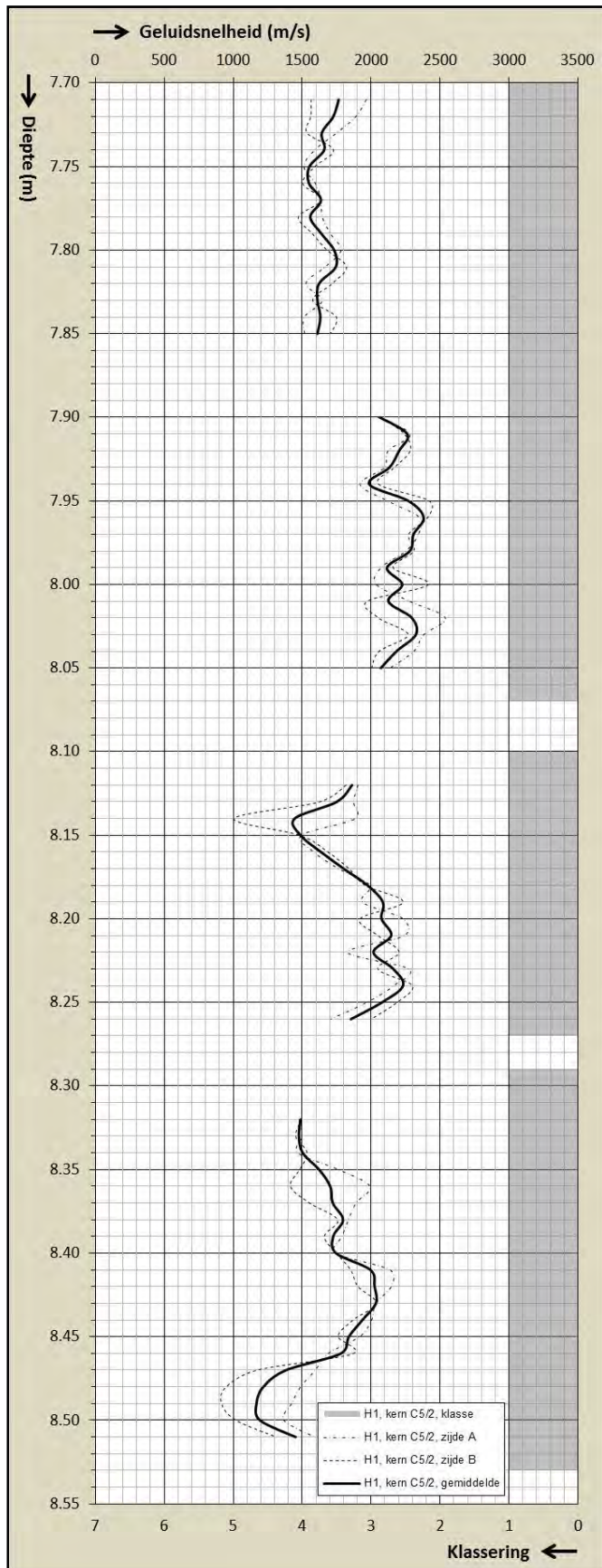
**Roeselberg (Herent)**

Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C5/1



**Roeselberg (Herent)**

Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C5/2



**Roeselberg  
(Herent)**

**Losse Fragmenten**

**Roeselberg (Herent)**  
 Los fragment H/F8 (fragment voor verzagen)



Staal beproefd op druksterkte						
Richting >	A		B		C	
Oriëntatie >	parallel aan groefleger					
Lengte [cm] >	9.4					
	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]
1	47.3	1987				
2	42.6	2207				
3	40.5	2321				
4	39.4	2386				
5	40.3	2333				
6	42.1	2233				
7	43.4	2166				
8	45.5	2066				
9	44.7	2103				
10	44.6	2108				
11	43.1	2181				
<b>Gemiddelde</b>		<b>2190 ± 122</b>				
<b>Minimum</b>		1987				
<b>Maximum</b>		2386				



Staal beproefd op vorstbestendigheid						
Richting >	A		B		C	
Oriëntatie >	parallel aan groefleger		parallel aan groefleger			
Lengte [cm] >	6.3		23.5			
	t [ $\mu$ s]	v [m/s]	t [ $\mu$ s]	v [m/s]	t [ $\mu$ s]	v [m/s]
1	34.1	1848	102.9	2284		
2	34.8	1810				
3	32.7	1927				
4	28.5	2211				
5	27.4	2299				
6	28.2	2234				
7	30.0	2100				
8	34.4	1831				
9	33.6	1875				
10	32.8	1921				
11	34.6	1821				
12	33.6	1875				
13	31.8	1981				
14	26.4	2386				
15	27.5	2291				
16	25.8	2442				
17	28.8	2188				
18	26.8	2351				
19	26.9	2342				
20	31.0	2032				
21	28.9	2180				
<b>Gemiddelde</b>		<b>2093 <math>\pm</math> 214</b>		<b>2284</b>		
<b>Minimum</b>		1810				
<b>Maximum</b>		2442				



**Roeselberg (Herent)**

Los fragment HF/9 (fragment voor verzagen)



Staal beproefd op druksterkte						
Richting >	A		B		C	
Oriëntatie >	loodrecht op groefleger		parallel aan groefleger			
Lengte [cm] >	11.0 – 11.5		8.2			
	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]
1	60.5	1818	33.0	2485		
2	51.5	2155	33.4	2455		
3	47.4	2363	33.5	2448		
4	46.8	2415	32.9	2492		
5	45.4	2511	34.0	2412		
6	46.4	2478	33.9	2419		
7			32.9	2492		
8			31.4	2611		
9			31.4	2611		
10			30.7	2671		
<b>Gemiddelde</b>		<b>2290 ± 263</b>		<b>2510 ± 90</b>		
<b>Minimum</b>		1818		2412		
<b>Maximum</b>		2511		2671		

Staal beproefd op vorstbestendigheid						
Richting >	A		B		C	
Oriëntatie >	parallel aan groefleger		parallel aan groefleger			
Lengte [cm] >	6.2 – 6.5		22.5			
	t [µs]	v [m/s]	t [µs]	v [m/s]	t [µs]	v [m/s]
1	24.9	2490	88.0	2557		
2	24.1	2573				
3	23.3	2661				
4	23.3	2661				
5	23.7	2658				
6	23.8	2647				
7	24.5	2571				
8	24.1	2614				
9	25.1	2510				
10	24.9	2570				
11	25.6	2500				
12	25.9	2471				
13	26.6	2406				
14	26.0	2462				
15	24.9	2570				
16	25.1	2590				
17	24.1	2697				
18	24.5	2653				
19	27.0	2407				
<b>Gemiddelde</b>		<b>2564 ± 90</b>		<b>2557</b>		
<b>Minimum</b>		2406				
<b>Maximum</b>		2697				

**Roeselberg (Herent)**

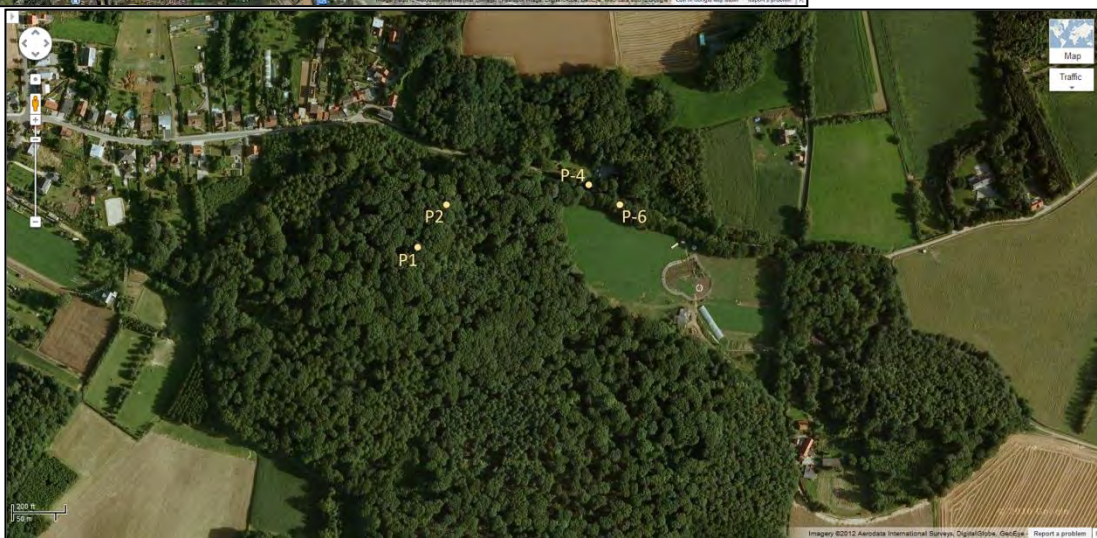
Los fragment H/F10 (fragment voor verzagen)



Staal beproefd op vorstbestendigheid						
Richting >	A		B		C	
Oriëntatie >	parallel aan groefleger		parallel aan groefleger			
Lengte [cm] >	6.9		18.0			
	t [µs]	v [m/s]	t [µs]	v [m/s]	t [µs]	v [m/s]
1	33.5	2060	85.2	2113		
2	34.0	2029	113.2	1590		
3	33.9	2035				
4	33.5	2060				
5	33.1	2085				
6	35.4	1949				
7	43.7	1579				
8	37.9	1821				
9	34.3	2012				
10	28.7	2404				
11	28.6	2413				
12	29.2	2363				
13	33.2	2078				
14	32.8	2104				
15	33.9	2035				
16	33.8	2041				
17	30.6	2255				
18	37.5	1840				
<b>Gemiddelde</b>		<b>2065 ± 207</b>		<b>1851 ± 370</b>		
<b>Minimum</b>		1579		1590		
<b>Maximum</b>		2413		2113		

## Site II

### Gasthuisbos (Pellenberg)



#### Overzicht

Kernboringen: VLA10-4.1-B2 en VLA10-4.1-B3

7 kernen

Ontsluiting: P-4 en P-6

2 losse fragmenten



## Gasthuisbos (Pellenberg)

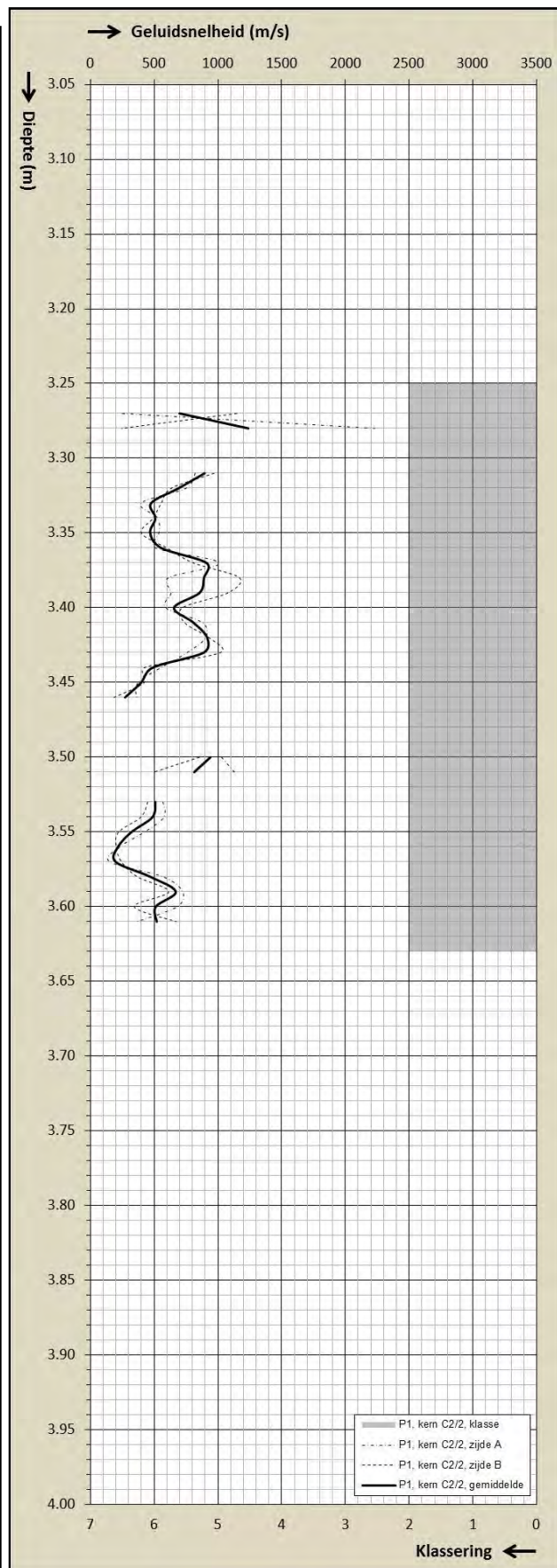
### Kernboring VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1)





**Gasthuisbos (Pellenberg)**

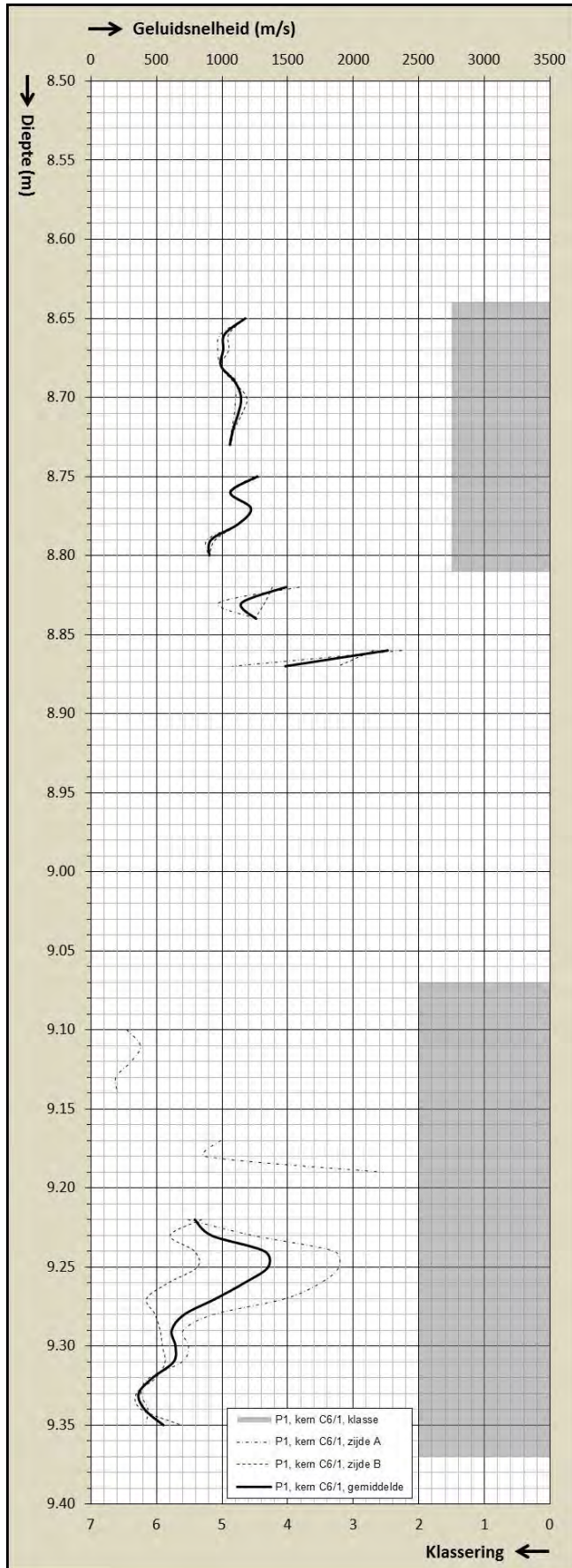
Kernboring VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1), kern C2/2





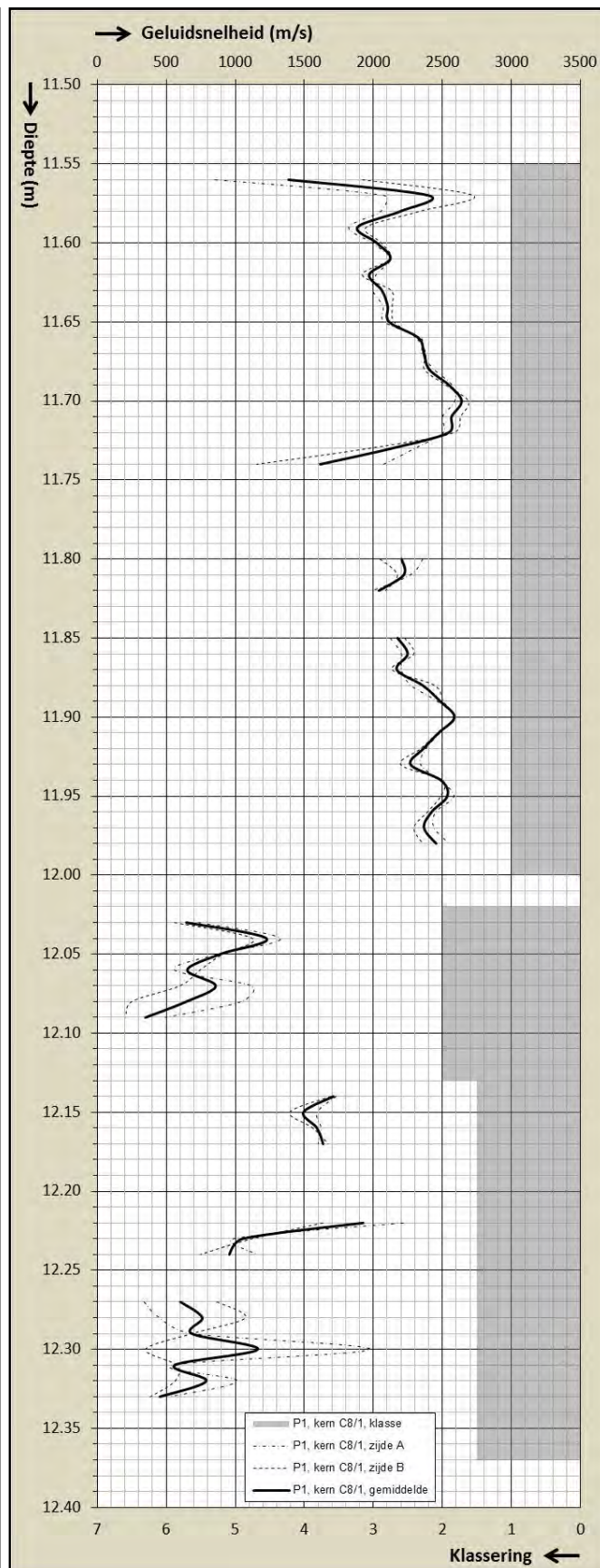
**Gasthuisbos (Pellenberg)**

Kernboring VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1), kern C6/1





**Gasthuisbos (Pellenberg)**  
Kernboring VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1), kern C8/1



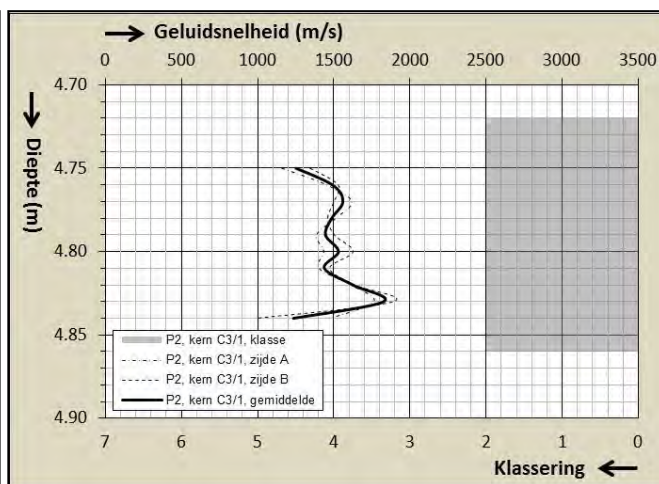
## Gasthuisbos (Pellenberg)

### Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2)



**Gasthuisbos (Pellenberg)**

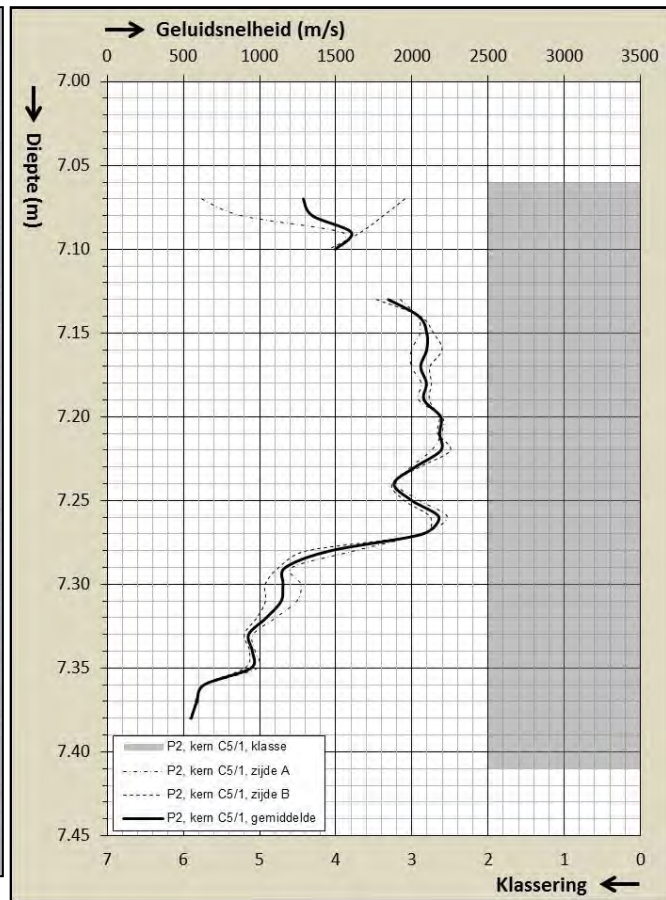
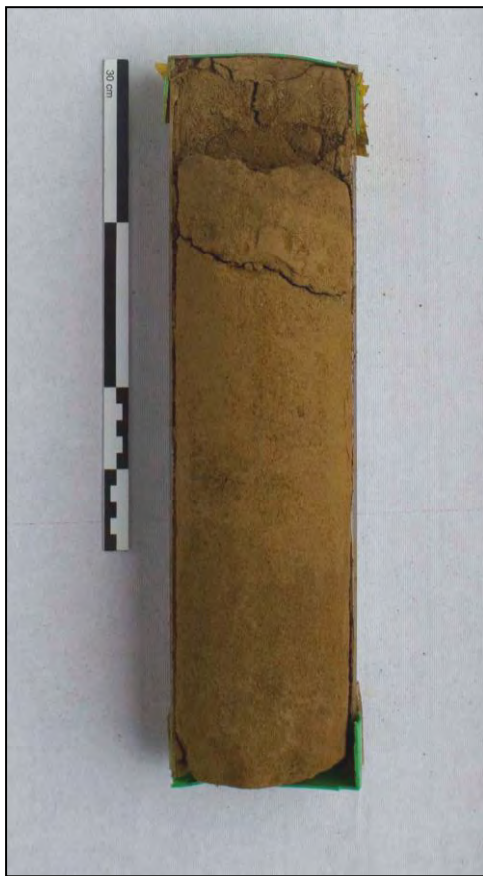
Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2), los fragment uit kern C3/1





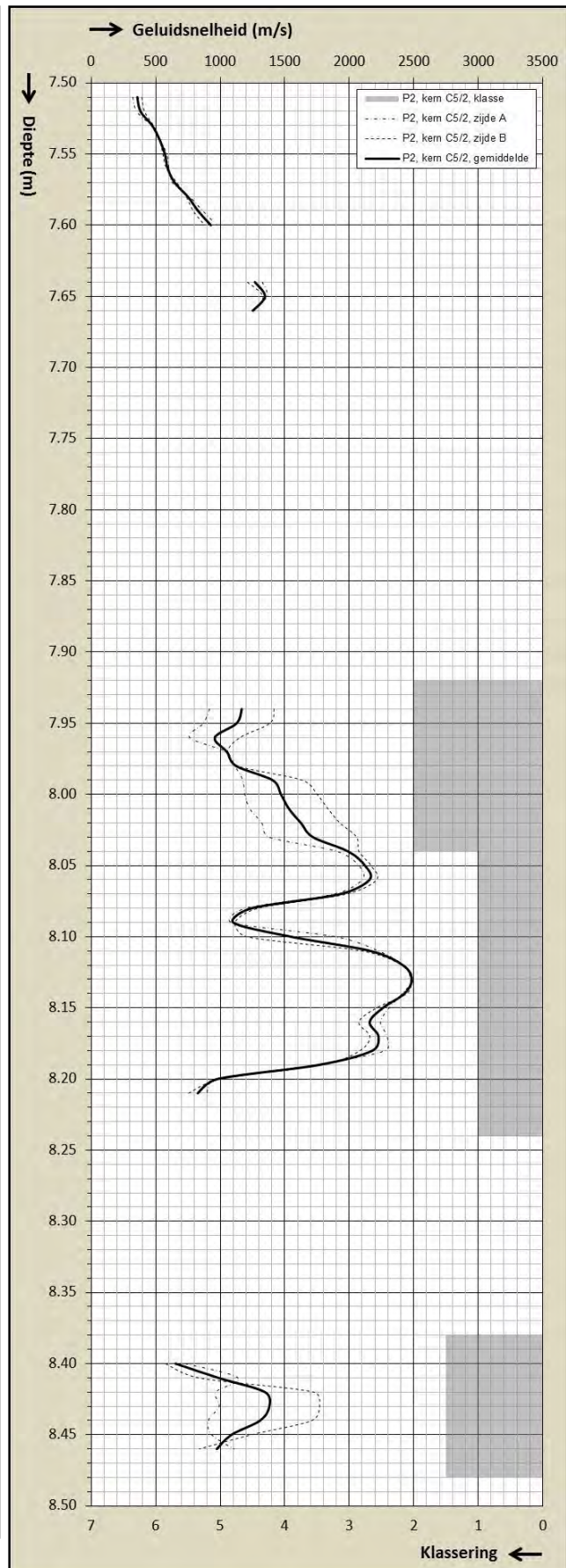
**Gasthuisbos (Pellenberg)**

Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2), kern C5/1



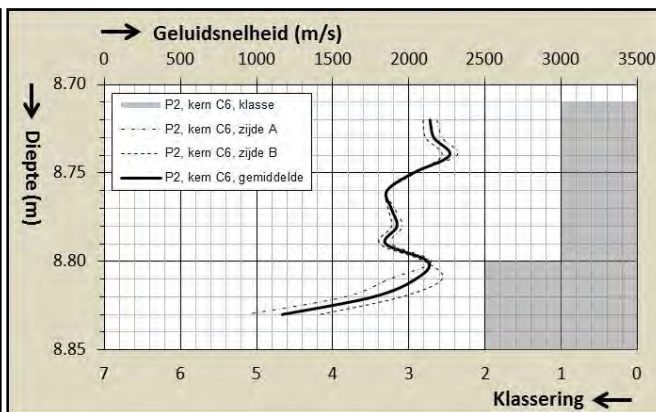
**Gasthuisbos (Pellenberg)**

Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2), kern C5/2



**Gasthuisbos (Pellenberg)**

Kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2), los fragment uit kern C6





## Gasthuisbos (Pellenberg)

### Losse Fragmenten



**Gasthuisbos (Pellenberg)**

Los fragment nr. P/F3 (fragment voor verzagen)



Staal beproefd op druksterkte						
Richting >	A		B		C	
Oriëntatie >	parallel aan groefleger		loodrecht op groefleger		parallel aan groefleger	
Lengte [cm] >	10.1 – 10.3		9.9 – 10.1		10.3	
	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]
1	50.2	2012	137.8	718	62.2	1656
2	44.1	2290	157.0	631	60.2	1711
3	50.0	2020	221.6	447	62.7	1643
4	48.7	2094	229.4	436	58.0	1776
5	58.4	1747	174.0	575	60.7	1697
6	59.7	1709	190.2	526	60.7	1697
7	65.7	1568	199.8	501	57.8	1782
8	64.9	1587	124.4	812	57.6	1788
9	66.1	1558	116.5	867	58.4	1764
<b>Gemiddelde</b>		<b>1843 ± 268</b>		<b>612 ± 157</b>		<b>1724 ± 55</b>
<b>Minimum</b>		1558		436		1643
<b>Maximum</b>		2290		867		1788



Staal beproefd op vorstbestendigheid						
Richting >	A		B		C	
Oriëntatie >	loodrecht op groefleger		parallel aan groefleger			
Lengte [cm] >	6.5 – 7.0		7.5			
	t [µs]	v [m/s]	t [µs]	v [m/s]	t [µs]	v [m/s]
1	111.1	585	53.4	1404		
2	149.3	435	49.5	1515		
3	145.8	446	48.1	1559		
4	150.1	433	48.5	1546		
5	203.4	320	49.9	1503		
6	151.1	430	53.4	1404		
7	126.2	523	55.1	1361		
8	113.6	581	57.0	1316		
9	140.3	470	51.1	1468		
10	115.3	572	44.2	1697		
11	92.5	724	38.8	1933		
12	128.7	521	40.5	1852		
13	100.2	669	40.6	1847		
14	109.6	611	39.5	1899		
15	117.2	572	41.1	1825		
16	106.2	631	40.9	1834		
17	109.3	622	42.0	1786		
18	129.7	524	45.7	1641		
19	123.9	549	44.3	1693		
20	86.9	783	50.8	1476		
21	108.6	626	48.5	1546		
22	112.3	614	52.0	1442		
23	81.2	850	50.7	1479		
24	107.1	644	48.6	1543		
25	108.6	635	48.5	1546		
26	95.8	720	51.0	1471		
27	97.4	708	53.8	1394		
28	162.4	431	53.9	1391		
29	110.2	635	55.8	1344		
30	133.1	526	56.5	1327		
31	141.8	494	57.5	1304		
32	122.8	570	56.2	1335		
<b>Gemiddelde</b>		<b>577 ± 114</b>		<b>1553 ± 191</b>		
<b>Minimum</b>		320		1304		
<b>Maximum</b>		850		1933		

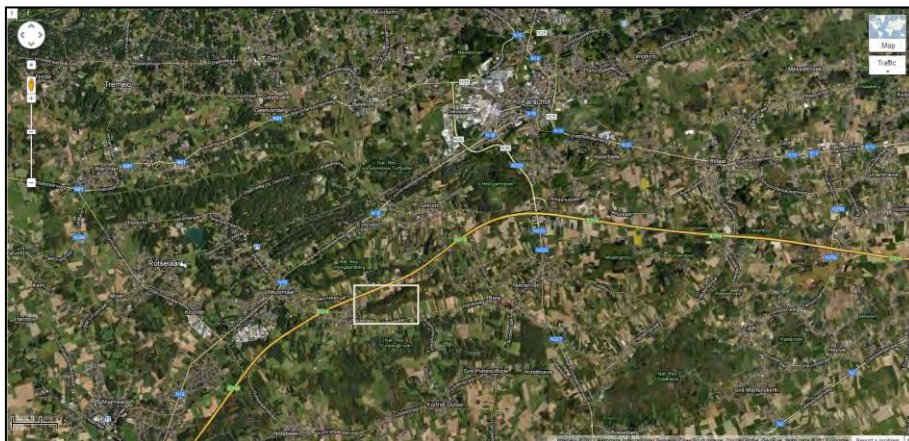
**Gasthuisbos (Pellenberg)**  
 Los fragment P/F4 (fragment voor verzagen)



Staal beproefd op druksterkte						
Richting >	A		B		C	
Oriëntatie >	parallel aan groefleger		parallel aan groefleger		loodrecht op groefleger	
Lengte [cm] >	9.7		9.8 – 9.9		9.8 – 9.9	
	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]
1	50.3	1928	50.6	1957	71.2	1376
2	50.4	1925	53.7	1844	69.9	1402
3	43.8	2215	45.0	2200	70.6	1388
4	40.7	2383	39.3	2519	69.6	1408
5	40.1	2419	39.9	2456	70.8	1384
6	41.3	2349	41.4	2367	70.9	1396
7	43.2	2245	40.9	2396	71.4	1387
8	38.8	2500	39.5	2481	69.7	1420
9	37.2	2608	36.8	2663	72.1	1373
<b>Gemiddelde</b>		<b>2286 ± 236</b>		<b>2320 ± 270</b>		<b>1393 ± 15</b>
<b>Minimum</b>		1925		1844		1373
<b>Maximum</b>		2608		2663		1420

Staal beproefd op vorstbestendigheid						
Richting >	A		B		C	
Oriëntatie >	parallel aan groefleger		loodrecht op groefleger		parallel aan groefleger	
Lengte [cm] >	6.6 – 6.8		6.6		25.0	
	t [µs]	v [m/s]	t [µs]	v [m/s]	t [µs]	v [m/s]
1	30.0	2267	53.5	1234	107.3	2330
2	30.9	2201	54.8	1204		
3	31.4	2166	53.5	1234		
4	31.8	2138	51.5	1282		
5	31.2	2179	50.4	1310		
6	31.1	2186	49.9	1323		
7	31.8	2138	48.2	1369		
8	32.8	2073	49.8	1325		
9	33.9	2006	45.9	1438		
10	34.0	1971	47.3	1395		
11	31.0	2161	46.0	1435		
12	29.0	2310	41.1	1606		
13	29.3	2287	38.3	1723		
14	28.7	2334	39.0	1692		
15	28.1	2384	40.8	1618		
16	28.0	2393	40.4	1634		
17	26.8	2500	41.8	1579		
18	27.1	2435	41.6	1587		
19	26.9	2454	39.1	1688		
20	26.2	2519	37.6	1755		
21	26.1	2529	36.9	1789		
22	25.8	2558	34.7	1902		
23	24.8	2661	33.0	2000		
<b>Gemiddelde</b>		<b>2298 ± 187</b>		<b>1527 ± 227</b>		<b>2330</b>
<b>Minimum</b>		1971		1204		
<b>Maximum</b>		2661		2000		

**Site III**  
**Beninksberg**  
**(Wezemaal)**



**Overzicht**

Kernboringen: VLA10-4.1-B4, VLA10-4.1-B5 en VLA10-4.1-B6  
11 kernen

Ontsluiting: W-1(a & b)  
geen losse fragmenten



## Beninksberg (Wezemaal)

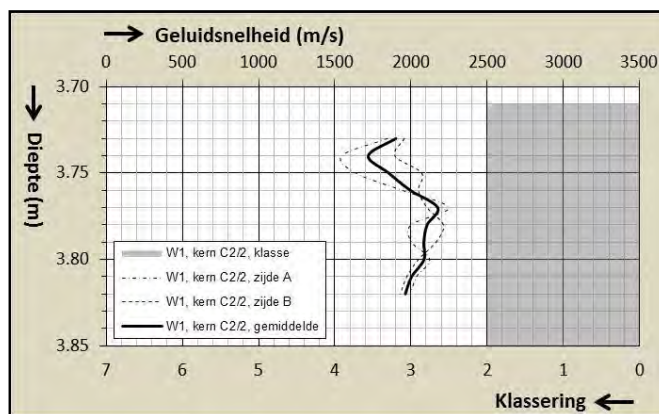
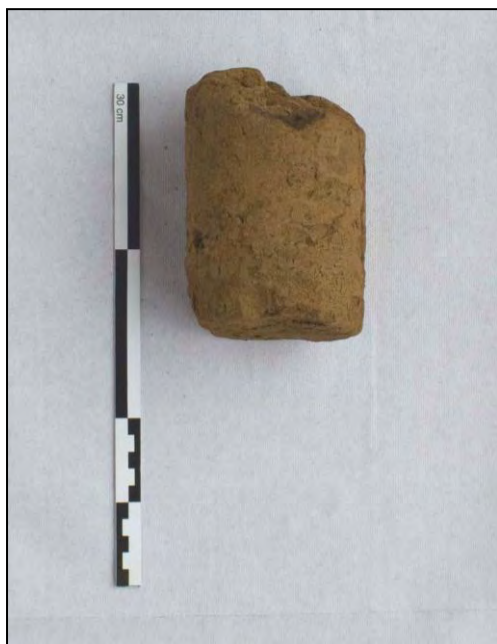
### Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1)





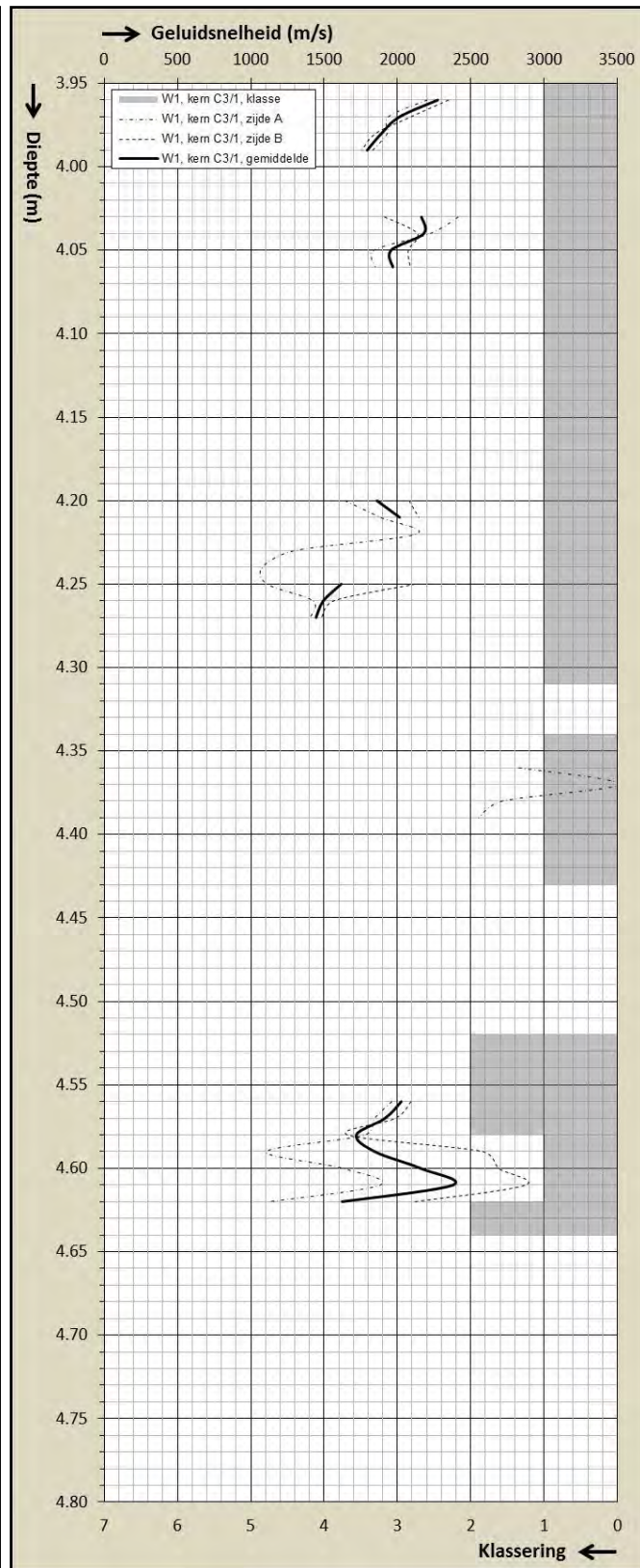
**Beninksberg (Wezemaal)**

Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1), los fragment uit kern C2/2



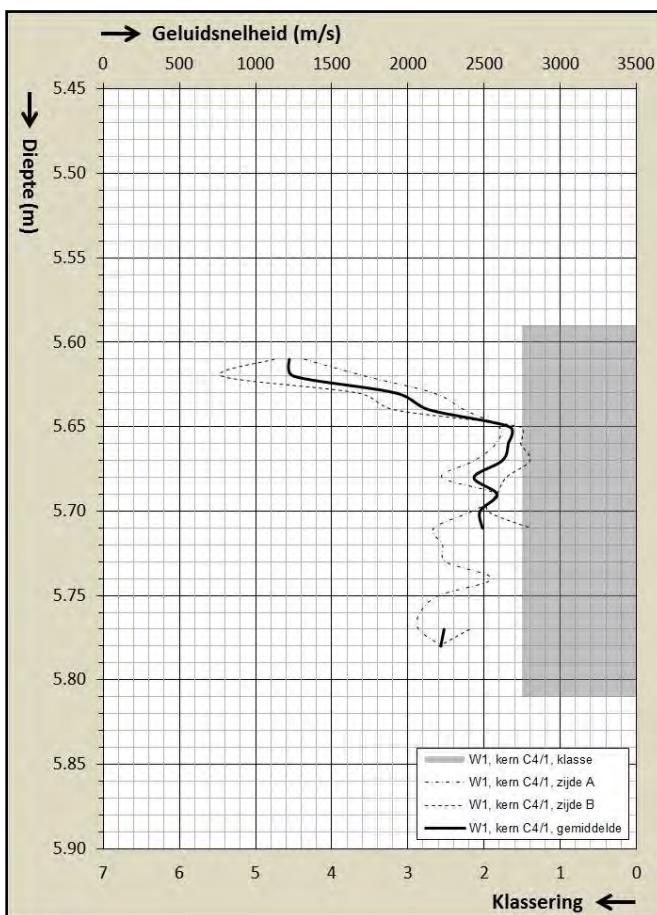
**Beninksberg (Wezemaal)**

Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1), kern C3/1



**Beninksberg (Wezemaal)**

Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1), kern C4/1





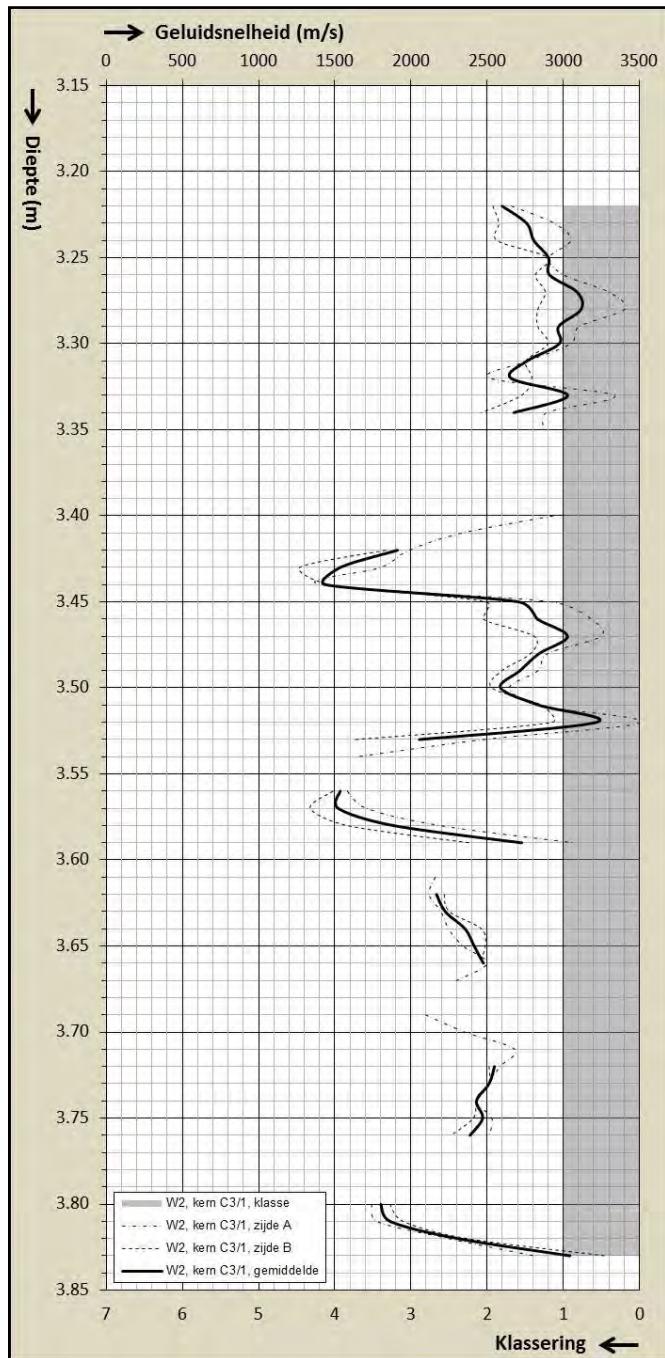
## Beninksberg (Wezemaal)

### Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2)



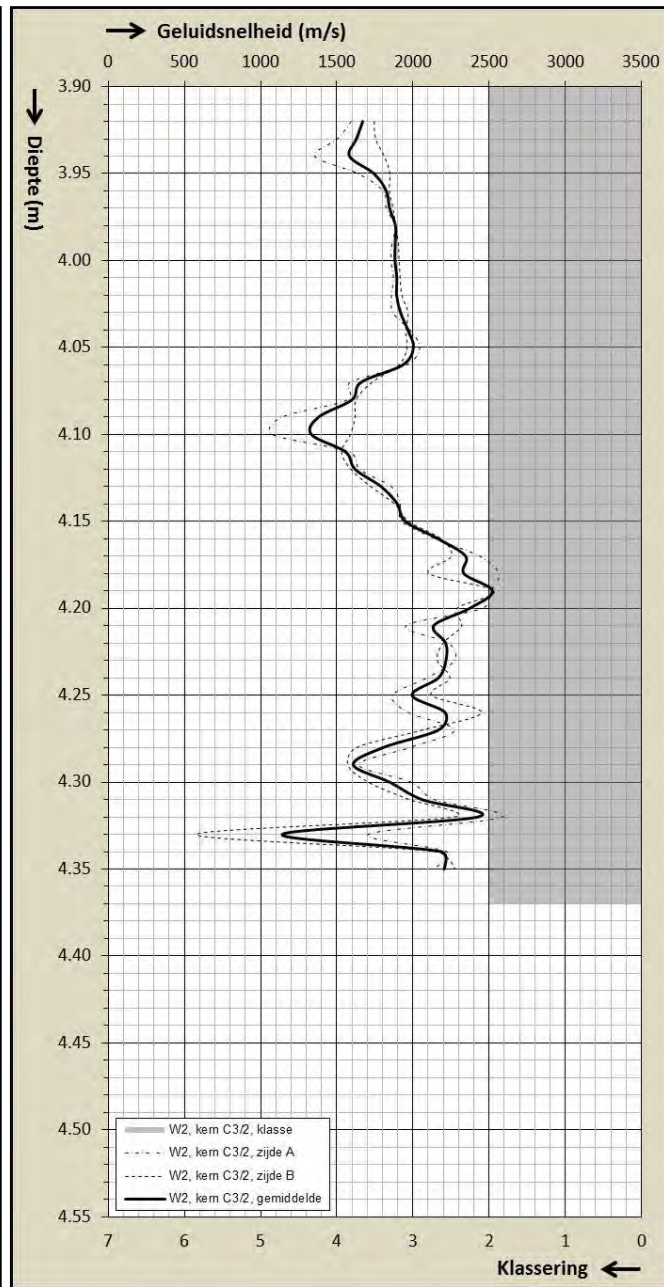
**Beninksberg (Wezemaal)**

Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2), kern C3/1



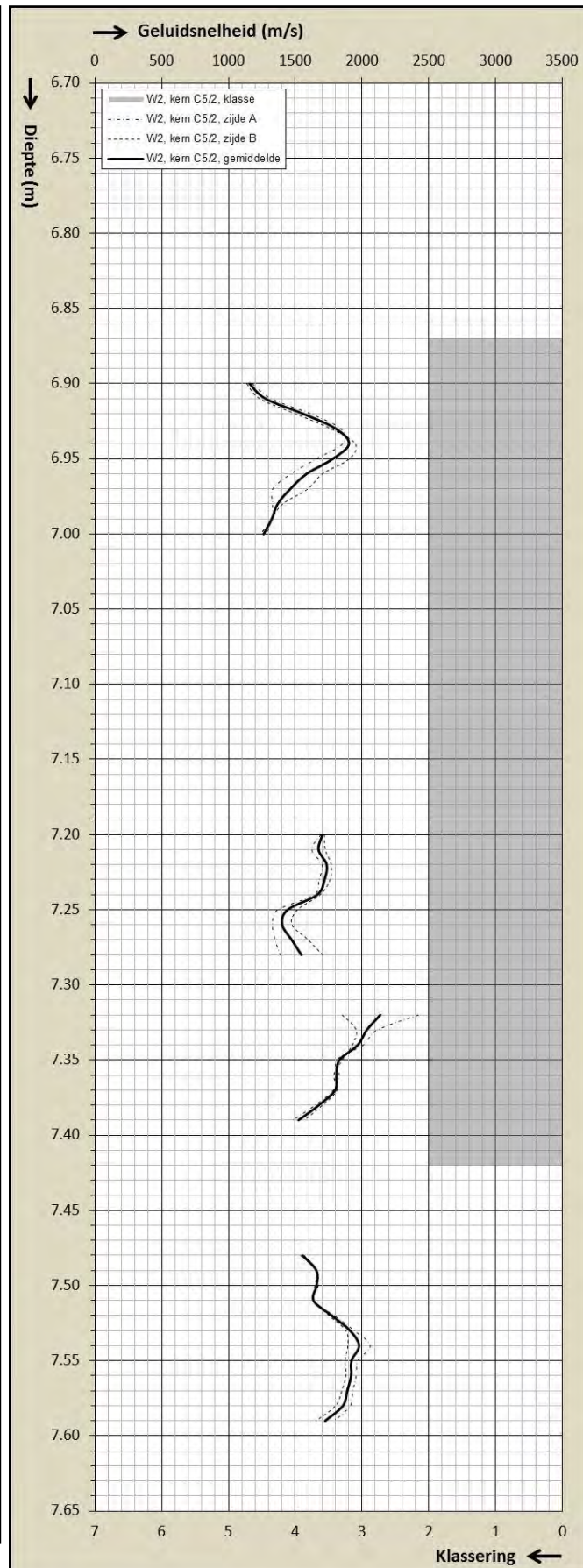


**Beninksberg (Wezemaal)**  
Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2), kern C3/2



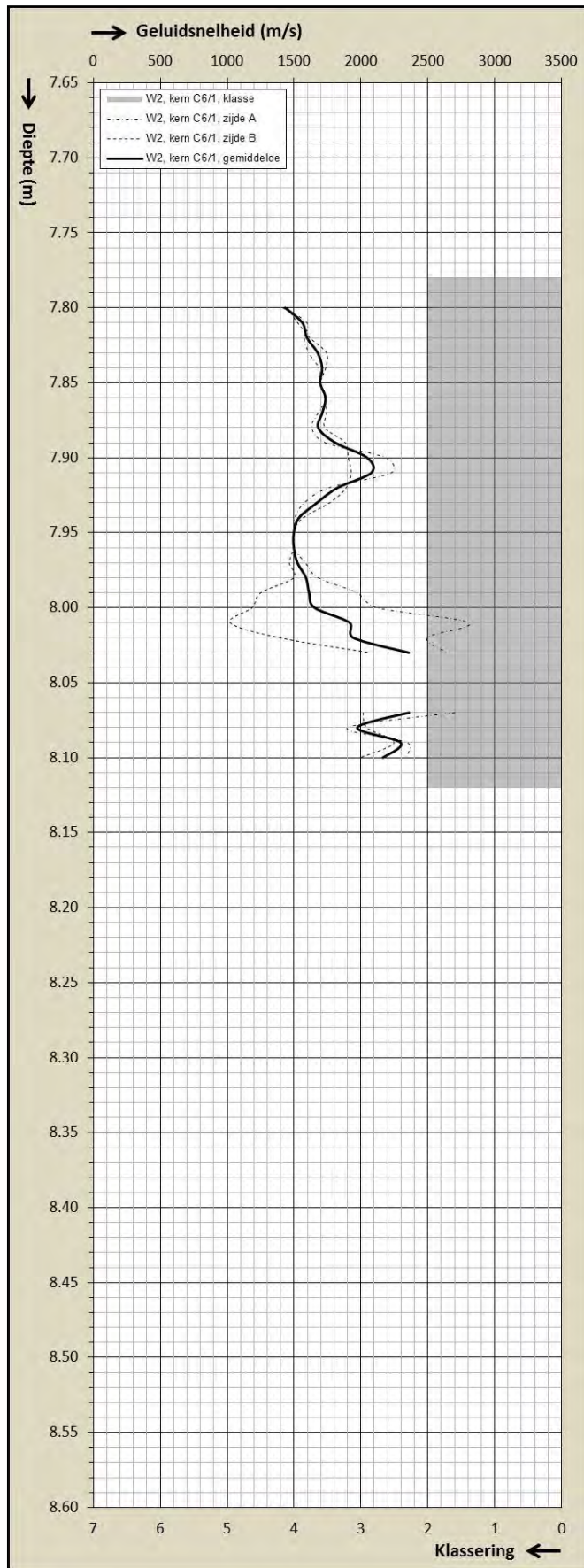
**Beninksberg (Wezemaal)**

Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2), kern C5/2





**Beninksberg (Wezemaal)**  
Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2), kern C6/1



## Beninksberg (Wezemaal)

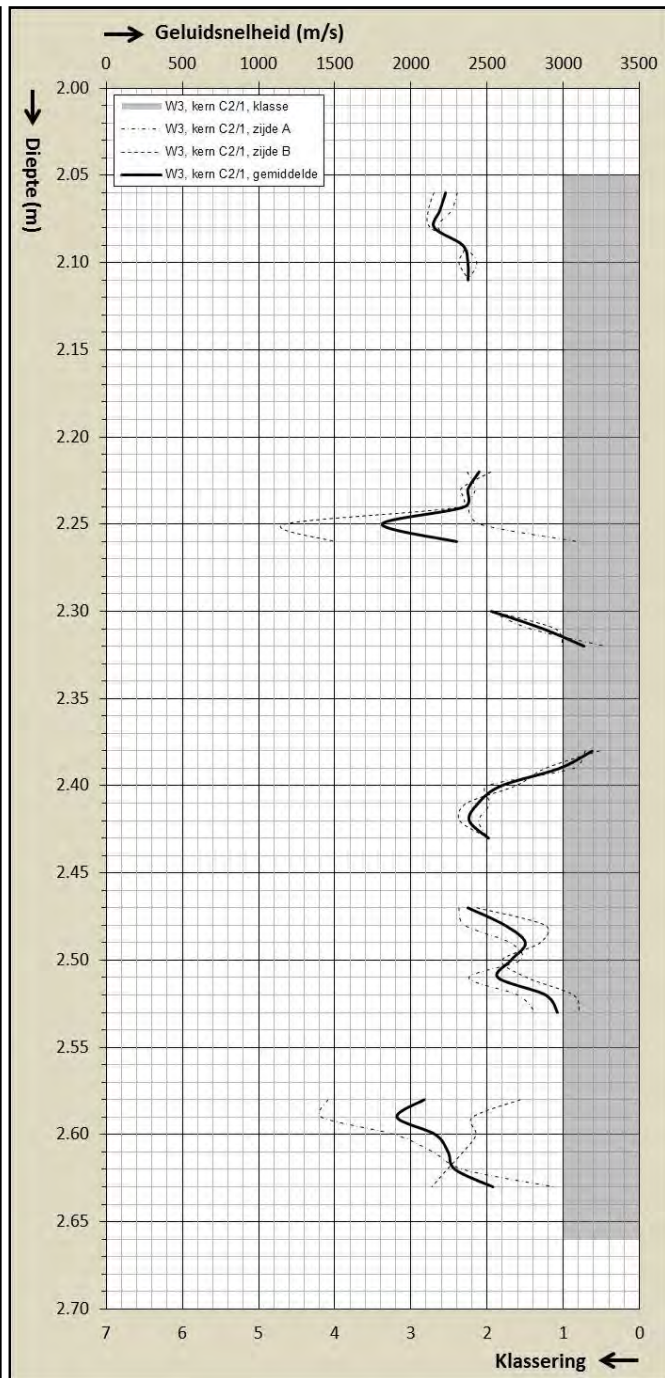
### Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3)





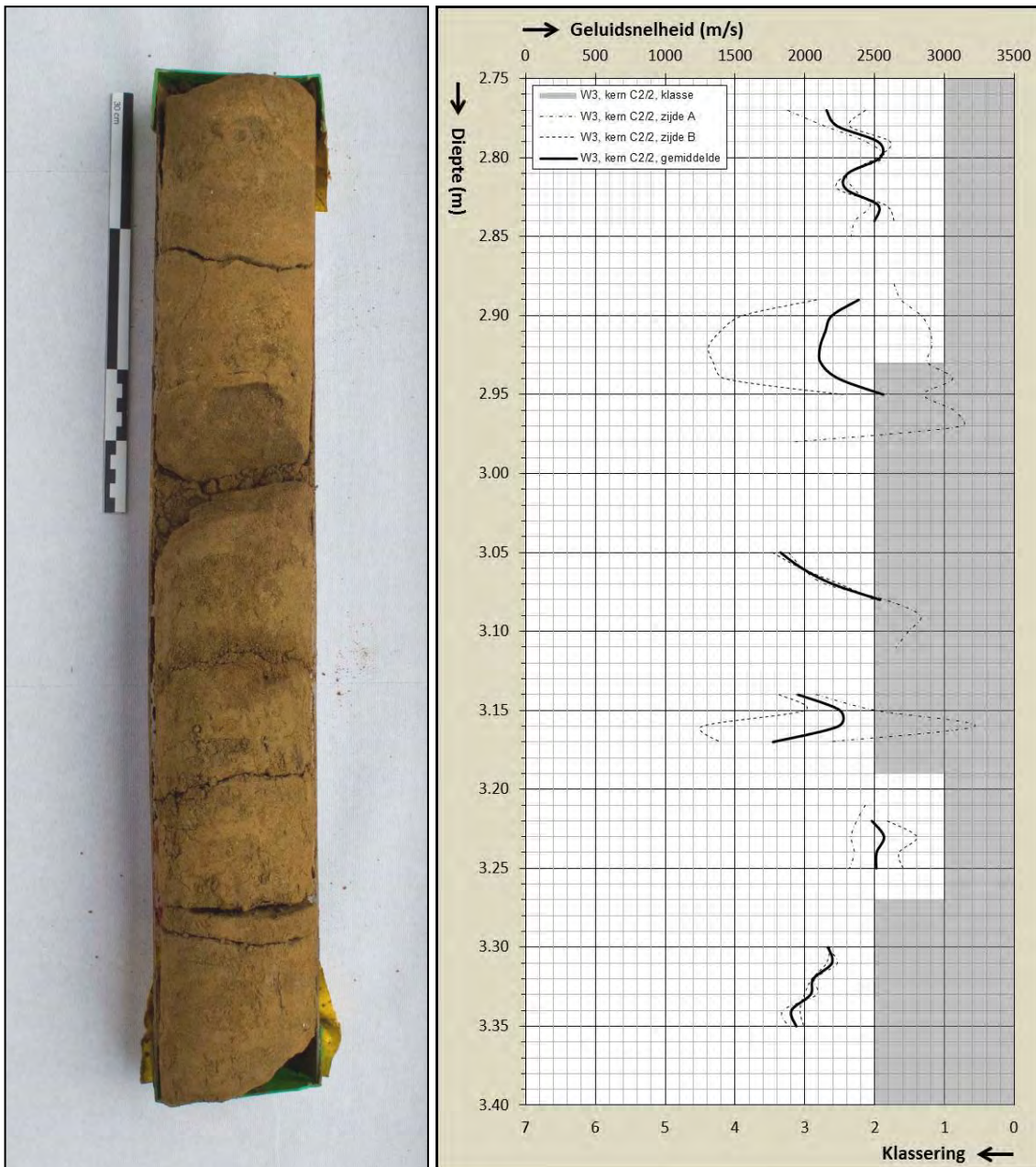
**Beninksberg (Wezemaal)**

Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3), kern C2/1



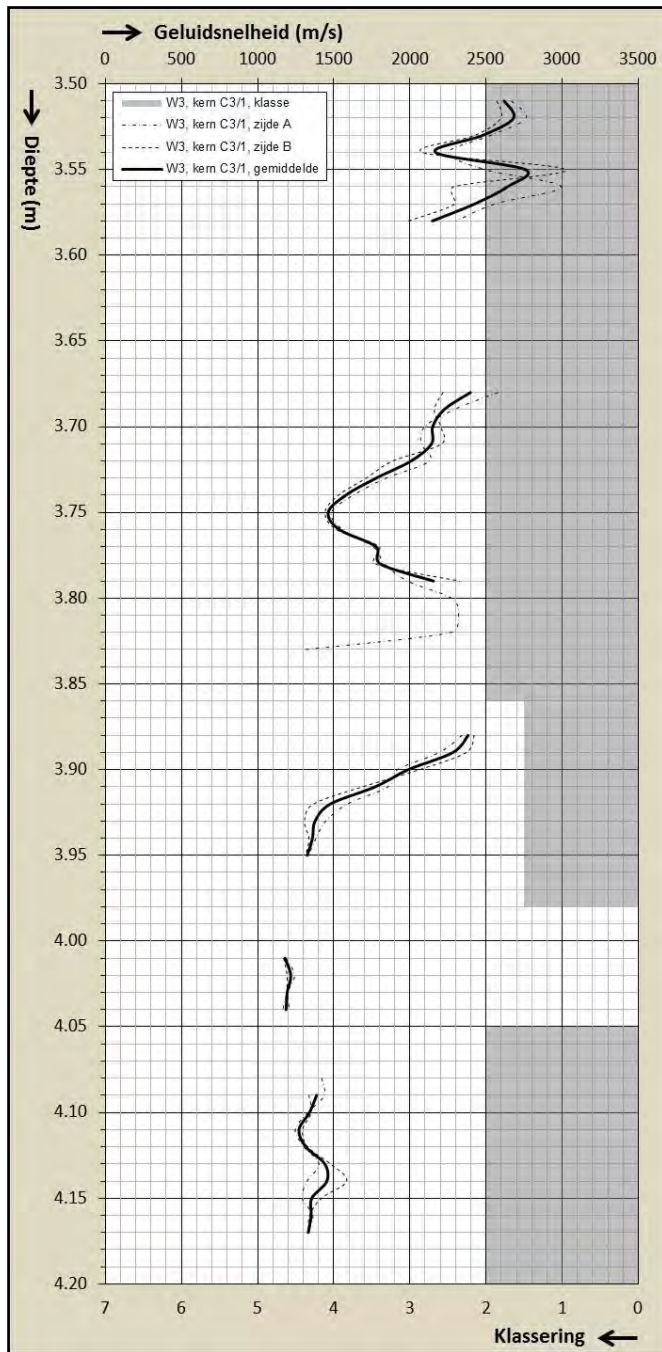


**Beninksberg (Wezemaal)**  
Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3), kern C2/2



**Beninksberg (Wezemaal)**

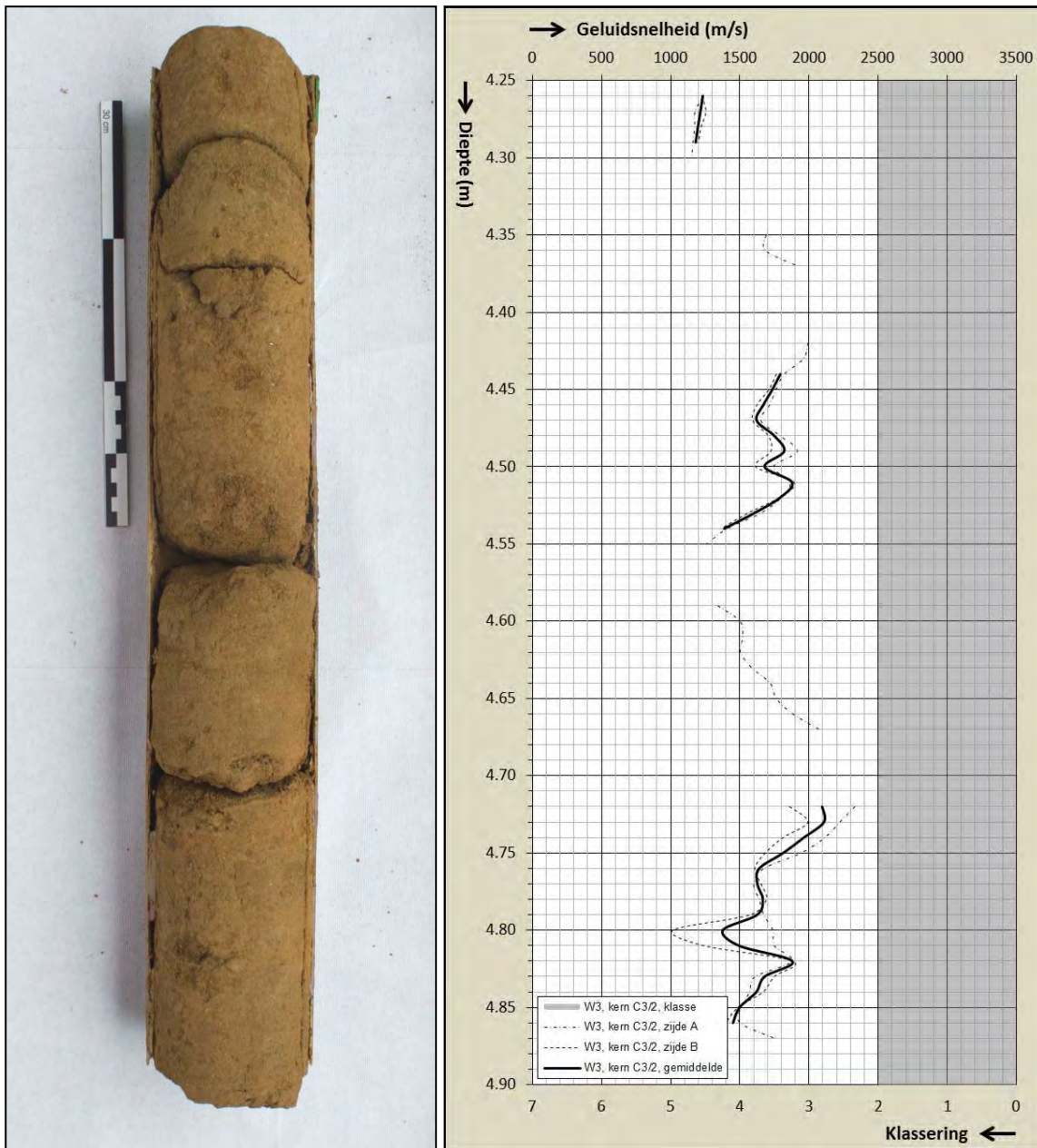
Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3), kern C3/1



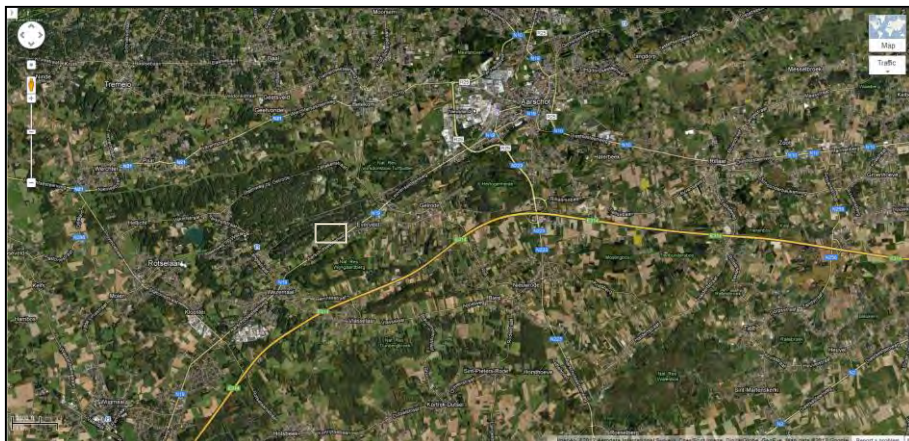


**Beninksberg (Wezemaal)**

Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3), kern C3/2



**Site IV**  
**Middelberg**  
**(Rotselaar)**



**Overzicht**

Kernboringen: VLA10-4.1-B7 en VLA10-4.1-B8

7 kernen

Ontsluiting: R-2

2 losse fragmenten

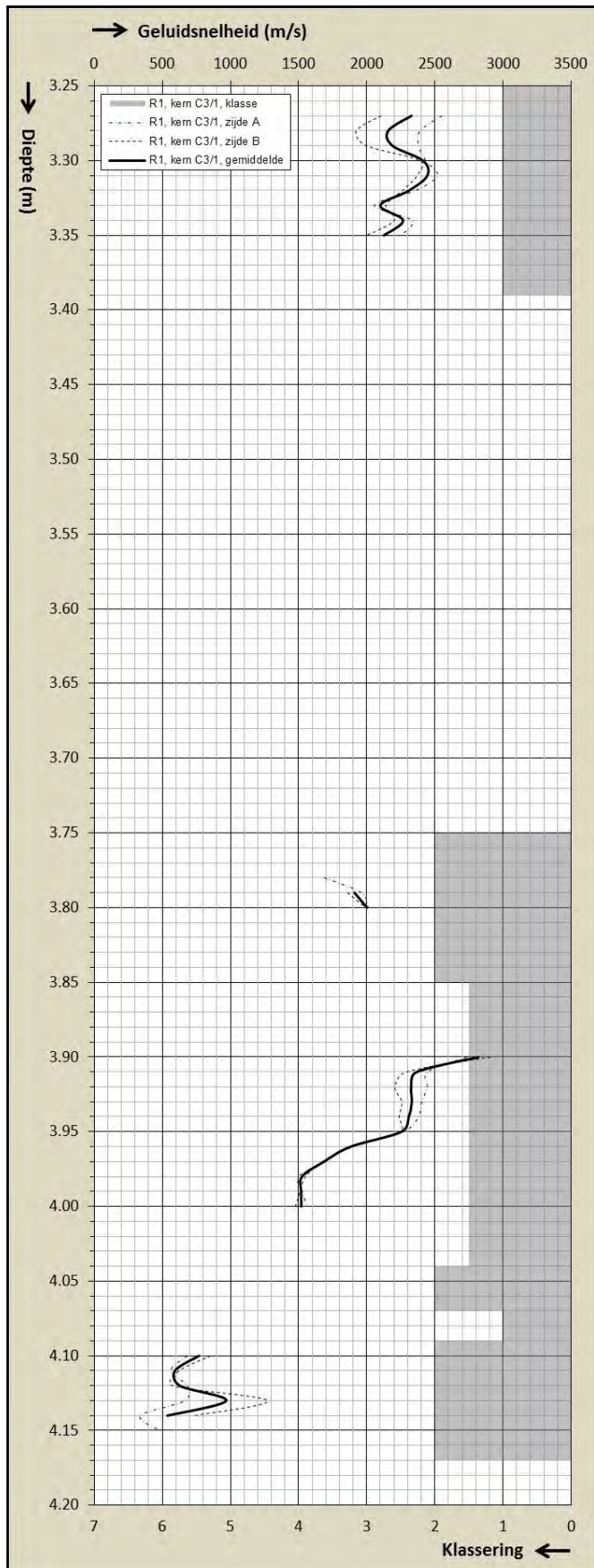


## Middelberg (Rotselaar)

### Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1)

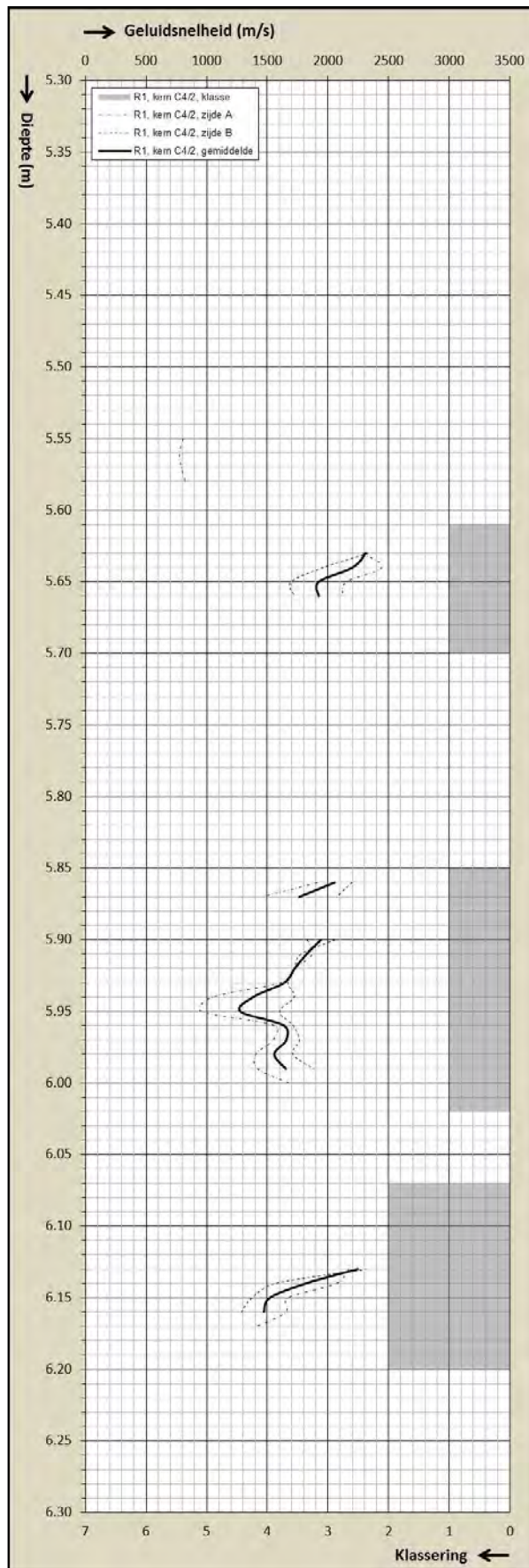


**Middelberg (Rotselaar)**  
Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1), kern C3/1



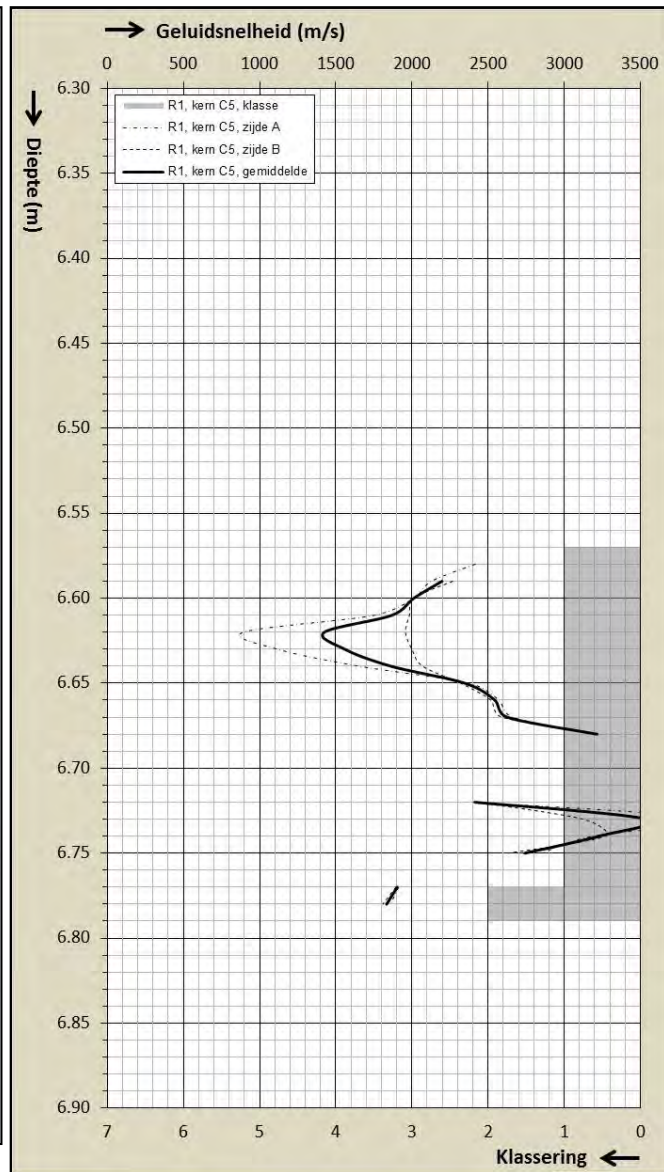


**Middelberg (Rotselaar)**  
Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1), kern C4/2



**Middelberg (Rotselaar)**

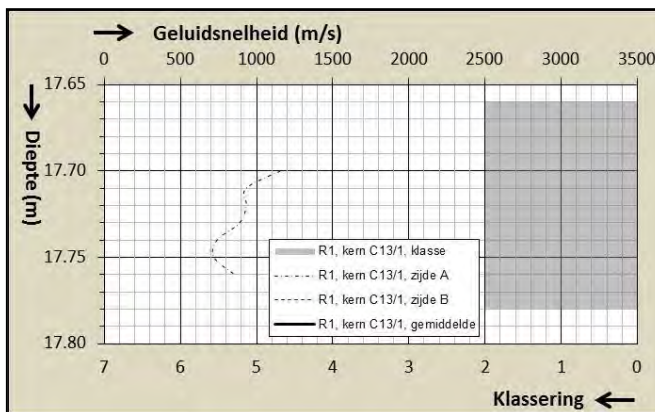
Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1), kern C5





**Middelberg (Rotselaar)**

Kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1), los fragment uit kern C13/1



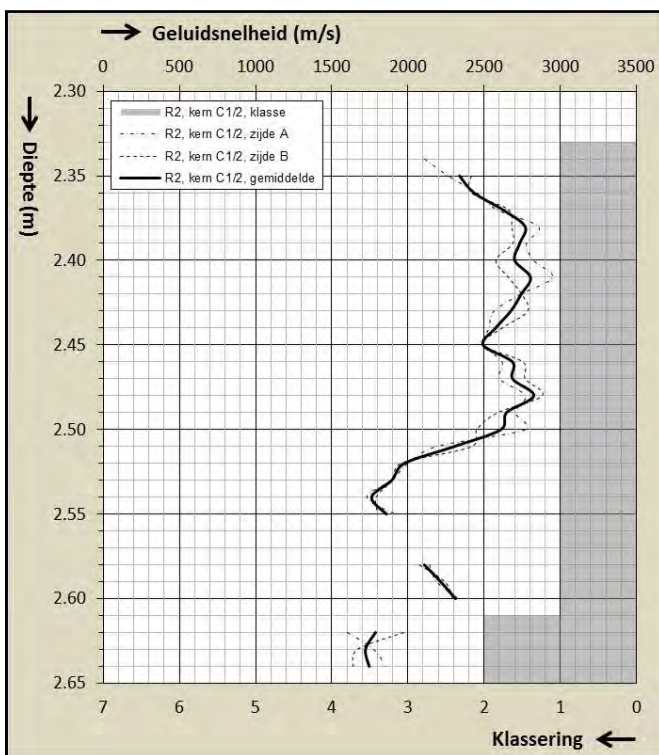
## Middelberg (Rotselaar)

### Kernboring VLA10-4.1-B8 (075W/0390 R2)



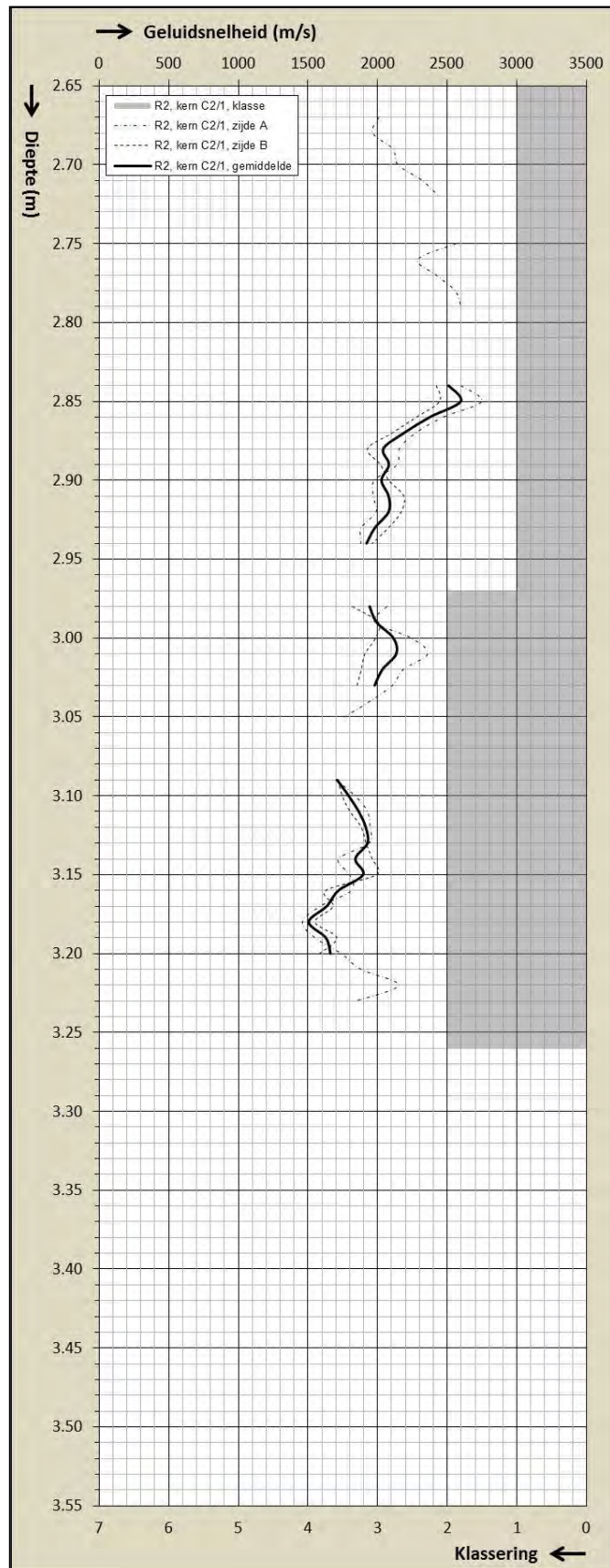
**Middelberg (Rotselaar)**

Kernboring VLA10-4.1-B8 (075W/0390 R2), kern C1/2



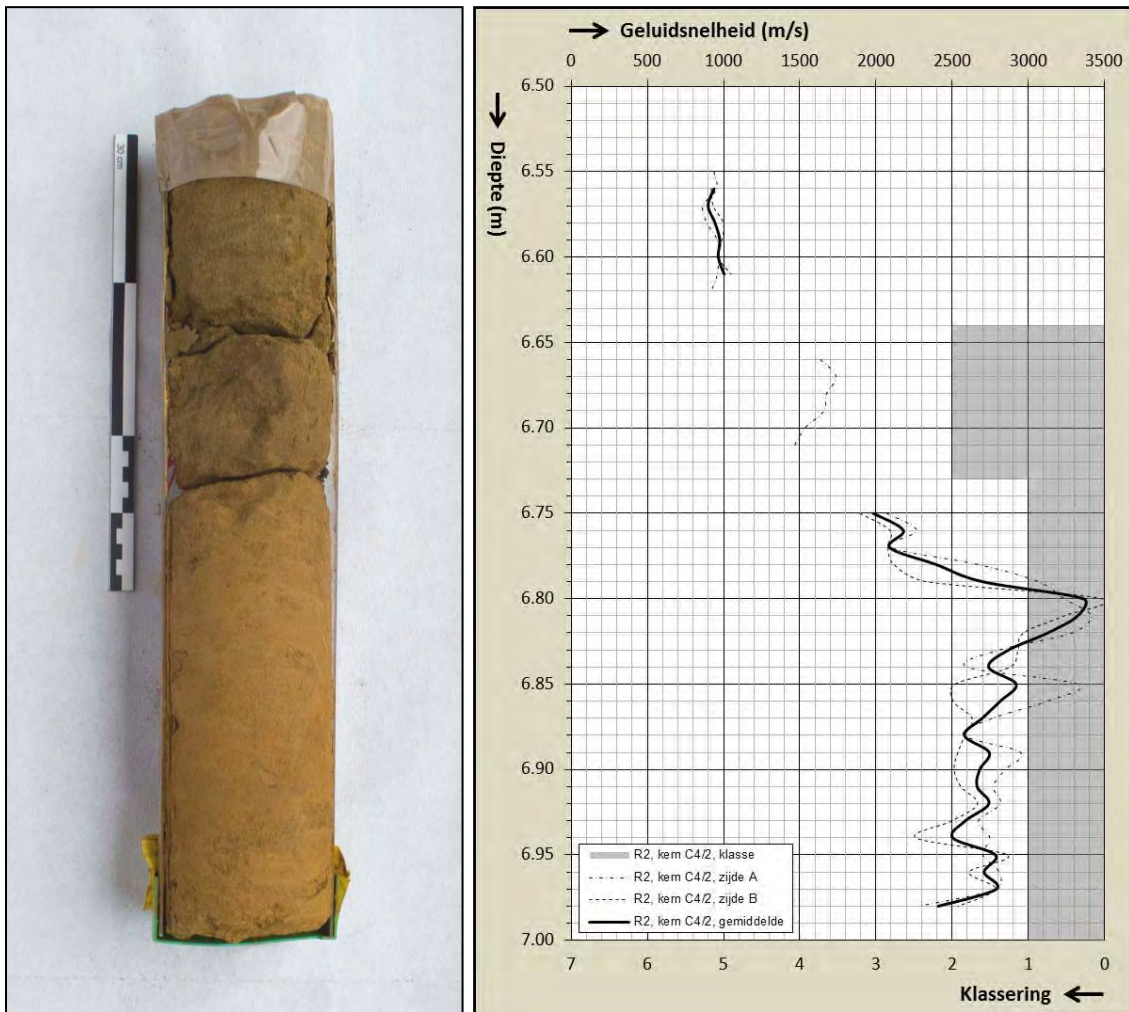


**Middelberg (Rotselaar)**  
Kernboring VLA10-4.1-B8 (075W/0390 R2), kern C2/1



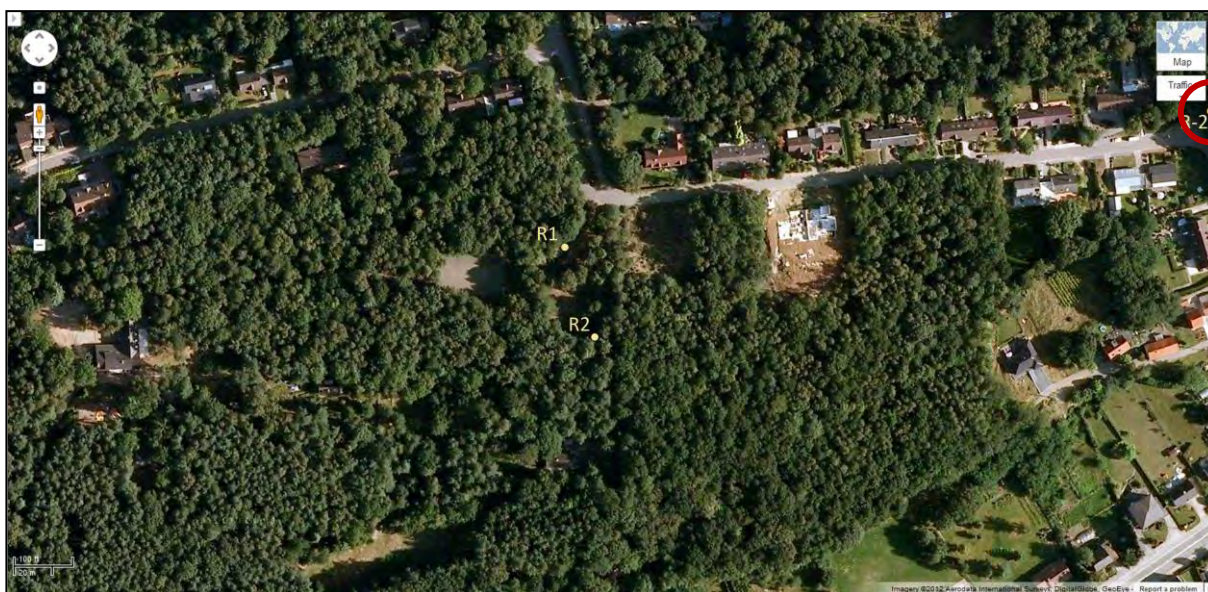


**Middelberg (Rotselaar)**  
Kernboring VLA10-4.1-B8 (075W/0390 R2), kern C4/2



## Middelberg (Rotselaar)

### Losse Fragmenten



**Middelberg (Rotselaar)**  
 Los fragment R/F6 (fragment voor verzagen)



Staal beproefd op druksterkte						
Zijde >	A		B		C	
Oriëntatie >	parallel aan groefleger		parallel aan groefleger		loodrecht op groefleger	
Lengte [cm] >	9.6 – 9.7		9.5 – 9.6		9.6	
	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]
1	37.6	2580	36.4	2637	54.3	1768
2	39.5	2456	37.3	2574	49.2	1951
3	41.6	2332	37.0	2595	47.2	2034
4	42.6	2277	38.6	2487	49.6	1935
5	41.4	2343	39.1	2455	51.7	1857
6	39.1	2455	38.5	2468	51.1	1879
7	32.4	2963	42.4	2241	53.1	1808
8	34.7	2767	43.1	2204	51.8	1853
9	37.8	2540	43.4	2189	50.2	1912
<b>Gemiddelde</b>		<b>2524 ± 222</b>		<b>2428 ± 174</b>		<b>1889 ± 80</b>
<b>Minimum</b>		2277		2189		1768
<b>Maximum</b>		2963		2637		2034

Staal beproefd op vorstbestendigheid						
Zijde >	A		B		C	
Oriëntatie >	parallel aan groefleger		loodrecht op groefleger		parallel aan groefleger	
Lengte [cm] >	7.1		7.3 – 7.5		26.5	
	t [µs]	v [m/s]	t [µs]	v [m/s]	t [µs]	v [m/s]
1	29.4	2415	42.7	1756	116.1	2283
2	28.0	2536	41.5	1807		
3	25.0	2840	38.6	1943		
4	24.4	2910	39.4	1904		
5	25.0	2840	41.6	1803		
6	26.3	2700	43.0	1744		
7	27.0	2630	44.2	1697		
8	26.7	2659	44.6	1682		
9	29.8	2383	41.8	1794		
10	31.0	2290	43.3	1709		
11	33.8	2101	44.8	1652		
12	33.5	2119	45.9	1612		
13	33.1	2145	47.0	1574		
14	33.6	2113	45.2	1637		
15	31.8	2233	44.2	1674		
16	31.4	2261	40.5	1827		
17	31.6	2247	40.6	1798		
18	31.3	2268	40.7	1794		
19	30.9	2298	40.0	1825		
20	30.9	2298	39.9	1830		
21	30.7	2313	39.6	1843		
22	31.8	2233	40.7	1794		
23	32.1	2212	41.2	1772		
24	32.2	2205	41.1	1776		
25	33.0	2152	41.3	1768		
<b>Gemiddelde</b>		<b>2376 ± 247</b>		<b>1761 ± 88</b>		<b>2283</b>
<b>Minimum</b>		2101		1574		
<b>Maximum</b>		2910		1943		



**Middelberg (Rotselaar)**

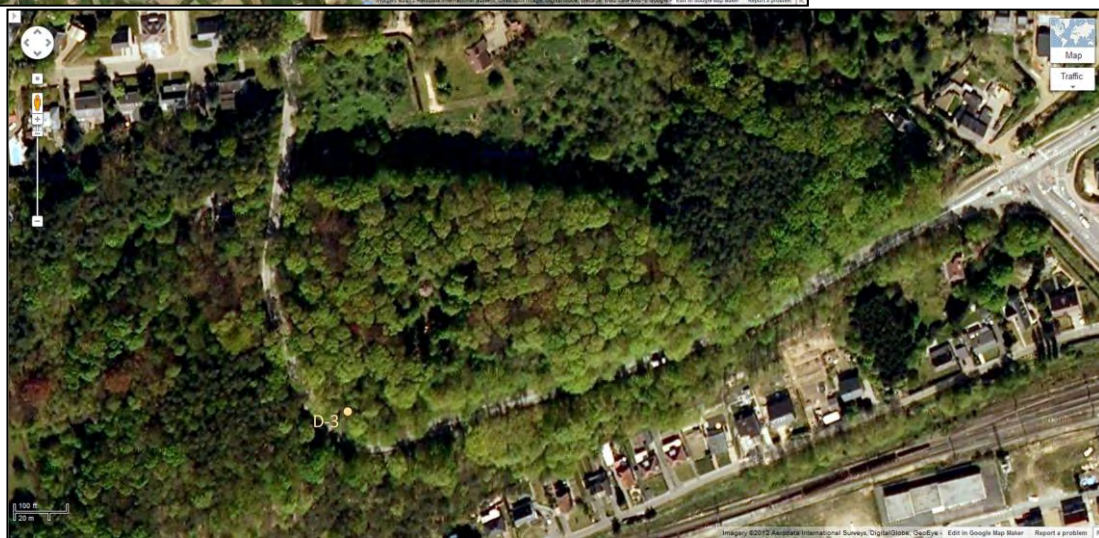
Los fragment R/F7 (fragment voor verzagen)



Staal beproefd op druksterkte						
Zijde >	A		B		C	
Oriëntatie >						
Lengte [cm] >	8.5		8.8 – 8.9		8.4 – 8.7	
	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]	t [μs]	v [m/s]
1	67.4	1261	74.0	1189	68.0	1235
2	68.5	1241	73.0	1205	70.2	1197
3	67.2	1265	71.2	1236	66.2	1284
4	66.2	1284	68.6	1283	64.7	1314
5	65.8	1292	66.7	1334	64.6	1331
6	68.4	1243	66.8	1332	62.1	1385
7	68.8	1235	64.9	1371	61.3	1419
8	69.0	1232	65.3	1363	62.9	1383
<b>Gemiddelde</b>		<b>1257 ± 23</b>		<b>1289 ± 72</b>		<b>1319 ± 77</b>
<b>Minimum</b>		1232		1189		1197
<b>Maximum</b>		1292		1371		1419

## Site V

### Langenberg (Diest)



#### Overzicht

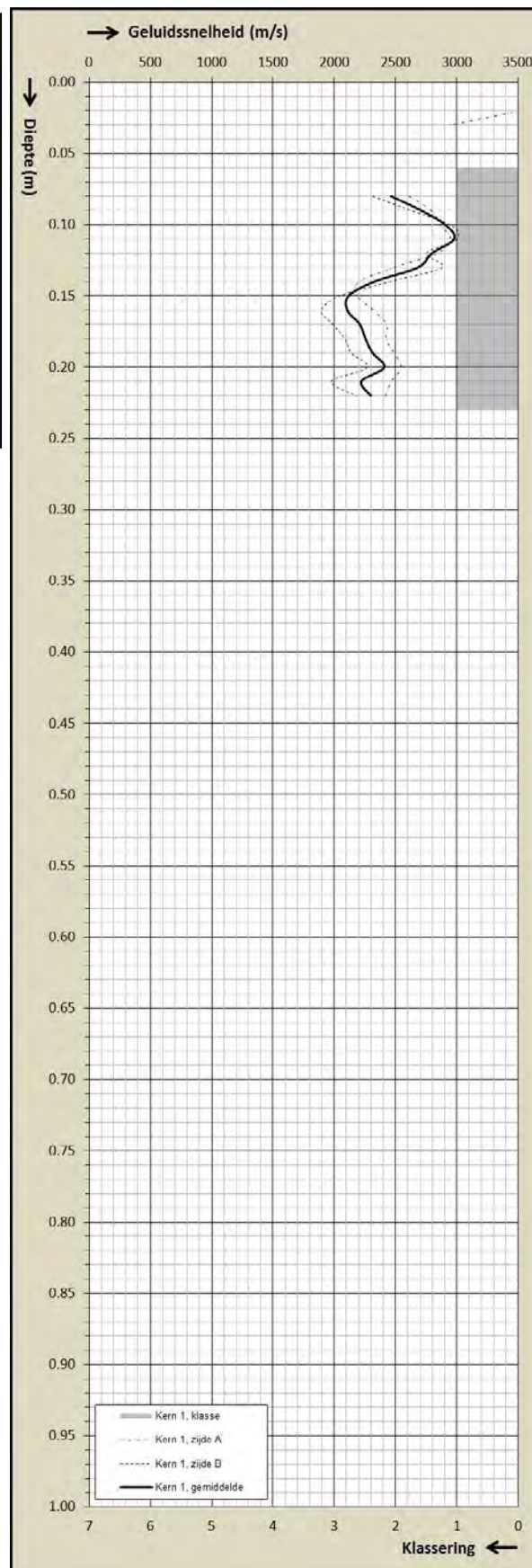
Kernboringen:

15 kernen

Ontsluiting: D-3

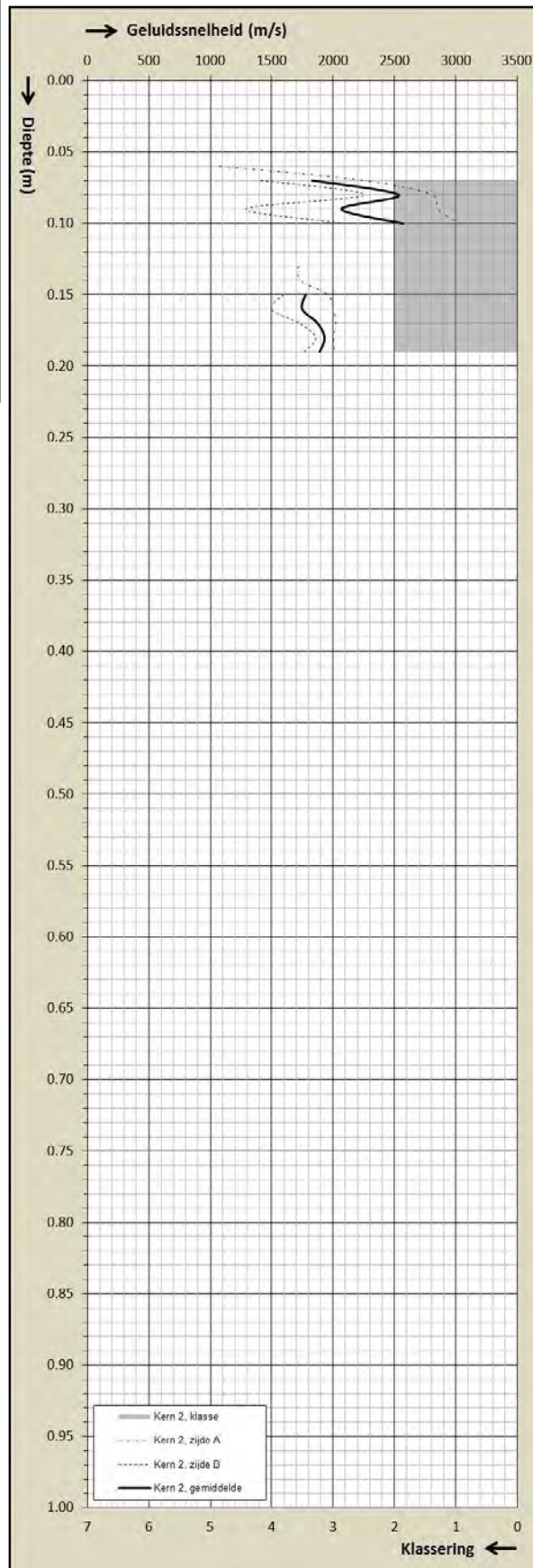
geen losse fragmenten

Langenberg (Diest)  
Kernboring 1



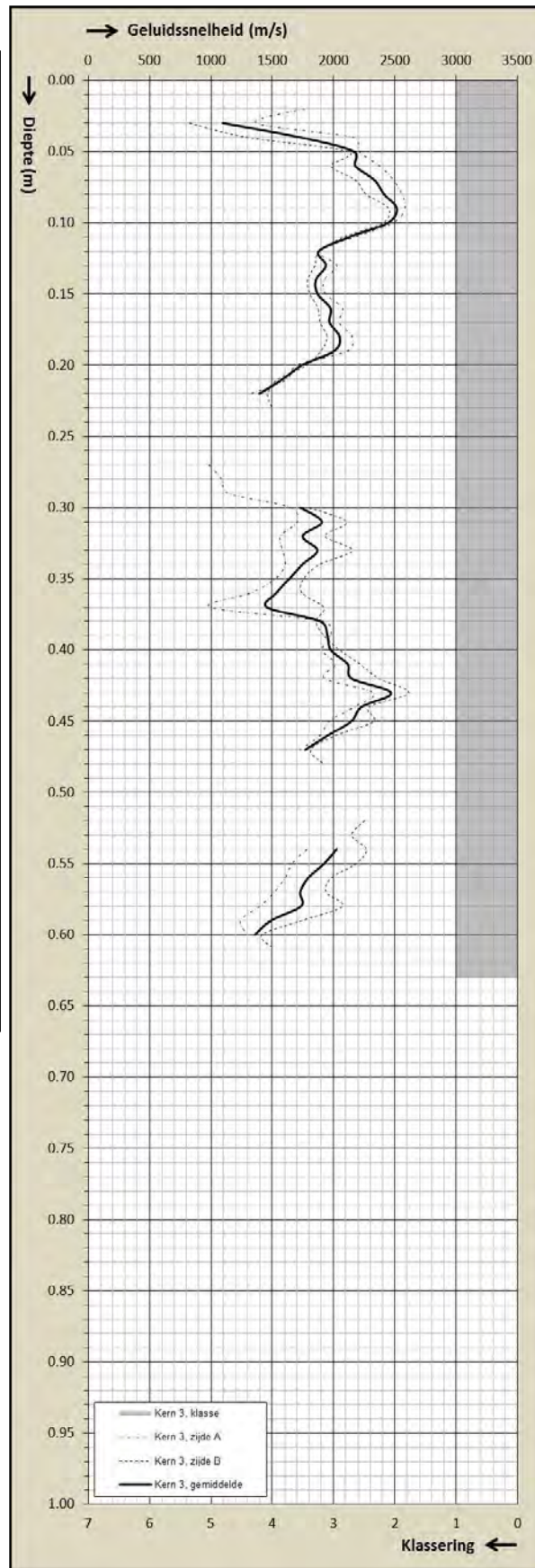


**Langenberg (Diest)**  
Kernboring 2

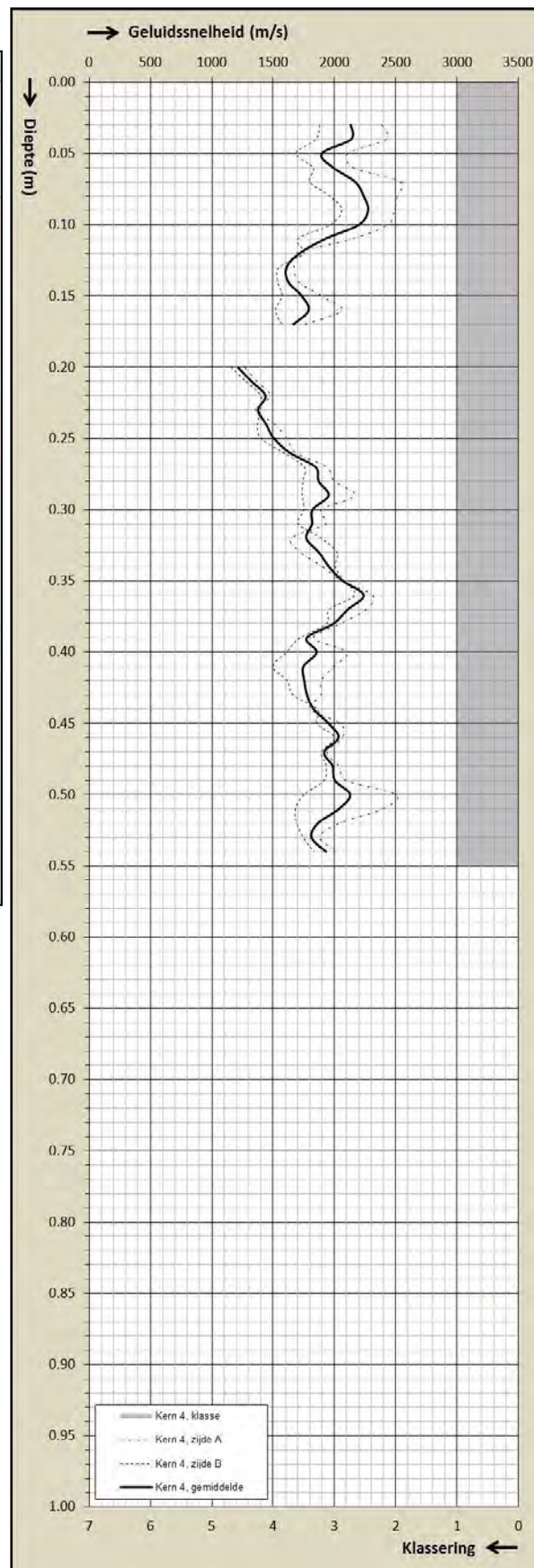




Langenberg (Diest)  
Kernboring 3

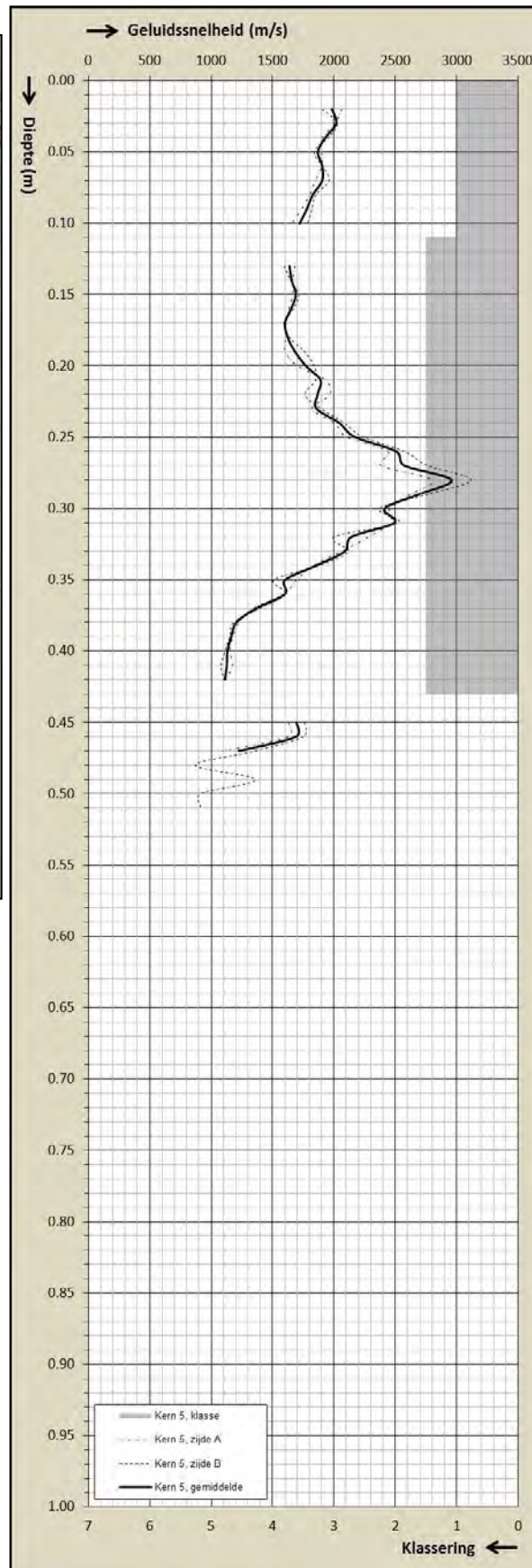


Langenberg (Diest)  
Kernboring 4

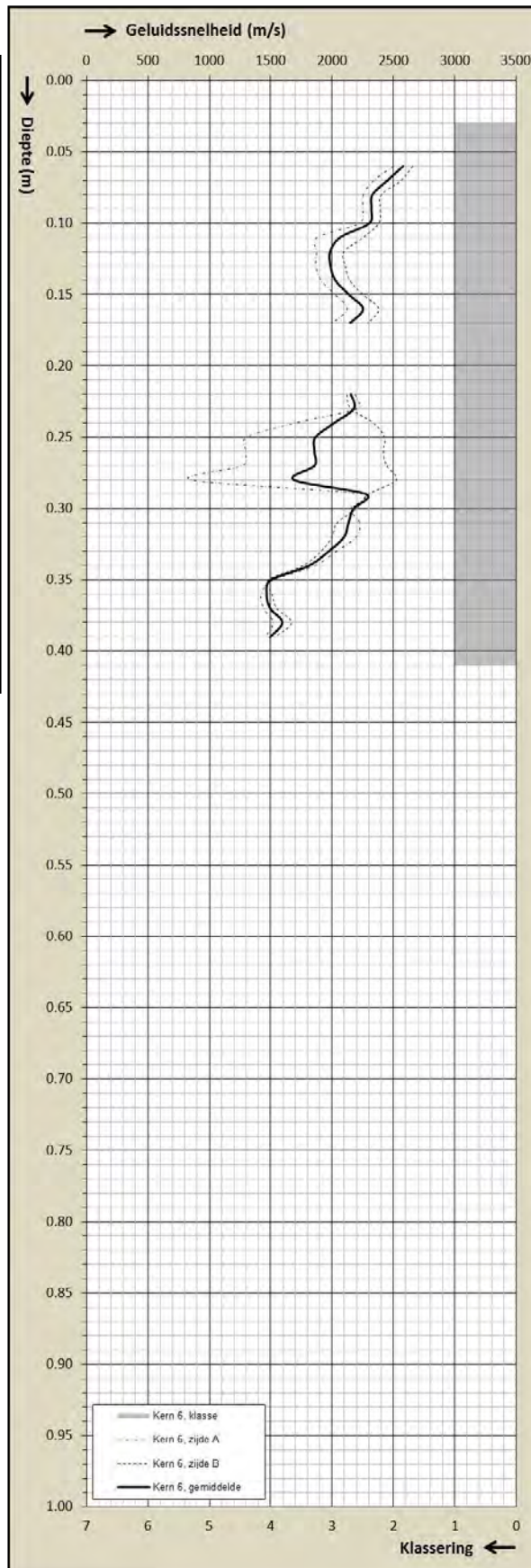




Langenberg (Diest)  
Kernboring 5

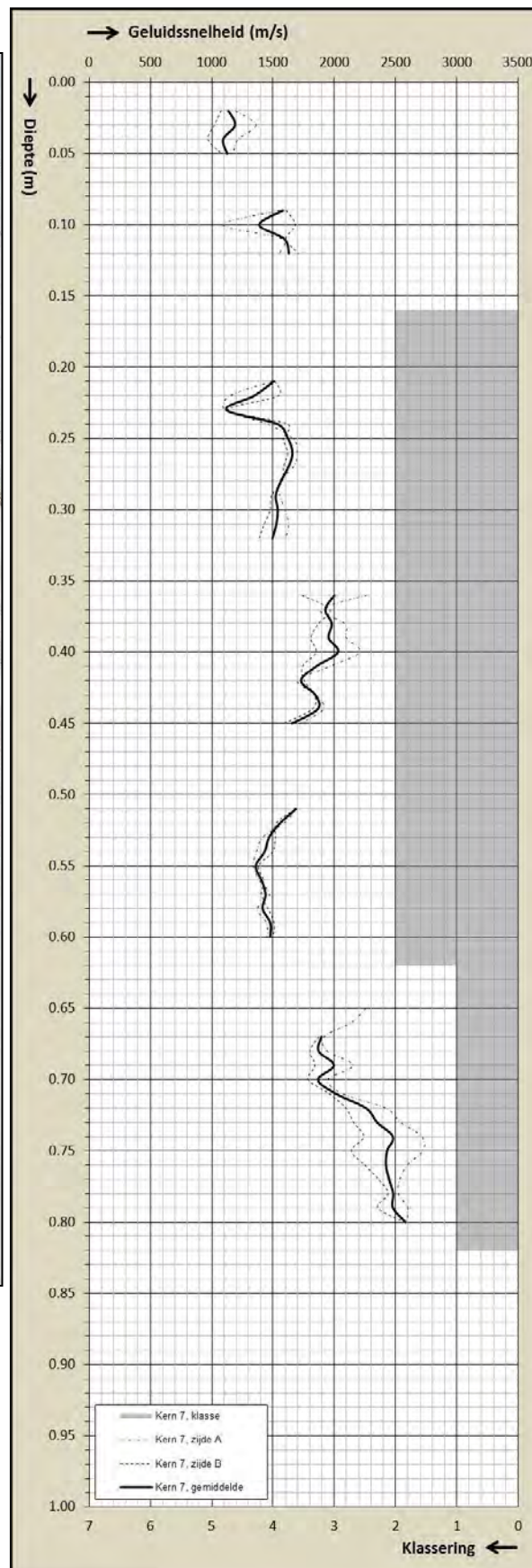


Langenberg (Diest)  
Kernboring 6

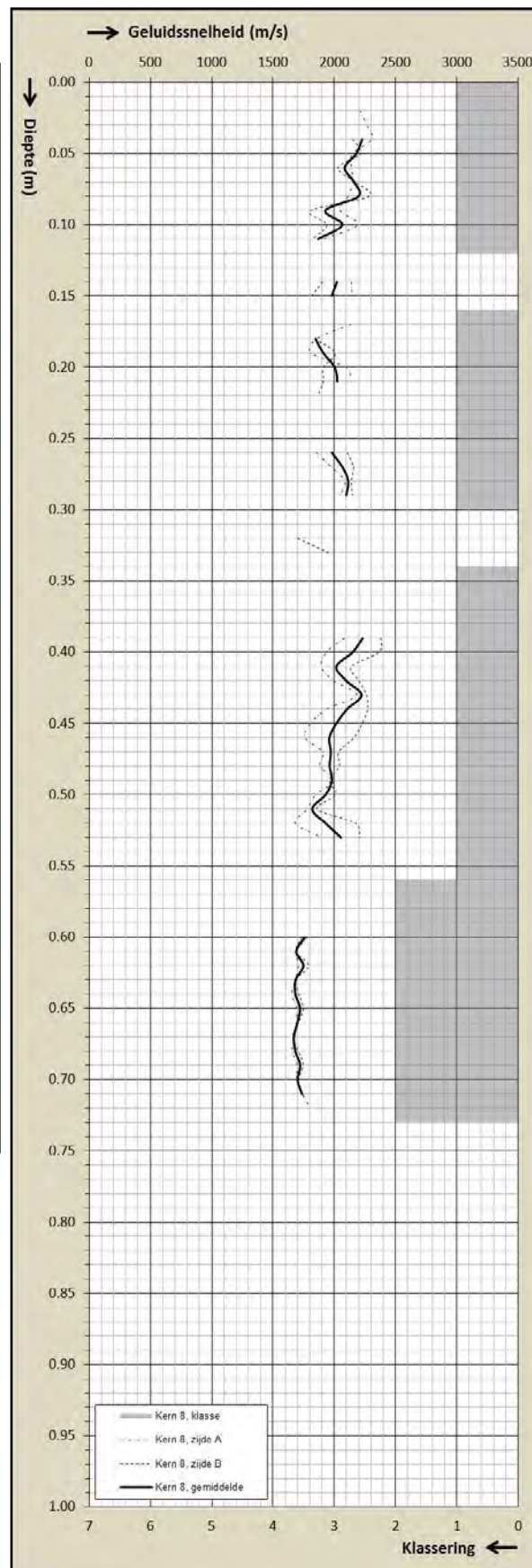




Langenberg (Diest)  
Kernboring 7

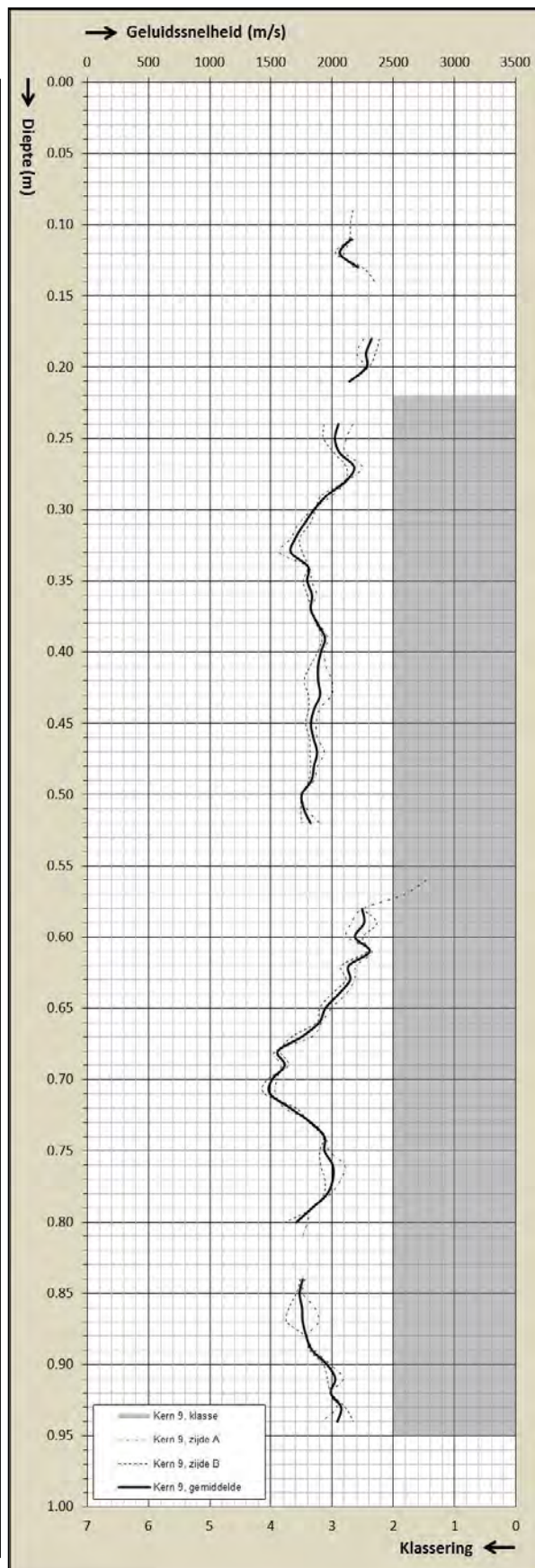


Langenberg (Diest)  
Kernboring 8

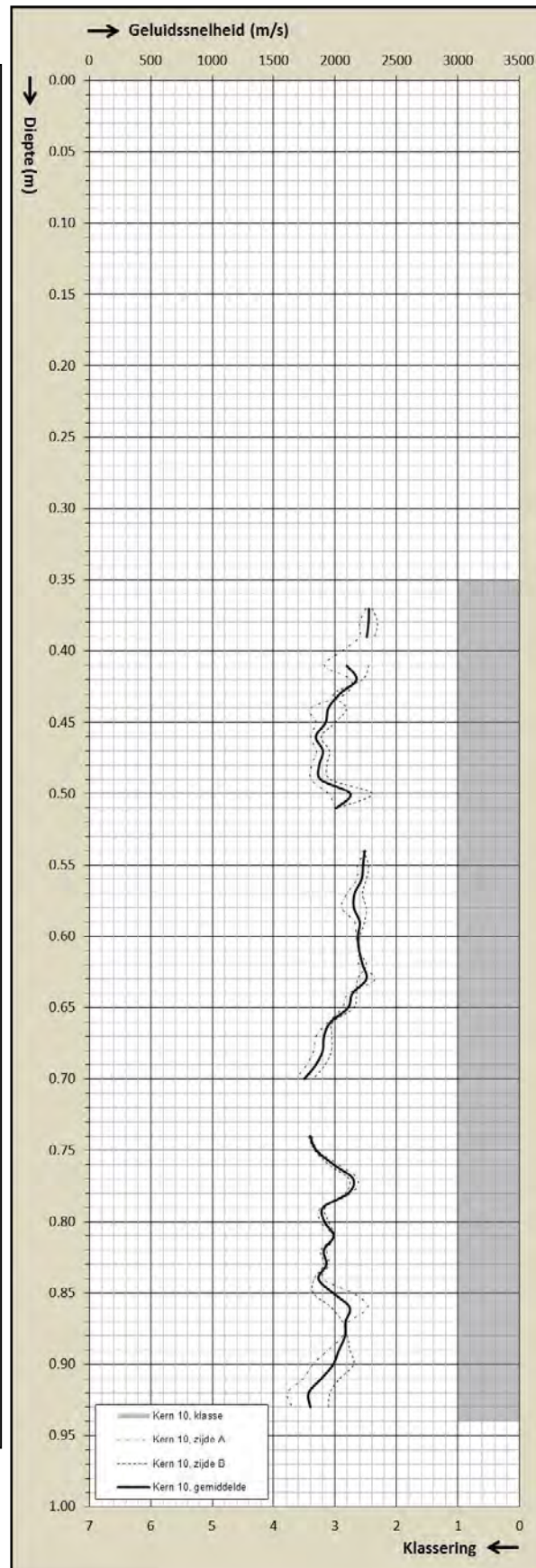




Langenberg (Diest)  
Kernboring 9

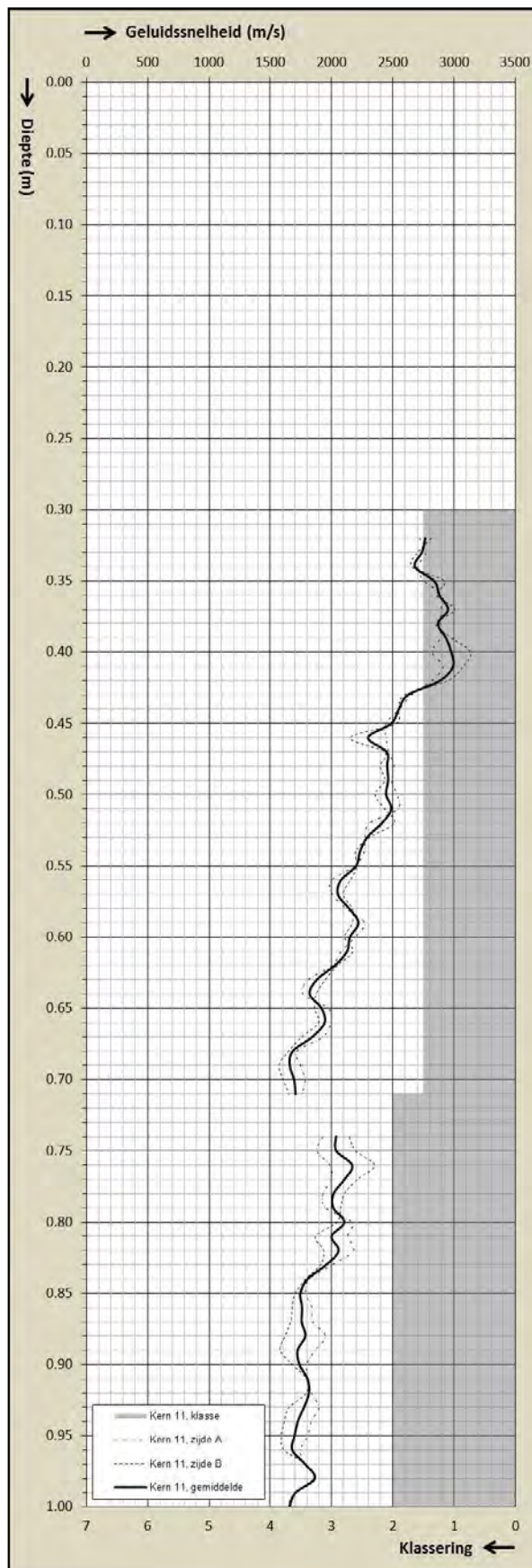


Langenberg (Diest)  
Kernboring 10

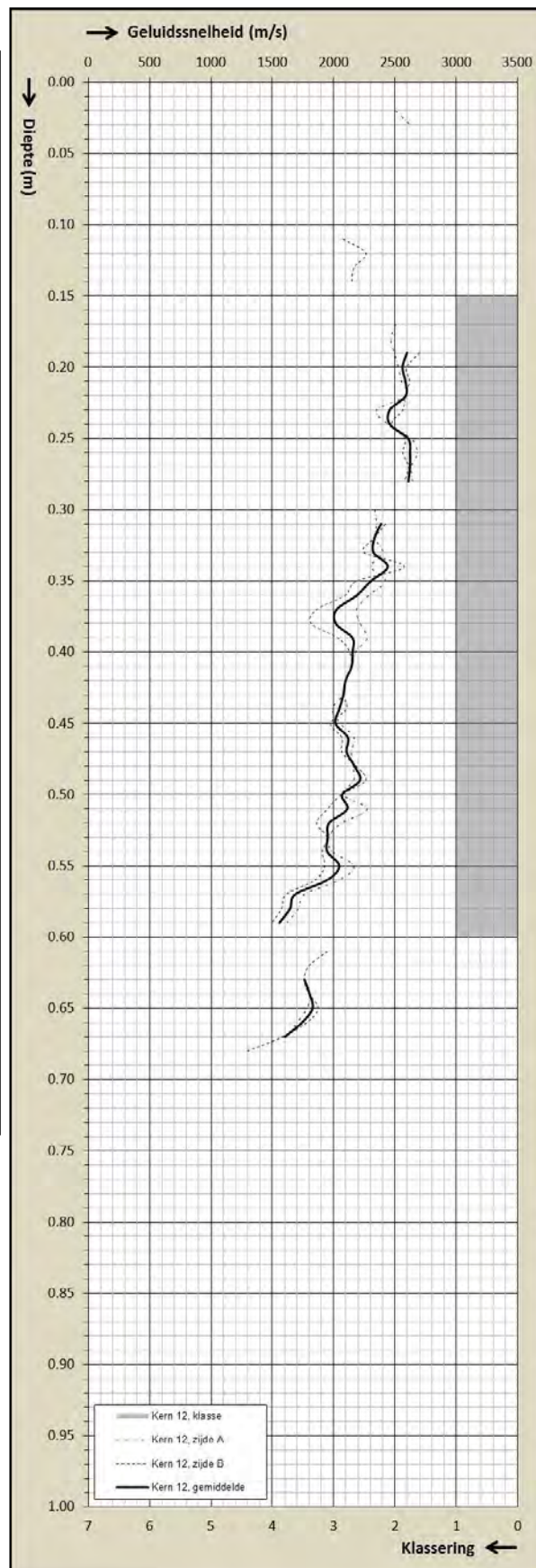




Langenberg (Diest)  
Kernboring 11

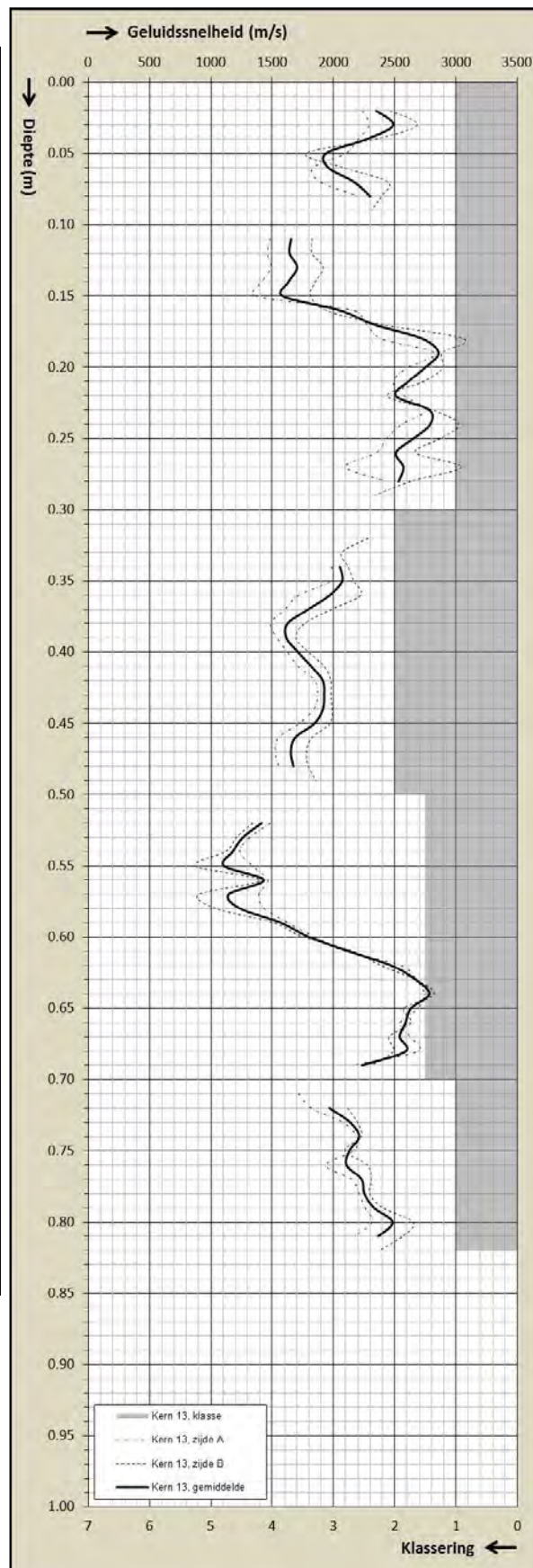


Langenberg (Diest)  
Kernboring 12

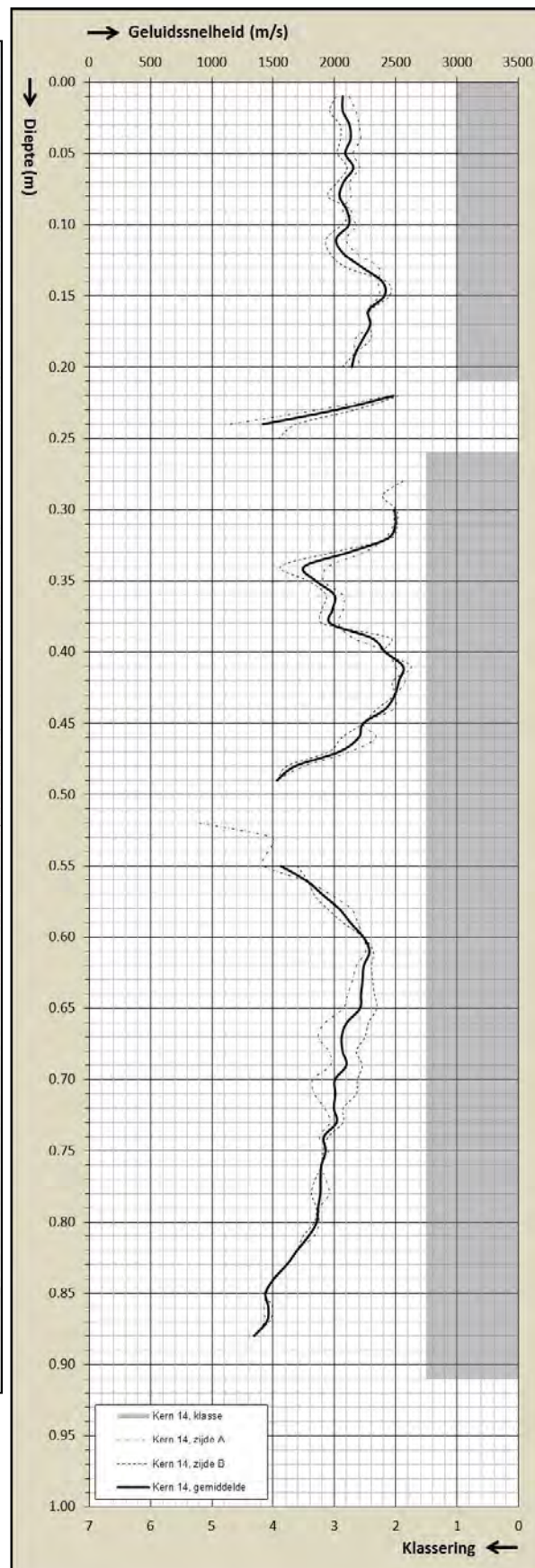




Langenberg (Diest)  
Kernboring 13

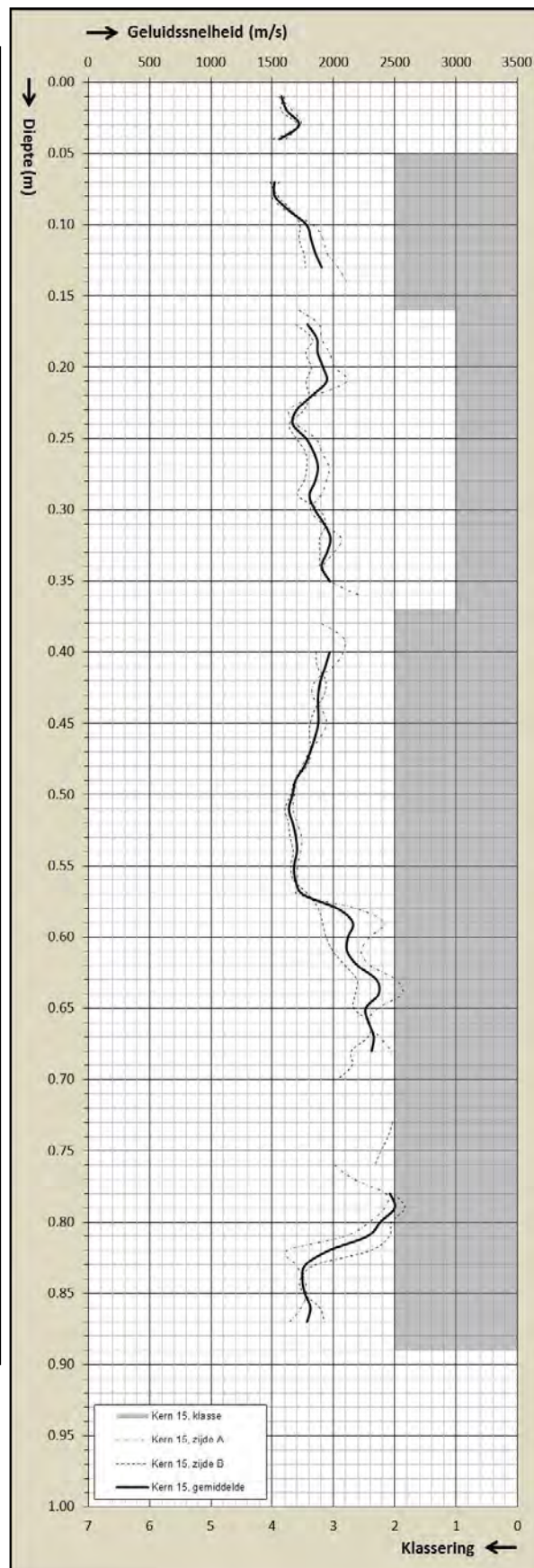


Langenberg (Diest)  
Kernboring 14





Langenberg (Diest)  
Kernboring 15





**Onderzoeksproject VLA11-4.1**

**Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen**

**Bijlage III  
Petrografische studie**

D: 2012.11586

*Aanvrager:* Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON)

*Contactpersoon:* Mevr. Griet Verhaert

*Uitvoering:* Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK)  
Departement Labo, Cel Monumenten  
*Laurent Fontaine, Roald Hayen en Ingrid Nijs*

*Verslaggeving:* Laurent Fontaine, Hilde De Clercq en Roald Hayen  
met wetenschappelijke review door Michiel Duser en Marleen De Ceukelaire  
(KBIN – Belgische Geologische Dienst)

*Datum:* 30 september 2013

## Inhoudsopgave

1. Inleiding .....	3
2. Stalen .....	3
3. Methodiek.....	5
3.1. Staalvoorbereiding .....	5
3.2. Microscopisch onderzoek .....	5
3.3. Fiche petrografische kenmerken - consolidatiegraad .....	5
4. Resultaten petrografisch onderzoek .....	7
4.1. Kenmerken van de zandfractie .....	7
4.1.1. Korrelgrootte .....	7
4.1.2. Sorteringsgraad.....	8
4.1.3. Verhouding kwarts/glauconiet .....	9
4.1.4. Verweringsgraad van het glauconiet.....	10
4.1.5. Matrix .....	12
4.2. Voorkomen van cement .....	13
4.2.1. Continuïteit van de cementneerslag rond de zandkorrels .....	14
4.2.2. Globaal gehalte aan cement .....	14
4.2.3. Kleur van het cement .....	15
A/ Donker cement .....	16
A/1. Microkristallijne limonietaggregaten .....	17
A/2. Limonietkristallieten .....	18
A/3. Limonietkorsten .....	19
A/4. Dicht limonietcement.....	20
B/ Helder cement .....	20
B/1. Bruine films .....	21
B/2. Amberkleurige vlekken, blokken en korsten .....	22
B/3. Dicht glauconietcement .....	23
4.3. Poriën .....	24
4.3.1. Gemiddelde macroporiëngrootte .....	24
4.3.2. Schijnbare connectiviteit .....	25
4.3.3. Macroporositeit .....	26
4.4. Homogeniteit .....	27
4.4.1. Spreiding kwarts/glauconiet .....	27
4.4.2. Verdeling van het cement.....	28
4.4.3. Microscheuren .....	30
5. Vergelijking met geschiktheidsklasse als bouwsteen.....	31
6. Vergelijking van de consolidatiegraad met resultaten geluidssnelheidsmetingen .....	32
7. Schatting van het bruikbare materiaal per site op basis van de consolidatiegraad.....	34
7.1. Roeselberg (Herent) .....	35
7.2. Gasthuisbos (Pellenberg).....	36
7.3. Beninksberg (Wezemaal).....	38
7.4. Middelberg (Rotselaar).....	40
7.5. Langenberg (Diest) .....	41
7.6. Overzicht.....	43

## 1. Inleiding

Tijdens het terreinbezoek en bij de boorkernbeschrijvingen werd aan elk staal op empirische wijze een geschiktheidsklasse als bouwsteen toegeschreven. De klasse-indeling gaat van I (beste kwaliteit) over II (mindere kwaliteit) tot III (zand dat onvoldoende versteend is om als bouwsteen te worden gebruikt, wat in deze studie verder niet aan bod komt) met de mogelijkheid van een overgangskwaliteit (I-II).

Deze petrografische studie zal nagaan of de op deze manier bepaalde klasse overeenstemt met de consolidatiegraad bepaald aan de hand van petrografische parameters.

Voor de codering van de stalen wordt verwezen naar bijlage X *Vergelijkende tabel voor de benamingen van de proefstukken*.

## 2. Stalen

In het kader van de petrografische studie werden 50 stalen geselecteerd afkomstig van de sites gelegen in Herent (H), Pellenberg (P), Wezemaal (W), Rotselaar (R) en Diest (D) (zie Bijlage I *Selectie stalen en overzicht analyses*).

Tabel 1 geeft een overzicht van de bestudeerde stalen. De slijpplaatjes van deze stalen worden bewaard in het departement Laboratoria van het KIK.



*Tabel 1. Overzicht van de 50 stalen onderworpen aan een petrografische studie met aanduiding van de plaats van monstername, de code van het staal en van het slijpplaatje, de diepte, de geschiktheidsklasse en de gemiddelde geluidssnelheid. Het nummer van de fiche van de petrografische beschrijving van het betreffende staal is weergegeven in de laatste kolom. Geluidssnelheidswaarden worden in Tabel 1 voorafgegaan door 'ca.' wanneer de slijpplaatjes gemaakt zijn van een mogelijk minder goed geconsolideerd deel gelegen aan de rand van het staal, dat bijgevolg overeenkomt met de rand van de betreffende ijzerzandsteenlaag terwijl de kern van het staal gebruikt werd voor het uitvoeren van mechanische proeven. In dat geval is de aan het staal toegeschreven geluidssnelheidswaarde een ruwe schatting bepaald op basis van de dichtstbijzijnde metingen, en dus niet altijd representatief voor het staal in zijn geheel.*

Plaats, site	Staal, code slijpplaatje	Diepte (m)	Klasse	Geluidssnelheid (m/s)	Fiche nr.
<b>Herent, Roeselberg</b> VLA10-4.1-B1	H1/1A, X1136	2.84-2.88	I	1600	1
	H1/1B, X1137	3.14-3.18	I	750	2
	H1/2A, X1138	4.79-4.83	I	1500	3
	H1/3A, X1139	5.39-5.42	I	2500	4
	H1/4A, X1148	7.18-7.22	I	2200	5
	H1/5A, X1149	8.06-8.07	I	ca. 2000	6
	H1/6A, X1150	8.29-8.34	I	1500	7
	H/F8A, X1140	ontsluiting	II	2200	8
	H/F9A, X1172	ontsluiting	I	2500	9
H/F10A, X1141	ontsluiting	I	2000	10	
<b>Pellenberg, Gasthuisbos</b> VLA10-4.1-B2 VLA10-4.1-B3	P1/1A, X1142	3.30-3.34	II	1000	11
	P1/3A, X1143	8.64-8.66	I-II	1000	12
	P1/6A, X1144	9.21-9.23	II	1000	13
	P1/7A, X1151	11.59-11.63	I	2000	14
	P2/2A, X1145	7.39-7.41	II	500	15
	P2/2B, X1152	7.16-7.20	II	2000	16
	P2/3A, X1153	7.92-7.95	II	1000	17
	P2/3B, X1154	8.08-8.10	I	1000	18
P/F3A, X1174	ontsluiting	I-II	1600	19	
P/F4A, X1175	ontsluiting	I	2300	20	
<b>Wezemaal, Beninksberg</b> VLA10-4.1-B4 VLA10-4.1-B5 VLA10-4.1-B6	W1/2A, X1155	4.27-4.31	I	ca. 1250	21
	W1/3A, X1156	5.71-5.75	I-II	ca. 2000	22
	W2/1A, X1157	3.20-3.26	I	2500	23
	W2/3A, X1158	3.90-3.95	II	1600	24
	W2/4A, X1159	7.78-7.82	II	ca. 1250	25
	W3/1A, X1160	2.45-2.47	I	2400	26
	W3/4A, X1161	3.75-3.76	II	1500	27
	W3/7A, X1162	4.84-4.90	II	1500	28
W/F1A, X1146	ontsluiting	I	te klein fragment	29	
W/F2A, X1147	ontsluiting	II	te klein fragment	30	
<b>Rotselaar, Middelberg</b> VLA10-4.1-B7 VLA10-4.1-B8	R1/2A, X1164	5.88-5.93	I	1750	31
	R1/3A, X1165	6.57-6.61	I	ca. 1900	32
	R1/4A, X1166	17.65-17.67	II	1000	33
	R2/1A, X1167	2.33-2.37	I	ca. 1750	34
	R2/2A, X1168	2.82-2.86	I	ca. 2000	35
	R2/5A, X1169	6.73-6.78	I	ca. 1750	36
	R/F6A, X1173	ontsluiting	I	2400	37
R/F7A, X1176	ontsluiting	II	1200	38	
<b>Diest, Langenberg</b>  15 gekernde boringen	D4.1A, X1269	0.25-0.30	I	1800	39
	D5.1A, X1270	0.15-0.20	II	1600	40
	D5.1B, X1271	0.25-0.30	I	2800	41
	D6.1A, X1272	0.10-0.15	I	2000	42
	D7.4A, X1273	0.51-0.56	II	1400	43
	D8.5A, X1274	0.60-0.65	II	1700	44
	D9.2A, X1275	0.40-0.45	II	1900	45
	D11.2A, X1276	0.45-0.50	I	2000	46
	D12.3A, X1277	0.50-0.55	I	2000	47
	D13.3A, X1278	0.52-0.58	II	1250	48
	D13.3B, X1279	0.64-0.69	I	2100	49
D15.3A, X1280	0.40-0.45	II	1900	50	

### 3. Methodiek

#### 3.1. Staalvoorbereiding

Van elk staal werd een slijpplaatje vervaardigd voor petrografisch onderzoek. De stalen werden met een geel gekleurd hars geïmpregneerd om de macroporiën te vullen. Als gevolg daarvan vertonen de macroporiën een gele tint in de microscopische opnamen. Bij waarnemingen onder natuurlijk doorvallend licht komen kwartskorrels doorzichtig voor terwijl glauconietkorrels donker gekleurd zijn. Het ijzerhoudende bindmiddel dat voor de samenhang van de zandkorrels zorgt is meestal zwart gekleurd (limoniet).

#### 3.2. Microscopisch onderzoek

De slijpplaatjes werden bestudeerd met behulp van een optische microscoop (Zeiss, Axioplan) voorzien van een digitaal fototoestel (DeltaPix Invenio 5DII). De in het verslag weergegeven foto's van de slijpplaatjes zijn onder natuurlijk doorvallend licht genomen, tenzij anders vermeld.

#### 3.3. Fiche petrografische kenmerken - consolidatiegraad

Teneinde de petrografische kenmerken van elk slijpplaatje op een praktische en systematische wijze in kaart te brengen werd een modelfiche ontworpen. Alle fiches met de petrografische beschrijving van de geanalyseerde stalen zijn weergegeven in een afzonderlijk document (Bijlage IV *Petrografische beschrijving per slijpplaatje*).

Op elke fiche staat volgende informatie van het geanalyseerde staal: (1) de plaats van monstername, (2) de code van het staal genomen voor de petrografische studie, (3) de diepteaanduiding, (4) de klasse van de ijzerzandsteen volgens de boorbeschrijving of de terreinwaarnemingen en (5) de gemiddelde waarde van de geluidssnelheid. In sommige kernen werd het centrale deel van het staal voorbehouden voor de mechanische proeven. Een slijpplaatje werd in dit geval vervaardigd van een stukje gelicht langs de randen van het staal, bijgevolg soms gelegen in de mogelijk minder goed geconsolideerde rand van de ijzerzandsteenlaag. De geluidssnelheidswaarden van deze stalen worden voorafgegaan door de aanduiding ca.

Aan de linkerkant van de fiche is een zo representatief mogelijke foto van het slijpplaatje weergegeven (met vermelding van de interne labo-KIK code). De rechterkant van de fiche is voorbehouden voor de petrografische beschrijving van het onderzochte ijzerzandsteenstaal.

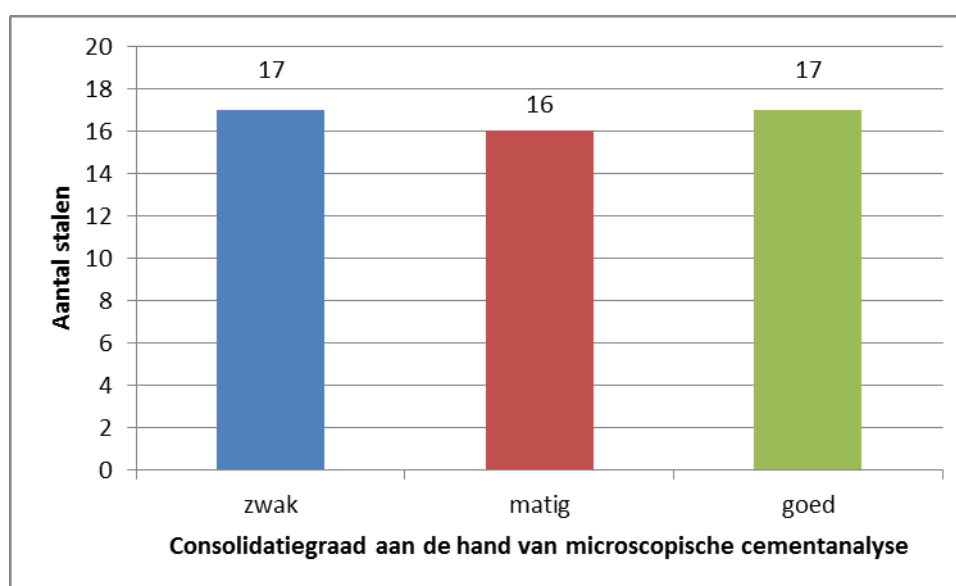
De petrografische beschrijving is opgebouwd uit 4 delen : (1) kenmerken van de zandfractie, (2) voorkomen van cement tussen de zandkorrels, (3) intergranulaire porositeit en (4) opmerkingen betreffende de globale homogeniteit van het staal.

Uiteindelijk wordt een algemene beoordeling van de verkittingsgraad van de ijzerzandsteen gegeven, en dit volgens een indeling in 3 categorieën:

- (i) zwak geconsolideerde zandsteen
- (ii) matig geconsolideerde zandsteen
- (iii) goed geconsolideerde zandsteen

De consolidatiegraad wordt gedefinieerd aan de hand van de microscopische cementanalyse. Twee parameters worden hierbij samen geëvalueerd: (1) de continuïteit van de cementneerslag rond de zandkorrels (zie punt 4.2.1.) en (2) het globale gehalte aan cement (zie punt 4.2.2). Zo vertoont een zwak geconsolideerde zandsteen een geïsoleerde neerslag rond de zandkorrels en een globaal laag cementgehalte (<5% tot max. 5-10%). Matig geconsolideerde zandsteen wordt gekenmerkt door een discontinue neerslag rond de zandkorrels en een globaal gemiddeld cementgehalte (5 tot 15%). Goed geconsolideerde zandsteen wordt gekenmerkt door een continue neerslag rond de zandkorrels en een globaal hoog cementgehalte (10 tot 20%).

Figuur 1 stelt de verdeling van de consolidatiegraad van de 50 geanalyseerde stalen voor. Deze min of meer gelijke verdeling van de stalen over de drie types van consolidatiegraad is niet zozeer een aanduiding van de spreiding van de consolidatiegraad over de beschikbare boorkernen, maar eerder het gevolg van een gerichte selectie van verschillende kwaliteiten aan ijzerzandsteen in het licht van het onderzoek.



Figuur 1. Verdeling van de consolidatiegraad bepaald aan de hand van microscopische cementanalyse voor 50 geanalyseerde stalen.

## 4. Resultaten petrografisch onderzoek

### 4.1. Kenmerken van de zandfractie

De kenmerken van de zandfractie worden beschreven aan de hand van:

- de korrelgrootte;
- de sorteringsgraad;
- de verhouding kwarts/glauconiet;
- de verweringsgraad van het glauconiet;
- de aanwezigheid van een matrix.

#### 4.1.1. Korrelgrootte

De korrelgrootte van de zandfractie is voor dit onderzoek gebaseerd op een visuele schatting van de afmetingen van de zandkorrels. Theoretisch kan dat voor een zandsteen gaan van zeer fijn tot zeer grof volgens het classificatiesysteem van Udden-Wentworth (Figuur 2).

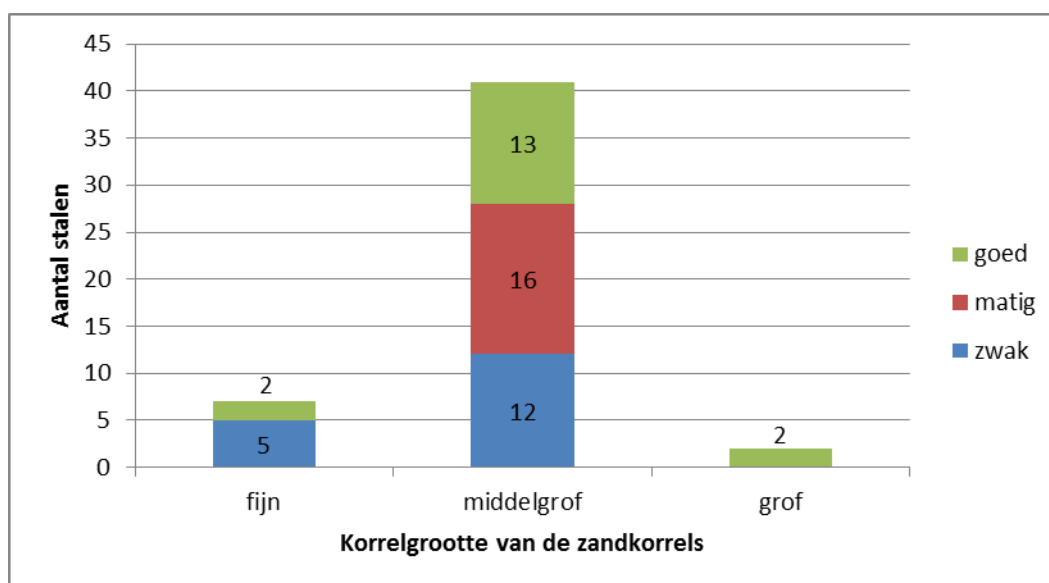
Zandkorrels				
zeer fijn	fijn	middelgrof	grof	zeer grof

63  $\mu\text{m}$  -      125  $\mu\text{m}$  -      250  $\mu\text{m}$  -      500  $\mu\text{m}$  -      1 mm -      2 mm -

*Figuur 2. Classificatie van de zandkorrels op basis van de meest voorkomende korrelgroottes volgens het classificatiesysteem van Udden-Wentworth.*

Hoofdzakelijk worden stalen gedomineerd door middelgrove zandkorrels (41 op 50 stalen hetzij 82%) (Figuur 3) wat betekent dat de meeste korrels een diameter tussen 250 en 500  $\mu\text{m}$  hebben. Zanden met vooral fijne zandkorrels of grove zandkorrels komen in mindere mate voor, respectievelijk in 7 stalen hetzij 14% en in 2 stalen hetzij 4%. Er is geen opvallend verschil qua korrelgrootte tussen zwak, matig en goed geconsolideerde zandsteen.

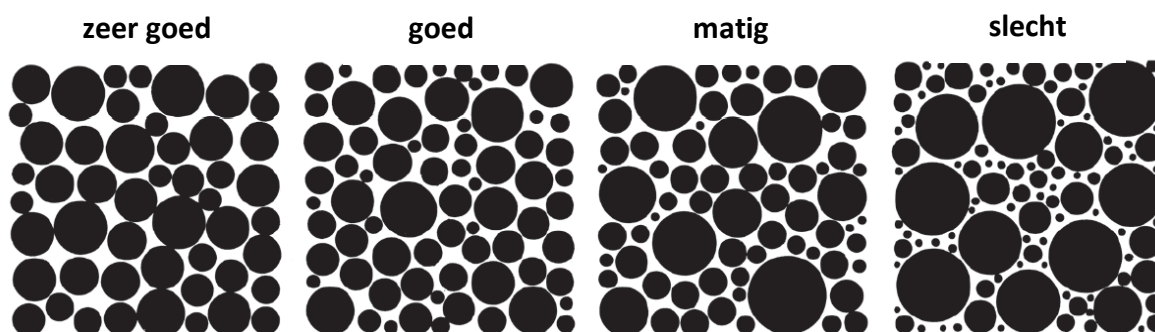




Figuur 3. Verdeling van de geschatte korrelgroottes voor ijzerzandsteenstalen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (goed-matig-zwak).

#### 4.1.2. Sorteringsgraad

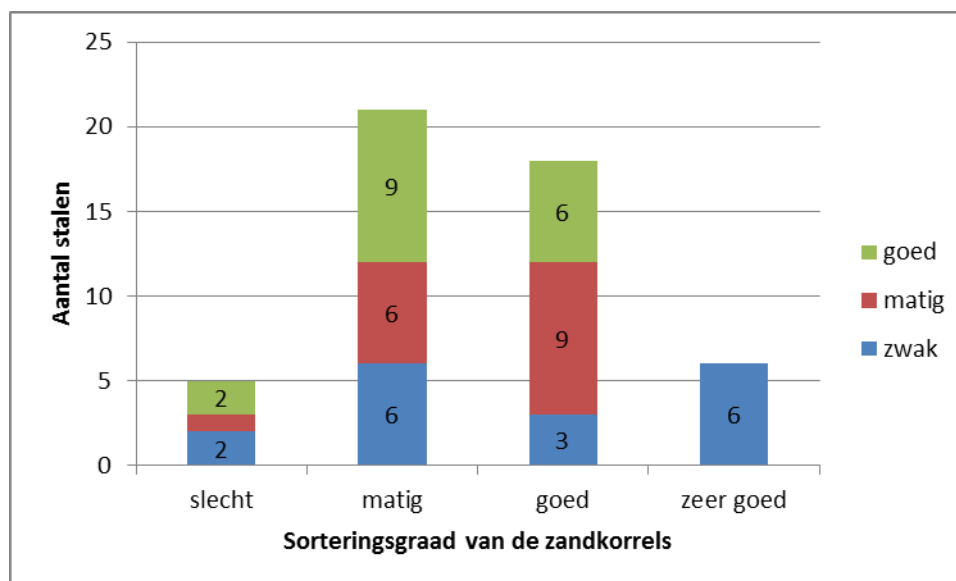
De sorteringsgraad (of het klassement) van een zand is een visuele beoordeling van de verdeling van de afmeting van de zandkorrels ten opzichte van de gemiddelde diameter (Figuur 4). Korrels van een zeer goed gesorteerd zand, bijvoorbeeld, hebben afmetingen die onderling niet sterk van elkaar afwijken.



Figuur 4. Visuele beoordeling van de sorteringsgraad (op basis van Pettijohn et al. 1973<sup>1</sup>).

78% van de stalen (39 op 50) vertoont een matige tot goede sorteringsgraad van de zandkorrels, maar stalen met zowel een zeer goede als een zwakke sorteringsgraad zijn niet uitzonderlijk (Figuur 5). Er is geen opvallend verschil qua sorteringsgraad tussen zwak, matig en goed geconsolideerde zandsteen. De ijzerzandstenen met zeer goed gesorteerde zandkorrels betreffen enkel stalen met een fijn zand, gecombineerd met een zwakke consolidatiegraad (6 stalen op 6).

<sup>1</sup> Pettijohn T.J., Potter P.E. and Siever R., 1973. *Sand and Sandstone* (1<sup>st</sup> edition), New York, Springer-Verlag, 618 p.



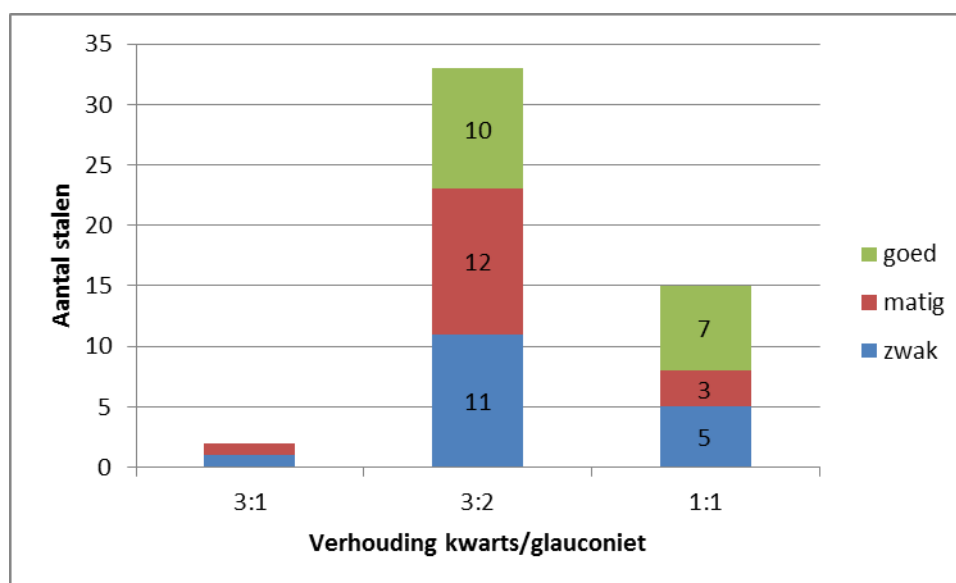
Figuur 5. Verdeling van de geschatte sorteringsgraad van de zandkorrels voor stalen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (goed-matig-zwak).

#### 4.1.3. Verhouding kwarts/glauconiet

De mineralogische samenstelling van het zand wordt sterk overheerst door kwarts- en glauconietkorrels. Andere componenten komen slechts sporadisch voor: polykristallijne kwartskorrels (tot 2 mm in diameter), veldspaatkorrels (vaak verweerd volgens de splijtingsvlakken), vuursteenfragmenten (tot enkele mm diameter), micaplaatjes (type muscoviet) en zware mineralen (onder andere tourmalijn en zirkoon). In de verhouding kwarts/glauconiet worden deze allen bij de kwarts gerekend.

De verhouding kwarts/glauconiet geeft dus een idee van de globale samenstelling van het zand. Kwarts is chemisch samengesteld uit  $\text{SiO}_2$ , een uiterst stabiel en inert oxide. Kwarts wordt gekenmerkt door een witte kleur onder de microscoop. Meestal zijn de kwartskorrels subhoekig tot afgerond. Glauconiet komt voor als lobvormige korrels. Vanuit mineralogisch oogpunt is het glauconiet een kleimineraal (fyllosilicaat) dat tweewaardig ijzer bevat, waaraan frisse glauconietkorrels hun groene kleur ontleen. Naast ijzer bevat glauconiet ook kalium, aluminium, silicium en chemisch gebonden water, d.w.z. water gelinkt aan het kristalrooster.

Een ruime meerderheid van de stalen (66%, 33 op 50) wordt gekenmerkt door een zand met een kwarts/glauconiet verhouding van ca. 3:2, anders gezegd drie volumedelen kwarts voor 2 volumedelen glauconiet (Figuur 6). Voor 15 van de 50 stalen (ong. 30%) is deze verhouding 1:1, 50% kwarts en 50% glauconiet. Stalen gekenmerkt door een kwarts/glauconiet verhouding van 3:1, 75% kwarts voor 25% glauconiet, zijn eerder uitzonderlijk (slechts 2 op 50 stalen hetzij 4%). Er is geen opvallend verschil qua kwarts/glauconiet verhouding tussen zwak, matig en goed geconsolideerde zandsteen.

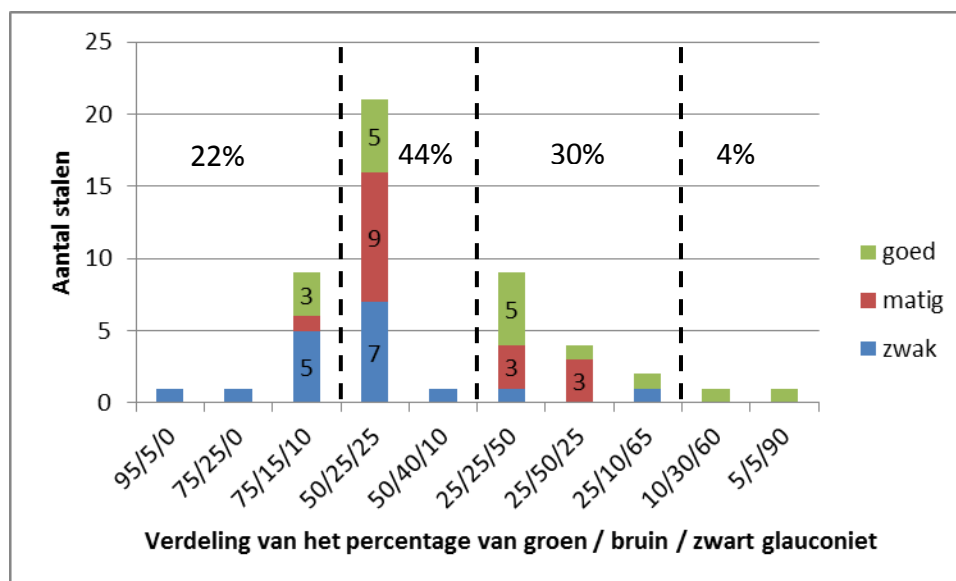


Figuur 6. Verdeling van de geschatte kwarts/glaucinet verhouding voor stalen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (goed-matig-zwak).

#### 4.1.4. Verweringsgraad van het glauconiet

Het tweewaardig ijzer van glauconiet kan bij blootstelling aan atmosferische omstandigheden vanaf de randen en langs scheuren in de korrels oxideren tot driewaardig ijzer. In functie van de intensiteitsgraad van deze oxidatiereactie verliest glauconiet zijn oorspronkelijke groene tint en kan het volledig bruin (matige verwerking) tot zwart (sterke verwerking) verkleuren. Het allerlaatste verweringsresidu bestaat uit limoniet (een algemene term om een mengeling van ijzeroxiden en hydroxiden te benoemen). Het percentage van groene, bruine en zwarte glauconietkorrels geeft dus een aanwijzing van het aandeel aan glauconietkorrels dat respectievelijk relatief fris, matig en sterk verweerd is.

Zowel stalen met bijna uitsluitend relatief fris glauconiet als stalen met sterk verweerd glauconiet komen voor. Alhoewel alle combinaties in de natuur a priori aanwezig kunnen zijn, maken visuele schattingen van de slijpplaatjes het mogelijk 10 combinaties te identificeren. De 3 meest voorkomende combinaties zijn 75-15-10, 50-25-25 en 25-25-50 (waarbij achtereenvolgens het gehalte aan relatief fris, matig en sterk verweerd glauconiet wordt aangegeven). Samen vertegenwoordigen ze 39 op 50 stalen, hetzij 78% (Figuur 7). De meest voorkomende combinatie is duidelijk 50-25-25 aangezien 21 stalen op 50 hetzij 42% deze combinatie vertonen.

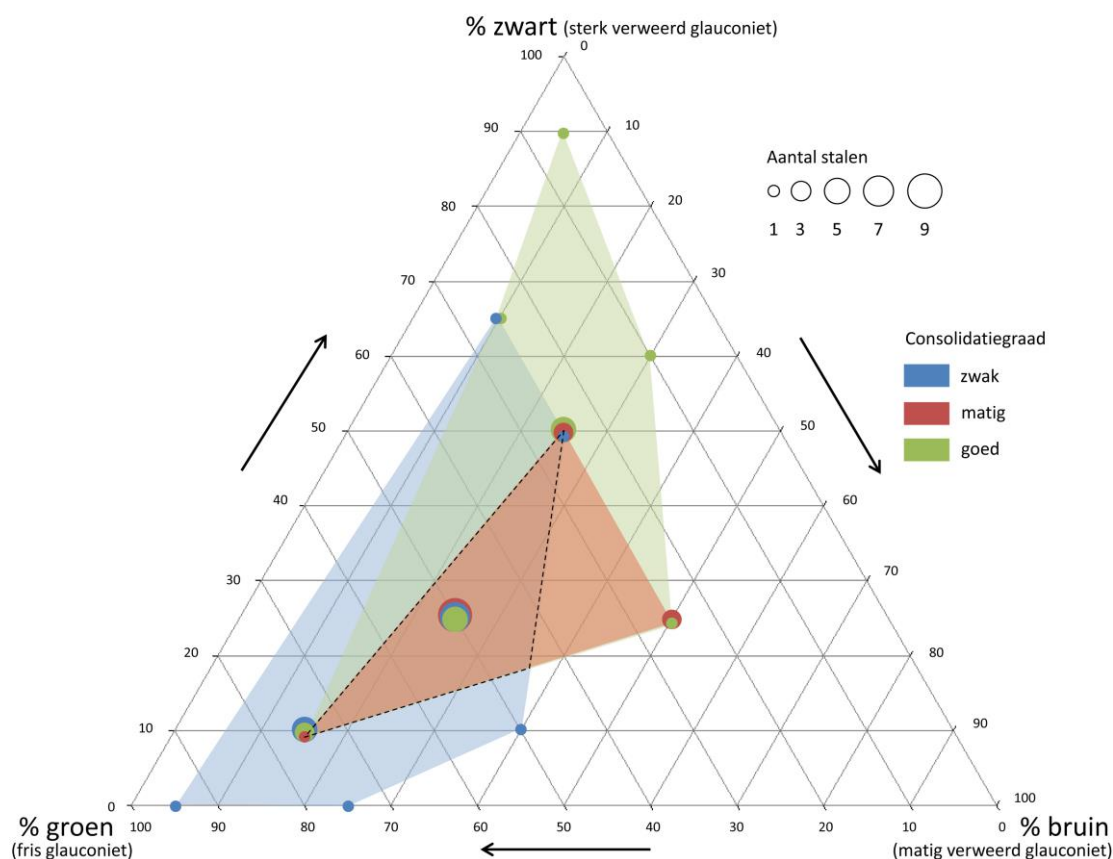


*Figuur 7. Verdeling van het geschatte percentage aan groen / bruin / zwart gekleurd glauconiet voor stalen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (goed-matig-zwak). De stippellijnen duiden de grenzen aan (van links naar rechts) tussen de zone met tot 25% verweerd glauconiet, de zone met tot 50% verweerd glauconiet, de zone met tot 75 % verweerd glauconiet en de zone met meer dan 90% verweerd glauconiet. In elke zone wordt telkens het totale percentage aan stalen aangeduid.*

Figuur 8 stelt dezelfde gegevens voor als Figuur 7 maar onder de vorm van een ternair diagram waarin elk uiteinde (apex) met respectievelijk 100% groen, bruin of zwart glauconiet overeenkomt. Op het diagram blijkt dat de meeste voorkomende combinatie (50-25-25) het centrum bezet van de driehoek gevormd door de opeenstapeling van de gekleurde zones voor zwak, matig en goed geconsolideerde zandsteen (zone aangeduid met zwarte stippellijn). Zoals eerder gezegd, vertonen 42% van de stalen (21 op 50) deze combinatie. In deze driehoek met coördinaten (75-15-10, 25-25-50 en 45-35-20) zijn 78% van de stalen (39 op 50) gelegen.

Uit Figuur 7 en Figuur 8 blijkt dat er geen opvallend verschil qua verdeling van groen/bruin/zwart glauconiet is tussen zwak, matig en goed geconsolideerde zandsteen. Niettemin is er wel een zekere tendens merkbaar waarbij stalen met zo goed als geen sterk verweerd glauconiet een zwakke consolidatiegraad vertonen en stalen met een zeer hoog gehalte aan verweerde glauconietkorrels door een goede consolidatiegraad worden gekenmerkt. Het aantal stalen in deze extreme klassen is echter te gering om een duidelijke trend af te tekenen.





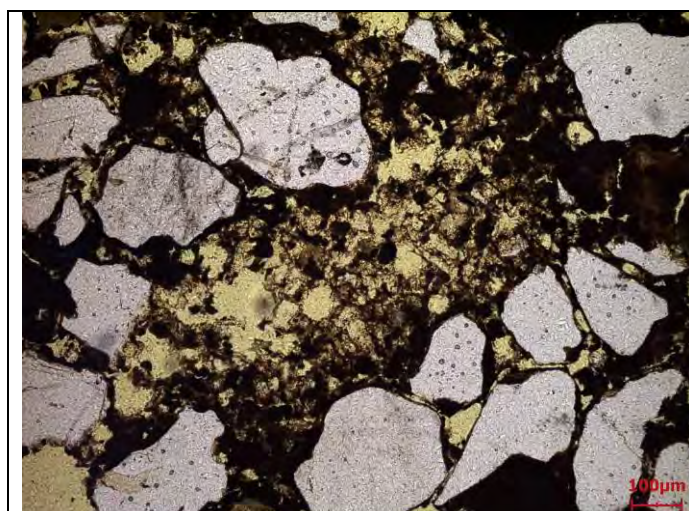
*Figuur 8. Ternair diagram met verdeling van het percentage groen / bruin / zwart glauconiet in stalen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (zwak-matig-goed). De blauwe, rode en groene zones komen overeen met de enveloppeveelhoeken voor respectievelijk zwak, matig en goed geconsolideerde zandsteen. De driehoek (zwarte stippellijn) duidt het oppervlak aan waarin zowel zwak, matig als goed geconsolideerde zandsteen samen voorkomen en heeft als coördinaten: 75-15-10, 25-25-50 en 45-35-20.*

Wanneer zowel grote als kleine glauconietkorrels in hetzelfde staal voorkomen heeft vaak een selectieve vertering plaatsgevonden (staal P1/1A bijvoorbeeld, fiche nr. 11). De grotere korrels lijken meer aangetast dan de kleinere. Verschillende verklaringen zijn denkbaar. Mogelijk zijn de grote glauconietkorrels gevoeliger voor vertering door een licht verschil in de chemische samenstelling of worden grote korrels door interne splijting of agglomeratie van lobben meer aan vertering blootgesteld. Er moet ook rekening mee gehouden worden dat glauconietkorrels in Diestiaan ijzerzandsteen een verschillende herkomst kunnen hebben: pas gevormd op de zeebodem (fris) en/of reeds verweerd afkomstig, net als kwarts, uit erosiemateriaal van het continent, en gevormd tijdens vroegere geologische tijdperken.

#### 4.1.5. Matrix

De term matrix verwijst naar het zeer fijnkorrelig materiaal dat zich tussen de zandkorrels bevindt en dat tegelijkertijd met de zandkorrels werd afgezet. De matrix kan gedeeltelijk tot volledig de poriënruimte opvullen. In zandsteen gaat het om partikels met afmetingen typerend voor silt en klei vanuit een granulometrisch oogpunt. Volgens het classificatiesysteem van Udden-Wentworth komt silt overeen met partikels tussen 63 en 2  $\mu\text{m}$  terwijl klei overeenkomt met partikels kleiner dan 2  $\mu\text{m}$ .

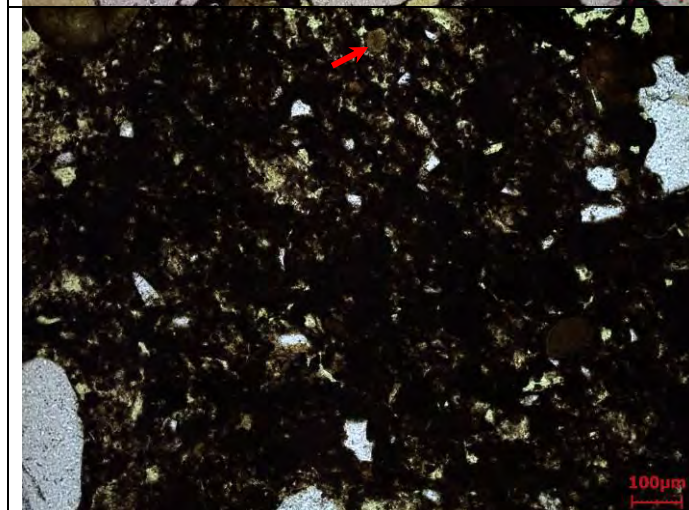
In het geval van Diestiaan ijzerzandsteen is het praktisch onmogelijk een duidelijk onderscheid te maken tussen de matrix (het oorspronkelijke materiaal aanwezig tussen de zandkorrels) en het cement (vooral limoniet), dat na afzetting van het sediment is neergeslagen, aangezien beiden zich in de intergranulaire ruimte bevinden. Niettemin kan men aannemen dat de eventuele matrix in een zwak geconsolideerde zandsteen meer zichtbaar moet zijn gezien het lager cementgehalte. Sommige stalen van zwak geconsolideerde zandsteen vertonen inderdaad een zeer fijnkorrelig materiaal, dat met de matrix lijkt overeen te komen (Figuur 9). In beter gecementeerde zandsteen is de matrix echter zeer moeilijk herkenbaar. Kwartskorrels met afmetingen van silt kunnen evenwel wijzen op de oorspronkelijke aanwezigheid van een matrix (Figuur 10). Het eventuele kleiig materiaal van deze matrix zelf is vaak echter niet meer herkenbaar door het hoge cementgehalte.



*Figuur 9. Vermoedelijke matrix in zwak geconsolideerde zandsteen (staal P1/3A).*

*De matrix (bruin gekleurd) vertoont het uitzicht van kleiige aarde.*

*Een weinig limoniet (zwart gekleurd) is in deze kleimatrix neergeslagen.*



*Figuur 10. Intense mengeling van matrix-cement in goed geconsolideerde zandsteen (staal R1/2A).*

*Kwartskorrels (wit gekleurd) en een glauconietkorrel (rode pijl) met afmetingen van silt wijzen op de aanwezigheid van een matrix.*

#### 4.2. Voorkomen van cement

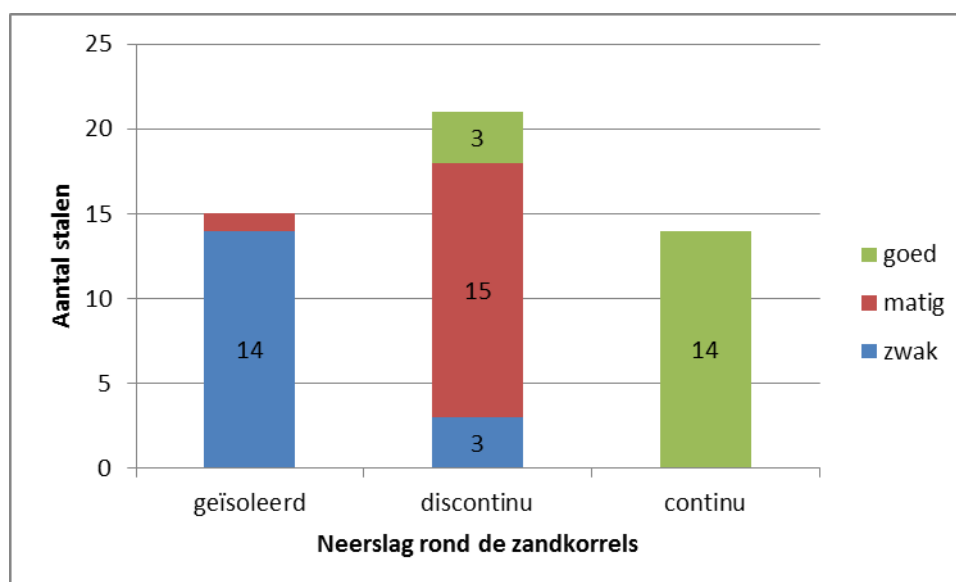
Het ijzerhoudende cement – mogelijk wat kleihoudend door de aanwezigheid van de matrix – dat voor de samenhang van de zandkorrels zorgt, wordt gekenmerkt door 3 parameters: (1) de continuïteit van de neerslag rond de zandkorrels, (2) het globale gehalte aan cement en (3) de kleur van het cement. Een mogelijke oorsprong voor de aanwezigheid van ijzerhoudend cement rond de zandkorrels is een sterke vertering van glauconiet in de bovenliggende glauconiethoudende zanden. Door sterke vertering van glauconiet kan het ijzer oplossen en in diepere lagen neerslaan. Het opgeloste ijzer kan echter ook afkomstig zijn uit de onder warmer klimaat verweerde leemlagen.

Een gedetailleerde karakterisatie van het ijzerhoudende cement is niet mogelijk op basis van een microscopische analyse van slijpplaatjes. Een dergelijke karakterisatie kan mogelijk worden uitgevoerd met onderzoekstechnieken waaronder scanning elektronenmicroscopie (SEM), micro-Ramanspectroscopie, Mössbauerspectroscopie en X-stralen diffractie. Sommige technieken vereisen bovendien een volledige scheiding van het cement ten opzichte van de zandfractie.

#### 4.2.1. Continuïteit van de cementneerslag rond de zandkorrels

De continuïteit is één van de parameters om de consolidatiegraad van de ijzerzandsteen te omschrijven.

Zwak geconsolideerde zandsteen wordt hoofdzakelijk gekenmerkt door een geïsoleerde neerslag rondom de zandkorrels (82%, 14 stalen op 17) (Figuur 11). Matig geconsolideerde zandsteen (94%, 15 stalen op 16) wordt daarentegen vooral gekenmerkt door een discontinue neerslag rondom de zandkorrels, terwijl een goed geconsolideerde zandsteen vooral een continue neerslag van het cement vertoont (82%, 4 stalen op 17).



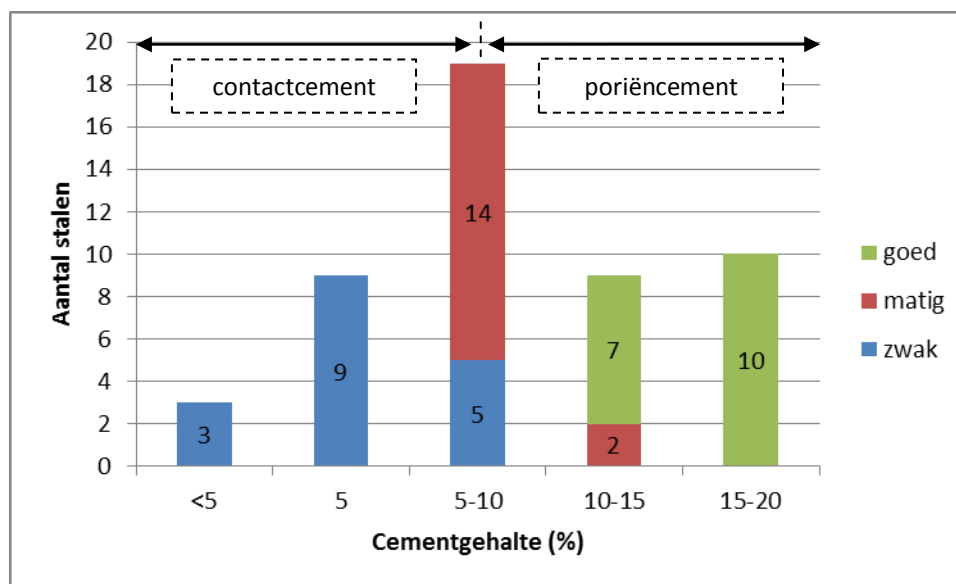
Figuur 11. Continuïteit van de neerslag rond de zandkorrels bepaald aan de hand van microscopische cementanalyse van stalen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (goed-matig-zwak).

#### 4.2.2. Globaal gehalte aan cement

Wat het gehalte aan cement betreft kan worden gesteld dat hoe hoger het cementgehalte, hoe meer het cement de poriënruimte vult. Het cement kan zowel een contactfunctie hebben als poriënvullend zijn. Het cementgehalte is dus een tweede indicator om de consolidatiegraad van de ijzerzandsteen te beschrijven.

In zwak geconsolideerde zandsteen bedraagt het cementgehalte steeds minder dan 10%. Het fungeert daarbij vooral als contactcement. Matig geconsolideerde zandsteen is daarentegen een overgangsvorm, gekenmerkt door een gemiddeld cementgehalte (5-15%) onder de vorm van

zowel contact- als poriëncement. Een goed geconsolideerde zandsteen bevat een hoog cementgehalte (>10% tot 20%) hoofdzakelijk onder de vorm van poriëncement (Figuur 12).



Figuur 12. Cementgehalte (%) in vergelijking met de consolidatiegraad (goed-matig-zwak) bepaald aan de hand van de microscopische cementanalyse van de 50 stalen. Bovenaan is tevens het voorkomen van het cement (contact- of poriëncement) indicatief weergegeven.

#### 4.2.3. Kleur van het cement

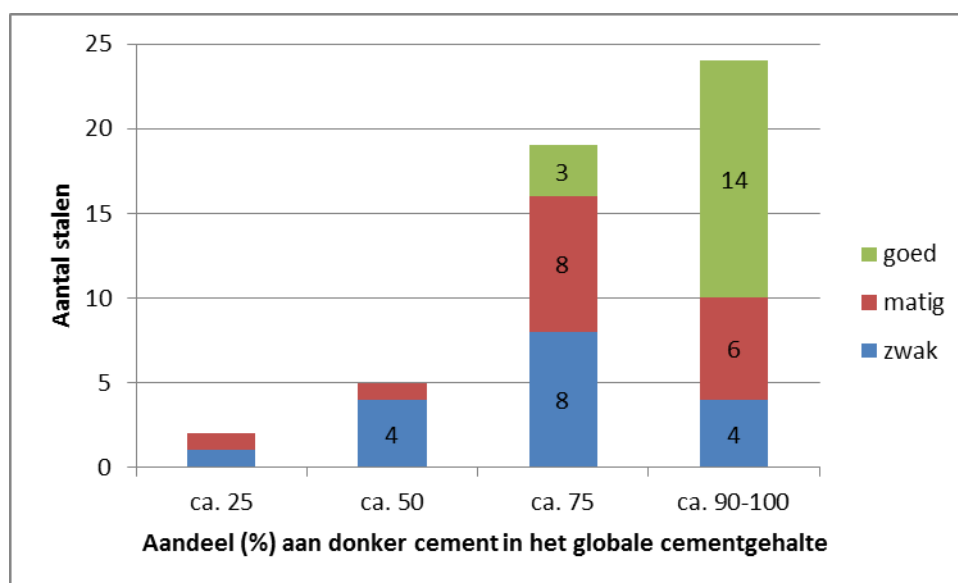
Op basis van de kleur volgens de visuele analyse van het slijpplaatje onder doorvallend licht kunnen twee types cement herkend worden: een donker en een helder cement.

Op basis van het aandeel aan donker cement in het globaal cementgehalte (Figuur 13) kan worden afgeleid dat 86% van de stalen (43 op 50) een aandeel aan donker cement vertoont van minstens 75%. Het donker cement is dus het meest voorkomend.

Alle goed geconsolideerde zandsteenstalen (100%, 17 op 17) hebben een aandeel aan donker cement van minstens 75%. 88% van matig geconsolideerde zandsteenstalen (14 op 16) valt eveneens in diezelfde categorie, alsook 70% van de zwak geconsolideerde (12 op 17).

De stalen waarvan het aandeel aan donker cement maximaal 50% bedraagt behoren hoofdzakelijk tot de groep van zwak geconsolideerde zandsteen (5 stalen op 7) en deze van matig geconsolideerde zandsteen (2 stalen op 7). Het gehalte aan donker cement is bijgevolg geen sluitend criterium om de consolidatiegraad van de zandsteen te beoordelen. Een laag gehalte (ca. 25%) ervan lijkt wel te wijzen op een lagere consolidatiegraad.





Figuur 13. Verdeling van het geschatte aandeel (%) aan donker cement in het globaal cementgehalte voor stalen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (goed-matig-zwak).

#### A/ Donker cement

Het donker cement is grotendeels diep zwart (opaak) gekleurd, eerder zelden diep rood. In het kader van dit onderzoek wordt het limoniet genoemd. Limoniet is een vage term die verwijst naar een menging van ijzeroxiden en hydroxiden zonder meer informatie te geven over de zuiverheid, de exacte chemische en mineralogische samenstelling, de kristalliniteitsgraad en het eventuele kleigehalte (gezien de vaak intense menging met de matrix).

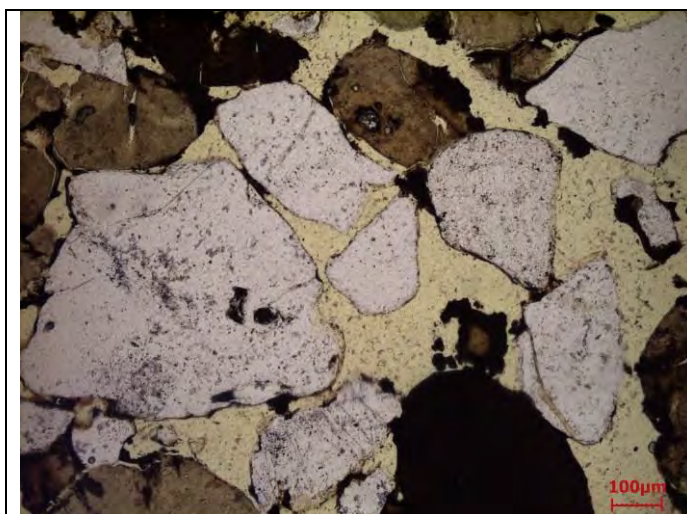
Het limonietcement kan onder vier verschillende vormen voorkomen:

- (1) microkristallijne aggregaten;
- (2) kristallieten;
- (3) dunne (enkellagige) tot dikke (meerlagige) korsten;
- (4) een dicht cement.

De volgorde wijst op een globale toename van de opvullingsgraad van de poriënruimte. De verschillende vormen van limonietcement kunnen in eenzelfde staal voorkomen, evenals overgangen tussen deze 4 beschreven types.

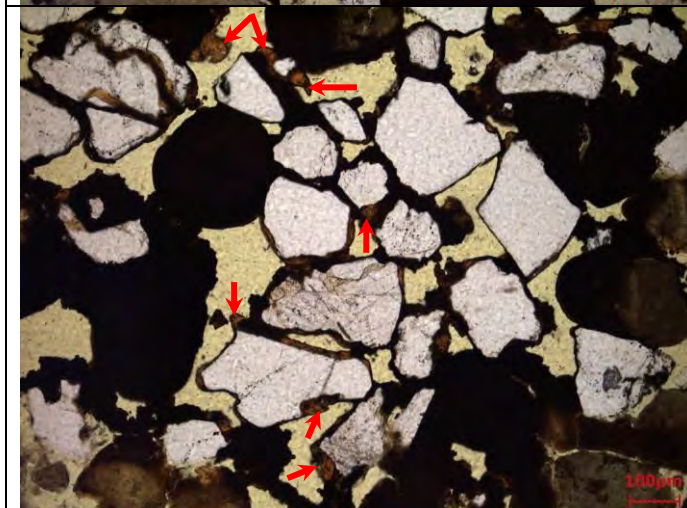
### A/1. Microkristallijne limonietaggregaten

Microkristallijne limonietaggregaten worden zowel in zwak en matig als goed geconsolideerde zandsteen teruggevonden (Figuur 14 tot Figuur 16).



*Figuur 14. Microkristallijne limonietaggregaten in een zwak geconsolideerde zandsteen (staal H1/1B).*

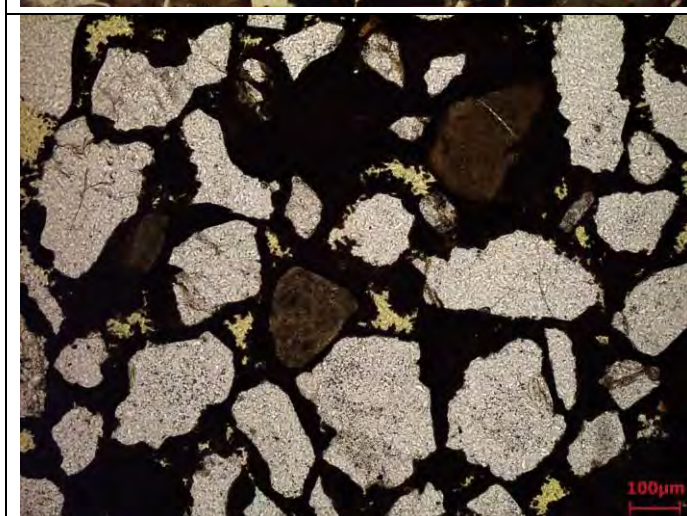
*Het limonietcement (zwart gekleurd) komt voor als een geïsoleerde neerslag onder de vorm van contactpunten tussen de zandkorrels.*



*Figuur 15. Microkristallijne limonietaggregaten in een matig geconsolideerde zandsteen (staal H1/5A).*

*Het limonietcement (zwart gekleurd) komt voor als een discontinue neerslag rond de zandkorrels.*

*Vlekken van helder cement (amberkleurig) zijn aangeduid met rode pijlen.*



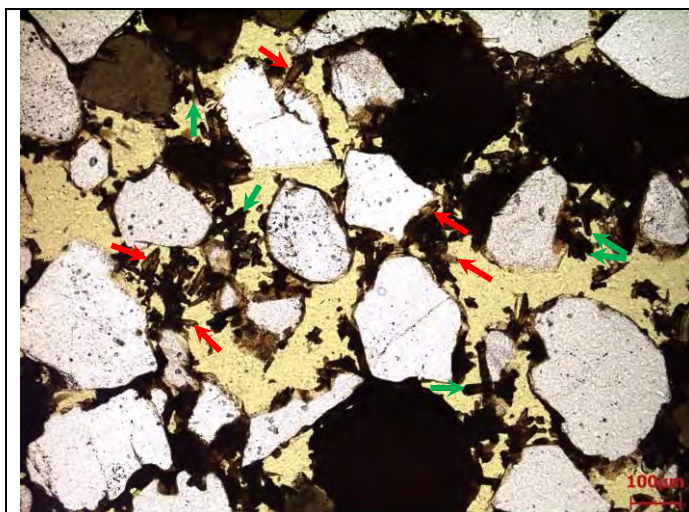
*Figuur 16. Microkristallijne limonietaggregaten in een goed geconsolideerde zandsteen (staal D6.1A).*

*Het limonietcement (zwart gekleurd) komt voor als een continue neerslag rond de zandkorrels die in toenemende mate de poriënruimte (geel gekleurd) vult.*



## A/2. Limonietkristallieten

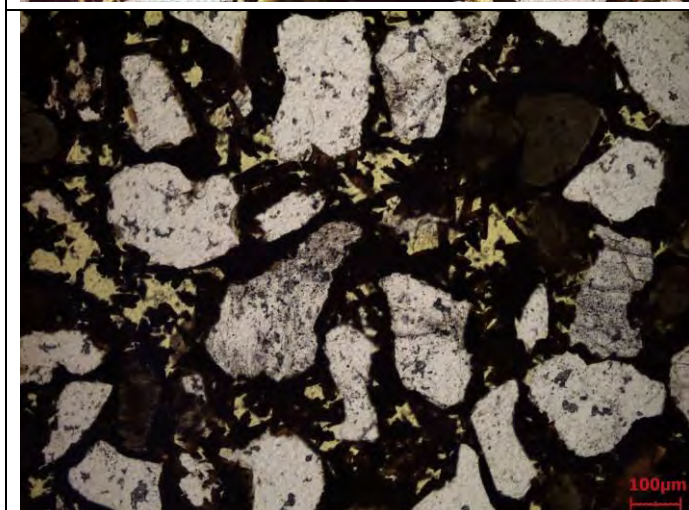
Limonietkristallieten (doorgaans blokvormig naast wat naaldvormig) groeien vanuit de randen van de zandkorrels in de poriënruimte tot deze eventueel volledig is gevuld (Figuur 17 en Figuur 18). Het neerslagproces van de limonietkristallieten geeft aanleiding tot de vorming van microporeus poriëncement (Figuur 19). Limonietkristallieten komen zowel in zwak en matig als goed geconsolideerde zandsteen voor.



*Figuur 17. Limonietkristallieten in een zwak geconsolideerde zandsteen (staal P2/3A).*

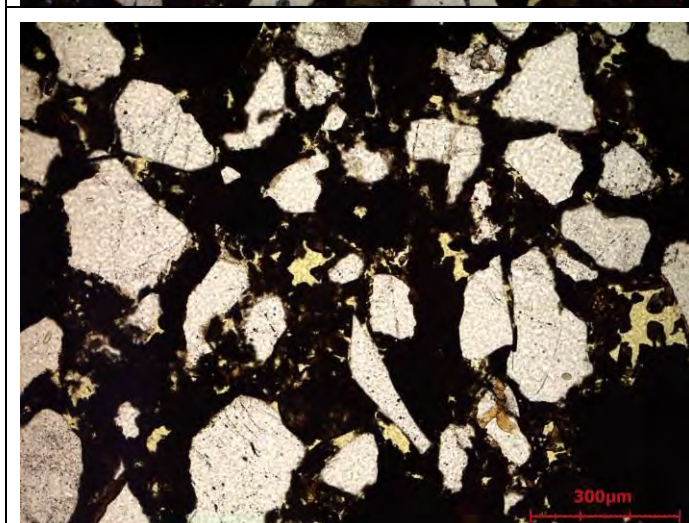
*Limonietkristallieten (zwart gekleurd, groene pijlen) hebben zich ontwikkeld vanuit de randen van de zandkorrels (geïsoleerde neerslagen).*

*Kristallieten van helder cement (amberkleurig) zijn aangeduid met rode pijlen).*



*Figuur 18. Limonietkristallieten in een goed geconsolideerde zandsteen (staal D6.1A).*

*Limonietkristallieten (zwart gekleurd) vormen een continue neerslag rondom de zandkorrels die in toenemende mate de poriënruimte (geel gekleurd) vult.*

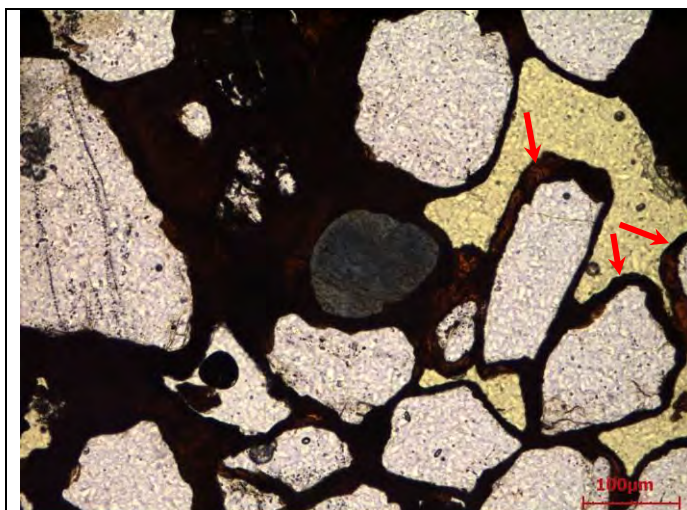


*Figuur 19. Limonietkristallieten in een goed geconsolideerde zandsteen (staal H1/4A).*

*De neergeslagen limonietkristallieten (zwart gekleurd) vormen een microporeus poriëncement.*

### A/3. Limonietkorsten

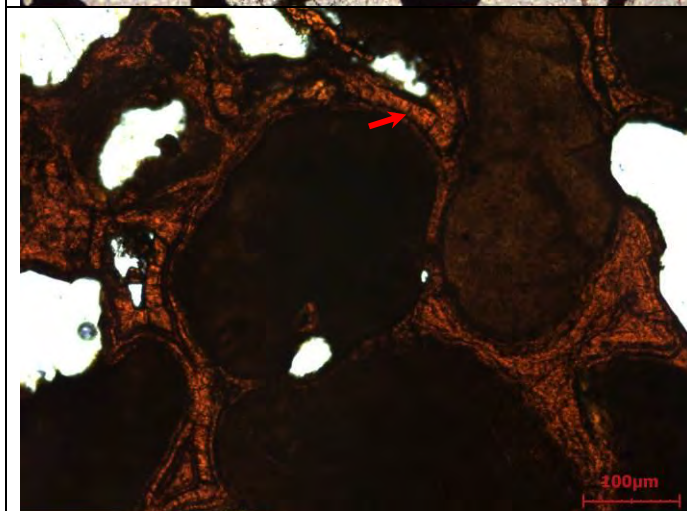
Limonietkorsten worden gekenmerkt door een dieprode kleur en vormen altijd een continue neerslag rond de zandkorrels. Het is het minst voorkomende cement en werd hier en daar in een paar stalen geïdentificeerd. Enkel staal H1/3A bevat een belangrijk gehalte aan cement onder de vorm van limonietkorsten (25%). In dit staal komen de limonietkorsten zowel in dunne, enkellagige (Figuur 20) als in dikke, meerlagige korsten (Figuur 21) voor.



*Figuur 20. Enkellagige limonietkorsten (diep rood gekleurd, rode pijlen) in een goed geconsolideerde zandsteen (staal H1/3A).*

*De enkellagige limonietkorsten omringen de zandkorrels volledig (continue neerslag).*

*Midden in de figuur is een korrel toermalijn herkenbaar.*



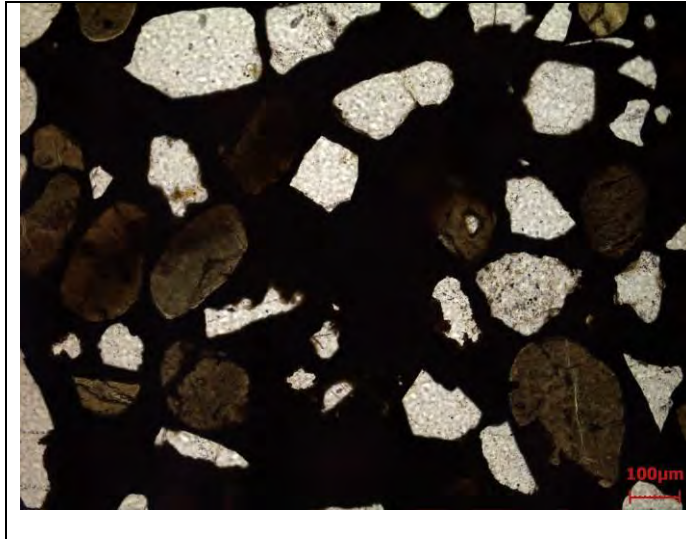
*Figuur 21. Meerlagige limonietkorsten in een goed geconsolideerde zandsteen (staal H1/3A). De korsten zijn hier oranje gekleurd als gevolg van de bewuste overbelichting.*

*De opeenstapeling van limonietlaagjes leidde hier tot een volledige opvulling van de poriënruimte. Een van de lagen vertoont een vezelige structuur (rode pijl).*



#### A/4. Dicht limonietcement

Dicht limonietcement betreft een zeer opaak cement dat de poriënruimte volledig opvult (Figuur 22). Onder de microscoop vertoont het dicht limonietcement zo goed als geen zichtbare interne structuren. Stalen die bijna uitsluitend dicht limonietcement vertonen behoren tot de groep van goed geconsolideerde zandstenen.



*Figuur 22. Dicht limonietcement (zwart gekleurd) in een goed geconsolideerde zandsteen (staal H/F9A).*

*Zandkorrels zijn volledig gecementeerd door dicht limoniet dat zowel de rol van contactcement als van poriëncement vervult.*

*De zwarte kleur van het cement maakt het onderscheid met zwarte, sterk verweerde glauconietkorrels van de zandfractie moeilijk.*

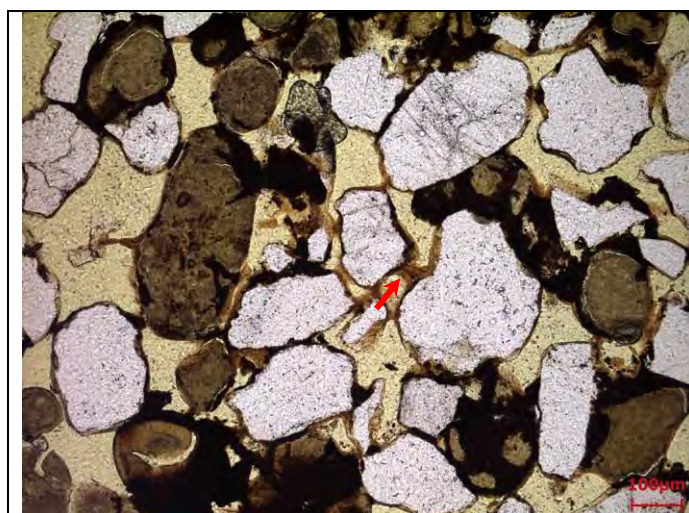
#### **B/ Helder cement**

Helder cement is doorschijnend en kan onder drie vormen voorkomen:

- (1) bruine films rondom de zandkorrels;
- (2) amberkleurige vlekken, blokken en korsten;
- (3) een dicht glauconietcement.

### B/1. Bruine films

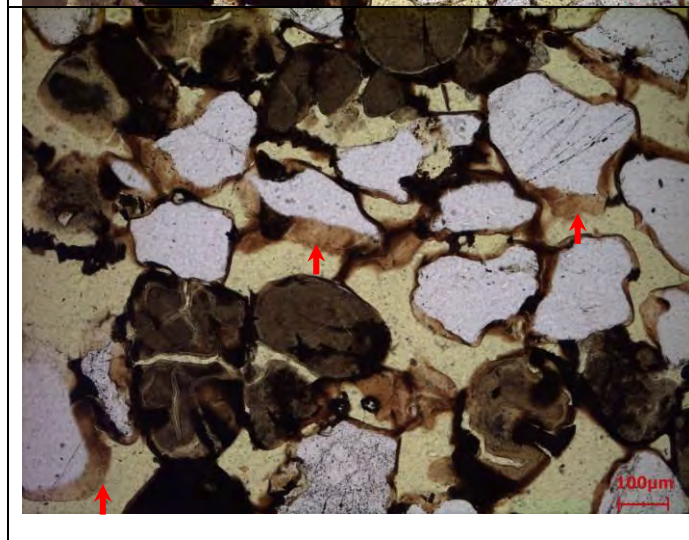
De bruine films rondom de zandkorrels hebben vaak de vorm van een meniscus (meniscus cement, Figuur 23) en/of vertonen kenmerken van een microstalactitisch cement (Figuur 24) wat wijst op een meteorische oorsprong in de vadose zone (de onverzadigde zone van de bodem waar de poriën niet of gedeeltelijk met water gevuld zijn, exclusief de capillaire zone boven het grondwater). De stalen die veel bruine films rondom de zandkorrels vertonen zijn de 7 die een aandeel tot 50% aan donker cement in het globale cementgehalte bevatten (Figuur 13). Het gaat voornamelijk om zwak geconsolideerde zandsteen (5 stalen op 7 hetzij 71%) en in mindere mate om matig geconsolideerde zandsteen (2 stalen op 7 hetzij 29%).



*Figuur 23. Bruine films rondom de zandkorrels in een zwak geconsolideerde zandsteen (staal W1/2A).*

*Plaatselijk vertonen de bruine films kenmerken van een meniscus cement dat de contactpunten tussen de korrels vormt (rode pijl).*

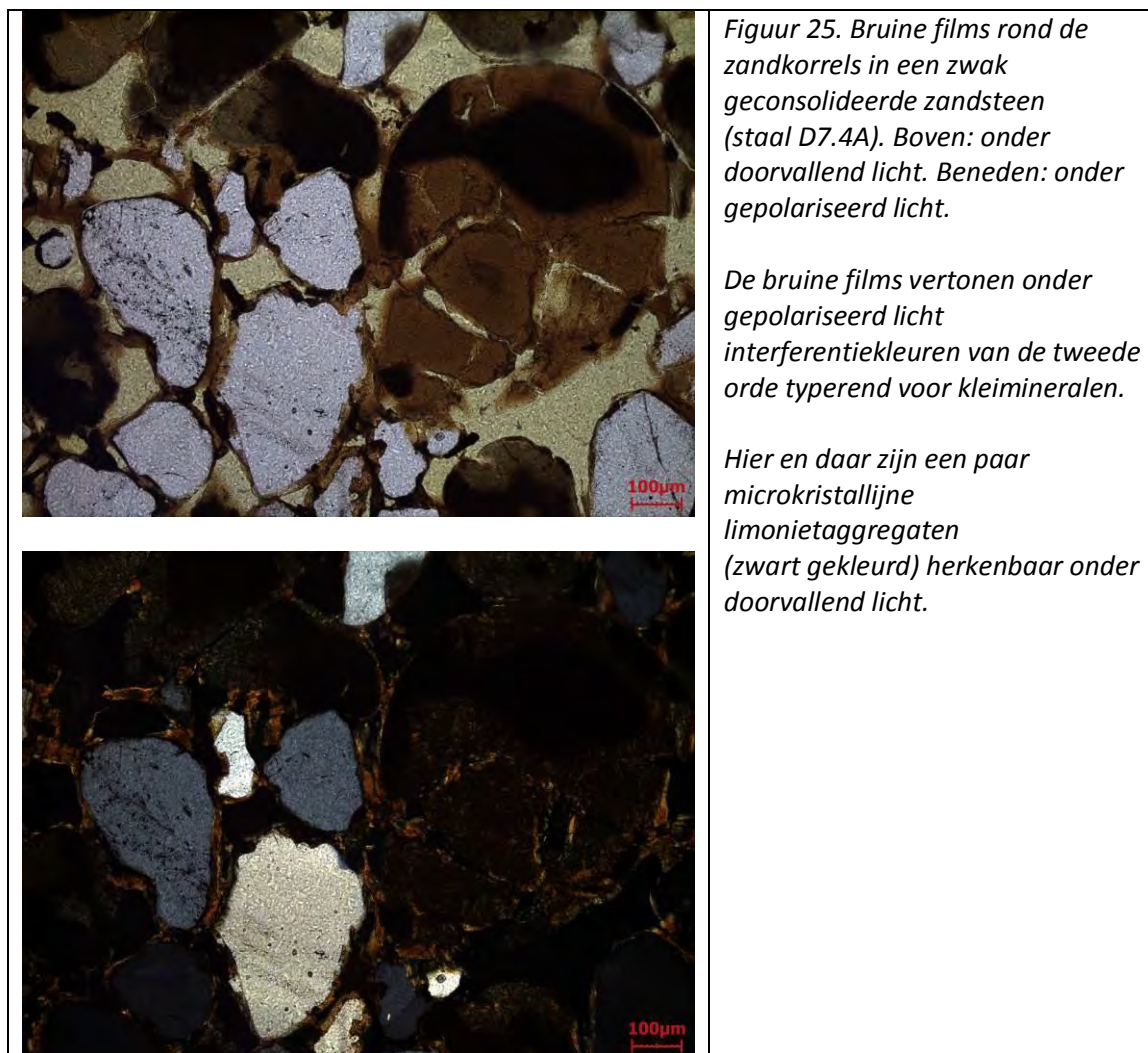
*Hier en daar zijn enkele microkristallijne limonietaggregaten (zwart gekleurd) herkenbaar.*



*Figuur 24. Bruine films rondom de zandkorrels in een zwak geconsolideerde zandsteen (staal W3/4A).*

*Plaatselijk vertonen de bruine films kenmerken van een microstalactitisch cement, gekenmerkt door een grotere dikte en gevormd op het stratigrafisch onderste gedeelte van de korrels (rode pijlen). Tevens zijn wat microkristallijne limonietaggregaten (zwart gekleurd) aanwezig.*

De bruine films hebben vermoedelijk een kleiige samenstelling gezien deze onder gepolariseerd licht interferentiekleuren van de tweede orde typerend voor kleimineralen vertonen (Figuur 25). De aanwezigheid van driewaardig ijzer in de klei zou een verklaring kunnen zijn voor de bruine kleur van de films. De exacte aard van de bruine films kan evenwel niet met zekerheid bepaald worden aan de hand van microscopische analyse van slijpplaatjes.



*Figuur 25. Bruine films rond de zandkorrels in een zwak geconsolideerde zandsteen (staal D7.4A). Boven: onder doorvallend licht. Beneden: onder gepolariseerd licht.*

*De bruine films vertonen onder gepolariseerd licht interferentiekleuren van de tweede orde typerend voor kleimineralen.*

*Hier en daar zijn een paar microkristallijne limonietaggregaten (zwart gekleurd) herkenbaar onder doorvallend licht.*

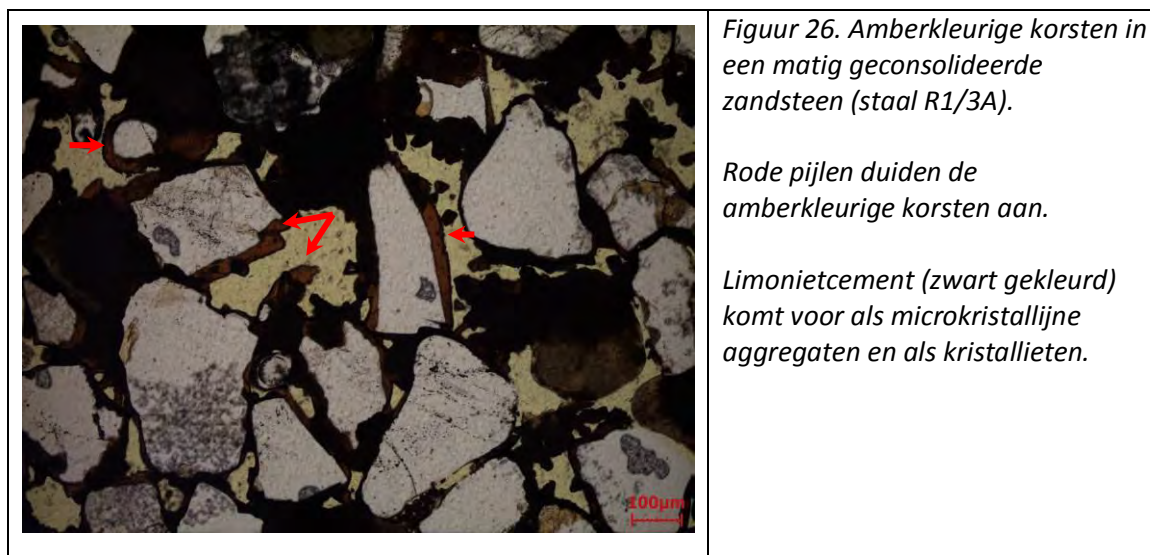
In de literatuur wordt als mogelijke herkomst van deze bruine, vermoedelijk kleiige, films een natuurlijke verwerking van glauconiet in de bodem vermeld, met als gevolg daarvan het verlies van kalium en de vorming van zwellende kleilagen (vermiculiet of montmorilloniet<sup>2</sup>). De bruine films zijn afgezet bovenop de microkristallijne limonietaggregaten wat wijst op een meer recente neerslag van de bruine films ten opzichte van het donker cement (Figuur 23 tot Figuur 25).

#### B/2. Amberkleurige vlekken, blokken en korsten

Amberkleurige vlekken (Figuur 15), blokken (Figuur 17) en korsten (Figuur 26) komen zowel in zwak en matig als in goed geconsolideerde ijzerzandsteen voor, maar weliswaar in mindere mate dan de bruine films. Vermoedelijk komen ze overeen met limoniet van een verschillende samenstelling dan het eerder beschreven donker limonietcement.

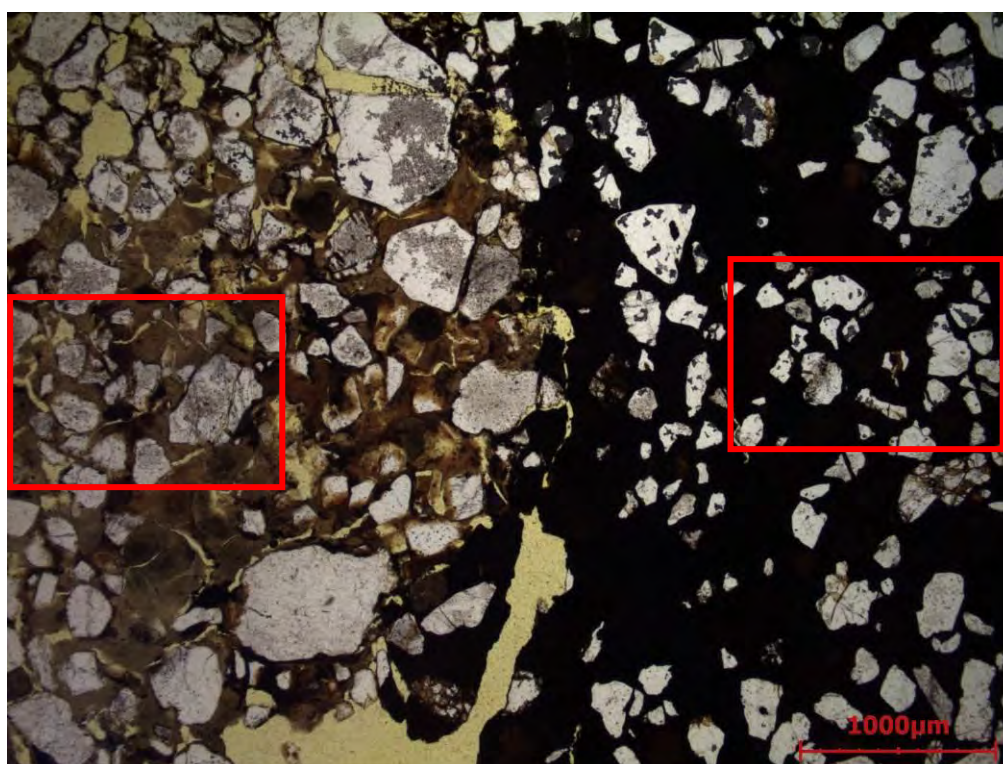
<sup>2</sup> McRae, S.G, 1972. *Glauconite*. Earth-Science Reviews, 8:397-440.





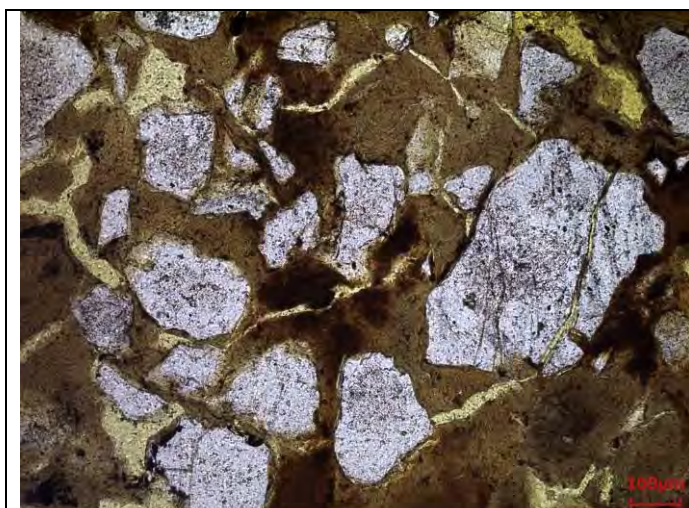
### B/3. Dicht glauconietcement

Het gaat om een eerder fris, groen gekleurd glauconiet dat de rol van zowel contactcement als van poriëncement vervult. Dit type cement wordt slechts in één staal van een goed geconsolideerde zandsteen waargenomen (D5.1B) en dit slechts op één plaats. De contactzone tussen het dicht glauconietcement en het dicht limonietcement in dit staal vertoont zo goed als geen overgangszone (Figuur 27). Detailopnames van Figuur 27 zijn weergegeven in Figuur 28 en Figuur 29.



*Figuur 27. Contactzone tussen het dicht glauconietcement (links) en het dicht limonietcement (rechts) in een goed geconsolideerde zandsteen (staal D5.1B).*





*Figuur 28. Detailopname van Figuur 27 in het dicht glauconietcement (staal D5.1B).*

*Talrijke krimpscheuren kunnen herkend worden in het groen getint glauconietcement.*



*Figuur 29. Detailopname van de Figuur 27 in het dicht limonietcement (staal D5.1B).*

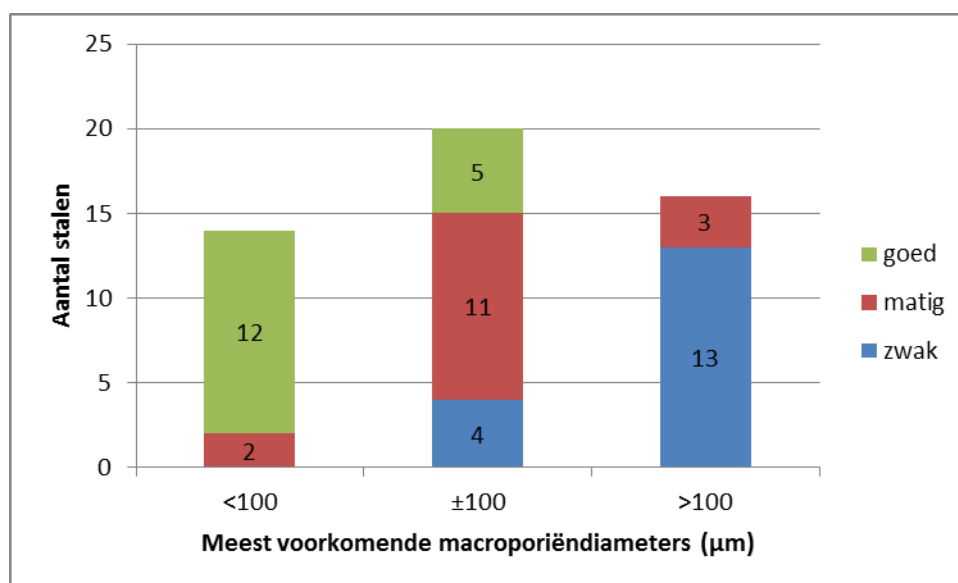
### 4.3. Poriën

Enkel de intergranulaire macroporiën zichtbaar onder de optische microscoop ( $\geq 10 \mu\text{m}$ ) worden hier besproken, vanuit hun grootste diameter, in termen van de gemiddelde grootte, de interconnectiviteit en de totale macroporositeit. De microporiën die in de matrix of het cement voorkomen worden niet besproken.

#### 4.3.1. Gemiddelde macroporiëngrootte

De diameter van de poriën is een visuele schatting van de meest voorkomende macroporiëngroottes en dit volgens een ruwe indeling: hoger dan  $100 \mu\text{m}$ , ongeveer  $100 \mu\text{m}$  en lager dan  $100 \mu\text{m}$  in diameter.

De meest voorkomende macroporiëngroottes worden grotendeels door de consolidatiegraad beïnvloed (Figuur 30). Zo vertoont zwak geconsolideerde zandsteen doorgaans macroporiën met een diameter groter dan  $100 \mu\text{m}$  (13 stalen op 17 hetzij 76%) terwijl goed geconsolideerde zandsteen macroporiën met een diameter kleiner dan  $100 \mu\text{m}$  bevat (12 stalen op 17 hetzij 71%). Matig geconsolideerde zandsteen vertoont globaal macroporiën van ongeveer  $100 \mu\text{m}$  in diameter (11 stalen op 16 hetzij 69%).

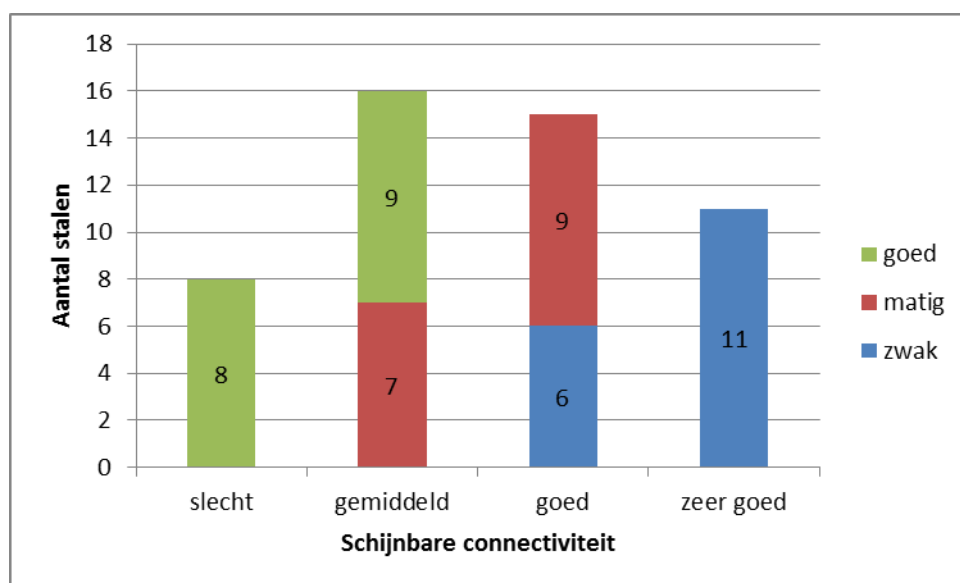


Figuur 30. Verdeling van de meest voorkomende macroporiëndiameters ( $\mu\text{m}$ ) van ijzerzandsteen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (goed-matig-zwak).

#### 4.3.2. Schijnbare connectiviteit

De connectiviteit van de macroporiën werd bepaald op basis van een microscopische analyse van de slijpplaatjes. Gezien zeer fijne capillairen ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ) niet kunnen gedetecteerd worden aan de hand van optische microscopie, lijkt de term schijnbare connectiviteit beter.

De consolidatiegraad heeft een invloed op de schijnbare connectiviteit van de macroporiën (Figuur 31). Zwak geconsolideerde zandsteen vertoont goed tot zeer goed geconnecteerde macroporiën terwijl goed geconsolideerde zandsteen door slecht tot gemiddeld geconnecteerde macroporiën gekenmerkt wordt. Matig geconsolideerde zandsteen bevat gemiddeld tot goed geconnecteerde macroporiën. Deze observaties zijn aanwijzingen voor de consolidatiegraad. Ze mogen evenwel niet worden geïnterpreteerd als indicatoren voor vorstgevoeligheid of hygrisch gedrag.

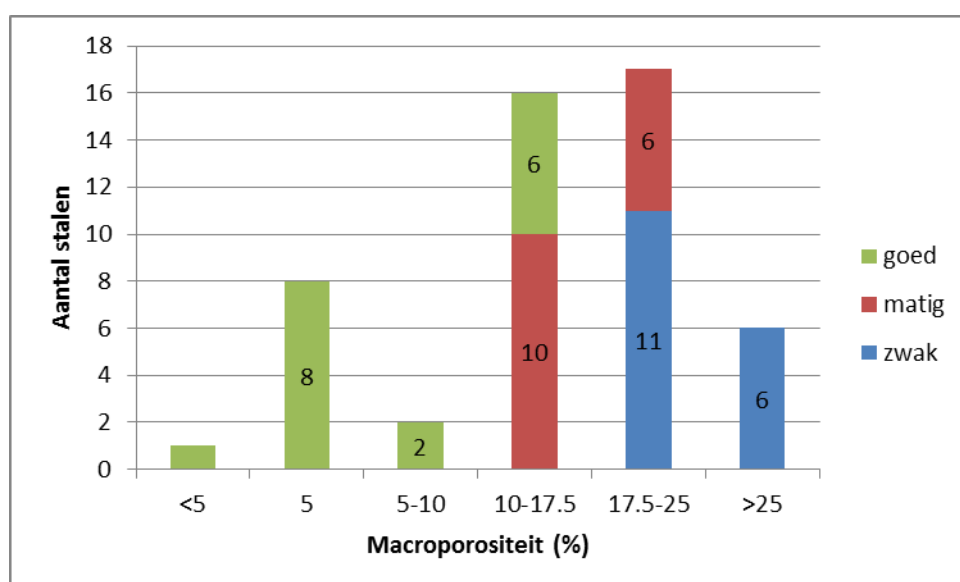


Figuur 31. Verdeling van de schijnbare connectiviteit van de macroporiën van ijzerzandsteen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (goed-matig-zwak).

### 4.3.3. Macroporositeit

Het gebruik van een geel gekleurd hars voor de vervaardiging van slijpplaatjes maakt het mogelijk een visuele schatting van de macroporositeit te maken.

Doorgaans vertoont zwak geconsolideerde zandsteen een macroporositeit van meer dan 20% terwijl dit van goed geconsolideerde zandsteen maximaal 10-15% bedraagt (Figuur 32). De macroporositeit van matig geconsolideerde zandsteen varieert van 10 tot 25%. Kortweg: ijzerzandsteen met een hogere consolidatiegraad wordt gekenmerkt door een lagere macroporositeit, fijnere poriën en een lagere schijnbare connectiviteit.



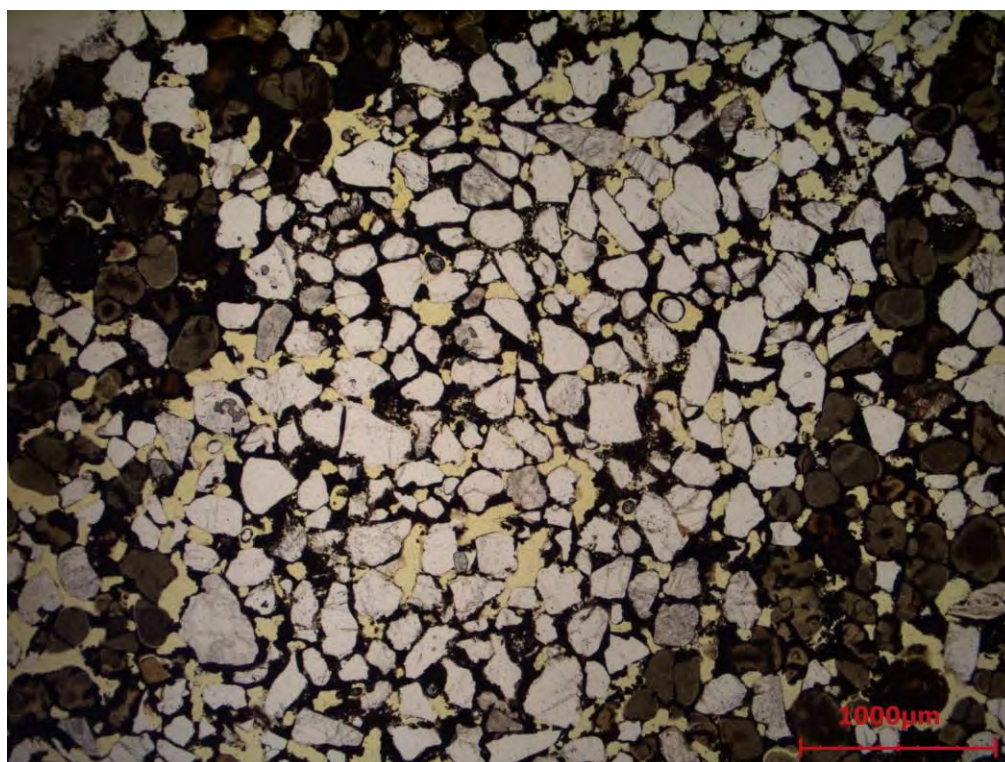
Figuur 32. Verdeling van de macroporositeit (%) voor ijzerzandsteen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (goed-matig-zwak).

#### 4.4. Homogeniteit

Hoewel de meeste geanalyseerde stalen op het niveau van het slijpplaatje (2 x 3 cm) door een redelijke globale homogeniteit worden gekenmerkt kunnen toch sterke verschillen voorkomen en dit op het niveau van (1) een ongelijke spreiding van de verhouding kwarts/glauconiet, (2) een ongelijke verdeling van het cement en (3) de aanwezigheid van microscheuren.

##### 4.4.1. Spreiding kwarts/glauconiet

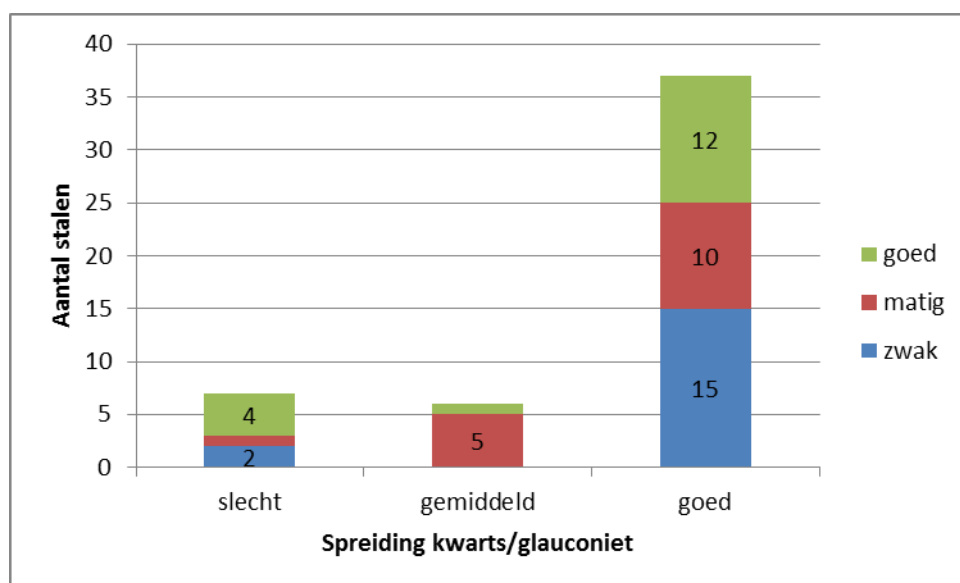
De verdeling van de globale verhouding kwarts/glauconiet geeft een idee van de variabiliteit van deze verhouding over het oppervlak van het slijpplaatje en bijgevolg van de homogeniteit van de zandfractie. De spreiding kwarts/glauconiet is immers sterk beïnvloed door de aanwezigheid van bioturbaties (we mogen overigens veronderstellen dat niet gebioturbeerde zandsteen niet voorkomt). Zo kan de kwarts/glauconiet verhouding van het sediment in graafgangen van zeewormen lokaal sterk afwijken van de globale kwarts/glauconiet verhouding (Figuur 33) en leiden tot een slechte spreiding ervan. Intens gebioturbeerde ijzerzandsteen wordt daarentegen gekenmerkt door een goede spreiding kwarts/glauconiet, hoewel glauconietkorrels in talrijke kleine nesten geconcentreerd zijn.



*Figuur 33. Doorsnede van een graafgang van een zeeworm volledig opgevuld door een zandig sediment (het gaat uitsluitend om kwartskorrels) in een matig geconsolideerde zandsteen (staal R1/3A). Doordat de randen van de graafgang een hoge concentratie aan glauconietkorrels bevatten, vertoont dit staal nog steeds een globale verhouding kwarts/glauconiet van 3:2.*

De spreiding kwarts/glauconiet van de 50 geanalyseerde stalen is weergegeven in Figuur 34. 74% van de stalen (37 op 50) vertoont een goede spreiding kwarts/glauconiet. Er wordt geen verband afgeleid tussen de spreiding kwarts/glauconiet en de consolidatiegraad.

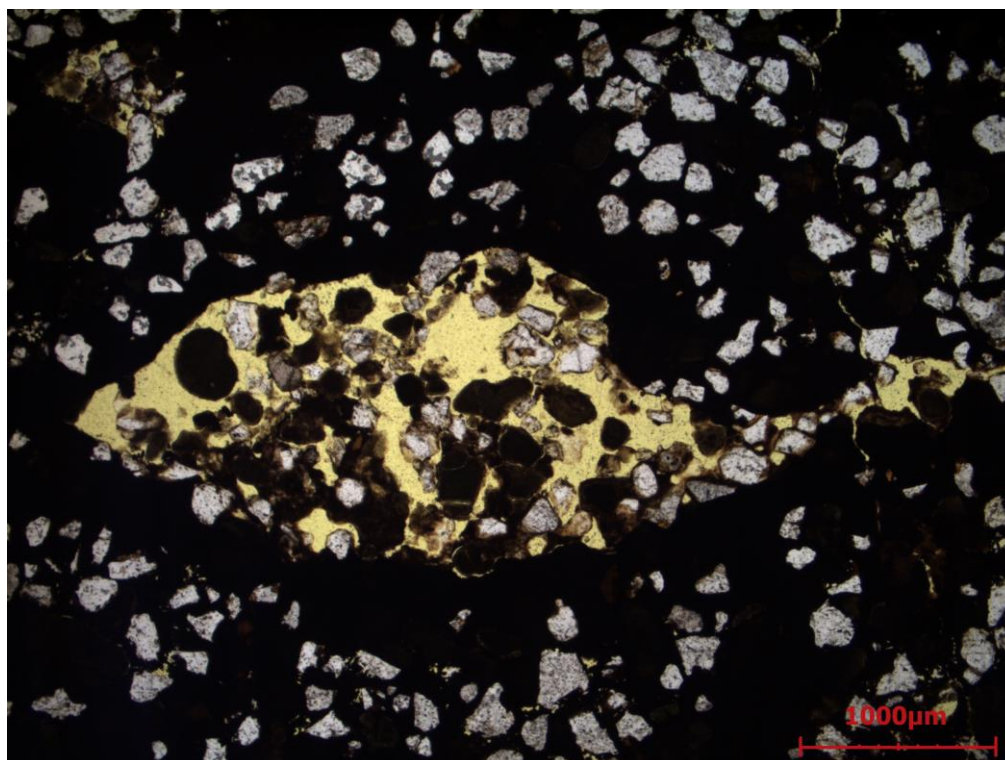




Figuur 34. Verdeling van de spreiding kwarts/glaucconiet van ijzerzandsteen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (goed-matig-zwak).

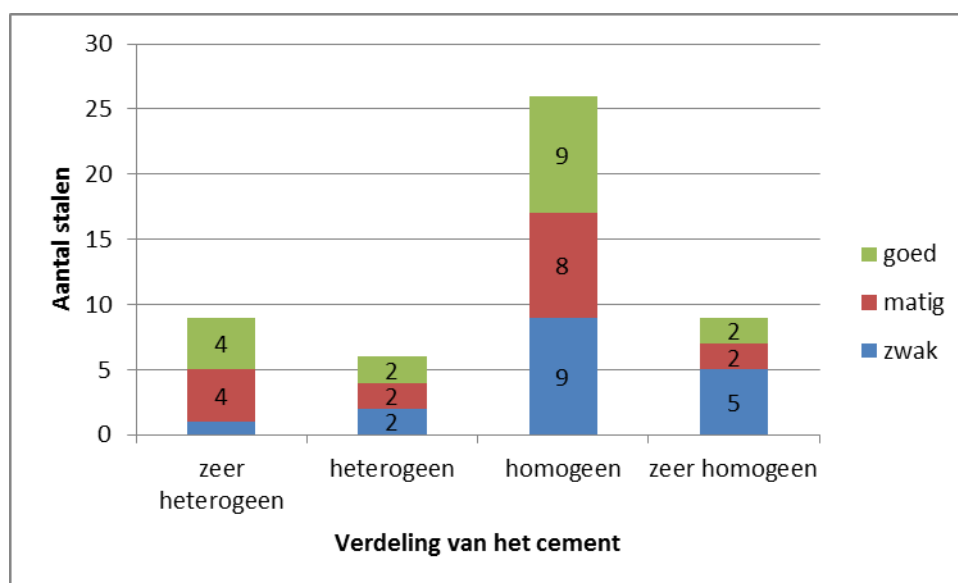
#### 4.4.2. Verdeling van het cement

Ook de verdeling van het cement is een indicatie van de homogeniteit van de stalen Diestiaan ijzerzandsteen. Zo kunnen zandige zones voorkomen in een staal en dit onafhankelijk van de consolidatiegraad. Voor zover hun aandeel beperkt is, hebben zandige zones op zich geen negatief effect op de duurzaamheid van een goed geconsolideerde zandsteen aangezien de goed geconsolideerde zones fungeren als het skelet van de steen (Figuur 35). Een zeer heterogene verdeling van het cement kan daarentegen aanleiding geven tot een sterke daling in de mechanische eigenschappen voor zwak en matig geconsolideerde zandsteen.



Figuur 35. Zandige geïsoleerde zone (in het midden) in een goed geconsolideerd zandsteen (staal R/F6A).

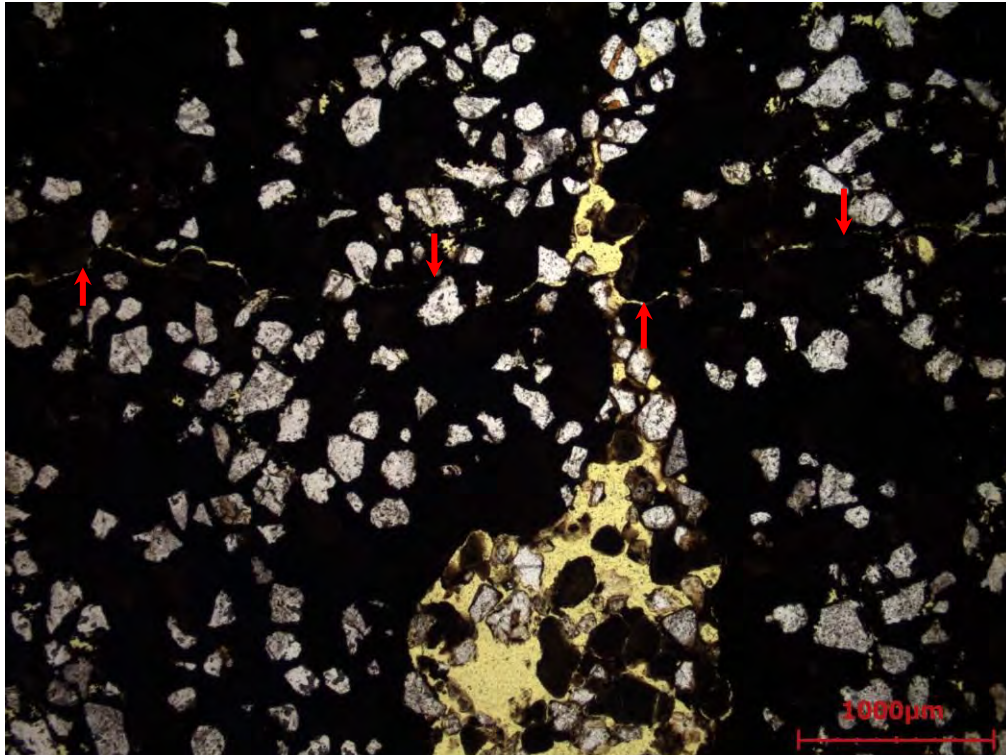
De verdeling van het cement van de 50 stalen is weergegeven in Figuur 36. 66% van de stalen (33 op 50) vertoont een homogene of zeer homogene cementverdeling op het niveau van het meetvlak van een slijpplaatje. Er wordt geen verband waargenomen tussen de verdeling van het cement en de consolidatiegraad.



Figuur 36. Verdeling van het cement voor ijzerzandsteen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad (goed-matig-zwak).

#### 4.4.3. Microscheuren

Microscheuren in de grootteorde van een paar micrometers (Figuur 37), soms doorlopend over het hele oppervlak van het slijpplaatje, worden enkel in 6 stalen van goed geconsolideerde zandsteen gedetecteerd (H1/3A: 5.39-5.42m, H/F10A: ontsluiting, R1/2A: 5.88-5.93m, R/F6A: ontsluiting, D5.1B: 0.25-0.30m en D13.3B: 0.64-0.69m). 4 van de 6 stalen zijn afkomstig van ontsluitingen of werden genomen in de nabijheid van het maaiveld. Een mogelijke hypothese is dat de hoge cementatiegraad tot een hogere vorstgevoeligheid leidt als gevolg van een slechte connectiviteit van de poriën en/of een te groot aandeel aan microporiën. Hoewel enkele van deze microscheuren misschien tijdens het maken van het slijpplaatje zijn gevormd, weerspiegelt dit in ieder geval de aanwezigheid van zones met een lage mechanische sterkte.



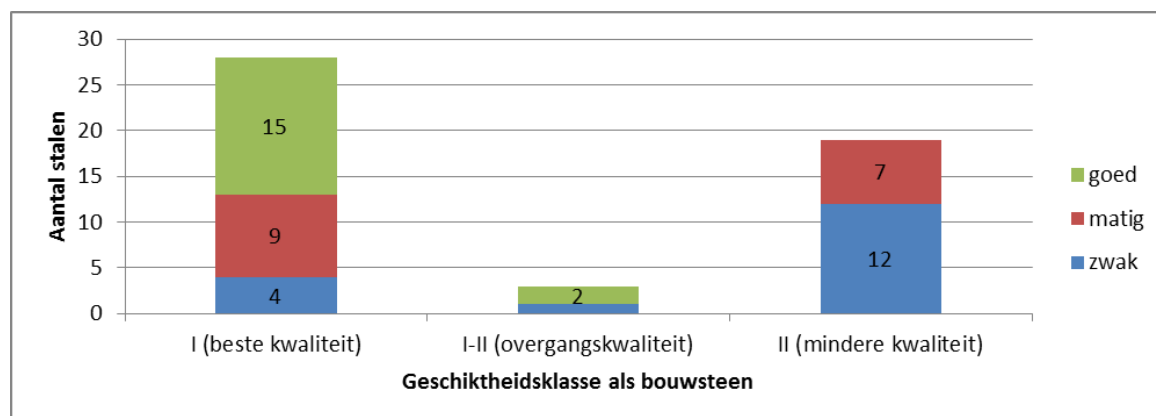
*Figuur 37. Microscheur (rode pijlen) doorlopend over het hele slijpplaatje in een goed geconsolideerde zandsteen (staal R/F6A). In het midden bevindt zich tevens een zandige zone.*

## 5. Vergelijking met geschiktheidsklasse als bouwsteen

De petrografische studie en in het bijzonder de microscopische analyse van het voorkomen van cement tussen de zandkorrels maakt het mogelijk een algemene beoordeling te geven van de consolidatiegraad van de onderzochte stalen en dit volgens een indeling in 3 categorieën: zwak, matig en goed geconsolideerde zandsteen.

De indeling in 3 categorieën moet semi-kwantitatief beschouwd worden omdat deze enkel gebaseerd is op visuele waarnemingen/schattingen van slijpplaatjes. Verdere kwantificering zou evenwel niet meer informatie opleveren, gezien de natuurlijke heterogeniteit van Diestiaan ijzerzandsteen.

De petrografische studie had dan ook de bedoeling na te gaan in hoeverre de empirische veldwaarnemingen gestaafd zijn. Bij de boorkernbeschrijvingen en tijdens de terreinbezoeken werd voor de gebruikte monsters een geschiktheidsklasse als bouwsteen gehanteerd gaande van I (beste kwaliteit) tot II (mindere kwaliteit) met de mogelijkheid van een overgangskwaliteit (I-II). Er wordt een vrij duidelijke overeenkomst vastgesteld tussen de geschiktheidsklasse als bouwsteen en de consolidatiegraad bepaald aan de hand van de microscopische cementanalyse (Figuur 38). 88% van de stalen van goed geconsolideerde zandsteen (15 op 17) behoort tot de klasse I, samen met 56% van de stalen van matig geconsolideerde zandsteen (9 op 16) en 23.5% (4 op 17) van de groep stalen die zwak geconsolideerd is. Hieruit kan afgeleid worden dat de geschiktheidsklasse als bouwsteen een ruwe maar toch redelijk betrouwbare indicatie van de consolidatiegraad is gezien 24 van de 33 stalen (hetzij 73%) van goed en matig geconsolideerde zandsteen tot klasse I behoren.

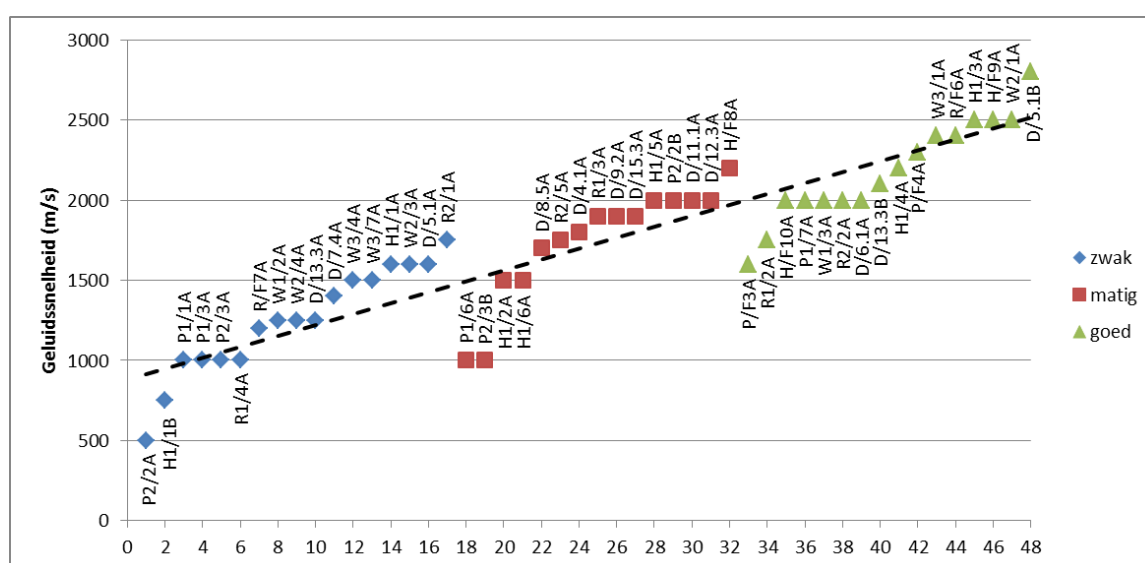


Figuur 38. Geschiktheidsklasse als bouwsteen van ijzerzandsteen gekenmerkt door een verschillende consolidatiegraad.



## 6. Vergelijking van de consolidatiegraad met resultaten geluidssnelheidsmetingen

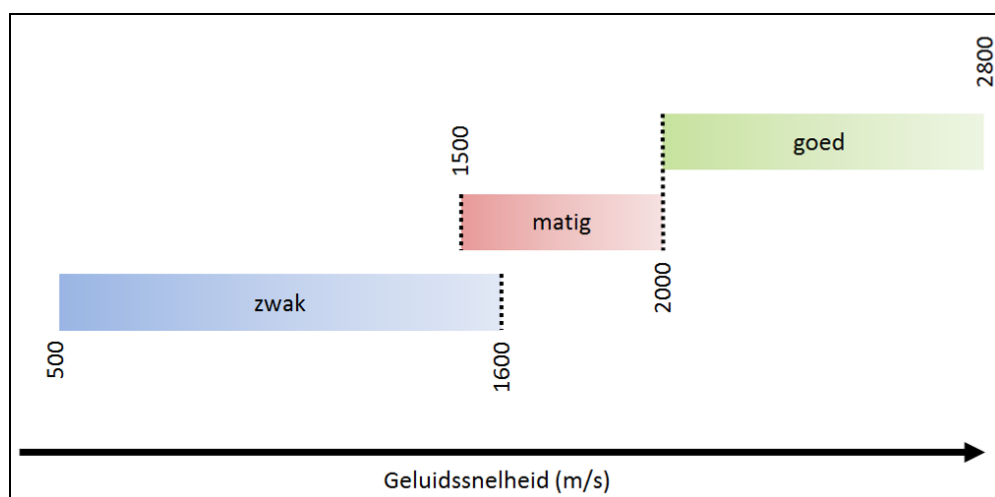
De consolidatiegraad bepaald aan de hand van microscopische cementanalyse vertoont een zeer goede positieve correlatie met de gemeten waarden voor de geluidssnelheid (Figuur 39). Hieruit kan tevens worden afgeleid dat er een duidelijk continuüm bestaat tussen zwak, matig en goed geconsolideerde zandsteen. Het feit dat niet alle stalen netjes op de tendenslijn liggen is eerder normaal omwille van minstens 3 redenen: (1) gezien de eerder geringe afmetingen is een slijpplaatje niet altijd representatief voor het gehele staal, en dit zeker voor een erg heterogene ijzerzandsteen, (2) voor de stalen genomen langs de randen van de ijzerzandsteenbanken is de toegeschreven geluidssnelheidswaarde een ruwe schatting bepaald op basis van de resultaten van metingen bekomen op de dichtstbijzijnde meetpunten (waarden met een 'ca.' in Tabel 1) en (3) visuele waarnemingen/schattingen op basis van slijpplaatjes zijn per definitie semi-kwantitatief.



Figuur 39. Geluidssnelheid van zwak-matig-goed geconsolideerde ijzerzandsteen (48 stalen<sup>3</sup>).

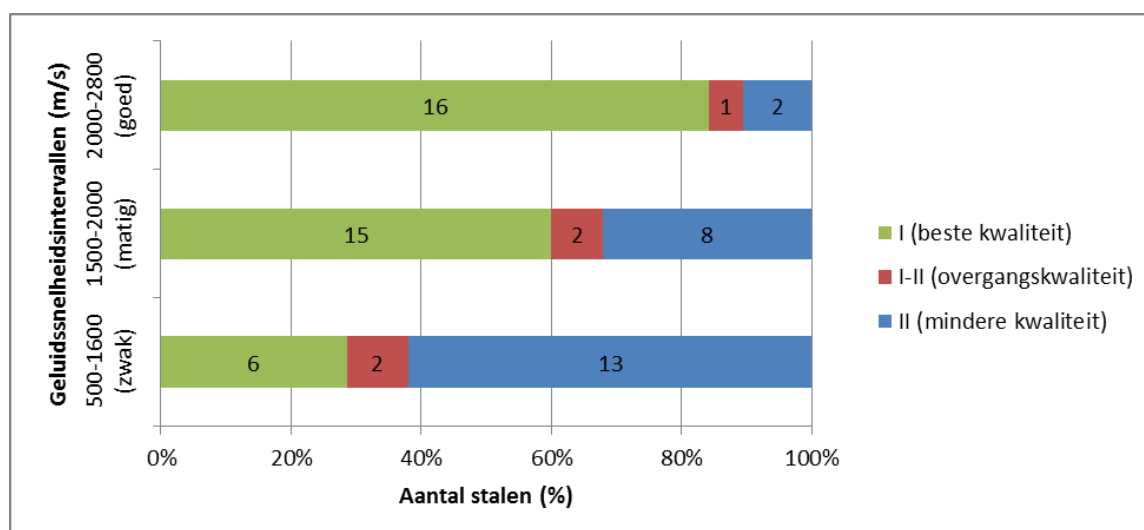
Figuur 40 geeft de typerende geluidssnelheidsintervallen weer voor respectievelijk zwak, matig en goed geconsolideerde ijzerzandsteen, zonder rekening te houden met deze die sterk afwijken van de globale tendens (R2/1A, P1/6A, P2/3B, H/F8A, P/F3A en R1/2A in Figuur 39). Zwak geconsolideerde zandsteen wordt gekenmerkt door een geluidssnelheid tot 1600 m/s. Matig geconsolideerde zandsteen wordt gekenmerkt door een geluidssnelheid van 1500 tot 2000 m/s. Goed geconsolideerde zandsteen wordt gekenmerkt door een geluidssnelheid van 2000 tot 2800 m/s.

<sup>3</sup> Twee stalen (W/F1A en W/F2A) waren te klein om geluidssnelheidsmetingen op uit te voeren (zie Tabel 1).



Figuur 40. Typerende geluidssnelheidsintervallen voor zwak, matig en goed geconsolideerde ijzerzandsteen.

In Figuur 41 worden de geluidssnelheidsintervallen gerelateerd aan de geschiktheidsklasse als bouwsteen. Globaal stijgt het aandeel aan stalen van klasse I met een hogere geluidssnelheid.



Figuur 41. Verdeling van stalen klasse I, I-II en II over de geluidssnelheidsintervallen (m/s) overeenkomende met zwak-matig-goed geconsolideerde ijzerzandsteen. Gezien de overlapping van de grenzen qua geluidssnelheid tussen zwak, matig en goed geconsolideerde zandsteen werden sommige stalen twee maal in de grafiek opgenomen.

## 7. Schatting van het bruikbare materiaal per site op basis van de consolidatiegraad

Op basis van het aantal en de dikte van de boorkernfragmenten die een geluidssnelheid typerend voor matig of goed geconsolideerde zandsteen vertonen kan vervolgens het bruikbare materiaal per site geschat worden. Zo werden kernfragmenten met geluidssnelheidswaarden tussen ca. 1500 m/s en ca. 2000 m/s beschouwd als **matig geconsolideerd** terwijl kernfragmenten met geluidssnelheidswaarden van minstens 2000 m/s als **goed geconsolideerd** (Figuur 40). Rekening houdend met het feit dat de consolidatiegraad van eenzelfde kernfragment met de diepte kan variëren tussen matig en goed werden zulke stalen als **matig tot goed geconsolideerd** beschouwd. Kernfragmenten gekenmerkt door een zwakke consolidatiegraad worden in het kader van dit onderzoek niet als bruikbaar materiaal beschouwd gezien hun te lage cementatiegraad die over het algemeen aanleiding geeft tot verzanding.

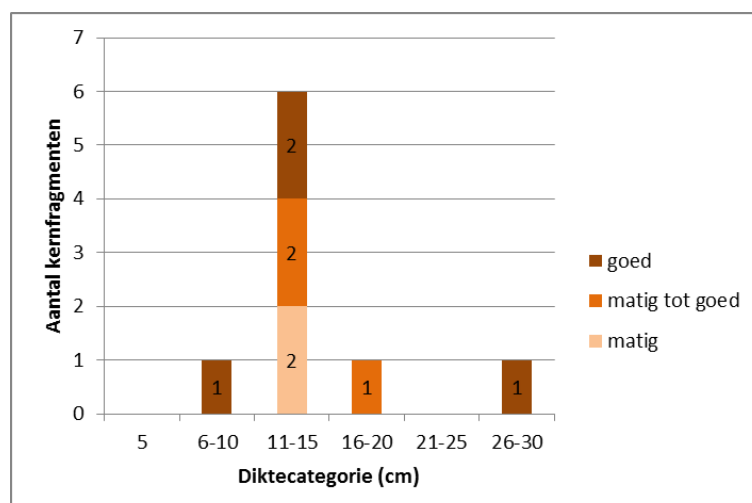
De minimale dikte voor bruikbaar materiaal in restauratie van historische gebouwen zou kunnen vastgelegd worden op 5 cm om gedeeltelijke steenvervanging te kunnen uitvoeren. Deze dikte wordt verder als limietwaarde voor bruikbare dikte gebruikt maar het is duidelijk dat restauratiewerken een spectrum van alle mogelijke diktes moet kunnen omvatten. Om alle bruikbare kernfragmenten per kernboring of per locatie op een praktische manier in beeld te brengen werd elk fragment in een categorie ondergebracht op basis van zijn dikte en zijn geluidssnelheidswaarde.

Hiernavolgend wordt per site een overzicht gegeven van de verdeling van bruikbaar materiaal. Hierbij wordt systematisch de verdeling van bruikbaar materiaal weergegeven volgens de dikte van de matig tot goed geconsolideerde fragmenten ijzerzandsteen zoals aangetroffen in de gelichte boorkernen, meer bepaald:

- Site Roeselberg (Herent): Figuur 42;
- Site Gasthuisbos (Pellenberg): Figuur 43 en Figuur 44;
- Site Beninksberg (Wezemaal): Figuur 45 tem Figuur 47;
- Site Middelberg (Rotselaar): Figuur 48 en Figuur 49;
- Site Langenberg (Diest): Figuur 50.

In de Tabel 2 tem Tabel 6 zijn deze resultaten per site in diezelfde volgorde opgelijst.

## 7.1. Roeselberg (Herent)



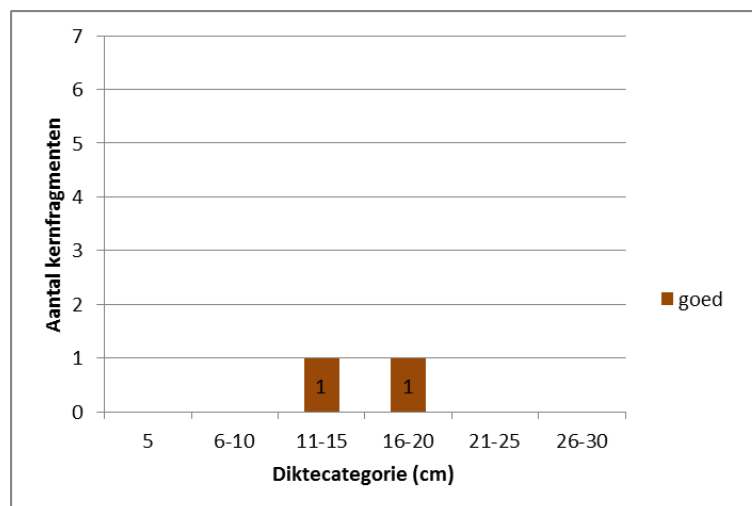
Figuur 42. Verdeling van het bruikbare materiaal volgens de dikte van de matig tot goed geconsolideerde fragmenten ijzerzandsteen zoals aangetroffen in de kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1) van de Roeselberg te Herent.

Tabel 2. Verdeling van het bruikbare materiaal op de Roeselberg (Herent) afkomstig van de kernboring en de ontsluiting op basis van de geschatte consolidatiegraad. De resultaten van de geluidssnelheidsmetingen zijn in de voorlaatste kolom weergegeven.

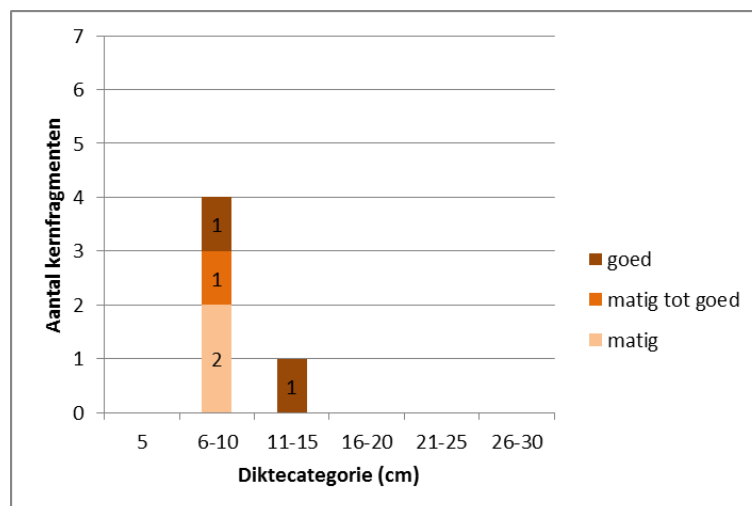
HERENT	Fragment	Dikte (cm)	Geluidssnelheid (m/s)	Consolidatiegraad
KERNBORING VLA10-4.1-B1	2.85-2.99	14	1500-1700	matig
	5.14-5.20	6	2500-3000	goed
	5.41-5.55	14	2000-2500	goed
	7.19-7.45	26	2000-2550	goed
	7.50-7.65	16	1550-1750	matig tot goed
	7.71-7.85	14	1700-2450	matig
	7.90-8.05	15	2000-2400	goed
	8.12-8.26	14	1500-2200	matig tot goed
8.32-8.47	15	1500-2000	matig tot goed	
<b>cumulatieve dikte: 1.34 m / max. diepte: 8.47 m / bruikbaar materiaal: 16%</b>				
ONTSLUITING	H/F8A	10-15	2000-2400	goed
	H/F9A	8-10	2400-2700	goed
	H/F10A	8	1800-2400	matig tot goed



## 7.2. Gasthuisbos (Pellenberg)



Figuur 43. Verdeling van het bruikbare materiaal volgens de dikte van de matig tot goed geconsolideerde fragmenten ijzerzandsteen zoals aangetroffen in de kernboring VLA10-4.1-B2 (090W/1272 P1) van het Gasthuisbos te Pellenberg.

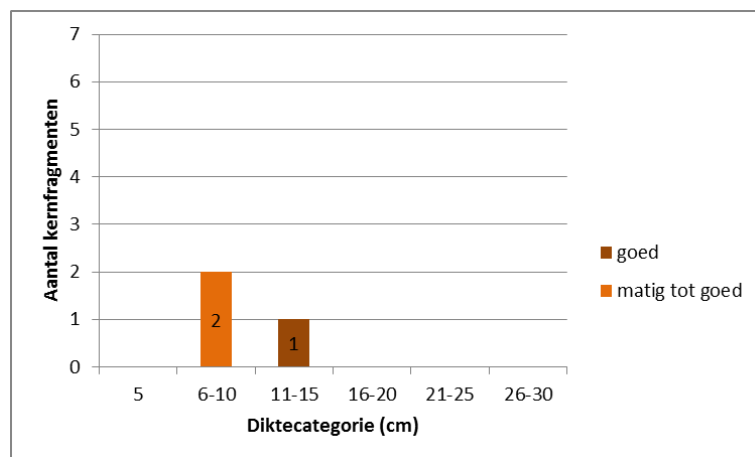


Figuur 44. Verdeling van het bruikbare materiaal volgens de dikte van de matig tot goed geconsolideerde fragmenten ijzerzandsteen zoals aangetroffen in de kernboring VLA10-4.1-B3 (090W/1273 P2) van het Gasthuisbos te Pellenberg.

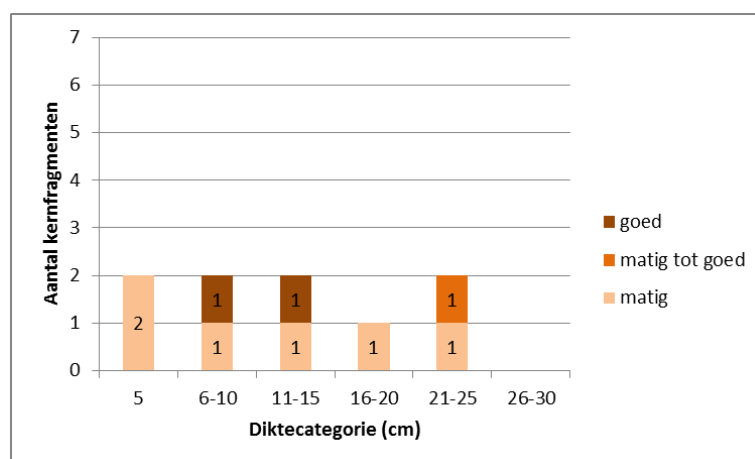
*Tabel 3. Verdeling van het bruikbare materiaal van het Gasthuisbos (Pellenberg) afkomstig van de kernboringen en de ontsluiting op basis van de geschatte consolidatiegraad. De resultaten van de geluidssnelheidsmetingen zijn in de voorlaatste kolom weergegeven.*

PELLENBERG	Fragment	Dikte (cm)	Geluidssnelheid (m/s)	Consolidatiegraad
KERNBORING VLA10-4.1-B2	11.57-11-73	16	2000-2600	goed
	11.85-11.98	13	2200-2600	goed
<b>cumulatieve dikte: 0.29 m / max. diepte: 11.98 m / bruikbaar materiaal: 2%</b>				
KERNBORING VLA10-4.1-B3	4.76-4.84	8	1500-1800	matig
	7.14-7.27	13	2000-2200	goed
	8.00-8.07	8	1500-2150	matig
	8.11-8.19	8	2000-2500	goed
	8.72-8.82	10	1700-2250	matig tot goed
<b>cumulatieve dikte: 0.47 m / max. diepte: 8.82 m / bruikbaar materiaal: 5%</b>				
ONTSLUITING	P/F3A	20-25	1500-2000	matig
	P/F4A	15	1900-2650	goed

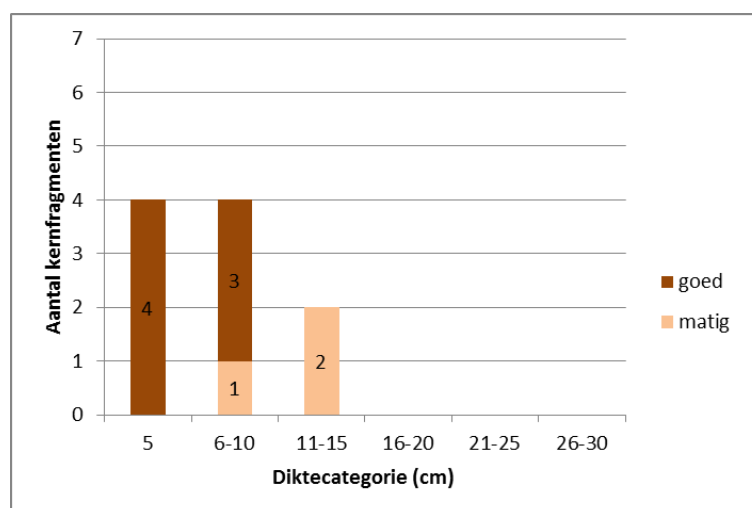
### 7.3. Beninksberg (Wezemaal)



Figuur 45. Verdeling van het bruikbare materiaal volgens de dikte van de matig tot goed geconsolideerde fragmenten ijzerzandsteen zoals aangetroffen in de kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1) van de Beninksberg te Wezemaal.



Figuur 46. Verdeling van het bruikbare materiaal volgens de dikte van de matig tot goed geconsolideerde fragmenten ijzerzandsteen zoals aangetroffen in de kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2) van de Beninksberg te Wezemaal.



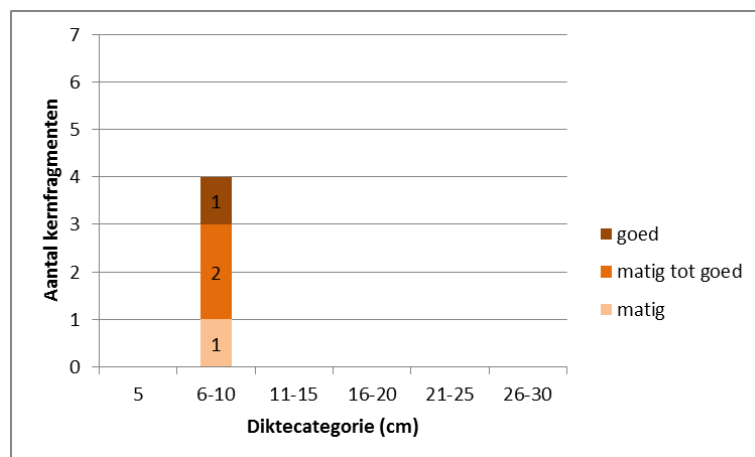
Figuur 47. Verdeling van het bruikbare materiaal volgens de dikte van de matig tot goed geconsolideerde fragmenten ijzerzandsteen zoals aangetroffen in de kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3) van de Beninksberg te Wezemaal.

Tabel 4. Verdeling van het bruikbare materiaal op de Beninksberg (Wezemaal) afkomstig van de kernboringen en de ontsluiting op basis van de geschatte consolidatiegraad. De resultaten van de geluidssnelheidsmetingen zijn in de voorlaatste kolom weergegeven. Het vraagteken wijst op kernfragmenten waarover een twijfel bestaat omtrent de consolidatiegraad gezien de beschikbare resultaten van de geluidssnelheidsmetingen (zie Bijlage II: Overzicht geluidssnelheidsmetingen).

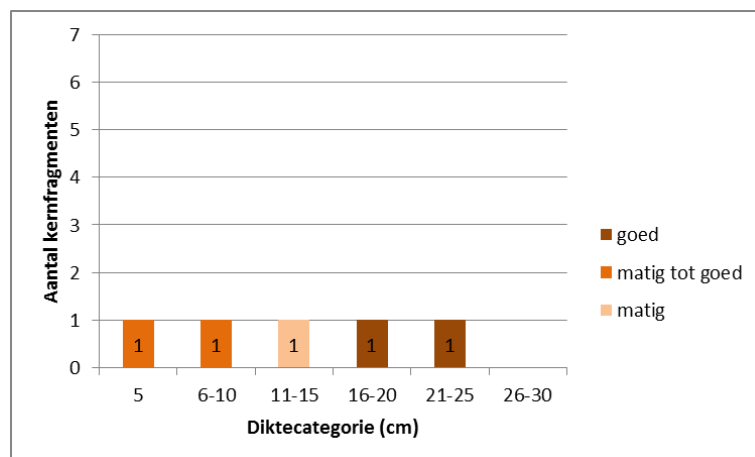
WEZEMAAL	Fragment	Dikte (cm)	Geluidssnelheid (m/s)	Consolidatiegraad
KERNBORING VLA10-4.1-B4	3.73-3.82 (W1)	9	1700-2200	matig tot goed
	4.56-4.62 (W1)	6	1700-2400	matig tot goed
	5.64-5.77 (W1)	14	2150-2700	goed ?
<b>cumulatieve dikte: 0.29 m / max. diepte: 5.77 m / bruikbaar materiaal: 5%</b>				
KERNBORING VLA10-4.1-B5	3.22-3.34 (W2)	12	2600-3100	goed
	3.45-3.52 (W2)	7	2700-3200	goed
	3.92-4.08 (W2)	16	1600-2000	matig
	4.11-4.32 (W2)	21	1600-2500	matig tot goed
	6.92-6.97 (W2)	5	1500-1900	matig
	7.20-7.25 (W2)	5	1500-1750	matig
	7.32-7.36 (W2)	7	1500-2100	matig
	7.48-7.59 (W2)	11	1550-2000	matig
7.81-8.03 (W2)	22	1550-2300	matig ?	
<b>cumulatieve dikte: 1.35 m / max. diepte: 8.03 m / bruikbaar materiaal: 17%</b>				
KERNBORING VLA10-4.1-B6	2.06-2.11 (W3)	5	2150-2400	goed
	2.38-2.43 (W3)	5	2400-3200	goed
	2.47-2.53 (W3)	6	2400-2950	goed
	2.57-2.63 (W3)	5	1900-2500	goed
	2.77-2.84 (W3)	7	2150-2550	goed
	2.89-2.95 (W3)	6	2100-2550	goed ?
	3.30-3.35 (W3)	5	1900-2200	goed
	3.68-3.79 (W3)	11	1500-2300	matig ?
	4.44-4.54 (W3)	10	1500-1900	matig
4.72-4.86 (W3)	14	1400-2100	matig ?	
<b>cumulatieve dikte: 0.74 m / max. diepte: 4.86 m / bruikbaar materiaal: 15%</b>				



#### 7.4. Middelberg (Rotselaar)



Figuur 48. Verdeling van het bruikbare materiaal volgens de dikte van de matig tot goed geconsolideerde fragmenten ijzerzandsteen zoals aangetroffen in de kernboring VLA10-4.1-B7 (075W/0389 R1) van de Middelberg te Rotselaar.



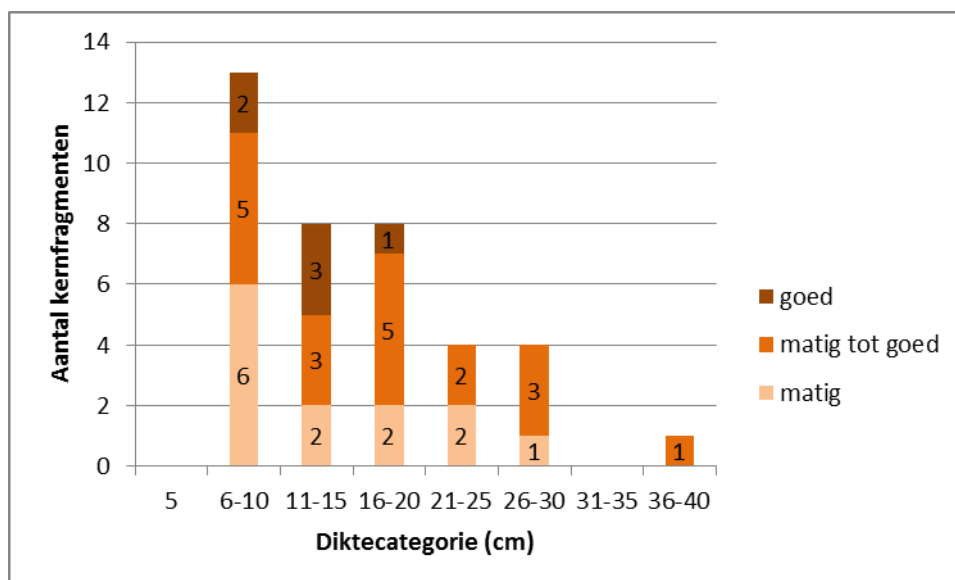
Figuur 49. Verdeling van het bruikbare materiaal volgens de dikte van de matig tot goed geconsolideerde fragmenten ijzerzandsteen zoals aangetroffen in de kernboring VLA10-4.1-B8 (075W/0390 R2) van de Middelberg te Rotselaar.

Tabel 5. Verdeling van het bruikbare materiaal op de Middelberg (Rotselaar) afkomstig van de kernboringen en de ontsluiting op basis van de geschatte consolidatiegraad. De resultaten van de geluidssnelheidsmetingen zijn in de voorlaatste kolom weergegeven. Het vraagteken wijst op kernfragmenten waarover een twijfel bestaat omtrent de consolidatiegraad gezien de beschikbare resultaten van de geluidssnelheidsmetingen (zie Bijlage II: Overzicht geluidssnelheidsmetingen).

ROTSELAAR	Fragment	Dikte (cm)	Geluidssnelheid (m/s)	Consolidatiegraad
KERNBORING VLA10-4.1-B7	3.27-3.35	8	2100-2450	goed
	3.90-3.98	8	1500-2800	matig tot goed
	5.90-5.99	9	1300-1900	matig ?
	6.59-6.68	9	1400-3200	matig tot goed ?
<b>cumulatieve dikte: 0.34 m / max. diepte: 6.68 m / bruikbaar materiaal: 5%</b>				
KERNBORING VLA10-4.1-B8	2.35-2.52	17	2000-2800	goed
	2.84-2.94	10	1900-2600	matig tot goed
	2.98-3.03	5	1950-2150	matig tot goed
	3.09-3.20	11	1500-1900	matig
	6.75-6.98	23	2000-3400	goed
<b>cumulatieve dikte: 0.66 m / max. diepte: 6.98 m / bruikbaar materiaal: 9%</b>				
ONTSLUITING	R/F6A	20	2100-2700	goed

## 7.5. Langenberg (Diest)

Op de Langenberg te Diest werden 15 kernboringen van ongeveer 1 m diepte uitgevoerd. Het gemiddelde van het bruikbare materiaal bedraagt 44% (5.96 van de 13.59 m). De cumulatieve dikte van bruikbaar materiaal met een dikte groter dan 20 cm bedraagt 2.42 m hetzij 40.6% van de cumulatieve dikte van bruikbaar materiaal (5.96 m).



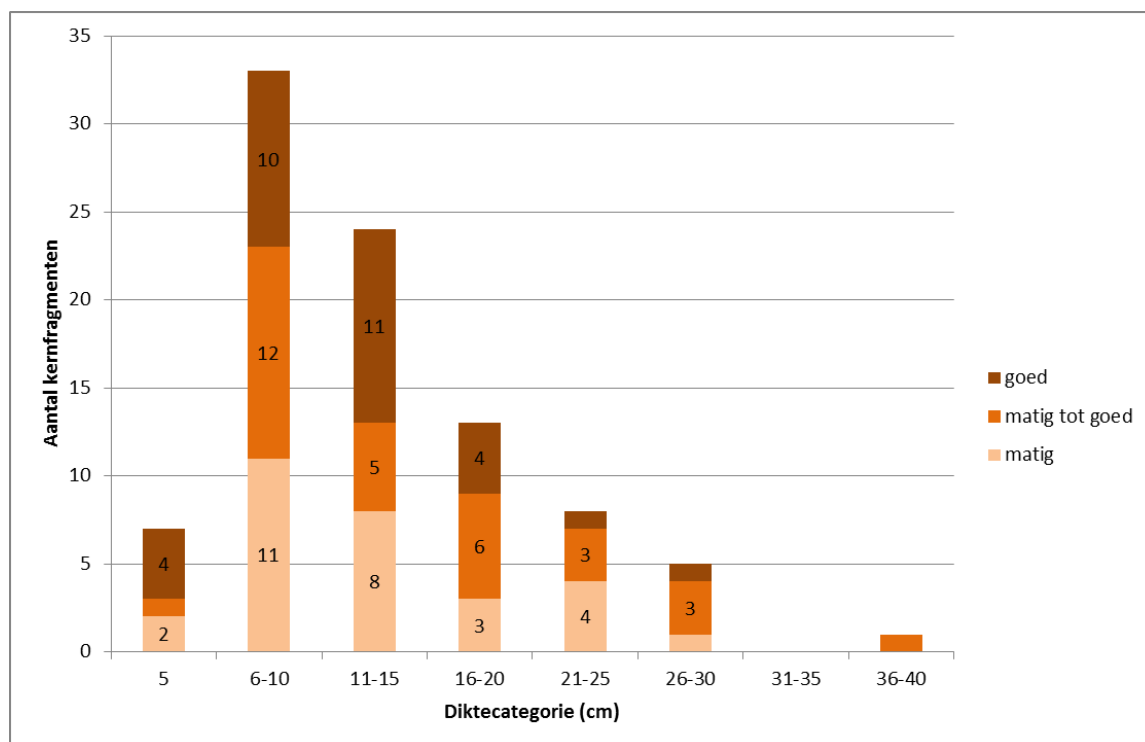
Figuur 50. Verdeling van het bruikbare materiaal volgens de dikte van de matig tot goed geconsolideerde fragmenten ijzerzandsteen zoals aangetroffen in de 15 kernen geboord op de Langenberg te Diest.

Tabel 6. Verdeling van het bruikbare materiaal op de Langenberg (Diest) afkomstig van de verschillende kernboringen op basis van de geschatte consolidatiegraad. De resultaten van de geluidssnelheidsmetingen zijn in de voorlaatste kolom weergegeven.

DIEST	Fragment	Dikte (cm)	Geluidssnelheid (m/s)	Consolidatiegraad
KERNBORING 1	0.08-0.22	14	2100-3000	goed
<b>cumulatieve dikte: 0.14 m / boordiepte: 0.40 m / bruikbaar materiaal: 35%</b>				
KERNBORING 2	<b>boordiepte: 0.40 m / bruikbaar materiaal: 0%</b>			
KERNBORING 3	0.05-0.20	15	1800-2500	goed
	0.30-0.47	17	1450-2500	matig tot goed
	0.54-0.60	5	1500-2000	matig
<b>cumulatieve dikte: 0.38 m / boordiepte: 0.70 m / bruikbaar materiaal: 54%</b>				
KERNBORING 4	0.03-0.17	14	1700-2300	matig tot goed
	0.25-0.54	29	1500-2250	matig tot goed
<b>cumulatieve dikte: 0.43 m / boordiepte: 0.70 m / bruikbaar materiaal: 61%</b>				
KERNBORING 5	0.02-0.10	8	1700-2000	matig
	0.13-0.36	23	1550-2950	matig tot goed
<b>cumulatieve dikte: 0.30 m / boordiepte: 0.90 m / bruikbaar materiaal: 33%</b>				
KERNBORING 6	0.06-0.17	11	2000-2600	goed
	0.22-0.39	17	1500-2300	matig
<b>cumulatieve dikte: 0.28 m / boordiepte: 0.50 m / bruikbaar materiaal: 56%</b>				
KERNBORING 7	0.24-0.32	8	1500-1650	matig
	0.36-0.45	9	1650-2050	matig
	0.67-0.80	13	1900-2600	matig tot goed
<b>cumulatieve dikte: 0.30 m / boordiepte: 1.00 m / bruikbaar materiaal: 30%</b>				
KERNBORING 8	0.04-0.11	7	1900-2200	matig tot goed
	0.39-0.53	14	1800-2200	matig tot goed
	0.60-0.71	11	1700-1750	matig
<b>cumulatieve dikte: 0.32 m / boordiepte: 1.20 m / bruikbaar materiaal: 27%</b>				
KERNBORING 9	0.24-0.52	23	1650-2200	matig
	0.58-0.80	22	1500-2300	matig
	0.84-0.94	10	1750-2100	matig
<b>cumulatieve dikte: 0.55 m / boordiepte 1.00 m / bruikbaar materiaal: 55%</b>				
KERNBORING 10	0.41-0.51	10	1850-2200	matig tot goed
	0.54-0.70	16	1750-2250	matig tot goed
	0.74-0.93	19	1800-2150	matig tot goed
<b>cumulatieve dikte: 0.45 m / boordiepte 1.15 m / bruikbaar materiaal: 39%</b>				
KERNBORING 11	0.02-0.41	39	1700-2750	matig tot goed
	0.44-0.70	26	1650-2200	matig
<b>cumulatieve dikte: 0.65 m / lengte boorkern 0.95 m / bruikbaar materiaal: 68%</b>				
KERNBORING 12	0.19-0.28	9	2450-2600	goed
	0.31-0.59	28	1550-2400	matig tot goed
<b>cumulatieve dikte: 0.37 m / boordiepte 1.20 m / bruikbaar materiaal: 31%</b>				
KERNBORING 13	0.02-0.08	6	1900-2500	matig tot goed
	0.11-0.28	17	1600-2850	matig tot goed
	0.34-0.43	14	1600-2100	matig
	0.59-0.69	10	1600-2800	matig tot goed
	0.72-0.81	9	2000-2500	goed
<b>cumulatieve dikte: 0.56 m / boordiepte 1.20 m / bruikbaar materiaal: 47%</b>				
KERNBORING 14	0.01-0.20	19	2000-2400	goed
	0.30-0.49	19	1500-2600	matig tot goed
	0.55-0.84	29	1500-2300	matig tot goed
<b>cumulatieve dikte: 0.67m / boordiepte 1.20 m / bruikbaar materiaal: 56%</b>				
KERNBORING 15	0.07-0.13	6	1500-1900	matig
	0.17-0.35	18	1700-2000	matig
	0.40-0.68	23	1650-2400	matig tot goed
	0.78-0.87	9	1750-2500	matig tot goed
<b>cumulatieve dikte: 0.56m / boordiepte 1.10 m / bruikbaar materiaal: 51%</b>				

## 7.6. Overzicht

Het op basis van de geschatte consolidatiegraad berekend aantal bruikbare blokken daalt duidelijk naarmate de dikte van de fragmenten toeneemt (Figuur 51). Hoewel uit dit onderzoek blijkt dat wel bruikbaar materiaal aanwezig is, hebben slechts 6 fragmenten op 91 (hetzij 6.6%) een dikte die overeenkomt met het voor historische gebouwen gebruikelijke formaat van 35 x 25 cm<sup>4</sup>. Dit aantal bedraagt 15.4% (14 fragmenten op 91), rekening houdend met een kleiner formaat met dikte van 20 cm.



*Figuur 51. Globale verdeling van het bruikbare materiaal. Synthese op basis van de 85 kernfragmenten, afkomstig van de 5 sites en waarvan de resultaten per site weergegeven werden in de Figuur 42 t/m Figuur 50, rekening houdend met de 6 losse fragmenten genomen bij de ontsluitingen vermeld in de Tabel 2 t/m Tabel 6.*

<sup>4</sup> Duser M., Dreesen R. en De Naeyer A., 2009. Renovatie & restauratie: Natuursteen in Vlaanderen, versteend verleden. Kluwer, 562 p.





**Onderzoeksproject VLA11-4.1**

**Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen**

**Bijlage IV  
Petrografische beschrijvingen per slijpplaatje**

D: 2012.11586

*Aanvrager:* Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON)

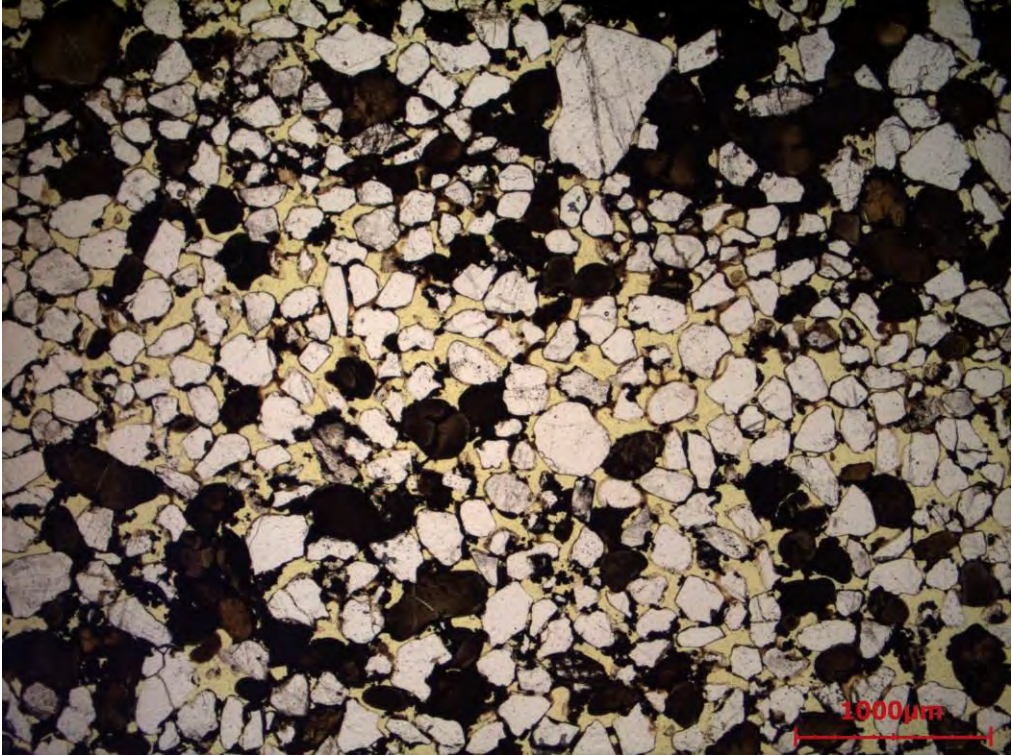
*Contactpersoon:* Mevr. Griet Verhaert

*Uitvoering:* Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK)  
Departement Labo, Cel Monumenten  
*Laurent Fontaine, Roald Hayen en Ingrid Nijs*

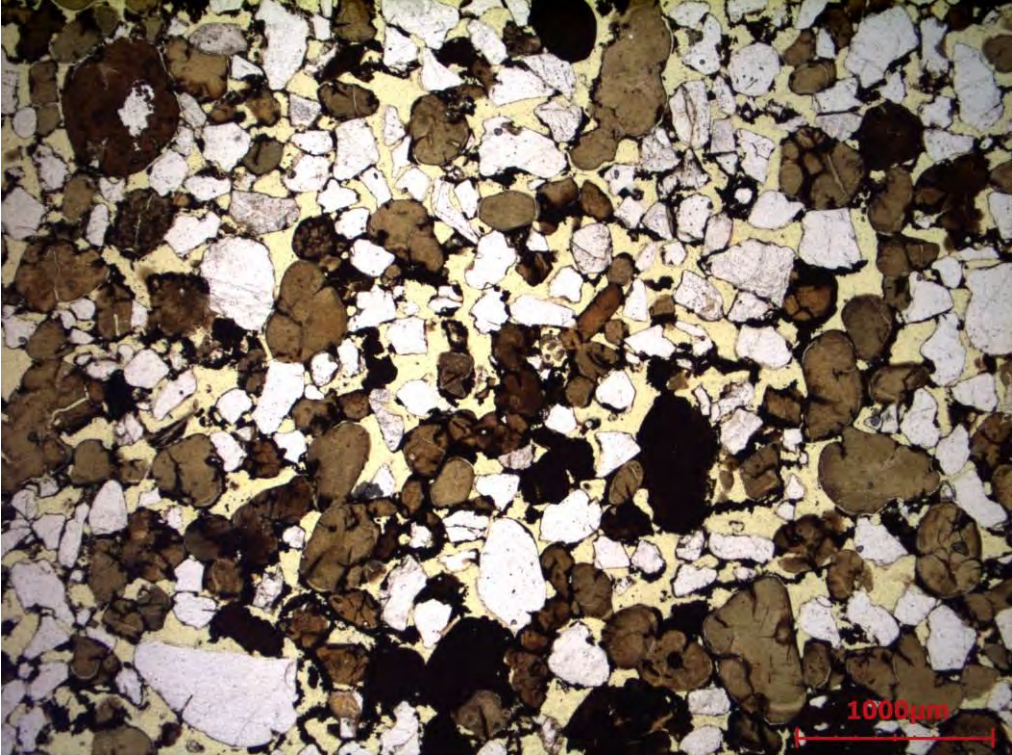
*Verslaggeving:* Laurent Fontaine (KIK) met wetenschappelijke review van Michiel Duser en Marleen De Ceukelaire (Belgische Geologische Dienst)

*Datum:* 30 september 2013

Herent (Roeselberg) Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C2/1


STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
H1/1A	2.84-2.88 m	I	1600 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		slecht
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	90%	μ-kristallijn
					helder	10%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 μm
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		slecht
					verdeling cement		zeer heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					- zandige zones - graafgang van zeeworm (Ø 1.5 mm) uitsluitend door kwartskorrels opgevuld		
Detailopname van het slijpplaatje X1136				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Herent (Roeselberg) Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C2/1

STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING				
H1/1B	3.14-3.18 m	I	750 m/s					
				ZAND	korrelgrootte	middelgrof		
					sorteringsgraad	matig		
					verhouding kwarts/glaucaniet	3:2		
					% groen / bruin / zwart glaucaniet	75 / 15 / 10		
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd	
					gehalte aan cement		< 5%	
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>	
					donker	95%	µ-kristallijn	
					helder	5%	films	
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 µm	
					schijnbare connectiviteit		zeer goed	
					macroporositeit		> 25%	
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glaucaniet		goed	
					verdeling cement		heterogeen	
					<i>andere waarnemingen</i>			
- zandige zones - glaucanietkorrel met zeer fijne kwartsinclusies								
Detailopname van het slijpplaatje X1137				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>				

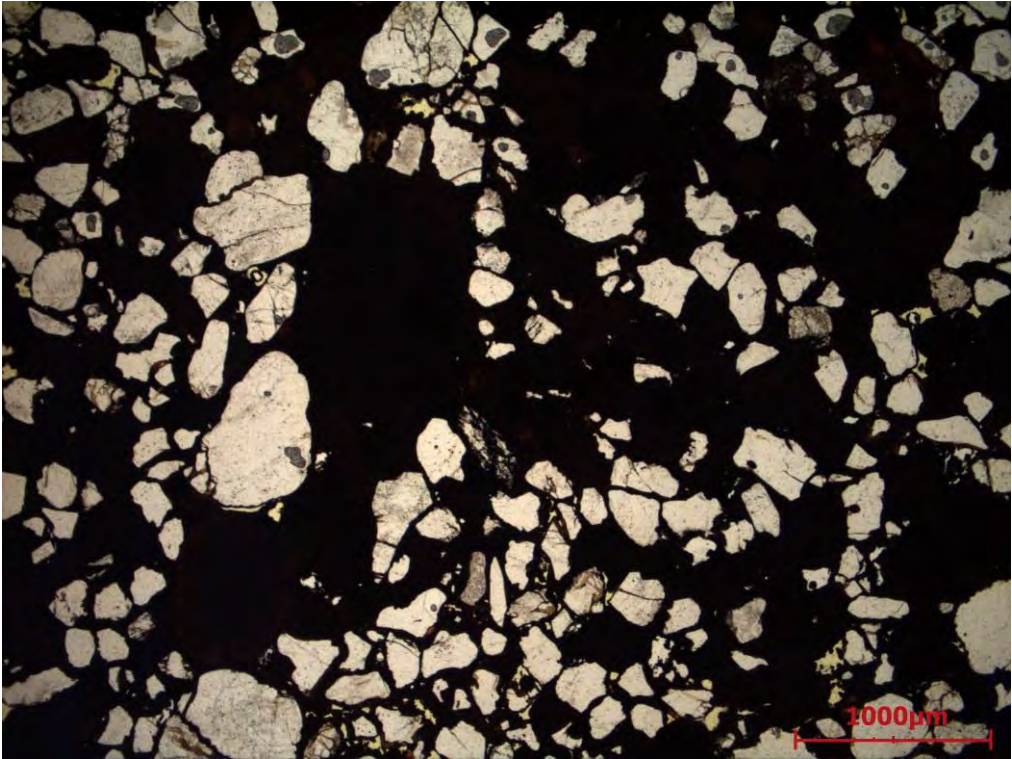


Herent (Roeselberg) Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C3/2

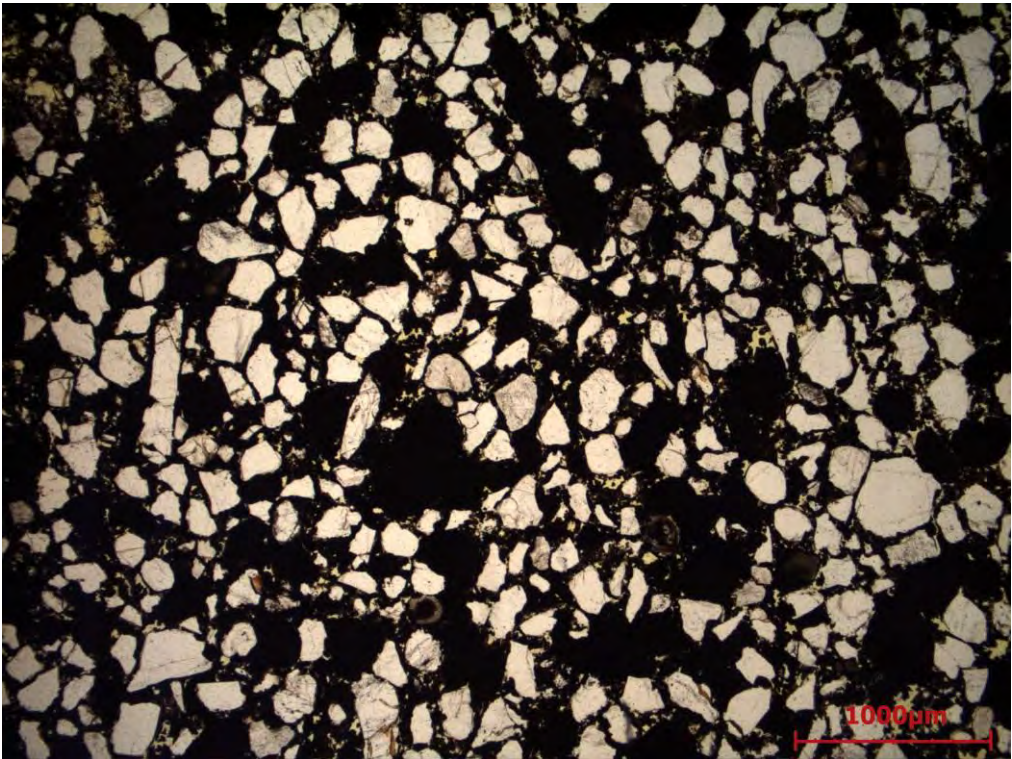
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
H1/2A	4.79-4.83 m	I	1500 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	μ-kristallijn
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 μm
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		gemiddeld
					verdeling cement		zeer heterogeen
<i>andere waarnemingen</i>							
- zandige zones							
Detailopname van het slijpplaatje X1138				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Herent (Roeselberg) Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C3/2

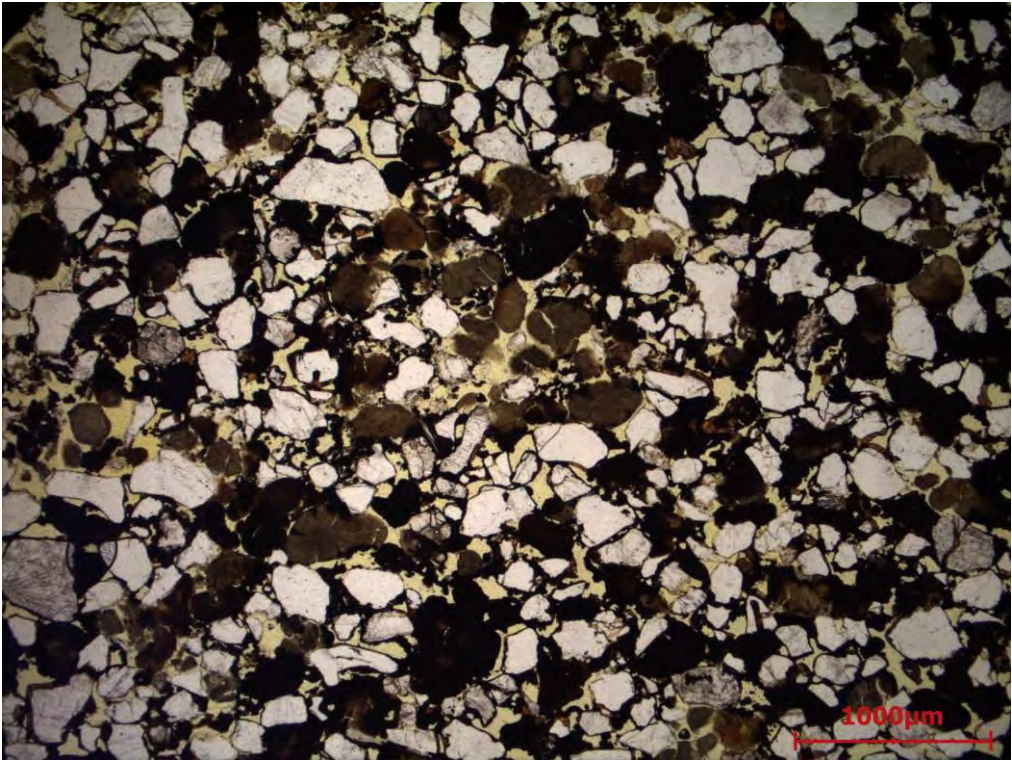
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
H1/3A	5.39-5.42 m	I	2500 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 50 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		15-20%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	100%	75% korsten 25% μ-kristallijn
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 μm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		5%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		zeer heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					- doorlopende microscheur over het hele slijpplaatje - toermalijnkorrel		
Detailopname van het slijpplaatje X1139				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Herent (Roeselberg) Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C5/1

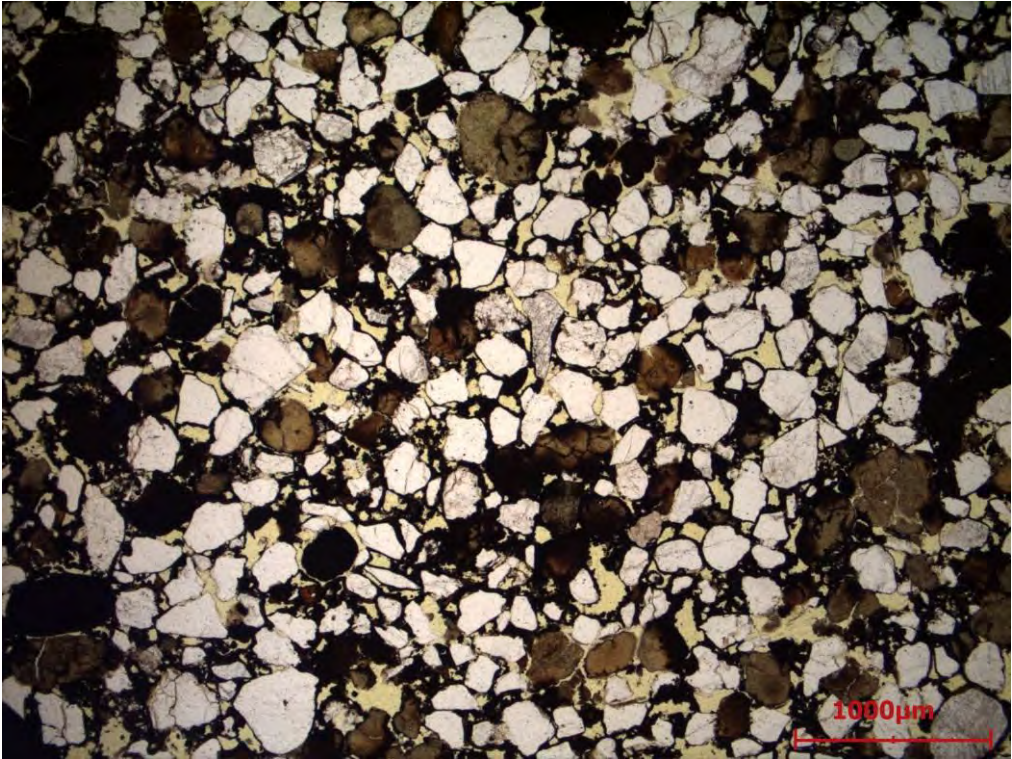
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
H1/4A	7.18-7.22 m	I	2200 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		5 / 5 / 90
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		15-20%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	75% kristallieten 25% dicht
					helder	25%	50% films 50% kristallieten
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		slecht
					macroporositeit		5%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					geen		
Detailopname van het slijpplaatje X1148				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Herent (Roeselberg) Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C5/2

STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING					
H1/5A	8.06-8.07	I	ca. 2000 m/s						
				ZAND	korrelgrootte	middelgrof			
					sorteringsgraad	goed			
					verhouding kwarts/glauconiet	3:2			
					% groen / bruin / zwart glauconiet	50 / 25 / 25			
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu		
					gehalte aan cement		5-10%		
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>		
					donker	75%	μ-kristallijn		
					helder	25%	films		
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 μm		
					schijnbare connectiviteit		goed		
					macroporositeit		20-25%		
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed		
					verdeling cement		homogeen		
					<i>andere waarnemingen</i>				
					- langdoorsnede in een graafgang van zeeworm (Ø 3 mm) uitsluitend met kwartskorrels opgevuld - afgeronde kwartskorrel (Ø 1 mm) - veldspaatkorrel verweerd langs splijtingsvlakken				
				Detailopname van het slijpplaatje X1149				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>	

Herent (Roeselberg) Kernboring VLA10-4.1-B1 (089E/0742 H1), kern C5/2

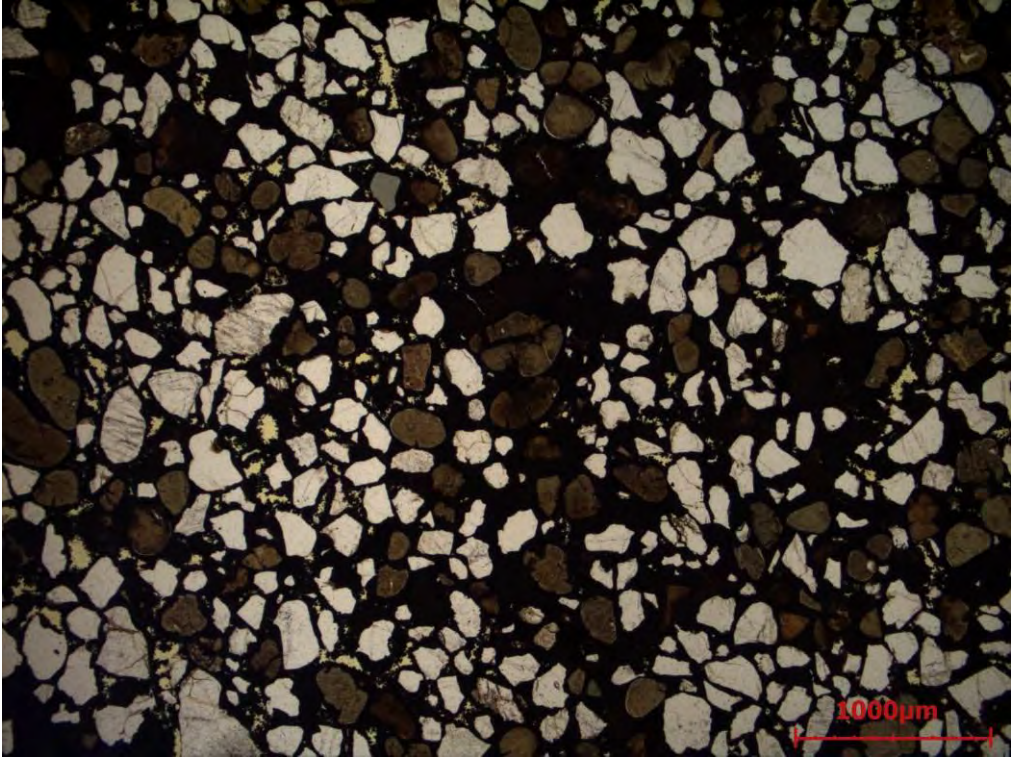
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
H1/6A	8.29-8.34 m	I	1500 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	μ-kristallijn
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 μm
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		gemiddeld
					verdeling cement		heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- zandige zones - enkele afgeronde kwartskorrels (Ø 2 mm)							
Detailopname van het slijpplaatje X1150				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Herent (Roeselberg) Los fragment nr. 8

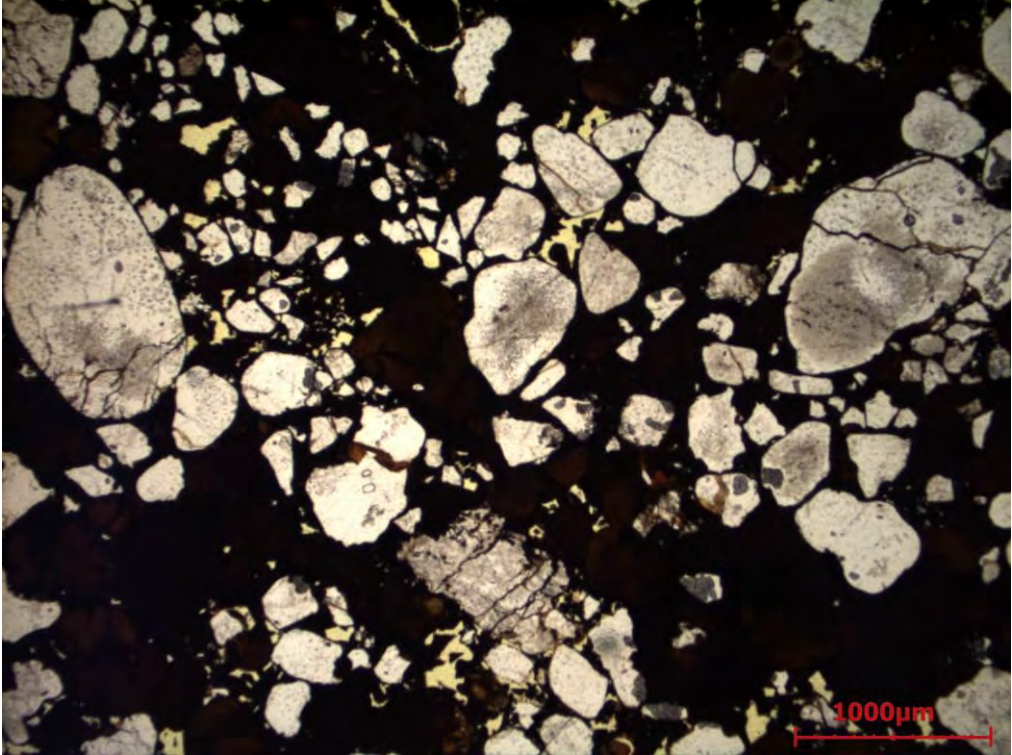
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
H/F8A	ontsluiting	II	2200 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		slecht
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	90%	µ-kristallijn
					helder	10%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		slecht
					verdeling cement		zeer heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- zones met bijna uitsluitend zeer fijne kwartskorrels (vermoedelijk bioturbaties) - zandige zones							
<i>Detailopname van het slijpplaatje X1140</i>				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Herent (Roeselberg) Los fragment nr. 9

STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
H/F9A	ontsluiting	I	2500 m/s				
				ZAND	korrelgrootte	fijn	
					sorteringsgraad	goed	
					verhouding kwarts/glauconiet	3:2	
					% groen / bruin / zwart glauconiet	75 / 15 / 10	
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		15-20%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	100%	50% kristallieten 50% dicht
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		slecht
					macroporositeit		5%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					geen		
				<p><i>Detailopname van het slijpplaatje X1172</i></p>			



Herent (Roeselberg), Los fragment nr. 10

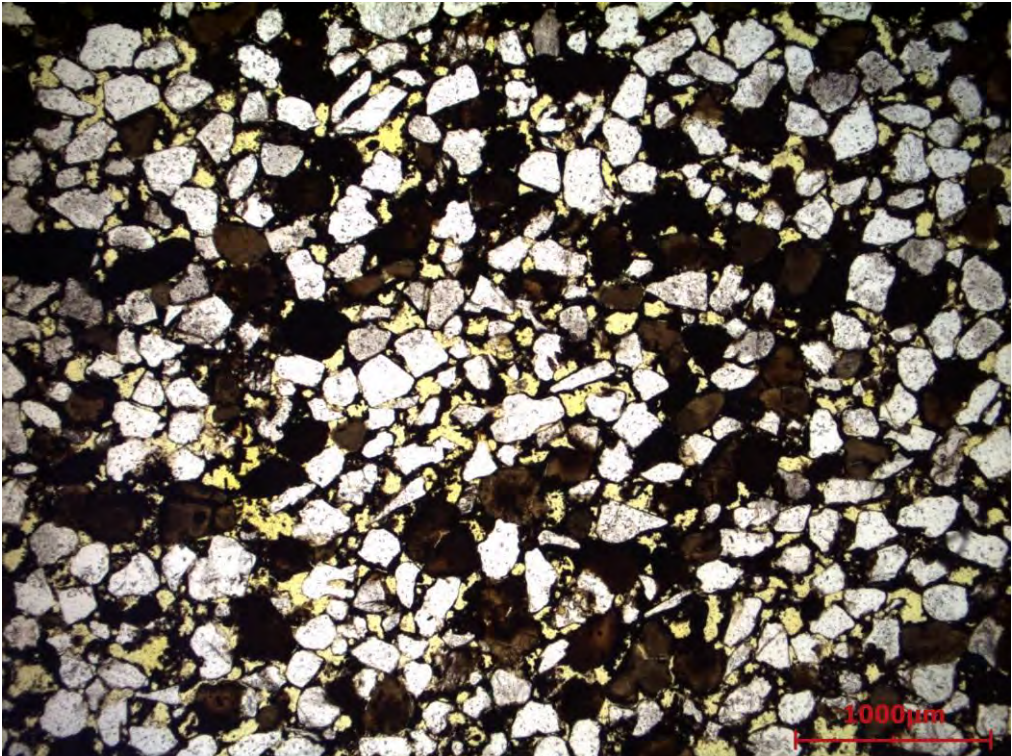
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
H/F10A	ontsluiting	I	2000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		grof
					sorteringsgraad		slecht
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 25 / 50
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		15-20%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	95%	50% kristallieten 50% dicht
					helder	5%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		slecht
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		gemiddeld
					verdeling cement		heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- enkele afgeronde kwartskorrels (Ø 2 mm) - twee microscheuren							
Detailopname van het slijpplaatje X1141				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Pellenberg (Gasthuisbos) Kernboring VLA-4.1-B2 (090W/1272 P1), kern C2/2

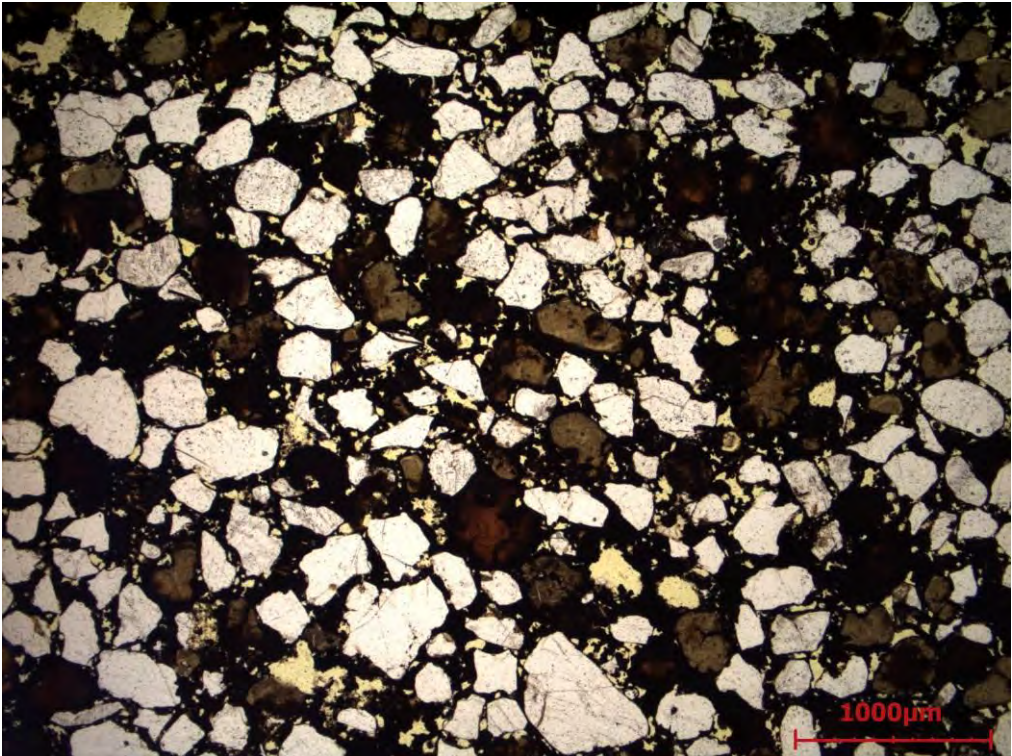
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
P1/1A	3.30-3.34 m	II	1000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte	middelgrof	
					sorteringsgraad	matig	
					verhouding kwarts/glauconiet	3:2	
					% groen / bruin / zwart glauconiet	50 / 40 / 10	
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	90%	kristallieten
				helder	10%	films	
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		heterogeen
<i>andere waarnemingen</i>							
- mm-schaal zones met uitsluitend fijne kwartskorrels (vermoedelijk bioturbaties)							
Detailopname van het slijpplaatje X1142				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Pellenberg (Gasthuisbos) Kernboring VLA-4.1-B2 (090W/1272 P1), kern C6/1

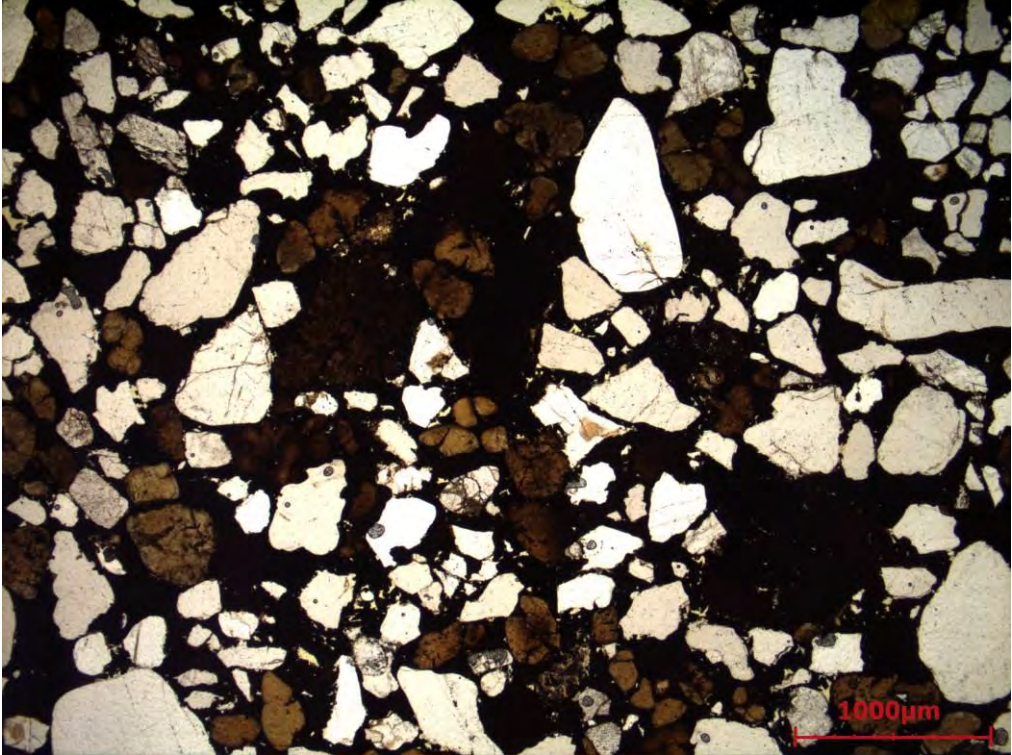
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
P1/3A	8.64-8.66 m	I-II	1000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		fijn
					sorteringsgraad		zeer goed
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	90%	μ-kristallijn
					helder	10%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 μm
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
<i>andere waarnemingen</i>							
geen							
Detailopname van het slijpplaatje X1143				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Pellenberg (Gasthuisbos) Kernboring VLA-4.1-B2 (090W/1272 P1), kern C6/1

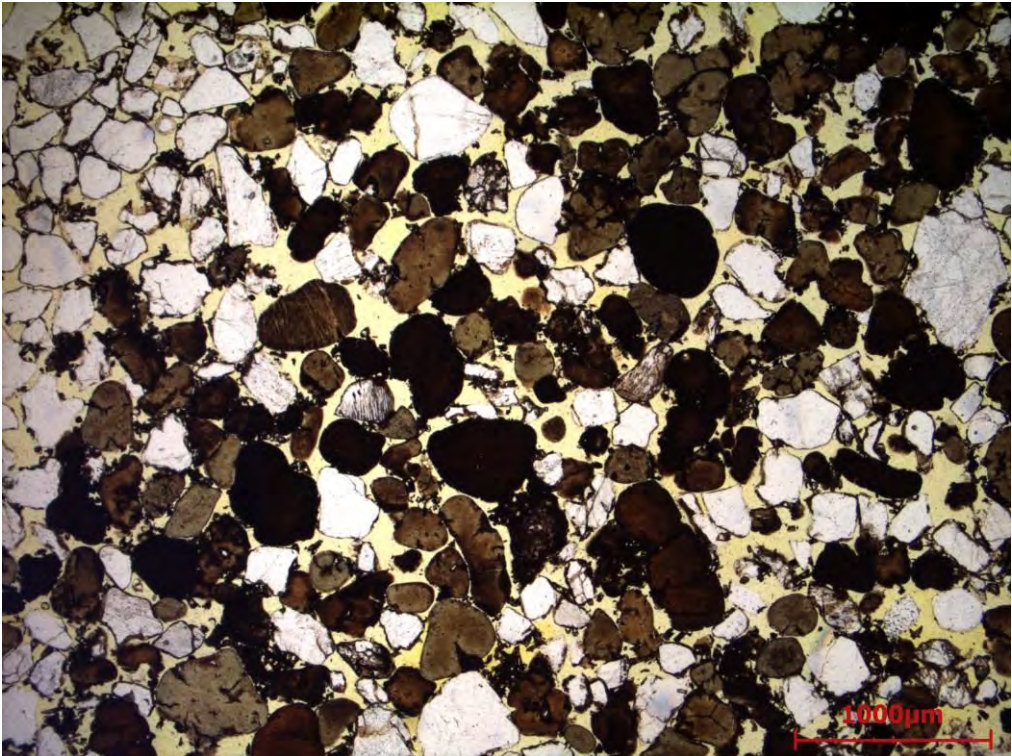
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
P1/6A	9.21-9.23 m	II	1000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte	middelgrof	
					sorteringsgraad	goed	
					verhouding kwarts/glauconiet	3:1	
					% groen / bruin / zwart glauconiet	50 / 25 / 25	
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		10-15%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	95%	kristallieten
				helder	5%	films	
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		zeer homogeen
<i>andere waarnemingen</i>							
- kwartskorrel (Ø 1.5 mm)							
Detailopname van het slijpplaatje X1144				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Pellenberg (Gasthuisbos) Kernboring VLA-4.1-B2 (090W/1272 P1), kern C8/1

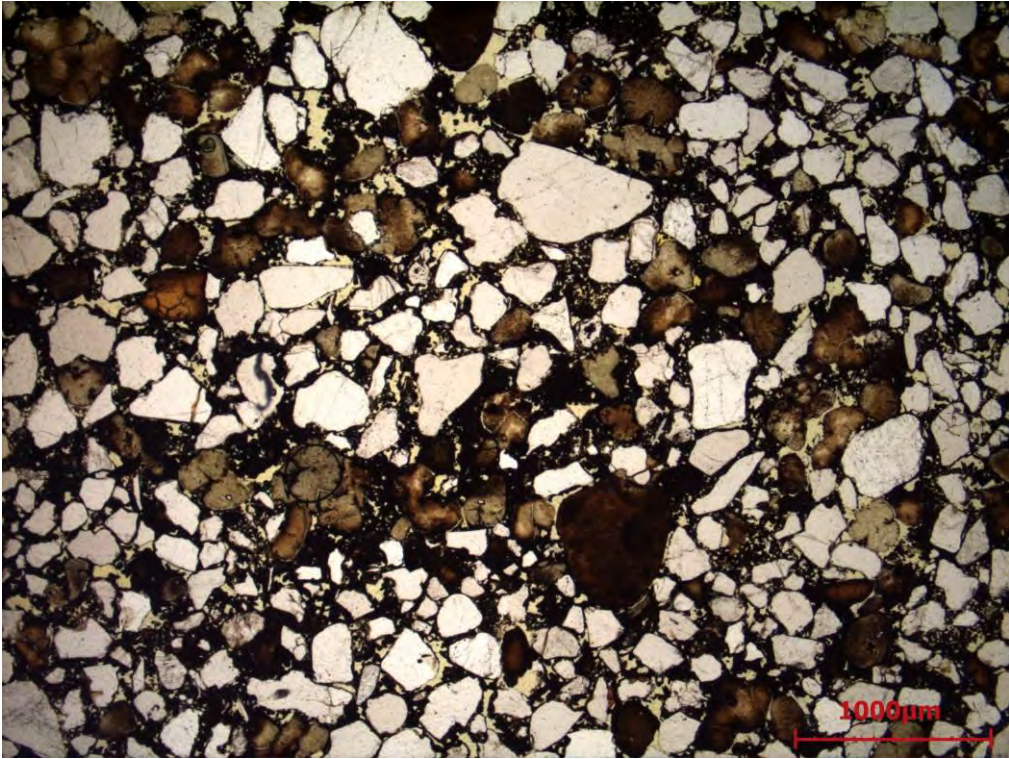
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING				
P1/7A	11.59-11.63 m	I	2000 m/s					
				ZAND	korrelgrootte	grof		
					sorteringsgraad	slecht		
					verhouding kwarts/glauconiet	3:2		
					% groen / bruin / zwart glauconiet	25 / 25 / 50		
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu	
					gehalte aan cement		15-20%	
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>	
					donker	100%	50% kristallieten 50% dicht	
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm	
					schijnbare connectiviteit		slecht	
					macroporositeit		5%	
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed	
					verdeling cement		homogeen	
					<i>andere waarnemingen</i>			
				geen				
Detailopname van het slijpplaatje X1151				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>				

Pellenberg (Gasthuisbos) Kernboring VLA-4.1-B3 (090W/1273 P3), kern C5/1

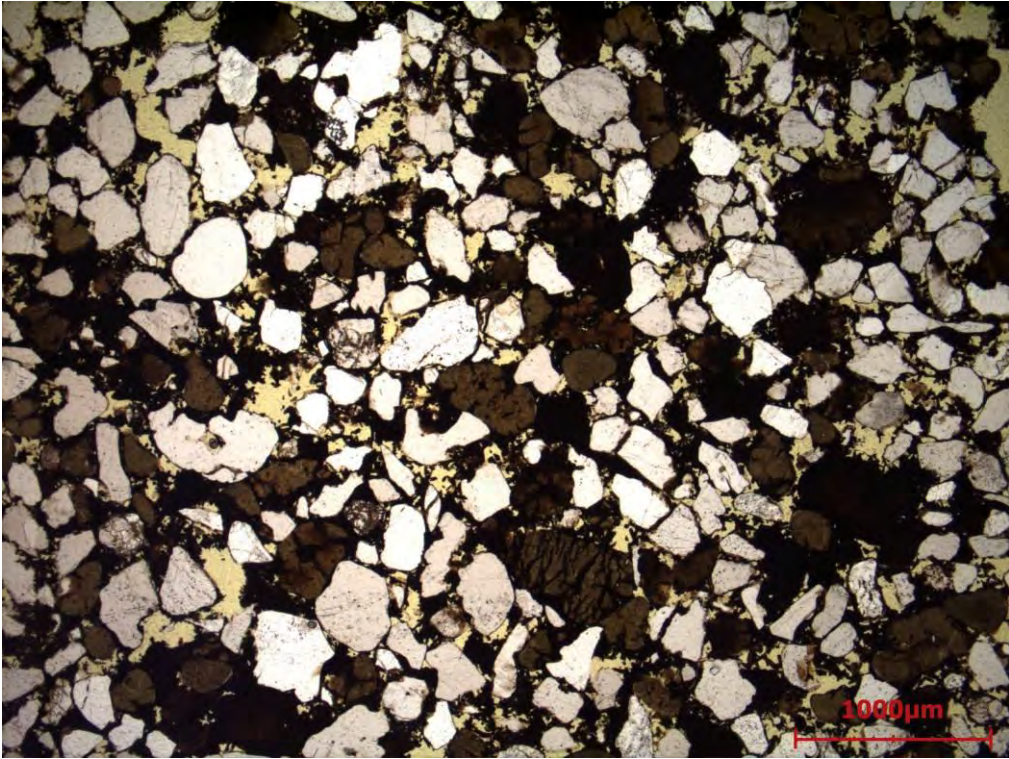
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
P2/2A	7.39-7.41 m	II	500 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		< 5%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	50%	kristallieten
					helder	50%	50% films 50% kristallieten
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 μm
					schijnbare connectiviteit		zeer goed
					macroporositeit		> 25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		slecht
					verdeling cement		zeer homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- talrijke mm-schaal graafgangen van zeewormen bijna uitsluitend met kwartskorrels opgevuld en langsdoorsnede (Ø 5 mm) over het hele slijpplaatje							
Detailopname van het slijpplaatje X1145				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Pellenberg (Gasthuisbos) Kernboring VLA-4.1-B3 (090W/1273 P3), kern C5/1

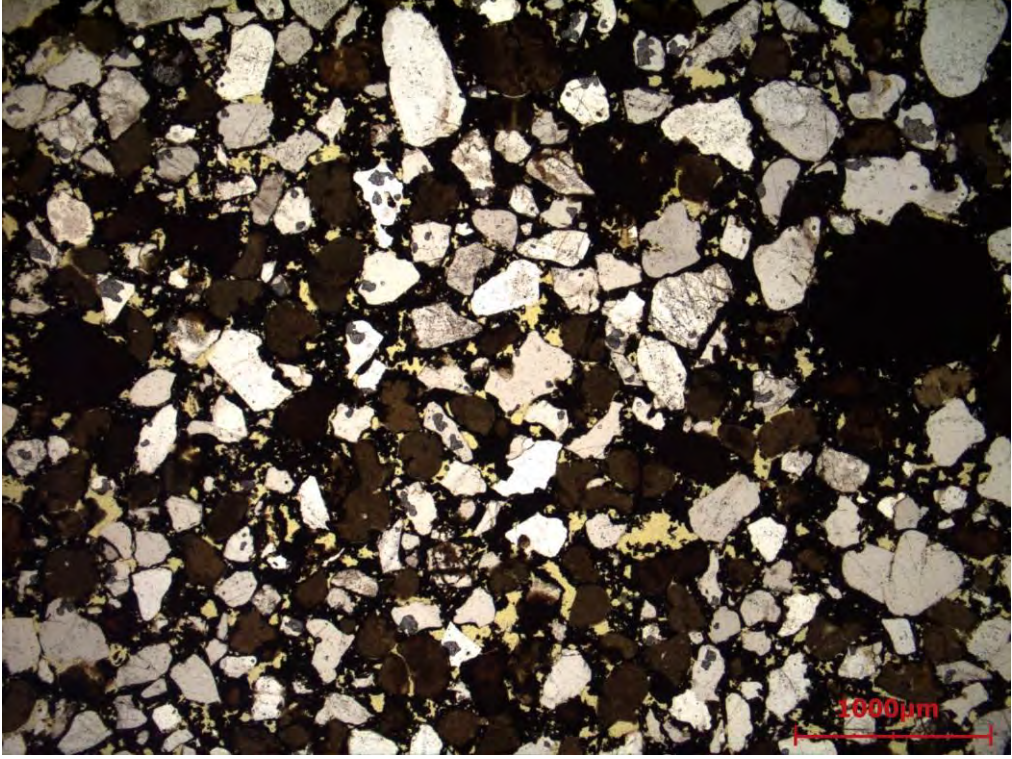
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
P2/2B	7.16-7.20 m	II	2000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 50 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		10-15%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	90%	kristallieten
				helder	10%	50% films 50% kristallieten	
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		zeer homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- vuursteenfragment (Ø 2.5 mm), sterk aangetast langs de randen, waarin verkiezelde skeletten van kleine foraminiferen herkenbaar zijn							
Detailopname van het slijpplaatje X1152				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Pellenberg (Gasthuisbos) Kernboring VLA-4.1-B3 (090W/1273 P3), kern C5/2

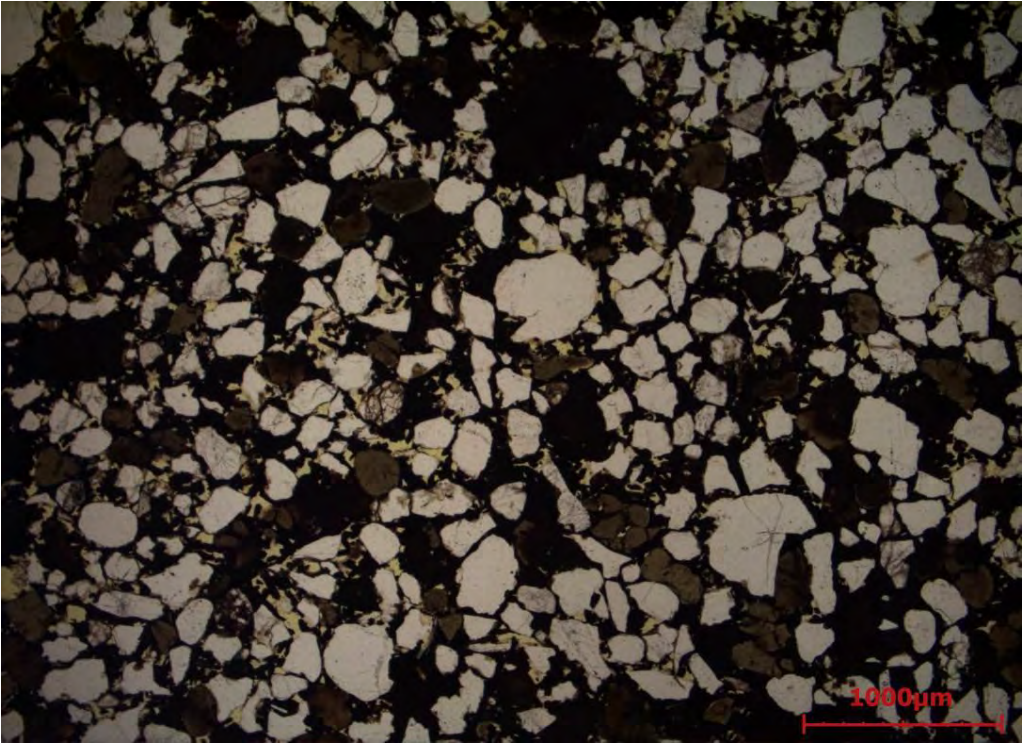
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
P2/3A	7.92-7.95 m	II	1000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	kristallieten
				PORIËN	helder		75% kristallieten 25% films
					meeste macroporiën		> 100 µm
					schijnbare connectiviteit		goed
				HOMOGENITEIT	macroporositeit		20-25%
					spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
<i>andere waarnemingen</i>							
				- kwartskorrel (Ø 1.5 mm)			
Detailopname van het slijpplaatje X1153				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Pellenberg (Gasthuisbos) Kernboring VLA-4.1-B3 (090W/1273 P3), kern C5/2

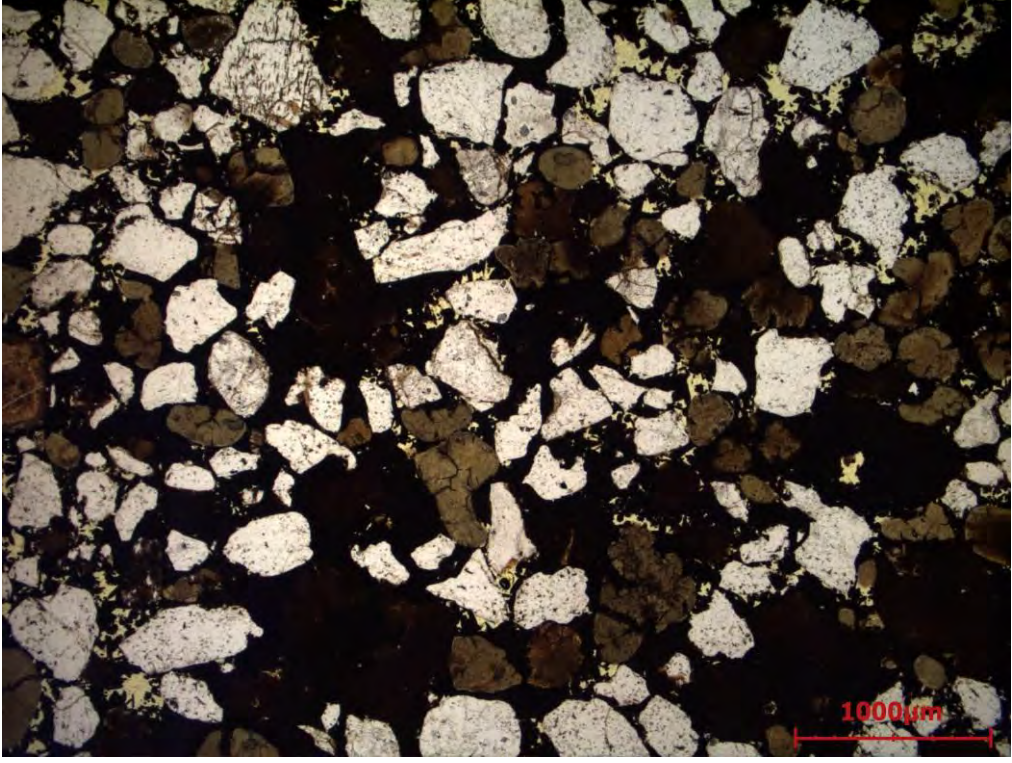
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
P2/3B	8.08-8.10	I	1000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	kristallieten
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		zeer heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					- twee goed afgeronde kwartskorrels (Ø 1.5 mm) - vuursteenfragment (Ø 2 mm) waarin verkieselde skeletten van kleine foraminiferen herkenbaar zijn		
Detailopname van het slijpplaatje X1154				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Pellenberg (Gasthuisbos) Los fragment nr. 3


STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
P/F3A	ontsluiting	I-II	1600 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart / glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan limonietcement		10-15%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	100%	80% kristallieten 20% dicht
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		5-10%
				HOMOGENITEIT	verdeling kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
			geen				
Detailopname van het slijpplaatje X1174				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Pellenberg (Gasthuisbos) Los fragment nr. 4


STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
P/F4A	ontsluiting	I	2300 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		15-20%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	100%	75% kristallieten 25% dicht
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		slecht
					macroporositeit		5%
				HOMOGENITEIT	verdeling kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		zeer homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					geen		
Detailopname van het slijpplaatje X1175				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Wezemaal (Beninksberg) Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1), kern C3/1

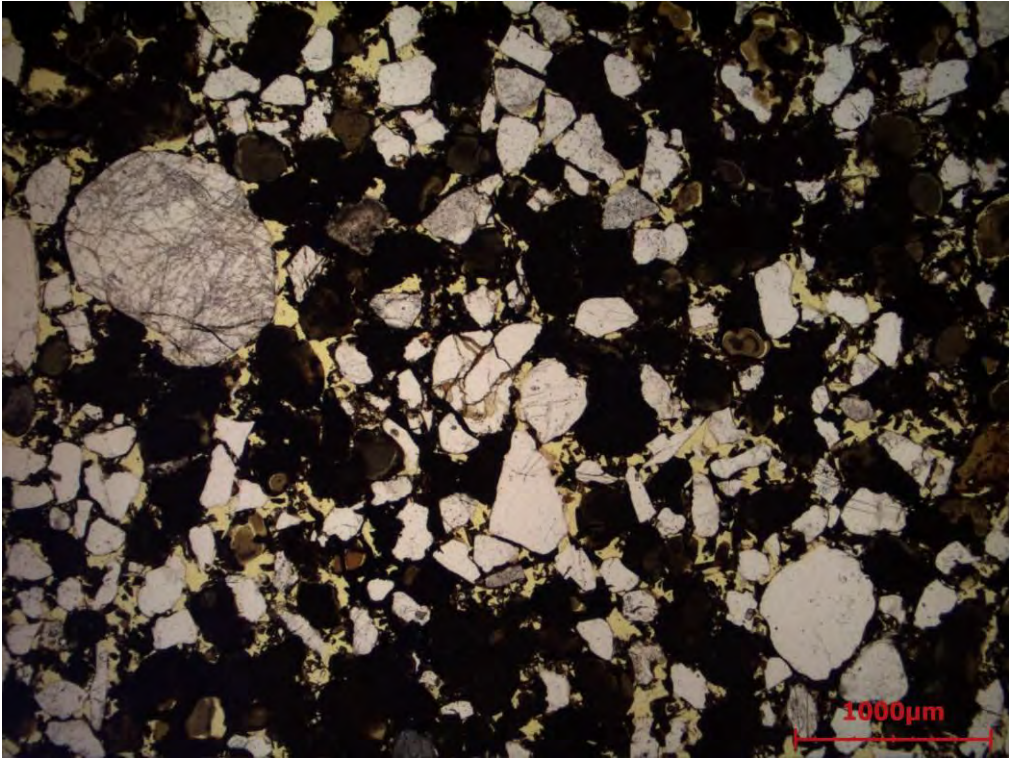
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
W1/2A	4.27-4.31 m	I	ca. 1250 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		fijn
					sorteringsgraad		zeer goed
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		75 / 15 / 10
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	kristallieten
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 µm
					schijnbare connectiviteit		zeer goed
					macroporositeit		> 25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		zeer homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
geen							
Detailopname van het slijpplaatje X1155				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Wezemaal (Beninksberg) Kernboring VLA10-4.1-B4 (075W/0386 W1), kern C4/1

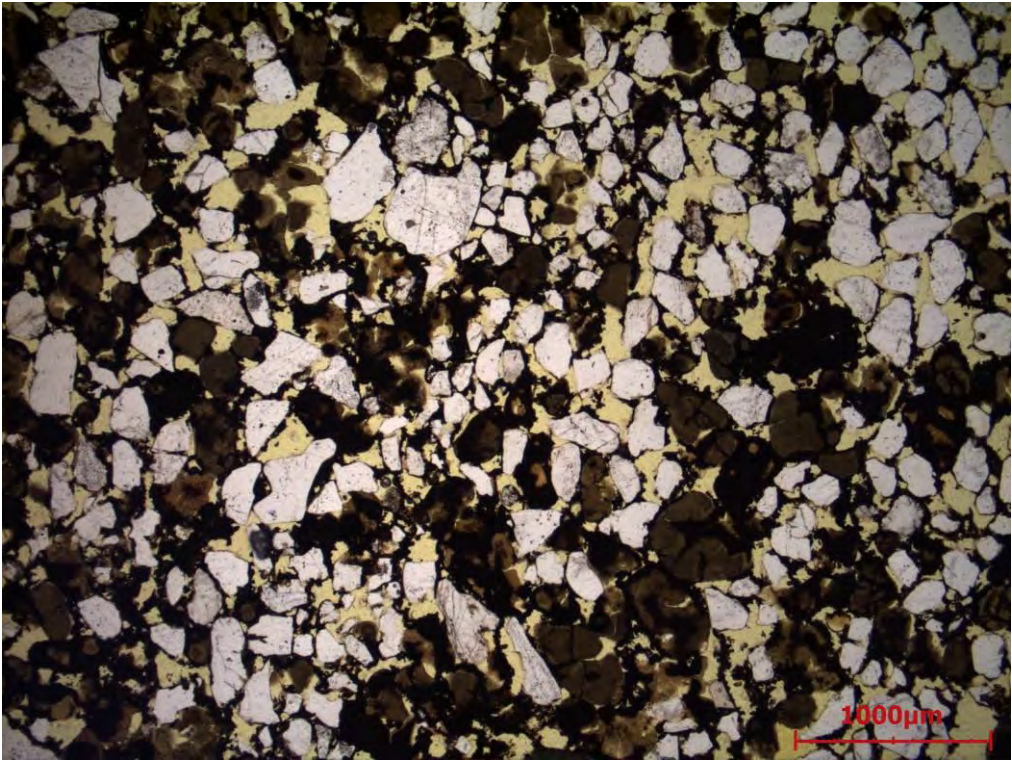
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
W1/3A	5.71-5.75 m	I-II	ca. 2000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte	fijn	
					sorteringsgraad	goed	
					verhouding kwarts/glauconiet	1:1	
					% groen / bruin / zwart glauconiet	25 / 10 / 65	
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		10-15%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	75% dicht 25% kristallieten
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		zeer heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- zandige zones							
Detailopname van het slijpplaatje X1156				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Wezemaal (Beninksberg) Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2), kern C3/1

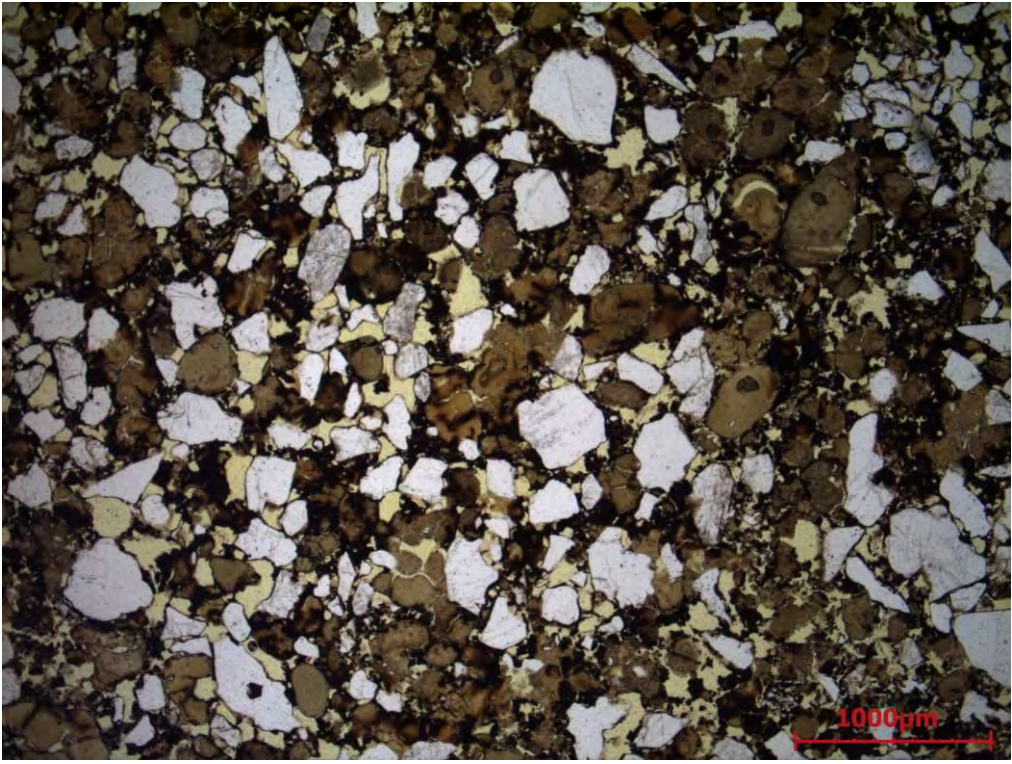
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
W2/1A	3.20-3.26 m	I	2500 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 25 / 50
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		10-15%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	kristallieten
					helder	25%	50% films 50% kristallieten
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	verdeling kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					geen		
Detailopname van het slijpplaatje X1157				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Wezemaal (Beninksberg) Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2), kern C3/2

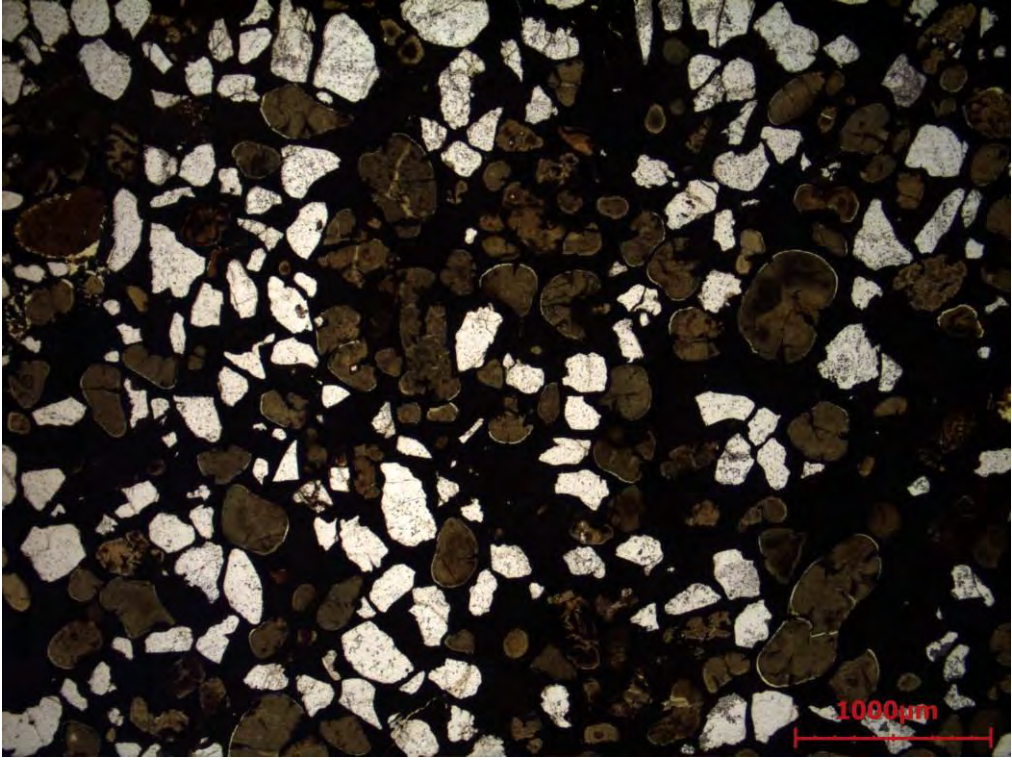
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
W2/3A	3.90-3.95 m	II	1600 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		fijn
					sorteringsgraad		zeer goed
					verhouding kwarts/glauconiet		3:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 10 / 65
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	μ-kristallijn
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 μm
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- graafgang van zeeworm (Ø 1 mm) uitsluitend met kwartskorrels opgevuld - kwartskorrel (Ø 2.5 mm)							
Detailopname van het slijpplaatje X1158				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Wezemaal (Beninksberg) Kernboring VLA10-4.1-B5 (075W/0387 W2), kern C6/1

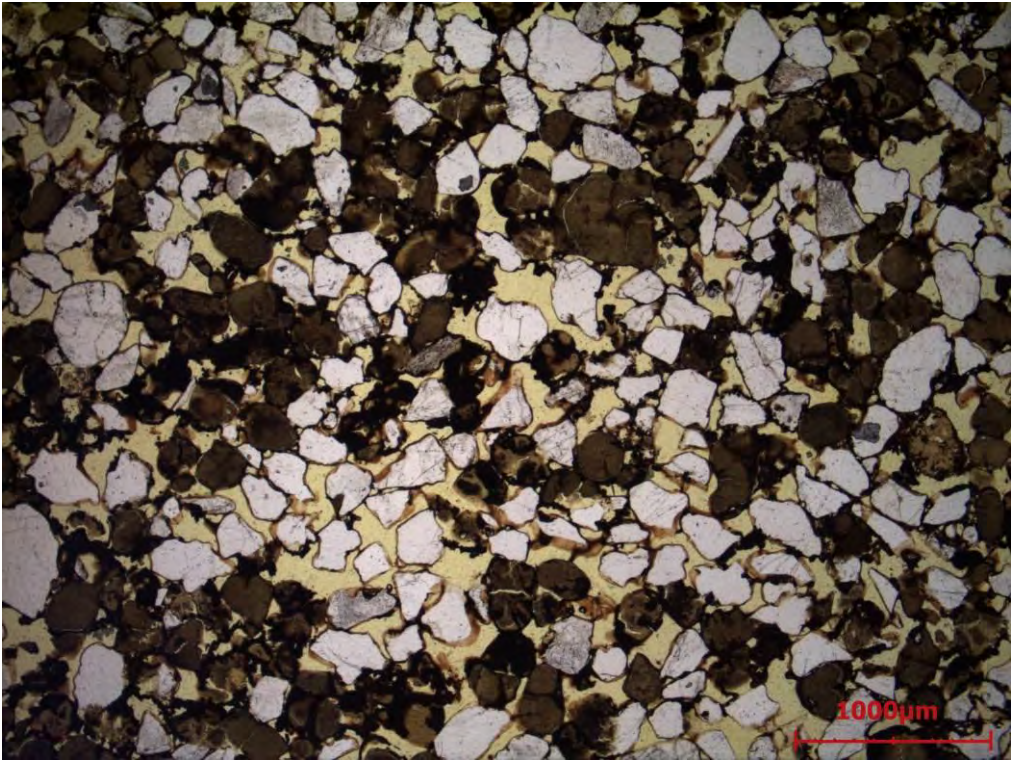
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
W2/4A	7.78-7.82 m	II	ca. 1250 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		75 / 15 / 10
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	µ-kristallijn
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 µm
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- goed afgeronde kwartskorrel (Ø 1mm)							
Detailopname van het slijpplaatje X1159				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Wezemaal (Beninksberg) Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3), kern C2/1

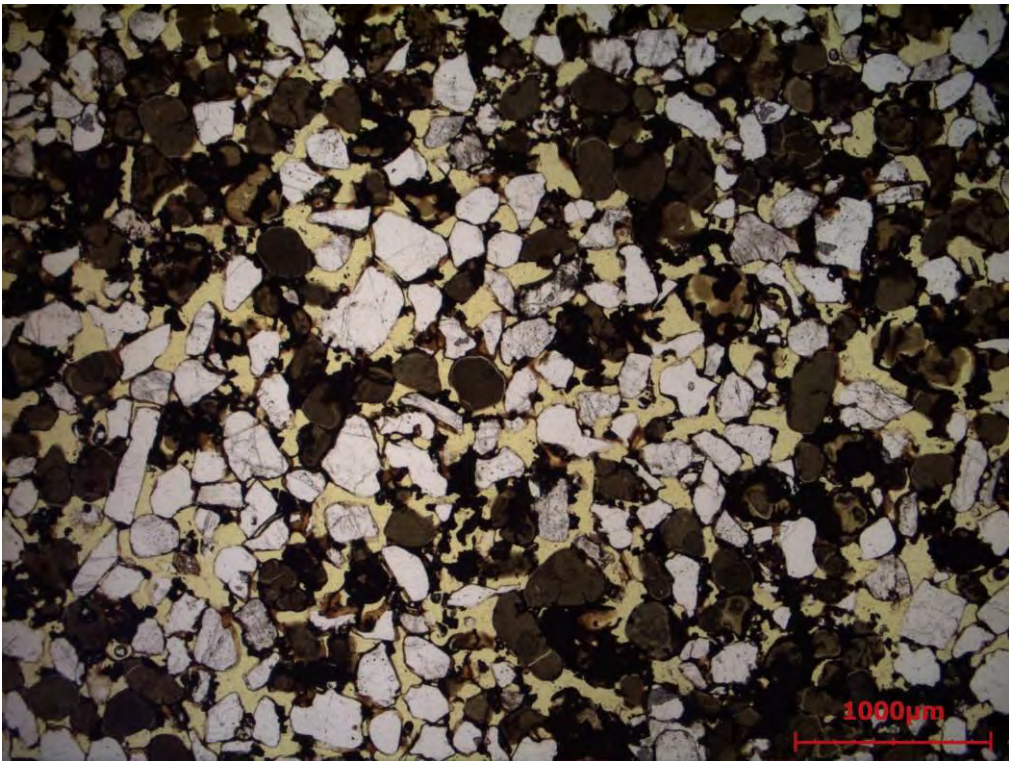
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
W3/1A	2.45-2.47 m	I	2400 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		75 / 15 / 10
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		15-20%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	100%	80% dicht 20% kristallieten
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		slecht
					macroporositeit		< 5%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		zeer homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
							- glauconietkorrel (Ø 0.6 mm) vol fijne kwartsinclusies
Detailopname van het slijpplaatje X1160				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Wezemaal (Beninksberg) Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3), kern C3/1

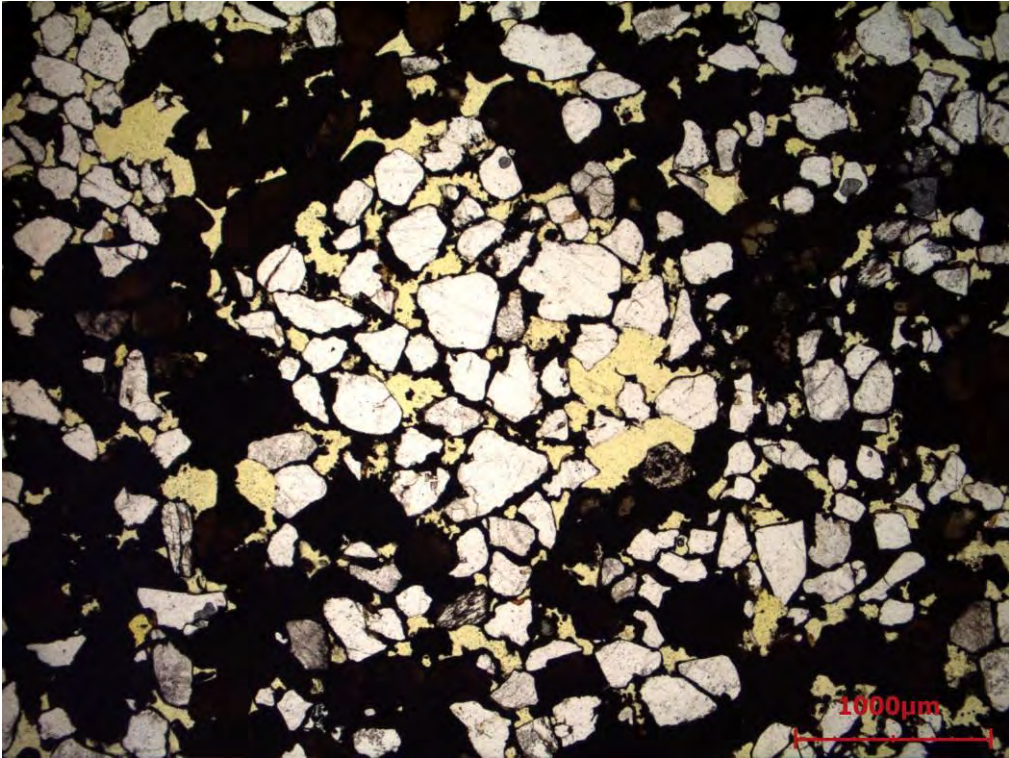
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
W3/4A	3.75-3.76 m	II	1500 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		zeer goed
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		75 / 15 / 10
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	50%	μ-kristallijn
					helder	50%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 μm
					schijnbare connectiviteit		zeer goed
					macroporositeit		> 25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		zeer homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					geen		
Detailopname van het slijpplaatje X1161				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Wezemaal (Beninksberg) Kernboring VLA10-4.1-B6 (075W/0388 W3), kern C3/2

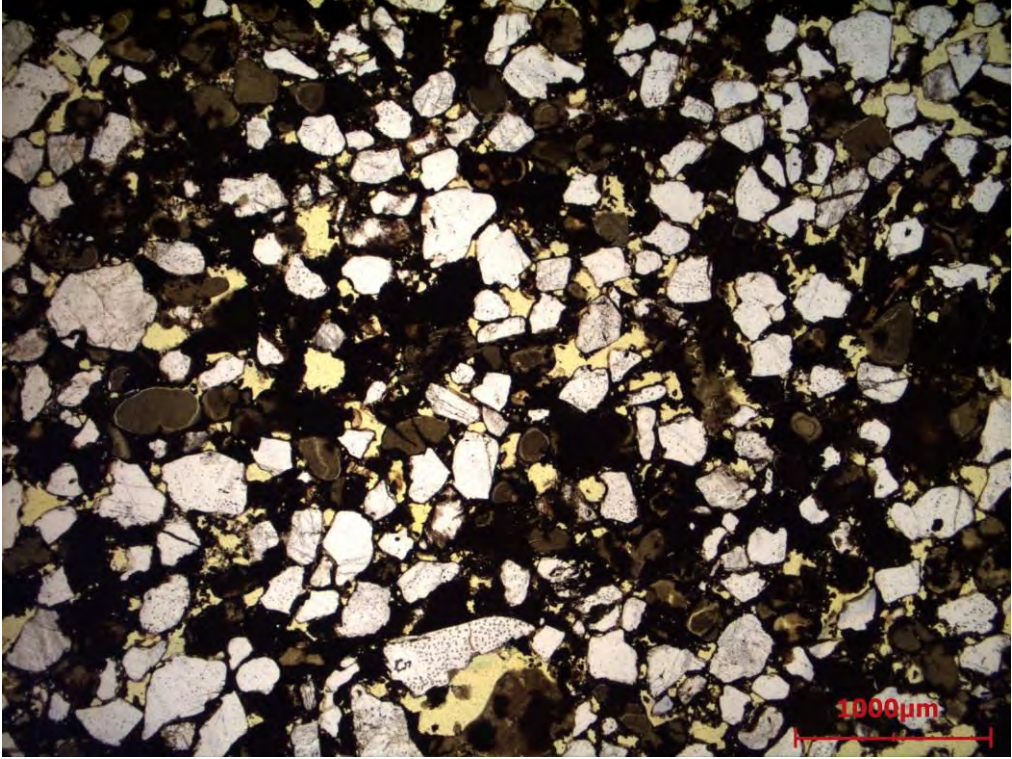
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
W3/7A	4.84-4.90 m	II	1500 m/s				
				ZAND	korrelgrootte	middelgrof	
					sorteringsgraad	goed	
					verhouding kwarts/glauconiet	3:2	
					% groen / bruin / zwart glauconiet	75 / 15 / 10	
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	kristallieten
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 µm
					schijnbare connectiviteit		zeer goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	verdeling kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
geen							
Detailopname van het slijpplaatje X1162				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Wezemaal (Beninksberg) Los fragment nr. 1

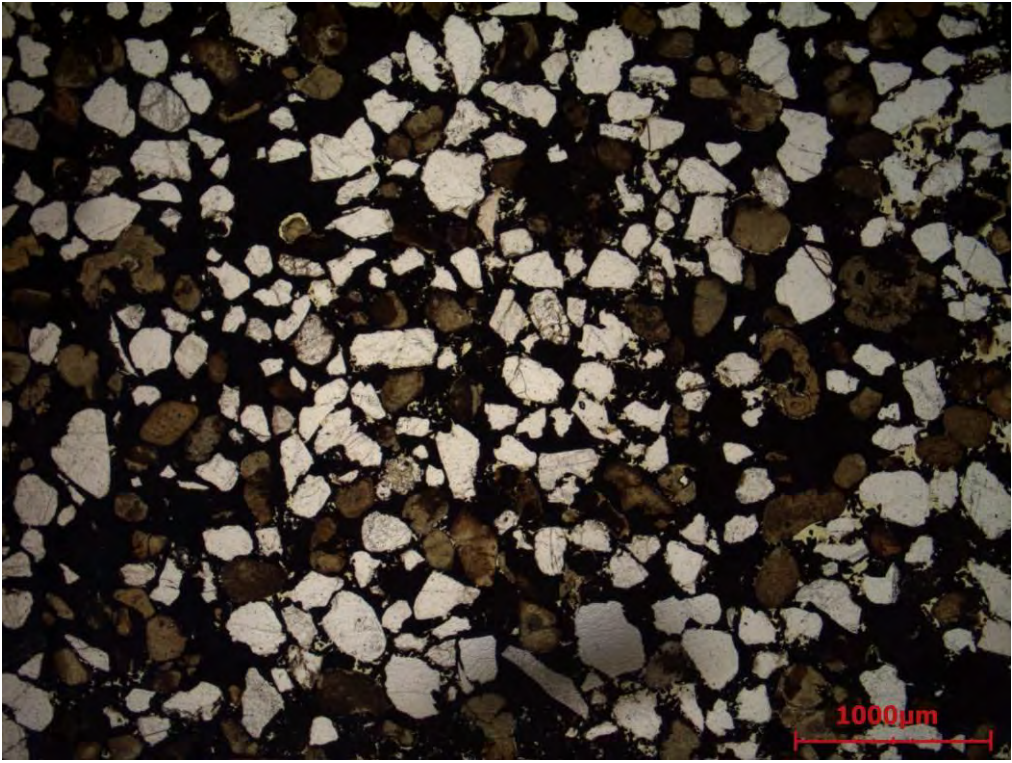
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
W/F1A	ontsluiting	I	<i>te klein fragment</i>				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 25 / 50
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		10-15%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	90%	80% $\mu$ -kristallijn 20% dicht
					helder	10%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		$\pm 100 \mu\text{m}$
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		slecht
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere opmerkingen</i>		
					- minstens 15 goed herkenbare graafgangen van zeewormen ( $\varnothing 3 \text{ mm}$ ) bijna uitsluitend met kwartskorrels opgevuld - zandige zone		
				Detailopname van het slijpplaatje X1146			



Wezemaal (Beninksberg) Los fragment nr. 2

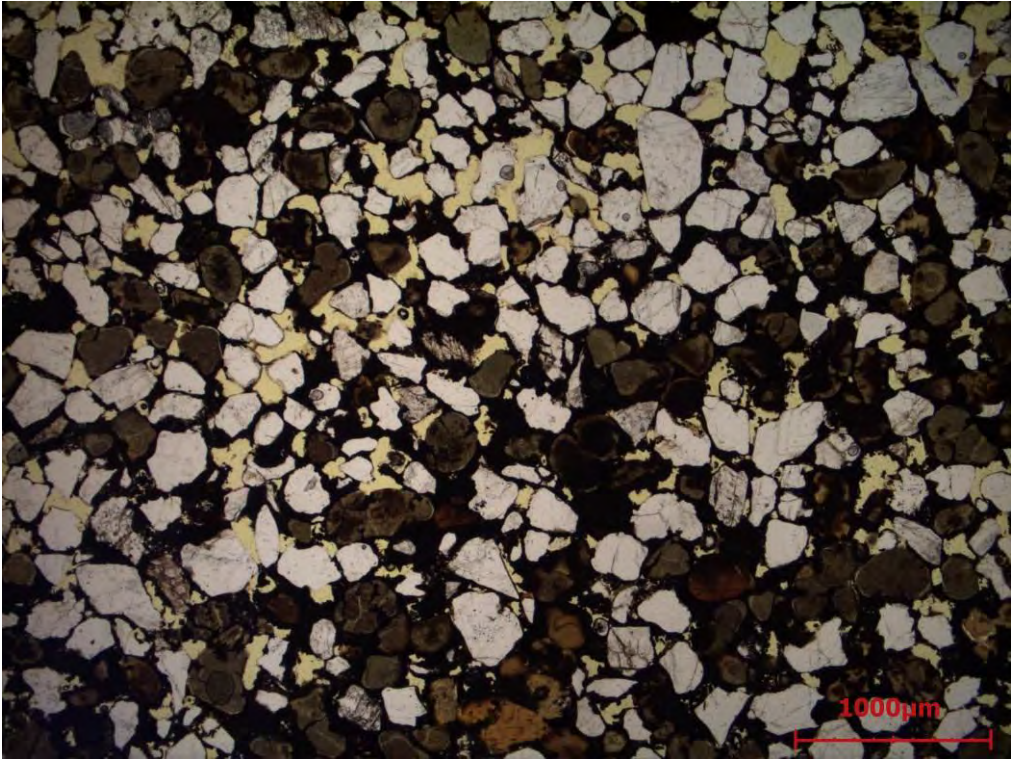
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
W/F2A	ontsluiting	II	<i>te klein fragment</i>				
				ZAND	korrelgrootte	middelgrof	
					sorteringsgraad	matig	
					verhouding kwarts/glauconiet	3:2	
					% groen / bruin / zwart glauconiet	50 / 25 / 25	
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	kristallieten
				helder	25%	films	
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		gemiddeld
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					geen		
<i>Detailopname van het slijpplaatje X1147</i>				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Rotselaar (Middelberg) Kernboring VLA-4.1-B7 (075W/0389 R1), kern C4/2


STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
R1/2A	5.88-5.93 m	I	1750 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		15-20%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	100%	75% kristallieten 25% dicht
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		slecht
					macroporositeit		5%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					- microscheuren		
Detailopname van het slijpplaatje X1164				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Rotselaar (Middelberg) Kernboring VLA-4.1-B7 (075W/0389 R1), los fragment uit kern C5

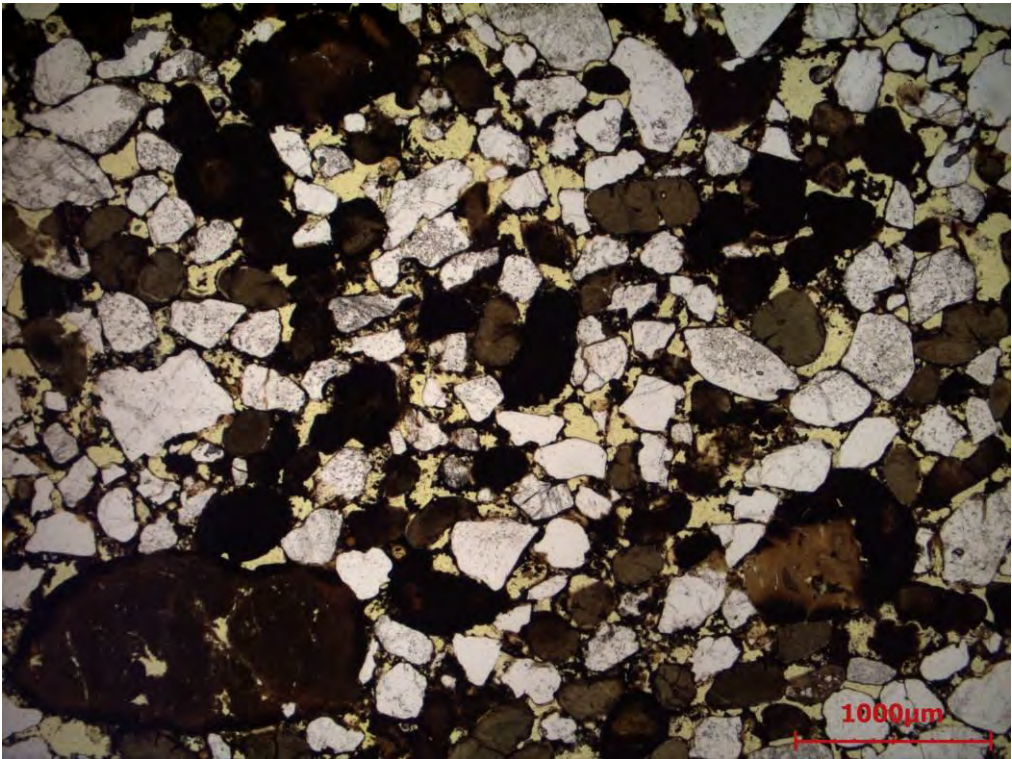
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
R1/3A	6.57-6.61 m	I	ca. 1900 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		75 / 15 / 10
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	90%	75% $\mu$ -kristallijn 25% kristallieten
					helder	10%	75% films
				PORIËN	meeste macroporiën		$\pm 100 \mu\text{m}$
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		gemiddeld
					verdeling cement:		heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- graafgang van zeeworm ( $\varnothing 4 \text{ mm}$ ) uitsluitend met kwartskorrels opgevuld							
Detailopname van het slijpplaatje X1165				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Rotselaar (Middelberg) Kernboring VLA-4.1-B7 (075W/0389 R1), los fragment uit kern C13/1

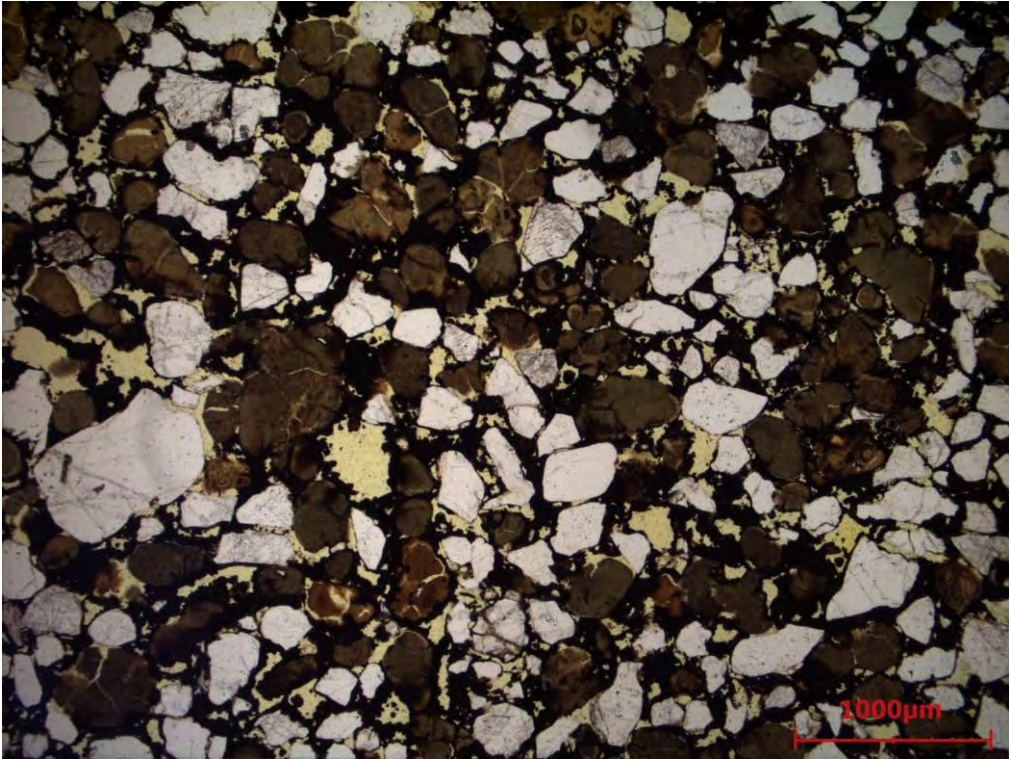
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
R1/4A	17.65-17.67 m	II	1000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte	fijn	
					sorteringsgraad	zeer goed	
					verhouding kwarts/glauconiet	3:2	
					% groen / bruin / zwart glauconiet	75 / 25 / -	
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		< 5%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	50%	μ-kristallijn
				helder	50%	films	
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 μm
					schijnbare connectiviteit		zeer goed
					macroporositeit		> 25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		zeer homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- toermalijnkorrel							
Detailopname van het slijpplaatje X1166				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Rotselaar (Middelberg) Kernboring VLA-4.1-B8 (075W/0389 R2), kern C1/2

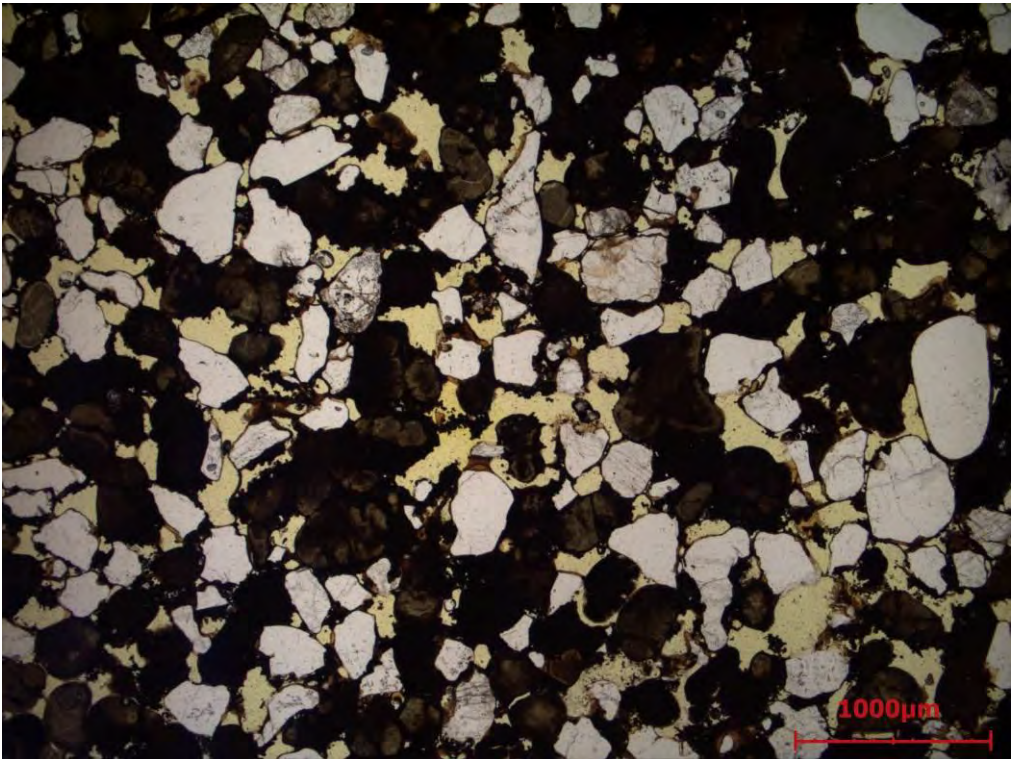
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
R2/1A	2.33-2.37 m	I	ca. 1750 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	μ-kristallijn
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 μm
					schijnbare connectiviteit		zeer goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
<i>andere waarnemingen</i>							
- twee vuursteenfragmenten (Ø 2 en 4 mm), het grootste vertoont verkiezelde skeletten van kleine foraminiferen							
Detailopname van het slijpplaatje X1167				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Rotselaar (Middelberg) Kernboring VLA-4.1-B8 (075W/0389 R2), kern C2/1

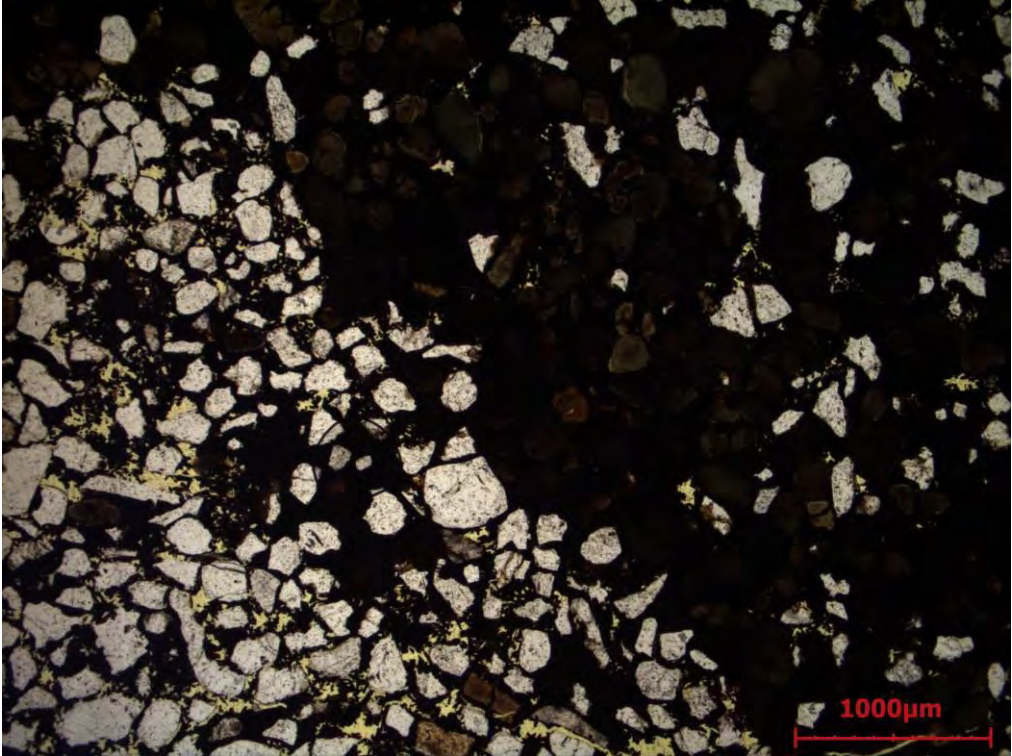
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
R2/2A	2.82-2.86 m	I	ca. 2000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		75 / 15 / 10
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		10-15%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	95%	50% µ-kristallijn 50% kristallieten
					helder	5%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- vuursteenfragment (Ø 1 mm) - toermalijnkorrel							
Detailopname van het slijpplaatje X1168				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Rotselaar (Middelberg) Kernboring VLA-4.1-B8 (075W/0389 R2), kern C4/2


STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
R2/5A	6.73-6.78	I	ca. 1750 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 50 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrel		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	50%	75% $\mu$ -kristallijn 25% kristallieten
					helder	50%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 $\mu$ m
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
<i>andere waarnemingen</i>							
- graafgang van zeeworm ( $\varnothing$ 7 mm) bijna uitsluitend met kwartskorrels opgevuld							
Detailopname van het slijpplaatje X1169				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Rotselaar (Middelberg) Los fragment nr. 6

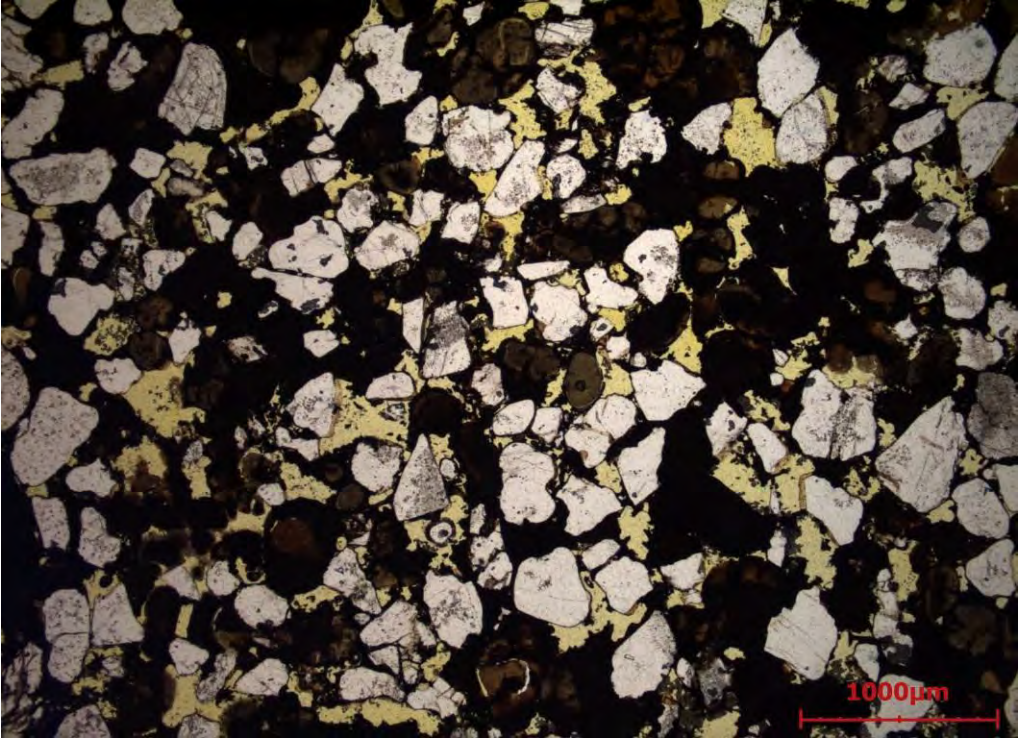
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
R/F6A	ontsluiting	I	2400 m/s				
				ZAND	korrelgrootte	middelgrof	
					sorteringsgraad	goed	
					verhouding kwarts/glauconiet	1:1	
					% groen / bruin / zwart glauconiet	50 / 25 / 25	
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		15-20%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	100%	50% kristallieten 50% dicht
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					porositeit		5%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		slecht
					verdeling cement		zeer heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					- kwartsrijke en glauconietrijke zones zonder overgang (vermoedelijk ontstaan door bioturbatie) - zandige zones omringd door sterk gelimontiseerde zones - doorlopende microscheur over het hele slijpplaatje		
Detailopname van het slijpplaatje X1173				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Rotselaar (Middelberg) Los fragment nr. 7

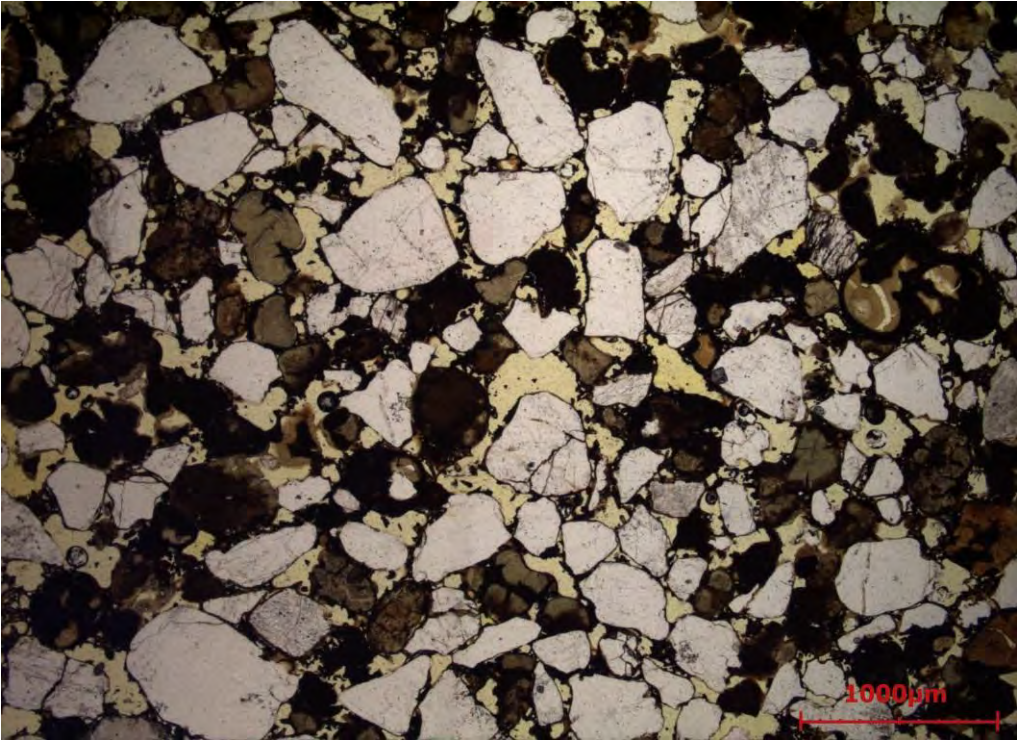
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
R/F7A	ontsluiting	II	1200 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		fijn
					sorteringsgraad		zeer goed
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		95 / 5 / -
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	kristallieten
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		zeer goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwartskorrels		goed
					verdeling cement		zeer homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					geen		
Detailopname van het slijpplaatje X1176				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Diest (Langenberg) Kernboring 4, kernfragment 1

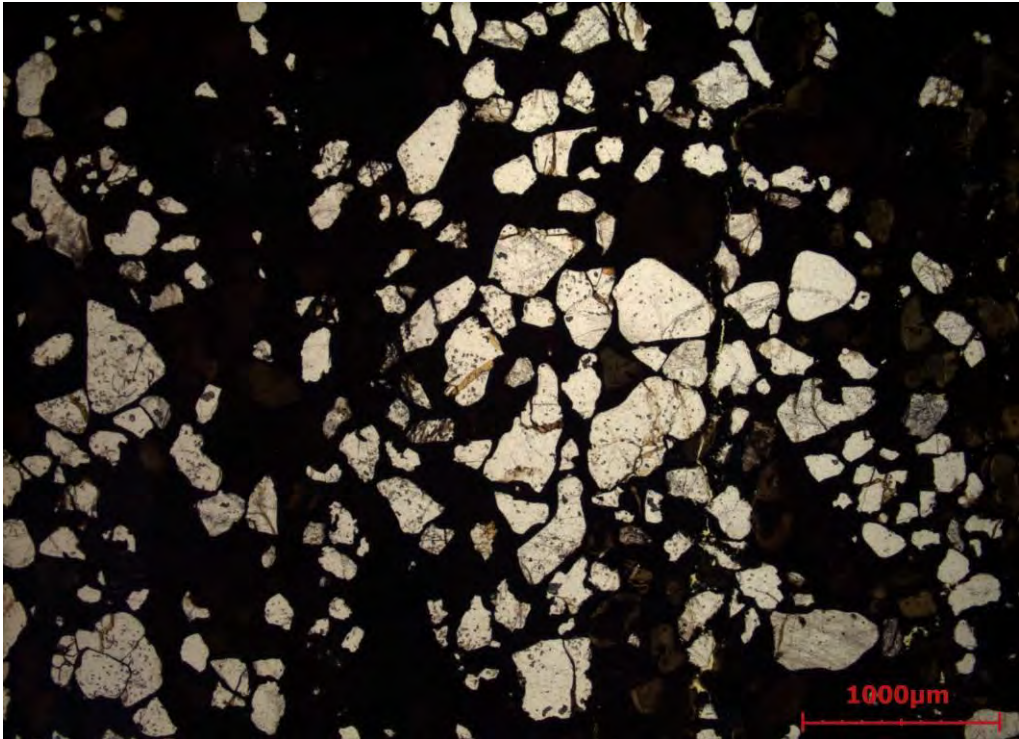
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D4.1A	0.25-0.30 m	I	1800 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 25 / 50
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	50% $\mu$ -kristallijn 50% kristallieten
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 $\mu$ m
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- veldspaatkorrels verweerd langs splijtingsvlakken</li> <li>- glauconietkorrel met zeer fijne kwartsinclusies</li> </ul>							
Detailopname van het slijpplaatje X1269				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Diest (Langenberg) Kernboring 5, kernfragment 1

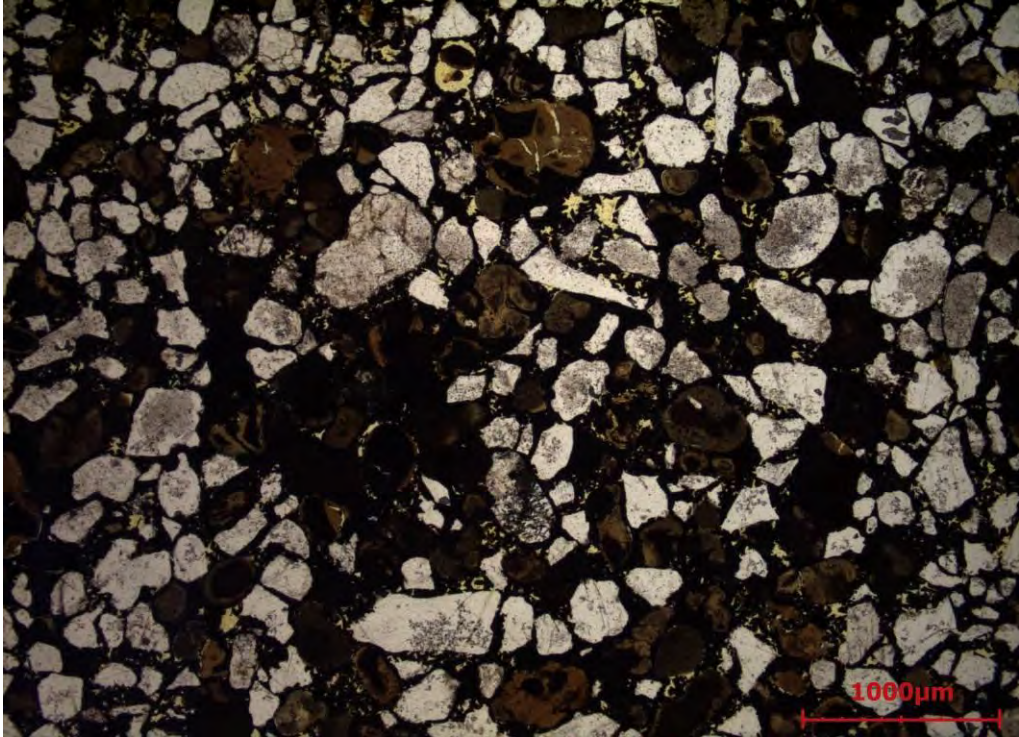
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D5.1A	0.15-0.20 m	II	1600 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	75% kristallieten 25% µ-kristallijn
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 µm
					schijnbare connectiviteit		zeer goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- graafgang van zeeworm (Ø 8 mm) bijna uitsluitend met kwartskorrels opgevuld - micaplaatje type muscoviet							
Detailopname van het slijpplaatje X1270				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Diest (Langenberg) Kernboring 5, kernfragment 1

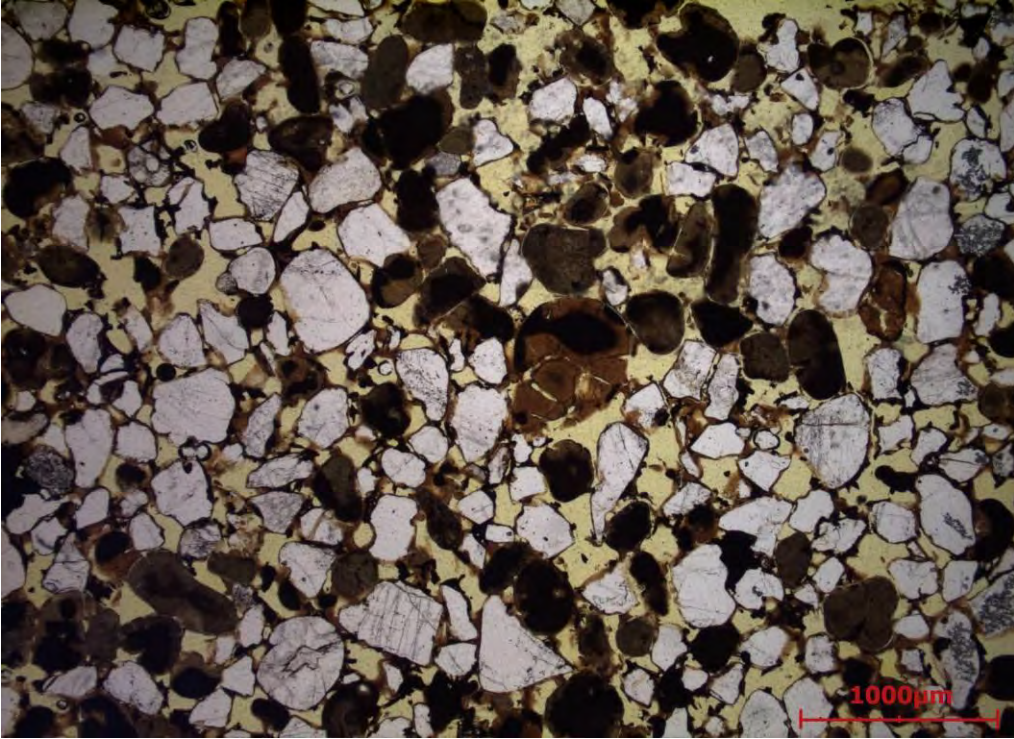
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D5.1B	0.25-0.30 m	I	2800 m/s				
				ZAND	korrelgrootte	middelgrof	
					sorteringsgraad	matig	
					verhouding kwarts/glauconiet	3:2	
					% groen / bruin / zwart glauconiet	25 / 25 / 50	
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		15-20%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	100%	75% dicht 25% kristallieten
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		slecht
					macroporositeit		5%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		slecht
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- graafgang van zeeworm (Ø 0.7 cm) bijna uitsluitend met kwartskorrels opgevuld</li> <li>- zone met eerder fris glauconiet als poriënvulling</li> <li>- microscheuren</li> </ul>							
<i>Detailopname van het slijpplaatje X1271</i>				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Diest (Langenberg) Kernboring 6, kernfragment 1

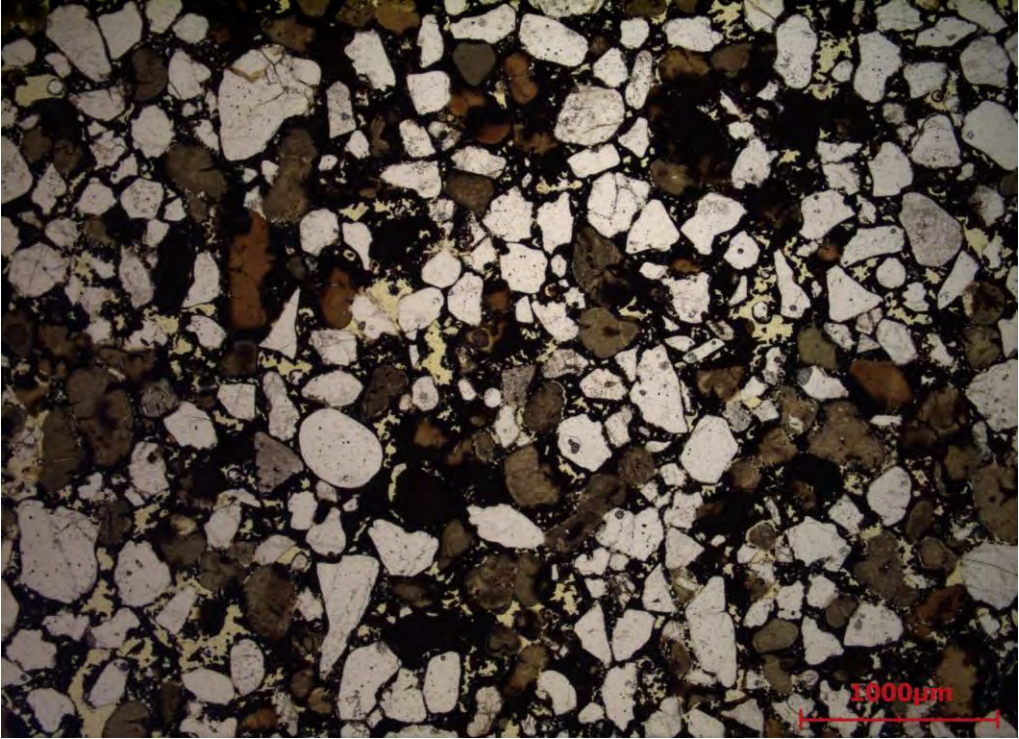
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D6.1A	0.10-0.15 m	I	2000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		10-15%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	100%	75% kristallieten 25% dicht
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
					- zandige zones		
Detailopname van het slijpplaatje X1272				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Diest (Langenberg) Kernboring 7, kernfragment 4

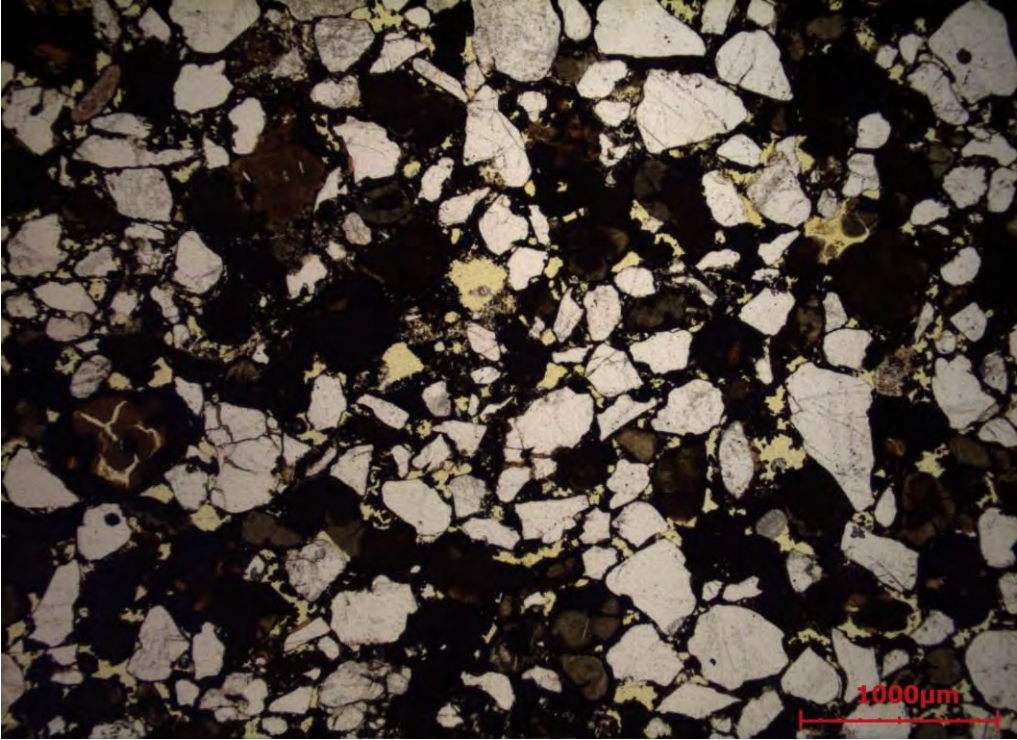
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D7.4A	0.51-0.56 m	II	1400 m/s				
				ZAND	korrelgrootte	middelgrof	
					sorteringsgraad	slecht	
					verhouding kwarts/glauconiet	3:2	
					% groen / bruin / zwart glauconiet	50 / 25 / 25	
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	25%	kristallieten
				helder	75%	films	
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 µm
					schijnbare connectiviteit		zeer goed
					macroporositeit		20-25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- graafgang van zeeworm (Ø 7 mm) bijna uitsluitend met kwartskorrels opgevuld - micaplaatje type muscoviet							
Detailopname van het slijpplaatje X1273				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Diest (Langenberg) Kernboring 8, kernfragment 5

STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D8.5A	0.60-0.65 m	II	1700 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	100%	75% kristallieten 25% dicht
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- vuursteenfragment (Ø 1 mm)							
Detailopname van het slijpplaatje X1274				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Diest (Langenberg) Kernboring 9, kernfragment 2

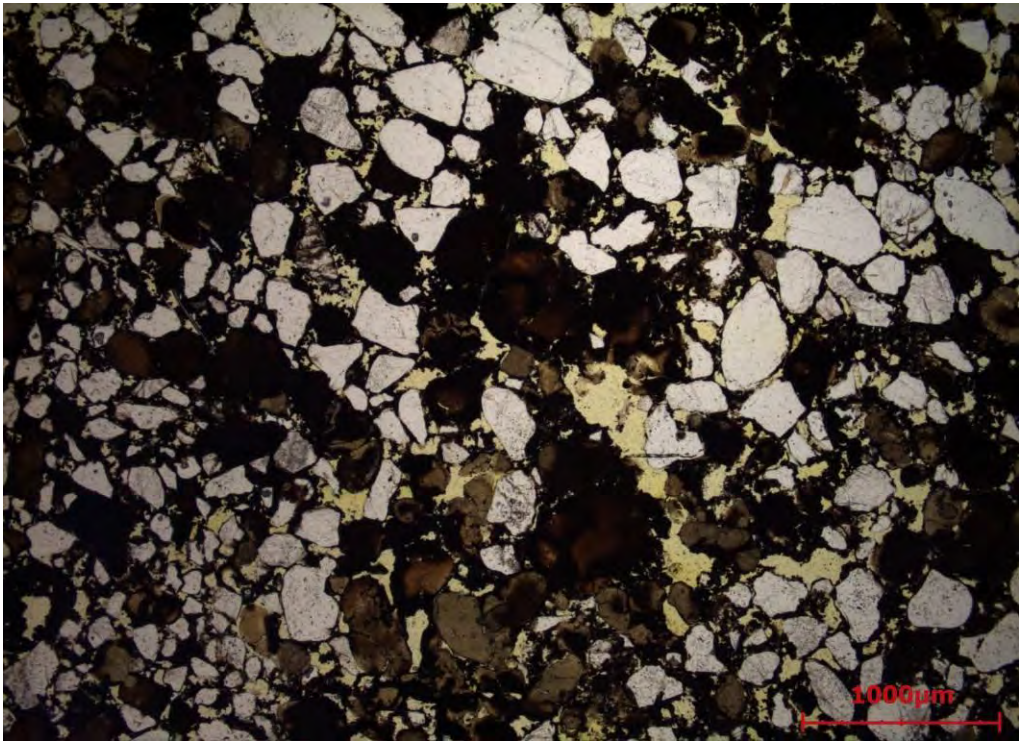
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D9.2A	0.40-0.45 m	II	1900 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 25 / 50
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	25%	kristallieten
				helder	75%	75% kristallieten 25% films	
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- goed afgeronde kwartskorrel (Ø 3.5 mm)							
Detailopname van het slijpplaatje X1275				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Diest (Langenberg) Kernboring 11, kernfragment 1

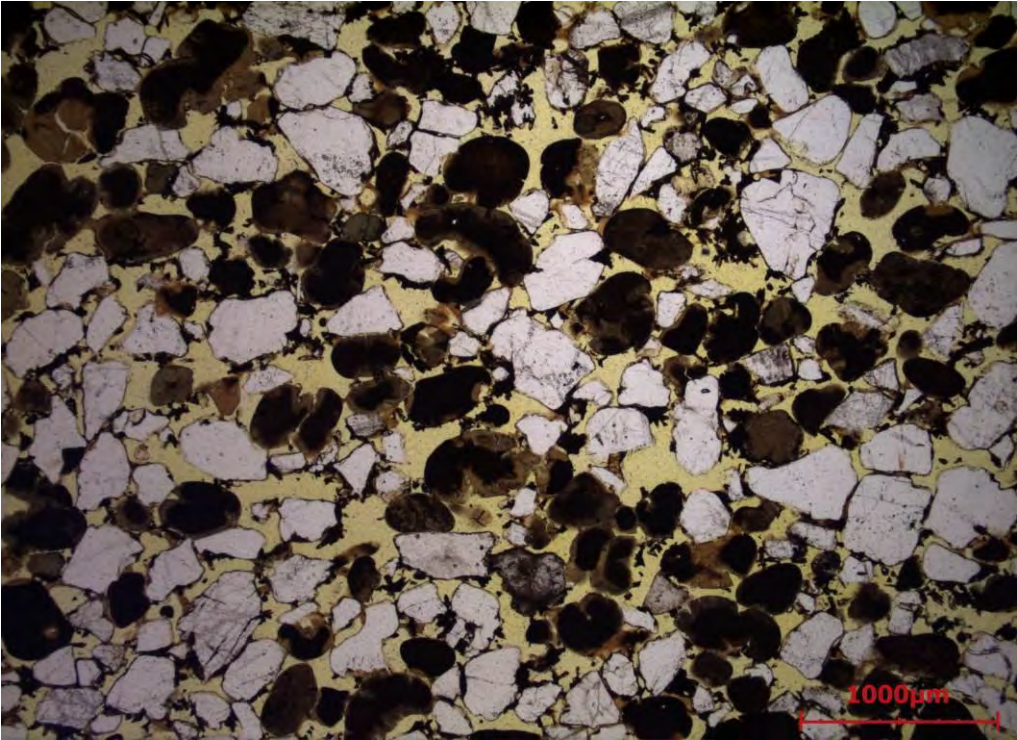
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D11.2A	0.45-0.50 m	I	2000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 50 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	50% $\mu$ -kristallijn 50% kristallieten
					helder	25%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 $\mu$ m
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		gemiddeld
					verdeling cement		zeer heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- zeer eigenaardige verijzeringen (microbiële structuur?) - zandige zone - micaplaatje type muscoviet							
Detailopname van het slijpplaatje X1276				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Diest (Langenberg) Kernboring 12, kernfragment 3

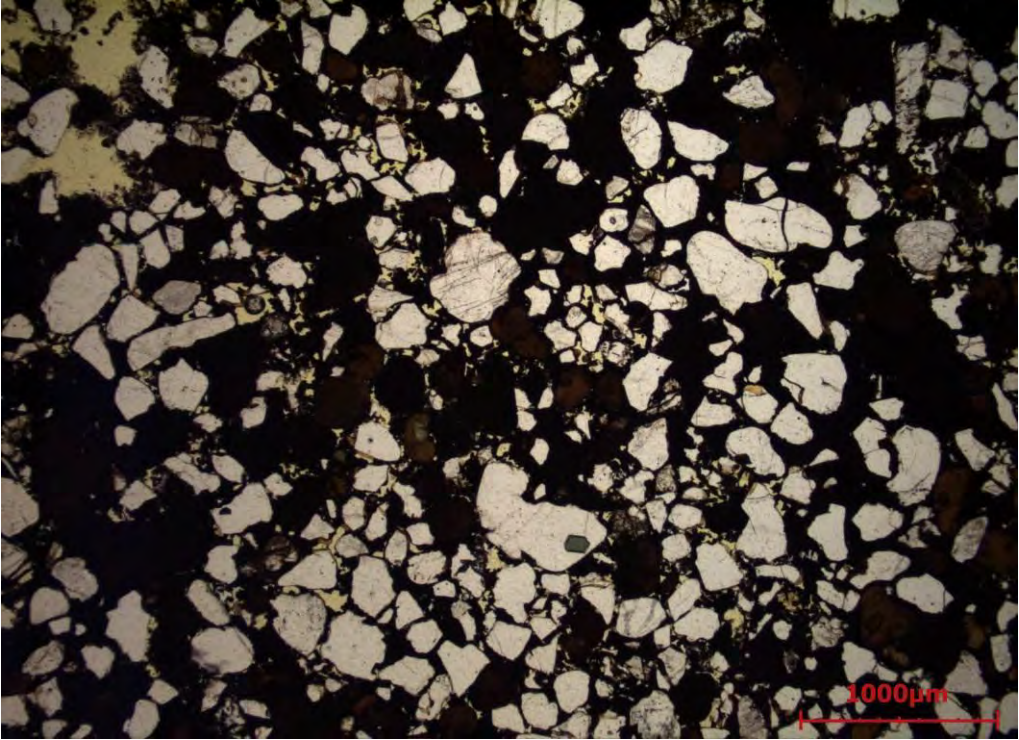
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D12.3A	0.50-0.55 m	I	2000 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 25 / 50
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	75%	75% kristallieten 25% $\mu$ -kristallijn
					helder	25%	75% kristallieten 25% films
				PORIËN	meeste macroporiën		$\pm 100 \mu\text{m}$
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
			geen				
Detailopname van het slijpplaatje X1277				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Diest (Langenberg) Kernboring 13, kernfragment 3

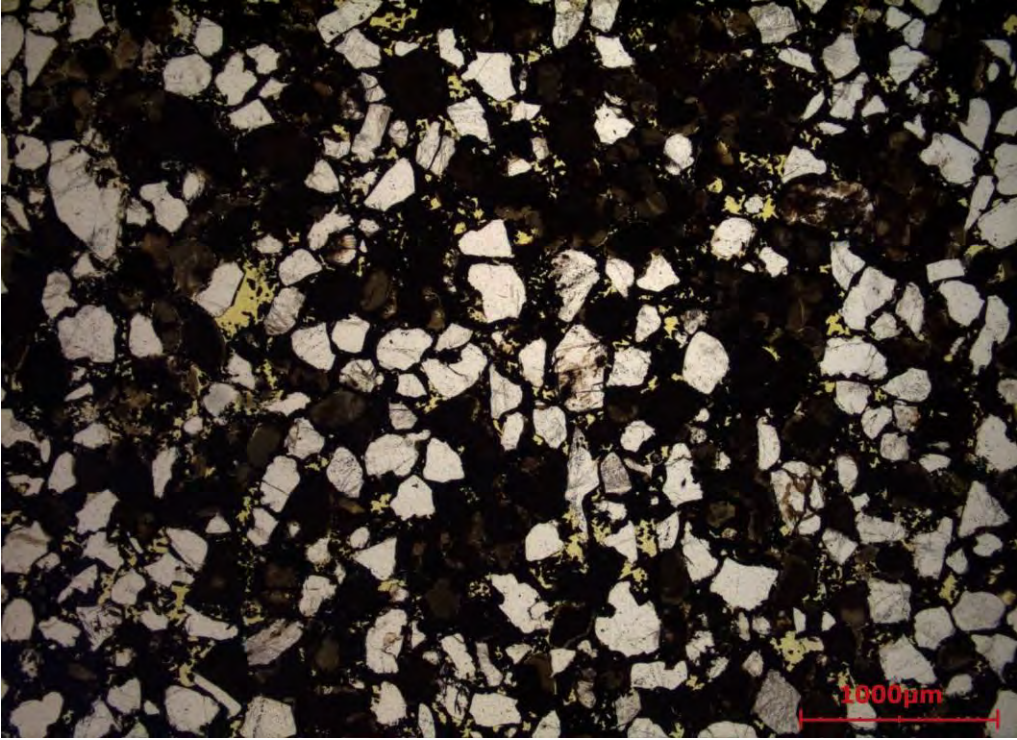
STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D13.3A	0.52-0.58 m	II	1250 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		25 / 25 / 50
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		geïsoleerd
					gehalte aan cement		5%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	50%	kristallieten
					helder	50%	50% films 50% kristallieten
				PORIËN	meeste macroporiën		> 100 µm
					schijnbare connectiviteit		zeer goed
					macroporositeit		> 25%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
geen							
Detailopname van het slijpplaatje X1278				<b>ZWAK GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			

Diest (Langenberg) Kernboring 13, kernfragment 3

STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D13.3B	0.64-0.69 m	I	2100 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		matig
					verhouding kwarts/glauconiet		3:2
					% groen / bruin / zwart glauconiet		10 / 30 / 60
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		continu
					gehalte aan cement		10-15%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	90%	50% kristallieten 50% dicht
					helder	10%	films
				PORIËN	meeste macroporiën		< 100 µm
					schijnbare connectiviteit		gemiddeld
					macroporositeit		5-10%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		slecht
					verdeling cement		zeer heterogeen
					<i>andere waarnemingen</i>		
- 3 graafgangen van zeewormen (Ø 8 mm) bijna uitsluitend met kwartskorrels opgevuld - microscheuren							
Detailopname van het slijpplaatje X1279				<b>GOED GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



Diest (Langenberg) Kernboring 15, kernfragment 3

STAAL	DIEPTE	KLASSE	GELUIDSSNELHEID	PETROGRAFISCHE BESCHRIJVING			
D15.3A	0.40-0.45 m	II	1900 m/s				
				ZAND	korrelgrootte		middelgrof
					sorteringsgraad		goed
					verhouding kwarts/glauconiet		1:1
					% groen / bruin / zwart glauconiet		50 / 25 / 25
				CEMENT	neerslag rond de zandkorrels		discontinu
					gehalte aan cement		5-10%
					<i>kleur</i>	<i>percentage</i>	<i>voorkomen</i>
					donker	95%	75% kristallieten 25% dicht
					helder	5%	kristallieten
				PORIËN	meeste macroporiën		± 100 µm
					schijnbare connectiviteit		goed
					macroporositeit		10-15%
				HOMOGENITEIT	spreiding kwarts/glauconiet		goed
					verdeling cement		homogeen
<i>andere waarnemingen</i>							
geen							
Detailopname van het slijpplaatje X1280				<b>MATIG GECONSOLIDEERDE ZANDSTEEN</b>			



**Onderzoeksproject VLA11-4.1**

**Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen**

**Bijlage V**

**Evaluatie van de Hardheid en het Effect van een Steenverstevigende Behandeling**

D: 2012.11586

*Aanvrager:* Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON)

*Contactpersoon:* Mevr. Griet Verhaert

*Uitvoering:* Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK)  
Departement Labo, Cel Monumenten  
*Tanaquil Berto, Laurent Fontaine en Ingrid Nijs*

*Verslaggeving:* Tanaquil Berto, Hilde De Clercq en Roald Hayen

*Datum:* 30 september 2013



## Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	4
2.	Methodologie .....	5
2.1.	Evaluatie van de hardheid van het gesteente.....	5
2.2.	Steenverstevigende proefbehandeling.....	5
2.3.	FTIR .....	6
3.	Evaluatie van de hardheid van Diestiaan ijzerzandsteen.....	8
4.	Evaluatie van verstevigende behandeling.....	11
4.1.	Verbruik en percentage droge stof .....	11
4.2.	Opvolging van de polymerisatie van TEOS met behulp van FTIR.....	15
4.3.	Verstevigend effect .....	16
5.	Overzicht van de DRMS-metingen.....	20
5.1.	Roeselberg (Herent) .....	21
5.1.1.	VLA10-4.1-B1 .....	21
	staal H1/1 .....	21
	staal H1/2 .....	21
	staal H1/3 .....	22
	staal H1/4 .....	22
	staal H1/5 .....	23
	staal H1/6 .....	23
5.1.2.	Losse fragmenten.....	24
	staal HF/8 .....	24
	staal HF/9 .....	24
	staal HF/10 .....	25
5.2.	Gasthuisbos (Pellenberg) .....	26
5.2.1.	VLA10-4.1-B2 .....	26
	staal P1/1 .....	26
	staal P1/3 .....	26
	staal P1/4 .....	27
	staal P1/5 .....	27
	staal P1/6 .....	28
	staal P1/7 .....	28
	staal P1/8 .....	29
	staal P1/9 .....	29
	staal P1/10 .....	30
5.2.2.	VLA10-4.1-B3 .....	31
	staal P2/1 .....	31
	staal P2/2 .....	31
	staal P2/3 .....	32
	staal P2/4 .....	32
5.2.3.	Losse fragmenten.....	33
	staal P/F3.....	33
	staal P/F4.....	33
5.3.	Beninksberg (Wezemaal) .....	34
5.3.1.	VLA10-4.1-B4 .....	34
	staal W1/2 .....	34
	staal W1/3 .....	34
5.3.2.	VLA10-4.1-B5 .....	35
	staal W2/1 .....	35
	staal W2/3 .....	35

staal W2/4 .....	36
5.3.3.    VLA10-4.1-B6 .....	37
staal W3/2 .....	37
staal W3/4 .....	37
staal W3/7 .....	38
5.4.    Middelberg (Rotselaar) .....	39
5.4.1.    VLA10-4.1-B7 .....	39
staal R1/1 .....	39
staal R1/2 .....	39
staal R1/3 .....	40
staal R1/4 .....	40
5.4.2.    VLA10-4.1-B8 .....	41
staal R2/1 .....	41
staal R2/2 .....	41
staal R2/3 .....	42
staal R2/4 .....	42
staal R2/5 .....	43
5.4.3.    Losse fragmenten .....	44
staal RF/6 .....	44
staal RF/7 .....	44
5.5.    Langenberg (Diest) .....	45
staal D4/1 .....	45
staal D5/1A .....	45
staal D5/1B .....	46
staal D6/1 .....	46
staal D7/4 .....	47
staal D8/5 .....	47
staal D9/2 .....	48
staal D11/2 .....	48
staal D12/3 .....	49
staal D13/3A .....	49
staal D13/3B .....	50
staal D15/3 .....	50
6.    Kalibratie van de DRMS-methodiek .....	51

## 1. Inleiding

In deze bijlage wordt een evaluatie opgemaakt van de hardheid van de Diestiaan ijzerzandsteen en worden de resultaten besproken van de mogelijkheid tot en de effectiviteit van een steenverstevigende behandeling. Voor dit onderzoeksluik werden van het beschikbare materiaal afkomstig van de vijf sites in totaal 55 stalen (afmetingen  $\pm 5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ) geselecteerd (zie Bijlage I *Geologische macroscopische studie, selectie stalen en overzicht analyses*).

De 55 stalen zijn als volgt verdeeld:

- 9 stalen afkomstig van de Roeselberg te Herent;
- 15 stalen van het Gasthuisbos te Pellenberg;
- 8 stalen van de Beninksberg te Wezemaal;
- 11 stalen van de Middelberg te Rotselaar; en
- 12 stalen van de Langenberg te Diest.

Voor de codering van de stalen afkomstig van boorkernen wordt verwezen naar bijlage X *Vergelijkende tabel voor de benamingen van de proefstukken*.

Voor losse stalen vermeldt de code de letter F (los fragment) en het volgnummer van het fragment.

In enkele gevallen werden van eenzelfde fragment meerdere stalen gelicht voor analyse en dit in functie van de waargenomen variaties in geluidssnelheid. Deze verschillende stalen worden onderscheiden door toevoeging van een letter A of B, naargelang de locatie in de boorkern van het staal.

Elk staal werd achtereenvolgens onderworpen aan:

- geluidssnelheidsmetingen. Uit de bekomen resultaten wordt de consolidatiegraad afgeleid, conform figuur 40 van bijlage III *Petrografische studie*;
- een analyse van de initiële hardheid door middel van DRMS (Drilling Resistance Measurement System);
- een steenverstevigende proefbehandeling;
- een analyse van de hardheid na behandeling, eveneens op basis van DRMS metingen.

Op verschillende tijdstippen na de steenverstevigende proefbehandeling werd de polymerisatie van het verstevigend middel, ethylsilicaat of TEOS, opgevolgd door middel van FTIR-analyses (Fourier Transformatie Infrarood spectroscopie).

Als gevolg van de beschikbaarheid van de stalen werd de uitvoering van dit onderzoek opgedeeld in twee fasen waarbij de stalen afkomstig van Herent, Pellenberg, Wezemaal en Rotselaar in een eerste fase werden onderzocht terwijl deze afkomstig uit Diest later aan bod kwamen. De onderzoeksmethodiek onderging in de tweede fase een lichte wijziging die wordt toegelicht bij de bespreking van de methodiek.

## 2. Methodologie

### 2.1. Evaluatie van de hardheid van het gesteente

De mechanische oppervlakteverweringskenmerken van de ijzerzandsteen worden geanalyseerd met behulp van het Drilling Resistance Measurement System wat kortweg DRMS wordt genoemd. Het betreft een niet genormaliseerde proef-methode waarmee het hardheidsprofiel van de onderzochte steen bepaald wordt. Bij deze onderzoeksmethode wordt een gat loodrecht op het steenvlak geboord met een diameter van 4.8 mm aan een constante penetratiesnelheid, een constante rotatiesnelheid en een variërende diepte (tot max. 30 mm). In het kader van dit onderzoek werden volgende parameters gebruikt: een penetratiesnelheid van 10 mm/min en een rotatiesnelheid van 600 tpm. Het toestel meet de weerstand die het ondervindt bij het boren, waarbij de weerstand een rechtstreekse maat is voor de hardheid van het materiaal (de meetlimiet bedraagt 100 N).

Het resultaat van een DRMS meting is een hardheidsprofiel van het materiaal in functie van de diepte. De hardheidsprofielen worden weergegeven aan de hand van een curve waarbij de y-as de geregistreerde weerstand weergeeft (N) en de x-as de diepte (mm) in de steen.

Bij de stalen afkomstig uit Herent, Pellenberg, Wezemaal en Rotselaar (eerste fase van het onderzoek) werden de metingen uitgevoerd loodrecht op het groefleger. Deze methodiek laat toe de stratigrafische heterogeniteit van de steen in beeld te brengen. Bij de stalen afkomstig van Diest (tweede fase van het onderzoek) zijn de boringen uitgevoerd parallel aan het groefleger, met andere woorden zoals de steen over het algemeen in het gevelmetselwerk wordt toegepast.

Er werden op elk staal twee DRMS metingen uitgevoerd. Tussen deze twee metingen in werd telkens een referentieboring tot 10 mm diepte uitgevoerd op een homogeen referentiemateriaal teneinde de absolute resultaten onderling te corrigeren voor de slijtage van de boor. Voor de stalen afkomstig uit Herent, Pellenberg, Wezemaal en Rotselaar (eerste fase van het onderzoek) werd een steenfragment afkomstig van Pellenberg (P/F8B) gebruikt als referentiemateriaal. Voor de stalen afkomstig van Diest (tweede fase van het onderzoek) werd echter een kunststeen (zie hoofdstuk 7 Kalibratie DRMS metingen van deze bijlage) als referentiemateriaal aangewend omdat het eerder gebruikte referentiemateriaal (fragment P/F8B) nog onvoldoende homogeen bleek.

Om de doeltreffendheid van de steenverstevigende proefbehandelingen te kunnen evalueren, worden minstens anderhalve maand (1.5 maand bij de eerste fase en 2 maand bij de tweede fase) na de laatste steenverstevigende proefbehandeling op elk staal opnieuw twee DRMS metingen uitgevoerd, waarbij de meetpunten zo dicht mogelijk gelegen zijn bij deze voor de behandeling (referentiemetingen).

### 2.2. Steenverstevigende proefbehandeling

Op de 55 stalen werd een steenverstevigende behandeling uitgevoerd. Het verstevigend product werd hierbij aangebracht door capillaire absorptie, waarbij het te behandelen oppervlak gedurende 10 seconden tot 1 mm diep in een oplossing van ethylsilicaat (TEOS) werd gebracht. Deze behandeling werd tot drie maal herhaald met een tussentijd van minimaal 24 uur. Het gebruikte consolideringsmiddel is een 100 % product op basis van ethylsilicaat (Rewah ARTISIL SVS 100) of een met White Spirit verdunde oplossing van datzelfde product (75 g% ethylsilicaat). De behandelingswijze en het gebruikte product werden bepaald op basis van de resultaten van de initiële hardheid van de onbehandelde proefstalen.



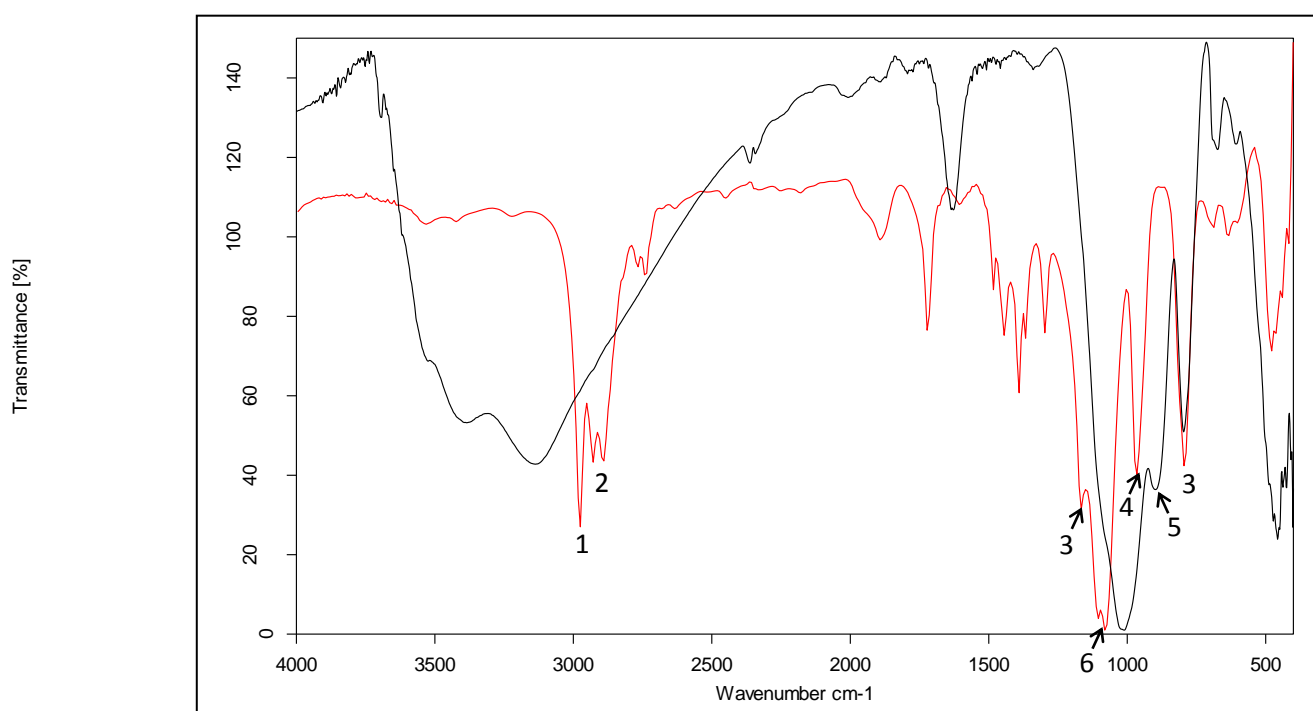
### 2.3. FTIR

Fourier-Transform-Infraroodspectroscopie (FTIR) is een techniek voor de identificatie van functionele groepen op moleculair niveau, in hoofdzaak maar niet beperkend tot organische verbindingen.

Infraroodspectroscopie is gebaseerd op de kenmerkende trillingsfrequenties van de chemische bindingen in moleculaire structuren. Elk type chemische binding wordt immers gekarakteriseerd door de sterkte van de binding en door de massa's van de atomen aan weerszijden van elke binding. Deze massa-veer-massa combinatie wordt gekenmerkt door een specifieke resonantiefrequentie voor buiging en een andere resonantiefrequentie voor strekking van de binding. In organische verbindingen treden deze frequenties op in het frequentiegebied van infrarood licht, zodat deze in IR-absorptiespectra herkend kunnen worden.

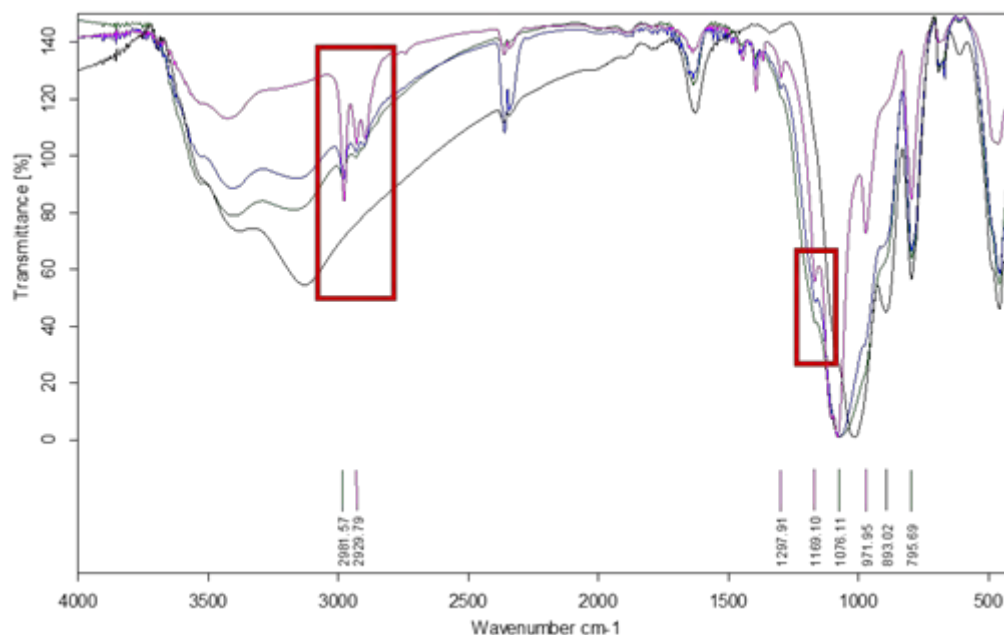
De FTIR-absorptiespectra kenmerkend voor Diestiaan ijzerzandsteen (zwart) en TEOS (rood) worden geïllustreerd in Figuur 1. Een overzicht van de kenmerkende absorptiebanden voor TEOS en hun betekenis is opgenomen in Tabel 1.

Een vergelijking van de absorptiespectra toont onmiddellijk aan dat de absorptiebanden van ijzerzandsteen en TEOS elkaar gedeeltelijk overlappen. Vooral de absorptiebanden van kwarts ( $\text{SiO}_2$ ) en glauconiet zijn gelegen bij frequenties waarbij ethylsilicaat eveneens een sterke absorptie vertoont (ca. 700 tot  $1250 \text{ cm}^{-1}$ ).



Figuur 1. Kenmerkende FTIR-absorptiespectra van Diestiaan ijzerzandsteen (zwart) en TEOS (rood). De frequentie van het IR-licht wordt hier uitgedrukt in functie van zijn golfgetal ( $\text{cm}^{-1}$ ). Voor de identificatie van de absorptiebanden in het IR-absorptiespectrum van TEOS, zie Tabel 1.

Figuur 2 illustreert de FTIR spectra van onbehandelde ijzerzandsteen (zwart), van met TEOS behandelde ijzerzandsteen respectievelijk 30 minuten (roos), 1 week (blauw) en 1 maand (groen) na de applicatie.



Figuur 2. FTIR spectra van een met TEOS behandeld staal van Diestiaan ijzerzandsteen in drie verschillende stadia van hydrolyse en polymerisatie van het TEOS. De zwarte curve geeft het absorptiespectrum van de onbehandelde ijzerzandsteen weer, de roze, blauwe en groene curven respectievelijk 30 minuten, 1 week en 1 maand na de proefbehandeling.

Tabel 1. Positie absorptiebanden en hun betekenis

Nr.	Banden (cm <sup>-1</sup> )	Betekenis
1-2	2980 en 2930	ethoxygroepen (SiOEt)
3	1168 en 812	TEOS in fase van hydrolyse
4-5	960 en 920	Si-OEt Si-O (vrije radicalen) <sup>1</sup>
6	1200 en 1147	Si-O-Si 1200 cm <sup>-1</sup> voor cyclische structuren en 1147 cm <sup>-1</sup> voor lineaire structuren <sup>2</sup> . Een sterke bandverstoring wordt waargenomen als gevolg van de aanwezigheid van kwarts en glauconiet, die eveneens rond 1100 cm <sup>-1</sup> absorptie vertonen.

<sup>1</sup> Beganskiene, A., *FTIR, TEM and NMR investigations of Stöber Silica Nanoparticles*. ISSN 1392-1320 Materials science. Vol; 10, No.4. 2004

<sup>2</sup> Rubio, F., *A FT-IR study of the hydrolyses of tetraethylorthosilicate (TEOS)*, Spectroscopy Letters volume 31, issue 1, 1998 199-219

### 3. Evaluatie van de hardheid van Diestiaan ijzerzandsteen

De individuele meetresultaten van de initiële hardheid van de Diestiaan ijzerzandsteen zijn opgenomen in Hoofdstuk 4, *Overzicht van de DRMS-metingen*. Op basis van de meetwaarden is het mogelijk de verschillende stalen in een aantal hardheidsklassen onder te verdelen: laag, matig en hoog met een bijkomende mogelijkheid tot de overgangsklassen laag tot matig en matig tot hoog. Een beschrijving van de bijhorende hardheid volgens elke klasse is opgenomen in Tabel 2. Stalen die niet tot een van deze klassen behoren, worden omschreven als *heterogeen*. Het relatieve aandeel aan stalen dat in elke klasse werd ondergebracht is eveneens opgenomen in deze tabel.

Een overzicht van de initiële hardheid van de verschillende stalen op basis van de DRMS-resultaten is weergegeven in Tabel 3. In deze tabel zijn naast de evaluatie van de hardheid, tevens de classificatie op basis van de geschiktheidsklasse en de consolidatiegraad zoals afgeleid uit de geluidssnelheid opgenomen. In Figuur 3 worden de resultaten van de consolidatiegraad vergeleken met deze van de hardheidsklasse bepaald door middel van DRMS-metingen.

*Tabel 2. Classificatie van de hardheid, aandeel en beschrijving van de hardheden volgens DRMS-metresultaten.*

Hardheid	Aandeel	Beschrijving
laag	55%	homogene hardheid tussen 0 en 5 N
laag/matig	7%	homogene hardheid rond 5 N
matig	2%	homogene hardheid tussen 5 en 15 N
matig/hoog	5%	homogene hardheid rond 15 N
hoog	4%	homogene hardheid vanaf 15 N
heterogeen	27%	heterogene hardheid waardoor er geen algemene hardheid bepaald kan worden

De Diestiaan ijzerzandsteen wordt over het algemeen gekenmerkt door een lage hardheid: de DRMS metingen registreren bij 55% van de stalen immers een weerstand lager dan 5 N. Naast deze lage hardheid wordt de steen doorgaans gekenmerkt door een sterke heterogeniteit. Zo vertoont 27% van de geteste stalen een hardheidsprofiel waarbij hoge en lage hardheden elkaar afwisselen. Het aandeel aan homogeen harde ijzerzandsteen is bovendien beperkt en bedraagt niet meer dan 4%.

Uit de vergelijking van de consolidatiegraad op basis van de resultaten van de geluidssnelheidsmetingen met deze bekomen door middel van de DRMS-metingen (tabel 3 en Figuur 2) kan worden afgeleid dat stalen gekenmerkt door een lage hardheid, doorgaans ook een beoordeling “zwakke tot matige consolidatie” krijgen. IJzerzandsteen met een gemiddeld hogere geluidssnelheid wordt daarentegen over het algemeen gekenmerkt door een hogere hardheid hoewel de spreiding op deze resultaten zeer ruim is.

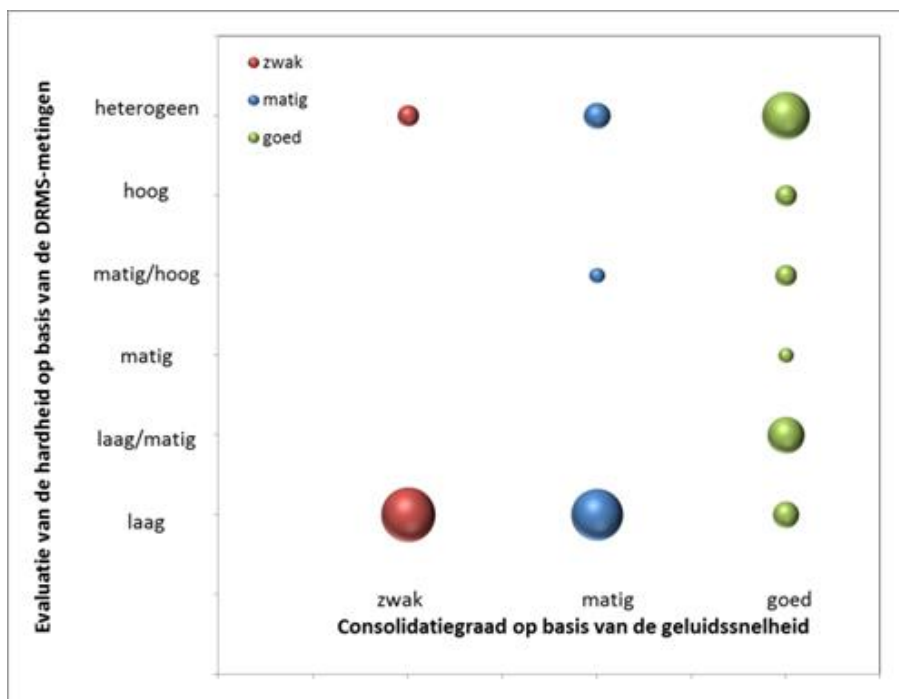
Verder kan worden vastgesteld dat het aandeel aan stalen dat als heterogeen wordt omschreven (27 % in tabel 2), niet eenduidig op basis van de geluidssnelheid kan geklasseerd worden. Er is weliswaar een licht overwicht aan goede kwaliteit ijzerzandsteen (op basis van de geluidssnelheid), maar ook beoordelingen van matig en zwak komen voor bij heterogene blokken. In drie gevallen worden goede resultaten bekomen voor de geluidssnelheid, terwijl de resultaten van de DRMS-metingen wijzen op een lage hardheid; deze zijn in tabel 3 in rood aangeduid.

Tabel 3. Overzicht van de meetresultaten van de initiële hardheid van de Diestiaan ijzerzandsteen met aanduiding van de plaats van monstername, de code van het staal, de diepte, de geschiktheidsklasse en de evaluatie op basis van de geluidssnelheidswaarde. In geval het resultaat van de algemene hardheid gelijklopend is met dit van de geluidssnelheid, werden deze in vet aangeduid.

Site	Staal	Diepte (m)	Klasse	Consolidatiegraad	Hardheid
<b>Herent, Roeselberg</b> VLA10-4.1-B1	H1/1	2.84-2.88	I	matig	laag
	H1/2	4.79-4.83	I	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	H1/3	5.39-5.42	I	goed	heterogeen
	H1/4	7.18-7.22	I	goed	heterogeen
	H1/5	8.06-8.07	I	goed	laag/matig
	H1/6	8.29-8.34	I	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	H/F8	ontsluiting	II	goed	laag/matig
	H/F9	ontsluiting	I	<b>goed</b>	<b>matig/hoog</b>
	H/F10	ontsluiting	I	goed	heterogeen
<b>Pellenberg, Gasthuisbos</b> VLA10-4.1-B2 VLA10-4.1-B3	P1/1	3.30-3.34	II	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	P1/3	8.64-8.66	I-II	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	P1/4	3.30-3.34	I-II	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	P1/5	8.64-8.66	II	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	P1/6	9.21-9.37 <sup>1</sup>	II	zwak	heterogeen
	P1/7	11.55-11.77 <sup>1</sup>	I	goed	heterogeen
	P1/8	9.21-9.23	I	<b>goed</b>	<b>hoog</b>
	P1/9	11.59-11.63	I-II	matig	heterogeen/holtes
	P1/10	12.21-12.26	I-II	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	P2/1	4.73-4.86 <sup>1</sup>	II	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	P2/2	7.16-7.20	II	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	P2/3	7.92-7.95	II	<b>zwak</b>	<b>heterogeen/laag</b>
	P2/4	8.70-8.84 <sup>1</sup>	I-II	matig	heterogeen
	P/F3	ontsluiting	I-II	<b>matig</b>	<b>matig/hoog</b>
	P/F4	ontsluiting	I	<b>goed</b>	<b>hoog</b>
<b>Wezemaal, Beninksberg</b> VLA10-4.1-B4 VLA10-4.1-B5 VLA10-4.1-B6	W1/2	4.27-4.31	I	matig	laag
	W1/3	5.71-5.75	I-II	goed	heterogeen
	W2/1	3.20-3.26	I	goed	heterogeen
	W2/3	3.90-3.95	II	matig	laag
	W2/4	7.78-7.82	II	matig	laag
	W3/2	2.55-2.66 <sup>1</sup>	I	goed	heterogeen
	W3/4	3.75-3.76	II	matig	laag
	W3/7	4.84-4.90	II	matig	laag
<b>Rotselaar, Middelberg</b> VLA10-4.1-B7 VLA10-4.1-B8	R1/1	3.85-4.04 <sup>1</sup>	I-II	goed	heterogeen
	R1/2	5.88-5.93	I	matig	heterogeen
	R1/3	6.57-6.61	I	goed	laag/matig
	R1/4	17.65-17.67	II	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	R2/1	2.33-2.37	I	<b>goed</b>	<b>laag</b>
	R2/2	2.82-2.86	I	goed	laag/matig
	R2/3	2.97-3.08 <sup>1</sup>	II	goed	laag/matig
	R2/4	3.08-3.26 <sup>1</sup>	II	matig	laag
	R2/5	6.73-6.78	I	<b>goed</b>	<b>laag</b>
	R/F6	ontsluiting	I	goed	matig
	R/F7	ontsluiting	II	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
<b>Diest, Langenberg</b>	D4.1	0.25-0.30	I	matig	laag
	D5.1A	0.15-0.20	II	matig	laag
	D5.1B	0.25-0.30	I	goed	heterogeen
	D6.1	0.10-0.15	I	goed	heterogeen
	D7.4	0.51-0.56	II	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	D8.5	0.60-0.65	II	matig	laag
	D9.2	0.40-0.45	II	matig	laag
	D11.2	0.45-0.50	I	goed	laag/matig
	D12.3	0.50-0.55	I	<b>goed</b>	<b>laag</b>
	D13.3A	0.52-0.58	II	<b>zwak</b>	<b>laag</b>
	D13.3B	0.64-0.69	I	<b>goed</b>	<b>matig/hoog</b>
	D15.3	0.40-0.45	II	matig	laag

<sup>1</sup>In tegenstelling tot de andere stalen werd hier de positie van het staal voor de DRMS-metingen niet exact bepaald ten opzichte van de boorkern. De opgenomen waarden zijn deze voor het desbetreffende fragment uit de boorkern, overeenkomstig bijlage I.





Figuur 3. Vergelijking van de consolidatiegraad bekomen op basis van de geluidssnelheid met de hardheid bekomen op basis van DRMS-metingen.

## **4. Evaluatie van verstevigende behandeling**

### **4.1. Verbruik en percentage droge stof**

Het overzicht van het totaal verbruik aan steenverstevigend product en het percentage aan droge stof is weergegeven in Tabel 4.

Om de uiteindelijke hoeveelheid van steenverstevigend product na uitharding te evalueren werd het percentage droge stof bepaald aan de hand van het gewichtsverschil voor en na conditionering van de behandelde stalen tot constant gewicht. De resultaten worden uitgedrukt in g%.

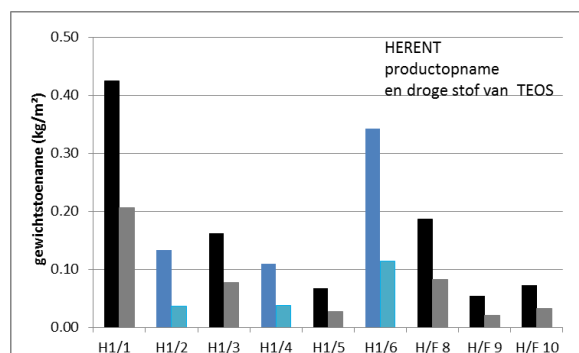
Deze waarden werden vergeleken met het droge stofgehalte van het steenverstevigend product bepaald op een inerte drager. Deze bedraagt 59 g% voor de solventvrije oplossing TEOS (100%) en 45 g% in het geval van de verdunde TEOS-oplossing (75%). Beide waarden werden bepaald door 0,5 g van het steenverstevigend product in een aluminium schaal te conditioneren tot een constant gewicht. Het percentage droge stof werd vervolgens bepaald door het gewichtsverschil voor en na conditionering, waarbij elke test in drievoud werd uitgevoerd. De vermelde waarden zijn telkens het gemiddelde van deze drie metingen.

Tabel 4. Totaal verbruik aan en percentage droge stof van TEOS. De stalen behandeld met een 100% TEOS oplossing zijn in blauw aangeduid. Alle overige stalen werden behandeld met een 75% TEOS oplossing. Het droge stofgehalte bepaald op een inerte drager van de solventvrije TEOS oplossing bedraagt 59 g%, dit van de 75% oplossing 45 g%.

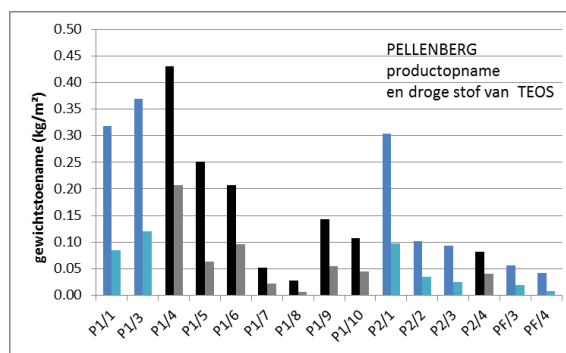
Site	Staal	Behandeling	Verbruik TEOS		Droge stofgehalte	
			(kg/m <sup>2</sup> )	(l/m <sup>2</sup> )	(g%)	(%) <sup>(a)</sup>
Herent, Roesselberg VLA10-4.1-B1	H1/1	100/3	4.2	4.8	49	83
	H1/2	75/2	1.3	1.5	28	62
	H1/3	100/2	1.6	1.9	47	80
	H1/4	75/3	1.1	1.3	34	76
	H1/5	100/2	0.7	0.8	41	70
	H1/6	75/3	3.4	3.9	33	73
	H/F8	100/3	1.9	2.1	44	75
	H/F9	100/2	0.5	0.6	39	66
	H/F10	100/3	0.7	0.8	45	76
Pellenberg, Gasthuisbos VLA10-4.1-B2 VLA10-4.1-B3	P1/1	75/2	3.2	3.6	27	60
	P1/3	75/2	3.7	4.2	32	71
	P1/4	100/3	4.3	4.9	48	81
	P1/5	100/3	2.5	2.9	25	42
	P1/6	100/2	2.1	2.4	46	78
	P1/7	100/2	0.5	0.6	43	73
	P1/8	100/2	0.3	0.3	24	41
	P1/9	100/2	1.4	1.6	38	64
	P1/10	100/2	1.1	1.2	41	69
	P2/1	75/3	3.0	3.5	32	71
	P2/2	75/3	1.0	1.2	35	78
	P2/3	75/2	0.9	1.1	27	60
	P2/4	100/3	1.0	1.1	49	83
	P/F3	75/3	0.6	0.6	34	76
	P/F4	75/2	0.4	0.5	19	42
Wezemaal, Beninksberg VLA10-4.1-B4 VLA10-4.1-B5 VLA10-4.1-B6	W1/2	75/2	2.6	3.0	33	73
	W1/3	100/3	1.8	2.0	49	83
	W2/1	75/3	0.4	0.5	28	62
	W2/3	75/3	3.1	3.5	36	80
	W2/4	100/2	1.2	1.4	32	54
	W3/2	100/2	0.5	0.6	35	59
	W3/4	100/3	2.3	2.7	47	80
	W3/7	100/3	1.3	1.5	42	71
Rotselaar, Middelberg VLA10-4.1-B7 VLA10-4.1-B8	R1/1	100/2	1.1	1.3	42	71
	R1/2	75/3	1.9	2.2	27	60
	R1/3	75/3	1.1	1.2	33	73
	R1/4	75/2	2.8	3.2	36	80
	R2/1	75/2	0.8	0.9	24	53
	R2/2	100/3	0.9	1.0	44	75
	R2/3	75/3	1.4	1.6	37	82
	R2/4	100/2	1.2	1.3	42	71
	R2/5	75/3	2.4	2.7	32	71
	R/F6	100/2	0.6	0.7	37	63
R/F7	100/2	1.2	1.3	43	73	
Diest, Langenberg <sup>(b)</sup>	D4.1	100/3	2.0	2.3		
	D5.1A	100/3	1.4	1.6		
	D5.1B	100/3	0.6	0.7		
	D6.1	100/3	1.1	1.2		
	D7.4	100/3	2.5	2.8		
	D8.5	100/3	1.5	1.7		
	D9.2	100/3	1.1	1.2		
	D11.2	100/3	1.4	1.6		
	D12.3	100/3	0.12	1.4		
	D13.3A	100/3	3.5	4.0		
	D13.3B	100/3	0.9	1.0		
D15.3	100/3	1.1	1.3			

(a): percentage droge stof gerelateerd naar dit bepaald op een inerte drager ; (b): Voor de stalen afkomstig van Diest werd het uitvoeren van FTIR metingen tijdens de proefbehandeling prioritair geacht waardoor de exacte droogstofwaarde niet kon bekomen worden.

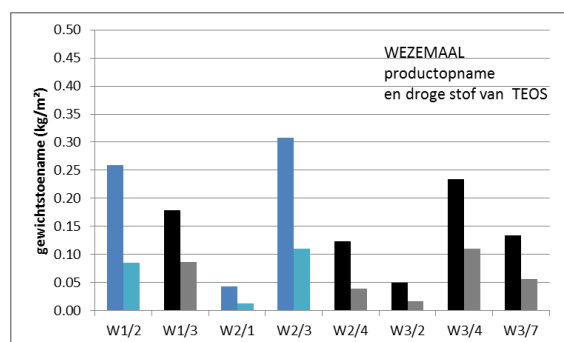
Onderstaande figuren (4 tot en met 7) geven per site de productopname en het droge stofgehalte aan TEOS (uitgedrukt in kg/m<sup>2</sup>) per staal weer. De zwarte en grijze staven betreffen de stalen behandeld met een 100 % oplossing, de donker- en lichtblauwe kolommen deze behandeld met een 75 g% oplossing. De zwarte, respectievelijk donkerblauwe staven stellen daarbij telkens de totale productopname (gewichtstoename in kg.m<sup>-2</sup>) voor, terwijl de grijze en lichtblauwe de hoeveelheid uitgehard product of het gehalte aan droge stof voorstellen (gewichtstoename in kg.m<sup>-2</sup>, 5 weken na de laatste behandeling).



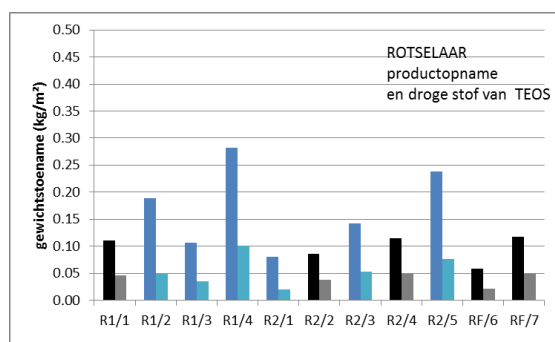
*Figuur 4. Productopname en droge stofgehalten van de stalen van de kernboring VLA10-4.1-B1 en losse fragmenten (Herent)*



*Figuur 5. Productopname en droge stofgehalten van de stalen van de kernboringen VLA10-4.1-B2 en B3 en losse fragmenten (Pellenberg)*



*Figuur 6. Productopname en droge stofgehalten van de stalen van de kernboringen VLA10-4.1-B4, B5 en B6 (Wezemaal)*



*Figuur 7. Productopname en droge stofgehalten van de stalen van de kernboringen VLA10-4.1-B7 en B8 en losse fragmenten (Rotselaar)*

Het gemiddeld opgenomen steenverstevigend product (100 % oplossing) door middel van capillaire absorptie per behandeling bedraagt 1.68 (± 1.10) l.m<sup>-2</sup> (enkel voor de 100% oplossing). De hoeveelheid aan geabsorbeerd product varieert echter sterk voor de verschillende stalen als gevolg van de sterke heterogeniteit van de ijzerzandsteen.

Indien per site de gemiddelde waarden van totaal verbruik voor 3 behandelingen aan 100% product wordt berekend, worden de laagste waarden bekomen voor Rotselaar en Diest, respectievelijk 1.0 en 1.7 l.m<sup>-2</sup>. De hoogste waarden worden voor de stalen van de site Pellenberg bekomen (3 l.m<sup>-2</sup>). Indien diezelfde berekeningen worden uitgevoerd voor 3 behandelingen met een 75% product, worden dit keer de laagste waarden voor Pellenbos bekomen (1.8 l.m<sup>-2</sup>) terwijl de hoogste voor Herent (2.6 l.m<sup>-2</sup>).



Voor elk staal is het berekende percentage droge stof lager dan het theoretische percentage zoals bepaald op de inerte drager. Deze lagere waarden zijn deels te verklaren door een gewichtsverlies als gevolg van het verkrumelen van de stalen en deels door een gereduceerde polymerisatiesnelheid zodat meer vluchtige TEOS-bestanddelen kunnen verdampen. Indien een gelijkaardige redenering wordt gevolgd voor de evaluatie van het percentage droge stof, gerelateerd naar het theoretische bepaald op een inerte drager, worden de laagste waarden bekomen voor de stalen van de site Pellenberg voor 3 behandelingen met het 100% product (68%) terwijl voor de overige sites dit varieert tussen 75 en 78 % (met uitzondering van deze van Diest waarvoor deze berekeningen niet werden uitgevoerd).

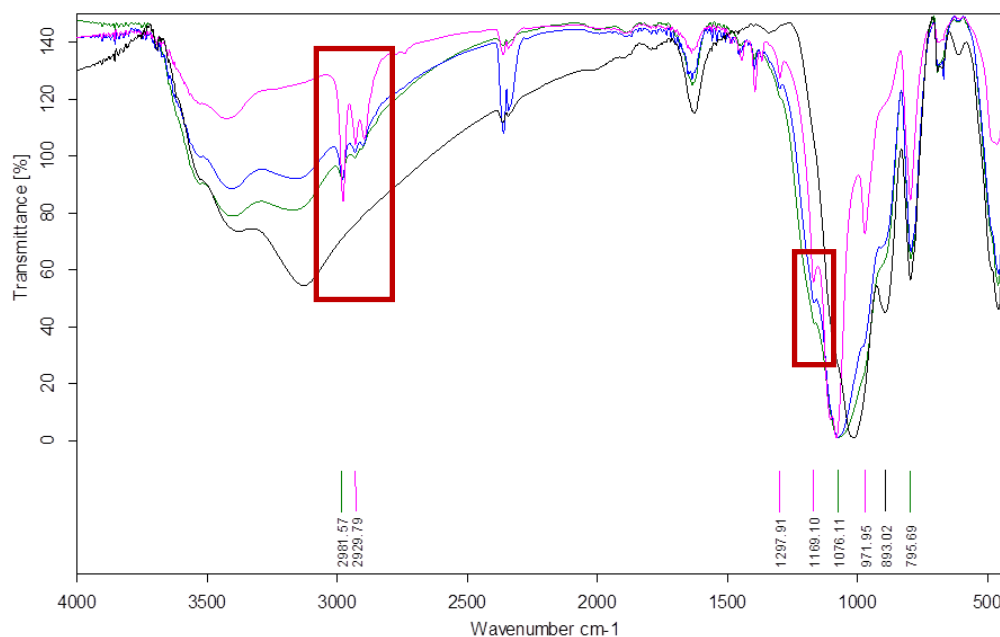
Concreet betekent dit dat de ijzerzandsteen van de site Pellenberg wel het hoogste verbruik aan verstevigend middel vertoont, maar dat daarentegen het gehalte aan uitgeharde  $\text{SiO}_2$  gel gevormd na polymerisatie lager is.

## 4.2. Opvolging van de polymerisatie van TEOS met behulp van FTIR

Het FTIR-onderzoek heeft als doel het polymerisatieproces van ethylsilicaat op te volgen. Het vermoeden bestaat immers dat in ijzerzandsteen het ethylsilicaat niet volledig polymeriseert als gevolg van de aanwezige kleimineralen, die de polymerisatie beïnvloeden en/of geheel of gedeeltelijk verhinderen.

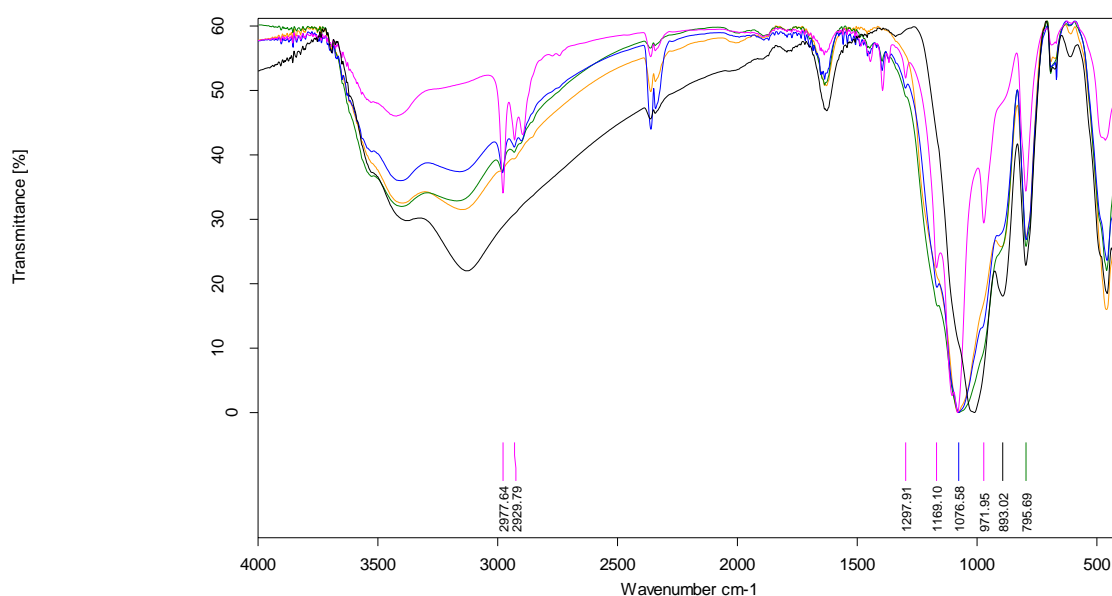
Figuur 8 illustreert de FTIR spectra van een met TEOS behandeld staal van Diestiaan ijzerzandsteen afkomstig van de site van Diest (D 12.3a) in drie verschillende stadia van hydrolyse en polymerisatie van het TEOS (roze, blauwe en groene curven) en dit vergeleken met een onbehandeld staal (zwarte curve). De voor TEOS typerende absorptiebanden bij  $2980\text{ cm}^{-1}$ ,  $2930\text{ cm}^{-1}$  en  $1168\text{ cm}^{-1}$  zijn duidelijk zichtbaar in het spectrum van het staal kort na de behandeling (roze curve). Dit illustreert de mogelijkheid van het detecteren van het niet gereageerde product in de ijzerzandsteen met behulp van FTIR.

Na verloop van tijd zijn de voor niet gereageerd TEOS typerende absorptiebanden minder sterk aanwezig. Het groen gekleurd FTIR spectrum, bekomen één maand na de behandeling, toont evenwel nog duidelijk aan dat het ethylsilicaat niet volledig is gepolymeriseerd. We dienen hier wel aan toe te voegen dat de evaluatie van de polymerisatiegraad gebaseerd is op de evolutie van de organische absorptiebanden, typerend voor de aanwezigheid van niet gereageerde ethoxy-groepen van TEOS. Gezien de absorptiebanden van uitgeharde gel ( $\text{SiO}_2$ ) op een gelijkaardige positie gelegen zijn als deze van de ondergrond, kunnen geen besluiten worden getrokken gerelateerd aan de hoeveelheid gevormde gel. Hiervoor dienen de waarden van percentage droge stof gehanteerd.



*Figuur 8. FTIR spectra van een met TEOS behandeld staal Diestiaan ijzerzandsteen in drie verschillende stadia van hydrolyse en polymerisatie van het TEOS. De zwarte curve geeft het absorptiespectrum van de onbehandelde ijzerzandsteen weer, de roze, blauwe en groene curven respectievelijk 30 minuten, 1 week en 1 maand na de verstevigende behandeling. De blauwe curve wordt verondersteld een opname te zijn tijdens de polymerisatie, de groene één maand na de behandeling. Echter ook in de groene curve kan de aanwezigheid van organische, en dus niet gereageerde ethoxygroepen van TEOS, nog worden waargenomen, wat wijst op een onvolledige polymerisatie van het TEOS.*

Dit was op zich voor ons een verantwoording, afwijkend van de praktijkervaring uit het verleden met dit verstevigend product, om de DRMS metingen minstens anderhalve maand na de laatste behandeling uit te voeren. Figuur 9 illustreert de FTIR spectra van stalen van de site van de Langenberg te Diest, waarbij de gele deze bekomen 3 maand na de verstevigende behandeling voorstelt. Hieruit kan worden afgeleid dat zo goed als geen absorptiebanden typerend voor organische bestanddelen, en dus voor niet gereageerde ethoxy-groepen, aanwezig zijn. Voor dit onderzoek vonden de DRMS-metingen plaats 1.5 tot 2 maanden na de laatste behandeling.



C:\DATA\Inord\Tanaqui\februari\D12.3 C voor behandeling.0	D12.3 C voor behandeling	Sample form	08/02/2013
C:\DATA\Inord\Tanaqui\februari\D12.3 C - 1 uur na behandeling.0	D12.3 C - 1 uur na behandeling	Sample form	08/02/2013
C:\DATA\Inord\Tanaqui\februari\D12.3 C - week na behandeling.0	D12.3 C - week na behandeling	Sample form	15/02/2013
C:\DATA\Inord\Tanaqui\februari\D12.3 C - maand na behandeling.0	D12.3 C - maand na behandeling	Sample form	08/03/2013
C:\DATA\Inord\D12.3-C 16 mei.0	D12.3/C 16 mei	Sample form	16/05/2013

Page 1/1

Figuur 9. FTIR spectra van staal D12.3, voor behandeling (zwart) en 1 uur (roos), 1 week (blauw), 1 maand (groen) en 3 maand (geel) na de verstevigende behandeling met TEOS.

### 4.3. Verstevigend effect

Een overzicht van de aard en de kenmerken van de verstevigende proefbehandeling en het steenverstevigend effect ervan is opgenomen in Tabel 5.

Tabel 5. Kenmerken van de verstevigende proefbehandeling uitgevoerd op Diestiaanse ijzerzandsteen van klassen I en II afkomstig van diverse sites. Wanneer een steenverstevigend effect werd waargenomen, wordt de vermoedelijke diepte van de behandelde zone vermeld.

Site	Staal	Hardheid	Behandeling <sup>(a)</sup>	Verbruik (l.m <sup>-2</sup> )	% droge stof	Verstevigend effect
<b>Herent, Roeselberg</b> VLA10-4.1-B1	H1/1	laag	100/3	4.8	49	geen
	H1/2	laag	75/2	1.5	28	geen
	H1/3	heterogeen	100/2	1.9	47	geen
	H1/4	heterogeen	75/3	1.3	34	geen
	H1/5	laag/matig	100/2	0.8	41	2 mm
	H1/6	laag	75/3	3.9	33	10 mm?
	H/F8	laag/matig	100/3	2.1	44	6 mm
	H/F9	matig/hoog	100/2	0.6	39	3 mm
	H/F10	heterogeen	100/3	0.8	45	geen
<b>Pellenberg, Gasthuisbos</b> VLA10-4.1-B2 VLA10-4.1-B3	P1/1	laag	75/2	3.6	27	geen
	P1/3	zeer laag	75/2	4.2	32	geen
	P1/4	zeer laag	100/3	4.9	48	12 mm
	P1/5	zeer laag	100/3	2.9	25	10 mm
	P1/6	heterogeen	100/2	2.4	46	geen
	P1/7	heterogeen	100/2	0.6	43	1 mm
	P1/8	hoog	100/2	0.3	24	geen
	P1/9	heterogeen/ holtes	100/2	1.6	38	15 mm?
	P1/10	laag	100/2	1.2	41	7 mm
	P2/1	laag	75/3	3.5	32	10 mm?
	P2/2	laag	75/3	1.2	35	7 mm
	P2/3	heterogeen/ laag	75/2	1.1	27	geen
	P2/4	heterogeen	100/3	1.1	49	geen
	P/F3	matig/hoog	75/3	0.6	34	3 mm?
	P/F4	hoog	75/2	0.5	19	5 mm?
<b>Wezemaal, Beninksberg</b> VLA10-4.1-B4 VLA10-4.1-B5 VLA10-4.1-B6	W1/2	laag	75/2	3.0	33	geen
	W1/3	heterogeen	100/3	2.0	49	geen
	W2/1	heterogeen	75/3	0.5	28	geen
	W2/3	laag	75/3	3.5	36	1 mm
	W2/4	laag	100/2	1.4	32	2 mm
	W3/2	heterogeen	100/2	0.6	35	geen
	W3/4	laag	100/3	2.7	47	6 mm
	W3/7	laag	100/3	1.5	42	2 mm
<b>Rotselaar, Middelberg</b> VLA10-4.1-B7 VLA10-4.1-B8	R1/1	heterogeen	100/2	1.3	42	4 mm
	R1/2	heterogeen	75/3	2.2	27	geen
	R1/3	laag/matig	75/3	1.2	33	12 mm
	R1/4	laag	75/2	3.2	36	5 mm
	R2/1	laag	75/2	0.9	24	3 mm
	R2/2	laag/matig	100/3	1.0	44	geen
	R2/3	laag/matig	75/3	1.6	37	geen
	R2/4	laag	100/2	1.3	42	geen
	R2/5	laag	75/3	2.7	32	geen
	R/F6	matig	100/2	0.7	37	3 mm
	R/F7	laag	100/2	1.3	43	3 mm
<b>Diest, Langenberg</b>	D4.1	laag	100/3	2.3	-	geen
	D5.1A	laag	100/3	1.6	-	geen
	D5.1B	heterogeen	100/3	0.7	-	5 mm?
	D6.1	heterogeen	100/3	1.2	-	4 mm
	D7.4	laag	100/3	2.8	-	geen
	D8.5	laag	100/3	1.7	-	geen
	D9.2	laag	100/3	1.2	-	3 mm
	D11.2	laag/matig	100/3	1.6	-	geen
	D12.3	laag	100/3	1.4	-	4 mm
	D13.3A	laag	100/3	4.0	-	11 mm
	D13.3B	matig/hoog	100/3	1.0	-	2 mm
	D15.3	laag	100/3	1.3	-	2 mm

(a): 100 of 75 refereren naar de concentratie aan actief bestanddeel ethylsilicaat van het gebruikte consoliderend middel, meer bepaald 100% of 75%. Het laatste cijfer verwijst naar het aantal behandelingen, respectievelijk 2 of 3.



Voor elke site wordt geen direct verband bekomen tussen verbruik/percentage droge stof en een verstevigend effect. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van een aantal resultaten bekomen met het 100% product.

*Site Roeselberg te Herent:* staal H1/1 vertoont een totaal verbruik aan  $4.8 \text{ l.m}^{-2}$  en een percentage uitgehard product gerelateerd aan het theoretische van 49%, doch geen verstevigend effect. Staal H/F8 vertoont een gelijkaardige waarde van percentage droge stof, doch een verbruik dat de helft bedraagt van dit van H1/1 en een verstevigend effect tot 6 mm.

*Site Gasthuisbos te Pellenberg:* staal P1/10 vertoont een totaal verbruik aan  $1.2 \text{ l.m}^{-2}$ , een percentage uitgehard product gerelateerd aan het theoretische van 41% en een verstevigend effect tot 7 mm diepte. Staal P1/6 daarentegen wordt gekenmerkt door een verbruik dat het dubbele is van dit van P1/10 en een vrij vergelijkbaar percentage droge stof (46%) doch geen verstevigend effect.

*Site Beninksberg te Wezemaal:* Stalen W1/3 en W3/4 hebben een verbruik dat principieel niet extreem verschilt (respectievelijk  $2.0$  en  $2.7 \text{ l.m}^{-2}$ ) en een gemiddeld percentage droge stof van 48%; het eerste staal vertoont geen verstevigend effect terwijl het tweede wel.

*Site Middelberg te Rotselaar:* diverse stalen, zoals R1/1, R2/4 en R/F7, worden gekenmerkt door een verbruik van  $1.3 \text{ l.m}^{-2}$  en een percentage droge stof van 42%. R2/4 vertoont geen verstevigend effect terwijl de overige wel.

Concreet kan uit deze resultaten worden afgeleid dat geen eenduidige correlatie tussen verbruik-hoeveelheid afgezet uitgehard product en verstevigend effect wordt bekomen. De evaluatie van het verstevigend effect zal bijgevolg statistisch worden benaderd.

Een (mogelijk) steenverstevigend effect wordt waargenomen voor ongeveer de helft van de behandelde stalen, waarvan 40% een duidelijk verstevigend effect vertoont en 15% een mogelijk verstevigend effect. De diepte van het verstevigend effect varieert sterk met waarden tussen 1 en 12 mm. De gemiddelde diepte van de verstevigde zone bedraagt 4 mm. Een overzicht per site van de stalen waarin vermoedelijk een verstevigend effect werd waargenomen is weergegeven in Tabel 6. Hieruit kan worden afgeleid dat meer dan de helft van de stalen van Herent geen verstevigend effect vertoont. Voor deze van Rotselaar en in het bijzonder Pellenberg en Diest is het verstevigend effect globaal positiever gezien voor het merendeel van de stalen een verstevigend effect wordt gemeten. Voor de stalen van Wezemaal wordt een verstevigend effect gemeten voor de helft van de onderzochte stalen. Concreet kan hieruit worden afgeleid dat, voor zover de eigenschappen van een verstevigende behandeling uitgevoerd op weinig/niet verouderde en natuurlijk verouderde ijzerzandsteen gelijkaardig zijn, in geval van verwerking gemiddeld een positief effect wordt bekomen op de stalen van Pellenberg en Diest, en in mindere mate deze van Rotselaar.

Wat betreft de invloed van de aard van de behandeling, zijnde een 100% of een 75% oplossing en 2 of 3 behandelingen, op het verstevigend effect kan worden gesteld dat minder positieve resultaten worden bekomen in geval van een 75 % product (8 van de 18 stalen). In geval een 100% product wordt gebruikt vertonen 21 van de 36 stalen een positief effect. Een duidelijk invloed van het aantal behandelingen op het verstevigend effect wordt bekomen in geval van het 75 % product: indien 2 behandelingen worden uitgevoerd vertonen 5 van de 8 stalen geen verstevigend effect. Een bijkomende behandeling verhoogt het aandeel aan stalen dat een verstevigend effect vertoont: 5 van de 10 stalen. Een gelijkaardige invloed wordt niet bekomen voor het 100% product.

Tabel 6: Overzicht van het verstevigend effect van de proefstalen per site.

Site (aantal stalen)	Herent (9)		Pellenberg (15)		Wezemaal (8)		Rotselaar (11)		Diest (12)		Totaal (55)
	d (mm)	#	d (mm)	#	d (mm)	#	d (mm)	#	d (mm)	#	
Versteving (mm in de diepte)	2 6 3	<b>3</b>	12 1 4 7	<b>4</b>	1 2 6 2	<b>4</b>	4 5 3 3 3	<b>5</b>	4 3 4 11 2 2	<b>6</b>	<b>22 (40%)</b>
Mogelijke versteving (a) (mm in de diepte)	10	<b>1</b>	15 10 10 3 5	<b>5</b>		<b>0</b>	12	<b>1</b>	5	<b>1</b>	<b>8 (15%)</b>
Geen versteving		<b>5</b>		<b>6</b>		<b>4</b>		<b>5</b>		<b>5</b>	<b>25 (45%)</b>

(a): Vanwege de heterogeniteit van de steen is het verstevigend effect soms moeilijk te bepalen

## 5. Overzicht van de DRMS-metingen

Hiernavolgend worden per staal de geschiktheidsklasse, de consolidatiegraad bepaald op basis van de geluidssnelheid en de hardheidsprofielen voor en na verstevigende proefbehandeling voorgesteld.

Hardheidsprofielen die door slijtage van de boor afwijkingen in de weerstandswaarden vertonen werden gecorrigeerd volgens de methodiek besproken in hoofdstuk 5 *Kalibratie DRMS metingen*. Het betreft de zwart en bruin gekleurde curves in de hiernavolgende profielen.

De blauwe en rode curves zijn de hardheidsprofielen die niet gecorrigeerd werden. Correctie was met name niet nodig omdat de gebruikte boor nog geen slijtage vertoonde of omdat de geregistreerde weerstand dermate laag was dat de afwijking erop verwaarloosbaar was.

Volgende kleurcodes zijn gebruikt in de hiernavolgende grafieken:

**Blauwe curve:** Hardheidsprofiel **vóór** steenverstevigende proefbehandeling.

**Zwarte curve:** Gecorrigeerd hardheidsprofiel **vóór** steenverstevigende proefbehandeling. De correcties voor de boorslijtage zijn uitgevoerd aan de hand van een kalibratiemethode gebruik makende van een referentiemateriaal.

**Rode curve:** Hardheidsprofiel **na** steenverstevigende proefbehandeling.

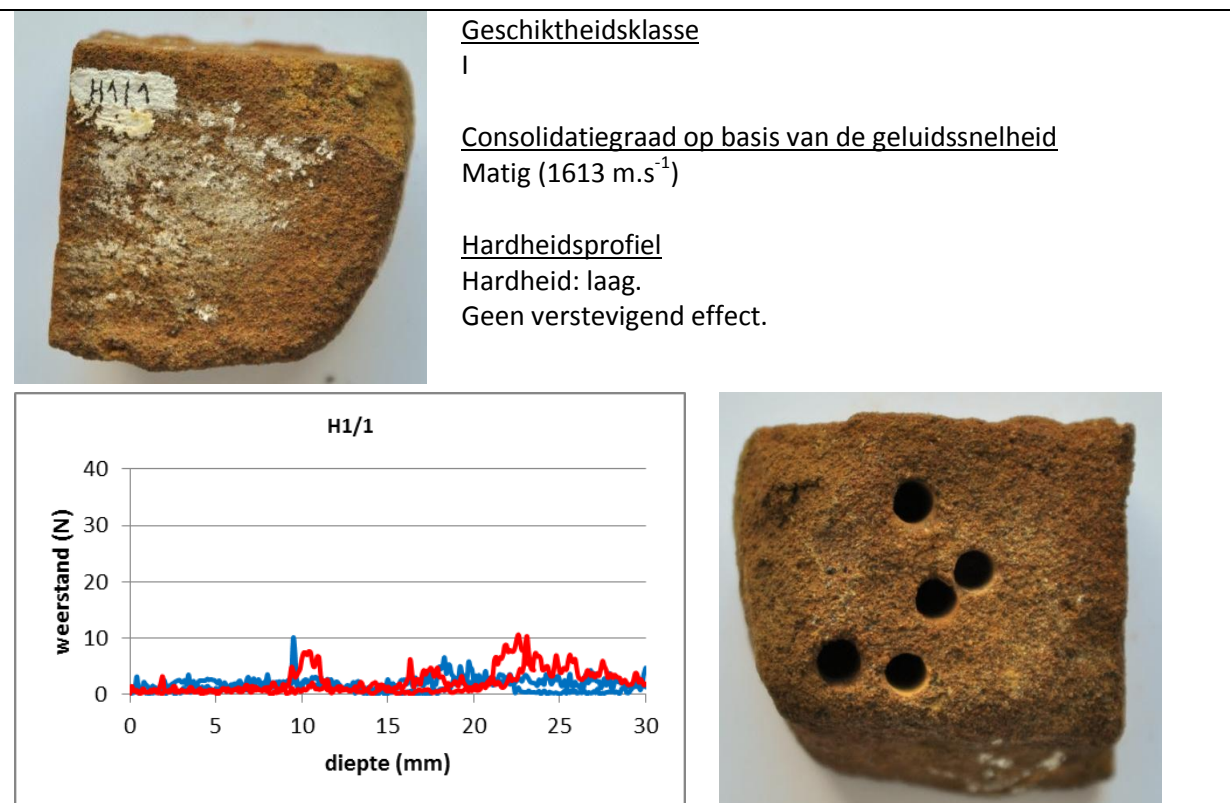
**Bruine curve:** Gecorrigeerde hardheidsprofiel **na** steenverstevigende proefbehandeling. De correcties voor de boorslijtage zijn uitgevoerd aan de hand van een kalibratiemethode gebruik makende van een referentiemateriaal

Voor elk staal wordt een afbeelding weergegeven van de bovenzijde (links boven) en de boorzijde (rechts onder) na het uitvoeren van de DRMS-metingen.

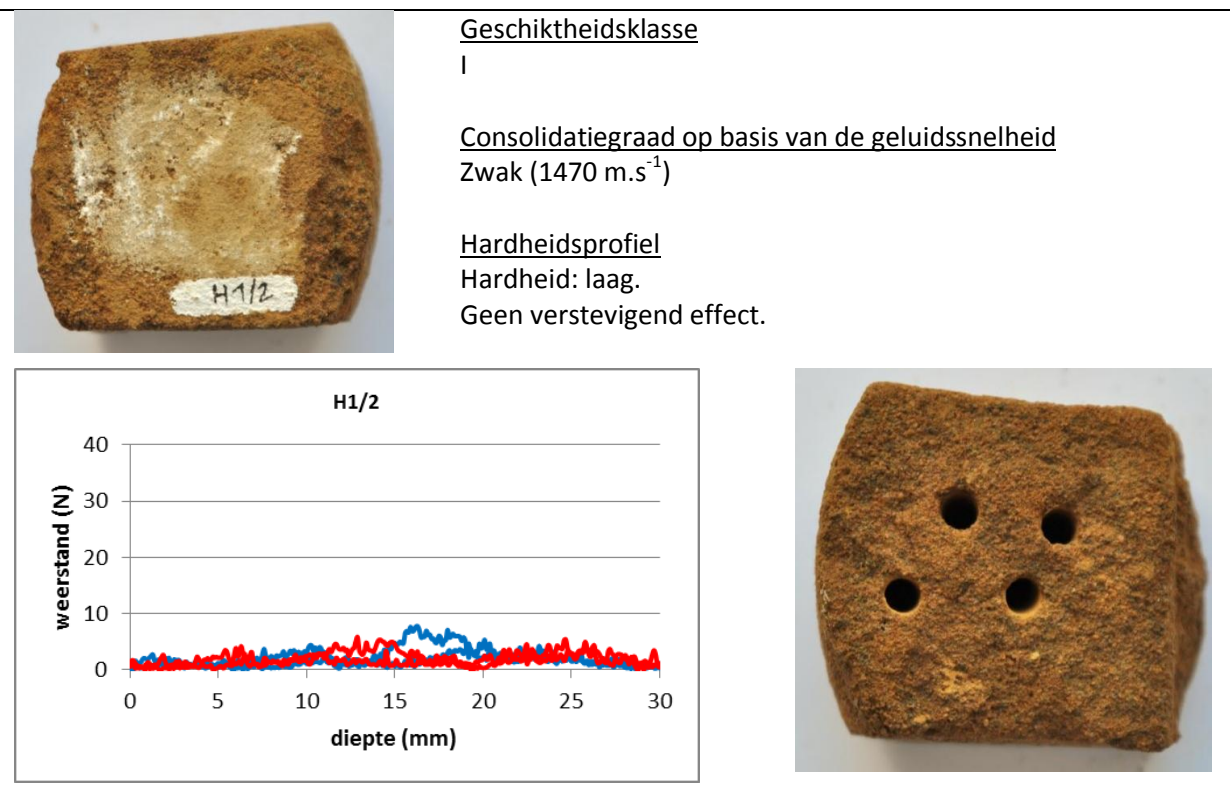
## 5.1. Roeselberg (Herent)

### 5.1.1. VLA10-4.1-B1

#### staal H1/1



#### staal H1/2





### staal H1/3



#### Geschiktheidsklasse

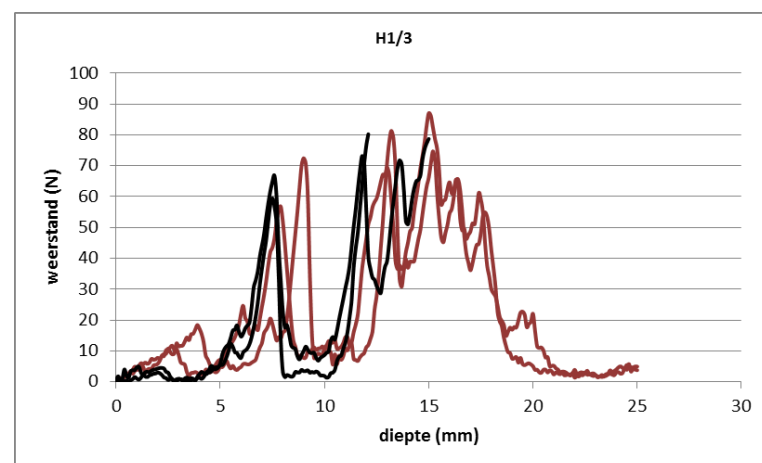
I

#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

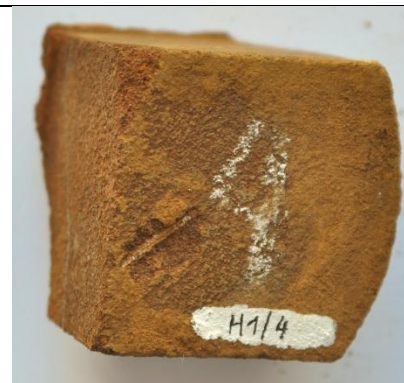
Goed ( $2620 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen.  
Geen versterkend effect.



### staal H1/4



#### Geschiktheidsklasse

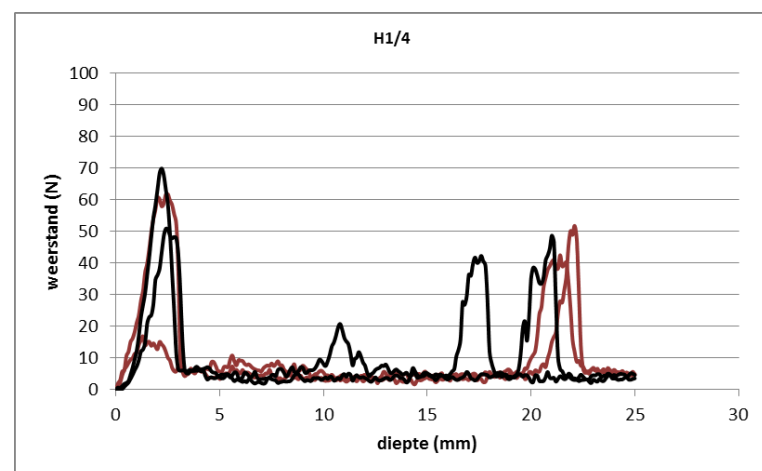
I

#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2210 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: Heterogeen.  
Geen versterkend effect.



### staal H1/5



#### Geschiktheidsklasse

I

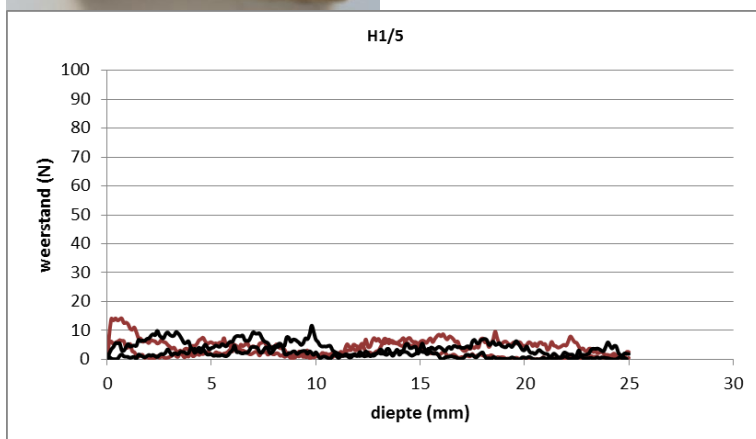
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2200 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: Laag tot matig.

Verstevend effect in de eerste 2 mm.



### staal H1/6



#### Geschiktheidsklasse

I

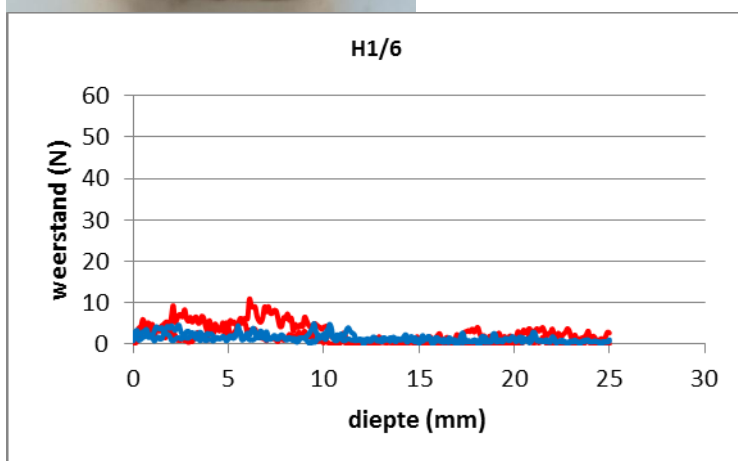
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Zwak ( $1490 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag.

Mogelijk verstevend effect in de eerste 10 mm.



### 5.1.2. Losse fragmenten

#### staal HF/8



#### Geschiktheidsklasse

II

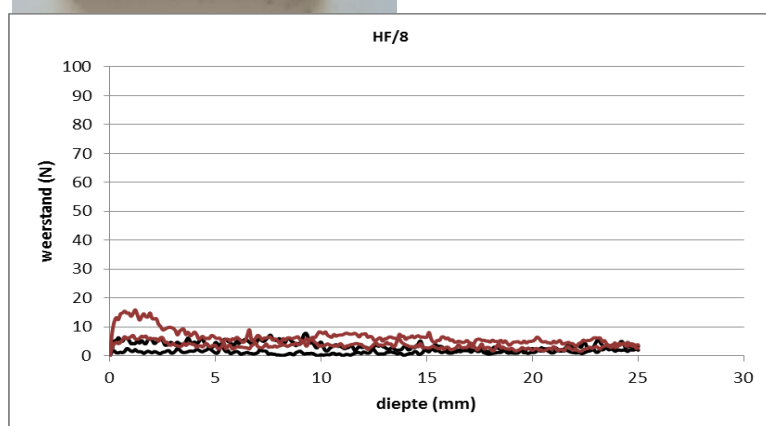
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2200 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag tot matig.

Verstevigend effect in de eerste 6 mm.



#### staal HF/9



#### Geschiktheidsklasse

I

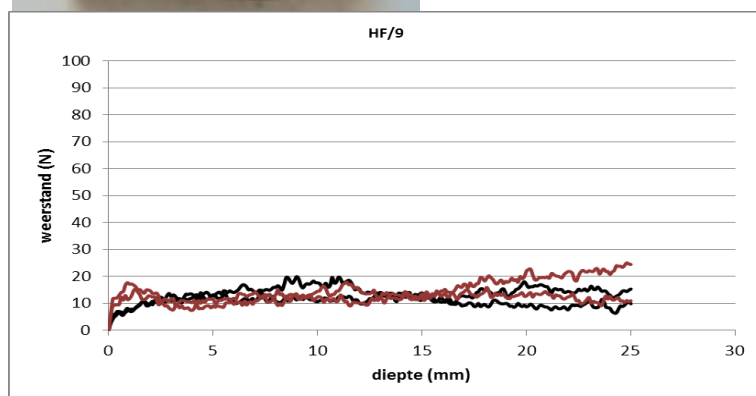
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2500 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: matig tot hoog.

Verstevigend effect in de eerste 3 mm.





**staal HF/10**



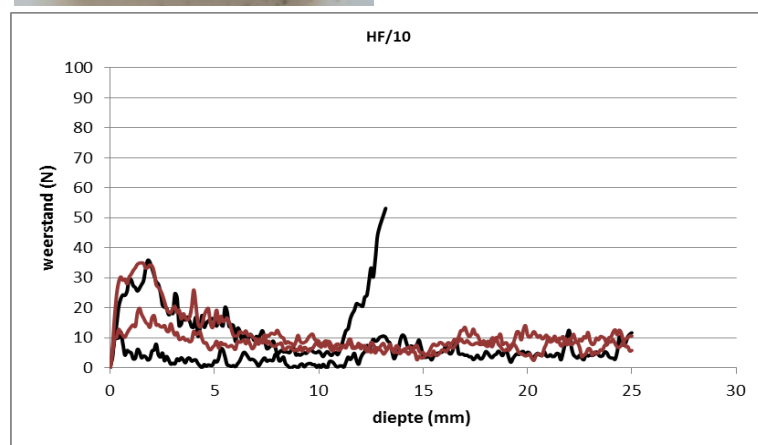
Geschiktheidsklasse

I

Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid  
Goed ( $2000 \text{ m.s}^{-1}$ )

Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen.  
Geen verstevigend effect.





## 5.2. Gasthuisbos (Pellenberg)

### 5.2.1. VLA10-4.1-B2

#### staal P1/1



#### Geschiktheidsklasse

II

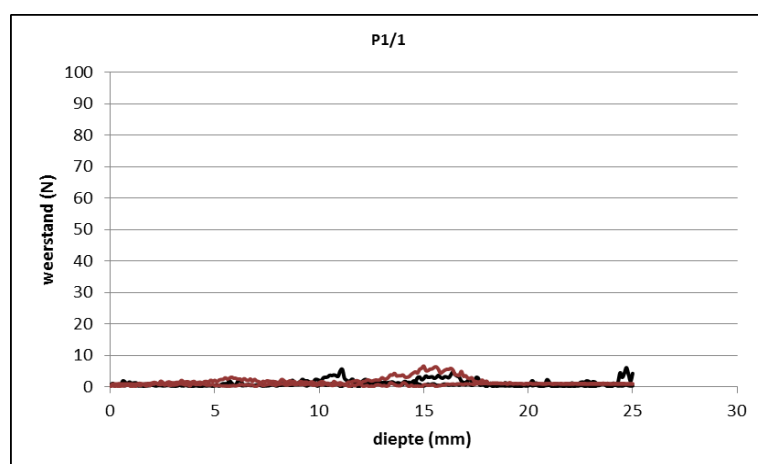
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Zwak ( $640 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag.

Geen verstevigend effect.



#### staal P1/3



#### Geschiktheidsklasse

I-II

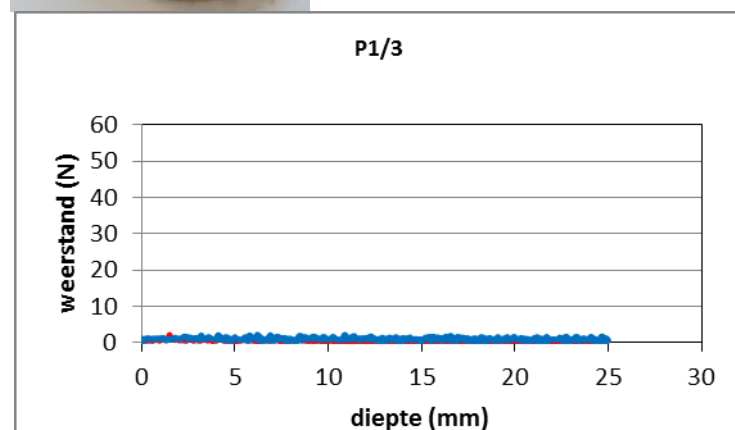
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Zwak ( $1100 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag.

Geen verstevigend effect.



### staal P1/4



#### Geschiktheidsklasse

I-II

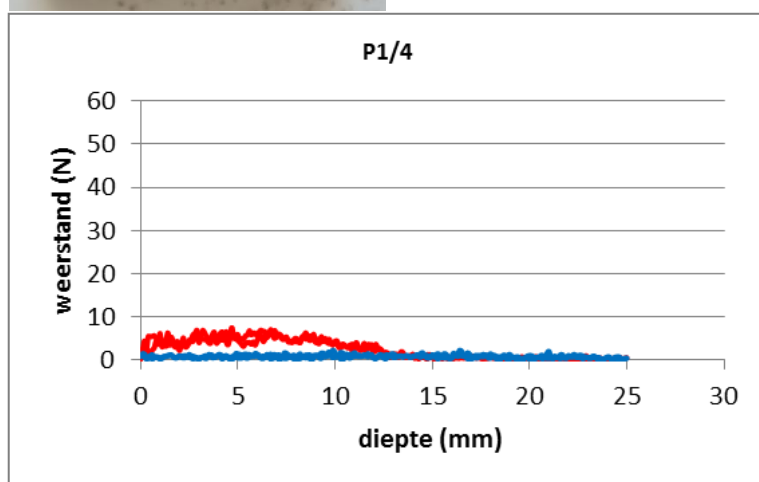
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Zwak ( $1080 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag.

Duidelijk verstevigend effect in de eerste 12 mm.



### staal P1/5



#### Geschiktheidsklasse

II

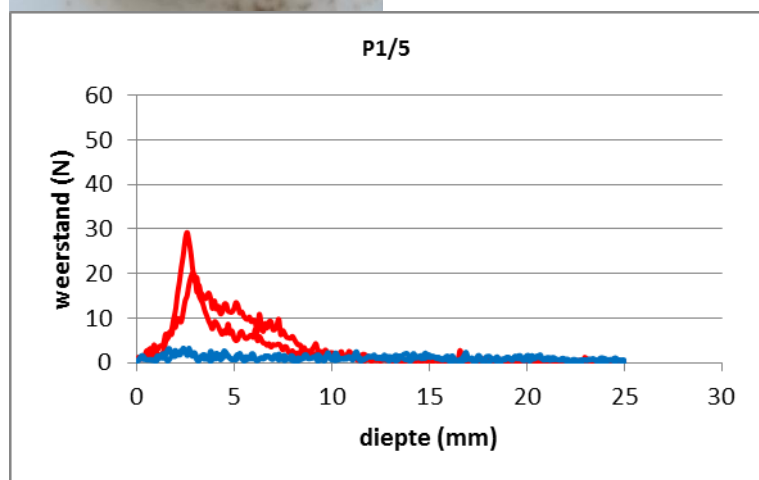
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Zwak ( $680 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: Laag.

Mogelijk verstevigend effect in de eerste 10 mm.



### staal P1/6



#### Geschiktheidsklasse

II

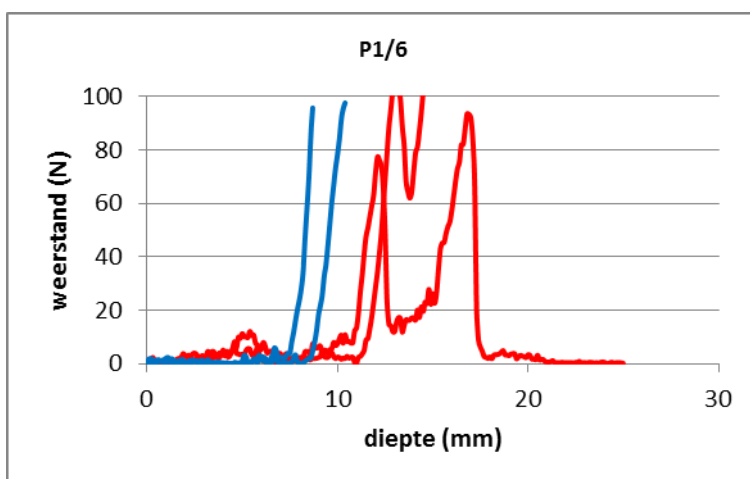
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Zwak ( $860 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen.

Geen verstevigend effect.



### staal P1/7



#### Geschiktheidsklasse

I

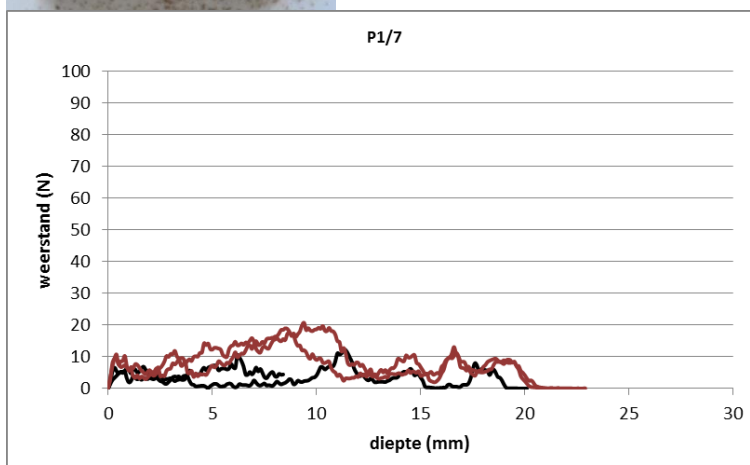
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2010 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen.

Geen verstevigend effect.





### staal P1/8



#### Geschiktheidsklasse

I

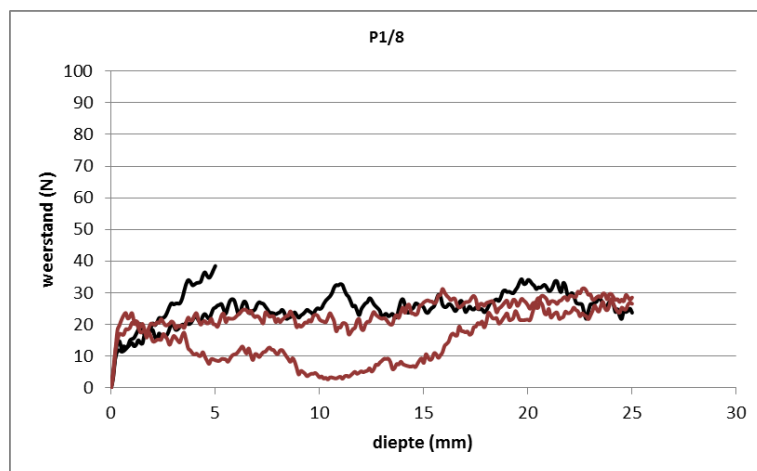
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2360 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid Hoog.

Verstevigend effect in de eerste mm.



### staal P1/9



#### Geschiktheidsklasse

I-II

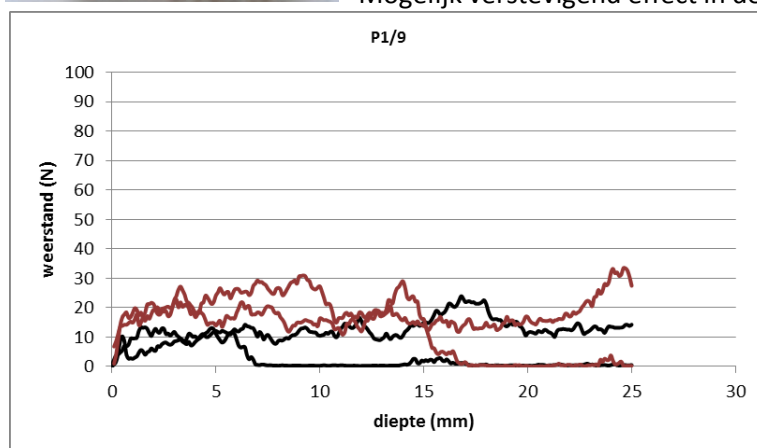
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Matig ( $1610 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen met grote holtes.

Mogelijk verstevigend effect in de eerste 15 mm.





**staal P1/10**



Geschiktheidsklasse

I-II

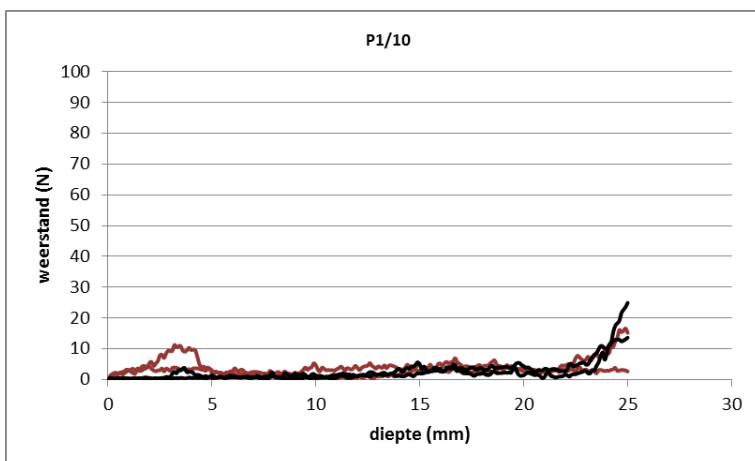
Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Zwak ( $1310 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Hardheidsprofiel

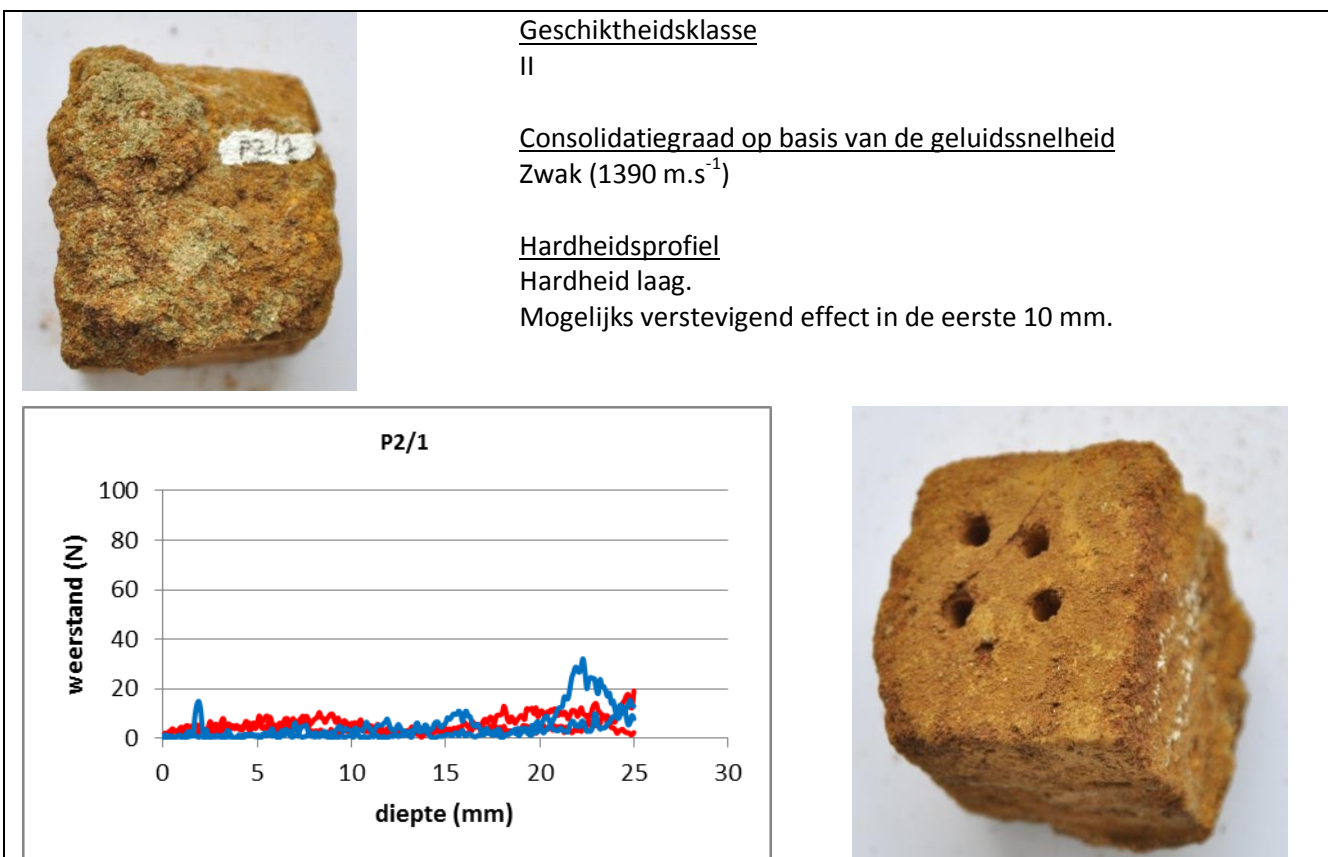
Hardheid: laag.

Verstevigend effect in de eerste 4 mm.

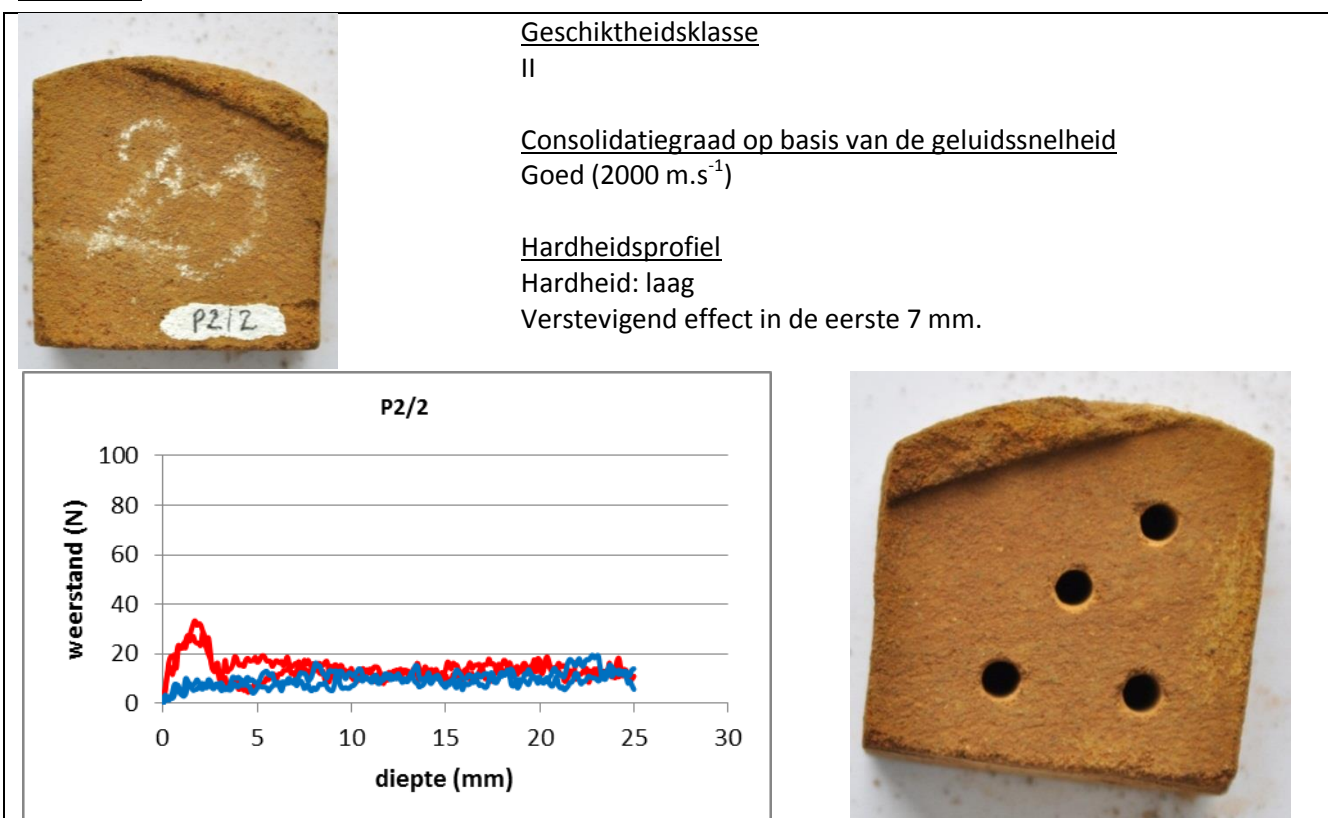


### 5.2.2. VLA10-4.1-B3

#### staal P2/1



#### staal P2/2



### staal P2/3



#### Geschiktheidsklasse

II

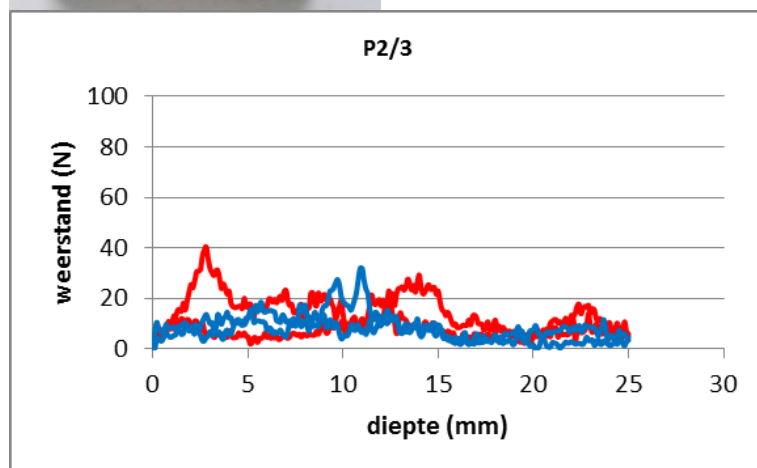
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Zwak ( $1000 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen.

Geen versterkend effect.



### staal P2/4



#### Geschiktheidsklasse

I-II

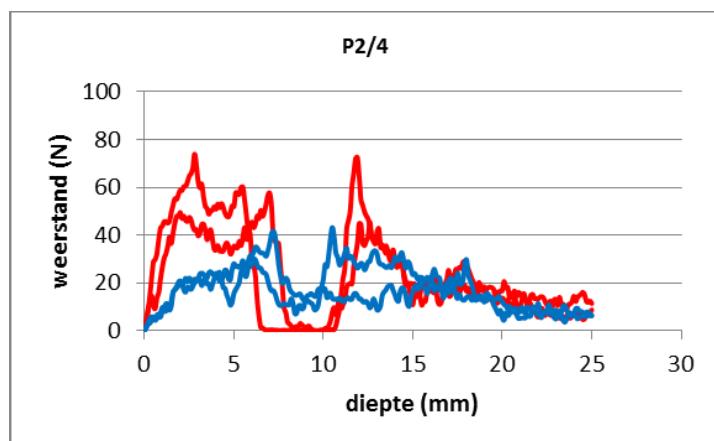
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Matig ( $1930 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen met holte.

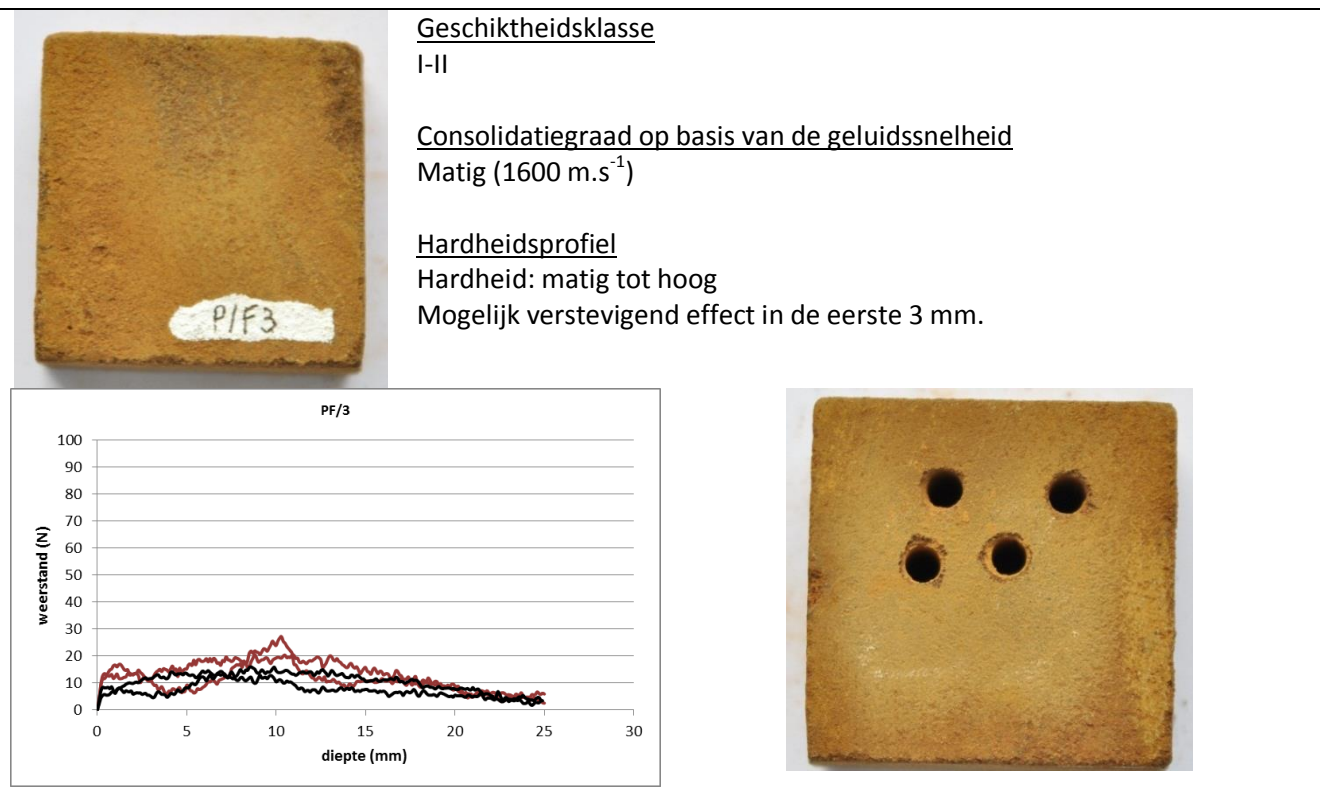
Geen versterkend effect.



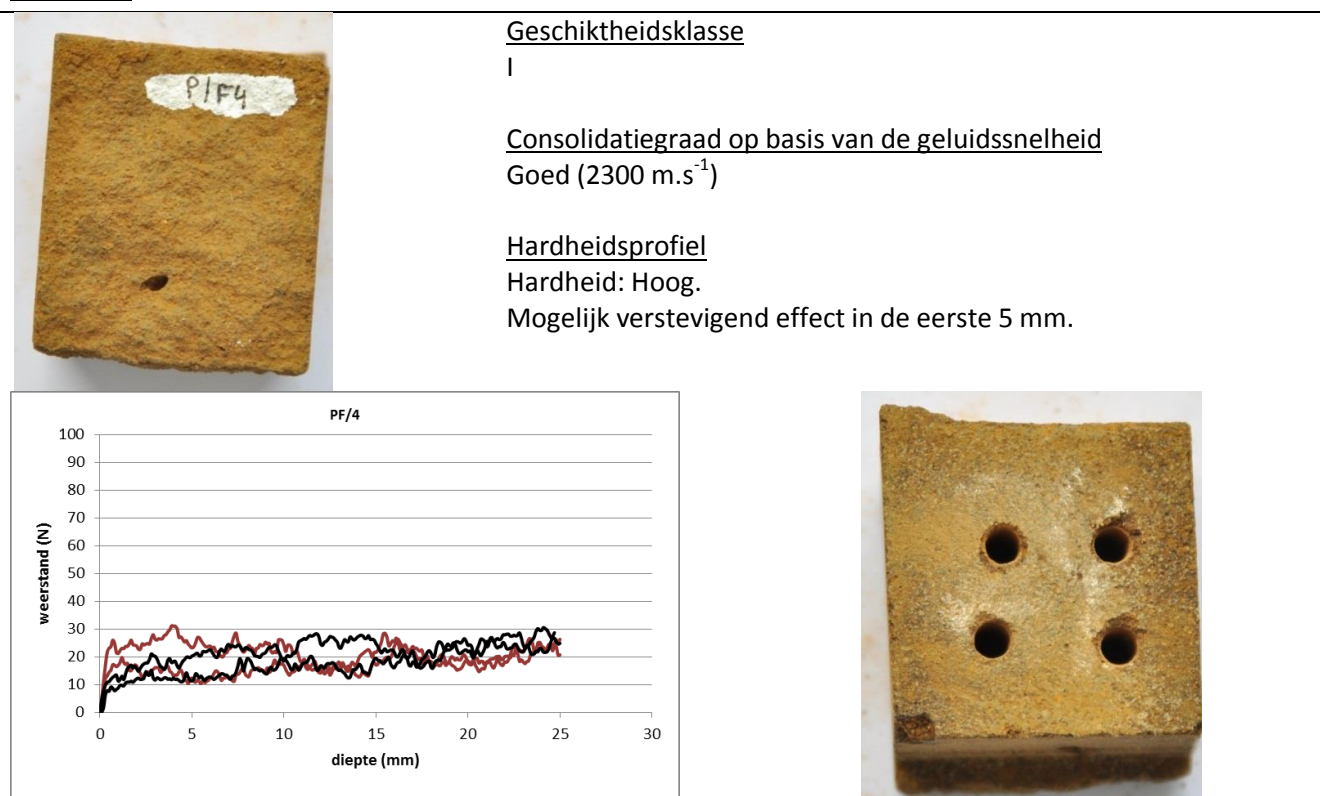


### 5.2.3. Losse fragmenten

#### staal P/F3



#### staal P/F4





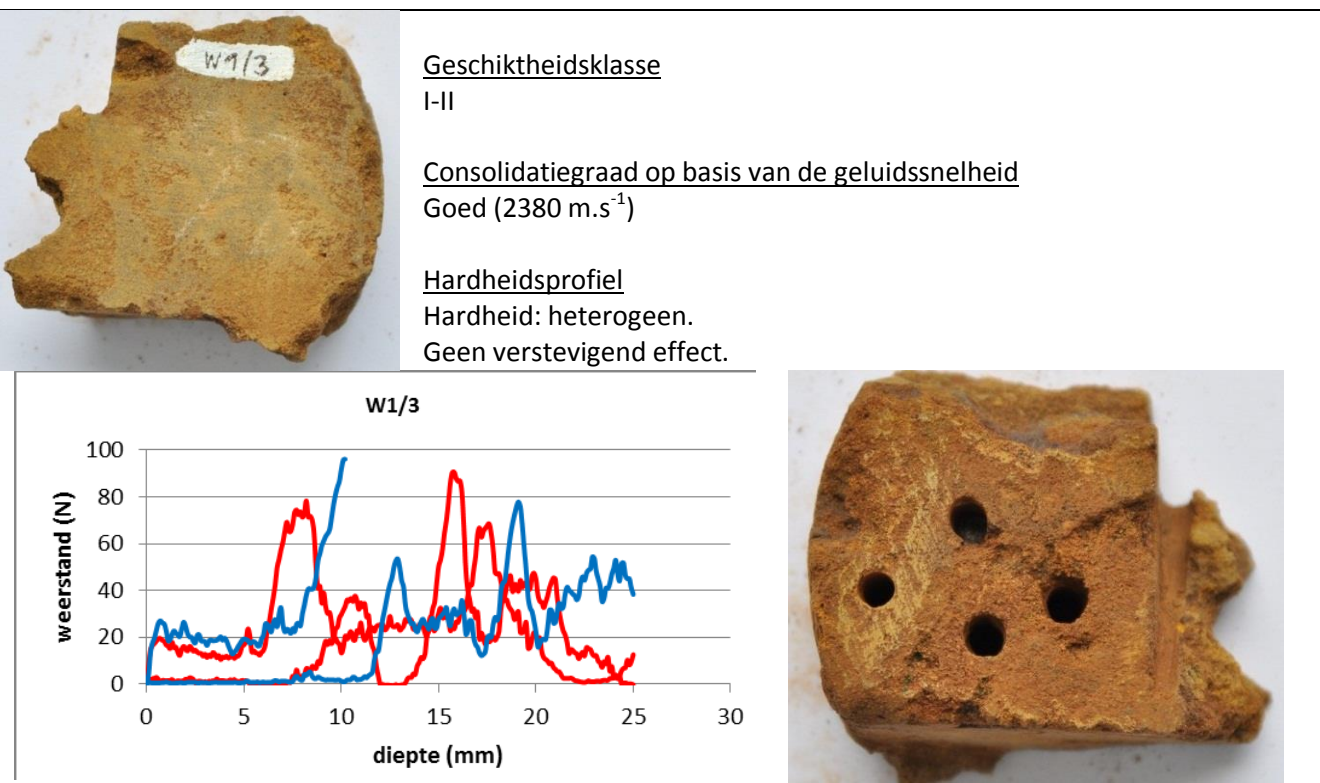
### 5.3. Beninksberg (Wezemaal)

#### 5.3.1. VLA10-4.1-B4

##### staal W1/2



##### staal W1/3



### 5.3.2. VLA10-4.1-B5

#### staal W2/1



##### Geschiktheidsklasse

I

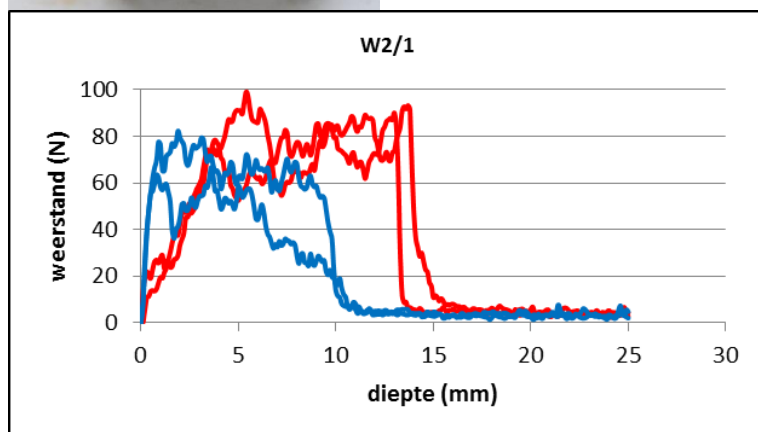
##### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2500 \text{ m.s}^{-1}$ )

##### Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen.

Geen versterkend effect.



#### staal W2/3



##### Geschiktheidsklasse

II

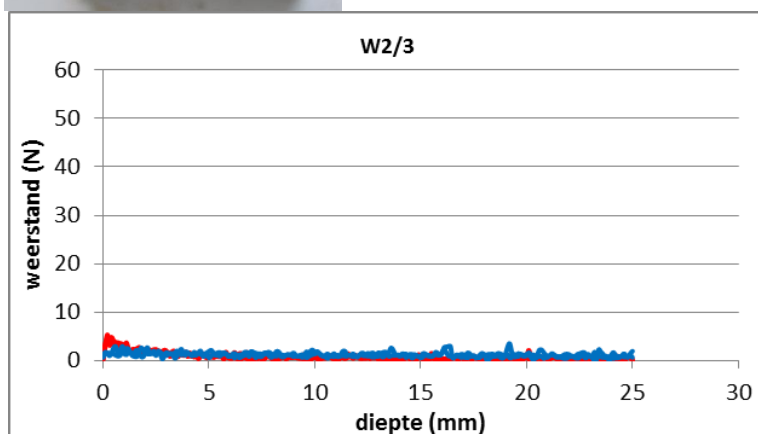
##### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Matig ( $1660 \text{ m.s}^{-1}$ )

##### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag.

Versterkend effect tot 1 mm diepte.



**staal W2/4**



Geschiktheidsklasse

II

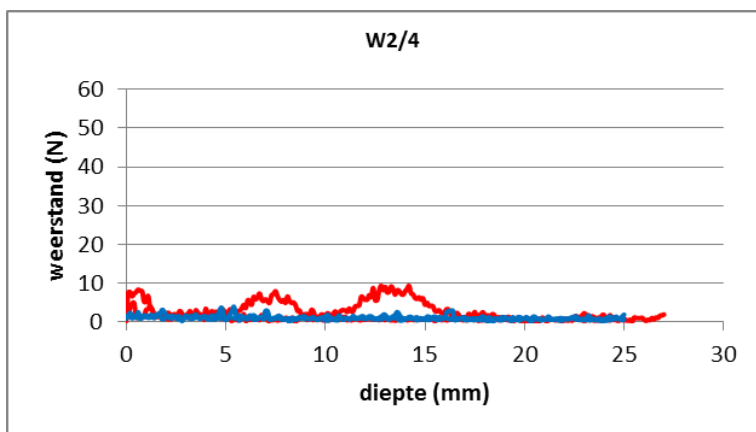
Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Matig ( $1530 \text{ m.s}^{-1}$ )

Hardheidsprofiel

Hardheid: Laag.

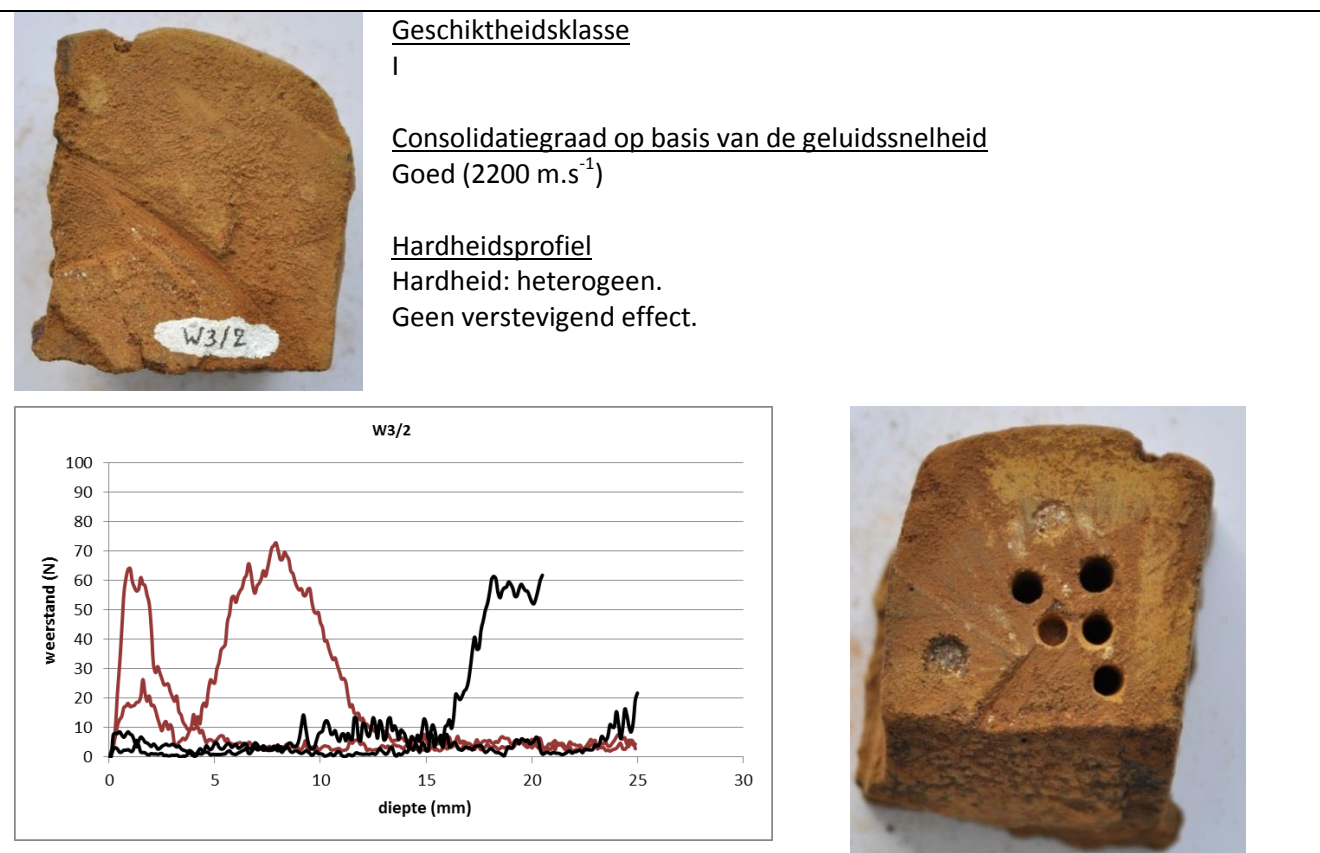
Verstevigend effect tot 2 mm diepte.



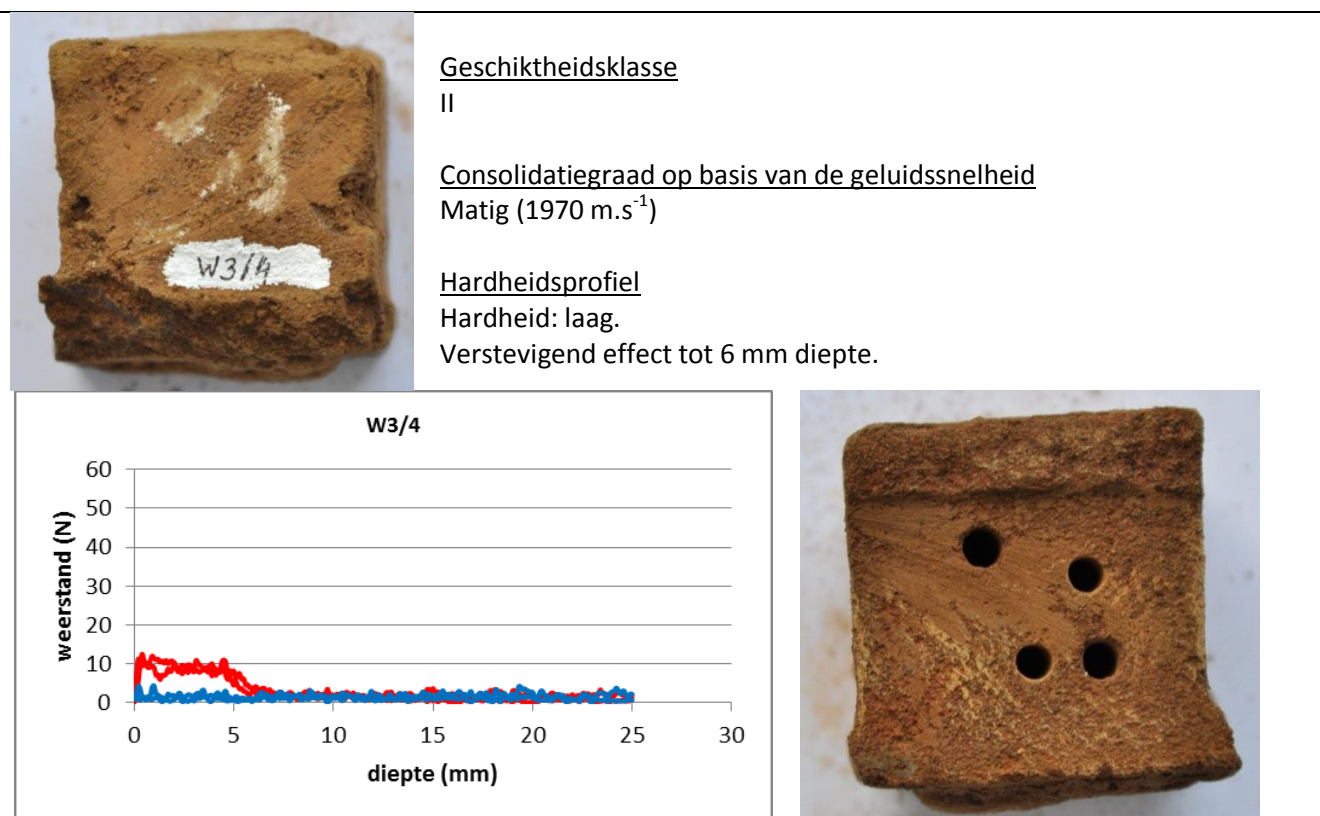


### 5.3.3. VLA10-4.1-B6

#### staal W3/2



#### staal W3/4





**staal W3/7**



Geschiktheidsklasse

II

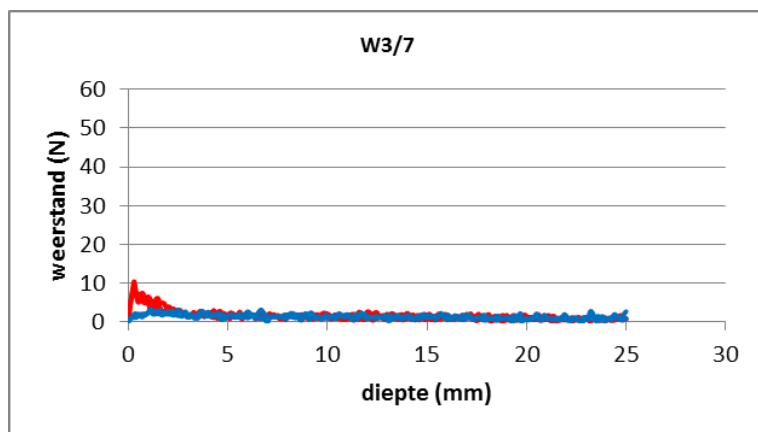
Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Matig ( $1580 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Hardheidsprofiel

Hardheid: laag.

Versterkend effect tot 2 mm diepte.



## 5.4. Middelberg (Rotselaar)

### 5.4.1. VLA10-4.1-B7

#### staal R1/1



#### Geschiktheidsklasse

I-II

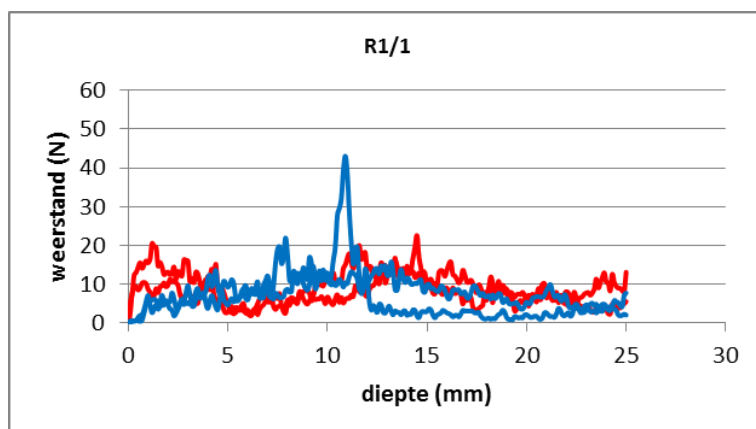
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2050 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen.

Verstevigend effect in de eerste 4 mm.



#### staal R1/2



#### Geschiktheidsklasse

I

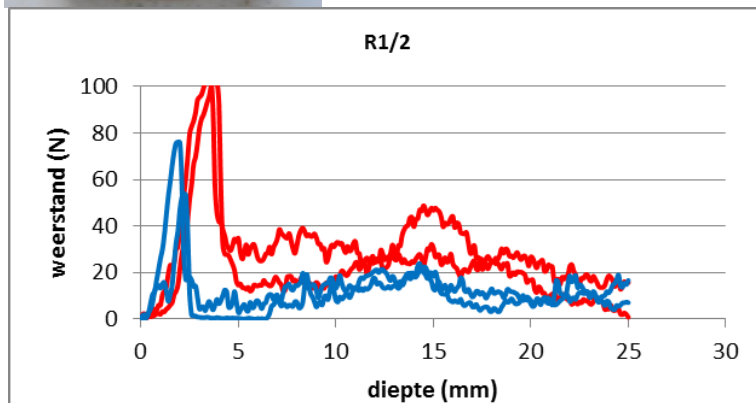
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Matig ( $1780 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen

Geen verstevigend effect.



### staal R1/3



#### Geschiktheidsklasse

I

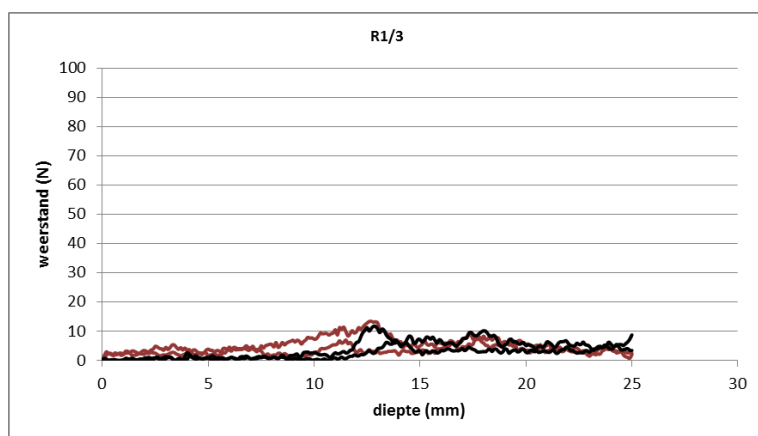
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2030 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag tot matig.

Mogelijk licht verstevend effect tot 12 mm.



### staal R1/4



#### Geschiktheidsklasse

II

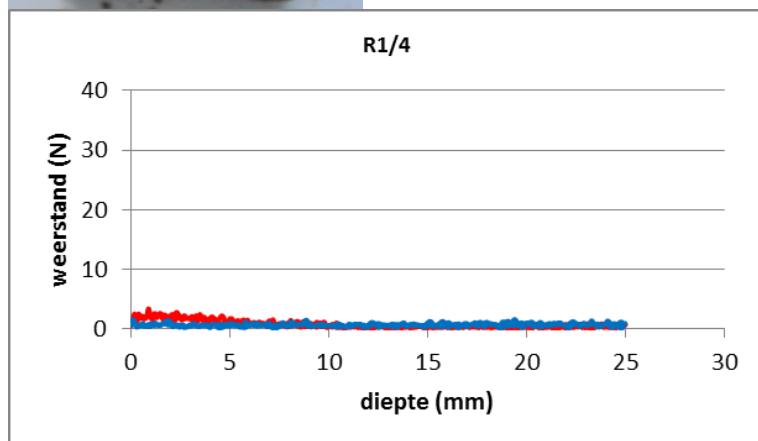
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Zwak ( $890 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag.

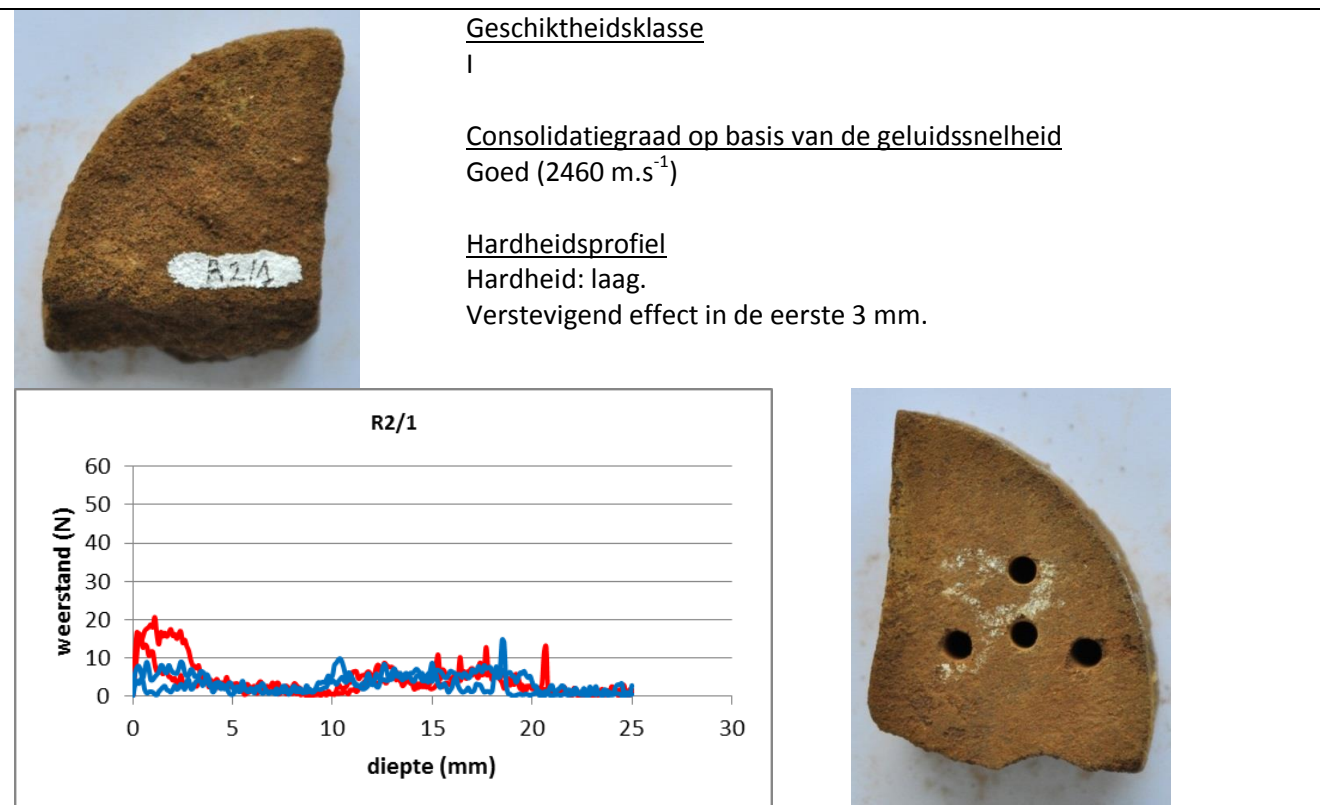
Licht verstevend effect in de eerste 5 mm.





### 5.4.2. VLA10-4.1-B8

#### staal R2/1



#### staal R2/2





### staal R2/3



Geschiktheidsklasse

II

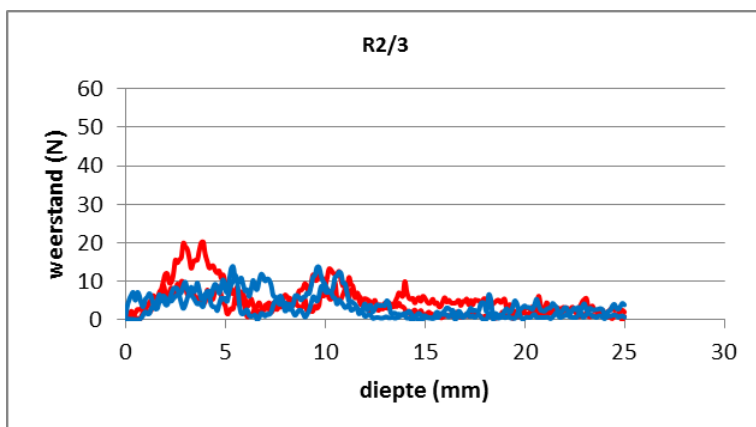
Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2030 \text{ m.s}^{-1}$ )

Hardheidsprofiel

Hardheid: laag tot matig

Geen versterkend effect.



### staal R2/4



Geschiktheidsklasse

II

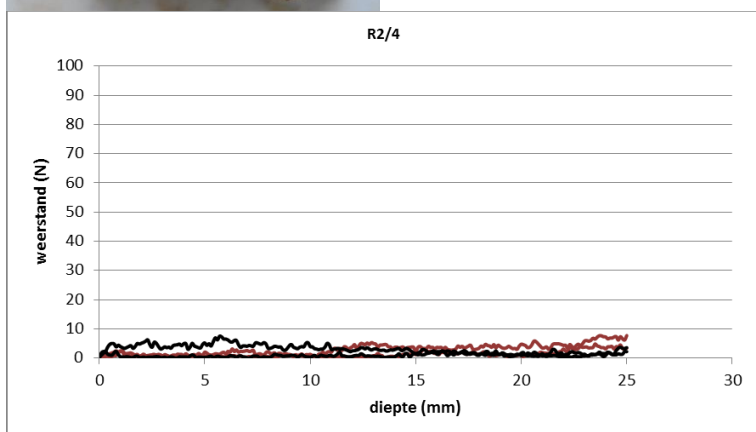
Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Matig ( $1800 \text{ m.s}^{-1}$ )

Hardheidsprofiel

Hardheid: laag.

Geen versterkend effect.



### staal R2/5



#### Geschiktheidsklasse

I

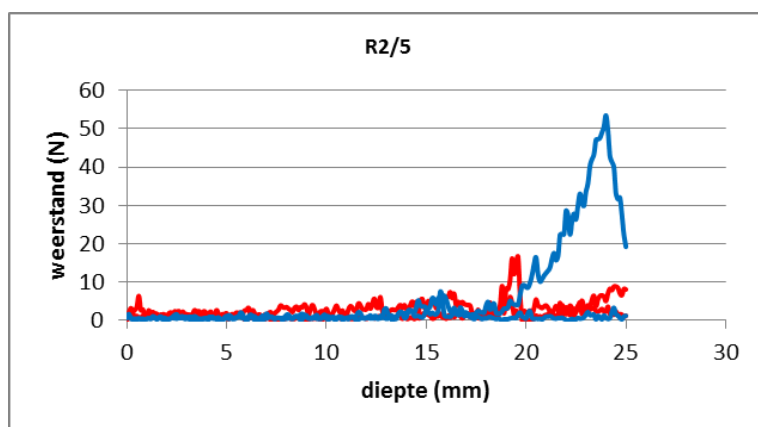
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2160 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

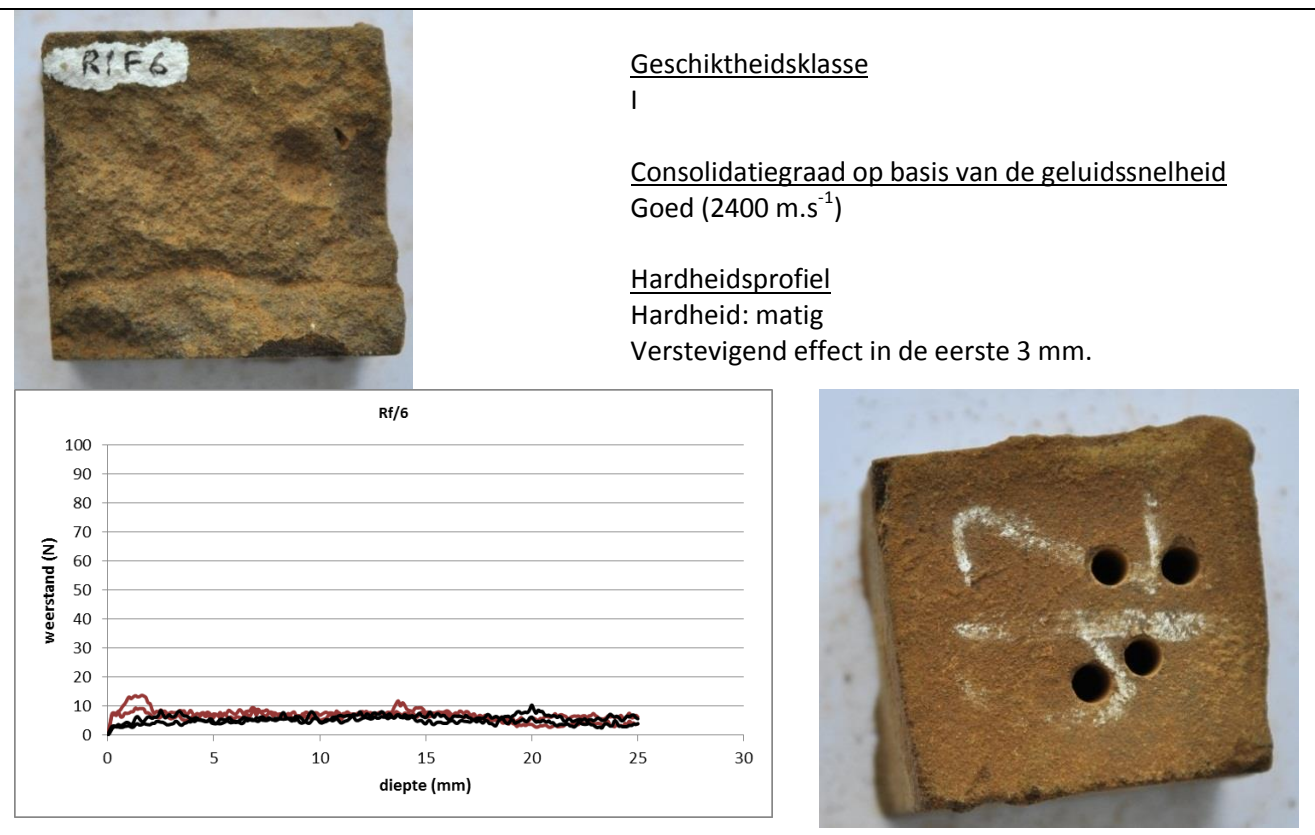
Hardheid: doorgaans laag, één harde zone.

Geen verstevigend effect.

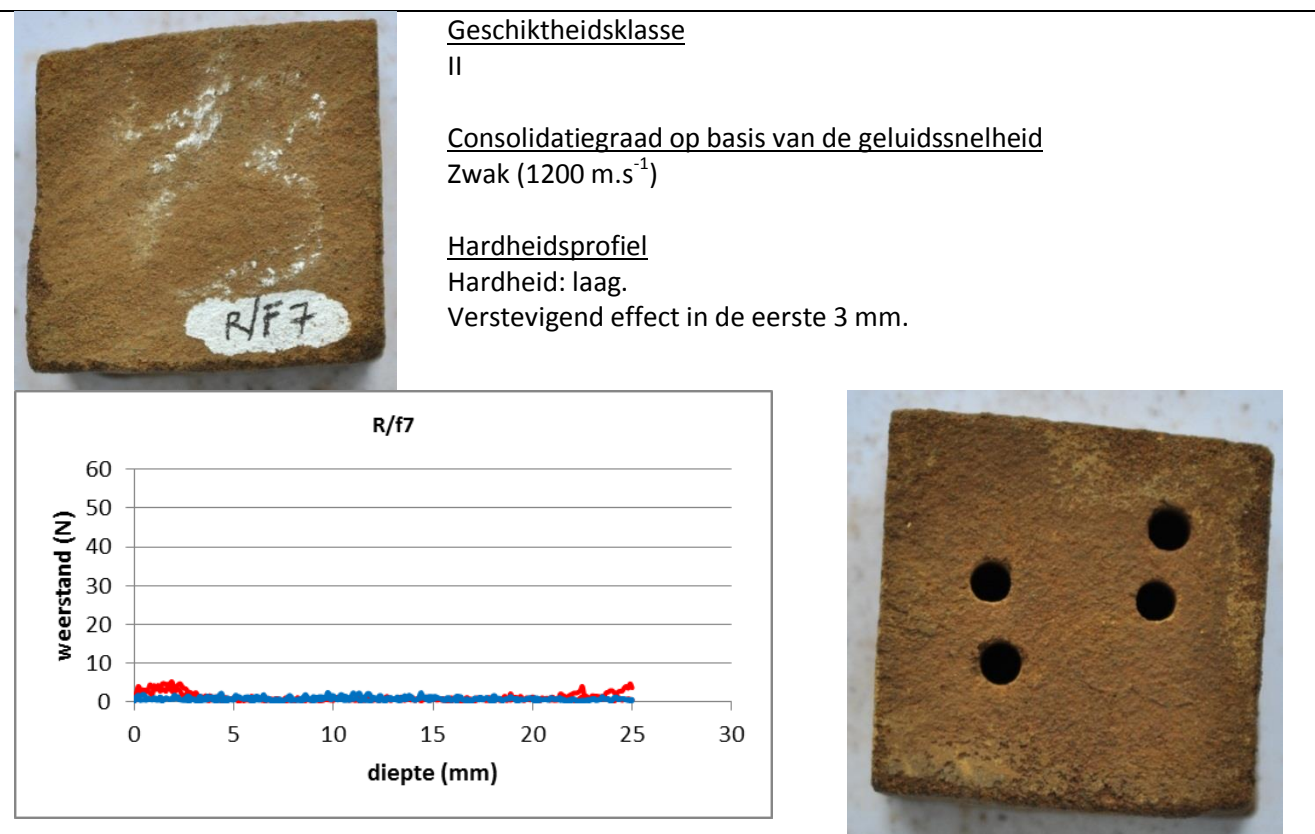


### 5.4.3. Losse fragmenten

#### staal RF/6



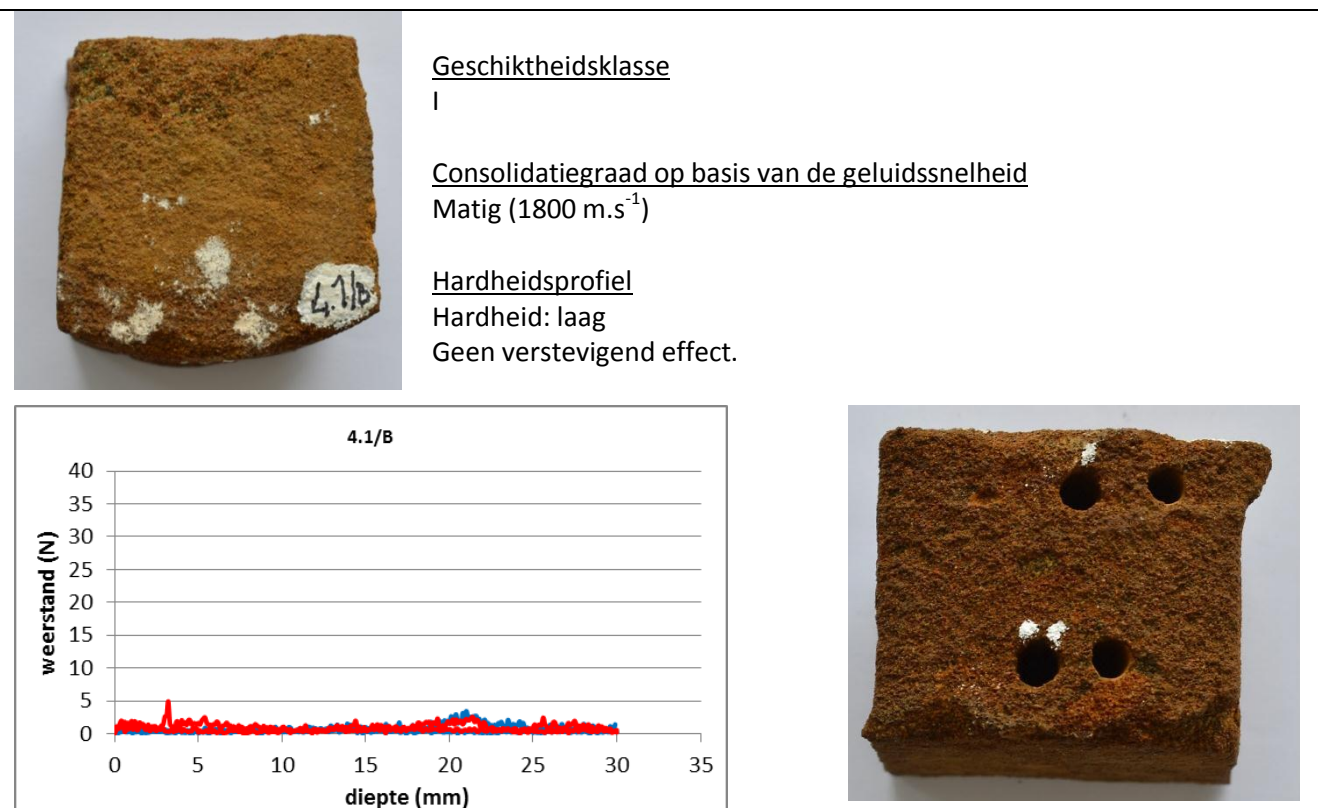
#### staal RF/7



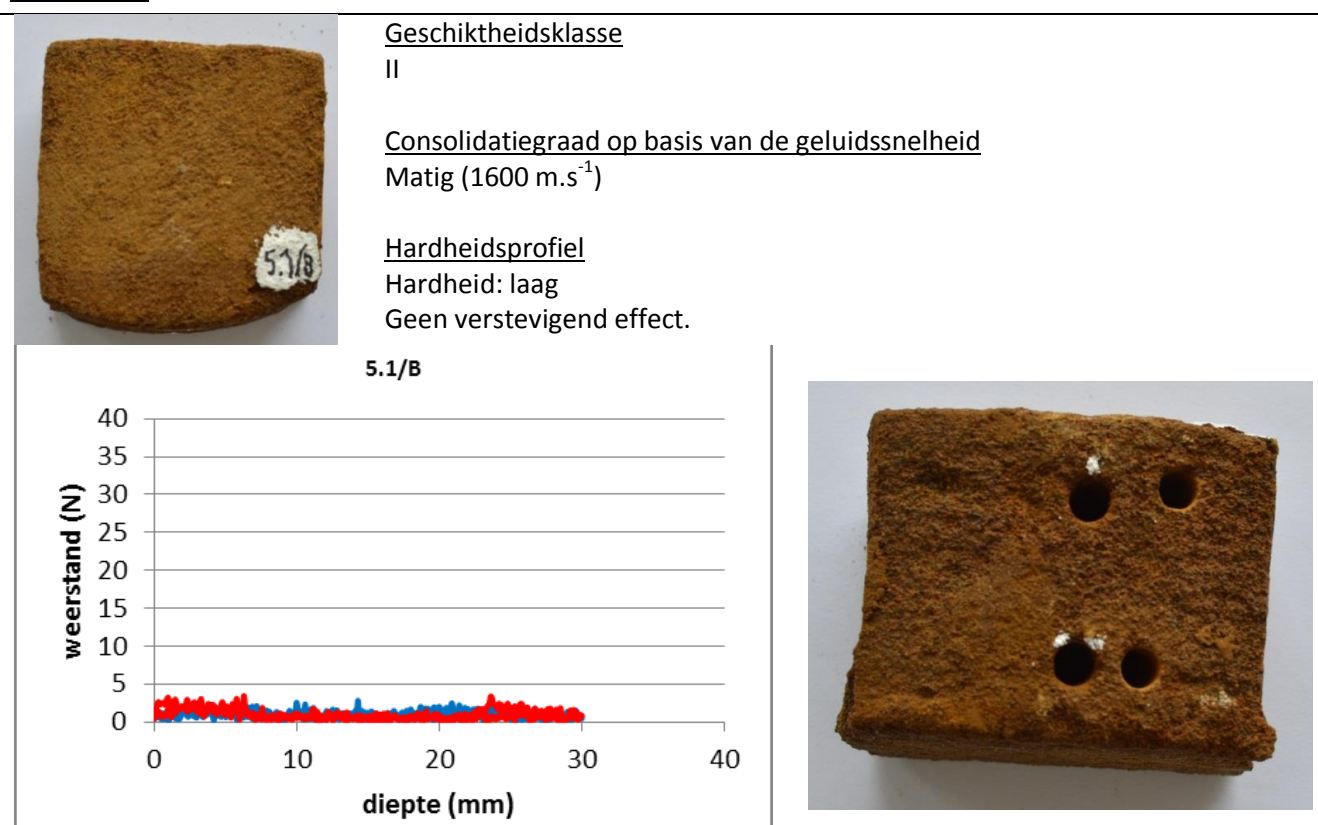


## 5.5. Langenberg (Diest)

### staal D4.1



### staal D5.1A





### staal D5.1B



Geschiktheidsklasse

I

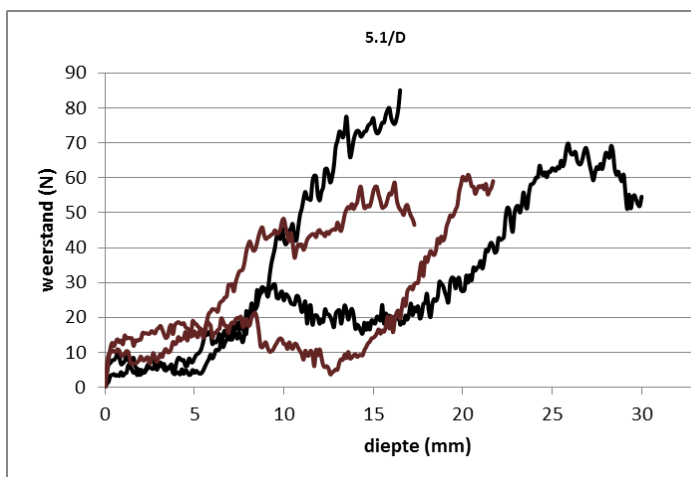
Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2800 \text{ m.s}^{-1}$ )

Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen

Mogelijk verstevigend effect in de eerste 5 mm.



### staal D6.1



Geschiktheidsklasse

I

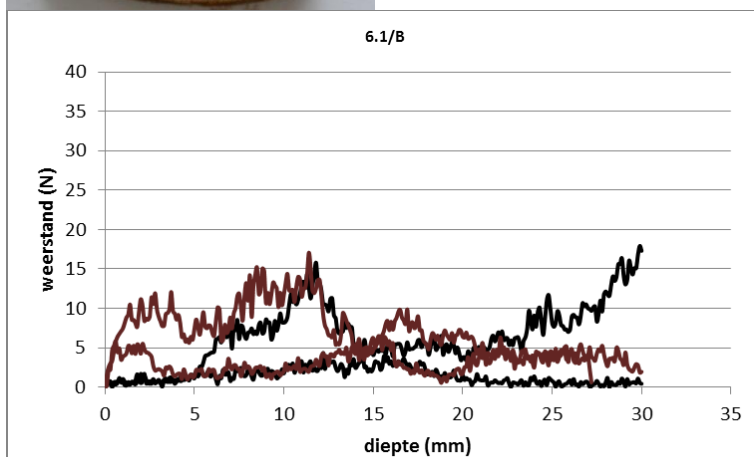
Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2000 \text{ m.s}^{-1}$ )

Hardheidsprofiel

Hardheid: heterogeen

Verstevigend effect in de eerste 4 mm.



### staal D7.4



#### Geschiktheidsklasse

II

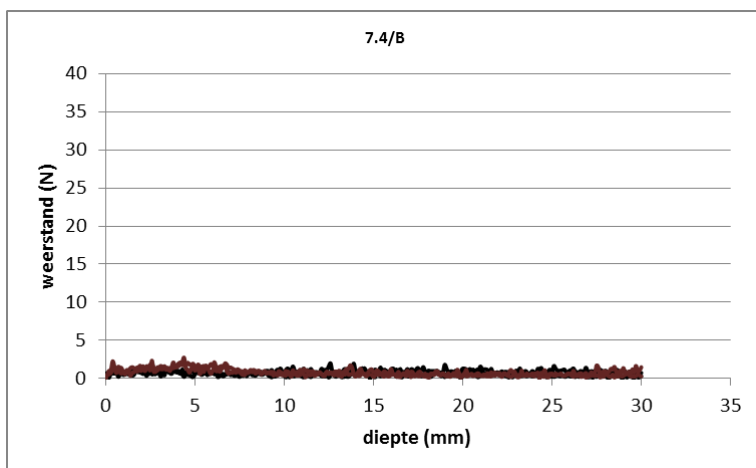
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Zwak ( $1400 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag

Geen verstevigend effect.



### staal D8.5



#### Geschiktheidsklasse

II

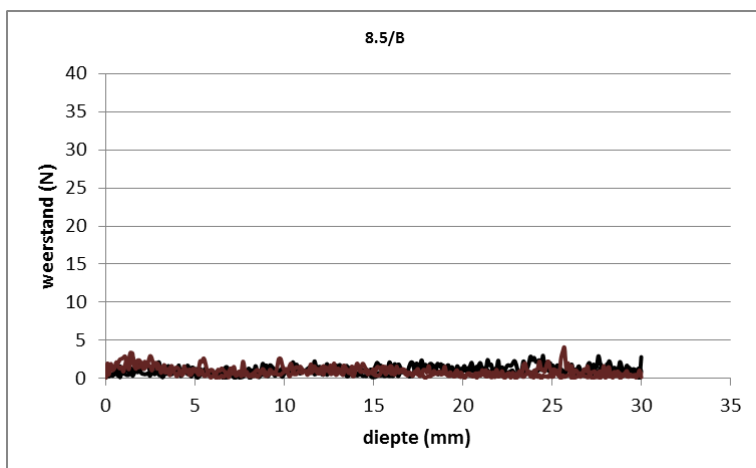
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Matig ( $1700 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag

Geen verstevigend effect.



### staal D9.2



#### Geschiktheidsklasse

II

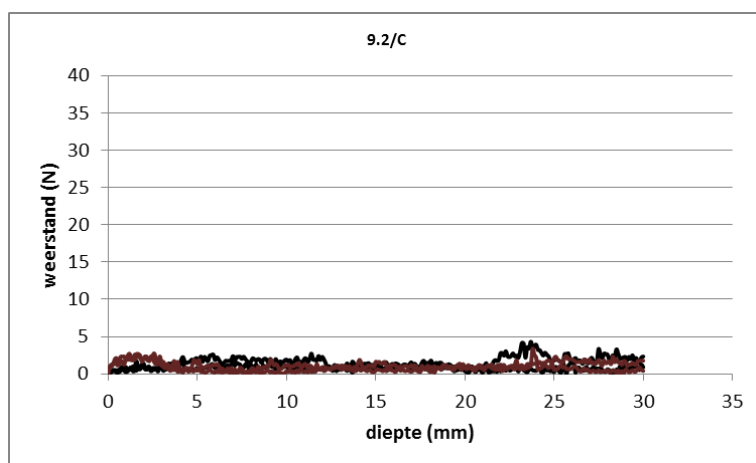
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Matig ( $1900 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag

Verstevigend effect in de eerste 3 mm.



### staal D11.2



#### Geschiktheidsklasse

I

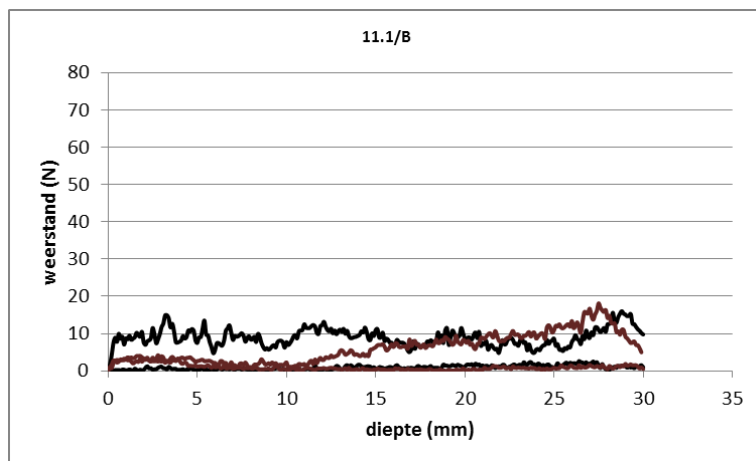
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2000 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag tot matig

Geen verstevigend effect.





### staal D12.3



#### Geschiktheidsklasse

I

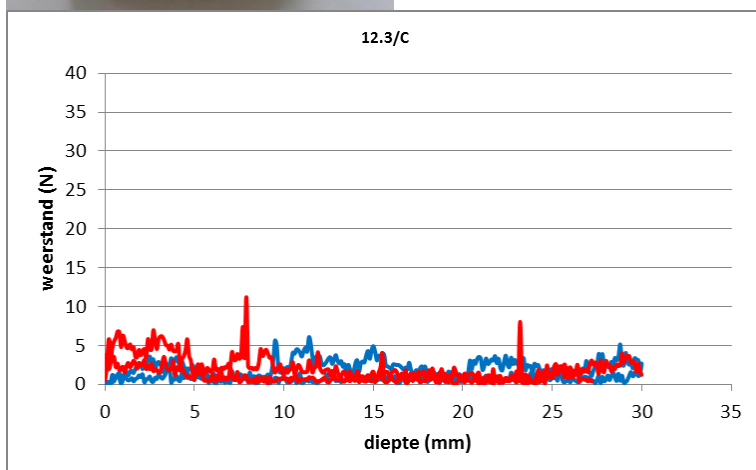
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2000 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag

Verstevend effect in de eerste 4 mm.



### staal D13.3A



#### Geschiktheidsklasse

II

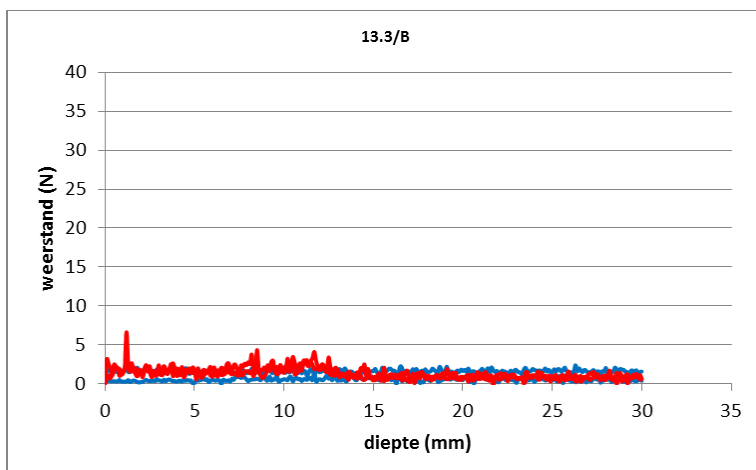
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Zwak ( $1250 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag

Verstevend effect in de eerste 11 mm.





### staal D13.3B



#### Geschiktheidsklasse

I

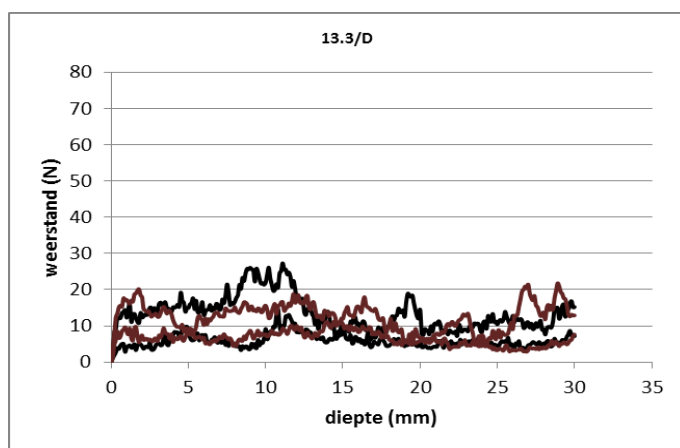
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Goed ( $2100 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: matig tot hoog

Verstevigend effect in de eerste 2 mm.



### staal D15.3



#### Geschiktheidsklasse

II

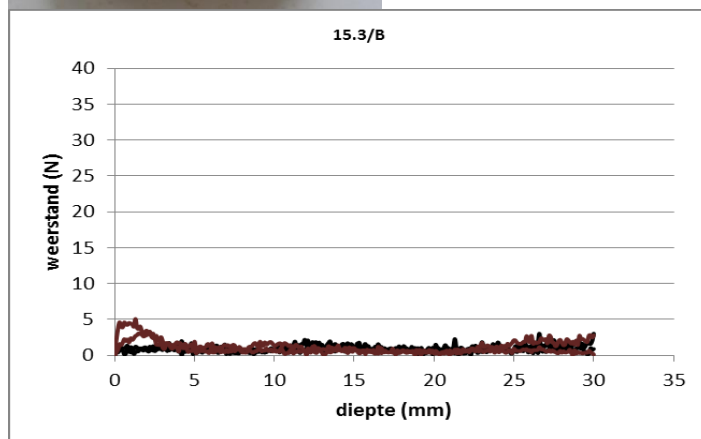
#### Consolidatiegraad op basis van de geluidssnelheid

Matig ( $1900 \text{ m.s}^{-1}$ )

#### Hardheidsprofiel

Hardheid: laag

Verstevigend effect in de eerste 2 mm.



## 6. Kalibratie van de DRMS-methodiek

Hardheidsprofielen worden bekomen aan de hand van boringen in het te analyseren materiaal. De hiervoor aangewende boren zijn voorzien van boorkoppen verhard met diamant. Tijdens het boren ondergaan deze boorkoppen desondanks een slijtage waarvan de slijtagegraad voornamelijk bepaald wordt door de hardheid van de te analyseren steen.

Hoe harder de steen is, hoe sneller de gebruikte boor zal slijten en hoe groter de afwijking zal zijn van de geregistreeerde weerstand tegenover de werkelijke weerstand.

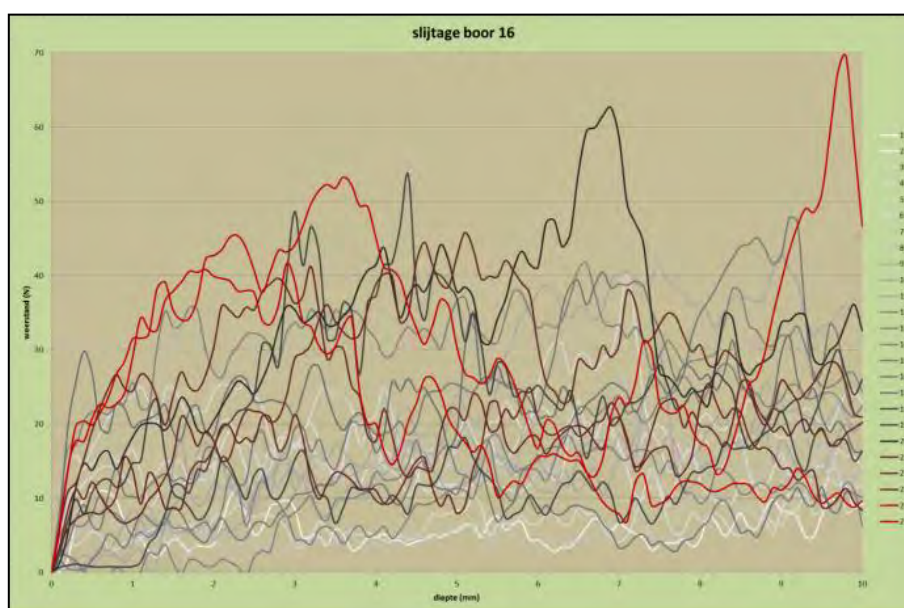
Omdat de ijzerzandsteen zeer heterogeen is, kan er geen standaard hardheid worden vooropgesteld. De bepaling van de slijtagegraad van de boor, en bijgevolg de foutmarge van de bekomen hardheidswaarden, is hierdoor zeer moeilijk te bepalen.

Tijdens de DRMS metingen dienen daarom referentiemetingen uitgevoerd, teneinde de hardheidsprofielen te corrigeren voor de slijtage van de boor. Referentiemetingen werden uitgevoerd tussenin de twee metingen van elk staal.

Voor de referentiemetingen van alle stalen met uitzondering van deze van Diest werd gebruik gemaakt van een groot steenfragment (P/F4) afkomstig van Pellenberg. Dit fragment werd aanvankelijk geselecteerd als referentiemateriaal omdat dit visueel homogeen leek.

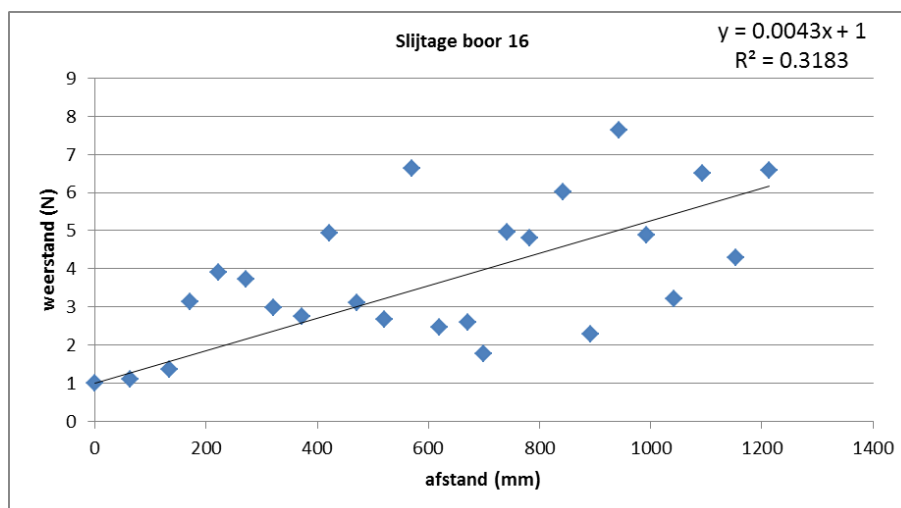
In Figuur 10 zijn de resultaten van de referentiemetingen bekomen met één boor samen weergegeven. In deze figuur zijn de profielen van de eerste referentiemetingen wit gekleurd, de daaropvolgende achtereenvolgens grijs, zwart, bruin en rood.

Uit deze hardheidsprofielen kan worden afgeleid dat het toegepaste referentiemateriaal te heterogeen is om de slijtage van de boor kwantitatief te berekenen nodig om de methodiek te kalibreren en de hardheidsprofielen van de stalen te corrigeren voor de slijtage van de boor.



Figuur 10. Hardheidsprofielen van de referentiemetingen, boor 16

Niettemin werd geprobeerd de slijtage van de boor door middel van een trendlijn weer te geven (Figuur 11).



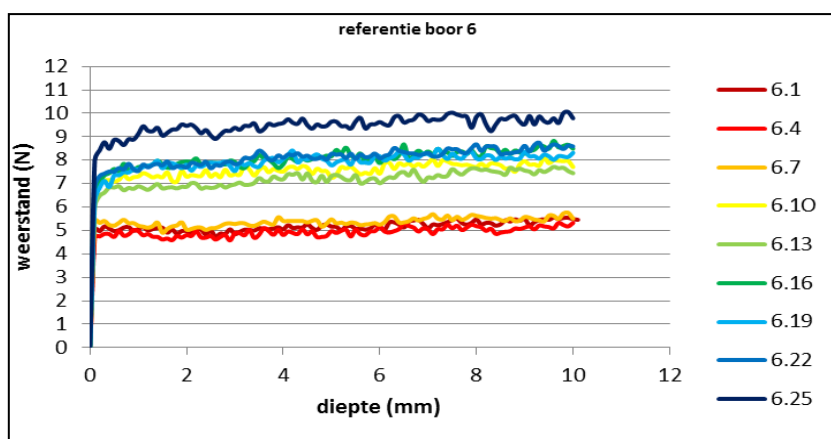
Figuur 11. Trendlijn van de slijtage van boor 16 aan de hand van referentiemetingen uitgevoerd op ijzerzandsteen.

Hiervoor werden de gemiddelde hardheidswaarden van elke referentiemeting afzonderlijk berekend, die vervolgens gedeeld werden door de gemiddelde waarde van de eerste referentiemeting (bekomen vóór aanvang van de metingen). De bekomen waarden worden in functie van de afgelegde boorafstand<sup>3</sup> weergegeven (Figuur 11). De overeenkomstige correlatiecoëfficiënt bedraagt echter slechts 0.3183 vanwege de te hoge heterogeniteit van het referentiemateriaal.

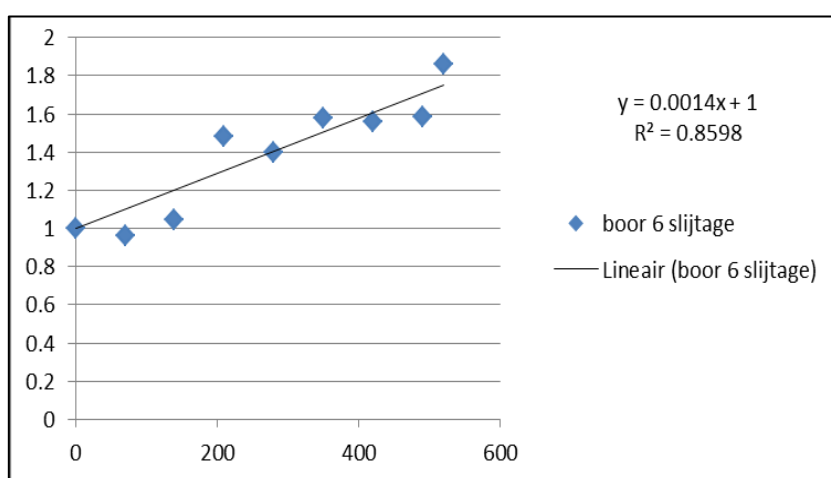
In de tweede fase van het onderzoek (onderzoek van de stalen afkomstig van Diest) wordt daarom overgegaan op een artificieel referentiemateriaal (ARS).<sup>4</sup> Dit referentiemateriaal is uiterst homogeen en kan daardoor een duidelijk beeld geven van de slijtage van de boren. In Figuur 12 zijn de hardheidsprofielen van alle referentiemetingen van boor 6 gebundeld. Hieruit kan worden afgeleid dat de weerstand van het ARS bij de 9<sup>de</sup> referentiemeting (6.25 of donkerblauwe curve, wat overeenkomt met de 25<sup>ste</sup> boring) reeds verdubbeld is (gemiddeld 9.5 N) in vergelijking met deze bekomen na de eerste metingen (rode curves, 6.1 en 6.4 met gemiddeld 4.8 N). Figuur 13 geeft de afwijking weer van elke referentiemeting ten opzichte van de eerste meting. Figuur 14 geeft de hardheidsprofielen van de referentiemetingen van boor 6 weer, na correctie voor de slijtage van de boor volgens de bepaalde functiewaarde (y waarde weergegeven in Figuur 13).

<sup>3</sup> Rodrigues J. Delgado & Costa D., 2004. *A New Method for Data Correction in Drill Resistance Tests for the Effect of Drill Bit Wear*, International Journal for Restoration, vol. 10, No3, 1-18

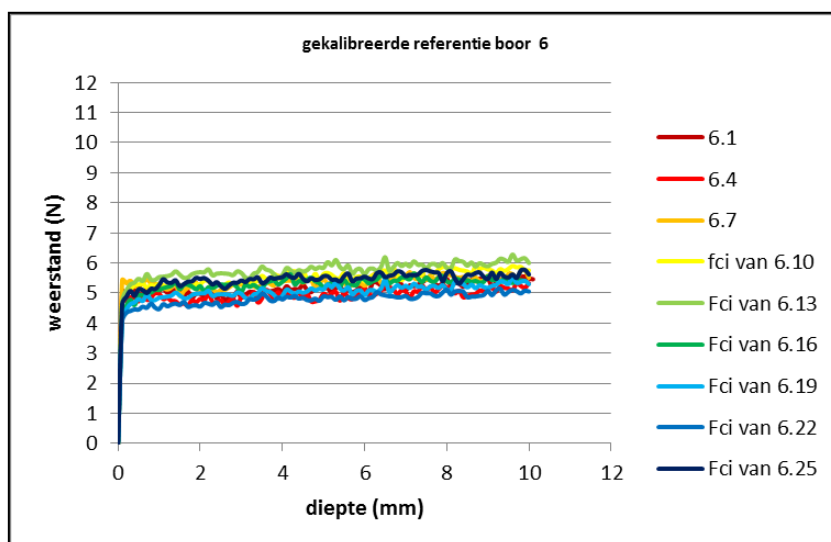
<sup>4</sup> ARS (artificial reference sample) is een porselein materiaal met 28.4 % waterabsorptievermogen en een druksterkte van 61.3 MPa



Figuur 12. Hardheidsprofielen van de referentiemetingen, boor 6.



Figuur 13. Trendlijn boor 6 aan de hand van referentiemetingen in ARS. Waarbij de y-as de afgelegde boorafstand in mm weergeeft en de X-as de afwijking van de weerstand waarde in N weergeeft.

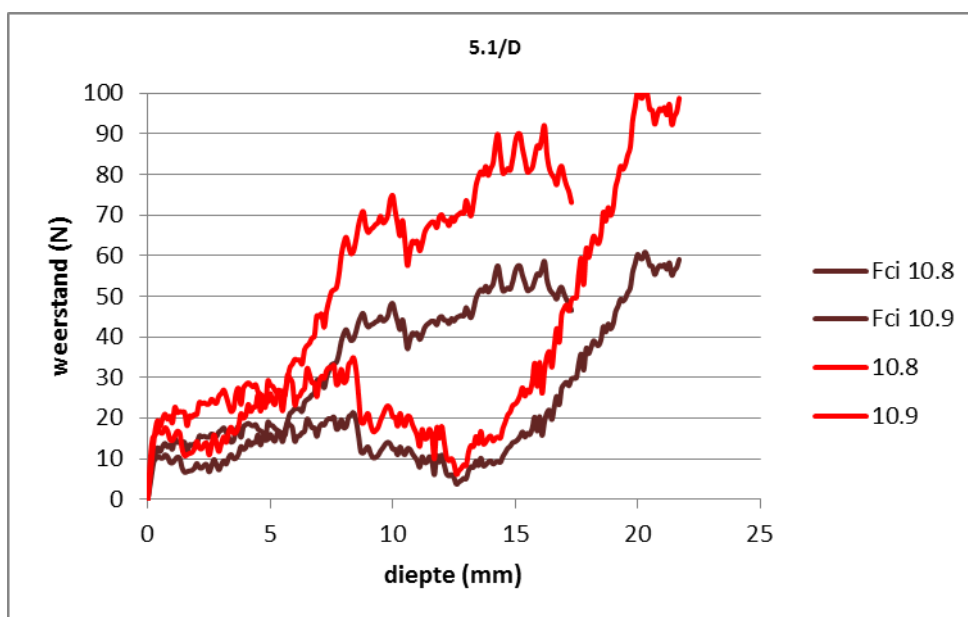


Figuur 14. Gekalibreerde hardheidsprofielen van de referentiemetingen, boor 6.



De hardheidsprofielen bekomen van de stalen van Diest zijn allen gecorrigeerd voor de experimenteel vastgestelde slijtage van de gebruikte boren. In Figuur 15 zien we dat de hoge meetwaarden een hogere correctiewaarde krijgen dan de lagere waarden.

Voor de hardheidsprofielen van de stalen afkomstig van Herent, Pellenberg, Wezemaal en Rotselaar kon de slijtage van elk afzonderlijke boor niet kwantitatief worden bepaald. De correctie van deze meetresultaten werd in dit geval uitgevoerd volgens de gemiddelde berekende slijtage van de vier boren gebruikt voor de metingen van de stalen van Diest.



*Figuur 15. Twee hardheidsprofielen waarbij de rode curves de originele hardheidsprofielen voorstellen en de bruine curves de gecorrigeerde curves (staal D5./1).*



**Koninklijk Instituut voor  
het Kunstpatrimonium**

Federaal wetenschapsbeleid  
Jubelpark 1  
BE-1000 BRUSSEL

**Wetenschappelijk en Technisch  
Centrum voor het Bouwbedrijf**

Lombardstraat 42  
B-1000 BRUSSEL



## Onderzoeksproject VLA11-4.1

**Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen  
met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen**

### **Bijlage VI Schijnbare volumieke massa**

D : 2012.11586

*Aanvrager:* Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land  
en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON)

*Contactpersoon:* Mevr. Griet Verhaert

*Uitvoering:* Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB)  
Laboratorium LMA

*Verslaggeving:* Roald Hayen & Yves Vanhellemont

*Datum:* 30 september 2013

## 1. Methodologie

De schijnbare volumieke massa ( $\rho_b$ ) is één van de basiseigenschappen die gewoonlijk bepaald wordt voor natuursteen. De schijnbare volumieke massa weerspiegelt de graad van compactheid van het materiaal en laat toe de massa van een gegeven volume in te schatten. Deze grootte wordt doorgaans uitgedrukt in  $\text{kg/m}^3$ . Typische waarden voor de schijnbare volumieke massa schommelen tussen ca. 1500 en  $3000 \text{ kg/m}^3$ .

De schijnbare volumieke massa wordt soms ook onder een andere vorm uitgedrukt: de schijnbare dichtheid. De schijnbare dichtheid is gelijk aan de schijnbare volumieke massa van het materiaal, gedeeld door de volumieke massa van water (m.a.w.  $1000 \text{ kg/m}^3$ ). Het resultaat is een dimensieloze grootte.

Voor de bepaling van de schijnbare volumieke massa schrijft de norm EN 1936 voor om zes kubussen van  $7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$  (de norm staat ook andere vormen en afmetingen toe) te drogen bij een temperatuur van  $70^\circ\text{C}$ . Na droging tot constant gewicht worden ze gewogen om hun droge massa ( $m_1$ ) te bepalen. Vervolgens worden de stalen onder vacuüm gebracht bij een maximale restdruk van  $15 \text{ mmHg}$ . Deze druk wordt gedurende 24 uur aangehouden, waarna er gedemineraliseerd water aan het vat wordt toegevoegd. Zodra de proefstukken volledig ondergedompeld zijn, wordt de druk nogmaals 24 uur aangehouden. Hierna wordt de atmosferische druk hersteld en blijven de proefstukken gedurende opnieuw 24 uur ondergedompeld. Vervolgens wordt elk proefstuk gewogen, en dit zowel onder water ( $m_3$ ) als aan de lucht ( $m_2$ ).

De volumieke massa ( $\rho_b$ ) wordt uitgedrukt als de verhouding van de droge massa van het proefstuk tot zijn schijnbaar volume, met behulp van de volgende formule:

$$\rho_b = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Gezien de beperkte hoeveelheid aan beschikbaar proefmateriaal werd steeds slechts één enkel proefstuk getest. De methode is niet destructief, en werd derhalve op alle proefstalen uitgevoerd vooraleer over te gaan tot de uitvoering van de drukproeven of de vorst-dooi cycli.

## 2. Overzicht meetresultaten

Tabel 1 geeft een overzicht van de meetresultaten. Afdrukken van de officiële proefrapporten van het WTCB zijn aan bijlage IX *Vorstbestendigheid* toegevoegd. Hierin kan een volledige beschrijving van de stalen teruggevonden worden.

Voor de codering van de stalen wordt verwezen naar bijlage X *Vergelijkende tabel voor de benamingen van de proefstukken*.

De stalen beproefd op druksterkte en vorstbestendigheid kunnen eenvoudig uit elkaar gehouden worden. De stalen bestemd voor de evaluatie van de vorstbestendigheid werden in het blauw gemarkeerd.

Tabel 1. Overzichtstabel van de resultaten bekomen voor de schijnbare volumieke massa

Plaats, site staal	Diepte (m)	$\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Herent, Roeselberg</b>		
VLA10-4.1-B1 (H1)		
H1/1	2.95 - 3.03	1870
	3.03 - 3.14	1880
H1/3	5.42 - 5.54	2370
H1/4	7.22 - 7.32	2240
	7.32 - 7.44	2060
H1/5	7.97 - 8.06	2070
H/F8	/	1950
	/	1950
H/F9	/	2130
	/	2200
H/F10	/	2120
<b>Minimum</b>		<b>1870</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>2076 ± 157</b>
<b>Maximum</b>		<b>2370</b>
<b>Pellenberg, Gasthuisbos</b>		
VLA10-4.1-B2 (P1)		
VLA10-4.1-B3 (P2)		
P1/2	3.52 - 3.63	1670
P1/7	11.63 - 11.72	2250
P1/8	11.84 - 11.94	1810
P2/2	7.20 - 7.28	2000
P/F3	/	2170
	/	2060
P/F4	/	2200
	/	2190
<b>Minimum</b>		<b>1670</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>2044 ± 207</b>
<b>Maximum</b>		<b>2250</b>



<b>Wezemaal, Beninksberg</b>		
VLA10-4.1-B4 (W1)		
VLA10-4.1-B5 (W2)		
VLA10-4.1-B6 (W3)		
W1/1	3.71 - 3.85	1930
W1/2	4.19 - 4.27	1970
W1/3	5.63 - 5.71	2100
W2/1	3.26 - 3.34	2410
W2/2	3.43 - 3.55	2200
W2/3	3.95 - 4.06	1830
	4.06 - 4.15	1810
W2/4	7.82 - 7.92	1770
	7.92 - 8.00	1730
W3/1	2.47 - 2.55	2340
W3/3	2.75 - 2.87	2100
W3/5	3.86 - 3.98	1850
W3/7	4.75 - 4.84	2300
<b>Minimum</b>		<b>1730</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>2026 ± 232</b>
<b>Maximum</b>		<b>2410</b>
<b>Rotselaar, Middelberg</b>		
VLA10-4.1-B7 (R1)		
VLA10-4.1-B8 (R2)		
R1/2	5.93 - 6.02	2160
R2/1	2.37 - 2.47	2100
	2.47 - 2.55	2370
R2/5	6.78 - 6.88	2200
	6.88 - 6.97	2040
R/F6	/	2280
	/	2270
R/F7	/	1760
<b>Minimum</b>		<b>1760</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>2148 ± 189</b>
<b>Maximum</b>		<b>2370</b>

<b><i>Diest, Langenberg</i></b>		
D3.0	0.05 - 0.20	2170
D3.1	0.30 - 0.45	2120
D4.0	0.03 - 0.17	2170
D4.1	0.30 - 0.54	2000
D6.2	0.25 - 0.39	2000
D8.4	0.39 - 0.53	2240
D9.2	0.25 - 0.40	1900
D9.3	0.65 - 0.80	2080
D10.2	0.54 - 0.66	2150
D11.1	0.05 - 0.15	2390
	0.15 - 0.25	2140
	0.25 - 0.35	2080
D11.2	0.50 - 0.70	1880
D12.3	0.35 - 0.50	2010
D14.0	0.01 - 0.16	2030
D14.3	0.65 - 0.80	1960
D15.2	0.17 - 0.35	1860
D15.3	0.45 - 0.60	1890
<b>Minimum</b>		<b>1860</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>2059 ± 140</b>
<b>Maximum</b>		<b>2390</b>



**Koninklijk Instituut voor  
het Kunstpatrimonium**

Federaal wetenschapsbeleid  
Jubelpark 1  
BE-1000 BRUSSEL

**Wetenschappelijk en Technisch  
Centrum voor het Bouwbedrijf**

Lombardstraat 42  
B-1000 BRUSSEL



## Onderzoeksproject VLA11-4.1

### **Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen**

#### **Bijlage VII Porositeit**

D : 2012.11586

*Aanvrager:* Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON)

*Contactpersoon:* Mevr. Griet Verhaert

*Uitvoering:* Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK)  
Departement labo, Cel monumenten  
*Laurent Fontaine*  
Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB)  
Laboratorium LMA

*Verslaggeving:* Roald Hayen & Yves Vanhellemont

*Datum:* 30 september 2013

## 1. Methodologie

### 1.1. Totale open porositeit

De totale open porositeit ( $p_o$ ) wordt bepaald door het volume aan poriën in het materiaal, die onderling en met de buitenomgeving verbonden zijn en aldus toegankelijk zijn voor water. De totale open porositeit wordt doorgaans uitgedrukt in volumepercent (vol%) en vertegenwoordigt het volume aan open poriën in verhouding tot het totale volume van het materiaal. De waarden variëren van bijna nul (bv. voor erg compacte graniet) tot om en bij de 50 vol% (voor zeer zachte kalksteen).

De open porositeit mag niet verward worden met de waterabsorptie, die uitgedrukt wordt in massapercent (m%). Wanneer de waterabsorptie bepaald wordt door impregnatie onder volledig vacuüm (zoals voor de totale open porositeit), bestaat er tussen beide eigenschappen een verband. De vermenigvuldigingscoëfficiënt in deze relatie is de schijnbare dichtheid van het materiaal, d.w.z. zijn schijnbare volumieke massa gedeeld door 1000. Zo wordt een natuursteen met een waterabsorptie van 20 m% en een schijnbare volumieke massa van 2000 kg/m<sup>3</sup> gekarakteriseerd door een totale open porositeit van 40 vol%.

De proefmethode ter bepaling van de totale open porositeit is dezelfde als deze die gebruikt wordt ter bepaling van de schijnbare volumieke massa (EN 1936). De open porositeit ( $p_o$ ) wordt uitgedrukt als de verhouding tussen het volume van de open poriën tot het schijnbare volume van het proefstuk met behulp van de volgende formule (voor de identificatie van de massa's, zie bijlage VI *Schijnbare volumieke massa*):

$$p_o = \left( \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3} \right) \times 100 \text{ (vol\%)}$$

Gezien de beperkte hoeveelheid aan beschikbaar proefmateriaal werd steeds slechts één enkel proefstuk getest per individueel fragment in plaats van 6 metingen zoals voorgeschreven in de norm. Het totaal aantal stalen per site is echter wel voldoende zodat de gemiddelde waarde representatief is voor de totale porositeit van ijzerzandsteen van de betreffende site. Bovendien werd de proef op het gehele fragment uitgevoerd, waardoor het resultaat representatief is voor de gemiddelde porositeit ervan, ook bij zeer heterogene proefstukken. De methode is niet destructief, en werd derhalve op alle proefstalen uitgevoerd vooraleer over te gaan tot de uitvoering van de drukproeven of de vorst-dooi cycli.

### 1.2. Poriënverdeling

De analyse van de poriënopbouw van een materiaal wordt uitgevoerd door middel van kwikintrusie (Micromeretics, Autopore 9500). In functie van de aangelegde druk bij de intrusie van het kwik in het staal worden bepaalde poriëndiameters bereikt, zodat een verdeling van de porositeit in functie van de poriëndiameter kan bepaald worden.



## 2. Overzicht meetresultaten

### 2.1. Totale open porositeit

Tabel 1 geeft een overzicht van de meetresultaten met betrekking tot de totale open porositeit. Afdrukken van de officiële proefrapporten van het WTCB zijn aan bijlage IX *Vorstbestendigheid* toegevoegd. Hierin kan een volledige beschrijving van de stalen teruggevonden worden. Voor de codering van de stalen wordt verwezen naar bijlage X *Vergelijkende tabel voor de benamingen van de proefstukken*.

De stalen beproefd op druksterkte en vorstbestendigheid kunnen eenvoudig uit elkaar gehouden worden. De stalen bestemd voor de evaluatie van de vorstbestendigheid werden in het blauw gemarkeerd.

Tabel 1. Overzichtstabel van de resultaten bekomen voor de totale open porositeit

Plaats, site staal	Diepte (m)	p <sub>0</sub> (vol%)
<b>Herent, Roeselberg</b>		
VLA10-4.1-B1		
H1/1	2.95 - 3.03	35.7
	3.03 - 3.14	35.1
H1/3	5.42 - 5.54	23.6
H1/4	7.22 - 7.32	26.9
	7.32 - 7.44	30.6
H1/5	7.97 - 8.06	30.5
H/F8	/	34.0
	/	34.2
H/F9	/	29.5
	/	28.1
H/F10	/	28.9
<b>Minimum</b>		<b>23.6</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>30.6 ± 3.8</b>
<b>Maximum</b>		<b>35.7</b>
<b>Pellenberg, Gasthuisbos</b>		
VLA10-4.1-B2 (P1)		
VLA10-4.1-B3 (P2)		
P1/2	3.52 - 3.63	44.9
P1/7	11.63 - 11.72	24.9
P1/8	11.84 - 11.94	37.2
P2/2	7.20 - 7.28	31.7
P/F3	/	26.8
	/	29.9
P/F4	/	27.0
	/	27.4
<b>Minimum</b>		<b>24.9</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>31.2 ± 6.7</b>
<b>Maximum</b>		<b>44.9</b>

<b>Wezemaal, Beninksberg</b>		
VLA10-4.1-B4 (W1)		
VLA10-4.1-B5 (W2)		
VLA10-4.1-B6 (W3)		
W1/1	3.71 - 3.85	34.8
W1/2	4.19 - 4.27	34.5
W1/3	5.63 - 5.71	30.8
W2/1	3.26 - 3.34	22.0
W2/2	3.43 - 3.55	28.2
W2/3	3.95 - 4.06	37.1
	4.06 - 4.15	37.6
W2/4	7.82 - 7.92	38.0
	7.92 - 8.00	39.3
W3/1	2.47 - 2.55	23.6
W3/3	2.75 - 2.87	30.2
W3/5	3.86 - 3.98	36.1
W3/7	4.75 - 4.84	22.7
<b>Minimum</b>		<b>22.0</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>31.9 ± 6.1</b>
<b>Maximum</b>		<b>39.3</b>

<b>Rotselaar, Middelberg</b>		
VLA10-4.1-B7 (R1)		
VLA10-4.1-B8 (R2)		
R1/2	5.93 - 6.02	28.6
R2/1	2.37 - 2.47	29.8
	2.47 - 2.55	38.0
R2/5	6.78 - 6.88	29.1
	6.88 - 6.97	34.1
R/F6	/	25.6
	/	26.1
R/F7	/	37.8
<b>Minimum</b>		<b>25.6</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>31.1 ± 4.9</b>
<b>Maximum</b>		<b>38.0</b>

<b><i>Diest, Langenberg</i></b>		
D3.0	0.05 - 0.20	28.6
D3.1	0.30 - 0.45	30.5
D4.0	0.03 - 0.17	28.7
D4.1	0.30 - 0.54	33.3
D6.2	0.25 - 0.39	32.3
D8.4	0.39 - 0.53	26.6
D9.2	0.25 - 0.40	36.2
D9.3	0.65 - 0.80	30.7
D10.2	0.54 - 0.66	28.0
D11.1	0.05 - 0.15	22.4
	0.15 - 0.25	28.4
	0.25 - 0.35	30.1
D11.2	0.50 - 0.70	35.2
D12.3	0.35 - 0.50	32.0
D14.0	0.01 - 0.16	31.4
D14.3	0.65 - 0.80	32.4
D15.2	0.17 - 0.35	36.0
D15.3	0.45 - 0.60	35.4
<b>Minimum</b>		<b>22.4</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>31.0 ± 3.6</b>
<b>Maximum</b>		<b>36.2</b>

## 2.2. Poriënverdeling

Van de stalen van de Langenberg te Diest, bestudeerd in het kader van het petrografisch onderzoek, werden telkens twee monsters van ca. 1 cm<sup>3</sup> gelicht voor de analyse van de poriënopbouw door middel van kwikintrusie. Hierdoor kunnen poriëndiameters van 120 µm tot 0.006 µm (6 nm) worden bereikt. De totale porositeit (vol%) bepaald op basis van kwikporosimetrie is bijgevolg lager dan de porositeit bepaald op basis van vacuümverzadiging onder water en dit vooral voor de zwak geconsolideerde ijzerzandsteen die op basis van de petrografische studie vaak een belangrijk aandeel aan poriëndiameters groter dan 100 µm vertoont.

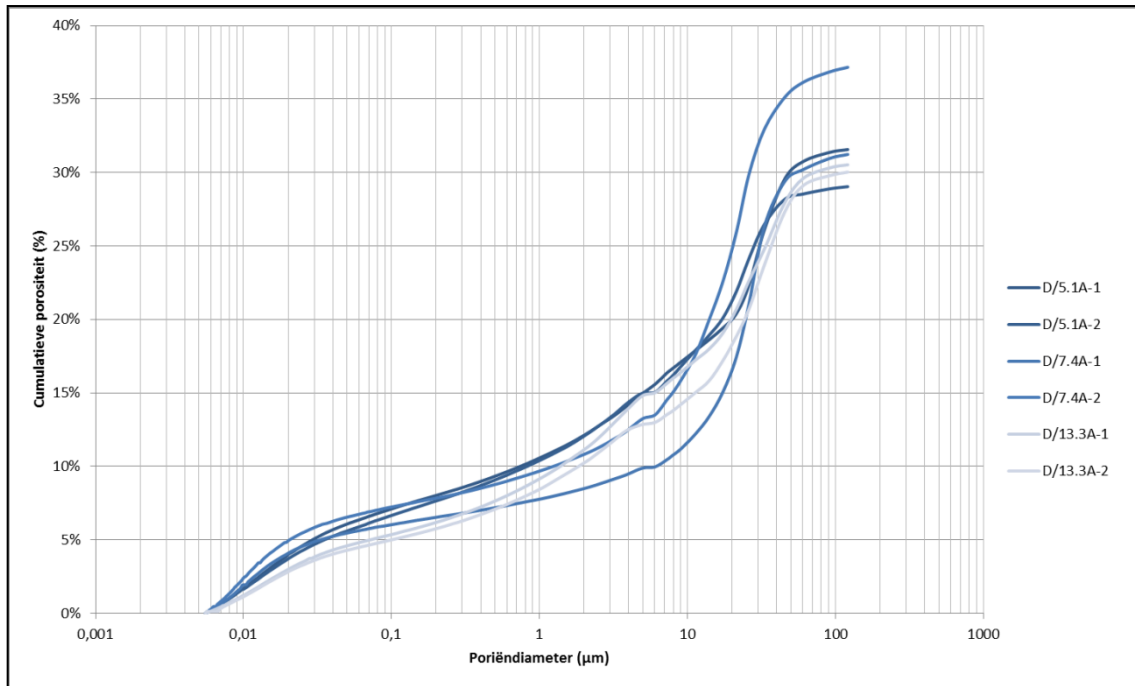
Tabel 2 geeft een overzicht van de bestudeerde stalen met omschrijving van de geschiktheidsklasse, de gemiddelde geluidssnelheid en de consolidatiegraad zoals bepaald op basis van de petrografische studie. Cumulatieve poriënverdelingen voor de zwak, matig respectievelijk goed geconsolideerde ijzerzandsteen zijn weergegeven in de figuren 1 t/m 3.

Figuur 4 stelt de minimale en maximale enveloppecurves voor van de cumulatieve poriënverdelingen van zwak, matig en respectievelijk goed geconsolideerde ijzerzandsteen. Goed geconsolideerde ijzerzandsteen wordt gekenmerkt door een totale porositeit tussen ca. 11 en 26 vol%, matig geconsolideerde ijzerzandsteen tussen ca. 25 en 30 vol% en zwak geconsolideerde zandsteen tussen ca. 29 en 37 vol%. Uit deze figuren kan worden afgeleid dat er een duidelijk continuüm bestaat tussen de verschillende consolidatiegraden van ijzerzandsteen (overlapping van de maximale enveloppecurve voor een zwakker geconsolideerde ijzerzandsteen met de minimale enveloppecurve voor een iets beter geconsolideerde ijzerzandsteen).

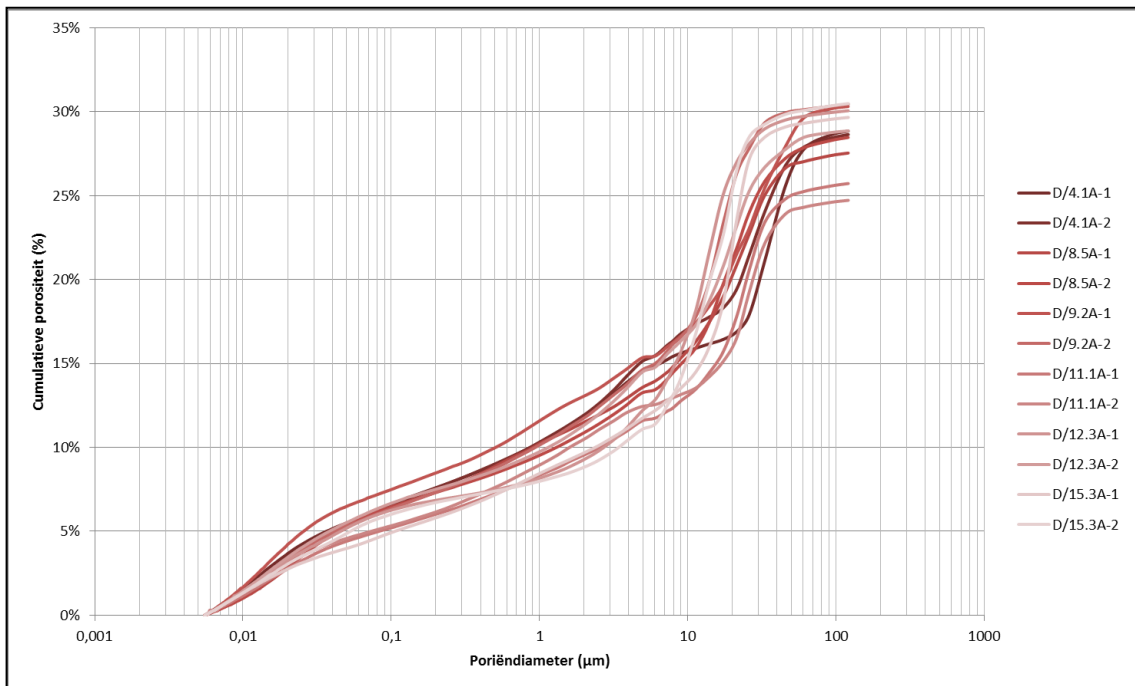
*Tabel 2. Overzicht van de 12 stalen onderworpen aan kwikporosimetriemetingen, met aanduiding van de code, het fichenummer, de geschiktheidsklasse als bouwsteen, de gemiddelde geluidssnelheidswaarde (m/s) en de consolidatiegraad bepaald aan de hand van microscopische cementanalyse.*

Code, fiche	Klasse	Geluidssnelheid (m/s)	Consolidatiegraad
D13.3A, nr. 48	II	1250	zwak
D7.4A, nr. 43	II	1400	
D5.1A, nr. 40	II	1600	
D8.5A, nr. 44	II	1700	
D4.1A, nr. 39	I	1800	matig
D9.2A, nr. 45	II	1900	
D15.3A, nr.50	II	1900	
D11.2A, nr. 46	I	2000	
D12.3A, nr.47	I	2000	
D6.1A, nr. 42	I	2000	goed
D13.3B, nr. 49	I	2100	
D5.1B, nr. 41	I	2800	

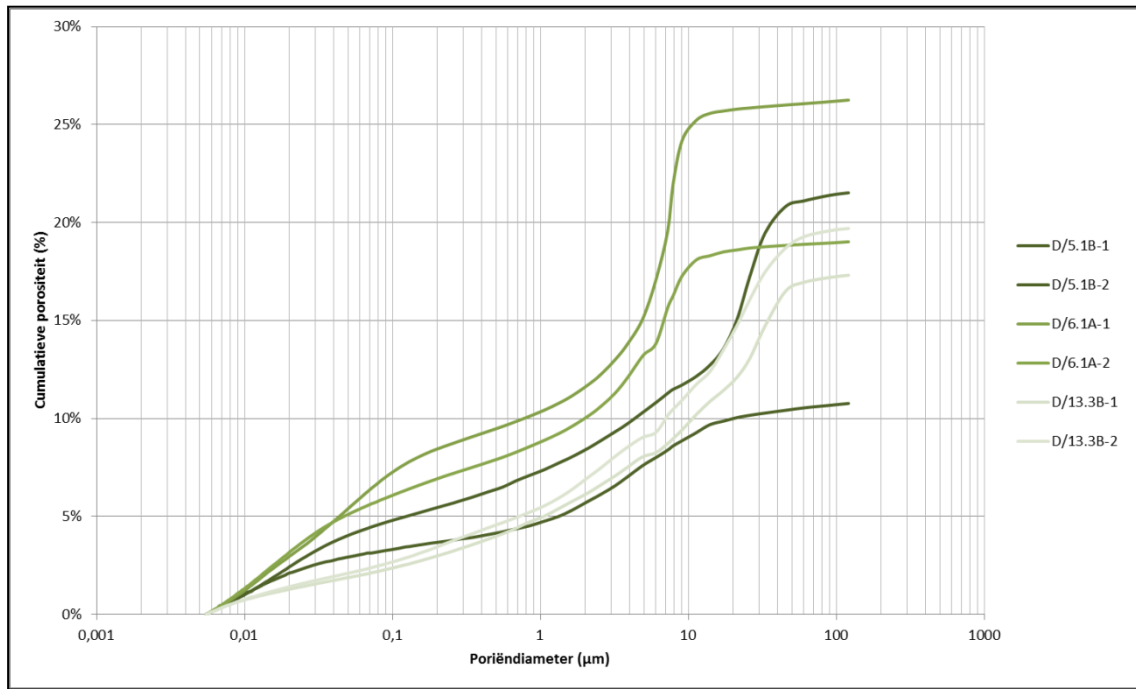




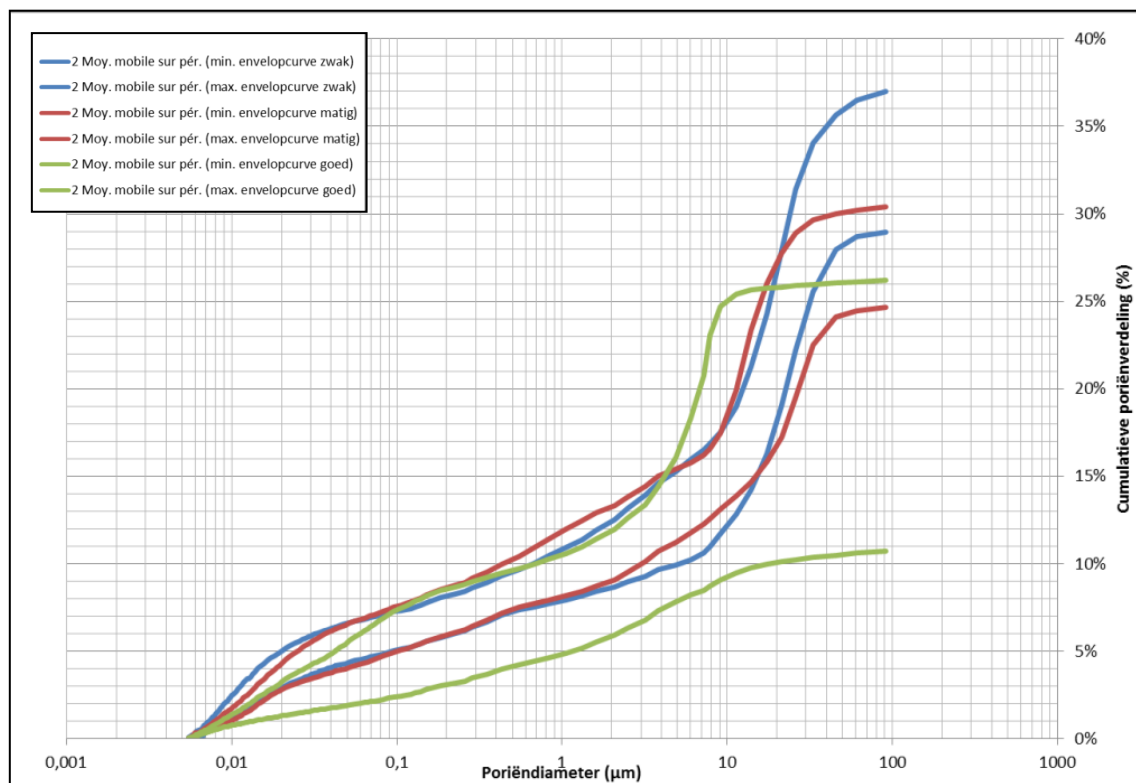
Figuur 1. Cumulatieve poriënverdeling voor de 3 stalen van zwak geconsolideerde ijzerzandsteen.



Figuur 2. Cumulatieve poriënverdeling voor de 6 stalen van matig geconsolideerde ijzerzandsteen.



Figuur 3. Cumulatieve poriënverdeling voor de 3 stalen van goed geconsolideerde ijzerzandsteen.



Figuur 4. Minimale en maximale enveloppecurves van de cumulatieve poriënverdelingen voor de zwak, matig en goed geconsolideerde ijzerzandsteen.

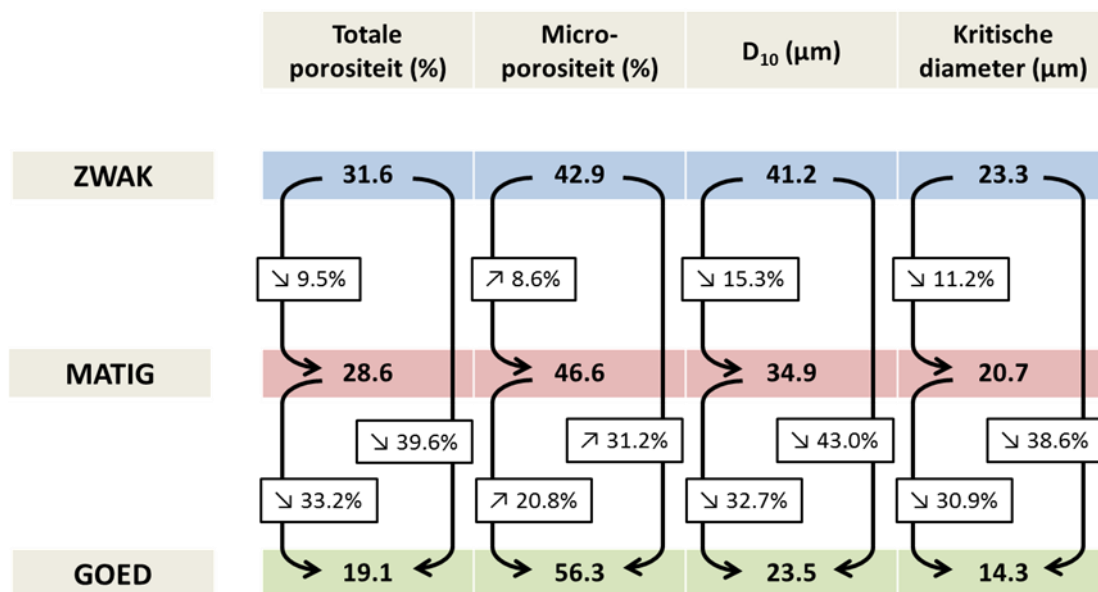
De resultaten van de kwikporosimetriemetingen worden samenvat in Tabel 3. De gemiddelde waarden van de diverse parameters zijn bovendien grafisch weergegeven in Figuur 5.

Uit de gegevens kan worden afgeleid dat de daling van de totale porositeit overeenkomt met een stijging van de microporositeit. Natuursteen met een aandeel aan microporositeit (vol% van de totale porositeit met poriën kleiner dan 5 µm) lager dan 30% kan over het algemeen als duurzaam omschreven worden, terwijl natuursteen met een aandeel aan microporositeit hoger dan 90% niet duurzaam is (Ingham, 2008<sup>1</sup>). Met een gemiddeld aandeel aan microporositeit tussen 42.9 en 56.3 vol% kunnen zwak, matig en goed geconsolideerde Diestiaan ijzerzandsteen bijgevolg noch als 100% duurzaam, noch als 100% niet duurzaam beschouwd worden. Opvallend is vooral de slechte score van drie monsters van goed geconsolideerde ijzerzandsteen met een aandeel aan microporositeit hoger dan 55% (waarden in rood in Tabel 3).

Tabel 3. Synthese van de resultaten van de kwikporosimetriemetingen, met aanduiding van 1) de totale porositeit (vol%), 2) de microporositeit (% van de totale porositeit met poriën <5 µm), 3) d<sub>10</sub> (gemiddelde poriëndiameter in µm waarvoor de eerste 10% van de poriën met kwikintrusie wordt gevuld) en 4) de kritische poriëndiameter (poriëndiameter in µm die overeenkomt met de steilste helling op de cumulatieve poriënverdeling).

	Code	Totale porositeit (vol%)		Microporositeit (%)		d <sub>10</sub> (µm)		Kritische diameter (µm)	
ZWAK	D13.3A	30.53 30.03	30.3	48.48 42.72	45.6	45.5 45.5	45.5	21-33 26	26
	D7.4A	31.23 37.16	34.2	31.64 35.63	33.6	39.3 33.0	36.2	26 21	23
	D5.1A	31.56 29.04	30.3	47.34 51.51	49.4	45.5 33.0	39.3	21 21	21
<b>Gemiddelde</b>		<b>31.6</b>		<b>42.9</b>		<b>41.2</b>		<b>23.3</b>	
MATIG	D8.5A	27.53 28.46	28.0	49.25 46.49	47.9	33.1 33.0	33.1	26 21	23
	D4.1A	28.84 28.63	28.7	50.35 52.78	51.6	45.5 39.3	42.4	33 26	29
	D9.2A	30.30 30.44	30.4	50.59 47.93	49.3	45.5 26.0	25.8	26 14	20
	D15.3A	29.65 30.48	30.1	39.53 36.32	38.0	26.0 23.6	49.6	17 17	17
	D11.2A	25.71 24.72	25.2	45.04 50.28	47.7	33.1 33.1	33.1	21 21	21
	D12.3A	30.05 28.85	29.4	40.56 50.22	45.4	21.4 29.5	25.5	11 17	14
<b>Gemiddelde</b>		<b>28.6</b>		<b>46.6</b>		<b>34.9</b>		<b>20.7</b>	
GOED	D6.1A	26.24 19.01	22.6	<b>57.39</b> <b>69.54</b>	<b>63.5</b>	<b>9.1</b> <b>9.1</b>	<b>9.1</b>	7 6	6
	D13.3B	17.31 19.69	18.5	46.36 45.81	46.1	39.3 33.1	36.2	26 21	23
	D5.1B	10.76 21.52	16.1	<b>70.63</b> 47.91	<b>59.3</b>	<b>17.3</b> 33.0	25.2	7 21	14
<b>Gemiddelde</b>		<b>19.1</b>		<b>56.3</b>		<b>23.5</b>		<b>14.3</b>	

<sup>1</sup> Ingham J.P., 2008. *Predicting the frost resistance of building stone*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 38, 387-399.



Figuur 5. Gemiddelde waarden van diverse parameters voor de zwak, matig en goed geconsolideerde ijzerzandsteen.

De daling van de totale porositeit wordt verder ook gekoppeld aan een vermindering van de parameter  $d_{10}$ , die de gemiddelde poriëndiameter aangeeft waarbij 10% van de poriën bij kwikintrusie wordt gevuld. Deze waarde is gebaseerd op de hypothese dat hetzelfde punt wordt bereikt bij verzadiging met water onder vacuüm wanneer de natuursteen een verzadigingsgraad van 90% bereikt. Als de  $d_{10}$ -waarde groter is dan  $2.5 \mu\text{m}$  wordt het risico op vorstschade als verwaarloosbaar beschouwd (Ingham, 2008). Met een gemiddelde  $d_{10}$ -waarde tussen  $41.2$  en  $23.5 \mu\text{m}$  bevinden zowel zwak, matig als goed geconsolideerde ijzerzandsteen zich boven deze limietwaarde. De vergelijking van de microporositeit en de  $d_{10}$ -waarde in functie van de consolidatiegraad laat duidelijk zien dat beiden complementair zijn aan elkaar. Daarom ook dat dezelfde stalen van de goed geconsolideerde ijzerzandsteen hier eveneens gekenmerkt wordt door lage  $d_{10}$ -waarden die de limietwaarde voor vorstgevoeligheid benaderen.

Op basis van deze resultaten kan worden vermoed dat zowel voor zwak, matig als goed geconsolideerde Diestiaan ijzerzandsteen een redelijke vorstbestendigheid mag worden verwacht. In de petrografische studie werd de aanwezigheid van microscheuren vastgesteld en dit uitsluitend in sommige stalen van goed geconsolideerde ijzerzandsteen (zie bijlage III *Petrografische studie*). De hypothese is dat een te hoge cementatiegraad tot een hogere vorstgevoeligheid leidt als gevolg van een te groot aandeel aan microporositeit en/of een slechte connectiviteit tussen de poriën. Deze hypothese wordt minstens gedeeltelijk bevestigd aan de hand van de kwikporosimetriemetingen omdat het net enkele goed geconsolideerde ijzerzandsteen fragmenten zijn die de grenszone voor vorstgevoeligheid, op basis van beschikbare literatuurwaarden, naderen.





**Koninklijk Instituut voor  
het Kunstpatrimonium**

Federaal wetenschapsbeleid  
Jubelpark 1  
BE-1000 BRUSSEL

**Wetenschappelijk en Technisch  
Centrum voor het Bouwbedrijf**

Lombardstraat 42  
B-1000 BRUSSEL



## Onderzoeksproject VLA11-4.1

**Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen  
met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen**

### **Bijlage VIII Druksterkte**

D : 2012.11586

*Aanvrager:* Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON)

*Contactpersoon:* Mevr. Griet Verhaert

*Uitvoering:* Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB)  
Laboratorium Betontechnologie

*Verslaggeving:* Roald Hayen & Yves Vanhellemont

*Datum:* 30 september 2013

*Bijlagen:* 3 (9 blz.)  
64112041 (BE12D045, LMA 5320) dd. 29.10.2012, 3 blz.  
64112041 (BE13D004/1, LMA 5320) dd. 11.03.2013, 3 blz.  
64112041 (BE12D004/2, LMA 5376) dd. 11.03.2013, 3 blz.

## 1. Methodologie

Rekening houdende met de gepaste veiligheidscoëfficiënten, kan aan de hand van de druksterkte het toelaatbare drukbelastingsniveau bepaald worden voor een in een bouwwerk te verwerken natuursteen. De kennis van de druksterkte van ijzerzandsteen is daarom onontbeerlijk om deze voor structurele toepassingen aan te wenden.

Volgens de normvoorschriften (EN 1926) bestaat de proef uit minstens zes kubusvormige proefstukken met een zijde van 7 cm (de norm staat ook andere vormen en afmetingen toe). Indien de zijden onvoldoende vlak en haaks zijn, moeten deze bijgewerkt worden.

De proefstukken worden vervolgens gedroogd en centraal op het drukplatform van een proefpers geplaatst. Hierop oefent men een gelijkmatig verdeelde kracht uit die continu verhoogd wordt (1 MPa/s) tot breuk optreedt. De methode is bijgevolg destructief.

In de regel grijpt de kracht loodrecht op de gelaagdheid aan. De druksterkte ( $f_c$ ) van elk proefstuk wordt uitgedrukt als de verhouding tussen de bezwijklast ( $F$ ) van het proefstuk en de oppervlakte van zijn dwarsdoorsnede ( $A$ ), met behulp van de volgende formule:

$$f_c = \frac{F}{A} \text{ (MPa)}$$

Gezien de beperkte hoeveelheden aan proefmateriaal werd steeds slechts één enkel proefstuk getest per fragment.

Zeer specifiek voor ijzerzandsteen dienen we te bemerken dat de resultaten van de drukproef sterk kunnen afhangen van het vochtgehalte van de steen. De druksterkte van de steen kan immers aanzienlijk afnemen wanneer deze nat wordt (Bourel<sup>1</sup>). Bovendien zijn er minstens aanwijzingen van kruipgedrag, dat mogelijkwijs aan de basis ligt van de schade of het instorten van gebouwen uitgevoerd in ijzerzandsteen. Dit kruipgedrag uit zich in een initieel goed gedrag van de steen, maar bij aanhoudende (constante) belasting kan dit, zeker in vochtige omstandigheden, uiteindelijk toch tot het bezwijken van de natuursteen leiden. Dit soort van gedrag werd niet getest in de hierboven beschreven drukproef, noch werd de invloed van het vochtgehalte op de druksterkte nagegaan.

---

<sup>1</sup> E. Bourel, *Numerieke modellering van tijdsafhankelijk gedrag en faling van monumentale metselwerkstructuren*, Masterthesis, KU Leuven 2010

## 2. Overzicht meetresultaten

Tabel 1 geeft een overzicht van de meetresultaten. Afdrukken van de officiële proefrapporten van het WTCB zijn in bijlage toegevoegd. Hierin kan een volledige beschrijving van de stalen teruggevonden worden. Voor de codering van de stalen wordt verwezen naar bijlage X *Vergelijkende tabel voor de benamingen van de proefstukken*.

Voor de gegevens van de druksterkte werden in onderstaande tabel de precieze data opgenomen. De officiële rapportering vermeldt de afgeronde gegevens, zoals opgegeven door de normering. Enkel voor de losse fragmenten werden in tabel 1 afgeronde gegevens vermeld, afgerond tot op de eenheid.

Tabel 1. Overzichtstabel van de resultaten bekomen voor de druksterkte

Plaats, site staal	Diepte (m)	f <sub>c</sub> (MPa)
<b>Herent, Roeselberg</b>		
VLA10-4.1-B1		
H1/1	2.95 - 3.03	5.1
H1/3	5.42 - 5.54	20.3
H1/4	7.22 - 7.32	17.0
H1/5	7.97 - 8.06	15.9
H/F8	/	4
H/F9	/	30
<b>Minimum</b>		<b>4.0</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>15.4 ± 9.8</b>
<b>Maximum</b>		<b>30.0</b>
<b>Pellenberg, Gasthuisbos</b>		
VLA10-4.1-B2 (P1)		
VLA10-4.1-B3 (P2)		
P1/2	3.52 - 3.63	
P1/6	9.23 - 9.32	6.0
P1/7	11.63 - 11.72	30.3
P2/2	7.20 - 7.28	6.2
P/F3	/	8
P/F4	/	23
<b>Minimum</b>		<b>6.0</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>14.7 ± 11.2</b>
<b>Maximum</b>		<b>30.3</b>

<b>Wezemaal, Beninksberg</b>		
VLA10-4.1-B4 (W1)		
VLA10-4.1-B5 (W2)		
VLA10-4.1-B6 (W3)		
W1/2	4.19 - 4.27	
W1/3	5.63 - 5.71	19.8
W2/1	3.26 - 3.34	36.7
W2/3	4.06 - 4.15	3.1
W2/4	7.92 - 8.00	4.7
W3/1	2.47 - 2.55	37.2
W3/5b	3.86 - 3.98	2.1
W3/7	4.75 - 4.84	35.5
<b>Minimum</b>		<b>2.1</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>19.9 ± 16.6</b>
<b>Maximum</b>		<b>37.2</b>

<b>Rotselaar, Middelberg</b>		
VLA10-4.1-B7 (R1)		
VLA10-4.1-B8 (R2)		
R1/2	5.93 - 6.02	12.9
R2/1	2.47 - 2.55	3.5
R2/5	6.88 - 6.97	10.4
R/F6	/	19
R/F7	/	
<b>Minimum</b>		<b>3.5</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>11.5 ± 6.4</b>
<b>Maximum</b>		<b>19.0</b>

<b>Diest, Langenberg</b>		
D3.0	0.05 - 0.20	12.6
D3.1	0.30 - 0.45	8.2
D4.0	0.03 - 0.17	11.9
D6.2	0.25 - 0.39	5.1
D8.4	0.39 - 0.53	14.8
D9.2	0.25 - 0.40	6.8
D9.3	0.65 - 0.80	6.9
D10.2	0.54 - 0.66	14.8
D11.1	0.05 - 0.15	21.8
	0.15 - 0.25	20.8
	0.25 - 0.35	7.8
D12.3	0.35 - 0.50	11.8
D14.0	0.01 - 0.16	11.7
D14.3	0.65 - 0.80	10.0
D15.3	0.45 - 0.60	4.0
<b>Minimum</b>		<b>4.0</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>11.3 ± 5.2</b>
<b>Maximum</b>		<b>21.8</b>





# WETENSCHAPPELIJK EN TECHNISCH CENTRUM VOOR HET BOUWBEDRIJF

INRICHTING ERKEND BIJ TOEPASSING VAN DE BESLUITWET VAN 30 JANUARI 1947



- Proefstation: B-1342 Limelette, avenue P. Holoffe 21  
- Kantoren: B-1932 Sint-Stevens-Woluwe, Lozenberg 7  
- Maatschappelijke zetel: B-1000 Brussel, Lombardstraat 42

Tel.: (32) 02 655 77 11

Fax: (32) 02 653 07 29

Tel.: (32) 02 716 42 11

Fax: (32) 02 725 32 12

Tel.: (32) 02 502 66 90

Fax: (32) 02 502 81 80

Btw-nr.: BE 407.695.057

**Blz. 1/3**

**LABORATORIUM:**  
**BETONTECHNOLOGIE**  
**(BE)**

**PROEFVERSLAG**

Nr. DE, ATA, RE : 64112041

Nr. Labo : BE12D045  
LMA 5320

Nr. Monster : 2012/27/020

**AANVRAGER:** Koninklijk Instituut voor het Kunspatrimonium (KIK)  
Jubelpark 1  
1000 Brussel

**Gecontacteerde personen:**

**- Aanvrager -**

**- WTBC -**

Mevr. Hilde De Clercq

Dhr. Yves Vanhellemont

**Uitgevoerde proeven:** SP/BE/7.16 : Bepaling van de druksterkte van natuursteen

**Referenties:** NBN EN 1926 (2007)

**Datum en referentie van de aanvraag** : 03/08/2012

**Ontvangstdatum van het (de) proefstuk(ken)** : 04/07/2012

**Datum van de proef** : 28/09/2012

**Datum opstelling van het verslag** : 29/10/2012

Dit proefverslag bevat **3** pagina's, genummerd van **1/3** tot en met **3/3**, en mag slechts in zijn geheel verveelvoudigd worden.

Elk blad van het origineel verslag is afgestempeld met de laboratoriumstempel (in het rood) en geparafeerd door het laboratoriumhoofd.

De resultaten en waarnemingen zijn slechts geldig voor de beproefde monsters.

Geen monster

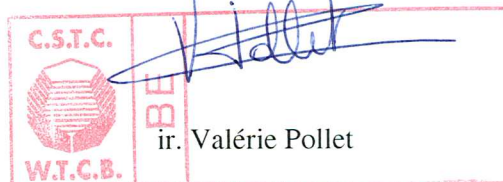
Monster(s) onderworpen aan destructieve proef

Monster(s) 60 kalenderdagen na het opsturen van het verslag uit onze laboratoria verwijderd, behalve bij andersluidende schriftelijke aanvraag

Projectleider  
Labo Betontechnologie

ir. Bram Dooms

Het Adjunct Departementshoofd  
"Materialen, Technologie en Omhulsel"



## 1. INLEIDING

De ontvangen proefstukken betreffen 6 brokstukken ijzerzandsteen, geïdentificeerd met P/F3, P/F4, R/F6, R/F7, H/F8 en H/F9. Al deze brokstukken vertoonden holtes, scheuren en onregelmatigheden (zie Figuur 1).



*Figuur 1 : Brokstuk P/F3 zoals ontvangen*

Uit deze brokstukken dienden de proefstukken (kubussen met ribbe  $50 \pm 5$  mm) gezaagd te worden voor de drukproeven, terwijl de onvolmaaktheden zoveel mogelijk vermeden werden. Hierdoor kon slechts 1 kubus uit ieder brokstuk gezaagd worden.

De overgebleven proefstukken werden als volgt genummerd:

- BE12D045/1: kubus uit brokstuk P/F3
- BE12D045/2: kubus uit brokstuk P/F4
- BE12D045/3: kubus uit brokstuk R/F6
- BE12D045/5: kubus uit brokstuk H/F8
- BE12D045/6: kubus uit brokstuk H/F9

Voor proefstuk BE12D045/1 konden de vereiste afmetingen niet gerespecteerd worden. Proefstuk BE12D045/4 brak tijdens de rectificering, waarna ook de rectificering van proefstuk BE12D045/5 niet uitgevoerd werd en dit proefstuk niet voldeed aan de toleranties van de norm.

## 2. DRUKPROEVEN

De drukproeven werden uitgevoerd op 28 september 2012 met behulp van een machine "TONI-MFL", die is uitgerust met een in kracht regelbare servohydraulische vijzel met een capaciteit van 4000 kN. Deze pers is van klasse 1 volgens de norm NBN EN ISO 7500-1.

De gemiddelde zijlengte en hoogte, de breekkracht en de druksterkte van de proefstukken zijn opgenomen in tabel 1.





**Proefmethoden voor natuursteen -  
Bepaling van de druksterkte volgens NBN EN 1926 (2007)****Proefstukken**

Nr. ontvangstregister	2012/27/020
Petrografische aard van de steen	Diestiaan ijzerzandsteen
Handelsbenaming van de steen	/
Land en plaats van ontginning	Diest, België
Leverancier	/
Anisotropievlakken	Niet zichtbaar
Verantwoordelijke voor de monsterneming	Niet meegedeeld
Oppervlakteafwerking	Gezaagd
Aantal proefstukken	5

**Laboratorium**

Behandeling voor de proef	Droging bij (70±5)°C tot constante massa, gevolgd door bewaring in het laboratorium bij (20±5)°C tot thermisch evenwicht
Oriëntatie krachtas-anisotropievlakken	Niet zichtbaar
Stijgsnelheid spanning	0,5 MPa/s

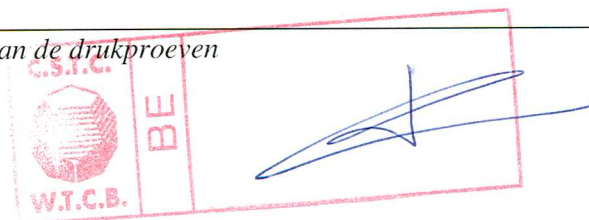
**Resultaten**

Proefstuk	Gemiddelde zijlengte (mm)	Gemiddelde hoogte (mm)	Kracht (kN)	R <sub>c</sub> (MPa)
BE12D045/1	51,2	43	20	8
BE12D045/2	50,7	51	60	23
BE12D045/3	51,5	51	50	19
BE12D045/5	51,2	50	10	4
BE12D045/6	51,3	51	80	30
<b>Gemiddelde</b>				/
Standaardafwijking				/
Variatiecoëfficiënt				/

**Opmerkingen**

Verschillen met de norm	<ul style="list-style-type: none"><li>▶ Er werden slechts 5 proefstukken getest in plaats van 10.</li><li>▶ Geen vermelding van het gemiddelde, de standaardafwijking en de variatiecoëfficiënt, wegens het kleine aantal proefstukken.</li><li>▶ De hoogte van proefstuk BE12D045/1 viel buiten de tolerantie.</li><li>▶ Proefstuk BE12D045/5 viel buiten de toleranties voor de vlakheid van de zijvlakken en het parallelisme van de laadvlakken.</li></ul>
Andere	

Tabel 1 : Resultaten van de drukproeven





# WETENSCHAPPELIJK EN TECHNISCH CENTRUM VOOR HET BOUWBEDRIJF

INRICHTING ERKEND BIJ TOEPASSING VAN DE BESLUITWET VAN 30 JANUARI 1947



- Proefstation: B-1342 Limelette, avenue P. Holoffe 21  
- Kantoren: B-1932 Sint-Stevens-Woluwe, Lozenberg 7  
- Maatschappelijke zetel: B-1000 Brussel, Lombardstraat 42

Tel.: (32) 02 655 77 11  
Tel.: (32) 02 716 42 11  
Tel.: (32) 02 502 66 90

Fax: (32) 02 653 07 29  
Fax: (32) 02 725 32 12  
Fax: (32) 02 502 81 80

Btw-nr.: BE 407.695.057

Blz. 1/3

**LABORATORIUM:**  
**BETONTECHNOLOGIE**  
**(BE)**

**PROEFVERSLAG**

Nr. DE, ATA, RE : 64112041  
Nr. Labo : BE13D004/1  
LMA5320  
Nr. Monster : 2012/27/020

**AANVRAGER:** Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK)  
Jubelpark 1  
1000 Brussel

**Gecontacteerde personen:**

**- Aanvrager -**

**- WTBC -**

Mevr. Hilde De Clercq

Dhr. Bram Dooms

**Uitgevoerde proeven:** Bepaling van de druksterkte van natuursteen

**Referenties:** NBN EN 1926 (2007)

**Datum en referentie van de aanvraag** : 20/12/2012  
**Ontvangstdatum van het (de) proefstuk(ken)** : 20/12/2012  
**Datum van de proef** : 15/02/2013  
**Datum opstelling van het verslag** : 11/03/2013

Dit proefverslag bevat **3** pagina's, genummerd van **1/3** tot en met **3/3**, en mag slechts in zijn geheel verveelvoudigd worden.

Elk blad van het origineel verslag is afgestempeld met de laboratoriumstempel (in het rood) en geparafeerd door het laboratoriumhoofd.

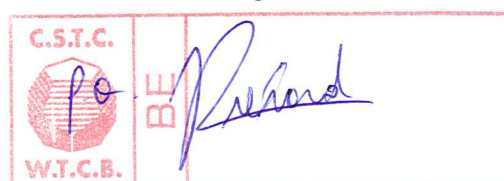
De resultaten en waarnemingen zijn slechts geldig voor de beproefde monsters.

- Geen monster  
 Monster(s) onderworpen aan destructieve proef  
 Monster(s) 60 kalenderdagen na het opsturen van het verslag uit onze laboratoria verwijderd, behalve bij andersluidende schriftelijke aanvraag

Projectleider  
Labo Betontechnologie

ir. Bram Dooms

Het Adjunct Departementshoofd  
"Materialen, Technologie en Omhulsel"



ir. Valérie Pollet





## 1. INLEIDING

Uit de ontvangen kernen werd telkens 1 kubus met afmetingen 50 x 50 x 50 mm<sup>3</sup> gezaagd. Ze werden als volgt genummerd:

- ▶ BE13D004/1/1 : afkomstig uit kern “H1/1 : 2,95-3,03”,
- ▶ BE13D004/1/2 : afkomstig uit kern “H1/3 : 5,42-5,54”,
- ▶ BE13D004/1/3 : afkomstig uit kern “H1/4 : 7,22-7,32”,
- ▶ BE13D004/1/4 : afkomstig uit kern “H1/5 : 7,97-8,06”,
- ▶ BE13D004/1/5 : afkomstig uit kern “P1/6 : 9,23-9,32”,
- ▶ BE13D004/1/6 : afkomstig uit kern “P1/7 : 10,63-10,72”,
- ▶ BE13D004/1/7 : afkomstig uit kern “P2/2 : 7,20-7,28”,
- ▶ BE13D004/1/8 : afkomstig uit kern “W1/3 : 5,63-5,71”,
- ▶ BE13D004/1/9 : afkomstig uit kern “W2/1 : 3,26-3,34”,
- ▶ BE13D004/1/10 : afkomstig uit kern “W2/3 : 4,06-4,15”,
- ▶ BE13D004/1/11 : afkomstig uit kern “W2/4 : 7,92-8,00”,
- ▶ BE13D004/1/12 : afkomstig uit kern “W3/1 : 2,47-2,55”,
- ▶ BE13D004/1/13 : afkomstig uit kern “W3/5 : 3,86-3,98”,
- ▶ BE13D004/1/14 : afkomstig uit kern “W3/7 : 4,75-4,84”,
- ▶ BE13D004/1/15 : afkomstig uit kern “R1/2 : 5,93-6,02”,
- ▶ BE13D004/1/16 : afkomstig uit kern “R2/1 : 2,47-2,55”,
- ▶ BE13D004/1/17 : afkomstig uit kern “R2/5 : 6,88-6,97”.

De proefstukken vertoonden in alle gevallen gebreken, vaak in belangrijke mate (luchtholtes, afgebroken hoeken, scheuren,...., zie Figuur 1).



*Figuur 1 : Proefstuk BE13D004/1/15*

Uit kern “W1/2: 4,19-4,27” was het niet mogelijk een kubus te zagen door de aanwezigheid van een ader doorheen de kern.

## 2. DRUKPROEVEN

De drukproeven werden uitgevoerd op 15 februari 2013 met behulp van een machine “TONI-MFL”, die is uitgerust met een in kracht regelbare servohydraulische vijzel met een capaciteit van 250 kN. Deze pers is van klasse 1 volgens de norm NBN EN 12390-4.

De gemiddelde zijlengte en hoogte, de breekkracht en de druksterkte van de proefstukken zijn opgenomen in tabel 1.



**Proefmethoden voor natuursteen -  
Bepaling van de druksterkte volgens NBN EN 1926 (2007)****Proefstukken**

Nr. ontvangstregister	2012/27/020
Petrografische aard van de steen	Diestiaan ijzerzandsteen
Handelsbenaming van de steen	/
Land en plaats van ontginning	Diest, België
Leverancier	/
Anisotropievlakken	Zichtbaar/aangegeven door de klant
Verantwoordelijke voor de monsterneming	Niet meegedeeld
Oppervlakteafwerking	Gezaagd
Aantal proefstukken	17

**Laboratorium**

Behandeling voor de proef	Droging bij (70±5)°C tot constante massa, gevolgd door bewaring in het laboratorium bij (20±5)°C tot thermisch evenwicht
Oriëntatie krachtas-anisotropievlakken	Loodrecht (figuur 1a van de norm), aangegeven door de klant
Stijgsnelheid spanning	0,33 MPa/s

**Resultaten**

Proefstuk	Gemiddelde zijlengte $\bar{l}$ (mm)	Hoogte h (mm)	Breekkracht F (kN)	Druksterkte R (MPa)
BE13D004/1/1	50,7	49	10	4
BE13D004/1/2	50,2	50	50	20
BE13D004/1/3	50,5	50	40	16
BE13D004/1/4	50,7	50	40	16
BE13D004/1/5	50,6	50	20	8
BE13D004/1/6	50,1	50	80	32
BE13D004/1/7	50,4	50	20	8
BE13D004/1/8	50,2	50	50	20
BE13D004/1/9	50,3	50	90	36
BE13D004/1/10	50,3	50	10	4
BE13D004/1/11	50,2	49	10	4
BE13D004/1/12	49,8	50	90	36
BE13D004/1/13	50,1	50	10	4
BE13D004/1/14	49,7	50	90	36
BE13D004/1/15	49,9	49	30	12
BE13D004/1/16	50,4	50	10	4
BE13D004/1/17	50,0	49	30	12

**Opmerkingen**

Verschillen met de norm	De proefstukken vertoonden in alle gevallen gebreken, vaak in belangrijke mate (luchtholtes, afgebroken hoeken, scheuren, ...). In vele gevallen werden de toleranties van de norm overschreden.
Andere	

Tabel 1 : Resultaten van de drukproeven







# WETENSCHAPPELIJK EN TECHNISCH CENTRUM VOOR HET BOUWBEDRIJF

INRICHTING ERKEND BIJ TOEPASSING VAN DE BESLUITWET VAN 30 JANUARI 1947



- Proefstation: B-1342 Limelette, avenue P. Holoffe 21  
- Kantoren: B-1932 Sint-Stevens-Woluwe, Lozenberg 7  
- Maatschappelijke zetel: B-1000 Brussel, Lombardstraat 42

Tel.: (32) 02 655 77 11

Fax: (32) 02 653 07 29

Tel.: (32) 02 716 42 11

Fax: (32) 02 725 32 12

Tel.: (32) 02 502 66 90

Fax: (32) 02 502 81 80

Btw-nr.: BE 407.695.057

Blz. 1/3

**LABORATORIUM:**  
**BETONTECHNOLOGIE**  
**(BE)**

**PROEFVERSLAG**

Nr. DE, ATA, RE : 64112041

Nr. Labo : BE12D004/2  
LMA5376

Nr. Monster : 2012/51/001

**AANVRAGER:** Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK)  
Jubelpark 1  
1000 Brussel

**Gecontacteerde personen:**

**- Aanvrager -**

**- WTBCB -**

Dhr. Roald Hayen

Dhr. Bram Dooms

**Uitgevoerde proeven:** Bepaling van de druksterkte van natuursteen

**Referenties:** NBN EN 1926 (2007)

**Datum en referentie van de aanvraag** : 20/12/2012

**Ontvangstdatum van het (de) proefstuk(ken)** : 20/12/2012

**Datum van de proef** : 15/02/2013

**Datum opstelling van het verslag** : 11/03/2013

Dit proefverslag bevat **3** pagina's, genummerd van **1/3** tot en met **3/3**, en mag slechts in zijn geheel verveelvoudigd worden.

Elk blad van het origineel verslag is afgestempeld met de laboratoriumstempel (in het rood) en geparafeerd door het laboratoriumhoofd.

De resultaten en waarnemingen zijn slechts geldig voor de beproefde monsters.

Geen monster

Monster(s) onderworpen aan destructieve proef

Monster(s) 60 kalenderdagen na het opsturen van het verslag uit onze laboratoria verwijderd, behalve bij andersluidende schriftelijke aanvraag

Projectleider  
Labo Betontechnologie

ir. Bram Dooms

Het Adjunct Departementshoofd  
"Materialen, Technologie en Omhulsel"

ir. Valérie Pollet

## 1. INLEIDING

Uit de ontvangen kernen werd telkens 1 kubus met afmetingen 70 x 70 x 70 mm<sup>3</sup> gezaagd. Ze werden als volgt genummerd:

- ▶ BE13D004/2/1 : afkomstig uit kern “D30/5-20”,
- ▶ BE13D004/2/2 : afkomstig uit kern “D31/40-45”,
- ▶ BE13D004/2/3 : afkomstig uit kern “D40/3-17”,
- ▶ BE13D004/2/4 : afkomstig uit kern “D62/25-39”,
- ▶ BE13D004/2/5 : afkomstig uit kern “D84/39-53”,
- ▶ BE13D004/2/6 : afkomstig uit kern “D92/25-40”,
- ▶ BE13D004/2/7 : afkomstig uit kern “D93/65-80”,
- ▶ BE13D004/2/8 : afkomstig uit kern “D102/54-66”,
- ▶ BE13D004/2/9 : afkomstig uit kern “D110/5-15”,
- ▶ BE13D004/2/10 : afkomstig uit kern “D110/15-25”,
- ▶ BE13D004/2/11 : afkomstig uit kern “D110/25-35”,
- ▶ BE13D004/2/12 : afkomstig uit kern “D123/35-50”,
- ▶ BE13D004/2/13 : afkomstig uit kern “D140/1-16”,
- ▶ BE13D004/2/14 : afkomstig uit kern “D143/65-80”,
- ▶ BE13D004/2/15 : afkomstig uit kern “D153/45-60”.

De proefstukken vertoonden in alle gevallen gebreken, vaak in belangrijke mate (luchtholtes, afgebroken hoeken, scheuren,...., zie Figuur 1).



*Figuur 1 : Proefstuk BE13D004/2/9*

## 2. DRUKPROEVEN

De drukproeven werden uitgevoerd op 15 februari 2013 met behulp van een machine “TONI-MFL”, die is uitgerust met een in kracht regelbare servohydraulische vijzel met een capaciteit van 250 kN. Deze pers is van klasse 1 volgens de norm NBN EN 12390-4.

De gemiddelde zijlengte en hoogte, de breekkracht en de druksterkte van de proefstukken zijn opgenomen in tabel 1.





**Proefmethoden voor natuursteen -  
Bepaling van de druksterkte volgens NBN EN 1926 (2007)****Proefstukken**

Nr. ontvangstregister	2012/51/001
Petrografische aard van de steen	Diestiaan ijzerzandsteen
Handelsbenaming van de steen	/
Land en plaats van ontginning	Diest, België
Leverancier	/
Anisotropievlakken	Zichtbaar/aangegeven door de klant
Verantwoordelijke voor de monsterneming	Niet meegedeeld
Oppervlakteafwerking	Gezaagd
Aantal proefstukken	15

**Laboratorium**

Behandeling voor de proef	Droging bij (70±5)°C tot constante massa, gevolgd door bewaring in het laboratorium bij (20±5)°C tot thermisch evenwicht
Orientatie krachtas-anisotropievlakken	Loodrecht (figuur 1a van de norm), aangegeven door de klant
Stijgsnelheid spanning	0,34 MPa/s

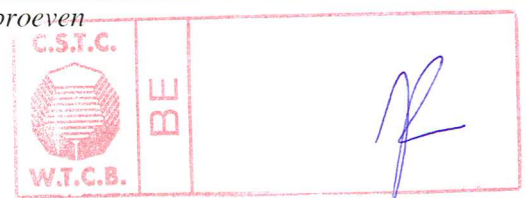
**Resultaten**

Proefstuk	Gemiddelde zijlengte $\bar{l}$ (mm)	Hoogte h (mm)	Breekkracht F (kN)	Druksterkte R (MPa)
BE13D004/2/1	70,9	69	60	12
BE13D004/2/2	71,0	71	40	8
BE13D004/2/3	70,7	70	60	12
BE13D004/2/4	70,6	71	30	6
BE13D004/2/5	50,9	50	40	15
BE13D004/2/6	71,3	71	30	6
BE13D004/2/7	71,0	70	30	6
BE13D004/2/8	70,8	71	70	14
BE13D004/2/9	70,6	70	110	22
BE13D004/2/10	70,8	70	100	20
BE13D004/2/11	70,3	70	40	8
BE13D004/2/12	70,7	70	60	12
BE13D004/2/13	70,6	71	60	12
BE13D004/2/14	70,6	70	50	10
BE13D004/2/15	70,5	70	20	4

**Opmerkingen**

Verschillen met de norm	De proefstukken vertoonden in alle gevallen gebreken, vaak in belangrijke mate (luchtholtes, afgebroken hoeken, scheuren, ...). In vele gevallen werden de toleranties van de norm overschreden.
Andere	De afmetingen van proefstuk BE13D004/2/5, afkomstig uit kern "D84/39-53", bedroegen 50 x 50 x 50 mm <sup>3</sup> .

Tabel 1 : Resultaten van de drukproeven





**Koninklijk Instituut voor  
het Kunstpatrimonium**

Federaal wetenschapsbeleid  
Jubelpark 1  
BE-1000 BRUSSEL

**Wetenschappelijk en Technisch  
Centrum voor het Bouwbedrijf**

Lombardstraat 42  
B-1000 BRUSSEL



## Onderzoeksproject VLA11-4.1

**Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen  
met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen**

### **Bijlage IX Vorstbestendigheid**

D : 2012.11586

*Aanvrager:* Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON)

*Contactpersoon:* Mevr. Griet Verhaert

*Uitvoering:* Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB)  
Laboratorium LMA

*Verslaggeving:* Roald Hayen & Yves Vanhellemont

*Datum:* 30 september 2013

*Bijlagen:* 4 (30 blz.)

64112041-1 (LMA 5320) dd. 04.12.2012, 7 blz.

64112041-2 (LMA 5320) dd. 25.02.2013, 5 blz.

64112041-3 (LMA 5376) dd. 25.02.2013, 6 blz.

64112041-4 (LMA 5320 en 5376) dd. 04.04.2013, 5 blz.

64112041-5 (LMA 5320 en 5376) dd. 29.05.2013, 7 blz.

## 1. Inleiding

Voor de evaluatie van de vorstbestendigheid van natuursteen bestaan er twee normen: de Belgische norm voor baksteen en keramische tegels NBN B 27-009, daterende van 1983 en waarbij het aantal cycli gebaseerd is op de inmiddels ingetrokken norm voor natuursteen NBN B17-001, en de Europese norm voor natuursteen NBN EN 12371, verschenen in 2000. Beide normen zijn niet onderling inwisselbaar.

De Belgische norm heeft het specifieke voordeel dat de uitvoeringstijd kort is en dat er mee aanzienlijke ervaring is opgebouwd in de loop van de jaren. Belangrijke nadelen zijn evenwel de benodigde afmetingen van de proefstukken, die in deze meetcampagne niet haalbaar waren, en de noodzaak tot de voorafgaandelijke keuze van het toepassingsgebied. Deze proef is immers als volgt opgevat:

1. de toepassing waarvoor de natuursteen dient te worden gebruikt wordt vastgelegd;
2. de druk wordt bepaald waarmee het proefstuk met water wordt geïmpregneerd (in functie van de beoogde toepassing);
3. de vorst-dooi cycli worden uitgevoerd.

Het gevolg van deze benadering is dat men alzo de geschiktheid van de natuursteen voor één specifieke toepassing bepaalt, maar dat men geen informatie verkrijgt omtrent het gebruik ervan in andere toepassingen. Indien, bijvoorbeeld, de geschiktheid van een type natuursteen bepaald wordt voor de toepassing in verticaal opgaand metselwerk, dan weet men op basis van deze genormaliseerde proefopstelling uiteindelijk niets omtrent de toepasbaarheid ervan in meer belastende omstandigheden, zoals een vloerbedekking buiten, of het gebruik van de steen in een kroonlijst.

De Europese norm voorziet een totaal andere benadering. De proefstukken worden vooraf steeds op dezelfde manier geconditioneerd en vervolgens blootgesteld aan een reeks identieke vorst-dooi cycli. Deze werkwijze beoordeelt vervolgens de natuursteen als des te duurzamer, naarmate deze meer van deze cycli doorstaat vooraleer falen optreedt. Op basis van één set proefstukken kan zo bepaald worden voor welke toepassingen de natuursteen geschikt is, en voor welke niet. Een bijkomend voordeel van deze proefmethode is de kleinere afmetingen van de proefstukken. Een nadeel is evenwel dat de uitvoering veel meer tijd in beslag neemt in vergelijking met de oude Belgische norm.

Gezien de voordelen van de kleinere afmetingen en de studie van het gebruik in diverse toepassingsgebieden in dit onderzoek als primordiaal werden beschouwd, werd gekozen om de proeven volgens de nieuwe normering NBN EN 12371 uit te voeren.

## 2. Methodologie

### 2.1. Evaluatie van de vorstbestendigheid

De norm NBN EN 12371 stelt twee proefmethoden voor: een identificatieproef en een technologische proef. In België is besloten om de identificatieproef als duurzaamheidsproef te hanteren, gezien specifieke ervaringen waar hier niet verder op ingegaan wordt.

Voor de identificatieproef zijn zeven prismatische proefstukken met afmetingen 50 x 50 x 300 mm<sup>3</sup> nodig. Wanneer deze afmetingen niet haalbaar zijn, dient men zoveel mogelijk proefstukken te gebruiken waarvan de verhouding tussen de verschillende zijden gelijkaardig is aan deze standaardafmetingen. De vorm (prisma) is bijgevolg belangrijker dan de afmetingen. Indien ook dat evenwel niet mogelijk is, kan men eventueel gebruik maken van afwijkende vormen (kubus, cilinder). Men dient zich dan echter te realiseren dat de proef uiteraard niet meer conform de norm wordt uitgevoerd en dat de resultaten met heel wat meer omzichtigheid dienen gehanteerd te worden.

Alvorens de proefstukken aan de vorst-dooi cycli bloot te stellen, worden deze eerst bij atmosferische druk gedurende 48 uren in water ondergedompeld.

Eén vorst-dooi cyclus duurt 24 uren en bestaat uit:

1. een vriesfase, waarbij gedurende 6 uur de temperatuur in de kern van het proefstuk daalt tot -8°C;
2. een dooiperiode van 18 uur.

In principe worden deze cycli herhaald tot er 'breuk' van het monster optreedt. Een steen wordt beschouwd als 'gebroken' indien aan één van volgende voorwaarden is voldaan:

- De stenen worden visueel beoordeeld op schade. Vanaf schade-waarde 3 wordt de steen als gebroken beschouwd. 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 mm<sup>2</sup>.
- De vermindering van het schijnbare volume groter is dan 1%. Hoewel dit criterium momenteel niet meer wordt gehanteerd, wordt het hier vermeld omdat tijdens de meetcampagne in een aantal gevallen de vermindering van het schijnbare volume toch werd bepaald.
- De vermindering van dynamische elasticiteitsmodulus is groter dan of gelijk aan 30%.

Aan het proefstuk wordt dan het voorgaande aantal behaalde vorst-dooi cycli toegekend als criterium voor vorstbestendigheid.

Volgende beschrijving komt overeen met de code voor de visuele beoordeling van de schade aan het proefstuk:

0 = intact proefstuk;

1 = zeer lichte beschadiging: afronding van de hoeken en ribben van het proefstuk, zonder dat de integriteit van het proefstuk is aangetast;

2 = één of enkele scheurtjes met een scheurwijdte van minder dan 0.1 mm, of loskomen van fragmenten kleiner dan 30 mm<sup>2</sup>;

3 = één of meerdere scheuren of beschadigingen die erger zijn dan bij 2, of beschadiging van het materiaal rond anders, waar het proefstuk tekenen van desintegratie (vb. verpoedering) vertoont;

4 = proefstuk in twee of meer stukken gebroken, of in belangrijke mate verpoederd.

Wanneer de vorst-dooi proeven worden uitgevoerd op niet-genormaliseerde proefstukken (met afwijkende vorm) is het beter om ook niet meer het verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus als criterium toe te passen. De rechtstreekse bepaling van de dynamische elasticiteitsmodulus op niet-prismatische proefstukken of prismatische proefstukken met een sterk afwijkende lengte/breedte verhouding dan oorspronkelijk voorgeschreven is immers niet mogelijk of levert te sterk afwijkende



waarden op. Vaak wordt de elasticiteitsmodulus dan bepaald op basis van de geluidssnelheid. Men dient zich dan echter te realiseren dat het criterium van een maximaal verlies van 30% aan elasticiteitsmodulus daarbij niet zomaar getransponeerd kan worden op de metingen gebaseerd op de geluidssnelheid. De nodige voorzichtigheid is daarbij geboden.

De evaluatie van de schade aan het proefstuk op basis van bovenstaande criteria wordt uiteraard niet na elke cyclus uitgevoerd, wegens te tijdrovend. Elke keer moeten immers de proefstukken volledig drogen, geëvalueerd worden om vervolgens opnieuw gedurende 48 uur te worden ondergedompeld om de vorst-dooi cycli verder te zetten. In de praktijk voert men bijgevolg een reeks cycli uit, waarna telkens een evaluatie wordt uitgevoerd. Volgende evaluatiemomenten worden, conform aan de norm, standaard gehanteerd: na 14, 56, 70, 84 en 140 cycli. Soms worden intermediaire stadia hieraan toegevoegd.

Het interpretatieschema weergegeven in Tabel 1 wordt gehanteerd om vervolgens de vorstbestendigheid te evalueren in functie van de beoogde toepassing.

Tabel 1. Interpretatieschema voor de evaluatie van de vorst-dooi cycli volgens de norm NBN EN 12371

Toepassing	aantal cycli dat minimaal behaald dient te worden volgens NBN 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

Gezien de beperkte hoeveelheid aan beschikbaar materiaal in dit onderzoek en de beperkte afmetingen daarvan, werden noch het aantal proefstukken, noch de afmetingen zoals voorgeschreven door de norm gehaald. Om die reden kon ook niet steeds een rechtstreekse meting van de dynamische elasticiteitsmodulus worden uitgevoerd. De verandering van de dynamische elasticiteitsmodulus werd daarom veelal op indirecte manier bepaald uitgaande van de verandering van de geluidssnelheid.

Tenzij stalen schadeloos de 140 cycli doorlopen, is deze proef destructief.

## 2.2. Meting van de geluidssnelheid

De meting van de geluidssnelheid is uitgevoerd conform de standaard EN 14579.

Door middel van een zender wordt in het proefstuk een elektroakoestische impuls opgewekt. Via een ontvanger, geplaatst aan een van de uiteinden van het proefstuk, wordt vervolgens de tijd ( $t$ , in  $\mu\text{s}$ ) bepaald die het signaal nodig heeft om de afstand ( $l$ , in mm) tussen de zender en ontvanger af te leggen doorheen het materiaal. Op basis van deze waarden wordt de geluidsvoortplantingssnelheid ( $v$ , in km/s) bepaald.

Het gaat hier om een zeer precieze techniek die echter afhankelijk is van een groot aantal invloedsparameters. De geluidsvoortplantingssnelheid in natuursteen wordt immers bepaald door onder meer de compactheid van het materiaal, het vochtgehalte, zijn mineralogische samenstelling, de aanwezigheid van eventuele scheuren of bepaalde zouten, ...

De meting van de geluidssnelheid werd hier uitgevoerd ten behoeve van de evaluatie van het verlies aan elasticiteitsmodulus als gevolg van vorstschade. De metingen werden bijgevolg op een vereenvoudigde manier uitgevoerd en zijn niet te vergelijken met de uitgebreide meetcampagne op de boorkernen, zoals omschreven in bijlage II *Geluidssnelheidsmetingen*, die een geluidssnelheidsprofiel opleveren in functie van de locatie op de boorkern.

De meting hier werd beperkt tot één waarde per proefstuk die kan worden aanzien als een soort gemiddelde 'bulk'-waarde. Dit werd als voldoende beschouwd. Omdat de meting steeds op eenzelfde wijze werd uitgevoerd, is het mogelijk de schade-evolutie als gevolg van de vorst-dooi cycli in kaart te brengen. De geluidssnelheidswaarden op eenzelfde proefstuk zijn bijgevolg onderling vergelijkbaar, maar hebben weinig absolute waarde.

### 2.3. Meting van de dynamische elasticiteitsmodulus

De elasticiteitsmodulus van een materiaal karakteriseert de spanningstoestand die in dit materiaal gegenereerd wordt, afhankelijk van de uitgeoefende belasting. Deze kan ofwel berekend worden op basis van vervormingsmetingen uitgevoerd tijdens een belastingsproef (in dit geval heeft men te maken met een statische elasticiteitsmodulus), ofwel door de meting van de respons van het materiaal op opgewekte trillingen. In dit geval wordt de elasticiteitsmodulus beschouwd als 'dynamisch' en wordt deze berekend aan de hand van de resonantiefrequentie. Het grote voordeel van deze laatste methode is haar niet-destructieve karakter.

Voor natuursteen wordt de dynamische elasticiteitsmodulus doorgaans gebruikt als indicator voor de mogelijke verwerking van het materiaal door de vergelijking met referentiewaarden. Ook bij de uitvoering van vorstbestendigheidspoeven en bij de bepaling van de weerstand tegen thermische schokken wordt gebruik gemaakt van deze methode.

De rechtstreekse meting van de dynamische elasticiteitsmodulus wordt beschreven door de norm EN 14146. Normaal gezien worden minstens zes cilindrische of prismatische proefstukken onderzocht. Ze worden aan het trillen gebracht door een impulsgenerator, zodat resonantie optreedt. Dit kan gebeuren op een van de volgende wijzen: longitudinaal, in buiging of in torsie. De resonantiefrequentie wordt daarbij bepaald met een meettoestel van het 'Grindo-sonic'-type. De formules uit de norm maken het vervolgens mogelijk de dynamische elasticiteitsmodulus te berekenen, rekening houdende met de trillingsmodus.

Gezien de beperkte hoeveelheid aan proefmateriaal werd voor dit onderzoek steeds één enkel proefstuk getest. Bovendien was het in het merendeel van de gevallen niet mogelijk om de dynamische elasticiteitsmodules rechtstreeks te bepalen, daar de vorm vaak te sterk afweek van de voorgeschreven prismatische proefstukken. De vorm van het proefstuk is immers cruciaal voor de bepaling van de resonantiefrequentie.

Slechts in enkele gevallen was een rechtstreekse meting van de dynamische elasticiteitsmodulus mogelijk.

Zoals reeds aangehaald, werd daarom in de meeste gevallen de elasticiteitsmodulus geschat op basis van de geluidssnelheid. Voor proefstukken met een vaste vorm en afmetingen bestaat er een vast verband tussen de elasticiteitsmodules ( $E_{dyn}$ ) en de geluidssnelheid ( $v_L$ ). De evenredigheidsfactor is onder meer afhankelijk van de vorm van de proefstukken, de afmetingen, de poissoncoëfficiënt ( $\nu$ ) en de dichtheid ( $\rho_b$ ). Hier werd volgende omrekening gehanteerd:

$$E_{dyn} = \frac{v_L^2 \rho_b (1 + \nu) (1 - 2\nu)}{1 - \nu} \text{ (GPa)}$$

Om de verandering in elasticiteitsmodulus te bepalen, is het in principe voldoende om de verandering in geluidssnelheid te bepalen en deze om te rekenen naar een verandering in elasticiteitsmodulus. Daarbij wordt uitgegaan van de veronderstelling dat de evenredigheidsfactor onveranderd blijft. Het gaat immers steeds om het zelfde proefstuk met dezelfde vorm en afmetingen. Deze veronderstelling is behoorlijk correct. Toch dient een kanttekening gemaakt te worden omdat, tijdens een verouderingsproef (zoals de vorstproef), de densiteit, de vorm, de afmetingen en de poissoncoëfficiënt niet noodzakelijk totaal ongewijzigd blijven. Gezien evenwel de beperkte beschikbaarheid van de proefstukken is het alvast wel de best mogelijke benadering.

### 3. Overzicht meetresultaten

Tabel 1 geeft een overzicht van de meetresultaten. Afdrukken van de officiële proefrapporten van het WTCB zijn in bijlage toegevoegd. Hierin kan een volledige beschrijving van de stalen teruggevonden worden. Voor de codering van de stalen wordt verwezen naar bijlage X *Vergelijkende tabel voor de benamingen van de proefstukken*.

Tabel 2. Overzichtstabel van de resultaten bekomen voor de vorstbestendigheid

Plaats, site Code kernboring staal	Diepte (m)	E <sub>dyn</sub> , initieel		Aantal voltooide cycli	
		rechtstreekse meting (GPa)	via de geluidssnelheid (GPa)	-ΔE > 30%	cat. 3+
<b>Herent, Roeselberg</b> VLA10-4.1-B1 (H1)					
H1/1	3.03 – 3.14	-	3.2	0	0
H1/4	7.32 – 7.44	-	4.1	140	0
H/F8	/	4.70	7.3	0	0
H/F9	/	10.84	11.0	140	14
H/F10	/	6.62	6.4	140	140
<b>Pellenberg, Gasthuisbos</b> VLA10-4.1-B2 (P1)					
P1/8	11.84 – 11.94	-	-	56	0
P/F3	/	2.20	1.8	0	0
P/F4	/	9.14	8.6	56	14
<b>Wezemaal, Beninksberg</b> VLA10-4.1-B4 (W1) VLA10-4.1-B5 (W2) VLA10-4.1-B6 (W3)					
W1/1	3.71 – 3.85	-	5.3	140	14
W2/2	3.43 – 3.55	-	8.4	140	14
W2/3	3.95 – 4.06	-	5.0	140	140
W2/4	7.82 – 7.92	-	3.8	140	84
W3/3	2.75 – 2.87	-	6.0	56	112
<b>Rotselaar, Middelberg</b> VLA10-4.1-B8 (R2)					
R2/1	2.37 - 2.47	-	10.8	140	140
R2/5	6.78 - 6.88	-	5.4	140	0
R/F6	/	9.17	10.0	140	84
<b>Diest, Langenberg</b>					
D4.1	0.30 - 0.54	-	2.0	56	56
D11.2	0.50 - 0.70	-	3.8	14	56
D15.2	0.17 - 0.35	-	1.9	-	0



De evaluatie van de vorstbestendigheid op basis van de criteria  $-\Delta E > 30\%$  en de visuele beoordeling van de schade aan het proefstuk (cat. 3+) toont aan dat deze beide criteria in het merendeel van de gevallen een totaal verschillend resultaat opleveren, waarbij de visuele beoordeling van de schade bovendien vaak resulteert in een lagere vorstbestendigheid. Deze twee criteria zijn in het geval van heterogene materialen, zoals ijzerzandsteen, echter niet onmiddellijk onderling vergelijkbaar. Daar waar de visuele beoordeling van de schade vaak betrekking heeft op eerder oppervlakkige schade aan het buitenoppervlak van het proefstuk, is het verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus verbonden met de interne schadeontwikkeling en het verlies aan samenhang van het proefstuk in zijn geheel. Scheurtjes aan het buitenoppervlak en/of het loskomen van een hoek of een deel van het oppervlak, als gevolg van een minder goede hechting bijvoorbeeld, zullen in dit geval aanleiding geven tot het falen op basis van de visuele beoordeling van het proefstuk. Deze oppervlakkige schade vertelt evenwel niets over de interne structuur, die misschien nog zo goed als volledig intact is en waardoor het proefstuk slechts een klein verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus zal vertonen. Dit is zeker relevant voor erg heterogene materialen. Dergelijke materialen zijn echter niet de regel, zodat de norm daarop vermoedelijk niet is afgestemd.

Het verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus lijkt dan ook eerder richtinggevend als criterium voor de vorstbestendigheid. Hierbij dient evenwel opgemerkt dat een verlies van 30% voor de dynamische elasticiteitsmodulus eigenlijk ruim geïnterpreteerd dient te worden, omdat i) de vorm en de afmetingen van de proefstukken voor de evaluatie van de vorstbestendigheid afwijken van de norm en dat de omrekeningsformule voor de bepaling van de dynamische elasticiteitsmodulus daarom niet geheel correct is, ii) de materiaaleigenschappen veranderen als gevolg van de zich ontwikkelende vorstschade, waar deze voor de gehele vorstproef constant geacht worden, en iii) de berekening van de dynamische elasticiteitsmodulus slechts gebaseerd is op een enkele geluidssnelheidsmeting. Bij gebrek aan alternatief wordt evenwel het criterium  $-\Delta E > 30\%$  ondanks alle beperkingen verder wel gehandhaafd. Niet het verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus wordt hier in vraag gesteld, dit is tenslotte enkel een vertaling van het verlies aan geluidssnelheid van het proefstuk, wel de waarde van 30% die mogelijk iets hoger of lager zou kunnen genomen worden om helemaal representatief te zijn voor de beoordeling van de vorstschade.

In het geval van de stalen gelicht aan de Langenberg te Diest werd de dynamische elasticiteitsmodulus op basis van de geluidssnelheid bepaald voor alle stalen, ook deze bestemd voor de drukproef. Voor de volledigheid zijn deze data in Tabel 3 opgenomen.

Tabel 3. Overzichtstabel van de resultaten bekomen voor de dynamische elasticiteitsmodulus, afgeleid uit de resultaten van de geluidssnelheid, voor de stalen van de Langenberg te Diest

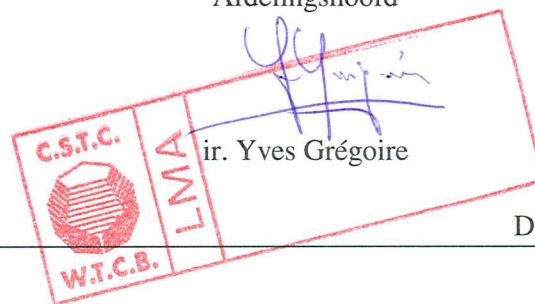
Staal	Diepte (m)	E <sub>dyn</sub> (GPa)
D3.0	0.05 - 0.20	3.1
D3.1	0.30 - 0.45	5.5
D4.0	0.03 - 0.17	7.0
D4.1	0.30 - 0.54	2.0
D6.2	0.25 - 0.39	6.1
D8.4	0.39 - 0.53	7.4
D9.2	0.25 - 0.40	6.6
D9.3	0.65 - 0.80	3.5
D10.2	0.54 - 0.66	11.2
D11.0	0.05 - 0.15	15.5
	0.15 - 0.25	13.1
	0.25 - 0.35	8.9
D11.2	0.50 - 0.70	3.8
D12.3	0.35 - 0.50	9.5
D14.0	0.01 - 0.16	5.3
D14.3	0.65 - 0.80	5.9
D15.2	0.17 - 0.35	1.9
D15.3	0.45 - 0.60	4.4
<b>Minimum</b>		<b>1.9</b>
<b>Gemiddelde</b>		<b>6.7 ± 3.7</b>
<b>Maximum</b>		<b>15.5</b>

- Proefstation : B-1342 Limelette, avenue P. Holoffe, 21      Tel : (32) 2 655 77 11      Fax : (32) 2 653 07 29  
 - Kantoren : B-1932 Sint-Stevens-Woluwe, Lozenberg, 7      Tel : (32) 2 716 42 11      Fax : (32) 2 725 32 12  
 - Maatschappelijke zetel : B-1000 Brussel, Lombardstraat, 42      Tel : (32) 2 502 66 90      Fax : (32) 2 502 81 80

BTW nr. : BE 407.695.057

Blz. : 1/7

<b>LABORATORIUM : LMA</b>	<b>PROEFVERSLAG</b>	Nr. DE, ATA, RE: 64112041-1
Ruwbouw & afwerkingsmaterialen		Nr. Labo : LMA 5320
		Nr. Monster : N-2012-27-020
<b>AANVRAGER:</b>	KONINKLIJK INSTITUUT VOOR HET KUNSTPATRIMONIUM JUBELPARK 1 1000 BRUSSEL	
<b>Gecontacteerde personen:</b>	- Aanvrager - Mevr. H. De Clercq (KIK) Dhr. R. Hayen (KIK) Dhr. Y. Vanhellemont (W.T.C.B. - labo REN)	- WTCTB - Dhr. Y. Grégoire (labo LMA)
<b>Wetenschappelijke coördinatoren 'Natuursteen' :</b>	Dhr. F. de Barquin, Mevr. D. Nicaise, Mevr. V. Bams	
<b>Uitgevoerde proeven:</b>	BELAC: Bepaling van de totale porositeit en de schijnbare dichtheid NIET-BELAC: de geluidssnelheid en de dynamische elasticiteitsmodulus op natuursteen	
<b>Referenties :</b>	BELAC: NBN EN 1936 (2007) NIET-BELAC: NBN EN 14579 (2004), NBN EN 14146 (2004)	
<b>Datum en referentie van de aanvraag</b>	: 04.07.2012 – 17.10.2012 Bestelbon 2012 (LABO) 15275	
<b>Ontvangstdatum van de proefstukken</b>	: 04.07.2011	
<b>Datum van de proef</b>	: Juli – septembre 2012	
<b>Datum opstelling van het verslag</b>	: 04.12.2012	
Dit proefverslag bevat 7 pagina's, genummerd van 1/7 tot en met 7/7, en mag slechts in zijn geheel verveelvoudigd worden. Elk blad van het origineel verslag is afgestempeld met de laboratoriumstempel (in het rood) en geparafeerd door het laboratoriumhoofd.		
De resultaten en waarnemingen zijn slechts geldig voor de beproefde monsters.		
<input type="checkbox"/> Geen monster <input checked="" type="checkbox"/> Monster(s) onderworpen aan destructieve proef <input checked="" type="checkbox"/> Monster(s) 60 kalenderdagen na het opsturen van het verslag uit onze laboratoria verwijderd, behalve bij andersluidende schriftelijke aanvraag		
Verantwoordelijke der proeven	Projectleider	Afdelingshoofd
Daphné Badet	ir. Arwen Smits	ir. Yves Grégoire
Technische medewerking: ALE/GM		DB





## 1. Proefmonster

Werden geleverd in ons proefstation te Limelette : proefstukken van natuursteen waarvan de gegevens in de tabel hieronder hernomen worden. De proefstukken werden ingeschreven in het register onder nummer N-2012-27-020.

De proefstukken werden geïdentificeerd op de proefaanvraag van KIK. Ze werden alle aangeduid door KIK. De proefstukken werden door ons genummerd.

Elasticiteitsmodulus	Afmetingen	Vol. Massa en porositeit	Afmetingen
H1/1:3.03-3.14 H1/4:7.32-7.44 W3/5:3.86-3.98a P2/2:7.28-7.39 W1/1:3.71-3.85 W2/2:3.43-3.55 W2/3:3.95-4.06 W2/4:7.82-7.92 W3/3:2.75-2.87 R2/1:2.37-2.47 R2/5:6.78-6.88	∅ : 10 cm L : 9 tot 11 cm	H1/1:2.95-3.03 H1/3:5.42-5.54 H1/4:7.22-7.32 H1/5:7.97-8.06 P1/2:3.52-3.63 P1/6:9.23-9.32 P1/7:10.63-10.72 P2/2:7.20-7.28 W1/2:4.19-4.27 W1/3:5.63-5.71 W2/1:3.26-3.34 W2/3:4.06-4.15 W2/4:7.92-8.00 W3/1:2.47-2.55 W3/5:3.86-3.98b W3/7:4.75-4.84 R1/2:5.93-6.02 R2/1:2.47-2.55 R2/5:6.88-6.97	∅ : 10 cm L : 5 tot 10 cm
Vorstbestendigheid en elasticiteitsmodulus	Afmetingen	Druksterkte, vol. Massa en porositeit	Afmetingen
5320-P-F3 vorst 5320-P-F4 vorst 5320-R-F6 vorst 5320-H-F8 vorst 5320-H-F9 vorst 5320-H-F10 vorst	≈ 25 x 6 x 6 cm <sup>3</sup>	5320-P-F3 druk 5320-P-F4 druk 5320-R-F6 druk 5320-R-F7 druk 5320-H-F8 druk 5320-H-F9 druk	≈ 9 x 9 x 9 cm <sup>3</sup>

Petrografische aard van de steen :

Diestiaan ijzerzandsteen

Commerciële naam van de steen :

Grès de Diest

Land en plaats van ontginning :

Diest, België

Verantwoordelijke monstername :

Hilde De Clercq

Oppervlakteafwerking :

Gezaagd

Proefstuknummer :

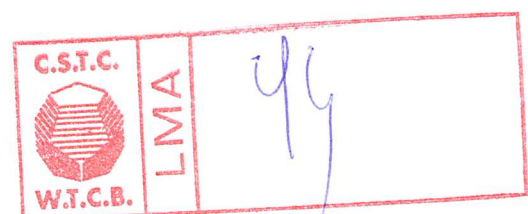
N-2012-27-020

Nr. LMA :

5320

Informatie geleverd door de leverancier

Opm: Op aanvraag van de aanvrager werden geen gemiddelde waarden berekend.







## 2. Proeven en resultaten

### 2.1 VOLUMIEKE MASSA EN OPEN POROSITEIT – NBN EN 1936 BELAC

#### a) PRINCIPE

De proefstukken worden gedroogd tot constante massa bij  $70 \pm 5$  °C. Na afkoeling worden de proefstukken gewogen ( $m_d$ ) en met water geïmpregneerd bij een restdruk van  $15 \pm 5$  mmHg. Deze restdruk wordt gedurende  $2 \pm 0.2$  uren constant gehouden. Vervolgens wordt langzaam gedemineraliseerd water in de tank gebracht. Als de proefstukken ondergedompeld zijn, wordt de atmosferische druk hersteld waarna de proefstukken gedurende  $24 \pm 2$  uren ondergedompeld blijven. Vervolgens wordt elk proefstuk

- onder water gewogen ( $m_h$ )
- vluchtig afgedroogd met een zeemvel en gewogen ( $m_s$ )

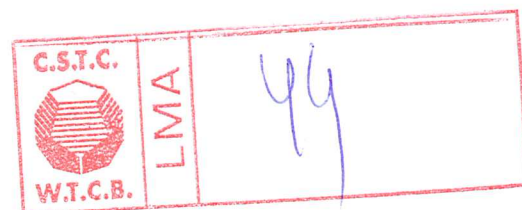
De schijnbare volumieke massa ( $\rho_b$ ) wordt gegeven door de formule:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} * \rho_{rh} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Waarbij:  $\rho_{rh}$  : de volumieke massa van water in functie van de temperatuur, de volumieke massa van water bij 20.8 °C bedraagt 998 kg/m<sup>3</sup>.

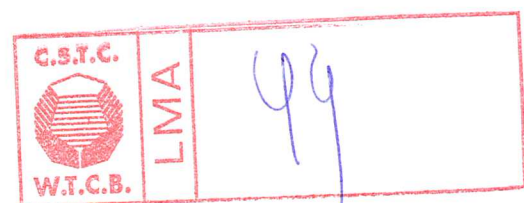
De open porositeit ( $p_o$ ) wordt gegeven door de verhouding van het volume open poriën en het schijnbare volume van het proefstuk:

$$p_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} * 100 \quad [\text{V}\%]$$



b) RESULTATEN\*

Proefstuknummer	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$P_0$ [v%]
H1/1:2.95-3.03	1870	35.7
H1/3:5.42-5.54	2370	23.6
H1/4:7.22-7.32	2240	26.9
H1/5:7.97-8.06	2070	30.5
P1/2:3.52-3.63	1670	44.9
P1/6:9.23-9.32	gebroken	gebroken
P1/7:10.63-10.72	2250	24.9
P2/2:7.20-7.28	2000	31.7
W1/2:4.19-4.27	1970	34.5
W1/3:5.63-5.71	2100	30.8
W2/1:3.26-3.34	2410	22.0
W2/3:4.06-4.15	1810	37.6
W2/4:7.92-8.00	1730	39.3
W3/1:2.47-2.55	2340	23.6
W3/5:3.86-3.98b	1850	36.1
W3/7:4.75-4.84	2300	22.7
R1/2:5.93-6.02	2160	28.6
R2/1:2.47-2.55	2370	38.0
R2/5:6.88-6.97	2040	34.1
5320-P-F3 druk	2170	26.8
5320-P-F4 druk	2200	27.0
5320-R-F6 druk	2280	25.6
5320-R-F7 druk	1760	37.8
5320-H-F8 druk	1950	34.0
5320-H-F9 druk	2130	29.5



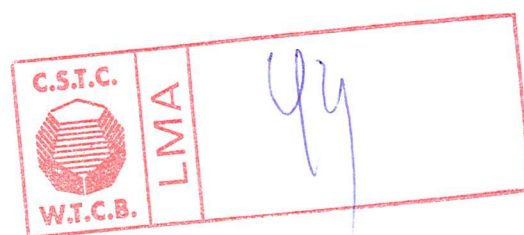
---

\* Zie ook opm § 1



Voor informatie:

Proefstuknummer	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$P_0$ [v%]
H1/1:3.03-3.14	1880	35.1
H1/4:7.32-7.44	2060	30.6
W3/5:3.86-3.98a	1810	37.2
P2/2:7.28-7.39	Niet getest	Niet getest
W1/1:3.71-3.85	1930	34.8
W2/2:3.43-3.55	2200	28.2
W2/3:3.95-4.06	1830	37.1
W2/4:7.82-7.92	1770	38.0
W3/3:2.75-2.87	2100	30.2
R2/1:2.37-2.47	2100	29.8
R2/5:6.78-6.88	2200	29.1
P/F3 vorst	2060	29.9
P/F4 vorst	2190	27.4
R/F6 vorst	2270	26.1
H/F8 vorst	1950	34.2
H/F9 vorst	2200	28.1
H/F10 vorst	2120	28.9

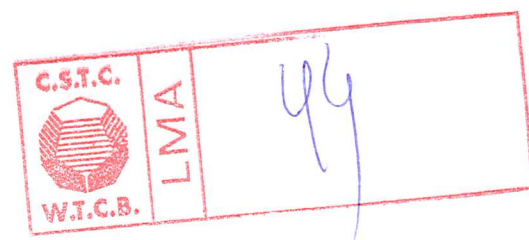


2.2 BEPALEN VAN DE GELUIDSSNELHEID - NBN EN 14579a) PRINCIPE

Voorafgaand aan de proef worden de proefstukken gedroogd tot constante massa bij een temperatuur van  $70 \pm 5$  °C. De proefstukken worden vervolgens opgemeten in de lengterichting (L) en de tijd (T) nodig om een elektrische puls uitgestuurd aan één zijde van het proefstuk te detecteren aan de andere zijde van het proefstuk wordt opgemeten volgens dezelfde richting. Op basis van deze meting wordt de geluidssnelheid (v) berekend.

b) RESULTATEN\*

Proefstuk nummer	lengte L [mm]	Tijd T [µs]	Geluidssnelheid v [km/s]
H1/1:3.03-3.14	105.45	71.9	1.47
H1/4:7.32-7.44	101.01	63.7	1.59
W3/5:3.86-3.98a	90.39	57.3	1.58
P2/2:7.28-7.39	97.43	Niet bepaald (Kruimelige steen)	
W1/1:3.71-3.85	110.35	59.0	1.87
W2/2:3.43-3.55	105.19	47.9	2.20
W2/3:3.95-4.06	103.91	55.7	1.87
W2/4:7.82-7.92	95.32	58.0	1.64
W3/3:2.75-2.87	86.52	45.7	1.89
R2/1:2.37-2.47	102.14	40.0	2.55
R2/5:6.78-6.88	103.67	58.9	1.76
5320-P-F3 vorst	299.81	285.8	1.05
5320-P-F4 vorst	240.19	108.1	2.22
5320-R-F6 vorst	240.71	101.8	2.36
5320-H-F8 vorst	210.79	97.0	2.17
5320-H-F9 vorst	179.39	71.4	2.51
5320-H-F10 vorst	182.63	93.8	1.95



---

\*Zie ook opm § 1





### 2.3 BEPALEN VAN DE DYNAMISCHE ELASTICITEITSMODULUS

#### a) OP BASIS VAN NBN EN 14146

Voorafgaand aan de proef worden de proefstukken gedroogd tot constante massa bij een temperatuur van  $70 \pm 5$  °C. De proefstukken worden vervolgens gewogen.

Ieder prisma is aangeslagen totdat drie identieke waarden van de resonantiefrequentie opeenvolgend zijn gemeten. Met deze resonantiefrequentie is de dynamische elasticiteitsmodulus bepaald.

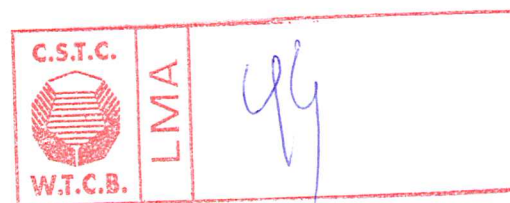
#### b) OP BASIS VAN GELUIDSSNELHEID

Op basis van de geluidssnelheid (zie §2.2), de volumieke massa (zie §2.1) en de Poissoncoëfficiënt (gelijk genomen aan  $\nu = 0.275$ ) wordt de dynamische elasticiteitsmodulus dan berekend.

#### c) RESULTATEN\*

Proefstuk nummer	MVA [kg/m <sup>3</sup> ]	Geluidssnelheid [km/s]	E <sub>dyn</sub> [GPa] Op basis geluidssnelheid	E <sub>dyn</sub> [GPa] NBN EN 14146
H1/1:3.03-3.14	1880	1.47	3.2	Niet getest
H1/4:7.32-7.44	2060	1.59	4.1	Niet getest
W3/5:3.86-3.98a	1810	1.58	3.6	Niet getest
P2/2:7.28-7.39	Niet getest	Niet getest	Niet getest	Niet getest
W1/1:3.71-3.85	1930	1.87	5.3	Niet getest
W2/2:3.43-3.55	2200	2.20	8.4	Niet getest
W2/3:3.95-4.06	1830	1.87	5.0	Niet getest
W2/4:7.82-7.92	1770	1.64	3.8	Niet getest
W3/3:2.75-2.87	2100	1.89	6.0	Niet getest
R2/1:2.37-2.47	2100	2.55	10.8	Niet getest
R2/5:6.78-6.88	2200	1.76	5.4	Niet getest
5320-P-F3 vorst	2060	1.05	1.8	2.20
5320-P-F4 vorst	2190	2.22	8.6	9.14
5320-R-F6 vorst	2270	2.36	10.0	9.17
5320-H-F8 vorst	1950	2.17	7.3	4.70
5320-H-F9 vorst	2200	2.51	11.0	10.84
5320-H-F10 vorst	2120	1.95	6.4	6.62

\* Zie ook opm § 1



- Proefstation : B-1342 Limelette, avenue P. Holoffe, 21  
- Kantoren : B-1932 Sint-Stevens-Woluwe, Lozenberg, 7  
- Maatschappelijke zetel : B-1000 Brussel, Lombardstraat, 42

Tel : (32) 2 655 77 11  
Tel : (32) 2 716 42 11  
Tel : (32) 2 502 66 90

Fax : (32) 2 653 07 29  
Fax : (32) 2 725 32 12  
Fax : (32) 2 502 81 80

BTW nr. : BE 407.695.057

Blz. : 1/5

**LABORATORIUM : LMA**

Ruwbouw & afwerkingsmaterialen

**PROEFVERSLAG**

Nr. DE, ATA, RE: 64112041-2

Nr. Labo : LMA 5320

Nr. Monster : N-2012-27-020

**AANVRAGER:** KONINKLIJK INSTITUUT VOOR HET KUNSTPATRIMONIUM  
JUBELPARK 1  
1000 BRUSSEL

**Gecontacteerde personen:**

- Aanvrager -  
Mevr. H. De Clercq (KIK)  
Dhr. R. Hayen (KIK)

- WTTCB -  
Dhr. Y. Grégoire (labo LMA)

Dhr. Y. Vanhellemont (W.T.C.B. - labo REN)

**Uitgevoerde proeven:** BELAC: Bepaling van vorstbestandheid (identificatie proef) van natuursteen.

**Referenties :** BELAC: NBN EN 12371 (2010)

**Datum en referentie van de aanvraag** : 04.07.2012 Bestelbon 2012 (LABO) 15275  
**Ontvangstdatum van de proefstukken** : 04.07.2011  
**Datum van de proef** : 07.2012 tot 02.2013  
**Datum opstelling van het verslag** : 25.02.2013

Dit proefverslag bevat 5 pagina's, genummerd van 1/5 tot en met 5/5, en mag slechts in zijn geheel verveelvoudigd worden. Elk blad van het origineel verslag is afgestempeld met de laboratoriumstempel (in het rood) en geparafeerd door het laboratoriumhoofd.

De resultaten en waarnemingen zijn slechts geldig voor de beproefde monsters.

- Geen monster  
 Monster(s) onderworpen aan destructieve proef  
 Monster(s) 60 kalenderdagen na het opsturen van het verslag uit onze laboratoria verwijderd, behalve bij andersluidende schriftelijke aanvraag

Verantwoordelijke der proeven

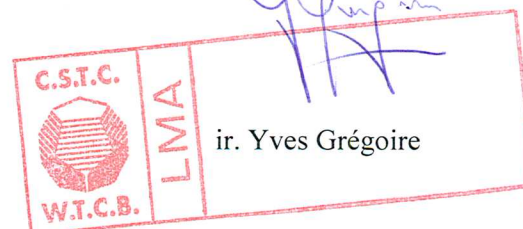
Projectleider

Afdelingshoofd



Daphné Badet

ir. Arwen Smits



ir. Yves Grégoire

Technische medewerking: ALE/JDL

DB





## 1. Proefmonster

Werden geleverd in ons proefstation te Limelette : proefstukken van natuursteen waarvan de gegevens in de tabel hieronder hernomen worden. De proefstukken werden ingeschreven in het register onder nummer N-2012-27-020.

De proefstukken werden geïdentificeerd op de proefaanvraag van KIK. Ze werden alle aangeduid door KIK. De proefstukken werden door ons genummerd.

Vorstbestendigheid en elasticiteitsmodulus	Afmetingen	
5320-P-F3 vorst	≈ 30 x 8 x 7 cm <sup>3</sup>	
5320-P-F4 vorst	≈ 24 x 7 x 7 cm <sup>3</sup>	
5320-R-F6 vorst	≈ 24 x 7 x 7 cm <sup>3</sup>	
5320-H-F8 vorst	≈ 21 x 6 x 6 cm <sup>3</sup>	
5320-H-F9 vorst	≈ 18 x 6 x 6 cm <sup>3</sup>	
5320-H-F10 vorst	≈ 18 x 5 x 7 cm <sup>3</sup>	

Petrografische aard van de steen : Diestiaan ijzerzandsteen

Commerciële naam van de steen : Grès de Diest

Land en plaats van ontginning : Diest, België

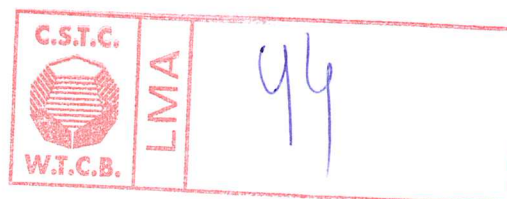
Verantwoordelijke monstername : Hilde De Clercq

Oppervlaktaefwerking : Gezaagd

Proefstuknummer : N-2012-27-020

Nr. LMA : 5320

Informatie geleverd door de leverancier





## 2. Bepaling van de vorstweerstand – NBN EN 12371 (identificatie proef) Belac

### a) PRINCIPE VAN DE IDENTIFICATIE PROEF VOLGENS NBN EN 12371

Zes proefstukken moeten aan deze proef onderworpen worden. Het zevende proefstuk dient voor het opmeten van de temperaturen.

Ze moeten tot constante massa gedroogd worden bij 70°C ( $\pm 5$ )°C. Vervolgens moeten met een onuitwisbare stift de zijden, de eventuele gebreken alsook de punten voor de meting van de resonantiefrequentie aangeduid worden. De proefstukken moeten gewogen worden (droge massa) en vervolgens moet de resonantiefrequentie bepaald worden. Vervolgens moeten de proefstukken geleidelijk met water geïmpregneerd worden en vervolgens 48 uur onder water gehouden. Nadien moeten ze onder water in natte toestand gewogen worden om het schijnbare volume te bepalen.

De proefstukken moeten daarna in de vrieskast geplaatst worden telkens voor het gevraagde aantal vriesdooi cycli. Elke cyclus bestaat uit een periode van 6 uur vorst aan lucht, gevolgd door een periode van 6 uur dooi waarbij de proefstukken worden ondergedompeld in water. De proef moet verdergezet worden tot de proefstukken worden geclassificeerd als beschadigd, met een maximum van 168 cycli.

Twee criteria moeten worden gebruikt om de invloed van de vriesdooi cycli op de proefstukken te beoordelen:

- visuele inspectie;
- opmeten van de dynamische elasticiteitsmodulus.

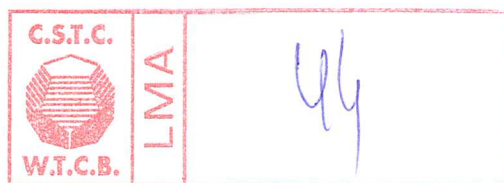
Het bepalen van het verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus en het uitvoeren van de visuele inspectie moeten na 14, 56, 84, 112, 140 en 168 vriesdooi cycli gebeuren. De test moet verdergezet worden totdat ten minste twee proefstukken worden beoordeeld als beschadigd door één van de volgende criteria:

- de code van de visuele inspectie bereikt een waarde van 3 (één of meer scheurtjes (breedte > 0,1 mm), gaten en loskomen van fragmenten (> 30 mm<sup>2</sup>) of verandering van het materiaal in de aders) of meer
- een verlies [%] aan de dynamische elasticiteitsmodulus van 30% of meer ( $\Delta E$ ).

Na het beëindigen van alle vriesdooi cycli wordt het verlies [%] aan schijnbaar volume bepaald ( $\Delta V_b$ ).

### b) GEVOLGD PRINCIPE OP VRAAG VAN DE AANVRAGER

Volgens de aanvraag werden ieder proefstuk gezien als een reeks en getest zover mogelijk met een max van 140 cycli.





c) RESULTATEN

Note : zie d) voor de illustraties

# cycli:		14	
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code	$\Delta V_b$ [%]
5320-P-F3	Niet meetbaar	3	+0.1
5320-P-F4	-13.4	1	Niet gemeten
5320-R-F6	-5.8	1	Niet gemeten
5320-H-F8	-32.6	3	Niet meetbaar
5320-H-F9	-5.8	0	Niet gemeten
5320-H-F10	-5.3	0	Niet gemeten

# cycli:		56	
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code	$\Delta V_b$ [%]
5320-P-F4	-21.9	3	Niet gemeten
5320-R-F6	-6.4	2	
5320-H-F9	-9.0	3	
5320-H-F10	-15.6	2	

# cycli:		84	
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code	$\Delta V_b$ [%]
5320-P-F4	-46.8	3	-0.2
5320-R-F6	-8.6	2	Niet gemeten
5320-H-F9	-9.0	3	Niet gemeten
5320-H-F10	-20.7	2	Niet gemeten










# cycli:		112	
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code	$\Delta V_b$ [%]
5320-R-F6	-10.5	3	Niet gemeten
5320-H-F9	-11.8	3	Niet gemeten
5320-H-F10	-22.1	2	Niet gemeten

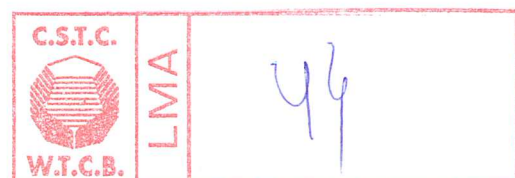




# cycli:		140	
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code	$\Delta V_b$ [%]
5320-R-F6	-13.5	3	-0.6
5320-H-F9	-14.4	3	-1.4
5320-H-F10	-26.9	2	-0.7

d) ILLUSTRATIES

Proefstuk	Illustraties	
5320-P-F3	 Na 14 cycli	/
5320-P-F4	 Na 56 cycli	/
5320-R-F6	 Na 112 cycli	 Na 140 cycli
5320-H-F8	 Na 14 cycli	/
5320-H-F9	 Na 112 cycli	 Na 140 cycli
5320-H-F10	 Na 112 cycli	 Na 140 cycli





- Proefstation : B-1342 Limelette, avenue P. Holoffe, 21  
- Kantoren : B-1932 Sint-Stevens-Woluwe, Lozenberg, 7  
- Maatschappelijke zetel : B-1000 Brussel, Lombardstraat, 42

Tel : (32) 2 655 77 11

Fax : (32) 2 653 07 29

Tel : (32) 2 716 42 11

Fax : (32) 2 725 32 12

Tel : (32) 2 502 66 90

Fax : (32) 2 502 81 80

BTW nr. : BE 407.695.057

Blz. : 1/6

<b>LABORATORIUM : LMA</b>  Ruwbouw & afwerkingsmaterialen	<b>PROEFVERSLAG</b>	Nr. DE, ATA, RE: 64112041-3 Nr. Labo : LMA 5376 Nr. Monster : N-2012-51-001
---	---------------------	---

<b>AANVRAGER:</b> KONINKLIJK INSTITUUT VOOR HET KUNSTPATRIMONIUM JUBELPARK 1 1000 BRUSSEL
--

<b>Gecontacteerde personen:</b>  Dhr. Y. Vanhellemont (W.T.C.B. - labo REN)	<b>- Aanvrager -</b> Mevr. H. De Clercq (KIK)  Dhr. R. Hayen (KIK)	<b>- WTCB -</b> Dhr. Y. Grégoire (labo LMA)
---	---	--

<b>Uitgevoerde proeven:</b> <i>BELAC</i> : Bepaling van de totale poreusheid en de schijnbare dichtheid op natuursteen <i>NIET-BELAC</i> : de geluidssnelheid en de dynamische elasticiteitsmodulus op natuursteen
--

<b>Referenties :</b> <i>BELAC</i> : NBN EN 1936 (2007) <i>NIET-BELAC</i> : NBN EN 14579 (2004), NBN EN 14146 (2004)
---

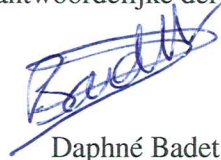
<b>Datum en referentie van de aanvraag</b> : 12.12.2012 Zie ook bestelbon 2012 (LABO) 15275
<b>Ontvangstdatum van de proefstukken</b> : 12.12.2012
<b>Datum van de proef</b> : Januari 2013
<b>Datum opstelling van het verslag</b> : 25.02.2013

Dit proefverslag bevat 6 pagina's, genummerd van 1/6 tot en met 6/6, en mag slechts in zijn geheel verveelvoudigd worden. Elk blad van het origineel verslag is afgestempeld met de laboratoriumstempel (in het rood) en geparafeerd door het laboratoriumhoofd.

De resultaten en waarnemingen zijn slechts geldig voor de beproefde monsters.

- Geen monster
- Monster(s) onderworpen aan destructieve proef
- Monster(s) 60 kalenderdagen na het opsturen van het verslag uit onze laboratoria verwijderd, behalve bij andersluidende schriftelijke aanvraag

Verantwoordelijke der proeven

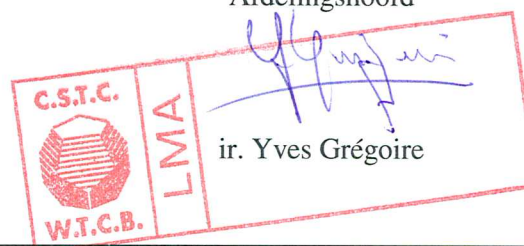


Daphné Badet

Projectleider

ir. Arwen Smits

Afdelingshoofd



ir. Yves Grégoire

Technische medewerking: ALE/JDL

DB



## 1. Proefmonster

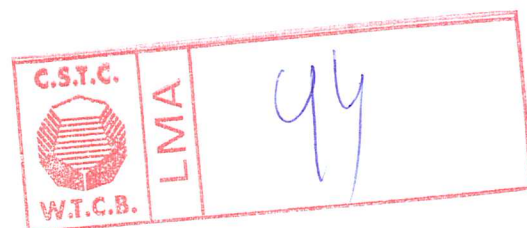
Werden geleverd in ons proefstation te Limelette : proefstukken van natuursteen waarvan de gegevens in de tabel hieronder hernomen worden. De proefstukken werden ingeschreven in het register onder nummer N-2012-51-001.

De proefstukken werden geïdentificeerd op de proefaanvraag van KIK. Ze werden alle aangeduid door KIK. De proefstukken werden door ons genummerd.

Vorstbestendigheid, vol. Massa en porositeit en elasticiteitsmodulus	Afmetingen (na versnijding)	Druksterkte, vol. Massa en porositeit en elasticiteitsmodulus	Afmetingen
D41/30-54 D111/50-70 D152/17-35	≈ 18 x 6 x 6 cm <sup>3</sup>	D30/5-20 D31/40-45 D40/3-17 D62/25-39 D84/36-53 D92/25-40 D93/65-80 D102/54-66 D110/5-15 D110/15-25 D110/25-35 D123/35-50 D140/1-16 D143/65-80 D153/45-60	≈ 7 x 7 x 7 cm <sup>3</sup>

Petrografische aard van de steen :	Diestiaan ijzerzandsteen
Commerciële naam van de steen :	Grès de Diest
Land en plaats van ontginning :	Diest, België
Verantwoordelijke monstername :	Hilde De Clercq
Oppervlakteafwerking :	Gezaagd
Proefstuknummer :	N-2012-51-001
Nr. LMA :	5376
Informatie geleverd door de leverancier	

Opm: Op aanvraag van de aanvrager werden geen gemiddelde waarden berekend.







## 2. Proeven en resultaten

### 2.1 VOLUMIEKE MASSA EN OPEN POROSITEIT – NBN EN 1936 BELAC

#### a) PRINCIPE

De proefstukken worden gedroogd tot constante massa bij  $70 \pm 5$  °C. Na afkoeling worden de proefstukken gewogen ( $m_d$ ) en met water geïmpregneerd bij een restdruk van  $15 \pm 5$  mmHg. Deze restdruk wordt gedurende  $2 \pm 0.2$  uren constant gehouden. Vervolgens wordt langzaam gedemineraliseerd water in de tank gebracht. Als de proefstukken ondergedompeld zijn, wordt de atmosferische druk hersteld waarna de proefstukken gedurende  $24 \pm 2$  uren ondergedompeld blijven.

Vervolgens wordt elk proefstuk

- onder water gewogen ( $m_h$ )
- vluchtig afgedroogd met een zeemvel en gewogen ( $m_s$ )

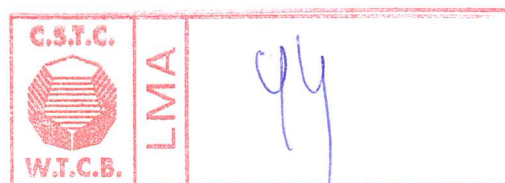
De schijnbare volumieke massa ( $\rho_b$ ) wordt gegeven door de formule:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} * \rho_{rh} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Waarbij:  $\rho_{rh}$  : de volumieke massa van water in functie van de temperatuur, de volumieke massa van water bij 19.4 °C bedraagt 998 kg/m<sup>3</sup>.

De open porositeit ( $p_o$ ) wordt gegeven door de verhouding van het volume open poriën en het schijnbare volume van het proefstuk:

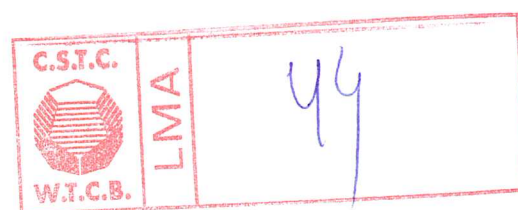
$$p_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} * 100 \quad [\text{V}\%]$$





b) RESULTATEN

Proefstuknummer	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$P_o$ [v%]
D30/5-20	2170	28.6
D31/40-45	2120	30.5
D40/3-17	2170	28.7
D62/25-39	2000	32.3
D84/36-53	2240	26.6
D92/25-40	1900	36.2
D93/65-80	2080	30.7
D102/54-66	2150	28.0
D110/5-15	2390	22.4
D110/15-25	2140	28.4
D110/25-35	2080	30.1
D123/35-50	2010	32.0
D140/1-16	2030	31.4
D143/65-80	1960	32.4
D153/45-60	1890	35.4
D41/30-54	2000	33.3
D111/50-70	1880	35.2
D152/17-35	1860	36.0





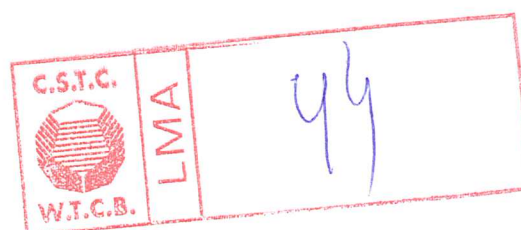
## 2.2 BEPALEN VAN DE GELUIDSSNELHEID - NBN EN 14579

### a) PRINCIPE

Voorafgaand aan de proef worden de proefstukken gedroogd tot constante massa bij een temperatuur van  $70 \pm 5$  °C. De proefstukken worden vervolgens opgemeten in de lengterichting (L) en de tijd (T) nodig om een elektrische puls uitgestuurd aan één zijde van het proefstuk te detecteren aan de andere zijde van het proefstuk wordt opgemeten volgens dezelfde richting. Op basis van deze meting wordt de geluidssnelheid (v) berekend.

### b) RESULTATEN

<b>Proefstuk nummer</b>	<b>lengte L [mm]</b>	<b>Tijd T [µs]</b>	<b>Geluidssnelheid v [km/s]</b>
D30/5-20	69.47	51.50	1.35
D31/40-45	70.52	39.10	1.80
D40/3-17	70.25	34.80	2.02
D62/25-39	70.23	35.90	1.96
D84/36-53	50.58	24.80	2.04
D92/25-40	71.20	33.90	2.10
D93/65-80	70.89	48.60	1.46
D102/54-66	70.70	27.50	2.57
D110/5-15	70.43	24.60	2.86
D110/15-25	70.73	25.40	2.78
D110/25-35	69.36	29.90	2.32
D123/35-50	70.48	28.90	2.44
D140/1-16	70.22	38.70	1.81
D143/65-80	70.12	35.90	1.95
D153/45-60	69.94	40.60	1.72
D41/30-54	180.96	163.10	1.11
D111/50-70	180.73	114.50	1.58
D152/17-35	179.69	158.90	1.13







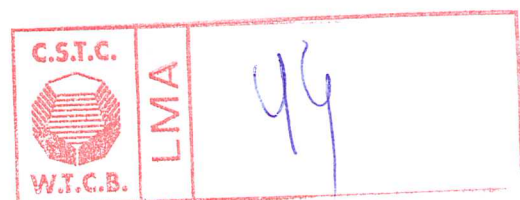
### 2.3 BEPALEN VAN DE DYNAMISCHE ELASTICITEITSMODULUS

#### a) OP BASIS VAN GELUIDSSNELHEID - PRINCIPE

Op basis van de geluidssnelheid (zie §2.2), de volumieke massa (zie §2.1) en de Poissoncoëfficiënt (gelijk genomen aan  $\nu = 0.275$ ) wordt de dynamische elasticiteitsmodulus dan berekend.

#### b) RESULTATEN

Proefstuk nummer	MVA [kg/m <sup>3</sup> ]	Geluidssnelheid [km/s]	E <sub>dyn</sub> [GPa] Op basis geluidssnelheid
D30/5-20	2170	1.35	3.1
D31/40-45	2120	1.80	5.5
D40/3-17	2170	2.02	7.0
D62/25-39	2000	1.96	6.1
D84/36-53	2240	2.04	7.4
D92/25-40	1900	2.10	6.6
D93/65-80	2080	1.46	3.5
D102/54-66	2150	2.57	11.2
D110/5-15	2390	2.86	15.5
D110/15-25	2140	2.78	13.1
D110/25-35	2080	2.32	8.9
D123/35-50	2010	2.44	9.5
D140/1-16	2030	1.81	5.3
D143/65-80	1960	1.95	5.9
D153/45-60	1890	1.72	4.4
D41/30-54	2000	1.11	2.0
D111/50-70	1880	1.58	3.8
D152/17-35	1860	1.13	1.9





- Proefstation : B-1342 Limelette, avenue P. Holoffe, 21  
- Kantoren : B-1932 Sint-Stevens-Woluwe, Lozenberg, 7  
- Maatschappelijke zetel : B-1000 Brussel, Lombardstraat, 42

Tel : (32) 2 655 77 11  
Tel : (32) 2 716 42 11  
Tel : (32) 2 502 66 90

Fax : (32) 2 653 07 29  
Fax : (32) 2 725 32 12  
Fax : (32) 2 502 81 80

BTW nr. : BE 407.695.057

Blz. : 1/5

**LABORATORIUM : LMA**

**PROEFVERSLAG**

Ruwbouw & afwerkingsmaterialen

Nr. DE, ATA, RE: 64112041-4  
Nr. Labo : LMA 5320 en 5376  
Nr. Monster : N-2012-27-020 en  
2012-51-001

**AANVRAGER:** KONINKLIJK INSTITUUT VOOR HET KUNSTPATRIMONIUM  
JUBELPARK 1  
1000 BRUSSEL

**Gecontacteerde personen:**

- **Aanvrager** -  
Mevr. H. De Clercq (KIK)  
Dhr. R. Hayen (KIK)

- **WTCB** -  
Dhr. Y. Grégoire (labo LMA)

Dhr. Y. Vanhellemont (W.T.C.B. - labo REN)

**Uitgevoerde proeven:** BELAC: Bepaling van vorstbestandheid (identificatie proef – tot 70 cycli) van natuursteen.

**Referenties :** BELAC: NBN EN 12371 (2010)

**Datum en referentie van de aanvraag** : 04.07.2012 Bestelbon 2012 (LABO) 15275  
**Ontvangstdatum van de proefstukken** : 04.07.2012 en 12.12.2012  
**Datum van de proef** : 01.2013 tot 03.2013  
**Datum opstelling van het verslag** : 04.04.2013

Dit proefverslag bevat 5 pagina's, genummerd van 1/5 tot en met 5/5, en mag slechts in zijn geheel verveelvoudigd worden. Elk blad van het origineel verslag is afgestempeld met de laboratoriumstempel (in het rood) en geparafeerd door het laboratoriumhoofd.

De resultaten en waarnemingen zijn slechts geldig voor de beproefde monsters.

- Geen monster  
 Monster(s) onderworpen aan destructieve proef  
 Monster(s) 60 kalenderdagen na het opsturen van het verslag uit onze laboratoria verwijderd, behalve bij andersluidende schriftelijke aanvraag

Verantwoordelijke der proeven

Projectleider

Afdelingshoofd



Daphné Badet

ir. Arwen Smits

ir. Yves Grégoire

Technische medewerking: ALE/JDL

DB



## 1. Proefmonster

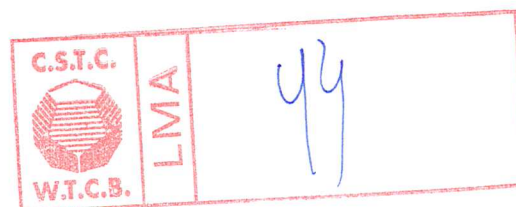
Werden geleverd in ons proefstation te Limelette : proefstukken van natuursteen waarvan de gegevens in de tabel hieronder hernomen worden.

De proefstukken werden geïdentificeerd op de proefaanvraag van KIK. Ze werden alle aangeduid door KIK. De proefstukken werden door ons genummerd.

Vorstbestendigheid	Afmetingen na snijding
LMA5320: H1/1:3.03-3.14 H1/4:7.32-7.44 P1/8:10.84-10.94 P2/2:7.28-7.39* W1/1:3.71-3.85 W2/2:3.43-3.55 W2/3:3.95-4.06 W2/4:7.82-7.92 W3/3:2.75-2.87 R2/1:2.37-2.47 R2/5:6.78-6.88	$\approx 9-10 \times 6 \times 6 \text{ cm}^3$
LMA5376 : 5376-D41/30-54 5376-D111/50-70 5376-D152/17-35	$\approx 18 \times 6 \times 6 \text{ cm}^3$

\* : gebroken tijdens initiële metingen.

Petrografische aard van de steen :	Diestiaan ijzerzandsteen
Commerciële naam van de steen :	Grès de Diest
Land en plaats van ontginning :	Diest, België
Verantwoordelijke monstername :	Hilde De Clercq
Oppervlakteafwerking :	Gezaagd
Proefstuknummer :	N-2012-27-020 en N-2012-51-001
Nr. LMA :	5320 en 5376
Informatie geleverd door de leverancier	





## 2. Bepaling van de vorstweerstand – NBN EN 12371 (identificatie proef) Belac

### a) PRINCIPE VAN DE IDENTIFICATIE PROEF VOLGENS NBN EN 12371

Zes proefstukken moeten aan deze proef onderworpen worden. Het zevende proefstuk dient voor het opmeten van de temperaturen.

Ze moeten tot constante massa gedroogd worden bij 70°C ( $\pm 5$ )°C. Vervolgens moeten met een onuitwisbare stift de zijden, de eventuele gebreken alsook de punten voor de meting van de resonantiefrequentie aangeduid worden. De proefstukken moeten gewogen worden (droge massa) en vervolgens moet de resonantiefrequentie bepaald worden. Vervolgens moeten de proefstukken geleidelijk met water geïmpregneerd worden en vervolgens 48 uur onder water gehouden. Nadien moeten ze onder water in natte toestand gewogen worden om het schijnbare volume te bepalen.

De proefstukken moeten daarna in de vrieskast geplaatst worden telkens voor het gevraagde aantal vriesdooi cycli. Elke cyclus bestaat uit een periode van 6 uur vorst aan lucht, gevolgd door een periode van 6 uur dooi waarbij de proefstukken worden ondergedompeld in water. De proef moet verdergezet worden tot de proefstukken worden geclassificeerd als beschadigd, met een maximum van 168 cycli.

Twee criteria moeten worden gebruikt om de invloed van de vriesdooi cycli op de proefstukken te beoordelen:

- visuele inspectie;
- opmeten van de dynamische elasticiteitsmodulus.

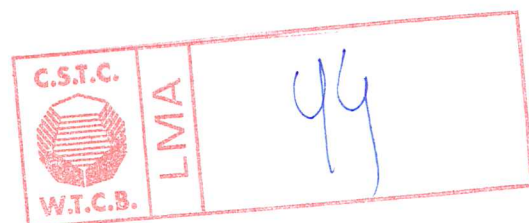
Het bepalen van het verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus en het uitvoeren van de visuele inspectie moeten na 14, 56, 84, 112, 140 en 168 vriesdooi cycli gebeuren. De test moet verdergezet worden totdat ten minste twee proefstukken worden beoordeeld als beschadigd door één van de volgende criteria:

- de code van de visuele inspectie bereikt een waarde van 3 (één of meer scheurtjes (breedte > 0,1 mm), gaten en loskomen van fragmenten (> 30 mm<sup>2</sup>) of verandering van het materiaal in de aders) of meer
- een verlies [%] aan de dynamische elasticiteitsmodulus van 30% of meer ( $\Delta E$ ).

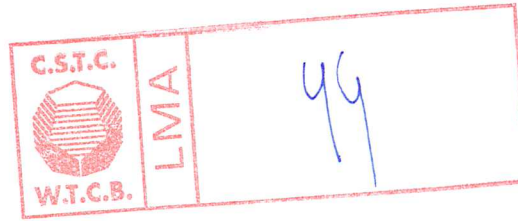
Na het beëindigen van alle vriesdooi cycli wordt het verlies [%] aan schijnbaar volume bepaald ( $\Delta V_b$ ).

### b) GEVOLGD PRINCIPE OP VRAAG VAN DE AANVRAGER

Volgens de aanvraag werden ieder proefstuk gezien als een reeks en getest zover mogelijk. Dit proefverslag bevat de resultaten tot en met 70 cycli. Aangezien de afmetingen van de geleverde proefstukken wordt  $\Delta E$  berekend op basis van de geluidssnelheid.





c) RESULTATEN

Note : zie d) voor de illustraties

# cycli:		14	
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code	$\Delta V_b$ [%]
H1/1:3.03-3.14	-34.1	3	Niet gemeten
H1/4:7.32-7.44	-9.3	2	Niet gemeten
P1/8:10.84-10.94	3.7	3	Niet gemeten
W1/1:3.71-3.85	1.1	2	Niet gemeten
W2/2:3.43-3.55	-8.4	2	Niet gemeten
W2/3:3.95-4.06	-1.9	0	Niet gemeten
W2/4:7.82-7.92	-2.7	1	Niet gemeten
W3/3:2.75-2.87	-1.7	1	Niet gemeten
R2/1:2.37-2.47	-5.4	0	Niet gemeten
R2/5:6.78-6.88	1.7	3	Niet gemeten
5376-D41/30-54	-22.0	2	Niet gemeten
5376-D111/50-70	-22.6	1	Niet gemeten
5376-D152/17-35	-21.7	4	Niet meetbaar

# cycli:		56	
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code	$\Delta V_b$ [%]
H1/1:3.03-3.14	Niet meetbaar	4	Niet gemeten
H1/4:7.32-7.44	-10.6	2	Niet gemeten
P1/8:10.84-10.94*	-12.3	4	Niet gemeten
W1/1:3.71-3.85	2.6	3	Niet gemeten
W2/2:3.43-3.55	-8.0	3	Niet gemeten
W2/3:3.95-4.06	-4.4	1	Niet gemeten
W2/4:7.82-7.92	-6.6	1	Niet gemeten
W3/3:2.75-2.87	-11.2	2	Niet gemeten
R2/1:2.37-2.47	-5.8	0	Niet gemeten
R2/5:6.78-6.88	0.0	3	Niet gemeten
5376-D41/30-54	-17.2	2	Niet gemeten
5376-D111/50-70	-32.3	2	Niet gemeten





\* : gebroken na de metingen.

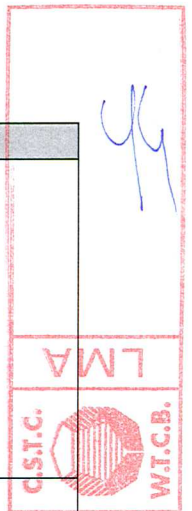




# cycli:		70	
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code	$\Delta V_b$ [%]
H1/4:7.32-7.44	-16.1	2	Niet gemeten
W1/1:3.71-3.85	-15.6	3	Niet gemeten
W2/2:3.43-3.55	-19.9	3	Niet gemeten
W2/3:3.95-4.06	-10.6	2	Niet gemeten
W2/4:7.82-7.92	-13.5	2	Niet gemeten
W3/3:2.75-2.87	-33.5	0	Niet gemeten
R2/1:2.37-2.47	-15.2	3	Niet gemeten
R2/5:6.78-6.88	-9.3	1	Niet gemeten
5376-D41/30-54	-34.3	2	Niet gemeten
5376-D111/50-70	-59.9	2	Niet gemeten

d) ILLUSTRATIES

Proefstuk	Illustraties	
H1/1:3.03-3.14	 Na 56 cycli	
P1/8:10.84-10.94	 Na 56 cycli	
5376 D152/17-35	 Na 14 cycli	 Na 14 cycli en manipulatie



- Proefstation : B-1342 Limelette, avenue P. Holoffe, 21  
 - Kantoren : B-1932 Sint-Stevens-Woluwe, Lozenberg, 7  
 - Maatschappelijke zetel : B-1000 Brussel, Lombardstraat, 42

Tel : (32) 2 655 77 11

Fax : (32) 2 653 07 29

Tel : (32) 2 716 42 11

Fax : (32) 2 725 32 12

Tel : (32) 2 502 66 90

Fax : (32) 2 502 81 80

BTW nr. : BE 407.695.057

**Blz. : 1/7**

**LABORATORIUM : LMA**

**PROEFVERSLAG**

Nr. DE, ATA, RE: 64112041-5

Nr. Labo : LMA 5320 en 5376

Nr. Monster : N-2012-27-020 en  
 2012-51-001

Ruwbouw & afwerkingsmaterialen

**Dit rapport 64112041-5 vervangt en annuleert het vorige rapport 64112041-4.**

**AANVRAGER:** KONINKLIJK INSTITUUT VOOR HET KUNSTPATRIMONIUM  
 JUBELPARK 1  
 1000 BRUSSEL

**Gecontacteerde personen:**

- Aanvrager -  
 Mevr. H. De Clercq (KIK)  
 Dhr. R. Hayen (KIK)

- WTCB -  
 Dhr. Y. Grégoire (labo LMA)

Dhr. Y. Vanhellefont (W.T.C.B. - labo REN)

**Uitgevoerde proeven:** BELAC: Bepaling van vorstbestandheid (identificatie proef) van natuursteen.

**Referenties :** BELAC: NBN EN 12371 (2010)

**Datum en referentie van de aanvraag :** 04.07.2012 Bestelbon 2012 (LABO) 15275

**Ontvangstdatum van de proefstukken :** 04.07.2012 en 12.12.2012

**Datum van de proef :** 01.2013 tot 05.2013

**Datum opstelling van het verslag :** 29.05.2013

Dit proefverslag bevat 7 pagina's, genummerd van 1/7 tot en met 7/7, en mag slechts in zijn geheel verveelvoudigd worden. Elk blad van het origineel verslag is afgestempeld met de laboratoriumstempel (in het rood) en geparafeerd door het laboratoriumhoofd.

De resultaten en waarnemingen zijn slechts geldig voor de beproefde monsters.

Geen monster

Monster(s) onderworpen aan destructieve proef

Monster(s) 60 kalenderdagen na het opsturen van het verslag uit onze laboratoria verwijderd, behalve bij andersluidende schriftelijke aanvraag

Verantwoordelijke der proeven

Projectleider



Afdelingshoofd

André Leblanc

ir. Arwen Smits

ir. Yves Grégoire

Technische medewerking: DB

DB/ALE/AS



## 1. Proefmonster

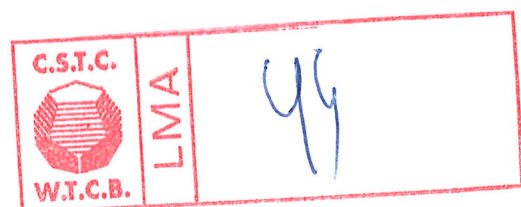
Werden geleverd in ons proefstation te Limelette : proefstukken van natuursteen waarvan de gegevens in de tabel hieronder hernomen worden.

De proefstukken werden geïdentificeerd op de proefaanvraag van KIK. Ze werden alle aangeduid door KIK. De proefstukken werden door ons genummerd.

Vorstbestendigheid	Afmetingen na snijding
LMA5320: H1/1:3.03-3.14 H1/4:7.32-7.44 P1/8:10.84-10.94 P2/2:7.28-7.39* W1/1:3.71-3.85 W2/2:3.43-3.55 W2/3:3.95-4.06 W2/4:7.82-7.92 W3/3:2.75-2.87 R2/1:2.37-2.47 R2/5:6.78-6.88	≈ 9-10 x 6 x 6 cm <sup>3</sup>
LMA5376 : 5376-D41/30-54 5376-D111/50-70 5376-D152/17-35	≈ 18 x 6 x 6 cm <sup>3</sup>

\* : gebroken tijdens initiële metingen.

Petrografische aard van de steen :	Diestiaan ijzerzandsteen
Commerciële naam van de steen :	Grès de Diest
Land en plaats van ontginning :	Diest, België
Verantwoordelijke monstername :	Hilde De Clercq
Oppervlakteafwerking :	Gezaagd
Proefstuknummer :	N-2012-27-020 en N-2012-51-001
Nr. LMA :	5320 en 5376
Informatie geleverd door de leverancier	







## 2. Bepaling van de vorstweerstand – NBN EN 12371 (identificatie proef) Belac

### a) PRINCIPE VAN DE IDENTIFICATIE PROEF VOLGENS NBN EN 12371

Zes proefstukken moeten aan deze proef onderworpen worden. Het zevende proefstuk dient voor het opmeten van de temperaturen.

Ze moeten tot constante massa gedroogd worden bij 70°C ( $\pm 5$ )°C. Vervolgens moeten met een onuitwisbare stift de zijden, de eventuele gebreken alsook de punten voor de meting van de resonantiefrequentie aangeduid worden. De proefstukken moeten gewogen worden (droge massa) en vervolgens moet de resonantiefrequentie bepaald worden. Vervolgens moeten de proefstukken geleidelijk met water geïmpregneerd worden en vervolgens 48 uur onder water gehouden. Nadien moeten ze onder water in natte toestand gewogen worden om het schijnbare volume te bepalen.

De proefstukken moeten daarna in de vrieskast geplaatst worden telkens voor het gevraagde aantal vriesdooi cycli. Elke cyclus bestaat uit een periode van 6 uur vorst aan lucht, gevolgd door een periode van 6 uur dooi waarbij de proefstukken worden ondergedompeld in water. De proef moet verdergezet worden tot de proefstukken worden geclassificeerd als beschadigd, met een maximum van 168 cycli.

Twee criteria moeten worden gebruikt om de invloed van de vriesdooi cycli op de proefstukken te beoordelen:

- visuele inspectie;
- opmeten van de dynamische elasticiteitsmodulus.

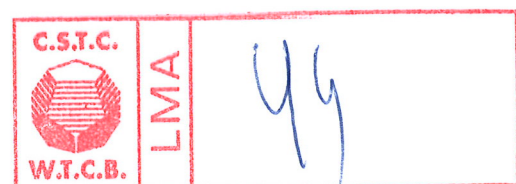
Het bepalen van het verlies aan dynamische elasticiteitsmodulus en het uitvoeren van de visuele inspectie moeten na 14, 56, 70\*, 84, 112, 140 en 168 vriesdooi cycli gebeuren. De test moet verdergezet worden totdat ten minste twee proefstukken worden beoordeeld als beschadigd door één van de volgende criteria:

- de code van de visuele inspectie bereikt een waarde van 3 (één of meer scheurtjes (breedte > 0,1 mm), gaten en loskomen van fragmenten (> 30 mm<sup>2</sup>) of verandering van het materiaal in de aders) of meer
- een verlies [%] aan de dynamische elasticiteitsmodulus van 30% of meer ( $\Delta E$ ).

Na het beëindigen van alle vriesdooi cycli wordt het verlies [%] aan schijnbaar volume bepaald ( $\Delta V_b$ ).

### b) GEVOLGD PRINCIPE OP VRAAG VAN DE AANVRAGER

Volgens de aanvraag werden ieder proefstuk gezien als een reeks en getest zover mogelijk. Dit proefverslag bevat de resultaten tot en met 70 cycli. Aangezien de afmetingen van de geleverde proefstukken wordt  $\Delta E$  berekend op basis van de geluidssnelheid.



\* Niet gevraagd in de Europese norm, maar wel in de Belgische voorschriften – zie TV 228



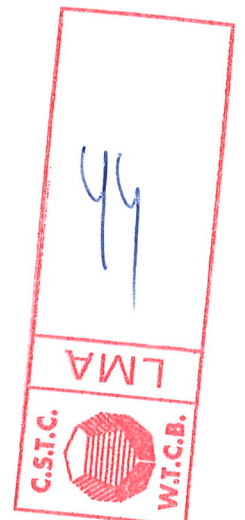
c) RESULTATEN

Note : zie d) voor de illustraties

# cycli:		14
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code
H1/1:3.03-3.14	-34.1	3
H1/4:7.32-7.44	-9.3	3
P1/8:10.84-10.94	3.7	3
W1/1:3.71-3.85	1.1	2
W2/2:3.43-3.55	-8.4	2
W2/3:3.95-4.06	-1.9	0
W2/4:7.82-7.92	-2.7	1
W3/3:2.75-2.87	-1.7	1
R2/1:2.37-2.47	-5.4	0
R2/5:6.78-6.88	1.7	3
5376-D41/30-54	-22.0	2
5376-D111/50-70	-22.6	1
5376-D152/17-35	-21.7	4

# cycli:		56
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code
H1/1:3.03-3.14	Niet meetbaar	4
H1/4:7.32-7.44	-10.6	3
P1/8:10.84-10.94*	-12.3	4
W1/1:3.71-3.85	2.6	3
W2/2:3.43-3.55	-8.0	3
W2/3:3.95-4.06	-4.4	1
W2/4:7.82-7.92	-6.6	1
W3/3:2.75-2.87	-11.2	2
R2/1:2.37-2.47	-5.8	0
R2/5:6.78-6.88	0.0	3
5376-D41/30-54	-17.2	2
5376-D111/50-70	-32.3	2

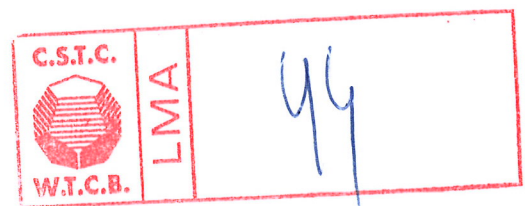
\* : gebroken na de metingen.





<b># cycli:</b>		<b>70</b>
<b>Proefstuk</b>	<b><math>\Delta E</math> [%]</b>	<b>Code</b>
H1/4:7.32-7.44	-16.1	3
W1/1:3.71-3.85	-15.6	3
W2/2:3.43-3.55	-19.9	3
W2/3:3.95-4.06	-10.6	1
W2/4:7.82-7.92	-13.5	2
W3/3:2.75-2.87	-33.5	2
R2/1:2.37-2.47	-15.2	0
R2/5:6.78-6.88	-9.3	3
5376-D41/30-54	-34.3	3
5376-D111/50-70	-51.5	3

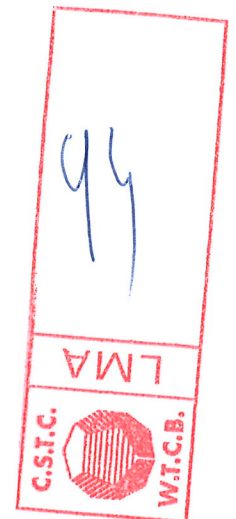
<b># cycli:</b>		<b>84</b>
<b>Proefstuk</b>	<b><math>\Delta E</math> [%]</b>	<b>Code</b>
H1/4:7.32-7.44	-21.0	3
W1/1:3.71-3.85	-14.6	3
W2/2:3.43-3.55	-24.6	3
W2/3:3.95-4.06	-16.5	1
W2/4:7.82-7.92	-23.3	2
W3/3:2.75-2.87	-50.4	2
R2/1:2.37-2.47	-15.2	1
R2/5:6.78-6.88	-2.3	3
5376-D41/30-54	-35.7	3
5376-D111/50-70	-53.3	3






# cycli:		112
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code
H1/4:7.32-7.44	-23.8	3
W1/1:3.71-3.85	-12.5	3
W2/2:3.43-3.55	-23.8	3
W2/3:3.95-4.06	-15.5	2
W2/4:7.82-7.92	-21.2	3
W3/3:2.75-2.87	-26.5	2
R2/1:2.37-2.47	-17.3	1
R2/5:6.78-6.88	-10.5	3
5376-D41/30-54	-35.7	3
5376-D111/50-70	-51.5	3

# cycli:		140
Proefstuk	$\Delta E$ [%]	Code
H1/4:7.32-7.44	-26.6	3
W1/1:3.71-3.85	-13.5	3
W2/2:3.43-3.55	-27.6	3
W2/3:3.95-4.06	-17.5	2
W2/4:7.82-7.92	-23.3	3
W3/3:2.75-2.87	-29.2	3
R2/1:2.37-2.47	-18.7	1
R2/5:6.78-6.88	-12.8	3
5376-D41/30-54	-40.0	3
5376-D111/50-70	-58.3	3









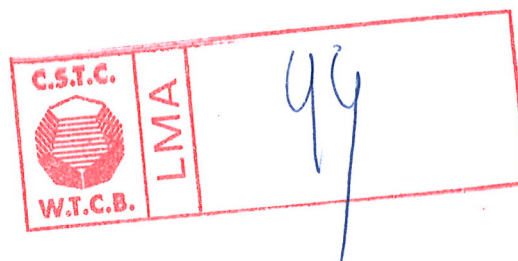
d) ILLUSTRATIES

Proefstuk	Illustraties
H1/1:3.03-3.14	 Na 56 cycli





P1/8:10.84-10.94	 <p>Na 56 cycli</p>	
Serie 5320	 <p>Erosie na 140 cycli</p>	 <p>Erosie na 140 cycli</p>
5376 D152/17-35	 <p>Na 14 cycli</p>	 <p>Na 14 cycli en manipulatie</p>
5376 D41/30-54 D111/50-70	 <p>Erosie na 140 cycli</p>	







**Onderzoeksproject VLA11-4.1**

**Geologische en bouwtechnische kenmerken van de Diestiaan ijzerzandsteen met als doel de inzet ervan in restauraties van historische gebouwen**

**Bijlage X**

**Vergelijkende tabel voor de benamingen van de proefstukken**

D: 2012.11586

*Aanvrager:* Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON)

*Contactpersoon:* Mevr. Griet Verhaert

*Uitvoering:* Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK)  
Departement Labo, Cel Monumenten  
*Laurent Fontaine, Roald Hayen*

*Verslaggeving:* Roald Hayen

*Datum:* 30 september 2013

*Overzichtstabel voor de benamingen gebruikt voor de proefstukken in dit onderzoek en DOV*

Code gebruikt in dit onderzoek	Code volgens DOV
<b>Herent, Roeselberg</b>	
<i>Kernboring VLA10-4.1-B1</i>	
H1/1	VLA10-4.1-B1/1
H1/2	VLA10-4.1-B1/2
H1/3	VLA10-4.1-B1/3
H1/4	VLA10-4.1-B1/4
H1/5	VLA10-4.1-B1/5
H1/6	VLA10-4.1-B1/6
<b>Pellenberg, Gasthuisbos</b>	
<i>Kernboring VLA10-4.1-B2</i>	
P1/1	VLA10-4.1-B2/1
P1/2	VLA10-4.1-B2/2
P1/3	VLA10-4.1-B2/3
P1/4	VLA10-4.1-B2/4
P1/5	VLA10-4.1-B2/5
P1/6	VLA10-4.1-B2/6
P1/7	VLA10-4.1-B2/7
P1/8	VLA10-4.1-B2/8
P1/9	VLA10-4.1-B2/9
P1/10	VLA10-4.1-B2/10
<i>Kernboring VLA10-4.1-B3</i>	
P2/1	VLA10-4.1-B3/1
P2/2	VLA10-4.1-B3/2
P2/3	VLA10-4.1-B3/3
P2/4	VLA10-4.1-B3/4
<b>Wezemaal, Beninksberg</b>	
<i>Kernboring VLA10-4.1-B4</i>	
W1/1	VLA10-4.1-B4/1
W1/2	VLA10-4.1-B4/2
W1/3	VLA10-4.1-B4/3
<i>Kernboring VLA10-4.1-B5</i>	
W2/1	VLA10-4.1-B5/1
W2/2	VLA10-4.1-B5/2
W2/3	VLA10-4.1-B5/3
W2/4	VLA10-4.1-B5/4
<i>Kernboring VLA10-4.1-B6</i>	
W3/1	VLA10-4.1-B6/1
W3/2	VLA10-4.1-B6/2
W3/3	VLA10-4.1-B6/3
W3/4	VLA10-4.1-B6/4
W3/5	VLA10-4.1-B6/5
W3/6	VLA10-4.1-B6/6
W3/7	VLA10-4.1-B6/7
<b>Rotselaar, Middelberg</b>	
<i>Kernboring VLA10-4.1-B7</i>	
R1/1	VLA10-4.1-B7/1
R1/2	VLA10-4.1-B7/2
R1/3	VLA10-4.1-B7/3
R1/4	VLA10-4.1-B7/4
<i>Kernboring VLA10-4.1-B8</i>	
R2/1	VLA10-4.1-B8/1
R2/2	VLA10-4.1-B8/2
R2/3	VLA10-4.1-B8/3
R2/4	VLA10-4.1-B8/4
R2/5	VLA10-4.1-B8/5