FACULTEIT WETENSCHAPPEN
Opleiding Master of Science in de geologie

Herstelmortels voor de Ledesteen: receptontwikkeling en eigenschappen.

Matthias De Clercq

Academiejaar 2013–2014

Scriptie voorgelegd tot het behalen van de graad
Van Master of Science in de geologie

Promotor: Prof. Dr. V. Cnudde
Co-promotor: Prof. Dr. Ir. G. De Schutter
Begeleider: T. De Kock
Leescommissie: Dr. Ir. P. De Pauw, Dr. Ir. H. Derluyn

Voorwoord

Deze thesis zou niet mogelijk zijn geweest zonder de hulp van bepaalde mensen, die ik dan ook uitvoerig wil bedanken.

Allereerst zou ik mijn promotor Prof. Dr. Veerle Cnudde bedanken voor de kans die ik geboden kreeg om deze thesis te maken. Ook mijn begeleider Tim De Kock en Delphine Vandevoorde wil ik graag bedanken. Samen zorgden ze voor verschillende goede ideeën, praktische kennis en hulp bij het maken van de thesis. Daarenboven waren hun antwoorden op mijn vragen, verbeteringen en feedback eveneens een grote hulp bij het schrijven.

Ook zou ik mijn co-promotor Prof. Dr. Geert De Schutter willen bedanken dankzij wie het mogelijk werd gebruik te maken van het labo Magnell te Zwijnaarde. Andere medewerkers van Labo Magnel zijn eveneens mijn dank verschuldigd. Ir. Tommy De Ghein, zou ik willen bedanken voor het inpassen van mijn proeven in het drukke werkschema van het labo, en Nicolas Coppieters voor de hulp bij het uitvoeren.

Mijn dank gaat ook uit naar Dr. Els Bruneel voor de begeleiding bij het gebruik van de TMA. Ook Daniëlle Schram van het Labo Sedimentologie wil ik bedanken voor de vele beantwoordde labo gerelateerde vragen. Verder wil ik de doctoraatstudenten Drs. Wesley De Boever, Drs. Aurelie Isebaert en Drs. Jeroen van Stappen van de onderzoekseenheid SGIG bedanken voor hun goede raad en praktische ervaring. Ook Hilke De Timmerman verdiend een vermelding voor haar gegevens van de Ledesteen.

Tot slot wil ik ook de mensen uit mijn omgeving bedanken. Mijn vrienden en medestudenten met wie ik de afgelopen vijf jaar heel wat leuke en interessante tijden heb meegemaakt. Ook mijn ouders, broer en grootouders zou ik willen bedanken voor de niet aflatende emotionele (en financiële) steun van de afgelopen vijf jaar.

Allemaal hartelijk bedankt!!

Inhoudsopgave

1 Inleiding 1
2 Literatuurstudie 3
2.1 Ledesteen 3
2.1.1 De Formatie van Lede 3
2.1.1.1 Ontstaan van kalksteen banken 5
2.1.1.2 Stratigrafische indeling 6
2.1.1.3 Geografische verbreiding 8
2.1.2 Petrografie 8
2.1.2.1 Macroscopisch 8
2.1.2.2 Microscopisch 9
2.1.3 Technische eigenschappen 10
2.1.4 Gebruik 10
2.1.4.1 Ontginning 13
2.1.4.2 Groeve van Balegem 14
2.1.4.3 Reserves 14
2.2 Verwering 15
2.2.1 Verwering van Ledesteen 15
2.3 Restauratie 17
2.3.1 Restauratie principes 17
2.3.1.1 Charter van Venetië 17
2.3.1.2 Nara Document on Authenticity 17
2.3.2 Concepten 17
2.3.3 Functionele vereisten 18
2.3.4 Technische vereisten 18
2.4 Restauratie methodes 20
2.4.1 Oppervlaktebehandelingen 20
2.4.2 Herstelmortel 20
2.4.2.1 Chemische mortels 21
2.4.2.2 Mortels met hars 21
2.4.2.3 Minerale mortels 21
2.4.3 Vervanging 21
2.4.3.1 Vervanging van de Ledesteen 21
2.5 Kalkmortels 22
2.5.1 Carbonatatie en hydratatie 22

2.5.1.1 Carbonatatie 22
2.5.1.2 Hydratatie 23
2.5.2 Mortels met luchthardende kalk 24
2.5.3 Mortels met natuurlijke hydraulische kalk (NHL) 24
2.5.4 Mortels met natuurlijk cement 25
2.5.5 Mortels met portlandcement 25
2.5.6 Gemengde kalk en cement mortels 25
2.6 Aggregaat 25
3 Materiaal en Methodes 28
3.1 Mortelrecept 28
3.2 Materiaal 29
3.2.1 Bindmiddel 29
3.2.2 Aggregaten 29
3.2.2.1 Lede zand 29
3.2.2.2 Lochristi en Geel zand 31
3.2.2.3 Gebroken Ledesteen 31
3.2.3 Mortel ontwerp 32
3.2.4 Procedure voor het aanmaken van de stalen 33
3.2.4.1 Mortel preparatie 34
3.2.4.2 Conditionering van de test stalen 35
3.2.5 Samenstelling van de mortel stalen 36
3.2.5.1 Reeks 1 (5 maanden uitharden) 36
3.2.5.2 Reeks 2 (3 maanden uitharden) 37
3.3 Methodes 38
3.3.1 Consistentie (verwerkbaarheid) 38
3.3.2 Optische microscopie 41
3.3.3 Fenolfthaleïne test 42
3.3.4 Bepaling van de schijnbare volumieke massa en open porositeit 42
3.3.5 Bepaling van de geluidvoortplantingssnelheid 44
3.3.6 Buig- en druksterkte test 45
3.3.7 Bepaling van de waterdampdoorlatendheid 47
3.3.8 Bepaling van de capillaire absorptie 49
3.3.9 Bepaling van de waterabsorptie bij atmosferische druk 51
3.3.10 Bepaling van de permeabiliteit 52
3.3.11 Bepaling van de droogsnelheid 54

3.3.12 Thermomechanische analyse 55
3.3.13 Veroudering door thermische schok 56
4 Resultaten en discussie 58
4.1 Consistentie 58
4.2 Petrografie 59
4.2.1 Ledesteen 59
4.2.2 Mortels met Lede zand 59
4.2.2.1 Lede 1 60
4.2.2.2 Lede 2 60
4.2.2.3 Lede 3 61
4.2.3 Mortels met Lochristi en Geel zand 61
4.2.3.1 Lo/Ge 1 62
4.2.3.2 Lo/Ge 2 62
4.2.3.3 Lo/Ge 3 63
4.2.4 Mortels met Gebroken Ledesteen 63
4.2.4.1 Gebr. Lede 2 64
4.2.4.2 Gebr. Lede 4 64
4.3 Carbonatatie 65
4.4 Schijnbare volumieke massa en openporositeit 66
4.5 Geluidvoortplantingssnelheid 68
4.6 Buig- en druksterkte 69
4.7 Waterdampdoorlatendheid 70
4.8 Capillaire absorptie 71
4.9 Waterabsorptie bij atmosferische druk 73
4.10 Permeabiliteit 74
4.11 Droogsnelheid 75
4.12 Thermische uitzetting 76
4.13 Verwering ten gevolge van thermische schok 77
4.13.1 Visuele evaluatie 77
4.13.1.1 Ledesteen 77
4.13.1.2 Mortels met Lede zand 77
4.13.1.3 Mortels met Lo/Ge 78
4.13.1.4 Mortels met Gebroken Ledesteen 79
4.13.2 Evaluatie van de RGB-waarden 80
4.14 Vergelijken van resultaten 82

4.14.1 Waterabsorptie 82
4.14.2 Waterabsorptie versus open porositeit 83
4.14.3 Sterkte versus open porositeit 86
4.14.4 Porositeit versus droogsnelheid 86
4.15 Compatibiliteit 87
5 Besluit 90
Referenties 91
Literatuur 91
Normen 96
Internetbronnen 97
Bijlagen 97
Bijlage 1 97
Bijlage 2 99
Bijlage 3 99
Bijlage 4 101
Bijlage 5 102
Bijlage 6 104
Bijlage 7 106
Bijlage 8 113
Bijlage 9 119
Bijlage 10 120
Bijlage 11 121
Bijlage 12 127

1 Inleiding

Eén van de belangrijkste historische bouwstenengebruikt in Vlaamse monumenten is de Ledesteen. De Ledesteen, ook wel Balegemse steen genoemd, duidt op de grijs-groene kalksteenbanken in de Formatie van Lede. Deze banken hebben een variërende dikte en zijn opgebouwd uit een fijnkorrelig, glauconiet- en fossielhoudend kwartszand, met als typische fossiel de *Nummulites variolarius*. De Formatie van Lede ontsluit voornamelijk in het Dender-Schelde interfluvium en werd daar ook ontgonnen.

De Ledesteen is een frequent gebruikte bouwsteen. De opkomst van de Gotische bouwstijl leidde tot het eerste grootschalige gebruik, waardoor de Ledesteen in de 15^{e} en 16^{e} eeuw een van de belangrijkste bouwstenen van Vlaanderen was. De opkomst van de Gotiek leidde ook tot de massale uitvoer ervan, voornamelijk naar Nederland. Met de komst van de industriële revolutie bleek dat kalkstenen gevoelig waren aan verwering door luchtvervuiling. De versterkte verwering leidde ertoe dat bestaande gebouwen gerestaureerd moesten worden.

Een restauratie wordt uitgevoerd volgens een aantal richtlijnen en principes, dewelke opgetekend zijn in verschillende documenten, zoals het Charter van Venetië en het Nara document. Uitgevoerde restauraties maken gebruik van het concept compatibiliteit. Dit houdt in dat een behandeling mechanisch, fysisch, chemisch en esthetisch compatibel moet zijn met het historische materiaal.

Ten gevolge van economische moeilijkheden voor ontginning en de uitputting van de lagen, lijkt de vraag naar Ledesteen groter dan de beschikbaarheid. Vanwege zijn problematiek werd de Ledesteen meer en meer vervangen door andere witstenen. De vervangstenen hebben echter een andere mineralogische samenstelling. Dit zorgt voor een andere resistentie tegen carbonatie en sulfatatie en de ontwikkeling van andere patina. De restauratie zorgt hierdoor voor een esthetische disharmonie tussen de blekere, niet of minder verweerde, vervangstenen en de licht okerkleurige Ledesteen.

Een mogelijke oplossing voor de restauratieproblemen van licht verweerde Ledesteen kan gevonden worden in het gebruik van restauratiemortels. Licht verweerde Ledesteen kan hersteld worden zonder dat de hele steen vervangen moet worden. Het gebruik van herstelmortels zorgt voor een duurzaam en goedkoop alternatief. Het voordeel van het gebruik van restauratiemortels is dat de eigenschappen en het uitzicht ervan, zowel qua kleur als qua textuur, kunnen aangepast worden om meer te lijken op de herstelde steen. De kleur van de mortels wordt meestal zodanig gekozen dat deze de kleur van het gereinigd oppervlak benadert. Ze zijn meestal erg stabiel, waardoor deze na verloop van tijd eveneens zorgen voor een kleurverschil door de ontwikkeling van een patina bij de natuursteen (Figuur 1).

Figuur 1: Ledesteen in de gevel van station Gent-Sint-Pieters. (Foto: M. De Clercq)

Het doel van deze thesis is het ontwikkelen van een restauratiemortel dat op vlak van mechanische, fysische, chemische en esthetische eigenschappen, compatibel is met de Ledesteen, ook doorheen de tijd. Om een compatibele mortel te ontwikkelen is er geopteerd voor een mortelrecept op basis van hydraulische kalk met toevoeging van respectievelijk Lede zand, een mengeling van Lochristi zand en Geel zand (Lo/Ge) en gebroken Ledesteen.

De evaluatie van de mortels vond plaats door de technische eigenschappen en de compatibiliteit ervan te bepalen aan de hand van een aantal karakteriseringsproeven en een duurzaamheidsproef.

2 Literatuurstudie

2.1 Ledesteen

De Ledesteen is gekend onder verschillende namen, waarvan Ledesteen en Balegemse steen de bekendste zijn. Andere namen waar de Ledesteen mee bedoeld worden, zijn: Vlaamse arduin, witte arduin, Lediaanse (zand)steen, Ledische zandsteen, Dendersteen, Grimbergse zandsteen en Dieleghemse steen (Dusar, Dreesen & De Naeyer, 2009). De term Balegemse steen is in de volksmond het meest gebruikt, dit vanwege de ontginning van de Ledesteen die de laatste vijftig jaar enkel nog in Balegem plaatsvond. Volgens Dusar, Dreesen & De Naeyer (2009) kunnen de term Ledesteen en Balegemse steen naast elkaar gebruikt worden, zonder dat er hiermee een overlap plaatsvindt in betekenis. De term Balegemse steen duidt dan enkel op de kalkstenen afkomstig uit streek tussen Gent en Brussel. De term Ledesteen daarentegen wordt gebruikt om alle kalkstenen uit de Formatie van Lede aan te duiden.

2.1.1 De Formatie van Lede

De Formatie van Lede is ongeveer 46 Ma geleden afgezet (Lutetiaan), in het zuidelijke gedeelte van het toenmalige Noordzee bekken. De lithologie van de Formatie van Lede is vrij homogeen en bestaat uit fijnkorrelig glauconiet- en kalkhoudend zand met *Nummulites variolarius*. Op vele plaatsen is het zand echter volledig ontkalkt en vormt het een zacht, bleek zand. Waar de Formatie van Lede niet ontkalkt is, komen doorgaans drie banken zandige kalksteen (of kalkhoudende zandsteen) voor. In de groeve van Balegem zijn deze beschreven door Fobe (1986) en Mourlon (1888).

- De onderste steenbank ligt onmiddellijk bovenop en soms ook deels in het basisgrind van de Formatie van Lede. Het gevolg hiervan is dat het onderste deel ervan grove elementen uit het basisgrind bevat, afkomstig van gerodeerde afzettingen van de Formatie van Aalter en Brussel. Naar boven toe verdwijnen de grove componenten en het gesteente wordt een gewone ongestructureerde packstone. Deze steenbank is echter discontinu en wordt niet aangetroffen in nabij gelegen ontsluitingen zoals bijvoorbeeld in Oosterzele.
- De basis van de tweede steenbank bevindt zich ongeveer 50 cm hoger en vertoont een tamelijk conventioneel uitzicht. De steenbank is ook veel beter ontwikkeld en heeft een grote laterale verbreiding. Het gesteente heeft een lichtjes hoger gehalte aan grofkorreligere elementen (grove kwarts korrels, nummulieten, bivalvenfragmenten) en wordt aangetroffen net boven een schelpenlaag. Het gesteente is echter weinig poreus en de epitaxiale randen rond de nummulieten zijn dan ook beperkt gebleven. Het cement is ijzerrijk en vrij fijnkorrelig. Naar boven toe verminderen de grove componenten tot hun normale concentraties.
- Verder bevond er zich in de oude groeve ook een derde laag op ± 2,7 m boven de tweede steenlaag. Deze kalksteen bevat eveneens veel schelpen, grind en nummulieten en is te correleren met de bovenste schelpenmergelbank in de nu actieve groeve.

De kalksteenbanken hebben een variërende dikte (20 cm tot > 50cm) en met een variërend kalkgehalte van ± 50 - 68 % volgens Gulinck & Hacquaert (1954) en ± 55 – 60 % volgens Fobe & Spiers (1992). In bijna zijn volledige voorkomen zijn de Lede zanden bedekt met de Asse

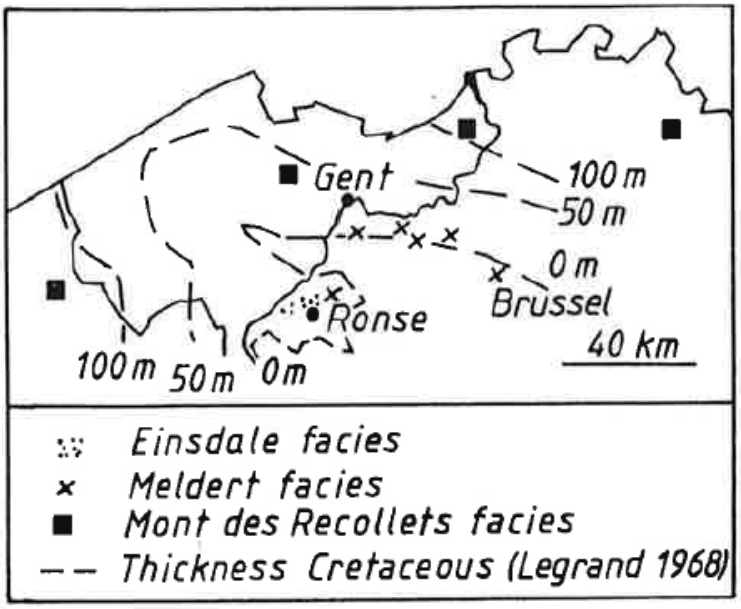
Formatie. Enkel aan de extreme oostelijke randen van de Kempen en de zuidelijke voorkomens in Brabant worden ze bedekt met de Formatie van Tongeren. Buiten de kalksteenbanken, bevat de Formatie amper een gelaagdheid. Ten oosten van de Zenne zou het aantal kalksteenbanken volgens Gulinck en Hacquaert (1954) kunnen oplopen tot vijf of zelfs tot twaalf volgens Camerman (1957).

De samenstelling van de fossielrijke fauna varieert van plaats tot plaats maar de hoofdbestanddelen worden volgens Kaasschieter (1961) ingenomen door *Nummulites variolarius*, *Turbinolia sulcata*, *Turritella imbricataria*, *Solarium nysti*, *Rostellaria fissurella*, *Ostrea gryphina*, *Pecten corneus*, *Nautilus lamarcki*, *Echinolampas affinis*, *Terebratua kickxi*, *Ditrupa strangulata*, visresten zoals *Lamna vincenti* en *Odontaspis macrota* en Bryozoa resten van o.a. *Lunulites latera.*

Uit de zeer rijke fossiele fauna van de Formatie van Lede kan afgeleid worden dat ze is afgezet in ondiepe en warme, goed verluchte, zeer kalkrijke omgeving. Aan de hand van foraminiferen interpreteerde Kaasschieter (1961) het afzettingsgebied als een ondiepe shelf, vergelijkbaar met de huidige Guyana shelf. Het afnemen van het aantal foraminiferen in noordelijke richting werd geïnterpreteerd als het dieper worden van de zee in noordelijke richting, met de mogelijke vorming van een rif systeem.

Jacobs & Sevens (1996) stellen dat het onregelmatige, scherpe grensoppervlak aan de basis van de Formatie van Lede in de groeve van Balegem, waarschijnlijk een sequentiegrens vormt op de vroegere shelf. Het hierop liggende schelprijke, grove zand- (tot grind-) pakket met herwerkte zanden van het lid van Vlierzele en Nummulites variolarius, kan beschouwd worden als een late lowstand tot vroege transgressieve afzetting (Lowstand Systems Tracts, LST – Transgressive Systems Tracts, TST) net voordat het relatieve zeeniveau begon te stijgen. De hierop volgende tweede grindlaag bevat zowel grote als kleine zandsteen keien, haaien- en roggentanden en schelpengruis en duidt het definitieve begin aan van de sequentie van de Formatie van Lede. Uit het voorkomen van kleine maar robuuste soorten fossiele nummulieten zoals Ditrupa en Homolaxis, het ontbreken van een duidelijke gelaagdheid en de aanwezigheid van een meer massief karakter (als gevolg van sediment herwerking door stormen), kan worden afgeleid dat de afzetting van de Formatie van Lede het gevolg is van een transgressie over een platte en laag liggende kustvlakte. Verdere indicaties voor het transgressieve karakter van de Formatie van Lede zijn bioturbatie die enkel aan de top voorkomt en de stapsgewijze, lichte *fining upward* trend aanwezig in de sedimenten.

Het volgens Fobe & Spiers (1992) voorkomen van drie verschillende facies in de Formatie van Lede (Meldert facies, Mont des Récollets facies en Einsdale facies) wordt verklaard aan de hand van het oscilleren van het massief van Brabant (Figuur 2).



Figuur 2: Verspreiding Lede facies (aanpassing van de Krijt dikte kaart van Legrand (1968), uit Fobe & Spiers, 1992)

Volgens Fobe & Spiers (1992) was de zee, direct ten noorden van Ronse, tussen Gent en Brussel voldoende ondiep, zodat de zeebodem boven de stormgolfbasis lag tijdens periodes van lage zeespiegelstand (Meldert facies). Dit facies bevat verschillende erosieoppervlakken, welke vaak geassocieerd worden met zandige kalksteenlagen die vaak een laterale verspreiding hebben van enkele tientallen kilometers en storm gerelateerde structuren bevatten. In Noord-België en de Cassel regio, vond de afzetting plaats in dieper water en fases van lage siliciclasitische afzetting worden enkel aangeduid door kalksteenlagen, zonder erosieoppervlakken (Mont des Récollets facies). Cassel ligt op eenzelfde breedtegraad als Ronse, maar zal minder onderhevig zijn aan de oscillaties van het Massief van Brabant vanwege zijn grotere afstand tot het Massief van Brabant. Vermits Ronse dichter bij het Massief van Brabant ligt zal de formatie van Lede hier afgezet zijn in een ondiep, kustnabij gebied, gekenmerkt door grofkorrelige afzettingen met silicificaties en een mogelijke paleosol (Einsdale facies).

De variaties in lithofacies kunnen echter ook ontstaan zijn ten gevolge van andere factoren zoals de wisselwerking van zeeniveau fluctuaties met sediment toevoer en lokale topografische omstandigheden (Jacobs & Sevens, 1996).

2.1.1.1 Ontstaan van kalksteen banken

Fobe (1986) stelt dat de diagenese van de kalksteenbanken reeds kort na de afzetting van de sedimenten plaatsvond. De aanwezigheid van ijzer in het calcietcement is volgens Fobe (1986) het gevolg van de vorming van de kalkstenen in een reducerend milieu in contact met zoet (meteorisch) water. Ten gevolge van rijzen van de zeespiegel, werden verschillende transgressieve oppervlakken gevormd, gekenmerkt door grovere zand en schelp accumulaties. De grovere zandlagen met schelpfragmenten fungeren hierbij als vloeistof geleiders. Doordat de afzettingen van een zoutwater naar een zoetwater omgeving veranderden, werden de biogene aragoniet en Mg-calciet mineralen onstabiel, waardoor ze oplosten. In de kalkrijkere niveaus resulteerde dit in, respectievelijk, het direct uitkristalliseren van laag-Mg-calciet, met de vorming van epitaxiale korsten op de intact gebleven kalkfragmenten.

2.1.1.2 Stratigrafische indeling

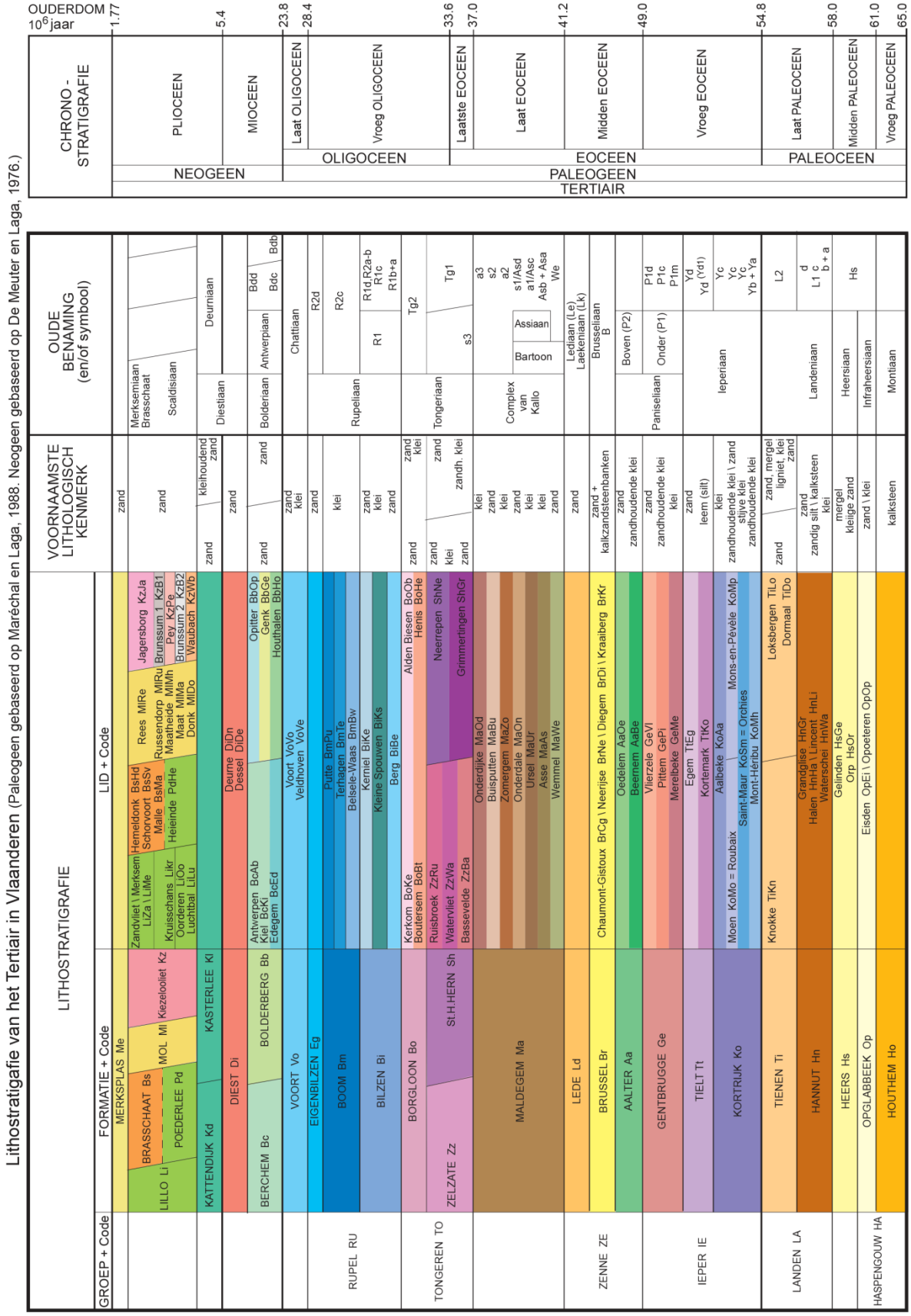
Het Eoceen wordt door Jacobs (1975) onderverdeeld in de Formaties van Ieper, Mont-Panisel, Knesselare (of den Hoon), Brussel, Lede en Meetjesland welke zijn ingedeeld in drie groepen. Deze Formaties worden nog steeds gehanteerd door Fobe (1986), hoewel de Formatie van het Meetjesland aangeduid wordt als de Formatie van Kallo. De drie groepen die geïntroduceerd worden door Jacobs (1975) worden in 1988 in het werk 'Voorstel lithostratigrafische indeling van het Paleoceen' door Maréchal als basis gebruikt voor het aanduiden van de Zenne Groep, de Ieper groep en de Formatie van Maldegem. In dit werk worden de lithostratigrafische eenheden gedefinieerd die nu nog steeds gehanteerd worden en waar te nemen zijn in Figuur 3. Hierop is te zien dat het Eoceen onderverdeeld is in:

- De Ieper Groep;
    - Formatie van Kortrijk
    - Formatie van Tielt
    - Formatie van Gentbrugge
- De Zenne Groep;
    - Formatie van Aalter
    - Formatie van Brussel
    - Formatie van Lede
- De Formatie van Maldegem.

Deze indeling is dezelfde als gehanteerd wordt door Fobe (1986), waarbij dat de Formatie van Knesselare nu de Formatie van Aalter vormt. Verder is er ook waar te nemen dat het Eoceen een ouderdom heeft van 54,8 Ma tot 33,6 Ma en opgedeeld is in vroeg-, midden-, laat- en laatste-Eoceen.

Door het *International Commission on Stratigraphy* (ICS) wordt het Eoceen ingedeeld in vier Stages, die grofweg overeenkomen met de informele indeling op Figuur 3. Deze zijn:

- Het Ieperiaan (55,8 ± 0,2-48,6 ± 0,2 Ma)
- Het Lutetiaan (48,6 ± 0,2-40,4 ± 0,2 Ma)
- Het Bartoniaan (40,4 ± 0,2-37,2 ± 0,1 Ma
- Het Priaboniaan (37,2 ± 0,1-33,9 ± 0,1 Ma).



Figuur 3: Lithostratigrafie van het Tertiair in Vlaanderen. (Paleoceen gebaseerd op Maréchal en Laga, 1988. Neogeen gebaseerd op De Meuter en Laga, 1976.)

2.1.1.3 Geografische verbreiding

De Formatie van Lede heeft een variabele dikte en is altijd vrij klein. De dikte varieert van 4 - 5 m in de buurt van Ronse, over 7,50 m in de buurt van Gent, tot 12 m in de buurt van Mechelen, en heeft een zeer variabele dikte in de heuvels van Cassel-Ieper.

De Formatie van Lede ontsluit voornamelijk in het Dender-Schelde interfluvium en ten oosten van de Zenne, waar ze samen met Bartoniaan afzettingen te vinden zijn op de flanken van de heuvels. Verder bedekken ze een groot oppervlak tussen de Dender en de Dijle (Gulinck en Hacquaert, 1954). Op vele plaatsen is de Formatie van Lede bedekt door Pleistocene afzettingen van de Vlaamse Vallei. Vermits de lagen hellen naar het Noorden, gaan ze verder over in een dieper zandig facies, bedekt door boven-Paleogene en Neogene sedimenten (Kaasschieter, 1961). Naar het oosten en het westen wiggen de ontsluitingen uit, waarbij de extensie naar het oosten beperkt is tot de flexuur van Korbeek-Loo (Gulinck en Hacquaert, 1954). Naar het Zuiden toe zijn er nog ontsluitingen te vinden in de buurt van Nijvel, maar zijn ze volledig geërodeerd tussen de Zenne en de Dender tot in de Regio van Brussel (Gulinck en Hacquaert, 1954). Volgens Gulinck en Hacquaert (1954) moet de Noord-West grens langs Zeebrugge en Westkapelle lopen, maar is ze nooit ondubbelzinnig vastgesteld tussen Eeklo en de kust (Kaasschieter, 1961).

Hoewel de Formatie van Lede in Brabant en ten oosten van de Dijle niet meer waar te nemen is in ontsluitingen, werd er ten Noordoosten van deze zone, door Fobe (1989), Lede aangetroffen in de ondergrond van de regio's Oostham, Kwaadmechelen en Mol.

Afhankelijk van de locatie kan de Formatie van Lede aangetroffen worden tussen verschillende formaties. In het westen en het centrale deel van voorkomen, bevindt de Formatie van Lede zich op de Formatie van Aalter of de Formatie van Gent en onder de Formatie van Maldegem. In het oosten bevindt de Formatie van Lede zich op de Formatie van Brussel en onder de Formatie van Tongeren.

2.1.2 Petrografie

2.1.2.1 Macroscopisch

De Ledesteen is, in niet verweerde toestand, een bleke kalksteen die afhankelijk van zijn samenstelling en graad van verwering, verschillende kleuren kan hebben (Figuur 4). Vaak aangetroffen kleuren gaan van een grijze, groengrijze tot gelige, oker tot roestbruine kleur. De meer groene varianten bevatten een hoger gehalte glauconiet en de gelige, okerkleurige of roestkleurige Ledestenen zijn geoxideerd. De Ledesteen bevat vrij veel fossielen die macroscopisch waarneembaar zijn. Deze fossielen worden zowel verspreid, als in schelpenbanken aangetroffen, waardoor (in het geval van schelpenbanken) de steen soms bijna volledig opgebouwd is uit fossielen. Macroscopisch waar te nemen fossielen zijn bijvoorbeeld *Nummulites variolarius*, *Ditrupa strangulata* en *Turritella imbricataria*, milioliden, bivalven, haaientanden en roggentanden. Van sommige van deze fossielen (voornamelijk gastropoden) zijn enkel de oplossingsholtes waar te nemen.

Figuur 4: Ledesteen (foto: M. De Clercq)

2.1.2.2 Microscopisch

De Ledesteen is opgemaakt uit een fijnkorrelig, detritisch kwartszand dat glauconiet bevat (< 5 %). Volgens Fobe (1989) vormt dit kwartszand het raamwerk en maakt het 38 tot 50 % van de volledige steen op. Verder is er ook een variabele hoeveelheid fossiele fragmenten en een klein gehalte aan pyriet aanwezig. De meest voorkomende fossiele resten zijn afkomstig van *Nummulites variolarius*, maar ook mylioliden, bivalven en echiniden stekels worden aangetroffen. Dit geheel wordt bij elkaar gehouden door een calciet matrix dat zowel uit micriet als spariet bestaat. Volgens de classificatie van Dunham is de Ledesteen in te delen als een *packstone* of een *grainstone* (Fobe, 1990).

Sommige fossielfragmenten zijn gerekristalliseerd tot ijzerrijke calciet, waarbij de vorm van het fossiel behouden is gebleven. De Ledesteen heeft een variabel kalkgehalte dat kan variëren tussen 40 en 60% (WTCB, 1997). Volgens zijn kalkgehalte is de steen te classificeren als zandhoudende kalksteen of kalkhoudende zandsteen.

Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de Ledesteen wordt er verwezen naar Fobe (1986).

2.1.3 Technische eigenschappen

De Ledesteen is vrij heterogeen en afhankelijk van de bovenliggende lagen, post-sedimentaire processen, fossielinhoud en porositeit kan de kwaliteit ervan lokaal verschillen.

De technische kenmerken van de Ledesteen uit Balegem zijn waar te nemen in Tabel 1.

Tabel 1: Technische kenmerken van de Ledesteen uit Balegem (Balegro, z. j.)

Kenmerk	Norm	Eenheden	afmeting proefstukken (mm)	proefresultaten	
				Gemiddelde	St. dev.
Schijnbare volumieke massa	NBN EN 1936:1999	kg/m³	50 x 50 x 50	2448	29
Open Porositeit	NBN EN 1936:1999	vol.%	51 x 50 x 50	8,27	1,09
Waterabsorptie door capillariteit	NBN EN 1925:1999	g/(m²√s)	52 x 50 x 50	11,98	4,07
Geluidsvoortplantingssnelheid[1]	NBN EN 14579:2004	m/s	300 x 70 x 50	4359	41
Druksterkte[2]	NBN EN 1926:1999	N/mm²	70 x 70 x 70	48,4	12,6
Buigsterkte	NBN EN 12372:1999	N/mm²	300 x 50 x 50	17,6	3,9
Slijtsterkte (Capon)	NBN EN 1341:2001	mm	110 x 110 x 50	19	1,19
Vorstbestandigheid	NBN EN 12371:2010	nvt	300 x 50 x 50	vorstbestendig (Nc = 168)	

2.1.4 Gebruik

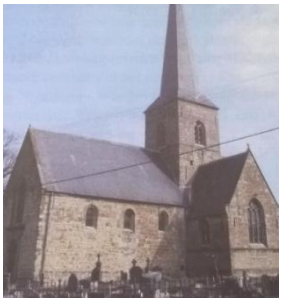
Het historisch gebruik van een natuursteen, was sterk plaats- en tijdsgebonden en hing voornamelijk af van de mogelijkheid voor exploitatie en bewerking in een groeve, de transportmogelijkheden vanuit de groeve naar de benodigde plaats, de mogelijkheden voor verwerking en toepassing op de bouwplaats en de economische, politieke, sociaal-culturele en andere tijdsgebonden omstandigheden (Dusar, Dreesen & De Naeyer, 2009)

Het, tot nog toe, oudste gedocumenteerde gebruik van de Ledesteen, is van Romeinse afkomst, en wijst erop dat de Ledesteen reeds ontgonnen werd in de 2^{e}-3^{e} eeuw na Chr. (De Ceukelaire & Cnudde, 2009). De Ledesteen werd toen gebruikt in funderingen en waterputten.

Vanwege de, vrij sobere, Romaanse bouwstijl was het gebruik van de Ledesteen in de 11^{e} en 12^{e} eeuw na Chr. vrij beperkt en werd het enkel lokaal gebruikt (vb.: Sint-Martinuskerk te Westrem (Figuur 5) en de Sint-Liviniuskerk te Sint-Lievens-Houtem).

[1] Volgens de lengterichting parallel aan de gelaagdheid

[2] Loodrecht op de gelaagdheid



Figuur 5: Sint-Martinuskerk te Westrem. (Figuur uit De Ceukelaire & Cnudde (2009))

In deze periode werd er voornamelijk gebruik gemaakt van de Doornikse kalksteen, dewelke beter paste bij de Romaanse bouwstijl[3] (De Ceukelaire & Cnudde, 2009).

Bij de opkomst van de Gotische bouwstijl werden veel kerken uitgebreid, waarbij er zowel Doornikse als lokale stenen gebruikt werden. Voor de uitbreiding van zowel het Belfort en de Sint-Michielskerk te Gent (Figuur 6) werd Ledesteen gebruikt afkomstig uit de groeve van Vlierzele (De Ceukelaire & Cnudde, 2009 en Cnudde et al., 2009).

Figuur 6: Sint-Michielskerk te Gent. (Figuur van Gent.be (A))

De opkomst van de Brabantse Gotiek (15^{e} en 16^{e} eeuw) en de overgang naar de Renaissance bouwstijlen (1400-1650), zorgde voor een sterke toename in gebruik. Een ander gevolg is dat hij massaal uitgevoerd werd (Cnudde et al., 2009). De toename van het gebruik van de Ledesteen was echter sterk gebonden aan verschillende politieke en sociaal-culturele omstandigheden. De uitbraak van de pest en de 100-jarige oorlog in de 14^{e} eeuw, en de oorlog tussen Gent en de Hertogen van Bourgondië in de 15^{e} eeuw, zorgden voor verschillende periodes waarin de Ledesteen amper gebruikt werd. Tijdens de 15^{e} en 16^{e} eeuw werd de Ledesteen gebruikt als de voornaamste historische bouwsteen in West-Brabant en Vlaanderen ten noorden van de lijn Brussel-Ninove-Oudenaarde-Brugge. Het is ook in deze periode dat de Ledesteen op grote schaal naar Zeeland en Holland uitgevoerd wordt (Gulinck & Hacquaert, 1954).

Ten gevolge van het uitbreken van de godsdienstoorlogen en het begin van de 80-jarige oorlog in de tweede helft van de 16^{e} eeuw, viel het gebruik van de Ledesteen terug. Daarna kregen de eigenaars van de Balegemse groeve problemen met de concurrentie met de groeves uit Oosterzele, Oombergen en Sint-Lievens-Houtem, die samen een bedrijf vormden.

---

[3] Andere oorzaken voor het veelvuldig gebruik van de Doornikse kalksteen, zijn de nabijheid van de Schelde waardoor ze op een efficiënte manier verspreid konden worden en dat Doornik in deze periode economisch en religieus een belangrijk centrum was (De Ceukelaire & Cnudde, 2009).

Met de opkomst van de Barok en het gebruik van de baksteen in de 17e eeuw, wordt het gebruik van de Ledesteen teruggedrongen. Tijdens deze perioden werden de gebruikte Ledestenen steeds kleiner van formaat en ook van een slechtere kwaliteit wat volgens Cnudde et al. (2009) te maken had met het uitgeput raken van de ontginningsmogelijkheden. In deze periode wordt de Ledesteen voornamelijk gebruikt in deur- en vensterposten. Voorbeelden van de Ledesteen uit deze periode zijn te vinden in het Huis van de Gekroonde Hoofden in de Brugstraat te Gent (De Ceukelaire & Cnudde, 2009), het Korenmetershuis uit 1696 (Figuur 7) en andere gebouwen op de Graslei, Korenlei en in de Veldstraat.

Figuur 7: Korenmetershuis. (Figuur van Gent.be, (B))

In de 19e en het begin van de 20e eeuw werden enkele groeven opnieuw geëxploiteerd voor de bouw van neogotische gebouwen en voor restauratie van bestaande gebouwen. In deze periode werd de Ledesteen echter vanwege zijn verweringgevoeligheid meer en meer vervangen door andere witstenen zoals de Brusseliaanse steen, de Gobertange steen en ingevoerde Franse kalkstenen. Tussen 1866 en 1905 worden verschillende groeves geopend of heropend in Balegem, Oosterzele, Gijzenzele, Lede en Bambrugge. Voor de wereldtentoonstelling van 1913 werd het station Gent-Sint-Pieters volledig herbouwd. In het nieuwe station werd er gebruik gemaakt van de Ledesteen voor de afwerking van de vensterposten en de buitenmuren (Figuur 8).

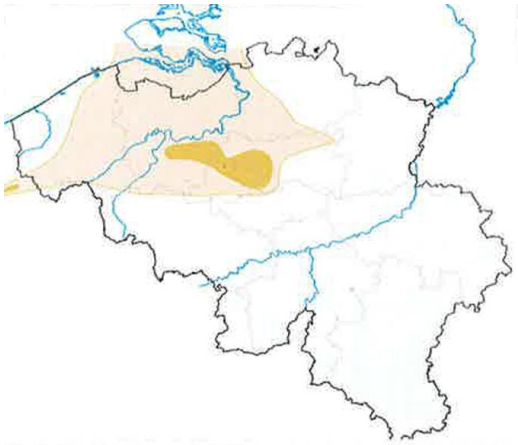
Figuur 8: Station Gent-Sint-Pieters. Vensterposten en buitenmuren met Ledesteen, enkele vervangen door Massangis bij een recente restauratie (Foto: M. De Clercq).

Na de Eerste Wereldoorlog bleef enkel de groeve in Bambrugge open tot 1942. In 1966 heropende de familie Verlee de groeve te Balegem. Initieel werd enkel zand gewonnen, met slechts sporadisch Ledesteen. De groeve is nu nog steeds open en de ontginning van de Ledesteen wint meer en meer aan belang. In 1920 werd er een onderzoek uitgevoerd naar de beschikbaarheid van de Ledesteen. Hieruit bleek dat de Ledesteen op de nog niet ontgonnen plaatsen voornamelijk aan te treffen is onder de watertafel. Dit heeft als gevolg

dat deze steen door ontkalking niet meer te ontginnen is. Het gebruik van de Ledesteen lijkt (ten gevolge van economische moeilijkheden voor ontginning, de uitputting van de lagen en zijn gevoeligheid voor vervorming ten gevolge van luchtvervuiling) in ongebruik te raken voor bouwwerken en restauratie (Gulinck & Hacquaert, 1954).

Vermits de Ledesteen slechts sporadisch ontgonnen werd en gevoelig is voor luchtvervuiling wordt hij niet altijd gebruikt voor restauratie. Voor restauratie worden voornamelijk Franse witte stenen gebruikt. Soms wordt er wel gebruik gemaakt van de Ledesteen, voornamelijk om de authenticiteit van het gebouw te bewaren. Volgens De Ceukelaire & Cnudde (2009) wordt de Ledesteen nu nog gebruikt voor gevels, deurlijsten, vensterbanken en dorpels bij nieuwbouw.

Zoals te zien is op Figuur 9 komt de Ledesteen voornamelijk voor in West- en Oost-Vlaanderen. Ten oosten van de lijn Halle-Brussel-Antwerpen en ten westen van de lijn Leuven-Diest-Geel komt Ledesteen samen met, en meestal ondergeschikt aan, Gobertange steen voor. In Limburg, dat historisch tot de invloedssfeer van de Maastrichtersteen behoort, is de Ledesteen totaal afwezig in het straatbeeld.



Figuur 9: Verspreidingskaart met herkomst en gebruik van de Ledesteen. De donkergele kleur duidt op het herkomst gebied en de lichtgele kleur op het verspreidingsgebied (uit Dusar, Dreesen & De Naeyer, 2009)

2.1.4.1 Ontginning

De ontginning van de Ledesteen heeft voornamelijk plaatsgevonden in openlucht groeves. Tot de 19e eeuw werd er in de regio van Brussel ook Ledesteen ontgonnen via ondergrondse exploitatie (Gulinck en Hacquaert, 1954). Vele van deze openlucht groeves zijn later opgevuld en zijn dus niet meer als dusdanig te herkennen. De Ledesteen werd vroeger op verschillende plaatsen ontgonnen, maar nu slechts in één openlucht groeve, namelijk in de zandgroeve 'Verlee' in Balegem. Tot vrij recent won deze groeve hoofdzakelijk zand van de Formatie van Vlierzele, waarbij de Ledesteen slechts werd opgedolven als nevenproduct. Nu wint de ontginning van de Ledesteen echter aan belang. Van der Kelen (1996) geeft een overzicht van de vroegere ontginningsplaatsen. Deze waren aan te treffen in Affligem, Asse, Balegem, Bambrugge, Erondegem, Etikhove, Geraardsbergen, Gijzenzele, Hekelgem, Impeghem, Kwaremont, Laarne, Landskouter, Lebbeke, Lede, Leupegem, Machelen, Meldert, Merelbeke , Moortsele, Nederbrakel, Nukerke, Oombergen, Oosterzele, Pamel, Scheldewindeke, St.Lievens Houtem, Velzeke en Vlierzele. Volgens Cnudde et al (2009) werd de Ledesteen ook ontgonnen in Aalst en Gijzenzele.

2.1.4.2 Groeve van Balegem

De groeve van Balegem ligt op de flank van een 73 m hoge getuigenheuvel genaamd Berg en is (deels) beschreven door Mourlon (1880) en in een discussie over Eocene stratigrafie, door Fobe in 1989 en door Jacobs en Sevens in 1993. De groeve bevindt zich tussen Gent, Brussel en Ronse en bevat een sectie van ongeveer 17 m, waarin een coupe zichtbaar is van het lid van Vlierzele, de formatie van Lede (± 5) en de Formatie van Maldegem (klei van Asse). De groeve bestaat uit twee delen, een oude in het Noorden en een nu nog actief deel in het zuiden. De Formatie van Lede die in de groeve aangetroffen wordt, behoort tot het Meldert facies (Fobe en Spiers 1992), dat gekenmerkt wordt door kalkhoudende zandsteen lagen die lateraal te vervolgen zijn over verschillende kilometers. In het nu nog actieve deel van de groeve komen slechts twee kalksteenbanken voor. Deze kalkstenen gaan aan de top en basis over van een zeer goed gecementeerd en dicht centraal gedeelte naar zand, via een slecht gecementeerd, brokkelige en poreuze zone.

De onderste steenbank ligt onmiddellijk bovenop en soms ook deels in het basisgrind van de basis van de Formatie van Lede (Fobe 1986). Het gevolg hiervan is dat het onderste deel ervan grove elementen uit het basisgrind bevat, afkomstig van gerodeerde afzettingen van de Formatie van Aalter en Brussel. Zo werd een gedeeltelijk verkiezelde *Nummulites laevigatus* aangetroffen; komen er grove, afgeronde kwartskorrels voor; treft men geremanieerde bivalvenschelpen aan, die meestal gerold zijn en boorgaten vertonen (Fobe, 1986) en zijn er *Cardita planicosta* te vinden die typisch zijn voor de Aalter formatie. Naar boven toe verdwijnen de grove componenten en het gesteente wordt een gewone ongestructureerde packstone. Deze steenbank is echter discontinu en wordt niet aangetroffen in nabij gelegen ontsluitingen zoals bijvoorbeeld in Oosterzele.

De basis van de tweede steenbank bevindt zich ongeveer 50 cm hoger en vertoont een tamelijk conventioneel uitzicht (Fobe, 1989). De steenbank is ook veel beter ontwikkeld en heeft een grote laterale verbreiding. Het gesteente heeft een lichtjes hoger gehalte aan grofkorreligere elementen (grove kwarts korrels, nummulieten, bivalvenfragmenten) en wordt aangetroffen net boven een schelpenlaag. Het gesteente is echter weinig poreus en de epitaxiale randen rond de nummulieten zijn dan ook beperkt gebleven. Het cement is ijzerrijk en vrij fijnkorrelig. Naar boven toe verminderen de grove componenten tot hun normale concentraties.

Volgens Mourlon (1880) en Fobe (1986) bevond er zich in de oude groeve ook een derde laag op ± 2,7m boven de tweede steenlaag. Deze kalksteen bevat eveneens veel schelpen, grind en nummulieten en is te correleren met de bovenste schelpenmergelbank in de nu actieve groeve.

2.1.4.3 Reserves

De vraag of er nog voldoende Ledesteen ter beschikking is, maakt deel uit van de probleemstelling die aanleiding geeft tot deze thesis. Op dit moment is de firma Balegro BVBA de enige die een voorraad Ledesteen ter beschikking heeft en deze verder ontgint. In principe zijn er op andere plaatsen nog volumes Ledesteen in de ondergrond aanwezig, maar om een idee te krijgen van de hoeveelheden bruikbare Ledesteen is een diepgaand onderzoek nodig. Verder moet er een geschikte ontginningsplaats gevonden worden, wat inhoudt dat de Ledesteen er een goede kwaliteit moet hebben en dat deze daar mag en kan ontgonnen worden.

2.2 Verwering

Verwering is het natuurlijke, complexe en continue proces waardoor een steen veranderingen ondergaat ten gevolge van de inwerking van externe krachten uit zijn omgeving. Verweringsprocessen kunnen onderverdeeld worden in mechanische, chemische en biologische verwering, dewelke, na verloop van tijd, allen zorgen voor een desintegratie van de steen. Deze desintegratie is afhankelijk van zowel de eigenschappen van de steen (= intrinsieke factoren) als van de eigenschappen van de omgeving (= extrinsieke factoren). Onder de intrinsieke factoren van een steen vallen, onder andere, de aard en graad van cementatie, de porositeit, de permeabiliteit, de mineralogische samenstelling en de fysische eigenschappen. Extrinsieke factoren duiden op het klimaat, water, temperatuurschommelingen, luchtvervuiling.

Onder mechanische verwering (= fysische verwering) vallen processen die leiden tot het uiteenvallen van de steen onder invloed van externe krachten waarbij er geen chemische of mineralogische veranderingen optreden. Mechanische verwering kan het gevolg zijn van thermische schok en vorst-dooi cycli, of chemische of biologische processen (haloklastie, groeien van wortels en takken, etc.)

Chemische verwering van stenen zorgt voor het ontbinden, oplossen of loskomen van gesteente fragmenten door chemische reacties. Hierbij wordt de samenstelling van de steen aangepast ten gevolge van de interactie van het gesteente met aanwezige vloeistoffen en gassen. Chemische verwering vindt plaats in bijna elk type gesteente, maar zal sneller optreden bij een groter vrijstaand contactoppervlak, bij een hogere temperatuur en in vochtige omstandigheden. Mogelijke vormen van chemische verwering zijn oplossing, kristallisatie en oxidatie.

Biologische verwering (organogene verwering) leidt tot de desintegratie van een steen ten gevolge van de werking van organismen. Biologische verwering kan zowel mechanisch als chemisch zorgen voor degradatie (Quirk et al., 2014, Cochran & Berner, 1995, etc.).

2.2.1 Verwering van Ledesteen

Vanwege de sterke kwaliteitsverschillen binnen de Ledesteen is het moeilijk om veel algemene uitspraken te doen over de verweringsgevoeligheid. Volgens Dusar, Dreesen & De Naeyer (2009) kan er echter wel gesteld worden dat Ledesteen in onverweerde toestand niet vorstgevoelig is. Verwering ten gevolge van vorst-dooi cycli (gelifractie) is het gevolg van het bevriezen en uitzetten van water (9% volume toename) in de poriën van een steen of van krimp. Hierdoor zullen de gevormde ijskristallen en het nog niet bevroren water, dat samengeperst wordt door het gevormde ijs, een druk uitoefenen op de poriewanden (Birot et al., 1962). De vorstgevoeligheid van een steen is niet enkel afhankelijk van de watersaturatie maar ook van de grootte en connectiviteit van de poriën. Een hogere permeabiliteit, gevormd door een hogere connectiviteit tussen de poriën, zal dus aanleiding geven tot een verlaagde vorstgevoeligheid. Verder heeft het klimaat een invloed doordat de vorstgevoeligheid van een steen groter is in klimaten met winters waar er meerdere vorstdooi cycli optreden dan in klimaten met continue koude winters met slechts enkele vorstdooi cycli.

Verwering ten gevolge van oxidatie van de minerale bestanddelen van een steen vindt plaats door de interactie van een mineraal met zuurstof, aanwezig in de atmosfeer of opgelost in

water. Een veel voorkomend oxidatieproces is de oxidatie van Fe^{2+} naar Fe^{3+} , waarbij er mogelijks roestplekken gevormd worden in ijzerhoudende stenen (Birot et al., 1962). Een voor de Ledesteen belangrijk oxidatieproces is de oxidatie van glauconiet. De oorzaak van de oxidatie is te vinden in het ontstaan van mineraal fasen in reducerende milieus, ten gevolge van de ontginning en hierop volgende blootstelling aan oppervlakte condities (lucht en water). Hierdoor zullen de mineralen in een oxiderend milieu terechtkomen en beginnen te oxideren. Voor oude monumenten die lang zijn blootgesteld aan de atmosfeer zal de verwering van de Ledesteen, ten gevolge van de oxidatie van ijzerhoudende mineralen (glauconiet, pyriet en gesubstitueerde ijzerhoudend calciet), zorgen voor een beige tot bruine patina, ter vervanging van de oorspronkelijk bleke en lichtgrijze kleur (Fobe, 1990). Deze verwering vangt aan vanaf het moment van ontginning en zorgt verder niet voor structurele schade. Het patina vormt zich op de blootgestelde buitenwanden van de steen en zal zelf dienen als bescherming (Dusar, Dreesen & De Naeyer, 2009).

Tevens is de Ledesteen ook zeer gevoelig voor verwering in een vervuilde atmosfeer (zure regen). Zure regen is het gevolg van de aanwezigheid van, onder andere, opgelost diwaterstofcarbonaat (H_2CO_3) en zwavelzuur (H_2SO_4) in regenwater (Camerman, 1945). Dit zal leiden tot zowel carbonatie en sulfatatie, met desintegratie van een steen tot gevolg.

- Carbonatie is het proces waarbij koolstofdioxide (CO_2) uit de atmosfeer oplost in water en diwaterstofcarbonaat (H_2CO_3) vormt. Wanneer dit water vervolgens in contact komt met een kalkhoudend gesteente zal het opgeloste koolzuur reageren met het calciumcarbonaat uit de kalkstenen met de vorming van calciumbicarbonaat ($Ca(HCO_3)_2$) als gevolg. Vermits calciumbicarbonaat oplosbaar is in water zal er na oplossing een holte achterblijven op de plaats van het oorspronkelijke calciumcarbonaat, met verzwakking van de steen tot gevolg.
- Sulfatatie is het proces waarbij zwaveldioxide (SO_2) uit de atmosfeer oplost in water en zwavelzuur (H_2SO_4) vormt. Dit zal reageren met calciumcarbonaat ($CaCO_3$) in een gesteente met de vorming van gips ($CaSO_4.2H_2O$) als gevolg. Dit gips blijft in oplossing totdat het water verdampt. Het verdampen van water vindt voornamelijk plaats aan het oppervlak, wat zal zorgen voor de afzetting van gipskorsten. Indien het steenoppervlak regelmatig blootgesteld wordt aan neerslag zal deze gipskorst oplossen, waardoor de vorming van een nieuwe gipskorst mogelijk wordt. Indien dit proces zich meerdere malen herhaalt, zal dit leiden tot het intern verzwakken en desintegreren van het steenoppervlak. Een verder nadeel van de vorming van gipskorsten is dat ze vaak stofdeeltjes opnemen uit de lucht, waardoor ze een donker tot zwarte kleur verkrijgen en dus esthetische schade aanbrengen. Indien gips niet aan het oppervlak wordt afgezet (maar wel intern) dan zullen de gipskristallen een druk uitoefenen in de poriën. De Ledesteen is volgens Fobe (1990) bijzonder gevoelig voor de vorming van gips in de contacten tussen het calciet cement en de kwarts- en glauconietkorrels

Ten gevolge van de toename van verbranding van fossiele brandstoffen sinds de industriële revolutie, is de hoeveelheid zwavel in de atmosfeer sinds de 19^{e} eeuw sterk toegenomen. Door deze toename is de verwering van kalkstenen en kalkhoudende zandstenen door carbonatie en sulfatatie versterkt (Camerman, 1957) waardoor deze steeds vaker moeten gerestaureerd worden. Volgens Smith et al. (2004) zal de uitstoot van SO_2 rond 1980 een piek vertonen waarna deze zal afnemen. Dit resulteert in het afnemen van de verwering door sulfatatie, waardoor een gunstigere omgeving ontstaat voor de Ledesteen.

Onbeschutte Ledesteen vertoont alveolaire uitholling, kan aangetast worden door graafwespen en gaat sterk verzanden (Dusar, Dreesen & De Naeyer, 2009). Ten gevolge van fysische verwering, zal een steen, die bijvoorbeeld blootgesteld is aan afstromend regenwater, een meelzakvorm bekomen, waarbij partikels bestaande uit meer kristallijn calciet in het reliëf kunnen staan en de randen van de steen afgerond worden (Dusar, Dreesen & De Naeyer, 2009).

2.3 Restauratie

2.3.1 Restauratie principes

Elke restauratie van een monument of gebouw wordt uitgevoerd volgens een aantal richtlijnen en principes. Deze richtlijnen werden doorheen de recente geschiedenis (vanaf het begin van de twintigste eeuw) opgetekend in verschillende documenten. Enkele van deze documenten zijn het Charter van Athene, het Charter van Venetië, de Verklaring van Amsterdam en het *Nara document of authenticity*, waarvan het Charter van Venetië en het Nara document als belangrijkste beschouwd worden.

2.3.1.1 Charter van Venetië

In 1964 werd tijdens het *2nd international congress of architects and technicians of historic monuments* het Charter van Venetië opgesteld. Dit document bestaat uit 16 artikels, dewelke richtlijnen vormen voor het behoud en de restauratie van monumenten en historische steden (Beyen, 2007). Het document is wereldwijd het meest gerefereerde document op vlak van monumentenzorg.

2.3.1.2 Nara Document on Authenticity

Het *Nara Document on Authenticity* is opgesteld in 1994 te Nara in Japan. Het *Nara Document on Authenticity* bestaat uit dertien artikels en vestigt voornamelijk de aandacht op het begrip authenticiteit, als belangrijkste factor in de beoordeling van een monument. Hiermee geeft het document een antwoord op de globalisering van onze samenleving, de grote verscheidenheid van culturen en de nood aan respect voor de culturele waarden van alle gemeenschappen (Beyen, 2007). Authenticiteit moet, volgens het *Nara Document on Authenticity*, zeer ruim beschouwd worden en richt hierbij voornamelijk de aandacht op tradities, het geestelijke en intuïtie, waaraan vooral belang wordt gehecht in niet-westerse monumentenzorg. Authenticiteit kan hierbij beschouwd worden in de zin van vorm en ontwerp, materiaal, functie, tradities en technieken, belevings- en gevoelswaarden, locatie en setting, geest en gevoel, en andere interne en externe factoren.

2.3.2 Concepten

Hoewel dit niet altijd mogelijk is, is er zeer lang gebruik gemaakt van het principe reversibiliteit bij het uitvoeren van een restauratie. Dit begrip is geïntroduceerd in de monumentenzorg in de jaren zestig, ten gevolge van de introductie van synthetische hydrofobeermiddelen en steenverstevigers (Quist, 2011). Reversibiliteit houdt in dat een toegepaste techniek geen verdere (negatieve) gevolgen mag hebben op toekomstige behandelingen zodat er in de toekomst de meeste keuze is gelaten voor verdere behandelingen of voor de correctie van onverwachte resultaten. Later kan blijken dat een restauratie gebaseerd was op verkeerde keuzes en/of dat latere generaties de restauratie

niet met dezelfde zienswijze benaderen waardoor er dus gestreefd moet worden naar restauratietechnieken die indien nodig volledig ongedaan kunnen worden.

Vermits vele processen echter niet (helemaal) reversibel zijn, werd ook het begrip compatibiliteit geïntroduceerd. Volgens Teutonico et al. (1997) betekent dit dat een uitgevoerde techniek of behandeling geen negatieve gevolgen mag hebben op het behandelde materiaal. Dit houdt niet alleen in dat een behandeling mechanisch, fysisch en chemisch compatibel moet zijn met het historische materiaal, maar ook dat die moet passen in een esthetisch opzicht. Volgens Van Balen et al. (2005) wordt compatibiliteit gedefinieerd als de mate waarin een materiaal, techniek of bewerking passend is voor de situatie waarin deze wordt gebruikt, in die zin dat de behandeling niet leidt tot schade of dat het de kans op schade vergroot. Bij mechanische compatibiliteit wordt er tevens ook gebruik gemaakt van het 'zelfopofferend principe'. Dit betekent dat het materiaal gebruikt voor een restauratie, bv. een mortel, zwakker moet zijn dan het historische materiaal, zodat de toevoeging preferentieel zou verweren en zelfs, in sommige gevallen, het historische materiaal kan beschermen.

Bij het toepassen van restauratiemortels moet er dus gezocht worden naar een mortel die een grote compatibiliteit heeft met het te herstellen materiaal. Volgens Van Balen et al. (2005) wil dit zeggen dat de mortel op een gelijkaardige manier moet reageren als het te restaureren materiaal in functie van de volgende eigenschappen: lange termijn resistentie, duurzaamheid en harmonisatie. Om dit te kunnen bepalen moeten de verschillende eigenschappen van de mortel en het te restaureren materiaal bepaald worden. Deze eigenschappen moeten voldoen aan een aantal functionele en technische vereisten.

2.3.3 Functionele vereisten

Bij het ontwerpen van een compatibele mortel moet er rekening gehouden worden met de functie die deze mortel zal moeten uitoefenen. De belangrijkste functionele eigenschappen van restauratiemortels zijn, naar analogie met voegmortels volgens Van Balen et al. (2005):

- Het voorkomen van waterpenetratie
- Het weerstaan van verschillende invloeden uit de omgeving en het beschermen van de gebruiker van het gebouw tegen negatieve effecten
- Bijdragen aan het esthetische uitzicht

2.3.4 Technische vereisten

Om aan de functionele vereisten van de mortel te kunnen voldoen, moeten deze eerst omgezet worden in technische vereisten. Hiermee is het mogelijk de technische eigenschappen van de mortel weer te geven in numerieke waarden, waarmee het eenvoudiger wordt de mortel te evalueren. Deze eigenschappen moeten vervolgens compatibel zijn met de te restaureren steen. Vermits stenen onderhevig kunnen zijn aan verschillende soorten en graden van verwering en vrij heterogeen kunnen zijn, is het mogelijk dat er een grote variatie in de eigenschappen van de stenen aan te treffen is. Hierdoor is het mogelijk dat één type mortel niet volstaat en dat deze moet kunnen aangepast worden afhankelijk van de eigenschappen van de steen. Indien dit niet gedaan wordt is het mogelijk dat de mortel incompatibel is met de steen, met als mogelijke gevolg dat het de steen zal beschadigen. Bij het vinden van een compatibele restauratiemortel

wordt er niet enkel gekeken naar de eigenschappen die een invloed hebben op de duurzaamheid. Het is ook belangrijk om rekening te houden met visuele aspecten van de mortel om deze als compatibel te beschouwen. Hierbij is het belangrijk om op te merken dat de kleur van een gesteente niet enkel kan variëren van steen tot steen maar ook in de tijd, ten gevolge van verwering. Bij het ontwikkelen van een restauratiemortel moet hiermee dus ook rekening gehouden worden.

De belangrijkste technische eigenschappen voor de evaluatie van de compatibiliteit van een mortel zijn volgens Van Balen et al. (2005):

- Oppervlakte kenmerken
    - Kleur
    - Textuur
    - Oppervlakte afwerking
- Samenstelling
    - Type bindmiddel
    - Type aggregaten
    - Korrelgrootte verdeling
- Sterkte
    - Druksterkte
    - Buigsterkte
    - Hechtsterkte
- Elasticiteit
    - Elasticiteitsmodulus
    - Vervormbaarheid
- Porositeit
    - Totale porositeit
    - Poriegrootte verdeling
    - Hygrische eigenschappen
- Thermische uitzetting
- Andere
    - Gehalte aan oplosbare zouten
    - Weerstand tegen vries/dooi cycli
    - Verwerkbaarheid
    - Uithardingsomstandigheden
    - Goede aanbrenging
    - Goede kwaliteitscontrole

Het bepalen van de duurzaamheid van een mortel vindt ook plaats aan de hand van zijn technische eigenschappen. Volgens Isebaert et al.(2014) zijn het vooral de mechanische en fysische aspecten (zoals de watertransporteigenschappen, elasticiteitsmodulus, vervormbaarheid, bindingssterkte en adhesie, thermische uitzetting, …) die een grote invloed hebben op de duurzaamheid.

2.4 Restauratie methodes

2.4.1 Oppervlaktebehandelingen

Onder oppervlakte behandelingen vallen het reinigen, verharden, kleuren van een steen en het aanbrengen van een biocide of een waterwerende stof. Deze behandelingen kunnen zowel preventief als curatief gebruikt worden bij restauratie. Meestal zijn deze technieken niet ontwikkeld om gebruikt te worden op elk gevelelement, waardoor ze mogelijks niet geschikt zijn om in bepaalde gevallen toe te passen zonder ongewenste effecten te hebben op natuursteen (Vanhellemont, Van Peer & Vernimme, z. j.).

2.4.2 Herstelmortel

Wanneer een steen te sterk beschadigd is om behandeld te worden met enkel een oppervlaktebehandeling, maar toch voldoende sterk is om een volledige vervanging te vermijden, kan er gerestaureerd worden met mortels. Mortels zijn meestal opgebouwd uit een bindmiddel vermengd met een aggregaat, waarbij eventueel een toeslagmiddel kan toegevoegd worden. Het toevoegen van aggregaten is bij het gebruik van minerale bindmiddelen noodzakelijk om de vorming van barsten bij het drogen te verminderen en om de mortel een zekere hardheid, sterkte en porositeit te verlenen (Elert et al., 2002). De samenstelling van een mortel wordt weergegeven in een mortelrecept. Dit bevat de bestanddelen en in welke verhouding ze gebruikt moeten worden. Traditioneel worden deze verhoudingen uitgedrukt in volumeverhoudingen (Van Balen et al., 2003). Voor restauratiewerk kan er echter geen gebruik gemaakt worden van vaste recepten, dit vanwege de noodzaak de mortel aan te passen aan verschillende situaties. De factoren die aangepast kunnen worden voor de optimalisatie van de mortel zijn de bindmiddel/aggregaat verhouding (B/Ag), de water/bindmiddel verhouding (W/B), de uithardingcondities en de mengmethode.

Het gebruik van een mortel komt veelvuldig voor. Dit komt voornamelijk doordat het uitzicht en de eigenschappen van een mortel aangepast kunnen worden om meer te lijken op de herstelde steen en doordat het aanbrengen van een restauratiemortel vaak goedkoper is dan het volledig vervangen een steen. De mogelijkheid om een mortel aan te passen zorgt ervoor dat de originele steen in het kader van authenticiteit bewaard kan worden. Een mortel is aan te passen door middel van verschillende korrelgrootte fracties, verschillende aggregaten en verschillende kleurstoffen te gebruiken. Een mortel kan *in situ* aangebracht worden en zal zich vasthechten aan de steen door zijn eigen adhesie (Griswold,1998). Het gebruik van een restauratie mortel moet voldoen aan de richtlijnen voor restauratie, vastgelegd in het Charter van Venetië en het Nara document (zoals besproken in 2.3). Een mortel moet 'technisch compatibel' zijn met de steen, wat inhoud dat de mortel een vergelijkbare hardheid moet hebben als de steen (maar wel minder hard moet zijn volgens het zelfopofferend principe). Verder mag de mortel de steen niet aantasten en moet het aanbrengen van de mortel een omkeerbaar proces zijn.

De verschillende mortels die gebruikt worden bij de herstelling van een steen kunnen opgedeeld worden in groepen op basis van hun bindmiddel. Afhankelijk van de auteur zijn ze op te delen in verschillende groepen (Isebaert, Van Parys & Cnudde, 2014). Een overzicht van de, volgens De Naeyer (2002), verschillende morteltypes wordt hieronder gegeven.

2.4.2.1 Chemische mortels

Chemische mortels zijn mortels die bestaan uit twee componenten, een zinkchloride vloeistof (ZnCl) enerzijds en een aggregaat met een zinkoxide coating anderzijds. Het grote voordeel van deze mortels is dat deze zeer snel uitharden. De chemische mortels hebben echter ook een grote hardheid wat voor problemen kan zorgen voor de compatibiliteit en reversibiliteit bij het restaureren van zachtere gesteenten.

2.4.2.2 Mortels met hars

Mortels met hars maken gebruik van organische stoffen zoals epoxy of acrylische stoffen als bindmiddel. Hierdoor bezitten ze een sterk afwijkende samenstelling en zullen ze anders verweren dan het gesteente waarop ze aangebracht zijn. Bovendien zorgt het gebruik van hars ervoor dat de onderliggende steen niet meer kan 'ademen', waardoor vocht zich begint op te stapelen, wat kan zorgen voor versnelde verwering.

2.4.2.3 Minerale mortels

Isebaert, Van Parys & Cnudde (2014) hanteren verder de volgende onderverdeling voor minerale mortels: mortels met luchthardende kalk, mortels met natuurlijke hydraulische kalk, mortels met natuurlijk cement, mortels met portlandcement en mortels met een mengesel van kalk en cement. De verschillende morteltypes worden kort besproken in 2.5. Deze mortels harden uit in 2 fasen. Een eerste verharding is het gevolg van het uitdrogen van de mortel ten gevolge van verdamping en absorptie door omliggende steen. Het uitdrogen zal aanleiding geven tot het verstarren van de mortel, als gevolg van het herschikken van de kalkdeeltjes (compactie). De tweede fase van uitharding is het gevolg van chemische reacties waarbij het bindmiddel zal uitharden ten gevolge van carbonatatie in het geval van mortels met luchthardende kalk of een combinatie van carbonatatie en hydratatie voor mortels met een hydraulische component.

2.4.3 <u>Vervanging</u>

Indien een steen te sterk verweerd is om hersteld te worden, wordt er geopteerd voor een vervanging van de verweerde steen door een andere. Vervanging houdt in dat een (stuk) steen, in een structuur geplaatst wordt ter compensatie van een geheel of gedeeltelijk verlies van de oorspronkelijke steen (Griswold, 1998). De nieuwe steen kan van dezelfde soort zijn als de steen die hij vervangt (*"in-kind"*), maar er kan ook gekozen worden voor een andere gelijkaardige steen *("near-kind"*), of zelfs kunststeen.

2.4.3.1 Vervanging van de Ledesteen

De Ledesteen kan vervangen worden door andere Ledesteen, maar, wegens het geringe aantal beschikbare stenen, wordt er echter geopteerd voor andere steensoorten, meestal Franse kalkstenen. Tot halverwege de negentiende eeuw werd de Ledesteen vaak gerestaureerd door hem te vervangen met de blekere Gobertange steen (Goossens et al., 2008) en de Brusseliaanse steen (De Ceukelaire & Cnudde, 2009). Ten gevolge van het uitbouwen van het spoornetwerk, werd het vanaf het midden van de 19^{e} eeuw eenvoudiger om grote en zware materialen te transporteren van en naar België (Dusar & Nijland, 2011). Volgens Camerman (1957) en Goossens *et al.* (2008) resulteerde dit in een massale invoer van buitenlandse steensoorten waaronder verschillende soorten Franse kalkstenen, voornamelijk Euville, Savonnières en Massangis. Op het einde van de 19e eeuw en begin van

de 20e werd in Nederland en in mindere mate ook in België de bleke kalksteen van St.-Joire of Reffroy en de oölitische Savonnière bij zeer veel restauraties van de Ledesteen toegepast (Quist, 2012). Het grootschalige gebruik van Franse witstenen is ook deels het gevolg van de grote invloed van de Franse (Parijse) architecten op de Belgische. De Savonnière steen werd voornamelijk tussen 1850 en 1925 toegepast, waarna er tussen 1870 tot 1910 vooral Euville steen toegepast werd.

Vanaf halverwege de 20e eeuw wordt voornamelijk de Franse Massangis (en Vaurion) steen gebruikt bij de vervanging van de Ledesteen en zijn vervangstenen. Volgens Breda (2005) werd de Massangis steen echter te vaak gebruikt, waarbij er vaak onnodig stenen werden vervangen. Dit leidde ertoe dat Breda (2005) de term '*Massanginitis*' gebruikte om te gebruiken voor 'het ondoordacht vervangen van vaak slechts oppervlakkig verweerd origineel steenmateriaal met niet zelden een Frans product dat op dat moment in "aanbieding" staat'.

Quist (2012) stelt dat er een recente toename is in het gebruik van de Gobertange steen en de Ledesteen voor de restauratie van authentieke zandige kalkstenen en sterk verweerde vervangstenen. Overige buitenlandse natuurstenen die gebruikt zijn ter vervanging van de Ledesteen zijn de *Braunbank* van de Muschelkalk uit Duitsland, de Portlandsteen uit Engeland en de Azul Bateig uit Spanje (Cnudde *et al*., 2009 en Quist, 2012).

2.5 Kalkmortels

2.5.1 Carbonatatie en hydratatie

Zoals reeds vermeld bij Minerale mortels zullen kalkmortels uitharden in twee fasen, waarbij de tweede fase het gevolg is van chemische reacties, meer bepaald carbonatatie en hydratatie.

2.5.1.1 Carbonatatie

Carbonatatie is de chemische reactie waarbij kalkhydraat (portlandiet of $Ca(OH)_2$) reageert met koolzuurgas (CO_2) met de vorming van calciumcarbonaat ($CaCO_3$) (Vergelijking 1). Het gevolg van carbonatatie is dat de vorming van calciumcarbonaat gepaard gaat met een massa en volumetoename van respectievelijk 35 % en 11,8 %. Het carbonatatieproces is volgens Van Balen et al. (2003) op te splitsen in twee fasen. De eerste fase is weergegeven in Vergelijking 2 en leidt tot de vorming van koolzuur, wat in de tweede fase zal reageren met het portlandiet volgens Vergelijking 3

Vergelijking 1: Carbonatatie reactie

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$$

Vergelijking 2: Vorming van koolzuur

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

Vergelijking 3: Vorming van calciumcarbonaat

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$$

Carbonatatie is een exotherme reactie, die meestal traag zal verlopen ten gevolge van de trage diffusie van koolzuurgas uit de lucht in de poriënstructuur (Van Balen et al., 2003 en Lawrence et al., 2007). De snelheid van carbonatatie is zeer afhankelijk van de vochtigheid

van de mortel en zal pas echt beginnen uitharden als de mortel het grootste deel van zijn vocht verloren heeft. Dit komt doordat de diffusie van koolzuurgas in water veel trager verloopt dan de diffusie in de lucht (Van Balen & Van Gemert, 1994). De volledige afwezigheid van water is echter ook niet aangeraden vermits water nodig is voor de vorming van koolzuur (Vergelijking 2). De ideale vochtigheid is die waarbij er een maximale adsorptie optreedt van water aan de poriën voordat capillaire condensatie optreedt (Van Balen & Van Gemert, 1994).

Andere bepalende factoren voor de snelheid van de carbonatatie zijn de temperatuur, de permeabiliteit en de CO_2 concentratie. Volgens Moorehead (1986) zal de carbonatatiesnelheid toenemen bij hogere CO_2 concentraties, maar bij het gebruik van 100 % CO_2 gas zal de hitte ontwikkeling door het exotherme karakter van het proces aanleiding geven tot het vroegtijdige drogen van de mortel, wat zal zorgen voor het stopzetten van de carbonatatie reactie. De optimale temperatuur voor carbonatatie ligt volgens (Elert et al., 2002) rond de 20 °C. Hoewel chemische reactie sneller zal optreden aan hogere temperaturen, zal de oplosbaarheid van CO_2 en gehydrateerde kalk afnemen.

2.5.1.2 Hydratatie

Hydratatie zal zorgen voor het verstarren en uitharden van een mortel ten gevolge van het in contact komen van calciumsilicaten en andere oxiden in hydraulische bindmiddelen met water (Van Balen et al., 2003). Hydraulische bindmiddelen die voornamelijk uit dicalciumsilicaten bestaan (natuurlijk hydraulische kalk) reageren trager dan bindmiddelen die uit dicalciumsilicaten en tricalciumsilicaten bestaan (Portlandcement).

$CaO{\cdot}SiO_2$ zal samen met $CaO{\cdot}Al_2O_3$ leiden tot de verharding van een mortel door te reageren met water (Vergelijking 4, Vergelijking 5 en Vergelijking 6). Het aanwezige $Ca(OH)_2$ zal mogelijk reageren met reactieve silicium-, aluminium- of ijzerverbindingen maar het merendeel zal bijdragen tot het verharden van de mortel door middel van carbonatatie. Zoals reeds vermeld bij Carbonatatie zal de omzetting van kalkhydraat naar kalk niet optreden zolang er veel water aanwezig is. De aanwezigheid van water is echter wel vereist voor de hydratatiereactie. Wanneer er geen water aanwezig is, wordt de mortel verbrand, wat leidt tot een verminderde samenhang, waardoor de hydratatie reactie minder goed of helemaal niet meer zal optreden bij het nadien bevochtigen.

Vergelijking 4: Hydratatie reactie van tricalciumsilicaat.

$$2\ (3\ CaO \cdot SiO_2) + 6\ H_2O \rightarrow 3\ CaO \cdot SiO_2 \cdot 3\ H_2O + Ca(OH)_2$$

Vergelijking 5: Hydratatie reactie van dicalciumsilicaat.

$$2\ (2\ CaO \cdot SiO_2) + 4\ H_2O \rightarrow 3\ CaO \cdot SiO_2 \cdot 3\ H_2O + Ca(OH)_2$$

Vergelijking 6: Hydratatie reacie van tricalcium-aluminaat.

$$3\ CaO \cdot Al_2O_3 + 6\ H_2O \rightarrow 3\ CaO \cdot 2\ Al_2O_3 \cdot 6\ H_2O$$

Volgens Elert et al. (2002) hebben vele wetenschappers studies uitgevoerd naar de invloed van verschillende parameters op hydratatie (zoals water/kalk verhouding en temperatuur). Ze stelden echter vast dat verschillende bekomen resultaten tegenstrijdig waren met elkaar, mogelijk ten gevolge van een verschil in kwaliteit van de kalk, in experimentele set-up en/of in de controle van de verschillende parameters.

2.5.2 Mortels met luchthardende kalk

Het bindmiddel bij luchthardende kalkmortels bestaat enkel uit portlandiet ($Ca(OH)_2$). Zuivere luchthardende kalk wordt gevormd door het branden van zuivere kalksteen of schelpen. Hierbij wordt $CaCO_3$ omgezet naar ongebluste kalk (CaO), dat vervolgens door het blussen van de kalk omgezet wordt naar portlandiet. Luchthardende kalk zal uitharden door middel van carbonatatie. Vermits de opname van CO_2 slechts aan het oppervlak kan plaatsvinden, zullen luchthardende mortels niet over hun gehele massa uitharden, met als gevolg dat deze langzamer en meestal onvolledig zullen uitharden. In contact met water zal portlandiet volgens Torraca (2009) reageren, met een vormverandering van hexagonale prismatische kristallen naar dunne hexagonale platen. Luchthardende mortels zijn soms onderhevig aan de vorming van barsten, dit ten gevolge van het hogere benodigde watergehalte (om een goede verwerkbaarheid te bekomen) en de trage carbonatatie. Mortels met luchthardende kalk beschikken meestal over een groot porienetwerk, een lage dichtheid en een lage druksterkte.

2.5.3 Mortels met natuurlijke hydraulische kalk (NHL)

Het bindmiddel van mortels met natuurlijke hydraulische kalk bestaat uit een combinatie van portlandiet en calcium-silicaat-hydrataten. Om een hydraulische kalk te bekomen moet de gebrande kalksteen vrij rijk zijn aan kleien (9 – 12 %) (Van Balen et al*.,* 2003). Volgens Van Balen et al. (2003) bestaat een hydraulische kalk voornamelijk uit $CaO{\cdot}SiO_2$ en $Ca(OH)_2$. De onderlinge verhouding tussen deze bestanddelen bepaalt het hydraulisch gedrag van de kalk. Hoe meer $CaO{\cdot}SiO_2$ er aanwezig is, hoe sterker hydraulisch de kalk zal zijn. Op basis van zijn hydraulische sterkte wordt NHL ingedeeld in NHL 2 (zwak), NHL 3,5 en NHL 5 (sterk). Doordat er twee soorten bindmiddel aanwezig zijn, zullen deze mortels verharden door middel van twee reacties. De eerste reactie die plaatsvindt is hydratatie, met de vorming van een calcium-silicaat-hydrataat (C-H-S), waarna er carbonatatie optreedt net als bij luchthardende kalk. Het portlandiet zal verder ook het C-H-S opsplitsen in calciet en amorf silica. De belangrijkste reactieve component van hydraulische kalk is (in verkorte termen uit de mortel technologie) C_2S (dicalciumsilicaat of $2CaO{\cdot}SiO_2$) hetwelk veel sneller reageert dan portlandiet. Dit heeft als gevolg dat hydraulische kalk veel sneller zal uitharden dan luchthardende kalk (Van Balen et al., 2003).

Volgens de classificatie van EN 459-1 (2010) Bouwkalk – Deel 1: Definities, specificaties en conformiteitscriteria, is de definitie van een natuurlijke hydraulische kalk, kalk zonder additieven, met hydraulische eigenschappen, gemaakt door kalksteen te branden zonder temperaturen van 800-1200 °C te bereiken. Volgens Van Balen et al. (2003) is deze definitie echter onvoldoende genuanceerd. Ze stellen dat er niet voldoende onderscheid is gemaakt tussen de verschillende soorten hydraulische verbindingen, welke gebruikt worden om een onderscheid te maken tussen hydraulische kalk en cement. Mortels met natuurlijke hydraulische kalk bezitten een groot verbonden porienetwerk, met een hoge waterdampdoorlatendheid en permeabiliteit. Dit porienetwerk zal zorgen dat deze mortels een lage druk en buigsterkte hebben (Cizer et al., 2008). Ten gevolge van de aanwezigheid van portlandiet zullen de mortels echter wel beter plastisch vervormen. Door de aanwezigheid van C-S-H zullen de mortels een snellere en bovendien ook hogere resistentie vertonen in vergelijking met luchthardende mortels.

2.5.4 Mortels met natuurlijk cement

Natuurlijk cement bestaat uit natuurlijk materiaal, waarvan de samenstelling sterk kan verschillen. Na uitharding zal het bindmiddel van deze mortel voornamelijk bestaan uit calcium-silicaat-hydraat, gevolgd door calcium aluminium hydraat en deels gecarbonateerde gehydrateerde calcium aluminium fasen. De structuur van het porienetwerk is sterk afhankelijk van de water/bindmiddel ratio en de uitharding periode (Klisinska-Kopacz et al., 2010). In het algemeen kan echter wel gesteld worden dat deze mortels een hoge porositeit hebben en een vrij hoge druksterkte (10-25 MPa).

2.5.5 Mortels met portlandcement

Portlandcement wordt bekomen door kalksteen met een hoog kleigehalte te branden aan temperaturen hoger dan 1200 °C (1450 °C voor grijze portlandcement en 1600 °C voor wit portland cement) (Van Balen et al., 2003). Portland cement is voornamelijk opgebouwd uit C3S (tricalciumsilicaat of 3CaO·SiO2) en C3A (tricalciumalluminaat of 3CaO·Al2O3), die beide sneller uitharden dan C2S. Om het carbonatatie proces te vertragen zal portlandcement altijd gips (CaSO4·2 H2O) bevatten (Isebaert, Van Parys & Cnudde, 2014 en Van Balen et al., 2003). Dit gips zal reageren met een deel van het portlandcement met de vorming van primair ettringiet, wat later zal reageren met calcium aluminium hydraten met de vorming van calcium aluminium sulfaten. De porositeit en permeabiliteit van deze mortels is vrij laag en de druk- en buigsterkte is hoog. Cement ondergaat ook carbonatatie, waarbij $CaCO_2$ calcium houdende bestanddelen omzet naar calciet en de silicaat en aluminium houdende bestanddelen naar amorf silica en alumina (Torraca, 2009).

2.5.6 Gemengde kalk en cement mortels

Deze mortels harden uit ten gevolge van hydratatie van cement en carbonatatie van portlandiet. Volgens Mosquera et al. (2006) hebben deze mortels een poriegrootte en waterdamp diffusiviteit die vergelijkbaar is met die van hydraulische kalk (NHL 3,5). Indien deze mortels een hoger gehalte aan cement zouden bevatten, zal de porositeit afnemen en indien ze een hoger kalkgehalte hebben zal de porositeit toenemen (Cizer et al., 2008). Ten gevolge van het toevoegen van kalk aan cement bekomen de resulterende mortels een betere verwerkbaarheid, wat zorgt voor een grotere waterdichtheid.

2.6 Aggregaat

Zoals reeds vermeld, is een mortel meestal opgebouwd uit een bindmiddel en een aggregaat, waarbij eventueel een toeslagmiddel kan toegevoegd worden. Een aggregaat is meestal een inert materiaal, dat dus niet zal reageren met het bindmiddel. Het aggregaat fungeert hierbij als vulmiddel, waardoor minder bindmiddel nodig is, en eveneens voorkomt dat de mortel zeer sterk zal krimpen, met vermindering van scheurvorming tot gevolg (Van Balen et al., 2003 en Elert et al., 2002). Een aggregaat zal hierbij de mortel beïnvloeden door middel van het type materiaal (mineralogische samenstelling, porositeit, sterkte,…) en door middel van de korrelgrootte en vorm. Afhankelijk van het aggregaat dat gebruikt wordt is het mogelijk dat een mortel een hogere of lagere mechanische sterkte bekomt. Door een aggregaat te gebruiken die hoekig en fijn is zal een mortel bekomen worden met een hogere mechanische sterkte, een hogere dichtheid, een lagere waterabsorptie en een lagere capillaire absorptie (Pavía & Toomey, 2008). Het gebruik van fijne aggregaten verhoogt

eveneens de resistentie tegen vorstverwering en de elasticiteitsmodulus (Von Konow, 2003). Volgens Isebaert, Van Parys & Cnudde (2014) kan de korrelgrootteverdeling gelinkt worden aan de verwerkbaarheid en het structurele uiterlijk. De korrelgrootteverdeling heeft een grote invloed op de pakking, wat voornamelijk een invloed zal uitoefenen op de porositeit (en de poriegrootteverdeling) en hiermee de mechanische sterkte van de mortel. Door gebruik te maken van een goed gegradeerd (en dus slecht gesorteerd) aggregaat zal een mortel bekomen worden met een hogere druksterkte. Niet alleen de grootte van de korrels maar ook hun samenstelling kan een grote invloed uitoefenen op de eigenschappen van een mortel. Indien het aggregaat vrij veel kleimineralen bevat, dan is het mogelijk dat er secundair ettringiet gevormd wordt ten gevolge van verwering door sulfaten. De vorming van secundair ettringiet zal mogelijks zorgen voor schade, dit ten gevolge van de volume expansie die erbij gepaard gaat. Bijkomende gevolgen van een hoog gehalte aan kleimineralen zijn dat een hoger watergehalte nodig is voor het verharden van de mortel en een verhoogde water retentie. Gevolgen van de hogere benodigde watergehaltes zijn volgens Isebaert, Van Parys & Cnudde (2014):

- dat er een daling optreedt in de dynamische elasticiteitsmodulus en de buig- en druksterkte (tot 50%)
- dat de capillaire porie inhoud en de krimp zal toenemen
- dat de waterabsorptiecoëfficiënt en de waterdampdiffusie zal toenemen, maar dat de droogsnelheid zal afnemen
- dat de vorst/dooiweerstand zal toenemen

Andere mineralen kunnen eveneens een grote invloed uitoefenen, glauconiet zwelt en oxideert en chalcedoon en opaal kunnen zorgen voor een Alkali Silica Reactie (ASR).

Over de gevolgen van het gebruik van kalkrijke aggregaten zijn tegenstrijdige gegevens beschikbaar. Volgens Vicat (1837) en Lanas et al. (2004) zal het gebruik van kalksteen aggregaten leiden tot een verhoging van de mechanische sterkte, door een betere bindmiddel/aggregaat binding ten gevolge van de syntaxiale overgroei van calciet. Volgens Pavia & Toomey (2007) en Holmes & Wingate (1997) zal er echter, indien er gebruik gemaakt wordt van een aggregaat die rijker is aan calciet, een mortel bekomen worden met een lagere buig- en druksterkte.

Bij de meeste mortels wordt er gebruik gemaakt van zand, dat eventueel ook fijn grind en silt en klei kan bevatten. Afhankelijk van hun transport en afzettingsomstandigheden zullen verschillende zandtypes verschillende samenstellingen en verschillende eigenschappen hebben.

Afhankelijk van hun samenstelling kunnen zanden verschillende kleuren hebben, wat kan gebruikt worden om een mortel van een compatibele kleur te voorzien. Veel zanden bestaan voornamelijk uit kwarts en zullen hierdoor een bleke kleur hebben. Een 100 % zuiver kwartszand heeft een witte kleur maar door bijvoorbeeld de bijmenging van organisch materiaal kan dit al gauw een zwarte kleur hebben. Indien het zand het gevolg is van de verwering van vulkanisch materiaal is het mogelijk dat dit een zwarte kleur heeft en bestaat uit obsidiaan fragmenten. Zanden kunnen een groene kleur hebben door de aanwezigheid van glauconiet ($(K,Na)(Fe^{3+},Al,Mg)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$), wat gevormd wordt in ondiepe zeeën en meren en samen met de zanden wordt afgezet.

Na hun afzetting is het mogelijk dat zanden een kleurverandering ondergaan. Een veel voorkomende verkleuring bij zanden is het bekomen van een oker tot 'zand' kleur. De verkleuring is het gevolg van de afzetting of *coating* van ijzerhydraten ($FeO(OH)\cdot nH_2O$). Een mogelijk bron voor het ijzer is de verwering van glauconiet waarbij het ijzer in dit glauconiet vrijgesteld wordt en op een andere plek kan neerslaan, wat kan zorgen voor een ijzerrijke coating.

Voor het bepalen van een geschikt aggregaat is het eveneens mogelijk verschillende zanden of zandfracties met elkaar te combineren of door de korrelgrootteverdeling te manipuleren door een bepaalde fractie uit te zeven. Door het mengen van verschillende zanden is het eveneens mogelijk een zand te bekomen die qua kleur meer compatibel is dan andere beschikbare zanden. Zanden kunnen eveneens gemaakt worden door het vermalen van grovere fracties zoals grind, stenen en keien. De afronding van deze zanden is zeer slecht, maar door te zeven is het mogelijk de sortering aan te passen.

3 Materiaal en Methodes

3.1 Mortelrecept

Ten gevolge van de opkomst van Portlandcement in de tweede helft van de 19e eeuw, is het gebruik van hydraulische kalk sterk verminderd. Dit komt doordat de hydraulische kalk in vergelijking met portlandcement veel trager uithard, zwakke mechanische eigenschappen heeft en een lage interne cohesie vormt. Doordat hydraulische kalk in onbruik raakte is veel informatie verloren gegaan over mortelsamenstellingen en mengverhoudingen. Uit de praktijk blijkt dat het gebruik van cement bij restauraties nadelige gevolgen heeft, wat leidt tot een toename van het gebruik van hydraulische kalk. Hydraulische kalk wordt echter nog niet altijd toegepast, mede door het ontbreken van standaarden voor het gebruik van mortels op basis van hydraulische kalk. Vanwege de positieve eigenschappen van hydraulische kalk is het onderzoek voor het gebruik ervan in restauraties toegenomen.

Door de onderlinge verhoudingen van de bestanddelen van een mortel te wijzigen, wordt een mortel met andere mechanische en fysische eigenschappen bekomen. Andere factoren die een invloed hebben zijn de uithardingsomstandigheden en de mengmethode.

Voor het vinden van geschikte B/Ag en B/W verhoudingen werden verschillende bronnen geraadpleegd. Verschillende auteurs maken echter gebruik van verschillende samenstellingen. Hierbij wordt niet altijd vermeld welk type kalkmortel gebruikt wordt en of dat de gebruikte verhoudingen in massa of volume verhoudingen uitgedrukt zijn. In de geraadpleegde werken wordt er niet enkel gebruik gemaakt van zuivere NHL 3,5 kalk als bindmiddel maar ook van NHL 2, NHL 5, CL 90 (= gehydrateerde kalk) en portlandcement, met eventueel een additief. De geformuleerde samenstellingen zijn ook niet altijd bedoeld voor de restauratie van stenen. Velen zijn ontwikkeld voor de restauratie van metselwerk, of zijn het resultaat van een reconstructie van een oorspronkelijke mortelsamenstelling. Een overzicht van de geraadpleegde werken is te vinden in Bijlage 1, samen met de gebruikte B/Ag en B/W verhoudingen.

Uit de literatuurstudie blijkt dat de gebruikte samenstellingen B/Ag verhoudingen hebben (zowel in massa als volume verhoudingen) die voornamelijk tussen de 1/2 en 1/3 liggen, hoewel verhoudingen van 1/1 tot 1/5 voorkomen in het onderzoek. Vele studies vermelden geen B/W verhoudingen. De vermelde B/W verhoudingen variëren van 0,33 voor portlandcement (Hassan, Robery & AL-Alawi, 2000) tot 1,5 voor vette kalk (Pavía & Treacy, 2006). In de gebruikte artikels wordt echter geen melding gemaakt van een gebruikte B/W verhoudingen voor mortels met NHL 3,5.

Vermits hydraulische kalk minder snel uithardt dan cement, worden ook langere uithardingsperioden gehanteerd voordat de stalen geëvalueerd worden.

- Cizer et al. (2008) analyseren de stalen na 3, 7, 28, 60, 90, 180 dagen;
- Zowel Lanas et al. (2004) als Lanas, Sirera & Alvarez (2005) testen de stalen na 7, 14, 21, 28 dagen;
- Lanas, Sirera & Alvarez (2006) testen de stalen 3, 7, 28, 91, 182 en 365 dagen.

3.2 Materiaal

Bij het ontwikkelen van een recept voor een restauratiemortel voor de Ledesteen wordt er gebruik gemaakt van een hydraulische kalk (NHL 3,5) als bindmiddel en drie verschillende aggregaten. Om compatibel te zijn met de Ledesteen moet de mortel voldoen aan de volgende criteria:

- Lagere resistentie;
- Hogere vervormbaarheid;
- Hogere capillaire absorptie, permeabiliteit en waterdampdoorlatendheid;
- Gelijkaardige thermische uitzettingscoëfficiënt;
- Lager oplosbaar zout gehalte

3.2.1 Bindmiddel

De keuze voor het gebruik van deze hydraulische kalk steunde op de benodigde eigenschappen.

Volgens Cizer et al. (2008) zullen mortels opgebouwd uit hydraulische kalk een grote porositeit en verbonden porienetwerk hebben wat leidt tot een lagere druk- en buigsterkte. De mortels hebben ook een grote waterdampdoorlatendheid, een grote permeabiliteit en kunnen beter plastisch vervormen. Ten gevolge van het optreden van zowel carbonatatie en hydratatie zullen de mortels niet enkel sneller uitharden dan luchthardende mortels, maar zullen ze ook een hogere resistentie hebben. Hoewel mortels op basis van hydraulische kalk langzamer uitharden en een grotere vorstgevoeligheid hebben in vergelijking met cement (en zeer sterk hydraulische mortels) zijn ze meer compatibel met natuurstenen. Hoewel een cement dus veel sneller zal uitharden, zal deze een hogere hardheid en stijfheid en een lagere permeabiliteit bekomen. Hierdoor zal de gerestaureerde steen versneld barsten en verweren (Mosquera et al., 2006). Andere nadelige eigenschappen van een cementmortel zijn een hoge thermische expansiecoëfficiënt en een hoog gehalte aan oplosbare zouten (Mosquera et al., 2006).

3.2.2 Aggregaten

Bij het ontwikkelen van een recept voor de Ledesteen is er geopteerd voor het gebruik van drie verschillende aggregaten. De gebruikte aggregaten zijn:

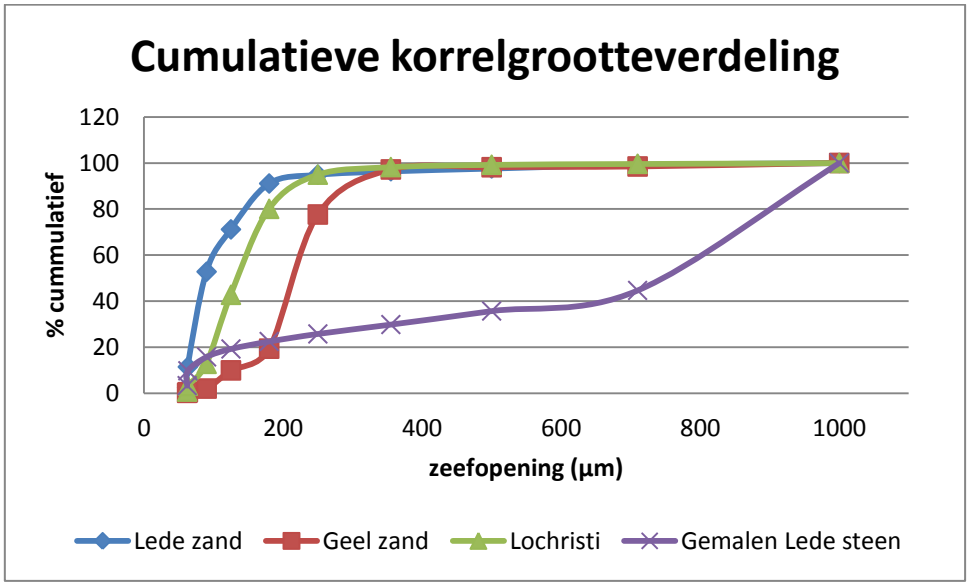
- Lede zand.
- Lochristi zand en Geel zand met een mengverhouding van 1/1.
- Gebroken Ledesteen (< 2 mm).

3.2.2.1 Lede zand

De keuze voor Lede zand als aggregaat voor het vormen van een mortel ligt voor de hand. Vermits Ledesteen het gevolg is van het uitkristalliseren van calciet in de kalkrijkere lagen van de Formatie van Lede, zou het zand in de Formatie van Lede mineralogisch zeer gelijkaardig moeten zijn aan de kalksteen. De idee was dat, vermits er gebruik gemaakt wordt van hydraulische kalk als bindmiddel, het verschil in kalkgehalte, mogelijk weggewerkt

zou worden bij het uitharden van de mortel. De gevormde mortel zou dan mineralogisch zeer compatibel zijn, ook doorheen de tijd. Doordat de mortel mineralogisch zeer compatibel zou zijn, wordt ook gedacht dat deze mortel hierdoor esthetisch zeer goed op de Ledesteen zou lijken en een gelijkaardige verwering zou ondergaan. Doordat er gebruik gemaakt werd van hydraulische kalk zou deze ook een hogere permeabiliteit en lagere sterkte hebben. Waarmee hij zou voldoen aan de fysische compatibiliteit en het zelfopofferend principe (2.3.2).

Lede zand is een fijnkorrelig, glauconiet- en kalkhoudend kwarts zand rijk aan *Nummulites variolarius*, dat op sommige plaatsen volledig ontkalkt kan zijn. Volgens Fobe (1986) is het Lede zand opvallend uniform en heeft een grafisch gemiddelde tussen 3 en 4, waardoor de zanden ingedeeld worden als fijne zanden. Fobe (1986) stelt dat de cumulatieve curven vaak een trapje bevatten, wat wijst op een geringe bijmenging (tot 3%) van materiaal grover dan ϕ= 2, waarna de curve sneller gaat stijgen. Dit is ook waar te nemen in Figuur 10. In de cumulatieve curven uit Fobe (1986) bevindt ongeveer 70% van het totale gewicht zich in het interval ϕ=3 en ϕ= 4. Waarbij het snel vlakker wordt in de buurt van de 90^{e} percentiel. In het interval tussen ϕ=4,3 en ϕ= 8,3 noteert men slechts een stijging van enkele procenten. De grens met de kleifractie wordt doorgaans bereikt net voor het 95^{e} percent. De sortering van de sedimenten is middelmatig goed tot slecht. De meeste curven zijn positief tot sterk positief asymmetrisch, als gevolg van de fijne staart van de silt fractie. Verder zijn ze doorgaan leptokurtisch tot zeer leptokurtisch. In Figuur 10 en Tabel 2 bevinden zich de waarden van een korrelgrootte analyse van het Lede zand.



Figuur 10: Cumulatieve korrelgrootte verdeling.

Tabel 2: Kenmerken Lede zand.

Lede zand			
FOLK EN WARD METHODE (ϕ)	Gemiddelde	2,874	fijn zand
	Sortering	0,674	matig goed gesorteerd
	Scheefheid	0,347	zeer grove scheefheid
	Kurtosis	1,041	mesoskurtisch

3.2.2.2 Lochristi en Geel zand

Dit aggregaat bestaat uit een 1/1 massaverhouding van Lochristi zand en Geel zand. Dit aggregaat is tot stand gekomen door het combineren van Lochristi zand dat in de praktijk zeer goede resultaten opleverde (mondelinge communicatie met Delphine Vandevoorde) met geel zand, dat met zijn gele kleur de donkere kleur van het Lochristi zand compenseert.

In Figuur 10, Tabel 3 en Tabel 4 bevinden zich de waarden van een korrelgrootte analyse van het Lochristi en geel zand.

Tabel 3: Kenmerken Lochristi zand.

Lochristi zand			
FOLK EN WARD METHODE (ϕ)	Gemiddelde	2,397	fijn zand
	Sortering	0,558	matig goed gesorteerd
	Scheefheid	0,050	symmetrisch
	Kurtosis	1,082	mesokurtisch

Tabel 4: Kenmerken Geel zand.

Geel zand			
FOLK EN WARD METHODE (ϕ)	Gemiddelde	1,745	medium zand
	Sortering	0,474	goed gesorteerd
	Scheefheid	0,131	fijne scheefheid
	Kurtosis	1,649	zeer leptokurtisch

3.2.2.3 Gebroken Ledesteen

De redenering achter het gebruik van gebroken Ledesteen is vergelijkbaar met de keuze voor Lede zand. Het verschil is te vinden in de samenstelling en de beschikbaarheid. Ledesteen is nu slechts sporadisch te verkrijgen bij de firma Balegro BVBA maar kan verkregen worden door het vermalen van onbruikbare ledestenen (afvalmateriaal). De verschillen in chemische samenstelling tussen Ledesteen en mortel op basis van gebroken Ledesteen zijn te vinden in het hogere kalkgehalte, maar voor de rest zijn deze chemisch zeer gelijkaardig. De aanwezigheid van breekmeel zorgt echter voor een groter gehalte aan fijnkorrelige deeltjes, wat zal leiden tot een grotere behoefte aan water. Dit kan zorgen voor een daling in dynamische elasticiteitsmodulus, buig- en druksterkte, een toename van de capillaire porie-inhoud en krimp, toename van de waterabsorptiecoëfficiënt en de waterdampdiffusie, een afname van de droogsnelheid en een toename in de gevoeligheid aan vorstverwering.

Het aggregaat dat gebruikt wordt bij de vorming van de mortels is geproduceerd door Ledesteen te breken door middel van een steenbreker, te zien in Figuur 11 (links), waarna de bekomen brokstukken gezeefd werden door middel van een zeef met openingen van 2 mm zoals waar te nemen in Figuur 11 (rechts). De grovere fractie die weerhouden werd, kon opnieuw gebroken worden.

Figuur 11: Steenbreker (links) en zeef (rechts). (Foto: M. De Clercq)

In Figuur 10 en Tabel 5 bevinden zich de waarden van een korrelgrootte analyse van het Lede zand, gebruikt bij het maken van de mortels.

Tabel 5: Kenmerken Gebroken Ledesteen.

Gebroken Ledesteen			
FOLK EN WARD METHODE (ϕ)	Gemiddelde	0,857	grof zand
	Sortering	1,478	slecht gesorteerd
	Scheefheid	0,818	zeer fijne scheefheid
	Kurtosis	0,937	mesokurtisch

3.2.3 Mortel ontwerp

Vooraleer er besloten werd welke samenstellingen gebruikt worden, werden op kleine schaal testverhoudingen samengesteld. Het resultaat van deze testen is dat de gevormde samenstellingen voor Lede zand en Lo/Ge een streef-B/Ag massaverhouding zullen hebben van 5/12, 1/3 en 5/18. Voor gebroken Ledesteen worden slechts twee verschillende verhoudingen gebruikt, namelijk 5/12 en 1/3. Voor elk type aggregaat is tevens ook een aggregaat afhankelijke B/W massaverhouding gehanteerd. Namelijk 1,11 voor Lede zand, 1,43 voor Lo/Ge en initieel 1,08 voor gebroken Ledesteen (zie ook 3.2.5). Bij het maken van de proefstukken werd echter bevonden dat een B/W van 1,08 resulteert in een te slechte verwerkbaarheid, waardoor na het maken van proefstuk Gebroken Lede 1 gekozen werd voor een B/W van 1,43. De reden waardoor de te grote verwerkbaarheid niet opgemerkt werd bij het testen is dat de gebroken Ledesteen grofkorreliger was en dat de verwerkbaarheid hierdoor moeilijker te evalueren was op kleine schaal. In Bijlage 2 bevinden zich afbeeldingen van de gebruikte volumeverhoudingen.

Vermits de proefstukken een lange tijd vereisen voor de carbonatatie en hydratatie, kan de uithardingstijd een invloed op de testresultaten hebben. In dit geval werd er gekozen voor een uitharding van 5 maanden voor reeks 1 en een uitharding van 3 maanden voor reeks 2, met de bedoeling beide reeksen met elkaar te kunnen vergelijken.

3.2.4 Procedure voor het aanmaken van de stalen

De procedure die gevolgd is bij het aanmaken van de mortelstalen volgt de norm EN 196-1 (2005) 'Beproevingsmethoden voor cement – Deel 1: Bepaling van de sterkte'. Hierin wordt een volledige beschrijving gemaakt van de benodigde toestellen en laboratoriacriteria teneinde een mortel te bekomen die gemaakt is aan de hand van vastgestelde normen. Voor meer gedetailleerde informatie omtrent de procedures die gevolgd zijn, wordt er verwezen naar de norm. Indien er bij bepaalde stappen afgeweken is van de normprocedures zal dit worden vermeld. Deze norm is opgesteld voor cementmortels met een ratio van 1/3: B/Ag met een W/B ratio van 0,5. In het kader van deze thesis wordt er echter gebruik gemaakt van andere verhoudingen en een hydraulische kalk.

Het maken van de stalen vond plaats in het Magnel Laboratorium voor beton onderzoek te Zwijnaarde. De ruimte waarin de mortelpreparatie gebeurde, werd aan een constante temperatuur van 20 ± 2 °C en een relatieve luchtvochtigheid van > 50 % gehouden. Na preparatie werden de stalen in een klimaatkamer met een zeer hoge relatieve vochtigheid (> 90 %) en een temperatuur van 20 ± 1°C geplaatst zodat deze konden uitharden totdat deze ontkist konden worden. Bijkomend bij de voorschriften van de norm werden de stalen na het ontkisten voor een periode van 3 en 5 maand bewaard in een klimaatkamer bij 60 % RH en 20 ± 2 °C
De verhoudingen werden tot ± 0,05 g nauwkeurig afgewogen met een KERN 572 (Figuur 12, links). Verder was ook een mixer nodig. De mixer bestaat uit een roestvrij stalen kom met een capaciteit van ongeveer 5 liter. Tijdens het mixen was deze kom stationair en werd het mixen uitgevoerd door een roestvrij stalen mes dat ronddraaide rond zijn eigen as en rond de as van de kom waardoor er een planetaire beweging uitgevoerd werd. Zoals waar te nemen is in Figuur 12, rechts, is de gebruikte mixer van het merk 'Testing' (Bluhm & Feuerherdt GmbH). De gebruikte rotatiesnelheden waren 140 toeren per minuut bij lage rotatiesnelheid en 285 toeren per minuut bij hoge rotatiesnelheid.

Figuur 12: foto's van links een type 572 serie, KERN weegschaal en rechts een 'Testing' (Bluhm & Feuerherdt GmbH) mixer. (Foto: M. De Clercq)

Na het mengen werd de mortel in een mal gegoten of gestampeerd, afhankelijk van de verwerkbaarheid. De gebruikte mallen (Figuur 13) bestonden uit drie horizontale compartimenten. Voor elke samenstelling werden drie stalen gemaakt met de volgende afmetingen: 40*40*100 mm. De mallen konden opengeschroefd worden om de bekisting te demonteren.

Figuur 13: foto stalen mal voor mortel preparatie. (Foto: M. De Clercq)

Bij het vullen van de mallen wordt er gebruik gemaakt van een schokplaat (Figuur 14), om luchtbellen uit de natte mortel te trillen aan 60 schokken per minuut.

Figuur 14: foto schokplaat. (Foto: M. De Clercq)

3.2.4.1 Mortel preparatie

Volgens de norm moet er voor de preparatie van de mortels gebruik gemaakt worden van 'CEN Standaard zanden'. In dit geval werd er geen gebruik gemaakt van CEN standaard zand maar van drie verschillende aggregaten (zie 3.2.2). Volgens de norm moeten de gebruikte aggregaten een vochtigheidsgraad hebben die lager is dan 0,2%, daarvoor werden de aggregaten in een oven geplaatst aan 60°C gedurende 48 uur.

Het mixen van de mortel werd uitgevoerd in de volgende stappen.

- Afwegen aggregaat;
- Afwegen bindmiddelen water in mengkom;
- Mixen aan een lage snelheid (140 toeren per minuut)voor 30 s;
- Toevoegen van het aggregaat aan een constant tempo;
- Mixen aan een hoge rotatie snelheid (285 toeren per minuut) gedurende 30 s;
- Mixen stoppen en losschrapen van materiaal van de kom;
- 60 s laten rusten;
- 60 s mixen aan een hoge rotatiesnelheid.

Ten gevolge van het fijnkorrelige karakter van bepaalde aggregaten was het echter niet mogelijk gebruik te maken van het hiervoor voorziene invoegsysteem en werden de aggregaten manueel toegevoegd. Hierdoor is er echter een grotere onzekerheid omtrent de

tijd waarin de aggregaten toegevoegd worden en kan er niet met zekerheid gezegd worden dat deze zijn toegevoegd in 30 s.

De mallen worden gevuld door een eerste laag van mortel (± 300 g) in de mal te gieten of estamperen, waarna deze op de schok plaat geplaatst wordt. Vervolgens wordt de mal 60 keer geschokt om de eerste laag te compacteren. Hierna wordt de tweede laag toegevoegd en wordt de mal ook 60 keer geschokt. Na dit schokken wordt de overbodige mortel afgeschraapt met een meetlat hellend volgens de bewegingsrichting, waarna er nog een keer wordt overgegaan onder een meer acute hoek teneinde een effen oppervlak te bekomen.

3.2.4.2 Conditionering van de test stalen

Volgens de norm moeten de stalen bedekt worden door een impermeabel materiaal (dat niet reageert met de mortel) en in een klimaatkamer met een zeer hoge relatieve vochtigheid (>90%) geplaatst worden. De mallen mogen niet op elkaar geplaatst worden en moeten langs alle kanten blootgesteld worden aan de vochtige lucht.

Na 48 h werden de stalen ontkist, waarna ze verder konden uitharden in een klimaatkamer met een relatieve vochtigheid van 60 % en een temperatuur van 20 ± 2 °C. Deze stap bevindt zich niet in de norm, maar werd uitgevoerd vanwege de tragere uitharding van hydraulische kalk.

3.2.5 Samenstelling van de mortel stalen

3.2.5.1 Reeks 1 (5 maanden uitharden)

De samenstellingen voor de eerste reeks mortels die vijf maanden hebben kunnen uitharden bevinden zich hieronder in Tabel 6, geordend volgens aggregaat type. Deze reeks werd gemengd op 09/09/2013 en vervolgens ontkist na 48 h waarna ze 5 maanden (tot 10/02/2014) in een klimaatkamer verder hebben uitgehard.

Tabel 6: Tabel 1: Samenstelling reeks 1 (vijfmaanden verder uitharden). Ag staat voor massa aggregaat in g, B voor massa bindmiddel in g en W voor massa water in g. Verder worden ook de B/Ag en B/W ratio's weergegeven voor elke mortel samenstelling.

Lede		Volume delen	massa (g)		
Lede 1	AG	3	1286	B/Ag	0,28
	B	3	357,25	B/W	1,11
	W	2	322,75		
Lede 2	AG	4	1000,55	B/Ag	0,42
	B	3	416,65	B/W	1,10
	W	2	379,3		
Lede 3	AG	15	863,8	B/Ag	0,33
	B	12	287,9	B/W	1,11
	W	8	259,8		

Lo/Ge (1:1)		Volume delen	massa (g)		
Lo/Ge 1	AG	6	1000,15	B/Ag	0,28
	B	6	277,8	B/W	1,42
	W	3	196,15		
Lo/Ge 2	AG	8	1000,1	B/Ag	0,42
	B	6	416,75	B/W	1,43
	W	3	292,3		
Lo/Ge 3	AG	15	998,65	B/Ag	0,33
	B	12	332,85	B/W	1,42
	W	6	234,9		

Gebroken Ledesteen		Volume delen	massa (g)		
Gebr. Lede 1	AG	6	1100,2	B/Ag	0,28
	B	5	305,65	B/W	1,08
	W	4	284,05		
Gebr. Lede 2	AG	8	1000	B/Ag	0,33
	B	6	333,35	B/W	1,41
	W	3	236,3		

De eerste mortel samenstelling met gebroken Ledesteen als aggregaat werd veel te nat bevonden en voor het maken van de tweede samenstelling met gebroken Ledesteen werd er geopteerd voor een andere B/W ratio, met een kleinere hoeveelheid water. Verder werden er wegens een gebrek aan beschikbaarheid van de Ledesteen slechts twee verschillende samenstellingen per reeks gemaakt met gebroken Ledesteen als aggregaat.

3.2.5.2 Reeks 2 (3 maanden uitharden)

De samenstellingen voor de tweede reeks mortels die drie maanden hebben kunnen uitharden bevinden zich hieronder in Tabel 7 en zijn geordend volgens aggregaat type. Deze reeks werd gemengd op 04/11/2013 en vervolgens ontkist na 48 h waarna ze drie maanden (tot 10/02/2014) in een klimaatkamer verder hebben uitgehard. De gebruikte samenstellingen voor de mortels uit reeks 2 komen overeen met de gekozen samenstellingen uit reeks 1, zodanig dat men het effect van drie maanden extra uitharding kan evalueren. Kleine verschillen zijn mogelijk vanwege de onomkeerbaarheid van het toevoegen van een hoeveelheid water aan een hoeveelheid kalk. Vanwege het veel te natte karakter van de eerste mengeling van reeks 1 met gebroken Ledesteen, werd er voor mengeling 4 met gebroken Ledesteen geopteerd voor een andere W/B ratio.

Tabel 7: Samenstelling reeks 2 (drie maanden verder uitharden). Ag staat voor massa aggregaat in g, B voor massa bindmiddel in g en W voor massa water in g. Verder worden ook de B/Ag en B/W ratio's weergegeven voor elke mortel samenstelling.

Lede		Volume delen	massa (g)		
Lede 4	AG	3	1100	B/Ag	0,28
	B	3	305,8	B/W	1,08
	W	2	282,6		
Lede 5	AG	4	1100	B/Ag	0,42
	B	3	458,85	B/W	1,11
	W	2	413,2		
Lede 6	AG	15	1100,05	B/Ag	0,33
	B	12	366,3	B/W	1,11
	W	8	330		

Lo/Ge (1:1)		Volume delen	massa (g)		
Lo/Ge 4	AG	6	1100	B/Ag	0,28
	B	6	305,5	B/W	1,43
	W	3	214		
Lo/Ge 5	AG	8	1100	B/Ag	0,42
	B	6	458,35	B/W	1,43
	W	3	321,2		
Lo/Ge 6	AG	15	1100	B/Ag	0,33
	B	12	366,6	B/W	1,43
	W	6	256,8		

Gebroken Ledesteen		Volume delen	massa (g)		
Gebr. Lede 4	AG	36	1100	B/Ag	0,28
	B	30	305,55	B/W	1,43
	W	15	213,95		
Gebr. Lede 5	AG	8	1100	B/Ag	0,33
	B	6	366,3	B/W	1,41
	W	3	259,85		

3.3 Methodes

Ter bepaling van de technische eigenschappen van de ontwikkelde mortels worden een aantal proeven uitgevoerd. Waar mogelijk werden deze proeven uitgevoerd aan de hand van een Europese of Belgische norm, waardoor de bekomen resultaten vergeleken konden worden met andere data. De normen waarmee deze testen zijn uitgevoerd zijn niet specifiek gericht op het evalueren van een restauratiemortel. De reden hiervoor is dat er voor het evalueren van een restauratiemortel geen standaardtests en drempelwaarden bestaan, zoals ook beaamd wordt door Bianco et al. (2013). Gezien de testen niet specifiek gericht zijn op het evalueren van restauratiemortels op basis van hydraulische kalk, zal er in sommige opzichten van een norm afgeweken worden. De uitgevoerde proeven zijn onder te verdelen in identificatie/karakterisatie proeven en proeven ter bepaling van de duurzaamheid.

- Identificatie/karakterisatie proeven geven informatie omtrent de intrinsieke eigenschappen van de proefstukken, zonder rekening te houden met externe factoren zoals de eindafwerking en de gebruiksomgeving. Voorbeelden zijn het bepalen van de buig- en druksterkte of de thermische uitzettingscoëfficiënt.
- Proeven ter bepaling van de duurzaamheid, onderzoeken de mogelijke verandering in eigenschappen van de proefstukken doorheen de tijd ten gevolge van externe factoren. De enige gebruikte proef ter bepaling van de duurzaamheid is de evaluatie van de kleurverandering ten gevolge van thermische schok.

De uitgevoerde proeven worden gebruikt voor het opstellen van technische fiches. De morteleigenschappen werden vergeleken met de eigenschappen van de Ledesteen uit de technische fiche van leverancier 'Balegro' en met data van referentie stalen voor proeven die niet in de technische fiche te vinden zijn.

Vermits de Ledesteen een vrij heterogene steen is en afhankelijk van de toepassing aan verschillende externe factoren wordt blootgesteld, zullen de resultaten slechts een indicatie geven over de compatibiliteit met gelijkaardige eigenschappen als de geëvalueerde stalen.

Dit wordt bevestigd door Camerman (1957), die stelt dat ervaring de beste vorm van evaluatie is voor natuurstenen, maar dat de bepaling van technische eigenschappen wel een indicatie kan geven over de geschiktheid van een steen voor een bepaalde functie of overeenstemmende eigenschappen heeft.

3.3.1 Consistentie (verwerkbaarheid)

De verwerkbaarheid van een mortel duidt op de eigenschappen die bepalen hoe de mortels zullen vervormen onder invloed van externe krachten. Volgens NEN 5950 (1995): Voorschriften Beton Technologie (VBT 1995) - Eisen, vervaardiging en keuring, is de consistentie (verwerkbaarheid) van cementmortels opgedeeld in vier consistentie gebieden. Deze zijn:

- Consistentie gebied 1 : Aardvochtig

  De mortel lijkt te bestaan uit los, onsamenhangend materiaal en moet tot een balletje gekneed kunnen worden zonder dat het water loslaat.

- Consistentie gebied 2: Halfplastisch

De mortel heeft een hogere vloeibaarheid dan mortels met een aardvochtige consistentie, maar kunnen ook worden aangestampt.

- Consistentie gebied 3: plastisch

  De mortel vormt een dikke vloeibare brij die in een bloemkoolachtige samenstelling wegvloeit. Bij het kneden tot een balletje, moet de mortel nog voldoende samenhang hebben. Dit houdt in dat de mortel enerzijds niet uit elkaar mag brokkelen en anderzijds niet in elkaar mag zakken.

- Consistentie gebied 4: vloeibaar

  De mortel vormt ook hier een vloeibare brij maar deze zal echter vloeiend wegvloeien.

Voor het bepalen van de verwerkbaarheid zijn verschillende technieken beschikbaar. Deze technieken zijn gestandaardiseerd en zijn geoptimaliseerd voor bepaalde consistentie gebieden. Voor consistentie gebied 1 wordt er gebruik gemaakt van de verdichtingmaat, voor consistentie gebieden 2 en 3 wordt er gebruik gemaakt van de zetmaat en voor consistentie gebied 4 van de schudmaat.

Het testen van de consistentie van een mortel werd uitgevoerd aan de hand van de norm B 14-207 (1983): 'Proeven op mortel, consistentie, uitspreiding op de schoktafel'. Deze norm geeft weer hoe de consistentie van een verse mortel bepaald wordt aan de hand van de uitspreiding op een schoktafel. Hierbij wordt de verwerkbaarheid bepaald door middel van de schudmaat. De vereiste verwerkbaarheid behoort echter niet tot consistentie gebied 4 en deze techniek is enkel gebruikt ter controle. Indien deze in het consistentie gebied 4 bevindt is deze te vloeibaar. De beoogde verwerkbaarheid behoord tot consistentie gebieden 1 en 2.

De schoktafel (Figuur 15) is opgebouwd zodat schokken opgewekt worden die overeenstemmen met een vrije val van 10 mm. Op het draagvlak van de schoktafel is er een cirkel aangebracht met een diameter van 100 mm, waarop de vorm kan worden gecentreerd.

Figuur 15: foto schoktafel. (Foto: M. De Clercq)

De vorm waarin de mortel geplaatst wordt is een afgeknotte kegelmantel (Figuur 16, links). Het verhoog (Figuur 16, rechts) wordt op de vorm geplaatst bij het invoegen van de mortel en dient om dit invoegen te vergemakkelijken.

Figuur 16: Vorm (links) en verhoog (rechts). (Foto: M. De Clercq)

Werkwijze

De draagtafel wordt bevochtigd. Vervolgens wordt deze vorm in het centrum van de draagtafel geplaatst, zodanig dat de onderrand van de vorm samenvalt met cirkel op de drager. Hierna wordt de vorm opgevuld met mortel, in twee lagen, waarbij elke laag 10 maal wordt aangestampt. Nadat de tweede laag is aangebracht wordt er nog een weinig mortel toegevoegd waarna het verhoog verwijderd wordt en de mortel gladgestreken wordt zonder op de mortel druk uit te oefenen. Bij het inbrengen van de mortel moet de vorm met de hand op zijn plaats gehouden worden en 10-15 s na het inbrengen van de mortel wordt de vorm met zorg, traag, verticaal verwijderd.

Vervolgens worden 15 schokken op een regelmatig tempo en in een periode van ongeveer 15 s uitgeoefend op de tafel. Waarna de loodrechte diameters d_1 en d_2 van de uitgezakte mortel opgemeten worden met een meetlat met een nauwkeurigheid van ± 0,1 cm. Hier wordt vervolgens een gemiddelde van berekend dat vergeleken wordt met de oorspronkelijke diameter van de mortelvorm (= diameter van de cirkel op de draagtafel). In het geval dat er brokstukken van de mortel zijn afgebroken wordt er met deze brokken geen rekening gehouden en indien er een zeer grote segregatie plaatsvindt, is deze proef niet meer toepasselijk. Slechts één diameter van de uitgezakte mortel werd bepaald. Hierdoor zijn de bekomen resultaten niet volgens de norm, maar kunnen ze wel nog steeds een zekere hulp geven bij het evalueren van de gegevens.

Normaal worden de resultaten van de consistentie test weergegeven door Vergelijking 7

Vergelijking 7: Bepaling van de schokmaat

$$F = \frac{d_1 + d_2}{2\mathrm{d}}$$

Hierin is $\frac{d_1+d_2}{2}$ het gemiddelde van de gemeten diameters d_1 en d_2 van de uitgespreide mortelkoek in mm, d de diameter van de oorspronkelijke basis, gelijk aan 100 mm. Indien de bekomen schudmaat een waarde heeft die kleiner is dan 1,2, vertoont de mortel een consistentie waarvoor de methode ongeschikt is. Vermits er slechts een diameter gemeten is zal enkel deze waarde vergeleken worden met de oorspronkelijke diameter (Vergelijking 8).

Vergelijking 8: Aangepaste formule voor de bepaling van de schokmaat.

$$F = \frac{d_1}{d}$$

3.3.2 Optische microscopie

Voor de uitvoering van de analyse werd de norm EN 12240 (2000) Beproevingsmethoden voor natuursteen - Petrografisch onderzoek gebruikt. Vermits de analyse van een restauratiemortel niet moet leiden tot een identificatie en een benaming, of het bepalen van de herkomst, zal de analyse gebruikt worden voor de evaluatie van de poriënstructuur en de binding van het calcietcement.

Gezien de beperkte evaluatie van de slijpplaatjes is er enkel gebruik gemaakt vaan een *Zeiss Axio scope* met een AxioCam MRc 5 camera (Figuur 17), waarmee de slijpplaatjes geëvalueerd kunnen worden onder doorvallend licht en door middel van fluorescentiemicroscopie.

Figuur 17: ZEISS microscoop met AxioCam MRc 5 camera. (Foto: M. De Clercq)

Vermits de mortels vrij bros zijn werden ze verstevigd met EpoFix kunsthars, gebruik makend van een Citovac (Figuur 18). Bij het mengen van de EpoFix hars werd EpoDye toegevoegd zodat analyse onder fluorescerend licht mogelijk werd.

Figuur 18: Struers CitoVac. (Foto: M. De Clercq)

3.3.3 Fenolfthaleïne test

Deze techniek steunt op de eigenschappen van fenolfthaleïne om een indicatie te geven over de carbonatatiediepte. De kleur van fenolfthaleïne varieert van kleurloos (onder pH 8,2) tot rood-violet (boven pH 10) waarbij de overgang tussen beiden plaatsvindt rond pH 9.5 en hierbij dus een indicatie van de carbonatatie geeft. Doordat het carbonatatieproces gepaard gaat met een verlaging van de pH, evolueert de mortel van een meer basisch medium naar een minder basis medium. Door deze pH verlaging is het dus mogelijk om fenolfthaleïne te gebruiken als indicator voor carbonatatie. Het vaststellen van de carbonatatiediepte werd uitgevoerd door het gemiddelde te nemen van waarden van de verschillende afstanden van de rand van het staal tot de overgang (van kleurloos naar violet) gemeten op verschillende punten.

Op het verse breukvlak gevormd bij de buigsterkte test, worden, druppels 1% fenolfthaleïne oplossing in ethanol aangebracht[4]. Na ongeveer een minuut worden de afstanden van de, al dan niet waargenomen, kleurverandering met de randen opgemeten.

3.3.4 Bepaling van de schijnbare volumieke massa en open porositeit

Het bepalen van de schijnbare volumieke massa en de open porositeit werd uitgevoerd aan de hand van norm EN 1936 (2006) Beproevingsmethoden voor natuursteen – Bepaling van de dichtheid en de schijnbare dichtheid en van de totale en open poreusheid.

De schijnbare volumieke massa is gedefinieerd als de ratio tussen de massa van een droog staal en zijn schijnbare volume. Het schijnbare volume van een staal, is het volume bepaald door de externe zijden.

De porositeit van een staal komt overeen met het totaal volume aan leegte versus het schijnbare volume en kan worden onderverdeeld in gesloten porositeit en open porositeit. De gesloten porositeit van een staal is dat deel van de totale porositeit dat niet in verbinding staat met elkaar en waar er dus geen transport kan optreden tussen de verschillende openingen. De open porositeit is de ratio tussen het volume aan open poriën en het schijnbare volume van het staal in kwestie.

Het bepalen van de schijnbare volumieke massa en de open porositeit vereist het gebruik van een vacuümstolp (Figuur 19) waarin een druk van 2,0 ± 0,7 kPa kan opgewekt worden en dat de mogelijkheid heeft om water toe te voegen. Zodat de stalen aan een geleidelijk tempo ondergedompeld worden.

Verder is er ook een weegschaal nodig die de mogelijkheid heeft te wegen met een nauwkeurigheid van minstens 0,01 % van de te wegen massa. De gebruikte weegschaal moet de mogelijkheid hebben om metingen te verrichten van een staal dat ondergedompeld is in water.

[4] Bij het gebruik van fenolfthaleïne moet er rekening gehouden worden met zijn (gevaarlijke) eigenschappen, dewelke voor de vaste stof af te lezen uit zijn MSDS (Vinquary Inc., 2001) en overigens aangeduid staan op het etiket. De R-zinnen die van toepassing zijn, zijn 45.62 en 68 en de S-zinnen die van toepassing zijn, zijn 45 en 53.

Figuur 19: Vacuümstolp. (Foto: M. De Clercq)

Werkwijze

Voor het bepalen van de open porositeit en de schijnbare volumieke massa worden de gedroogde stalen gewogen, waarna ze in de vacuümstolp geplaatst worden. Vervolgens wordt dit vat afgesloten en wordt de druk geleidelijk verlaagd tot een druk van 2,0 ± 0,7 kPa. Hierna moeten de stalen gedurende 2 h ± 0,2 h aan deze druk bewaard blijven teneinde de lucht uit de open poriën te extraheren. Vervolgens wordt er langzaam gedemineraliseerd water van 20 ± 5°C toegevoegd, terwijl een druk van 2,0 ± 0,7 kPa behouden blijft. Nadat alle stalen volledig ondergedompeld zijn wordt vervolgens de druk verhoogd tot de atmosferische druk. Vervolgens worden de stalen onder water en aan atmosferische druk bewaard gedurende 24 h ± 2 h.

Na 24 h ± 2 h worden de stalen op twee verschillende wijzen gewogen. De eerste manier maakt gebruik van een netje dat via een ketting verbonden is met de weegschaal en ondergedompeld is in water. Aan de hand van deze opstelling is het mogelijk om de massa van het staal te bepalen terwijl dit ondergedompeld is in water. De tweede manier wordt uitgevoerd om de massa van het staal te bepalen wanneer dit verzadigd is met water. Deze massa wordt bepaald door het staal lichtjes af te deppen met een vochtige doek en het staal vervolgens op de weegschaal te plaatsen.

Aan de hand van de massa van het droge specimen (m_d), de massa van het staal ondergedompeld in water (m_h), de massa van het verzadigde staal (m_s) en aan de hand van de dichtheid van water bij 20 °C (= 998 kg/m³) is het mogelijk om de schijnbare volumieke massa en de open porositeit te bepalen. De schijnbare volumieke massa en de open porositeit worden bepaald aan de hand van Vergelijking 9 en Vergelijking 10

Vergelijking 9: Schijnbare volumieke massa

$$\boldsymbol{\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} * \rho_{rh}}$$

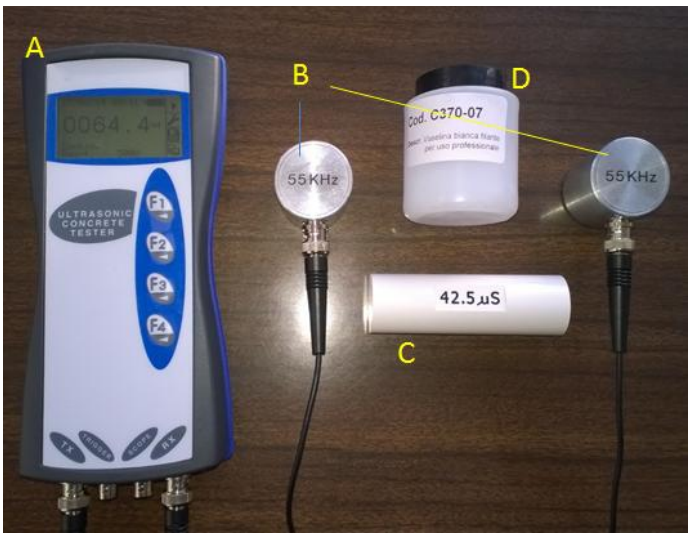
Vergelijking 10: Open porositeit

$$\boldsymbol{p_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} * 100}$$

3.3.5 Bepaling van de geluidvoortplantingssnelheid

Het uitvoeren van ultrasound testen zorgt voor een niet-destructieve, praktische en goedkope wijze van gesteentekarakterisering (Herb, Grosse & Reinhardt, 1999). Hierbij is de snelheid afhankelijk van verschillende gesteente eigenschappen waaronder de dichtheid, de korrelgrootte en vorm, de temperatuur, het type steen, elastische eigenschappen, de porositeit, de anisotropie, de verwering en breuken (Kahraman, Ulker & Delibalta, 2007 en Abassi et al., 2013).

Voor deze studie wordt er gebruik gemaakt van de transmissie methode, uitgevoerd volgens de norm EN 14579 (2004) *Natural stone test methods – Determination of sound speed propagation*. De ultrasound testen zijn uitgevoerd door middel van een C369N ultrasonische puls snelheid tester van het merk Matest (Figuur 20).



Figuur 20: C369N Matest ultrasonische puls snelheid tester. meettoestel (A), 2 sondes van 55 KHz met verbindingskabels (B), kalibratie cilinder, met een transmissie tijd van 42,5 µs (C) en vaseline contact gel (D). (Foto: M. De Clercq)

De gebruikte sondes fungeren zowel als zender als ontvanger zodat er geen verschil in resultaat ontstaat bij het omwisselen van de positie van de sondes Deze golven worden vervolgens weer omgezet naar een elektronisch signaal door een tweede transducer nadat het een lengte heeft overbrugd met een gekende afstand. De snelheid waaraan de geluidsgolf zal migreren door het proefstuk is hierbij vooral afhankelijk van de temperatuur en de chemische samenstelling (Dukhin & Goetz, 2002).

De norm is opgesteld voor specimen met afmetingen 300 mm * 75 mm * 50 mm met een tolerantie van ± 2 mm. Hiervan wordt er echter afgeweken vermits de stalen afmetingen hebben van 39,9 ± 0,2 mm * 39,9 ± 0,8 mm * 157 ± 20,6 mm. Verder wordt er ook afgeweken van de norm wat betreft het drogen van de stalen. Volgens de norm moeten de stalen drogen aan een temperatuur van 70 ± 5 °C tot wanneer het verschil in massa tussen twee metingen, met een interval van 24 ± 2 h, kleiner is dan 0,1 % van de massa van de eerste van deze metingen. Bij de uitvoering werden de stalen echter gedurende 48 h in een oven geplaatst aan een temperatuur van 40 °C. Deze afwijking was nodig vermits de stalen 24 h na deze periode nodig waren voor de buigsterkte test. Het verschil in massa tussen twee metingen was echter reeds kleiner 0,1 % voor het merendeel van de stalen (uitzondering waren de stalen van Gebr. Lede 4).

Het drogen van de stalen bij andere testen zal gebeuren in een oven op 40 °C tot wanneer het verschil in massa tussen twee metingen, met een interval van 24 ± 2 h, kleiner is dan 0,1 % van de massa van de eerste van deze metingen. De gebruikte toestellen zijn te zien in Figuur 21.

Figuur 21: OHAUS explorer weegschaal (links) en generatie 2003 Memmert oven (rechts). (Foto: M. De Clercq)

Werkwijze

Na het drogen van de proefstukken, worden de sondes aan de uiteinden (volgens de langste as) van de proefstukken geplaatst en wordt er, om de andere meting, een nieuwe laag vaseline aangebracht om een goed contact tussen het staal en de sondes te behouden. Door de gemeten aankomsttijden te combineren met de afmetingen van de stalen is het vervolgens mogelijk om de geluidssnelheid te bepalen van de stalen via Vergelijking 11.

Vergelijking 11: Bepaling van de geluidvoortplantingssnelheid.

$$V = \frac{L}{t}$$

Hierbij staat V voor de geluidssnelheid (km/s), L voor de lengte van het staal (mm) en t voor de gemeten aankomsttijd (µs).

3.3.6 Buig- en druksterkte test

De bepaling van de buig- en druksterkte werd uitgevoerd aan de hand van de norm EN 196-1 (2005) 'Beproevingsmethoden voor cement – Deel 1: Bepaling van de sterkte' en vond plaats in het Magnel Laboratorium voor beton onderzoek te Zwijnaarde. Voor meer gedetailleerde informatie omtrent de procedures die gevolgd zijn, wordt er verwezen naar de norm.

De buig- en druksterkte van de verschillende stalen werd geanalyseerd door middel van een buig- en druksterkte test machine van het Digicon 2000 type van het merk Walter+Bai gebruik makend van een Proteus operatie systeem (Figuur 22).

Figuur 22: Foto van de Digicon 2000 van het merk Walter+Bai. (Foto: M. De Clercq)

Dit toestel maakt gebruik van een driepuntsbuigproef voor de bepaling van de buigsterkte. Hierbij rust het staal op 2 stalen rollers, die zich op 100,0 ± 0,5 mm van elkaar bevinden, waarbij er vervolgens een kracht wordt uitgeoefend door middel van een derde stalen roller in het midden van de dragende rollers. Deze kracht zal toenemen totdat het staal breekt en de uitgeoefende kracht op het moment dat dit staal breekt, kan vervolgens gebruikt worden om de buigsterkte van het staal te onderzoeken.

Voor het bepalen van de druksterkte zal het toestel een druk uitoefenen volgens de verticale as, waarbij de resultante door het centrum van het staal loopt. De platen waarmee de druk uitgeoefend wordt hebben afmetingen van 40,0 ± 0,1 mm op 40,0 ± 0,1 mm en dus een oppervlak dat een weinig afwijkt van 1600 mm².

Werkwijze

De buigsterkte wordt bepaald aan de hand van Vergelijking 12

Vergelijking 12: Bepaling van de buigsterkte van een kubus.

$$Rf = \frac{1{,}5 * Ff * l}{b^3}$$

Hierbij staat Rf voor de buigsterkte (in N/mm²), b voor de breedte/dikte van de balk ter hoogte van het breukvlak (in mm), Ff voor de uitgeoefende buigbelasting op het moment van breken (in N) en l de afstand tussen de steun rollers (in mm).

Vermits er variaties mogelijk zijn in de groottes van de stalen, moet deze formule echter aangepast worden. Een andere methode wordt toegepast door b³ te vervangen door (b*d²), waarin b en d staan voor de breedte en de dikte van het staal, beide in mm. Deze aanpassing van de formule is terug te vinden in de norm EN 1015-11 (1999): 'Beproevingsmethoden voor metselmortel – Deel 11: Bepalen van de buigsterkte en druksterkte van verharde mortel'. Door deze aanpassingen wordt de bovenstaande formule omgevormd naar Vergelijking 13

Vergelijking 13: Bepaling voor de buigsterkte van een balk.

$$Rf = \frac{1{,}5 * Ff * l}{(b * d^2)}$$

Na het bepalen van de benodigde buigbelasting om het staal te breken, werden de afmetingen b en d van het staal bepaald op de positie van het breukvlak. Deze afmetingen werden vervolgens gebruikt voor het bepalen van buigsterkte van het staal.

De druksterkte test vindt plaats door de helften, bekomen na de buigsterkte test, centraal in het toestel te plaatsen zodat de stalen lateraal maximaal ± 0,5 mm afwijken van het centrum en dat longitudinaal de stalen ± 10 mm verder uitsteken. De test wordt gestart en de druk wordt aan een constant tempo verhoogt aan 2400 ± 200 N/s totdat het proefstuk breekt. De bekomen uitgeoefende kracht (F_c) op het moment van breken kan vervolgens samen met het oppervlak van de drukplaat (1600 mm²) gebruikt worden ter bepaling van de druksterkte (R_c) aan de hand van Vergelijking 14.

Vergelijking 14: Bepaling van de druksterkte

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

3.3.7 Bepaling van de waterdampdoorlatendheid

Het bepalen van de waterdampdoorlatendheid gebeurt aan de hand van norm NBN EN 15803 (2010) Instandhouding van cultureel erfgoed – Beproevingsmethoden – Bepaling van de waterdampdoorlatendheid (δp). Deze norm beschrijft de vereisten en de procedure voor het bepalen van de waterdampdoorlatendheid. De waterdampdoorlatendheid kan hierbij bepaald worden via de *dry cup test* en de *wet cup test*. In deze opstelling is er enkel gebruik gemaakt van de *wet cup test*.

Volgens Barsotelli et al (2001) wordt de waterdampdoorlatendheid beïnvloed door de verbondenheid van de poriën en de afwezigheid van condensatiefenomenen. Indien een mortel bestaat uit een goed verbonden netwerk van grote poriën zal de waterdampdoorlatendheid hoog zijn. In het geval dat deze porositeit voornamelijk opgebouwd is uit microporiën, zal er mogelijk condensatie van water plaatsvinden in deze poriën, waardoor de waterdampdoorlatendheid zeer laag zal uitvallen.

Voor deze test is er gebruik gemaakt van een klimaatkamer in het Magnel Laboratorium voor beton onderzoek te Zwijnaarde. Deze klimaatkamer heeft een temperatuur van 20 °C en een luchtvochtigheid van 60 ± 3 %.

Volgens de norm moet er gebruik gemaakt worden van een houder bestaande uit materiaal dat resistent is tegen corrosie. Om niet-lineaire dampvloei te voorkomen, moet 90% van het oppervlak van de houder door het staal gedekt kunnen worden. In deze houder wordt een verzadigde $MgSO_4 \cdot 7\ H_2O$ oplossing (epsomzout, oplosbaarheid = 710 g/L in water) geplaatst, die zal zorgen voor een luchtvochtigheid van 90 % bij 20 °C. Andere benodigde toestellen zijn een weegschaal die kan wegen met een nauwkeurigheid van ± 0,01 g en die in staat is de totale massa van het staal met de beker te dragen en een schuifmaat die kan meten met een nauwkeurigheid van 0,1 mm.

De afmetingen van een staal moeten voldoen aan de volgende regels.

- De dikte mag maximaal 20 mm bedragen, of in het geval van heterogene materialen tenminste twee maal zo groot zijn als de grootste korrelgrootte.
- De diameter moet minstens het dubbele bedragen van de dikte, of in het geval van heterogene materialen tenminste vijf maal de grootste korrelgrootte.
- Het test gebied (bepaald door het rekenkundig gemiddelde tussen het onderste en bovenste vrije oppervlak) mag niet meer dan 10 % afwijken van een van de vrije vlakken.

De norm laat evenwel ruimte voor eventuele beperkingen van de afmetingen. De dikte van de stalen wordt bepaald door middel van vier schuifmaatmetingen waarvan het gemiddelde als waarde gebruikt wordt voor de dikte.

Voordat de *cup test* kan uitgevoerd worden moeten de stalen eerst een voorconditionering ondergaan waarin de zijkanten afgeplakt worden met afdichtingstape en ze met een open kant naar boven in de testkamer geplaatst worden. De testkamer heeft een temperatuur van 20 ± 1 °C en een luchtvochtigheid van 60 ± 3 %, waaraan ze zich zullen aanpassen. De *cup test* zal slechts kunnen aanvangen wanneer een constante massa bereikt wordt tussen twee metingen met een interval van 24 h.

Werkwijze

Bij het aanvangen van de test worden de stalen, in de testkamer, op de houder geplaatst zodat de vrije oppervlakken zich aan de onder en bovenkant bevinden (Figuur 23). Hierbij worden de randen afgesloten zodat de lucht enkel kan migreren via de poriën van het staal. De houder bevat een minimum van 15 mm oplossing die bij 20 °C een constante luchtvochtigheid van 90 % behoudt in de beker. Ten gevolge van de differentiële partiële dampdruk die hierbij gevormd wordt zal er waterdamp migreren via het staal. Door op regelmatige tijdstippen de massa van het staal te bepalen is het mogelijk de waterdampdoorlatendheid te analyseren.

Figuur 23: Opstelling ter bepaling van de waterdampdoorlatendheid. (Foto: M. De Clercq)

Het analyseren van de waterdampdoorlatendheid vindt plaats door de gemeten massaverandering in functie van de tijd te plotten. Hierbij vormt de helling van de lineaire regressie lijn van het lineaire deel van de curve de waterdampvloeisnelheid G (kg/s). Deze waarde kan vervolgens gebruikt worden om aan de hand van Vergelijking 15 de waterdamp permeantie W te bepalen.

Vergelijking 15: Bepaling van de waterdamp permeantie.

$$W = \frac{G}{A.\Delta p_v}$$

In Vergelijking 15 staat A voor het test oppervlak (in m²), wat overeen komt met het gemiddelde van het contact oppervlak met de atmosfeer in de klimaatkamer en het contact oppervlak met de ingesloten ruimte. De waarde Δp_v geeft het verschil in dampdruk over het staal weer (in Pa), wat bepaald kan worden uit de gemiddelde temperatuur en de relatieve vochtigheid, aan de hand van Vergelijking 16 en Vergelijking 17.

Vergelijking 16: Bepaling van de waterdampdruk.

$$p = \varphi.610{,}5.e^{\frac{17{,}269.\theta}{237{,}3+\theta}}$$

Vergelijking 17: Bepaling van het verschil in dampdruk.

$$\Delta p_v = p_{intern} - p_{extern}$$

Door de waarde van de waterdamppermeantie (W) bekomen uit Vergelijking 15 is het mogelijk de waterdampdoorlatendheid (δ, in kg/m.s.Pa) te bepalen gebruik makend van Vergelijking 18, waarin d staat voor de dikte van het staal (in m).

Vergelijking 18: Bepaling van de waterdampdoorlatendheid.

$$\delta = W.d$$

3.3.8 Bepaling van de capillaire absorptie

De water absorptie coëfficiënt is een maat voor de hoeveelheid water dat een voorwerp kan absorberen in een bepaalde periode per oppervlak. Doorgaans wordt deze test gebruikt voor het evalueren van natuursteen in functie van een bepaalde applicatie of als een indirecte maat van verwering. Stenen met een hoge waterabsorptie zijn bijvoorbeeld gevoeliger voor vlekvorming en zoutmigratie, waardoor ze minder geschikt bevonden worden op plaatsen waar ze regelmatig in contact komen met water. Volgens Pavia & Treacy (2006) wordt er verder ook gesteld dat de aard van de poriën een belangrijke invloed heeft op de resistentie tegen vorstverwering. Bij het bevriezen van water, zal dit water uitzetten. In het geval van goed verbonden poriën zal dit zorgen voor de migratie van niet bevroren water naar aanliggende poriën. Wanneer het poriënnetwerk slecht verbonden is zal de uitzetting van water zorgen voor het opwekken van interne spanningen, die resulteren in schade aan het materiaal.

De absorptie van water in de capillaire absorptie test is het gevolg van capillaire krachten. Deze krachten resulteren uit de interacties tussen water, lucht en poriewanden (Hall & Hoff, 2002). Wanneer de contacthoek θ, de oppervlaktespanning σ en de straal van de porie gekend zijn, kan de capillaire druk P_c tussen water en lucht berekend worden aan de hand van de vergelijking van Young-Laplace (Vergelijking 19).

Vergelijking 19: Vergelijking van Young-Laplace voor capillaire druk.

$$P_c = \frac{2 * \sigma * \cos(\theta)}{r}$$

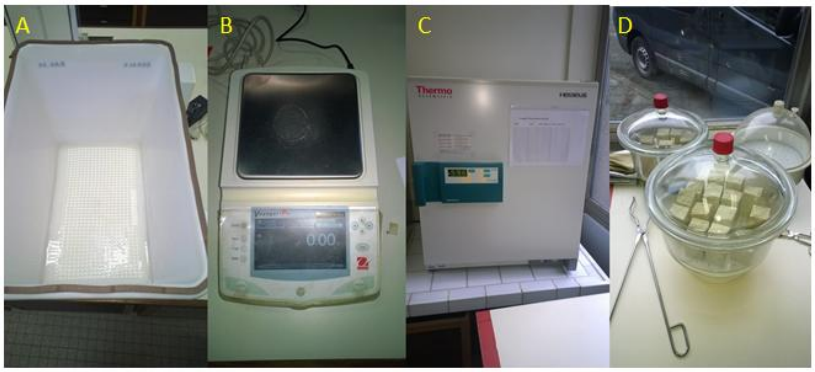
Ten gevolge van capillaire krachten zal water opgenomen en omhoog gestuwd worden in het poreuze materiaal (Shepherd, 2009). Het stromen van water in poriën wordt beschreven door Vergelijking 20.

Vergelijking 20: Vergelijking voor de capillaire stroomsnelheid volgens Poiseuille

$$v = \frac{r^2}{8\eta}\left(\frac{\Delta p}{l}\right)$$

Hierin is l gelijk aan de lengte van het capillair (m), Δp het drukverschil (N/m2), r de porie straal en η de dynamische viscositeit (Ns/m2). Volgens Poiseuille zal waterabsorptie dus sneller verlopen in stenen met grotere poriën dan in stenen met kleinere.

Voor het uitvoeren van de capillaire absorptie test, moet de opstelling voldoen aan de norm EN 1925 (1999) *Natural Stone test methods – Determination of water absorption coefficient by capillarity*. Volgens de norm, wordt de test uitgevoerd in een container met een vlakke bodem, een dragende structuur voor de stalen (bestaande uit niet-oxiderend en niet-absorberend materiaal). De gebruikte container en overige toestellen zijn te zien in Figuur 24.



Figuur 24: Foto's van toestellen gebruikt bij het uitvoeren van de capillaire absorptie test. A) kunststoffen container met draagnetjes omwikkeld met kunststof, B) Voyager pro weegschaal, C) Heraeus oven en D) exsiccator. (Foto: M. De Clercq)

Conform met de norm werd de test uitgevoerd in een laboratorium met een kamertemperatuur van 20 ± 5°C.

De gebruikte stalen hebben afmetingen van 39,9 ± 0,2 mm * 39,9 ± 0,8 mm * XX mm. Waarbij XX staat voor een variabele hoogte als gevolg van het breken van de stalen bij de buigsterkte test. De hoogte van de stalen varieert tussen 43 ± 1 mm en 112 ± 1 mm.

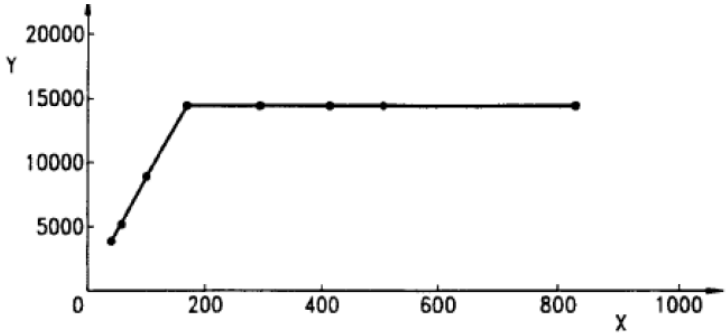
Voordat de test kan worden uitgevoerd moeten de stalen gedroogd worden zoals beschreven in 3.3.5.

Werkwijze

De capillaire absorptietest vangt aan met het wegen en het meten van de afmetingen van het basisoppervlak van de droge stalen, tot op respectievelijk 0,01 g en 0,1 mm nauwkeurigheid. Vervolgens worden de stalen op de dragende structuur in de bak geplaatst en wordt de bak gevuld met water zodanig dat de basis van de stalen 3 ± 1 mm onder water staan. Hierna wordt de timer gestart en wordt het water op een constant niveau gehouden door, indien nodig, water toe te voegen.

Na bepaalde, initieel kleine, maar stelselmatig groter wordende intervallen, worden de stalen een voor een verwijderd, lichtjes afgedept met een vochtige doek, gewogen en terug geplaatst. Bij elke meting wordt de tijd bijgehouden vanaf het begin van de test.

De resultaten worden weergegeven aan de hand van een grafiek waarin de waterabsorptie (g/m²) uitgezet wordt versus de vierkantswortel van de tijd (√s). Normaal gezien is het mogelijk de resultaten voor te stellen met twee rechten, zoals te zien is in Figuur 25.



Figuur 25: Grafiek met de vierkantswortel van de tijd (x-as) versus de waterabsorptie (y-as). (EN 1925:1999)

In het geval dat de correlatiecoëfficiënt tussen beide rechten groter is dan 0,9 of 0,95, is het mogelijk de waterabsorptiecoëfficiënt te bepalen uit de hellingen van regressiecurven van beide rechten. De waterabsorptiecoëfficiënt is verder ook voor elk punt te berekenen aan de hand van de volgende vergelijking (Vergelijking 21):

Vergelijking 21: Bepaling van de absorptie coëfficiënt volgens methode 1

$$C = \frac{m_i - m_d}{A * \sqrt{t_i}}$$

Waarbij C staat voor de waterabsorptie coëfficiënt, m_i en m_d voor de initiële massa en de massa op een bepaald tijdstip, A voor het ondergedompelde oppervlak van de voet van het geteste staal en t_i voor het tijdstip van de meting.

Deze formule kan echter niet gebruikt worden wanneer er aan de voorwaarde van een correlatiecoëfficiënt van 0,9 of 0,95 niet voldaan is. Wat erop duidt dat er niet genoeg metingen zijn uitgevoerd tijdens het eerste deel van de grafiek. Indien er niet aan de bovenstaande voorwaarden voldaan is, moet de proef herhaald worden met meer frequente metingen in het begin van de proef.

3.3.9 Bepaling van de waterabsorptie bij atmosferische druk

Voor het bepalen van de waterabsorptie bij atmosferische druk wordt er gebruik gemaakt van de norm EN 13755 (2008) Beproevingsmethoden voor natuursteen – Bepaling van waterabsorptie bij atmosferische druk. De waterabsorptie van een steen bij atmosferische druk geeft weer hoeveel water die steen kan absorberen als een percentage van de massa wanneer deze volledig is ondergedompeld is bij atmosferische druk versus de totale droge massa van de steen.

De waterabsorptie bij atmosferische druk wordt vaak gebruikt bij de evaluatie van een bepaald gesteente type voor het gebruik in een omgeving waar deze regelmatig in contact komt met water. Indien een gesteente een grote waterabsorptie zou hebben kan dit aanleiding geven tot een verandering in uitzicht bij bevochtiging, een grotere gevoeligheid voor vlekvorming en vuilafzetting in de oppervlaktetextuur (WTCB, z. j.).

Voor het uitvoeren van de test wordt er gebruik gemaakt van dezelfde bakken als bij het bepalen van de capillaire absorptie (Figuur 24, A). De gebruikte proefstukken hebben dezelfde afmetingen als voor de capillaire absorptie.

Vooraleer de test kan worden uitgevoerd worden de stalen gedroogd.

Werkwijze

Volgens de norm EN 13755 (2008) moeten de droge stalen gewogen worden met een nauwkeurigheid van 0,01 g, waarna ze op de draagnetjes geplaatst worden op een afstand van minstens 15 mm van elkaar.

- Op t_0 wordt er kraantjeswater (van 20 ± 10 °C) toegevoegd totdat de stalen voor de helft onder water staan.
- Op tijdstip t_0 + 60 ± 5 min wordt het waterniveau verhoogd zodat de stalen voor 3/4^{e} ondergedompeld zijn.
- Op tijdstip t_0 + 120 ± 5 min wordt het waterniveau weer verhoogd totdat alle stalen zich 25 ± 5 mm onder water bevinden.

48 h na het starten van de test (t_0 + 48 ± 2 h) worden de stalen voor maximaal 1 min uit het water gehaald, afgedept en gewogen met een nauwkeurigheid van 0,01 g, waarna ze terug in het water worden geplaatst. Elke 24 ± 2 h worden de stalen op deze manier gewogen totdat een constante massa bereikt wordt. Dit wordt bereikt wanneer de bekomen massa, minder dan 0,1 % verschilt van de vorige weging. De uiteindelijk bekomen massa is dan de verzadigde massa van het staal.

De waterabsorptie bij atmosferische druk wordt bepaald aan de hand van Vergelijking 22.

Vergelijking 22: bepaling van de waterabsorptie bij atmosferische druk.

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} * 100$$

Hierin is A_b de waterabsorptie bij atmosferische druk, m_s de massa van het verzadigde staal en m_d de massa van het droge staal.

3.3.10 Bepaling van de permeabiliteit

Permeabiliteit (ook wel doorlatendheid of doorlaatbaarheid geheten) duidt op het gemak waarmee een vloeistof of een gas doorheen een gesteentevolume kan dringen en wordt voorgesteld aan de hand van het symbool K (Shepard, 2009). De permeabiliteit is afhankelijk van de effectieve porositeit, de vorm en grootte van de poriën, de verbindingen tussen de poriën en de vloeistofeigenschappen. Het is mogelijk dat een gesteente een hoge porositeit heeft maar met een lage permeabiliteit ten gevolge van de geringe verbinding tussen de individuele poriën. Doordat in een zeer poreus materiaal, sommige macroporiën meer verbonden zijn dan andere, worden in het algemeen hoge waarden voor de permeabiliteit gemeten, met een vrij grote variatie. De bekomen waarden van de permeameter verschillen niet zo heel erg veel van elkaar. Het grote verschil in permeabiliteit is het gevolg van de

benodigde conversie die de waarden van de permeameter omzet naar waarden voor de permeabiliteit. De conversie maakt gebruik van een logaritme, waarbij initieel kleine verschillen al snel aanleiding kunnen geven tot sterk verschillende uitkomsten.

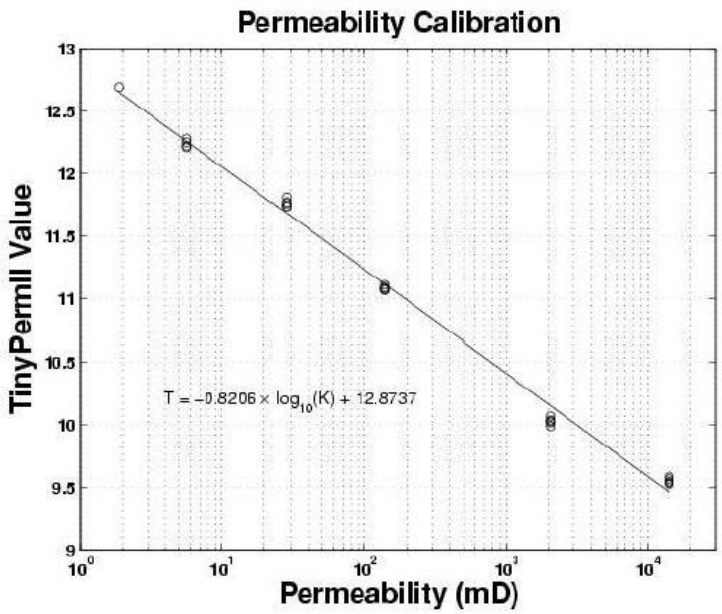
Voor het bepalen van de permeabiliteit wordt er gebruik gemaakt van de *TinyPerm II, Portable Air Permeameter* van *New England Research Inc.* (Figuur 26).

Figuur 26: TinyPerm II. Bestaande uit een microprocessor en controle toestel (1), een zuiger met handvat (2), een vacuüm cilinder (3), de drukmeter behuizing (4), een mondstuk (5). (Foto: M. De Clercq)

Indien de permeameter wordt toegepast op een materiaal met een zeer lage permeabiliteit (< 10 mD), bestaat er een onzekerheid over de nauwkeurigheid van de TinyPerm II (Filomena, Hornung & Stollhofen, 2014)

Werkwijze

Vooraleer de permeabiliteit bepaald werd, werden de stalen gedroogd, waarna de permeabiliteit bepaald werd. De bekomen TinyPerm II waarden moesten vervolgens omgezet worden naar permeabiliteit (K) waarden. Dit werd uitgevoerd aan de hand van de trend lijn in Figuur 27.



Figuur 27: Kalibratie curve voor de permeabiliteit (uit TinyPerm II User's Manual).

De vergelijking van de trend lijn in Figuur 27 (Vergelijking 23) moet omgevormd worden naar Vergelijking 24, ter bepaling van de permeabiliteit (K).

Vergelijking 23: Vergelijking van de trendlijn bij de kalibratie van de permeabiliteit K (Figuur 27).

$$T = -0{,}8206 * \log_{10}(K) + 12{,}8737$$

Vergelijking 24: Vergelijking voor het bepalen van de permeabiliteit K (in mD)

$$K = 10^{(\frac{T-12{,}8737}{-0{,}8206})}$$

3.3.11 Bepaling van de droogsnelheid

De droogsnelheid van een mortel heeft een belangrijke impact op de waterhuishouding van een gevel. Wanneer deze te laag is zal dit resulteren in een te natte gevel, met de mogelijke bevordering van verwering tot gevolg. De droogsnelheid werd geëvalueerd volgens Cnudde (2005).

Voor het bepalen van de droogsnelheid wordt er gebruik gemaakt van de klimaatkamer met een constante temperatuur van 20°C en een constante relatieve vochtigheid van 60% in het Magnel Laboratorium voor beton onderzoek te Zwijnaarde.

Voor het bepalen van de droogsnelheid wordt er gebruik gemaakt van dezelfde bakken als bij het bepalen van de capillaire absorptie (Figuur 28).

Werkwijze

Voor het bepalen van de droogsnelheid moeten de stalen eerst volledig verzadigd zijn met water. Om dit te bekomen werd de droogsnelheidstest uitgevoerd met de stalen die verzadigd zijn tijdens het bepalen van de waterabsorptie bij atmosferische druk. Vervolgens wordt de massa van de stalen op regelmatige tijdstippen bepaald, zodat de massa afname in functie van de tijd bepaald kan worden. Bij het bepalen van de droogsnelheid worden de stalen normaal gezien afgeplakt zodat enkel het bovenvlak blootgesteld wordt. Vermits de

stalen nog nodig zijn in andere testen en het aanbrengen van de tape zou zorgen voor irreversibele veranderingen in de mortel eigenschappen, werden de stalen in dit geval getest zonder af te plakken. Hierdoor moet het massaverlies genormaliseerd worden door het vrije oppervlak van de proefstukken.

Figuur 28: Opstelling bepaling van de droogsnelheid. (Foto: M. De Clercq)

3.3.12 Thermomechanische analyse

Het doel van een thermomechanische analyse (TMA) is het bepalen van de thermische uitzettingscoëfficiënt (α). Het bepalen van de thermische uitzettingscoëfficiënt is belangrijk voor het gebruik van mortels die vaak blootgesteld worden aan temperatuursveranderingen. Indien een mortel blootgesteld wordt aan een vrij sterke temperatuurtoename kan dit zorgen voor de vorming van spanningen indien er niet voldoende plaats is om uit te zetten. In het geval dat er (relatief grote) verschillen zijn in de thermische uitzettingscoëfficiënt van de mortel en de steen waarop deze is aangebracht kan dit zorgen voor de vorming van scheuren tussen de mortel en de steen.

Voor het bepalen van de thermische uitzettingscoëfficiënt wordt er gebruik gemaakt van een *2940 thermomechanical analyzer* (Figuur 29) van het merk 'TA instruments' in het '*Department of Inorganic and Physical Chemistry*' van de Universiteit Gent. Dit toestel wordt bestuurd door het programma *Thermal advantage*, waarna de data grafisch geanalyseerd kon worden via het programma *Universal analysis*. Dit toestel heeft de mogelijkheid de volume expansie en de temperatuur van een staal te bepalen tot op 0,1 µm en 0,001 °C nauwkeurig

Figuur 29: *Thermomechanichal analyser* 1940 van het merk TA instruments. (Foto: M. De Clercq)

De gebruikte stalen zijn geboord of, indien dit niet mogelijk was, gezaagd en hebben een diameter van ongeveer 1 cm en een variabele hoogte gaande van ± 20 mm tot ± 27 mm. Bij het voorbereiden van de stalen bleek echter dat mortel Lo/Ge 1 te bros was en dat er geen substaal van gemaakt kon worden.

Werkwijze

De thermische uitzettingscoëfficiënt werd bepaald door gebruik te maken van een script met een temperatuurtoename van 5 °C/min tot een maximale temperatuur van 80 °C.

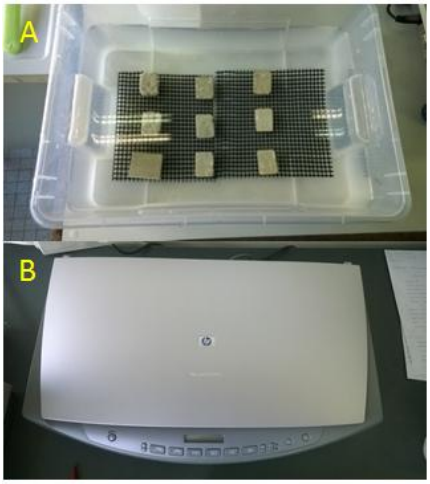
Na het bepalen van de lengte van het staal, kan de test uitgevoerd worden. De bekomen resultaten kunnen vervolgens met de software 'Universal analysis' grafisch worden geanalyseerd.

3.3.13 Veroudering door thermische schok

Het doel van deze test is het evalueren van de veroudering (meer bepaald de kleurverandering) van de stalen ten gevolge van herhaalde cycli van thermische schok volgens norm NBN EN 14066 (2013): Beproevingsmethoden voor natuursteen – Bepaling van de weerstand tegen veroudering door plotselinge temperatuurswisseling.

Het doel van deze test is het nabootsen van de situatie waarin gevelstenen zich bevinden op het moment van sterke regen of door een sterke afkoeling in de winter na een zonnige dag. Het risico van de thermische schok die hierbij gepaard gaat is de vorming van interne spanningen en mogelijks ook scheuren ten gevolge van een verschil in de thermische uitzettingscoëfficiënt van de verschillende mineralen of verschillende materialen (bv. mortel-steen). Verder is het ook mogelijk dat er ten gevolge van de plotse temperatuursveranderingen oxidatie en vlekvorming optreedt in de stalen.

In de gebruikte opstelling wordt er gebruik gemaakt van een bak met een afneembaar deksel uit kunststof (Figuur 30, A). De teststalen rusten op met kunststof omwikkelde stalen draag netjes. Het acclimatiseren van de stalen en het induceren van thermische schok werd bewerkstelligd door een oven op 70 °C. Verder is er gebruik gemaakt van een 'hp' scanjet 8200 scanner (Figuur 30, B) voor de visuele evaluatie.

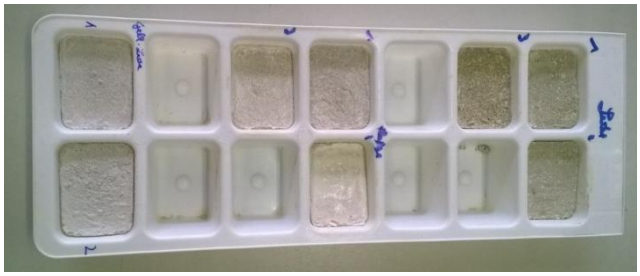


Figuur 30: Toestellen voor evaluatie van thermische schok. A) Bak met dragers en B) scanjet 8200. (Foto: M. De Clercq)

De stalen zijn 3 weken voor het uitvoeren van de test gemaakt, waarna ze drie weken hebben kunnen uitharden in een vochtige omgeving. Vooraleer de stalen in de oven

geplaatst werden, werden ze eerst gepolijst, om een effen oppervlak te bekomen zonder kalkuitbloeiingen. Hierna werden ze in de oven aan 70°C gedroogd. De reden dat voor deze test de stalen niet aan 40 °C verwarmd werden is dat door het gebruiken van een hogere temperatuur de thermische schok groter werd en dat deze stalen enkel gebruikt werden voor deze test.

De algemene vorm van de stalen is afhankelijk van de vorm van de gebruikte mal, dewelke in dit geval een houder is om ijsblokjes te maken (Figuur 31). De dikte van de stalen is variabel en gaat van ongeveer 5 ± 1 mm tot 12 ± 1 mm, dit ten gevolge van de variabele opvulling van de mal en een verschillende abrasiediepte bij het polijsten. De gebruikte samenstellingen komen overeen met de samenstellingen van reeks 1. Een uitzondering hierop is de samenstelling met gebroken Ledesteen 1, voor deze samenstelling is gekozen voor een samenstelling gelijkaardig aan mortel Gebr. Lede 4 uit reeks 2.



Figuur 31: Mal voor proefstukken verwering door thermische schok. (Foto: M. De Clercq)

Werkwijze

Volgens de norm moeten de stalen temperatuursveranderingen ondergaan in cycli, bestaande uit een periode van 18 ± 1 h aan 70 ± 5 °C, gevolgd door een periode van 6 ± 0,5 h volledig ondergedompeld in kraantjeswater aan 20 °C. Het waterniveau moet hierbij een hoogte van 60 ± 10 mm boven de stalen bedragen.

De evaluatie van de kleur vindt vervolgens plaats om de tien cycli door een scan te nemen van de stalen inclusief een *Macbeth colour chart*, teneinde een kleuren kalibratie uit te voeren via ImageJ. Nadat een kleuren kalibratie is uitgevoerd, wordt voor elk proefstuk de RGB-waarden bepaald (Rood, Groen, Blauw bitwaarden).

4 Resultaten en discussie

4.1 Consistentie

Zoals reeds vermeld moet de beoogde consistentie niet tot het consistentiegebied 4 behoren, waardoor deze test niet echt geschikt is. De grenswaarde van de schokmaat is 1,2. Wanneer de resultaten van de schoktest hoger zijn dan 1,2, behoren deze tot consistentiegebied 4 en zijn ze te vloeibaar. De resultaten van de consistentietest bevinden zich in Tabel 8.

Tabel 8: Resultaten van de consistentietest.

	Mortel	Schokmaat (F)
Reeks 1	Lede 1	1,1
(5 maand)	Lede 2	1,3
	Lede 3	1
Reeks 2	Lede 4	1
(3 maand)	Lede 5	1,3
	Lede 6	1,1
Reeks 1	Lo/Ge 1	1,1
(5 maand)	Lo/Ge 2	1,2
	Lo/Ge 3	1
Reeks 2	Lo/Ge 4	1
(3 maand)	Lo/Ge 5	1,2
	Lo/Ge 6	1
Reeks 1	Gebr. Lede 1	1,5
(5 maand)	Gebr. Lede 2	1,1
Reeks 2	Gebr. Lede 4	1
(3 maand)	Gebr. Lede 5	1,1

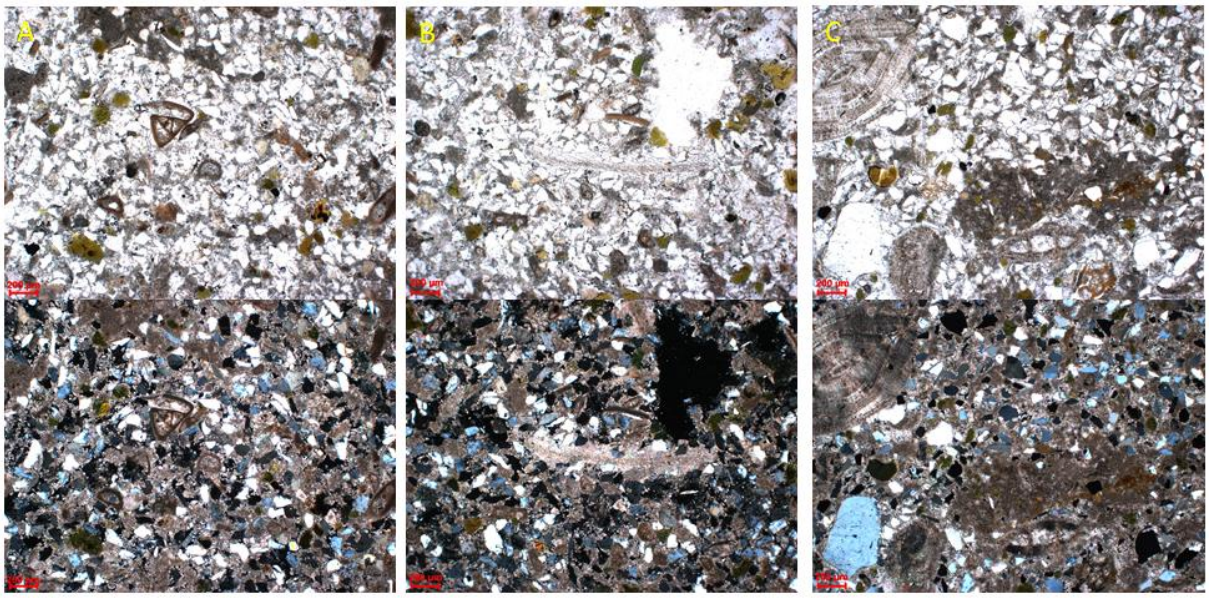
De bekomen schokmaten geven gelijkaardige resultaten voor reeks 1 en reeks 2 (met uitzondering van Gebroken Ledesteen 1 en 4). De mortels vertonen een hogere verwerkbaarheid bij de samenstellingen waarbij een hogere B/Ag verhouding gebruikt wordt. Voor eenzelfde B/W resulteerde dit in een grotere hoeveelheid water die toegevoegd werd, waardoor het geheel vloeibaarder werd. Hierdoor hebben de mortels, met samenstelling Lede 2 en 5, een schokmaat waarbij ze tot consistentiegebied 4 horen en dus te vloeibaar zijn. De mortels met Lo/Ge als aggregaat hebben een goede consistentie en, op de mortel op Gebr. Lede 1 na, hebben de mortels met gebroken Ledesteen eveneens een goede consistentie.

4.2 Petrografie

4.2.1 Ledesteen

Voor een meer uitgebreide microscopische beschrijving wordt er verwezen naar 2.1.2.2. De Ledesteen is opgemaakt uit een vrij hoekig, fijnkorrelig, kwartszand en bevat glauconiet en fossielen. Zoals te zien in Figuur 32 (A,B en C) is de graad van porositeit vrij variabel. Buiten de deels omgezette foraminifeer in Figuur 32 (A) bevat Figuur 32 (B) eveneens een stuk bivalve schelp en Figuur 32 (C) een nummuliet.

- In Figuur 32 (A) is te zien dat de cementatie dun, maar homogeen verdeeld is.
- In Figuur 32 (B) is de cementatie niet homogeen verdeeld, met holtes tot gevolg.
- Het cement in Figuur 32 (C), is in grotere hoeveelheden aanwezig dan in Figuur 32 (A), en vormt zelfs kalknodules.

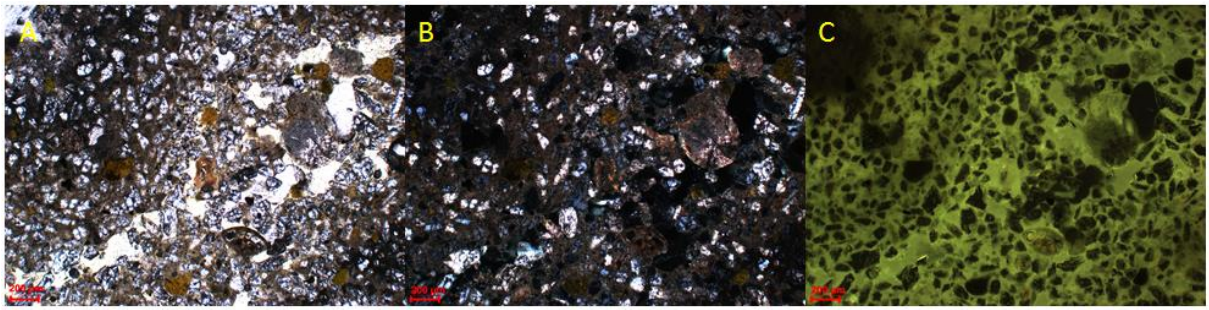


Figuur 32: foto's van slijpplaatjes van de Ledesteen. A (slijpplaatje 3421/4), B (slijpplaatje 34450) en C (slijpplaatje 35644): boven ppl, onder xpl.

4.2.2 Mortels met Lede zand

De mortels die opgemaakt zijn uit Lede zand worden gekenmerkt door grote hoeveelheden kwarts met in mindere mate ook glauconiet en nummulieten. Deze aggregaten zijn vrij hoekig, fijnkorrelig en bevinden zich in een fijnkorrelig calciet cement. Mineralogisch en qua fossielen is er een grote gelijkenis op te merken tussen de Ledesteen en de mortels met Lede zand. Deze gelijkenis was ook het uitgangspunt voor de keuze van dit aggregaat. In vergelijking met de Ledesteen bezitten de mortels een gelijkaardig raamwerk van kwarts, fossielen en glauconiet en is er een grotere hoeveelheid matrix aanwezig.

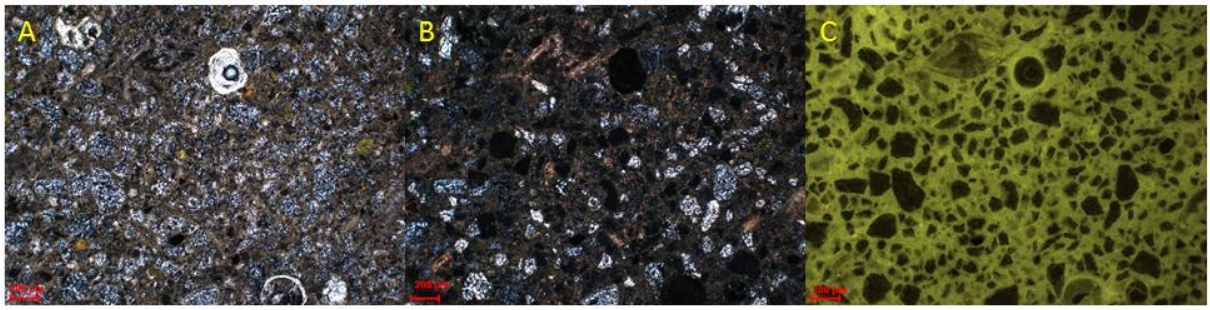
4.2.2.1 Lede 1



Figuur 33: Foto van een slijpplaatje van een mortel met samenstelling Lede 1. Van Links naar rechts: ppl (A), xpl(B) en fluorescentie (C).

Zoals te zien is op beeld A van Figuur 33, bevat de mortel vrij veel grote, onregelmatige poriën. Op het fluorescentiebeeld is er echter slechts een klein kleurverschil waar te nemen tussen het calcietcement en de grote poriën wat duidt op een grote microporositeit. Doorheen het slijpplaatje is te zien dat de mortel opgebouwd is uit cirkelvormige structuren, met aggregaten en rijk aan calciet, dewelke mogelijk nog $Ca(OH)_2$ bevatten. Deze structuren zijn ook geobserveerd in andere slijpplaatjes en zullen worden aangeduid als kalknodules. Doorheen het slijpplaatje is te zien dat de nodules verschillende afmetingen kunnen hebben. De grotere nodules bevatten in het centrum $Ca(OH)_2$, hetwelk mogelijk verwijderd is bij het maken van het slijpplaatje. Wanneer een kalknodule nog $Ca(OH)_2$ bevat, zal de porositeit ervan afnemen naar het centrum toe. In Figuur 33 is waar te nemen dat de nodules ook aggregaat fragmenten bevatten. Op het mogelijk niet-omgezette centrum na, zijn deze nodules goed gecementeerd en is er op het fluorescentiebeeld geen verhoogde porositeit waar te nemen aan de korrelranden, wat duidt op een goede binding. De porositeit neemt af in het centrum van de nodules. Buiten de nodules is de cementatie minder volledig en zijn er randen met een verhoogde porositeit waar te nemen rond verschillende korrels, wat duidt op een zwakkere binding tussen het cement en de granulaten. Buiten de grote mineralogische gelijkenis is er echter een groot verschil met de Ledesteen op te merken. Zelf in vergelijking met de meer poreuze Ledesteen varianten is de macroporositeit van deze mortel veel groter.

4.2.2.2 Lede 2

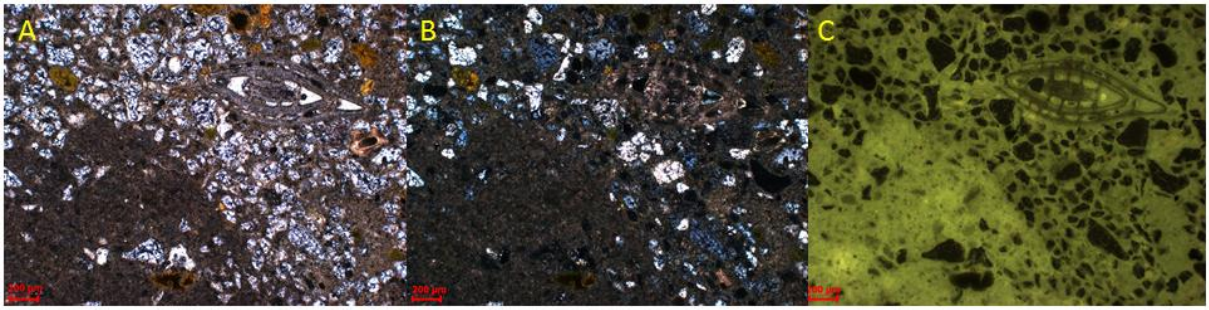


Figuur 34: Foto van een slijpplaatje van een mortel met samenstelling Lede 2. Van Links naar rechts: ppl (A), xpl (B) en fluorescentie (C).

In tegenstelling tot de mortel met samenstelling Lede 1 heeft de cementatie zich bij deze mortel meer homogeen voltrokken en bevinden er zich geen grote nodules met aggregaten. Wel zijn er ongeveer zuivere calcietnodules aan te treffen met een bijna cirkelvormige

harsmantel. Deze zijn waarschijnlijk gevormd doordat bij het uitharden van de mortelkrimp is opgetreden in deze nodules waardoor er een holte gevormd is die bij het inbedden gevuld is met hars. Het calcietcement heeft eveneens een hoge microporositeit en heeft een hogere porositeit rond de verschillende korrels. Deze mortels zijn in het slijpplaatje zeer gelijkaardig aan de Ledesteen. De cirkelvormige harsmantels zijn vrijwel de enige verschillen die waargenomen zijn.

4.2.2.3 Lede 3



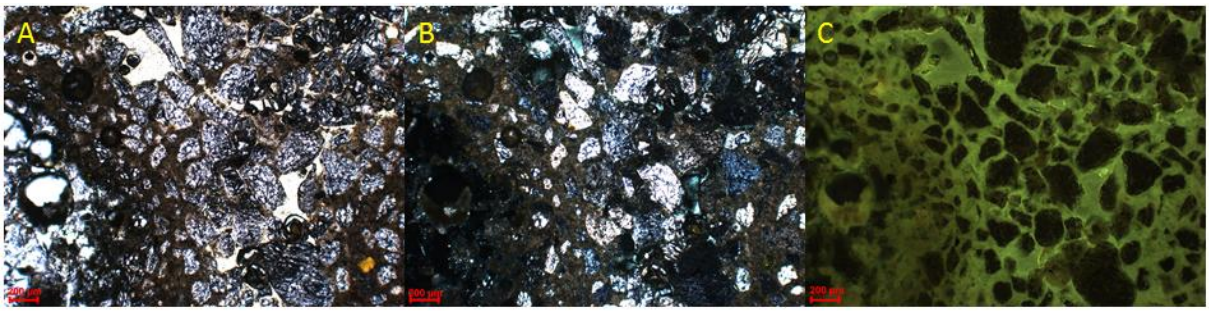
Figuur 35: Foto van een slijpplaatje van een mortel met samenstelling Lede 3. Van Links naar rechts: ppl (A), xpl (B) en fluorescentie (C).

In Figuur 35 (A, B en C) bevinden zich kalknodules, met weinig tot geen aggregaten in het centrum en veel aan de rand. De kalk ($Ca(OH)_2$) in het centrum is (deels) omgezet naar calciet. De korrels die zich tussen de verschillende nodules bevinden zijn in tegenstelling met mortel 1 omgeven door een vrij homogeen calcietcement, zonder grote holtes. Op het fluorescentiebeeld is op te merken dat de porositeit van het cement vrij hoog is, met een iets hogere porositeit in de nodules en een iets lagere tussen de korrels van de nodulerand. Het calcietcement vertoont eveneens een verhoogde porositeit rond verscheidene korrels, die niet wordt waargenomen bij de fossielen. Net zoals mortel Lede 2 is deze mortel gelijkaardig aan de Ledesteen. Het voorkomen van de kalknodules zorgt echter voor een duidelijk textuur verschil.

4.2.3 Mortels met Lochristi en Geel zand

De mortels met Lochristi en Geel zand bestaan voornamelijk (bijna uitsluitend) uit kwartskorrels, in een fijnkorrelig calcietcement. Het Lo/Ge aggregaat is grover dan het Lede zand en heeft een gelijkaardige afronding. Door de keuze voor dit aggregaat, bevatten de mortels geen fossielen. Andere verschillen zijn de grovere korrelgrootte en het algemeen hogere matrix gehalte.

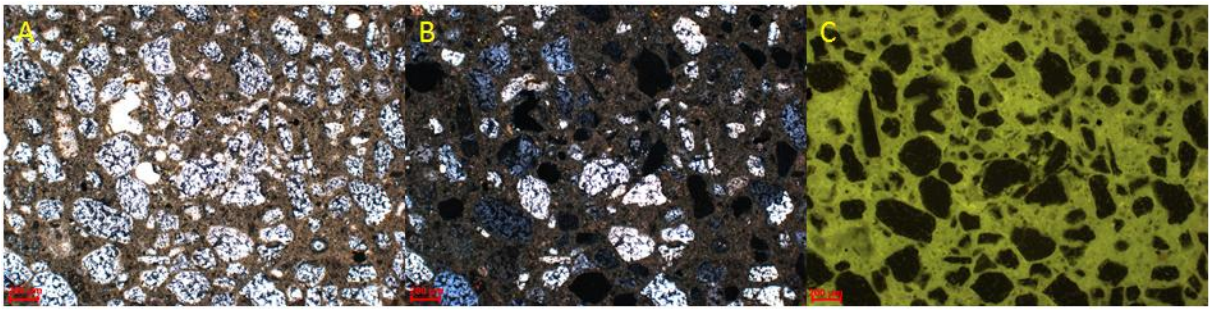
4.2.3.1 Lo/Ge 1



Figuur 36: Foto van een slijpplaatje van een mortel met samenstelling Lo/Ge 1. Van links naar rechts: ppl (A), xpl (B) en fluorescentie (C).

Op Figuur 36 is te zien dat deze mortel net zoals de mortel met samenstelling Lede 1 opgebouwd is uit nodules bestaande uit aggregaten en calcietcement met in het centrum van de grotere nodules niet omgezette kalk. De niet omgezette kalk is mogelijk verloren gegaan bij het maken van de slijpplaatjes. In het centrum van de nodules is de porositeit lager dan aan de randen (linksonder, Figuur 36, A, B en C) en is er eveneens een goede binding tussen de aggregaten en het calciet waar te nemen (geen fellere rand op fluorescentiebeeld). Tussen de nodules bevonden er zich tijdens het uitharden meer luchtbellen, met grote poriën en een dunnere cementatie tot gevolg. In deze zones bevinden er zich tevens ook randen van een verhoogde porositeit rond verschillende korrels. De nodules, grote poriën en het gebrek aan fossielen zorgen ervoor dat deze mortel onder een optische microscoop niet echt op de Ledesteen lijkt.

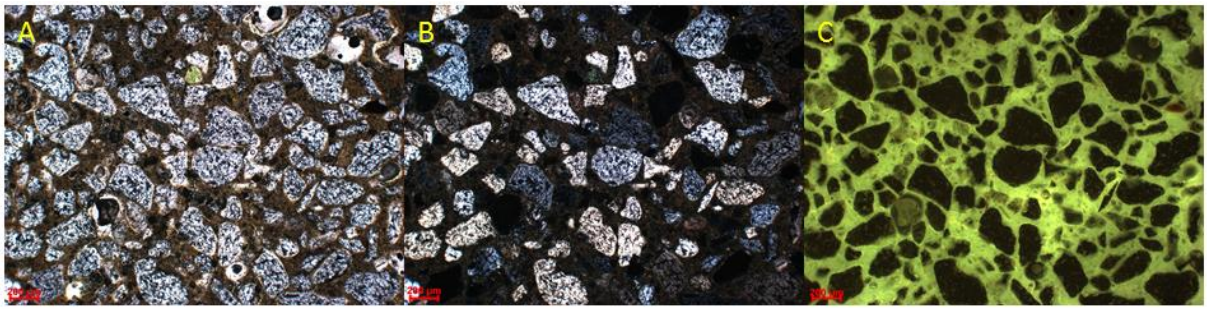
4.2.3.2 Lo/Ge 2



Figuur 37: Foto van een slijpplaatje van een mortel met samenstelling Lo/Ge 2. Van Links naar rechts: ppl (A), xpl (B) en fluorescentie (C).

In mortel Lo/Ge 2 valt op dat het calcietcement homogeen verdeeld is en dat de nodules ontbreken. In het cement bevinden zich slechts enkele kleine holtes, zoals waar te nemen in Figuur 37. De holtes zijn waarschijnlijk het gevolg van de aanwezigheid van luchtbellen tijdens het harden. Het gebrek aan opvallende intensiteitverschillen in het fluorescentiebeeld duidt op kleine verschillen in porositeit tussen de holtes en het cement, wat wijst op een hoge microporositeit van het cement. Rond de korrels is echter wel een hogere intensiteit op te merken wat duidt op een mindere binding van het cement met het aggregaat. Deze mortel vertoont al meer gelijkenissen met de Ledesteen dan mortel Lo/Ge 1, voornamelijk door de homogene verdeling van het cement.

4.2.3.3 Lo/Ge 3



Figuur 38: Foto van een slijpplaatje van een mortel met samenstelling Lo/Ge 3. Van Links naar rechts: ppl (A), xpl (B) en fluorescentie (C).

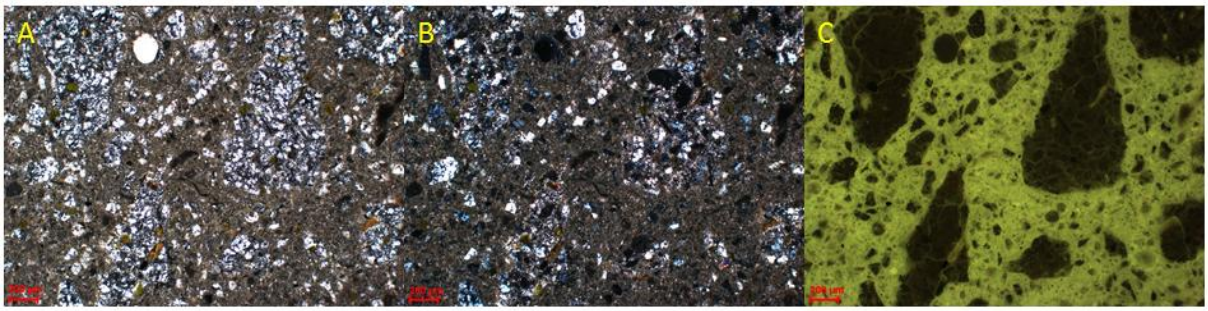
Deze mortel bevat geen duidelijke nodules verbonden met andere nodules door middel van aggregaten met slechts een geringe cementatie. De cementatie is vrij homogeen en dunner verdeeld dan bij mortel Lo/Ge 2 (Figuur 38), hoewel er wel zones waar te nemen zijn die duidelijk minder aggregaten bevatten, zoals te zien op Figuur 39. Hierop is te zien dat er verhoogde calcietconcentraties aanwezig zijn, dewelke mogelijks worden omgeven door een spiraalvormige textuur van aggregaten. Het voorkomen van de spiralen doet vermoeden dat deze structuren het gevolg zijn van een rollende beweging van kalkbolletjes tijdens het mengproces (gelijkaardig aan de vorming van een sneeuwbal). Het cement heeft eveneens een hoge microporositeit, met een verhoogde porositeitrand rond korrels. Ten gevolge van het dunnere cementlaagje tussen de korrels lijkt deze mortel (van de mortels met Lo/Ge) het meest op de Ledesteen. Het voorkomen van de kleine kalkrijkere delen is ook bij de Ledesteen waar te nemen (zie Figuur 32, C).

Figuur 39: Foto van een slijpplaatje van een mortel met samenstelling Lo/Ge 3. Hogere calciet concentratie, 'sneeuwbal motief'.

4.2.4 Mortels met Gebroken Ledesteen

De mortels, met gebroken Ledesteen als aggregaat, zijn opgebouwd uit kwarts, glauconiet en gebroken Ledesteenfragmenten in een calcietcement. Het aggregaat is aangemaakt door het breken en zeven van Ledesteen. Hierdoor zijn de aggregaatfragmenten veel hoekiger en grover dan de Lede en Lo/Ge zanden. Deze mortels lijken mineralogisch en qua fossielinhoud vrij sterk op de Ledesteen. Wel is op te merken dat tussen de verschillende stukken gebroken Ledesteen, het calcietgehalte veel hoger ligt dan in de fragmenten.

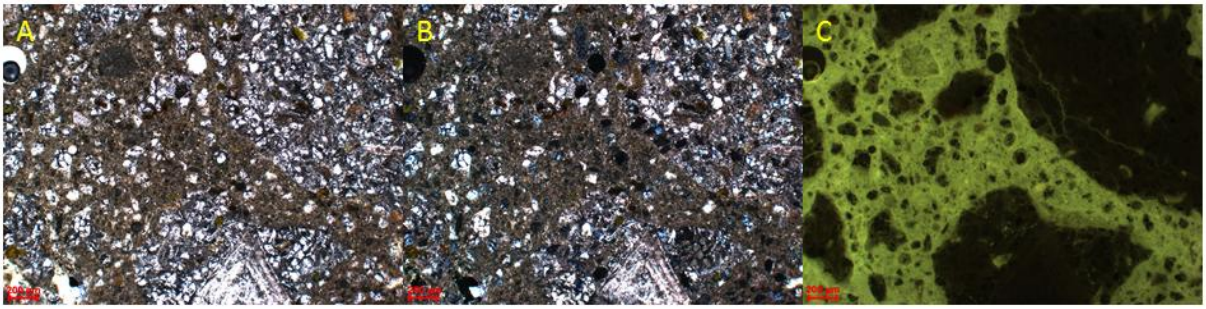
4.2.4.1 Gebr. Lede 2



Figuur 40: Foto van een slijpplaatje van een mortel met samenstelling Gebr. Lede 2.Van Links naar rechts: ppl (A), xpl (B) en fluorescentie (C).

Het cement van mortel Gebr. Lede 2 is homogeen verdeeld en vormt geen nodules (Figuur 40). Verder heeft het een hoge microporositeit en vertoont het geen hogere porositeit langsheen de korrelranden. De gebroken stukken Ledesteen vertonen een vrij lage tot afwezige porositeit. Wel is er een hogere porositeit waar te nemen in barsten van grovere brokken gebroken Ledesteen. In vergelijking met de mortels met Lede zand en Lo/Ge lijkt het gehalte aan cement veel hoger. Het schijnbaar hogere gehalte aan cement is waarschijnlijk het gevolg van de aanwezigheid van grovere korrels. Het is ook dit hogere cementgehalte rond de korrels dat zorgt voor het onderscheid met de Ledesteen. Indien dit cementgehalte lager zou zijn, is er weinig verschil met de Ledesteen op te merken.

4.2.4.2 Gebr. Lede 4



Figuur 41: Foto van een slijpplaatje van een mortel met samenstelling Gebr. Lede 4. Van Links naar rechts: ppl (A), xpl (B) en fluorescentie (C).

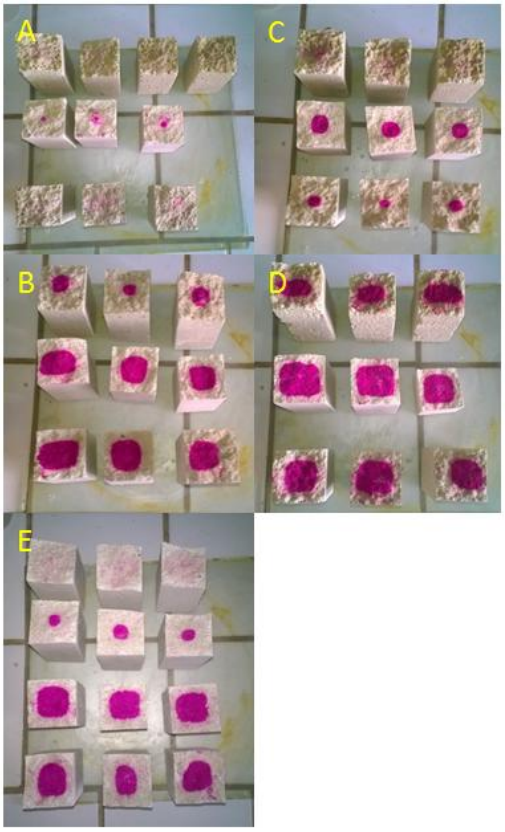
De mortel Gebr. Lede 4 verschilt microscopisch amper van de mortel Gebr. Lede 2 en zal niet verder worden besproken.

4.3 Carbonatatie

Na het breken van de proefstukken bij de buigsterkte test werd bij elk proefstuk de vordering van de carbonatatie geëvalueerd (zie Figuur 42). De resultaten voor elk staal zijn te vinden in Bijlage 3. In Tabel 9 bevinden zich de gemiddelde waarden met standaard deviaties voor elke samenstelling. Hoe groter de diepte hoe verder de uitharding gevorderd is.

Tabel 9: Gemiddelden en standaard deviaties van de resultaten van de Fenolfthaleïne test

	mortel	Uithardingsdiepte (mm)	
		gem.	St. dev
Reeks 1	Lede 1	x	x
	Lede 2	14,0	0,6
	Lede 3	x	x
Reeks 2	Lede 4	11,7	0,5
	Lede 5	8,1	1,5
	Lede 6	6,8	1,0
Reeks 1	Lo/Ge 1	x	x
	Lo/Ge 2	11,8	0,2
	Lo/Ge 3	13,8	0,4
Reeks 2	Lo/Ge 4	6,9	1,1
	Lo/Ge 5	4,6	0,2
	Lo/Ge 6	6,4	1,1
Reeks 1	Gebr. Lede 1	x	x
	Gebr. Lede 2	13,0	0,3
Reeks 2	Gebr. Lede 4	6,0	0,5
	Gebr. Lede 5	8,3	0,2

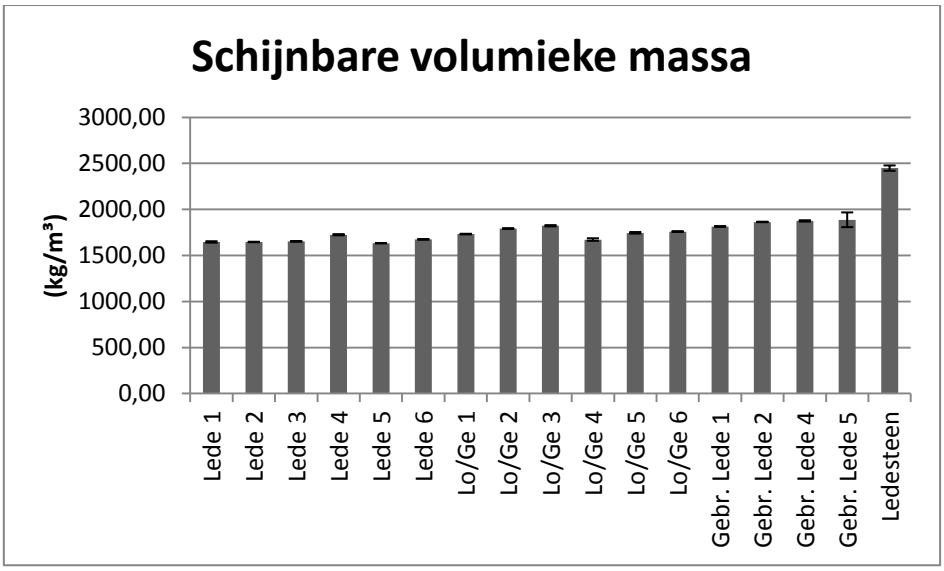


Figuur 42: Foto's evaluatie uithardingsdiepte. Van boven naar onder: A) Lede 1-3, B) Lede 4-6, C) Lo/Ge 1-3, D) Lo/Ge 4-6 en E)Gebr. Lede 1,2 en 4,5.

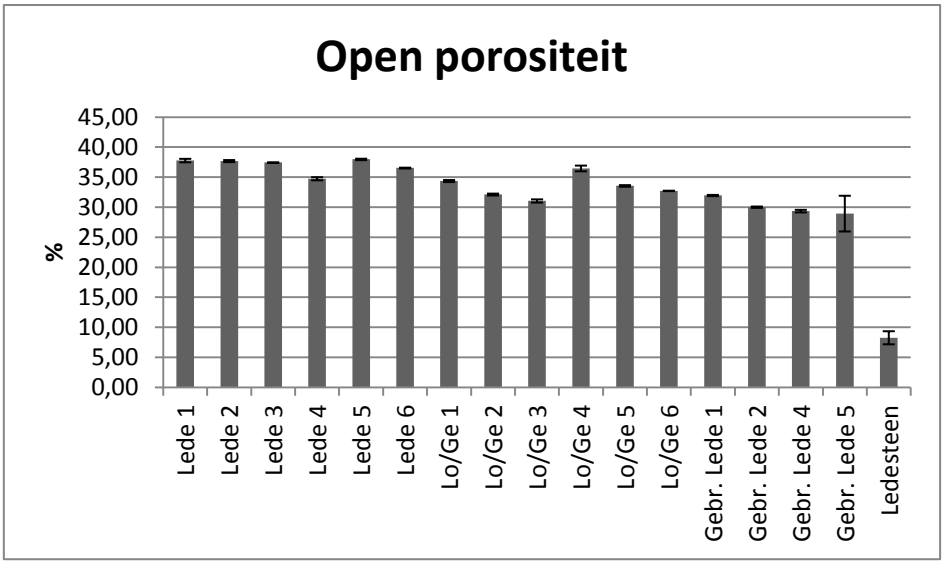
De waarden van de carbonatatiediepte geven een duidelijk verschil weer in vordering van de carbonatatie en hydratatie tussen de stalen van reeks 1 en reeks 2. Dit ten gevolge van het verder uitharden van reeks 1 gedurende 2 maanden. De uithardingsdiepte voor Lede 1 en 3, Lo/Ge 1 en Gebr. Lede 1 zijn niet te meten vermits er geen duidelijke roze kern waar te nemen was. Wel is er een rozige schijn te observeren, wat wil zeggen dat het uithardingsproces nog niet helemaal afgelopen is. De overige stalen hebben een duidelijke roze kern, dewelke voor de stalen van reeks 2 het grootste deel van het oppervlak bestrijkt. Uit de waarden van de fenolfthaleïne test valt op te maken dat, met mogelijk de uitzondering van mortels Lede 1, Lede 3, Lo/Ge 1 en Gebr. Lede 1, de uitharding niet voltooid is. Dit heeft gevolgen voor de bekomen waarden van andere testen. Een voorbeeld hiervan zijn de druk- en buigsterkte, dewelke een lagere waarde zullen bekomen dan wanneer de uitharding verder gevorderd is.

4.4 Schijnbare volumieke massa en openporositeit

De resultaten van de proef ter bepaling van de schijnbare volumieke massa en open porositeit bevinden zich in Bijlage 4. In de onderstaande grafieken bevinden zich de gemiddelde waarden met standaard deviaties van de schijnbare volumieke massa (Figuur 43) en open porositeit (Figuur 44). Uit de technische fiche van de Ledesteen blijkt dat de schijnbare volumieke massa 2448 ± 29 kg/m³ is en de open porositeit 8,27 ± 1,09 vol.%, dewelke ook weergegeven zijn in de respectievelijke grafieken.



Figuur 43: Schijnbare volumieke massa.



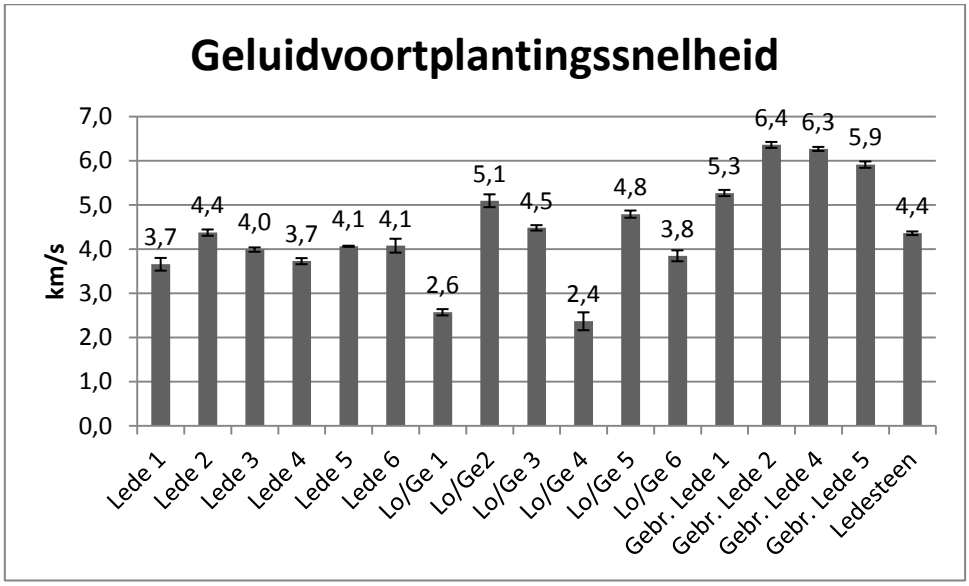
Figuur 44: Open porositeit.

Vermits het carbonatatieproces gepaard gaat met een toename van volume (11,8 %) en een nog grotere massatoename (35 %), wordt verwacht dat de schijnbare volumieke massa bij de overgang van reeks 2 naar 1 zal toenemen en de open porositeit zal afnemen. Een hogere schijnbare volumieke massa en lagere open porositeit van reeks 1 wordt echter enkel geobserveerd bij mortels met Lo/Ge als aggregaat en bij mortels Lede 5 naar Lede 2. De overige mortels met eenzelfde samenstelling registreren een afname van de schijnbare volumieke massa. De schijnbare volumieke massa en open porositeit van de samenstellingen met Lede zand van reeks 1 hebben gelijkaardige waarden. De mortels Lede 5 en Lede 6 hebben eveneens op elkaar gelijkende waarden. De waarden voor Lede 4 zijn echter afwijkend. De waarden voor de samenstellingen met Lo/Ge kunnen verklaard worden doordat bij verdere uitharding van het homogeen verdeelde cement, de grootte van de poriën verminderd wordt ten gevolge van de toename in volume van de mineralen bij de carbonatatiereactie. De intermediaire verhoudingen (3 en 5) vertonen hierbij de hoogste schijnbare volumieke massa en de laagste open porositeit. Dit kan verklaard worden doordat deze samenstellingen de beste stapelingen hebben, of tenminste het dichtst benaderen, en dat door bindmiddel of aggregaat toe te voegen de stapeling minder goed wordt.

In vergelijking met de Ledesteen bezitten de mortels een veel lagere schijnbare volumieke massa en een veel hogere porositeit. Deze verschillen zijn het gevolg van de aanwezigheid het calcietcement. De dichtheid van dit calcietcement is veel lager dan de dichtheid van de kwartskorrels, mede dankzij de hoge microporositeit. Wanneer gekeken wordt naar de verschillen in schijnbare volumieke massa van de mortels voor de verschillende aggregaten, is op te merken dat de mortels met Lede zand in het algemeen de laagste schijnbare volumieke massa hebben en de mortels met gebroken Ledesteen de hoogste. De verschillen zijn mogelijk te danken aan de verschillen in korrelgrootteverdeling en korrelgrootte tussen beide aggregaten. Volgens Pavía & Toomey (2008) bekomen mortels met een grof, slecht gegradeerd, goed afgerond zand een hoge porositeit en mortels met een goed gegradeerd zand met een scherpe en fijnkorrelige korrelgrootte een kleine porositeit. Het Lede zand is meer fijnkorrelig en is beter gesorteerd, maar bekomt een grotere porositeit, terwijl het grofkorrelige en slecht gesorteerde gebroken Ledesteen aggregaat een lage porositeit bekomt. Hiermee volgen de resultaten van de mortels niet dezelfde trend als waargenomen door Pavía & Toomey (2008).

4.5 Geluidvoortplantingssnelheid

De resultaten van de individuele proefstukken bevinden zich in Bijlage 5. Figuur 45 geeft de gemiddelde waarden met hun standaard deviatie weer. Uit de technische fiche is een waarde van 4359 ± 41 m/s voor de geluidvoortplantingssnelheid van de Ledesteen te halen, dewelke eveneens in Figuur 45 waar te nemen is. Vermits de snelheid afhankelijk is van verschillende gesteente-eigenschappen (zie 3.3.5) en de mortel compatibel moet zijn met de Ledesteen, zullen de gemeten waarden vergeleken worden met de geluidvoortplantingssnelheid van de Ledesteen en kunnen ze worden gebruikt als referentiewaarden voor de mortel zelf.



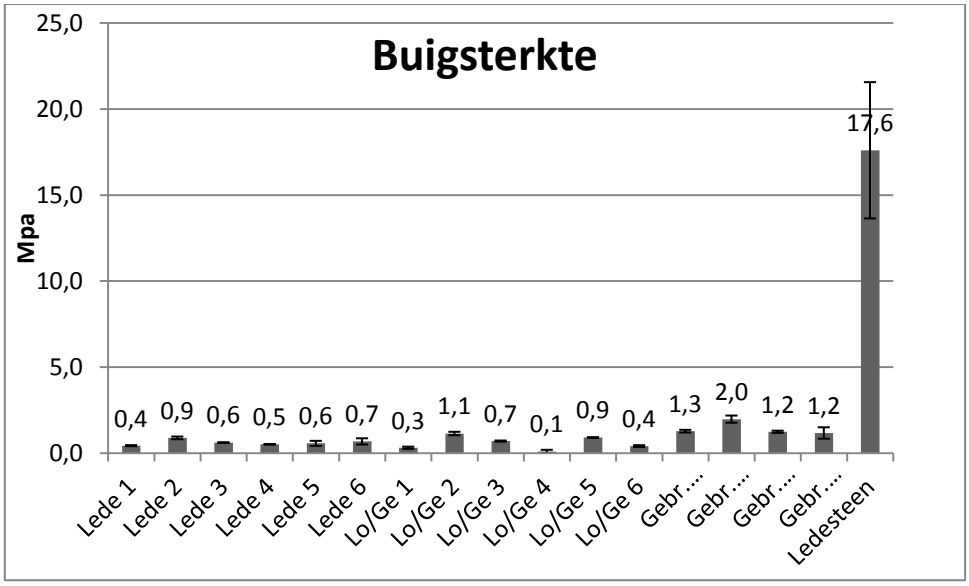
Figuur 45: Geluidvoortplantingssnelheid.

Bij het beschouwen van de data valt op dat waarden voor dezelfde samenstellingen van reeks 1 (1 - 3) en reeks 2 (4 – 6) ongeveer dezelfde zijn. Hieruit is op te maken dat het verschil in uitharden geen grote invloed heeft op de geluidvoortplantingssnelheid. De samenstellingen met een B/Ag van 5/18 voor de aggregaten Lede zand en Lo/Ge (1 en 4) hebben zeer lage geluidvoortplantingssnelheden, wat waarschijnlijk het gevolg is van de grote poriën die geobserveerd zijn in 4.2. De samenstellingen met een B/Ag van 5/12, hebben de hoogste geluidvoortplantingssnelheid voor elk aggregaat. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de grotere hoeveelheid bindmiddel, dat resulteerde in een groter volume cement, waarin de geluidsgolven minder obstakels tegenkomen.

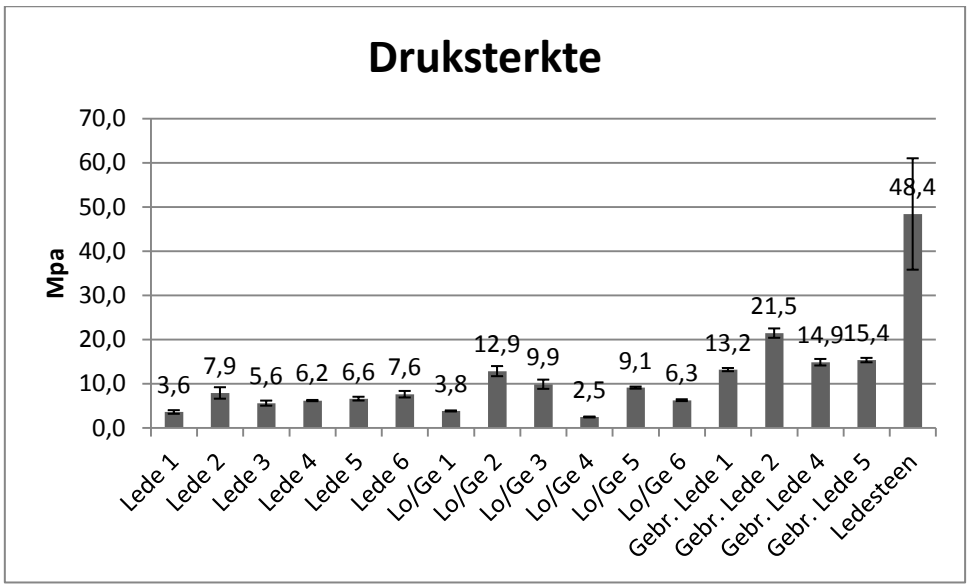
Verder is ook op te merken dat de samenstellingen met gebroken Ledesteen een merkbaar hogere geluidvoortplantingssnelheid hebben dan de overige samenstellingen. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de homogene verdeling van de cementatie, het ontbreken van grote holten en de aanwezigheid van grovere korrels. De andere samenstellingen die in 4.2 een homogene cementatie hebben, vertonen eveneens een hogere geluidvoortplantingssnelheid dan de samenstellingen waar er zich veel holtes en nodules in bevinden.

4.6 Buig- en druksterkte

De resultaten ter bepaling van de buig- en druksterkte bevinden zich in Bijlage 6. In Figuur 46 en Figuur 47 bevinden zich de gemiddelde waarden en standaarddeviaties van de buig- en druksterkte. De gemiddelde waarden voor de Ledesteen zijn 17,6 ± 3,96 N/mm² buigsterkte en 48,4 ± 12,6 N/mm² druksterkte (Balegro) en worden eveneens weergegeven.



Figuur 46: Buigsterkte.



Figuur 47: Druksterkte.

De bekomen buig- en druksterktes vertonen steeds dezelfde trends en zullen hierdoor samen besproken worden als 'sterkte'. Het vergelijken van de sterkte van mortels van reeks 1 met reeks 2 zou in principe een hogere waarde van reeks 1 moeten weergeven. Deze toename wordt echter niet geobserveerd bij mortels Lede 1 en 4, Lede 3 en 6 en Gebr.

De lagere sterkte van Gebr. Lede 1 is waarschijnlijk het gevolg van het gebruiken van een andere samenstelling voor Gebr. Lede 4.

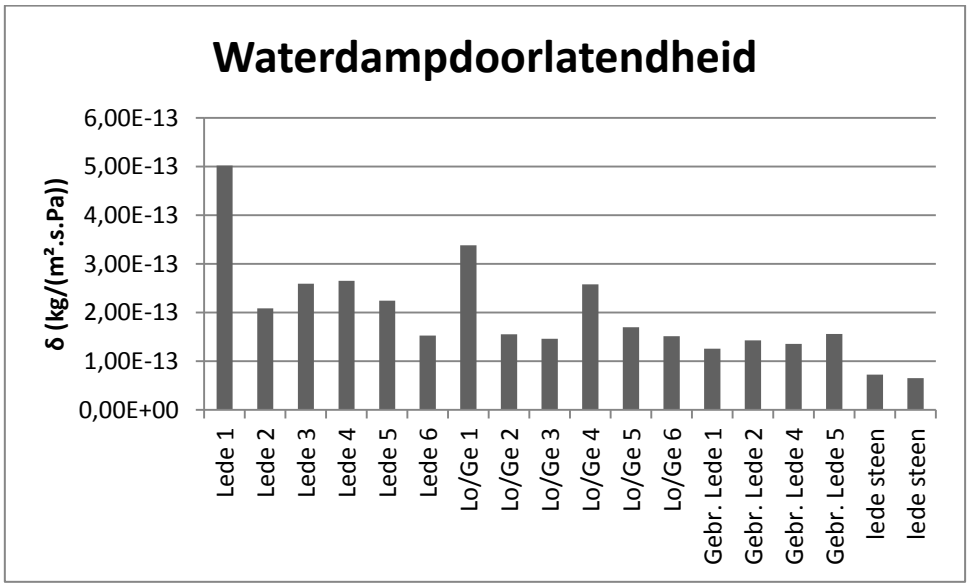
Szemerey-Kiss, Török & Siegesmund (2013), Beck & Al-Mukhtar (2008), Lanas & Alvarez (2003) en Lanas et al. (2004) stellen dat het toevoegen van aggregaat zal resulteren in een afname van de sterkte van een mortel. Op de afwijkende waarde van Lede 6 na wordt dit eveneens waargenomen bij deze mortels.

Op de uitzonderlijk grote waarde van Lede 6 na hebben de mortels met een B/Ag van 5/12 de hoogste sterkte voor elk type aggregaat. Deze hogere waarden zijn waarschijnlijk het gevolg van het hogere kalkgehalte, dat zorgde voor een betere binding. Met uitzondering van mortel Lede 4 hebben de mortels met Lede zand of Lo/Ge met een B/Ag van 5/18 een uitzonderlijk lage sterkte, waarschijnlijk te wijten aan de hoge macroporositeit en dunne cement tussen de nodules. De mortels met de hoogste sterkte zijn de mortels met gebroken Ledesteen samen met Lo/Ge 2. Voor de mortels met Lede zand, beschikken Lede 2 en Lede 6 over de hoogste buig- en druksterkte. Bij de mortels met Lo/Ge is dit Lo/Ge 2, welk een beduidend hogere sterkte heeft tegenover de overige mortels, gevolgd door Lo/Ge 3 en 5. De sterkste mortel met gebroken Ledesteen is Gebr. Lede 2.

De mortels met de laagste sterkte zijn Lede 1, Lo/Ge 1 en Lo/Ge 4. De sterkte was bij deze mortels zelfs zo laag dat de proefstukken volledig verpulverden bij het evalueren van de druksterkte. De lage sterkte is waarschijnlijk het gevolg van de hoge macroporositeit en dunne cementatie buiten de nodules, waargenomen in 4.2. De afwijkende sterkte van Lede 4 zal bij 4.14.3 besproken worden

4.7 Waterdampdoorlatendheid

De curven waarmee de waterdampdoorlatendheden bepaald zijn, zijn gegeven in Bijlage 7. De resultaten voor de permeatie en permeabiliteit zijn gegeven in Figuur 48. Deze test is uitgevoerd op stalen van de mortels en de Ledesteen waardoor een rechtstreekse vergelijking mogelijk is. Volgens het principe van compatibiliteit moet de waterdampdoorlatendheid van de mortels dus hoger zijn dan die van de Ledesteen.



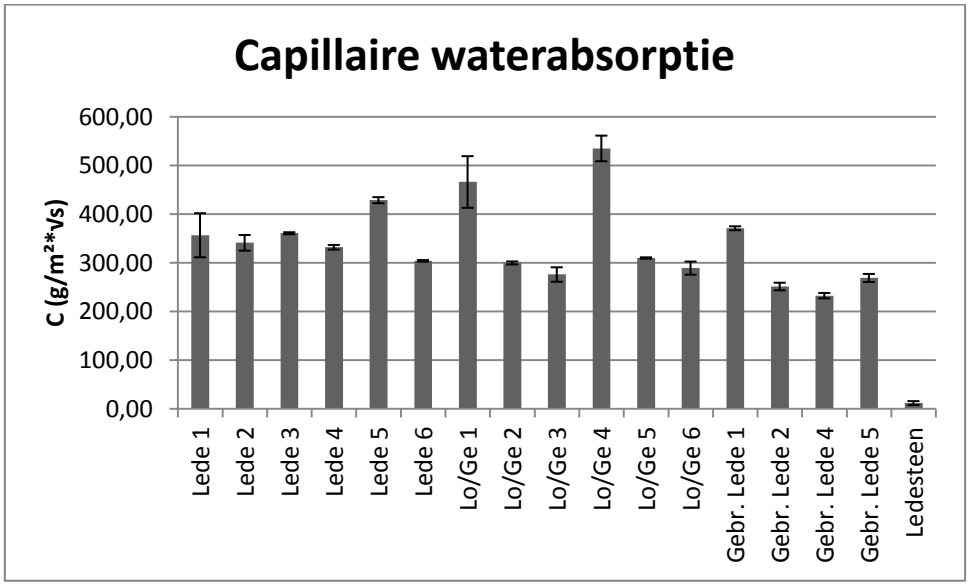
Figuur 48: Waterdampdoorlatendheid.

Bij het vergelijken van de δ-waarden van reeks 1 met reeks 2 is geen duidelijke trend waar te nemen. Wat wel opvalt, is dat de samenstellingen met een B/Ag van 5/18 van reeks 1 een grotere δ-waarde hebben dan de stalen van reeks 2. Voor samenstellingen met een B/Ag van 5/12 is echter het omgekeerde op te merken. Een verklaring hiervoor kan gevonden worden in de volumetoename bij het uitharden van de kalk. Bij de mortels met een B/Ag van 5/18 zorgt deze volumetoename voor een verbeterde verbinding tussen de poriën, ten gevolge van de vorming van barsten, wat zal leiden tot een hogere waterdampdoorlatendheid. De evolutie van de waterdampdoorlatendheid bij mortels met een B/Ag van 5/12 is vooral onderhevig aan het vernauwen van de poriën ten gevolge van de volumetoename. Het vernauwen van de poriën zorgt voor een toename van de microporositeit, waarmee de kans op condensatie van water verhoogd wordt. De tussenverhoudingen tonen zowel een δ-waarde toename als een afname. Hieruit volgt dat ze onderhevig zijn aan beide processen.

Wanneer men echter de mortels met eenzelfde aggregaat, maar met verschillende verhouding met elkaar vergelijkt, valt op dat de mortels met een B/Ag van 5/18 steeds de hoogste waterdampdoorlatendheid bezitten. Dit kan verklaard worden door rekening te houden met het voorkomen van grote poriën zoals geobserveerd in 4.2. De lagere waterdampdoorlatendheden van de overige samenstellingen is het gevolg van de afwezigheid van deze macroporiën.

4.8 Capillaire absorptie

De curves voor het bepalen van de capillaire absorptie bevinden zich in Bijlage 8. Voor elke samenstelling is de gemiddelde capillaire absorptie bepaald, samen met zijn standaard deviatie. Deze zijn waar te nemen in Figuur 49. Uit de technische fiche van leverancier Balegro is een waarde voor de Ledesteen te halen van 11,98±4,07 g/(m²√s), dewelke eveneens in Figuur 49 waar te nemen is. Om een compatibele mortel te bekomen, moet de waterabsorptie van de mortel hoger zijn dan die van de Ledesteen.



Figuur 49: Capillaire absorptie.

Bij de vergelijking van de capillaire absorptie van reeks 1 met reeks 2, wordt geen duidelijke trend waargenomen. De mortels vertonen in het geval van de samenstellingen met Lede zand geen duidelijke trend. Lede 1 en 3 hebben een hogere capillaire absorptie dan Lede 4

en 6, terwijl Lede 2 een beduidend lagere capillaire absorptie heeft dan Lede 5. Een mogelijke verklaring van de hogere capillaire absorptie van Lede 1 en 3 is dat deze waarschijnlijk het gevolg is van een meer volledige carbonatatie van de kalk aanwezig in de kalknodules. Deze verklaring is gebaseerd op de afwezigheid van microporositeit in het centrum van de kalknodules, indien deze $Ca(OH)_2$ bevatten (Figuur 33). Indien nodules volledig uit calciet bestaan, zal dit aanleiding geven tot een toename in microporositeit en een betere verbondenheid van de poriën (Figuur 35).

De lagere capillaire absorptie van Lede 2 tegenover Lede 5 kan verklaard worden doordat bij verdere uitharding, de grootte van de poriën verminderd wordt ten gevolge van de toename in volume van de mineralen bij de carbonatatiereactie (zie 4.4). Volgens de formule van Poiseuille (Vergelijking 20) zorgt een afname van de poriëndiameter voor een verlaging van het volume dat getransporteerd wordt. De samenstellingen met Lo/ge vertonen gelijkaardige verschillen tussen reeks 1 en 2 als Lede 2 en 5 en kunnen op dezelfde wijze verklaard worden.

Hoewel Lo/Ge 1 ook opgebouwd is uit een netwerk van nodules verbonden via aggregaten met een fijn calcietcement zoals geobserveerd bij Lede 1 (Figuur 36) is er echter in tegenstelling met de samenstellingen Lede 1 versus Lede 4 een capillaire absorptie-afname waar te nemen. Een mogelijke verklaring hiervan is gelinkt aan de minder goede cementatie van de aggregaten die zich tussen de nodules bevinden. Bij de volumetoename die gepaard gaat bij het carbonatatie/hydratatie proces, wordt de microporositeit in het dunne cement verkleind, met een verlaging van de capillaire absorptie tot gevolg.

De mortels met gebroken Ledesteen zijn moeilijker te vergelijken vermits Gebr. Lede 1 niet dezelfde samenstelling heeft als mortel Gebr. Lede 4. Indien men echter enkel Gebr. Lede 2 met 5 vergelijkt is er eveneens een porositeitafname waar te nemen bij verdere uitharding.

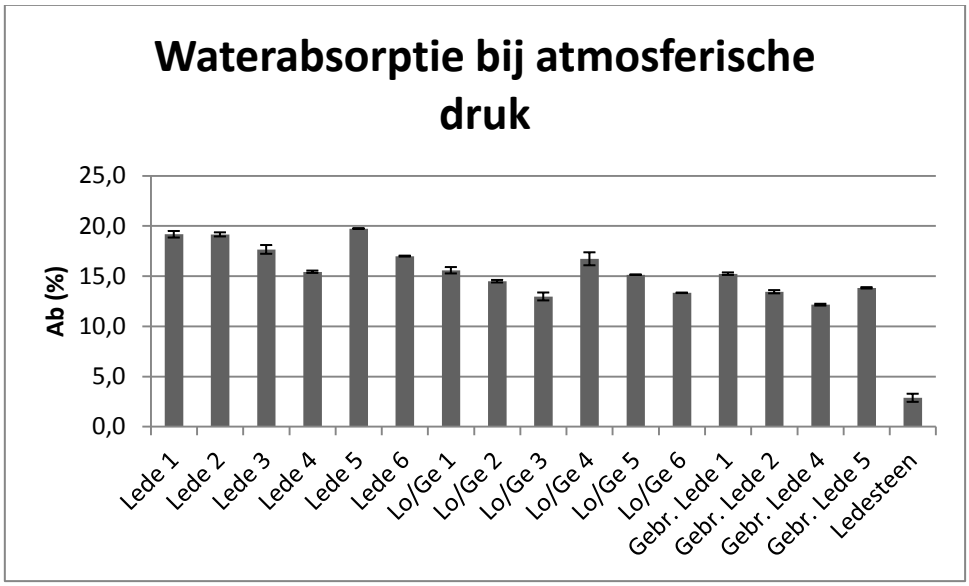
Volgens Szemerey-Kiss, Török & Siegesmund (2013) zou een hoger gehalte aan aggregaat moeten zorgen voor een toename in capillaire absorptie. Dit is echter niet overal waargenomen bij deze test. Wanneer men de capillaire absorptie per aggregaat beschouwd, valt op dat voor reeks 1 de samenstellingen met Lede zand ongeveer dezelfde capillaire absorptie hebben. De samenstellingen met Lede zand van reeks 2 vertonen meer verschillen, welke waarschijnlijk het gevolg zijn van een verschil in carbonatatie. De grote waarde van Lede 5 is waarschijnlijk het gevolg van een goede verbondenheid van de poriën in een homogeen verdeeld cement. De lagere waarden van Lede 4 en 6 zijn volgens deze redenering het gevolg van de aanwezigheid van $Ca(OH)_2$ in nodules, welke zorgen voor een hindering van de capillaire absorptie en het voorkomen van grote holten.

De capillaire absorptie van de samenstellingen met Lo/Ge vertonen een duidelijke trend. De samenstellingen met een B/Ag van 5/15 (Lo/Ge 3 en 6) vertonen de laagste capillaire absorptie en de overige consequent een hogere. Dit komt waarschijnlijk doordat de samenstellingen Lo/Ge 3 en 6 een structuur hebben die dichtbij de best mogelijke stapeling van de aggregaten ligt. Bij het verhogen van het gehalte aan bindmiddel of aan aggregaat zal de stapeling slechter worden met in beide gevallen een verhoging van capillaire absorptie als gevolg. De veel hogere capillaire absorptie van Gebr. Lede 1 is waarschijnlijk het gevolg van het hogere gehalte aan water, dat aanleiding gegeven zal hebben tot een betere uitharding en verbinding tussen de poriën. Een mogelijke verklaring voor het lager uitvallen van de capillaire absorptie van Gebr. Lede 4 t.o.v. Gebr. Lede 5 is dat voor dit aggregaat de beste stapeling dichter bij de samenstelling van Gebr. Lede 4 ligt dan bij Gebr. Lede 5.

Verder valt op dat de mortels met samenstelling Lo/Ge 1 en Lo/Ge 4 een capillaire absorptie hebben die hoger is dan de absorptie bij de andere mortels. Het verschil met de andere mortels is zelfs zo groot dat bij het uitvoeren van de test onvoldoende meetpunten gesitueerd waren in het eerste deel van de curves voor samenstellingen Lo/Ge 1 en Lo/Ge 4. hierdoor moest de test voor deze stalen herhaald worden. De algemeen hoge capillaire absorptie kan verklaard worden, door rekening te houden met de hoge porositeit die geobserveerd is in de fluorescentiebeelden van 4.2. Vermits de porositeit van de mortels, met uitzondering van Lede 1 en Lo/Ge 1, voornamelijk in het cement waar te nemen is, hebben de meeste poriën een kleine diameter. Ten gevolge van de massale aanwezigheid van microporiën zal de capillaire absorptie dus zeer groot zijn.

4.9 Waterabsorptie bij atmosferische druk

De resultaten voor de waterabsorptie bij atmosferische druk bevinden zich in Bijlage 9. De gemiddelde waarden van de waterabsorptie met hun standaarddeviaties zijn te zien in Figuur 50. Net zoals de capillaire absorptie, is de waterabsorptie bij atmosferische druk afhankelijk van de grootte, het aantal en de verbondenheid van de poriën. Net zoals bij capillaire waterabsorptie zal een hoge waterabsorptie zorgen voor een kleurverandering in vochtige toestand en een grotere gevoeligheid tot externe vlekvorming en vuilafzetting.



Figuur 50: Waterabsorptie bij atmosferische druk.

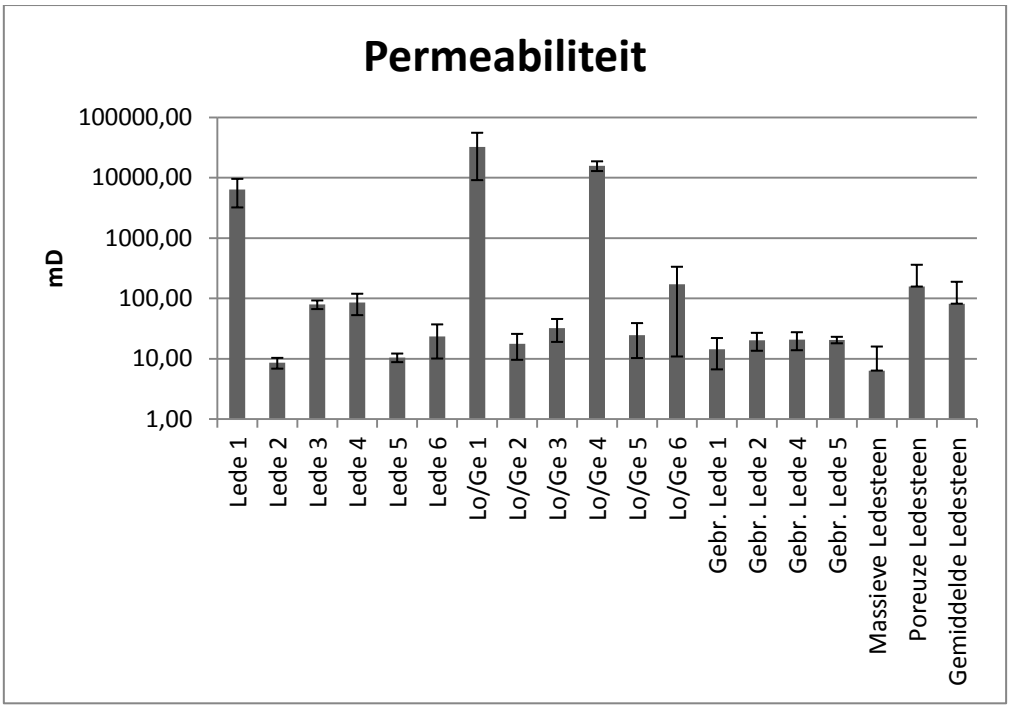
Het vergelijken van de waterabsorptie bij atmosferische druk van reeks 1 met reeks 2 vertoont gelijkaardige trends als bij de capillaire absorptie en kunnen op dezelfde wijze verklaard worden.

Wanneer men de waterabsorptie bij atmosferische druk per aggregaat beschouwt, valt op dat voor reeks 1 de samenstellingen Lede 1 en 2 ongeveer dezelfde absorptie hebben en Lede 3 een iets lagere. De samenstellingen met Lede zand van reeks 2 vertonen meer variatie. Lede 5 heeft de hoogste absorptie, gevolgd door Lede 6. Lede 4 heeft een veel lagere absorptie. De grote waarde van Lede 5 is waarschijnlijk, net zoals bij capillaire absorptie, het gevolg van een goede verbondenheid van de poriën in een homogeen verdeeld cement. De lagere waarde van Lede 6 is mogelijk het gevolg van de aanwezigheid van niet omgezette kalk in nodules, dewelke zorgen voor een hindering van de absorptie. De

lagere waterabsorptie van Lede 4 is het gevolg van de lagere open porositeit (zie 4.4). Een andere mogelijke verklaring voor Lede 4 is dat de porositeit van deze mortel grotendeels gesitueerd zou zijn in macroporiën. Dit kan er voor zorgen dat bij weegproces water uit deze poriën vloeide, met een onderschatting tot gevolg. Er is echter wel een verschil op te merken met de capillaire absorptie, hetgeen zal besproken worden in 4.14.1. De waterabsorptie van de samenstellingen met Lo/Ge en gebroken Ledesteen vertonen dezelfde trend als bij capillaire absorptie en kunnen eveneens op dezelfde wijze verklaard worden (beste stapeling bij B/Ag 5/15).

4.10 Permeabiliteit

De waarden voor de bepaling van de permeabiliteit bevinden zich in Bijlage 10. De gemiddelde waarden voor elke samenstelling bevinden zich in Figuur 51, samen met hun standaard deviaties. Waarden voor de permeabiliteit van de Ledesteen zijn 6,35 ± 9,56 mD voor een massieve Ledesteen en 156,82 ± 203,39 mD voor een meer poreuze ledesteen, afkomstig uit De Timmerman (2014). Wel wordt er gesteld dat er een onzekerheid bestaat omtrent de nauwkeurigheid voor waarden lager 10mD, ten gevolge van de beperkingen van de TinyPerm II. Om een compatibele mortel te bekomen moet de permeabiliteit van de mortel hoger zijn dan die van de Ledesteen, teneinde vochtophoping in de Ledesteen te voorkomen.



Figuur 51: Permeabiliteit.

Bij het vergelijken van de waarden voor de mortels van reeks 1 met reeks 2, is er geen duidelijke trend waar te nemen. Voor sommige samenstellingen zijn de waarden van reeks 1 hoger dan voor reeks 2, terwijl dit voor andere niet het geval is. Hieruit is op te maken dat het verloop van de uitharding geen rechtstreekse invloed uitoefent op de gas-permeabiliteit.

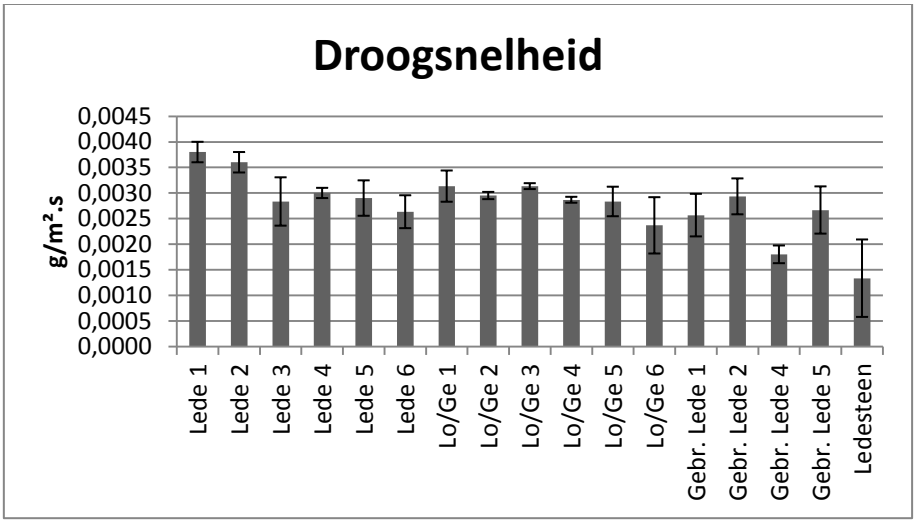
Wanneer men echter de mortels per aggregaat beschouwt valt wel op dat voor elk aggregaat en voor elke reeks, de samenstellingen met de laagste B/Ag (1 en 4), de hoogste

permeabiliteit hebben en dat de samenstellingen met de hoogste B/Ag (2 en 5), de laagste permeabiliteit hebben. De tussenverhouding heeft telkens een permeabiliteit die zich hiertussen bevindt. Een uitzondering op deze waarnemingen is aan te treffen bij Gebr. Lede 1. De permeabiliteit voor deze samenstelling is lager dan de Gebr. Lede 2. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de afwijkende samenstelling en dus het hogere watergehalte tijdens het samenstellen van de mortel Gebr. Lede 1.

De extreem hoge permeabiliteit van Lede 1, Lo/Ge 1 en Lo/Ge 4 is waarschijnlijk te wijten aan de hogere macroporositeit, geobserveerd in 4.2. Deze macroporositeit vormt eveneens de aanleiding tot de grote standaarddeviaties die bij deze mortels waargenomen worden. In vergelijking met de mortels met Lo/Ge heeft mortel Lede 4 een lagere permeabiliteit dan verwacht.

4.11 Droogsnelheid

De grafieken met de resultaten van de bepaling van de droogsnelheid bevinden zich in Bijlage 11. In de onderstaande Figuur 52 bevinden zich de gemiddelde droogsnelheid met standaarddeviaties van de verschillende mortels en de Ledesteen. Vermits de stalen niet afgeplakt zijn, was het toevoegen van de Ledesteen noodzakelijk om een vergelijkende studie uit te voeren. Afwijkende waarden zijn nog steeds mogelijk vermits het drogen van buiten naar binnen optreedt en niet elk oppervlak dezelfde afmetingen heeft.

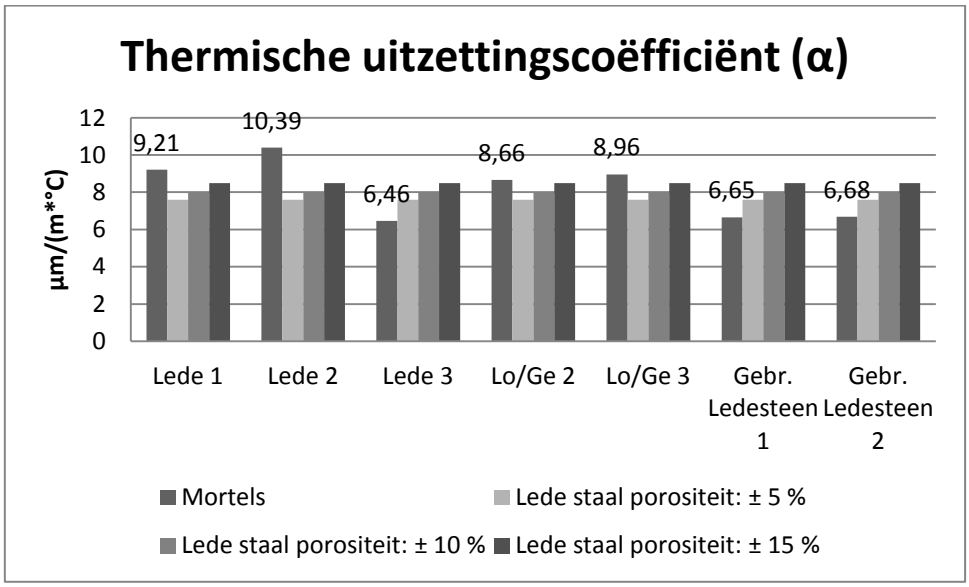


Figuur 52: Droogsnelheid.

De droogsnelheid vertoont een duidelijke trend bij het vergelijken van reeks 1 met reeks 2. De droogsnelheden van reeks 1 zijn stelselmatig hoger dan de droogsnelheden van gelijkaardige mortels uit reeks 2. Dit kan verklaard worden door rekening te houden met de aanwezigheid van niet omgezette kalk. De niet-omgezette kalk zal hierbij water opnemen voor het carbonatatieproces, waardoor de gemeten droogsnelheid verlaagd wordt. De droogsnelheid wordt bepaald door de massa afname te bepalen over een bepaalde tijd. Ten gevolge van het carbonatatie proces zal de massa afname deels gecompenseerd worden, met een lagere droogsnelheid tot gevolg. De droogsnelheid is eveneens afhankelijk van de porositeit en porieconnectiviteit en zal hierdoor verder besproken worden in 4.14.4. De droogsnelheid van de mortels met Lede zand zijn het hoogst, maar verschilt echter niet zo veel van de droogsnelheden van de overige mortels.

4.12 Thermische uitzetting

De resultaten van de thermomechanische analyse bevinden zich in Bijlage 12. De bekomen gemiddelde waarden van de thermische uitzettingscoëfficiënten bevinden zich in Figuur 53, samen met hun standaarddeviatie. Deze waarden zijn het gemiddelde van de α-waarden tussen 30 en 70 °C, bekomen via een grafische analyse met het programma *universal analysis*. Voor mortel Lo/Ge 1 zijn er geen gegevens beschikbaar, omdat deze te bros was om een substaal te maken. Indien er een groot verschil is in thermische uitzettingcoëfficiënt tussen de steen en de mortel zal dit zorgen voor scheurvorming. Hoewel er geen echte grenswaarden zijn om aan te duiden of een mortel compatibel is met de steen (Bianco et al., 2013), is het beter om het verschil tussen de uitzettingscoëfficiënten van de mortels en de Ledesteen zo klein mogelijk te houden (Van Balen et al., 2005). De stalen van de Ledesteen zijn afkomstig van stenen met een verschillende porositeit, zodanig dat er rekening gehouden wordt met de heterogeniteit van de Ledesteen.



Figuur 53: Thermische uitzettingscoëfficiënt.

Wanneer men de waarden van de verschillende aggregaten beschouwt, is op te merken dat samenstellingen Lede 1 en 2 gelijkaardige α-waarden hebben, en dat deze afwijken van de waarde voor Lede 3. De thermische uitzettingscoëfficiënt voor de andere samenstellingen met eenzelfde aggregaat liggen echter wel dicht bij elkaar.

Wanneer de verschillende uitzettingscoëfficiënten met elkaar vergeleken worden, valt op dat de samenstellingen met Lede zand, met uitzondering van Lede 3 relatief hoge α-waarden hebben en dat de samenstellingen met gebroken Ledesteen duidelijk lagere α-waarden hebben, in vergelijking de samenstellingen met Lo/Ge.

De samenstellingen met Lede zand zijn samengesteld met een fijnkorrelig aggregaat. De gemiddeld hogere thermische uitzetting van het calciet (26 µm/(m*°C) parallel en -6 µm/(m*°C) loodrecht t.o.v. de c-as) zorgt hier, bij een temperatuursverhoging, voor een grotere volume toename omdat deze minder gecompenseerd wordt door de lage thermische uitzetting van de kwartskorrels (0,55 µm/(m*°C)). Het Lochristi en Geel zand vormen samen een aggregaat dat grover is dan het Lede zand, waardoor een α-waarde bekomen wordt waarin de thermische uitzettingscoëfficiënt van het calciet meer

gecompenseerd zal worden. De mortels met gebroken Ledesteen zijn opgebouwd met een zeer grofkorrelig aggregaat, bestaande uit Ledesteenfragmenten. Deze fragmenten zouden een gelijkaardige α-waarde moeten hebben als de Ledesteen. In combinatie met het calciet cement zou dit moeten zorgen voor een hoge α-waarde. Er worden echter veel lagere α-waarden genoteerd. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de lagere α-waarden het gevolg zijn van de sterke anisotropie van de thermische expansie van calciet. De resulterende α-waarden zouden dan lager kunnen zijn indien de meting van de expansie plaatsvond volgens een richting waarin er relatief veel calcietkristallen loodrecht met hun c-as gepositioneerd zijn. Zoals reeds vermeld, heeft mortel Lede 3 een afwijkende α-waarde. De α-waarde van deze mortel benadert eerder de α-waarden van de mortels met gebroken Ledesteen en kan op dezelfde wijze verklaard worden. Waarom dit juist een grote invloed heeft op deze mortels is onduidelijk.

4.13 Verwering ten gevolge van thermische schok

De foto's die de evolutie van de verwering ten gevolge van thermische schok weergeven bevinden zich hieronder, samen met hun RGB waarden. Rond de 25^{e} cyclus, vond er een zeer grote verandering plaats bij elk proefstuk. Deze verandering werd enkele dagen later gevolgd door een sterke oxidatie van de oven waarin de stalen zich bevonden. Dit houdt in dat de verandering mogelijk niet enkel het gevolg is van verwering ten gevolge van thermische schok. Indien de verwering niet enkel het gevolg is van thermische schok, zal bij het herhalen van de test, het aantal cyclussen om dezelfde verwering te bekomen mogelijk niet overeenstemmen met het eigenlijke aantal cyclussen. Vermits alle stalen dezelfde verwering ondergaan hebben, zijn de resultaten voor de mortels nog steeds te vergelijken met de resultaten van de Ledesteen.

4.13.1 Visuele evaluatie

4.13.1.1 Ledesteen

De verwering door thermische schok zorgt voor een duidelijke kleurverandering tussen de 10^{e} en de 20^{e} cyclus zoals waar te nemen is in Figuur 54. De verkleuring is het gevolg van de oxidatie van ijzerhoudende mineralen (glauconiet, pyriet en gesubstitueerd ijzerhoudend calciet). Bij de overgang tussen de 20^{e} naar de 30^{e} cyclus zijn er geen grote verschillen waar te nemen en wordt het okerkleurige patina slechts versterkt.

Figuur 54: Ledesteen. Na 0, 10, 20 en 30 cycli.

4.13.1.2 Mortels met Lede zand

De mortels met Lede zand vertonen in Figuur 55, Figuur 56 en Figuur 57 tot de 20^{e} cyclus geen sterke kleurverandering aan het geobserveerde oppervlak. Wel zijn er

kleurveranderingen op te merken aan de zijkanten en onderkant van de proefstukken. De eerste duidelijke verkleuring die aan het bovenvlak optreedt, is het ontwikkelen van een okerkleurige rand bij de overgang van de 10^{e} naar de 20^{e} cyclus. Bij de overgang van de 20^{e} naar de 30^{e} cyclus breidt deze rand zich uit en zal het gehele oppervlak (op de kalknodules na) okerkleurig maken. Deze overgang ging bij de mortels met Lede zand gepaard met een exfoliatie van de buitenste rand.

Figuur 55: Mortel Lede 1. Na 0, 10, 20 en 30 cycli.

Figuur 56: Mortel Lede 2. Na 0, 10, 20 en 30 cycli.

Figuur 57:Mortel Lede 3. Na 0, 10, 20 en 30 cycli.

4.13.1.3 Mortels met Lo/Ge

De beschrijving van de mortels met Lo/Ge vertonen een gelijkaardig verweringspatroon als de mortels met Lede zand. Gedurende de eerste 20 cycli treden er amper kleurverschillen

op, met slechts een lichte verkleuring bij de overgang van de 10^{e} naar de 20^{e} cyclus en een duidelijke kleurverandering tussen de 20^{e} en 30^{e} cyclus. De exfoliatie die optrad bij de mortels met Lede zand is eveneens, maar in veel mindere mate waargenomen bij de mortels met Lo/Ge. De kalknodules die in de slijpplaatjes zijn waargenomen zijn bij Lo/Ge 1, zijn echter niet in even sterke mate aanwezig. Waarschijnlijk is dit het gevolg van het handmatig mengen van de samenstelling in plaats van gebruik te maken van een mixer.

Figuur 58: Mortel Lo/Ge 1. Na 0, 10, 20 en 30 cycli.

Figuur 59: Mortel Lo/Ge 2. Na 0, 10, 20 en 30 cycli.

Figuur 60: Mortel Lo/Ge 3. Na 0, 10, 20 en 30 cycli.

4.13.1.4 Mortels met Gebroken Ledesteen

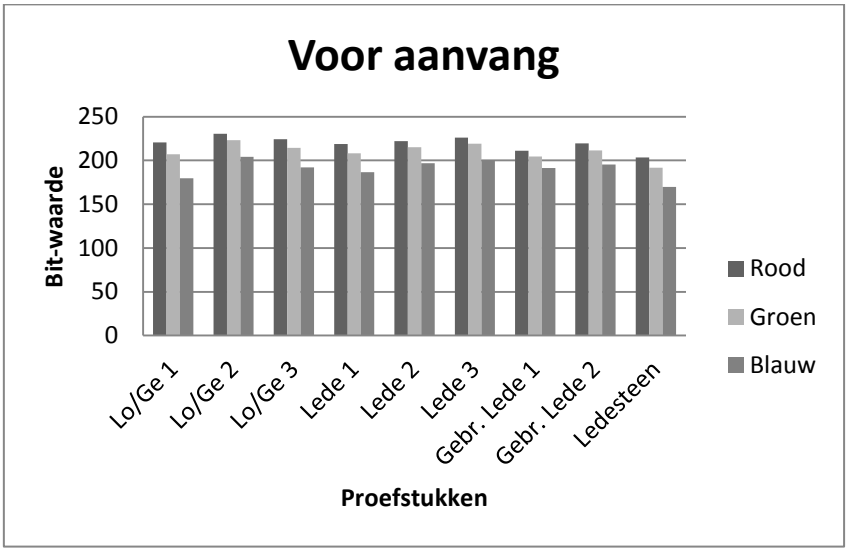
De mortels met gebroken Ledesteen vertonen geen opvallende kleurverschillen aan het bovenvlak gedurende de eerste 20 cycli, met een sterke kleurverandering tussen de 20^{e} en de 30^{e} cyclus. Bij deze mortels trad er amper exfoliatie op.

Figuur 61: Mortel Gebroken Lede 1. Na 0, 10, 20 en 30 cycli.

Figuur 62: Mortel Gebroken Lede 2. Na 0, 10, 20 en 30 cycli.

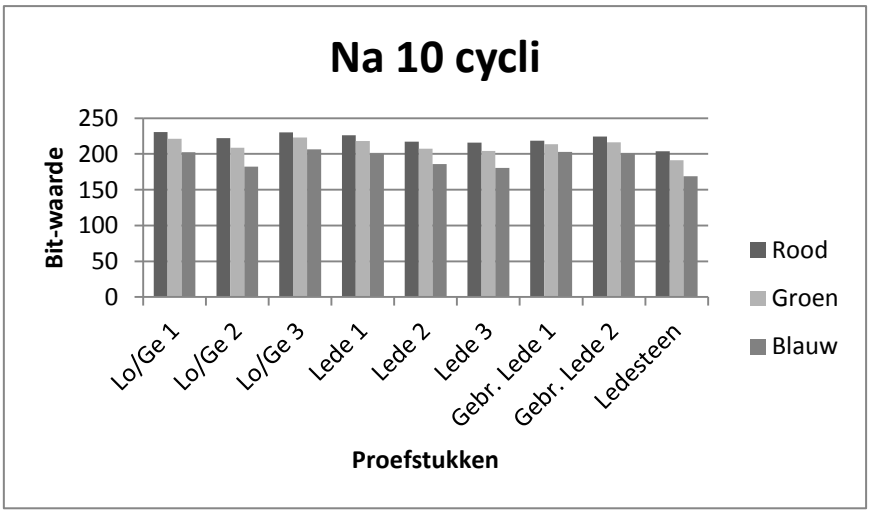
4.13.2 Evaluatie van de RGB-waarden

De RGB-waarden voor de aanvang van de test vertonen gelijkaardige waarden (Figuur 63). De waarde voor rood is steeds de hoogste en de waarde voor blauw steeds de laagste. De waarden voor Ledesteen zijn lager dan de waarden voor de mortels, waaruit op te maken is, dat de Ledesteen donkerder is.



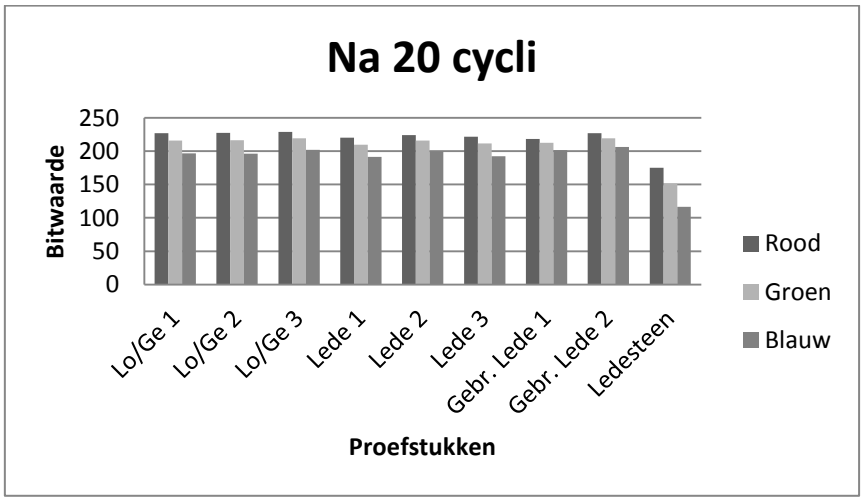
Figuur 63: RGB-waarden voor het aanvangen van de test.

Na 10 cycli zijn er amper veranderingen waar te nemen in de RGB-waarden (Figuur 64).



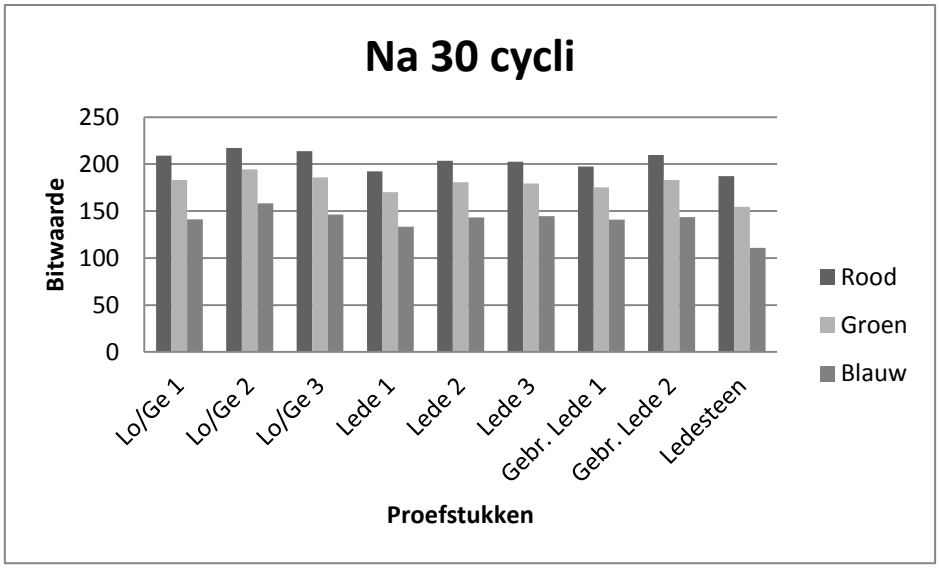
Figuur 64: RGB-waarden na 10 cycli.

Na 20 cycli valt op dat de waarden voor de Ledesteen sterk gedaald zijn en dat er bij de mortels amper veranderingen opgetreden zijn (Figuur 65). Deze observaties komen overeen met de visuele evaluatie, waarin eveneens enkel grote veranderingen geobserveerd zijn in de Ledesteen.



Figuur 65: RGB-waarden na 20 cycli.

Na 30 cycli is er bij elk proefstuk een daling van de RGB-waarden van alle proefstukken waar te nemen (Figuur 66), wat ook te zien is bij de visuele inspectie. De RGB-waarden van de Ledesteen zijn nog steeds de laagste, maar de waarden voor Lede 1 liggen in de buurt. De Mortels met Lo/Ge als aggregaat, voornamelijk de proefstukken Lo/Ge 2 en 3, hebben de laagste daling ondergaan.

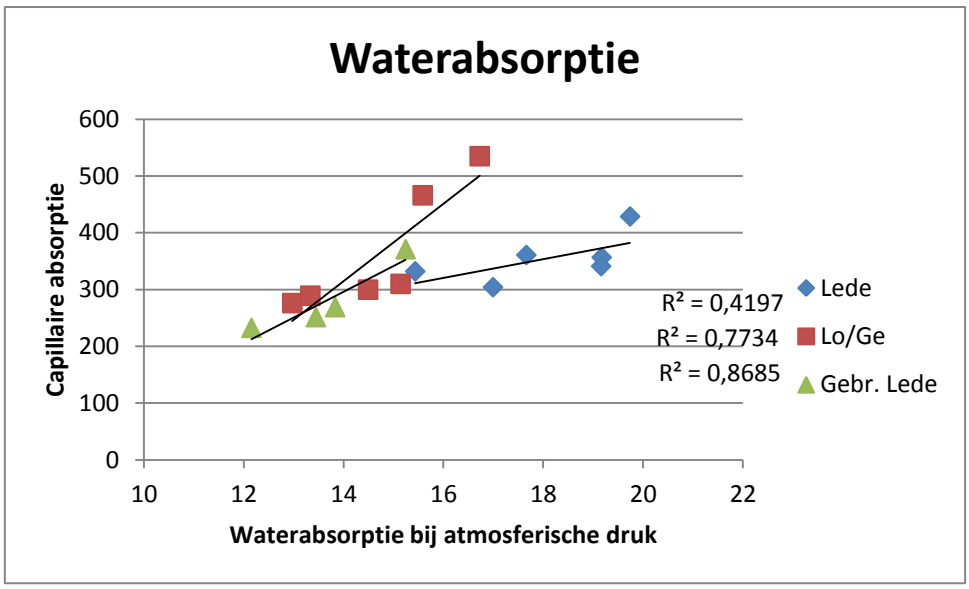


Figuur 66: RGB-waarden na 30 cycli.

4.14 Vergelijken van resultaten

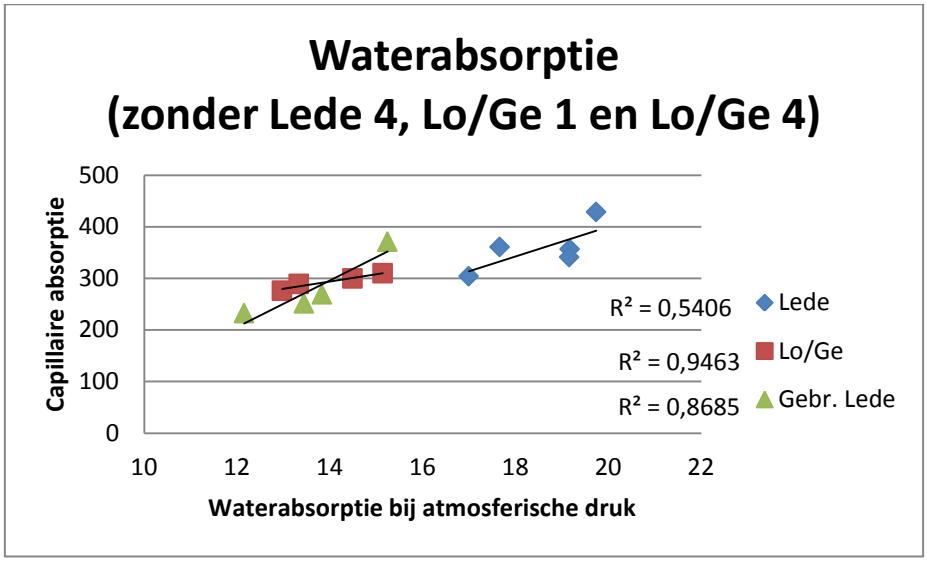
4.14.1 Waterabsorptie

De waterabsorptie werd bepaald door zowel capillaire absorptie als de waterabsorptie bij atmosferische druk. Wanneer deze met elkaar vergeleken worden, valt op dat deze gelijkaardige trends vertonen. Wanneer men ze echter tegenover elkaar uitzet (Figuur 67) is op te merken dat de determinatiecoëfficiënt voor mortels met Lede zand vrij laag zijn (0,4197), wat duidt op een matig verband tussen beiden. De overige mortels vertonen een sterk verband, ook al zijn er twee uitschieters aanwezig bij de mortels met Lo/Ge.



Figuur 67:Waterabsorptie.

Wanneer men de grafiek opstelt zonder de waarden voor de mortels met afwijkende waarden (met inbegrip van de uitschieters) (Figuur 68), is het verband voor de mortels met Lede zand nu sterk (0,5406) en het verband bij de mortels met Lo/Ge sterker.

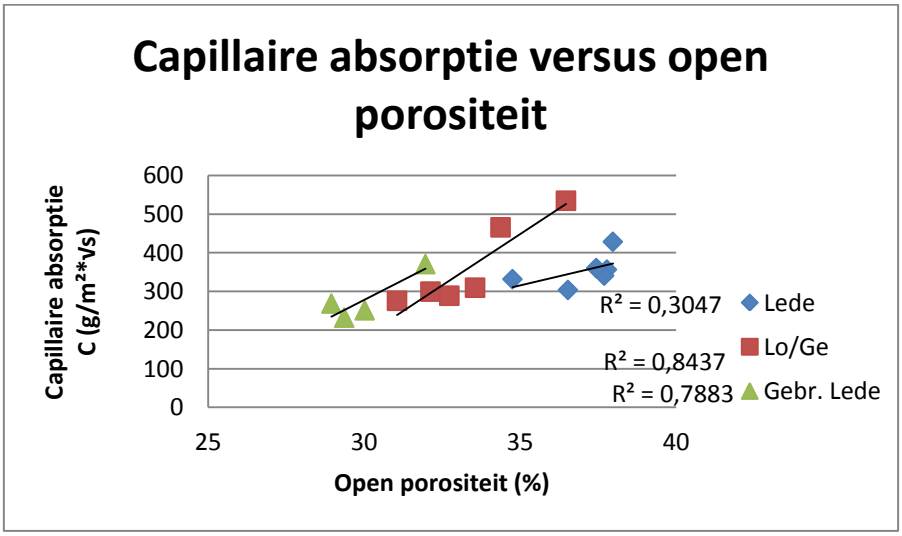


Figuur 68: Waterabsorptie zonder Lede 4, Lo/Ge 1 en 4

De afwijkende waarden van deze mortels zijn mogelijk het gevolg van een hogere capillaire absorptie, een lagere waterabsorptie bij atmosferische druk of een combinatie van beide en kunnen op dezelfde wijze verklaard worden als 4.14.2.

4.14.2 Waterabsorptie versus open porositeit

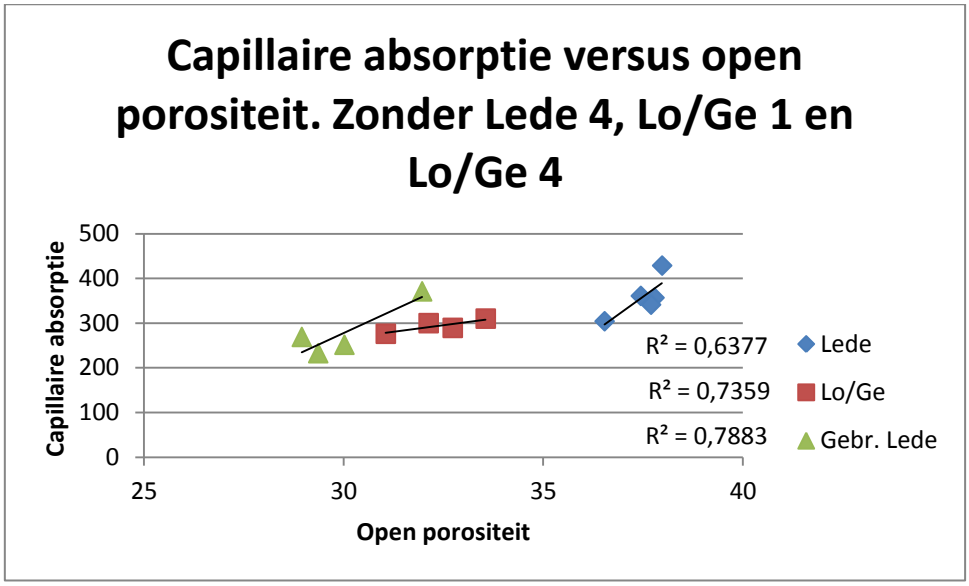
Wanneer de capillaire absorptie uitgezet wordt tegenover de open porositeit is er op te merken dat er slechts een matig verband tussen beide is bij de mortels met Lede zand en een sterk verband bij de mortels met Lo/Ge en Gebr. Lede (Figuur 69). Ook al is er een sterk verband aangetroffen bij de mortels met Lo/Ge, toch zijn er in Figuur 69, twee afwijkende waarden aangetroffen.



Figuur 69: Open porositeit versus capillaire absorptie.

Wanneer de uitschieters bij de mortels met Lo/Ge en Lede zand niet weergegeven worden (Figuur 70), is op te merken da het verband bij de mortels met Lo/Ge afneemt en bij de

mortels met Lede zand toeneemt. Hieruit is af te leiden dat de hoge capillaire absorptie bij beide Lo/Ge mortels het gevolg is van de hoge porositeit en dat mortel Lede 4 een afwijkende porositeit, capillaire absorptie of een combinatie van beide heeft.

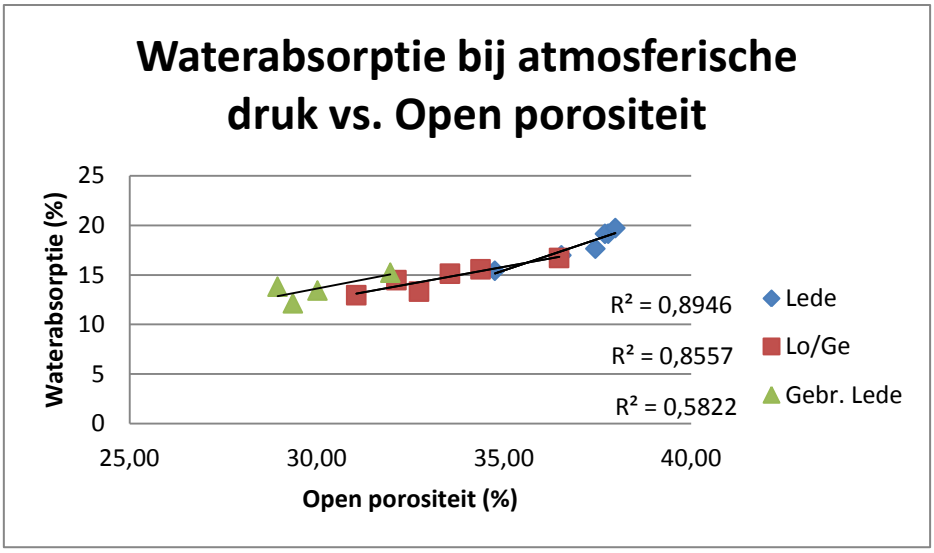


Figuur 70: Capillaire absorptie versus open porositeit. Zonder Lede 4, Lo/Ge 1 en Lo/Ge 4.

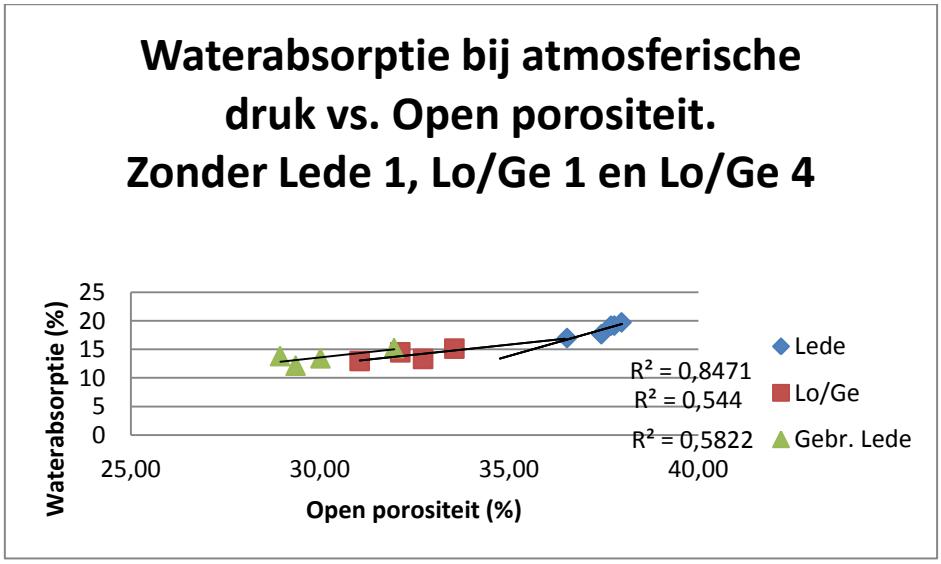
In Figuur 71 is de waterabsorptie bij atmosferische druk versus de open porositeit uitgezet. Er is een zeer sterk verband tussen beide voor de mortels met Lo/Ge en Lede zand en een sterk verband voor de mortels met gebroken Ledesteen. Verschillen zijn het gevolg van de aanwezigheid van lucht in poriën bij waterabsorptie bij atmosferische druk, dewelke bij de bepaling van de open porositeit verwijdert zijn in de vacuümstolp.

Het vergelijken van waterabsorptie bij atmosferische druk versus de open porositeit (Figuur 72), vertoont geen verbetering bij het uitsluiten van Lede 4. De afwijking is dus niet het gevolg van de open porositeit. Hieruit volgt dat de afwijkende waarden van Lede 4 het gevolg is van een hogere capillaire absorptie. De afwijkende waarde van Lede 4 kan verklaard worden door rekening te houden met zijn samenstelling.

Bij het samenstellen van Lede 4 is er een te grote hoeveelheid water bij het bindmiddel gevoegd. Hierdoor is de uitharding van deze mortels verder gevorderd, waardoor de diameters van de poriën verminderd worden. Doordat de poriediameters verkleinden, nam de open porositeit af en werd de capillaire absorptie groter. Dit verklaart ook waarom de permeabiliteit van Lede 4 lager was dan verwacht. Hieruit volgt dat de eigenschappen van een mortel zeer sterk afhankelijk zijn van zijn samenstelling. Zelf een afwijking van 0,03 in de massaverhouding zorgt voor een sterk verschillende mortel.



Figuur 71: Open porositeit versus waterabsorptie bij atmosferische druk.

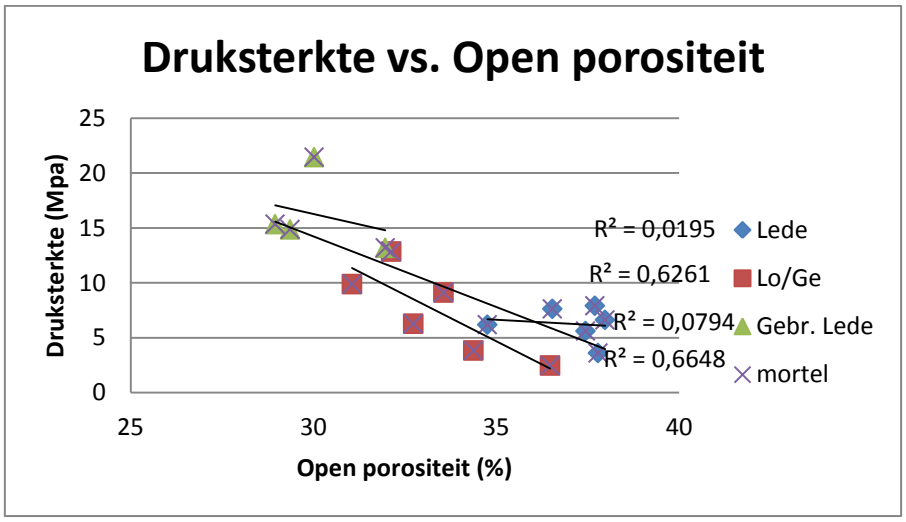


Figuur 72: waterabsorptie bij atmosferische druk versus open porositeit. Zonder Lede 1, Lo/Ge 1 en Lo/Ge 4.

Een andere verklaring zou kunnen zijn dat zowel de open porositeit als de waterabsorptie bij atmosferische druk eenzelfde afwijking hebben. Dit zou het gevolg zijn van de grote macroporositeit van de afwijkende mortels. De afwijkende waarde zou verklaard kunnen worden door waterverlies op het moment van wegen. Hierdoor zouden deze waarden voor de mortels een onderschatting kunnen zijn. Deze redenering past ook bij het beschouwen van de data, waarin te zien is dat de grootte van de capillaire absorptie nauw aansluit bij de overige capillaire absorptiewaarden en dat de open porositeit voor Lede 4 lager is dan de open porositeit van de waarden van de andere samenstellingen met Lede zand. De lagere open porositeit van Lede 4 is mogelijk het gevolg van de aanwezigheid van grovere aggregaten of van de andere samenstelling.

4.14.3 Sterkte versus open porositeit

Volgens Lanas & Alvarez (2003) hebben zeer poreuze materialen normaal een lagere sterkte. Er werd echter opgemerkt dat bij kalkmortels, een toename van het bindmiddel resulteerde in een toename van de porositeit en van de sterkte. Deze verhoging van de sterkte is beperkt door een minimale hoeveelheid aan aggregaat, teneinde barsten te voorkomen. De hogere druksterkte bij een hoger kalkgehalte is volgens Lanas & Alvarez (2003) het gevolg van de verhoogde aanwezigheid van calciumsilicaten. Dit zal zorgen voor een snellere en meer complete hydratatie met de ontwikkeling van een goede, continue en in elkaar grijpende structuur tot gevolg (Lanas et al., 2004). Bij het uitzetten van de druksterkte versus de open porositeit (Figuur 73) is er voor de mortels met Lede zand en gebroken Ledesteen geen verband tussen beide. De mortels met Lo/Ge vertonen echter wel een sterk verband. Figuur 73 toont aan dat voor mortel met Lo/Ge de druksterkte zal afnemen bij een toename van de open porositeit. Deze trend is waarschijnlijk het gevolg van de hoge macroporositeit van de mortels met een laag gehalte aan bindmiddel (vb. Lo/Ge 1), wat zal zorgen voor een grote open porositeit. Net zoals de lage open porositeit en hoge capillaire absorptie, is de hogere sterkte van Lede 4 het gevolg van een te grote hoeveelheid water bij mengen. Hierdoor is de uitharding van deze mortels verder gevorderd en hebben de mortels een grotere sterkte.



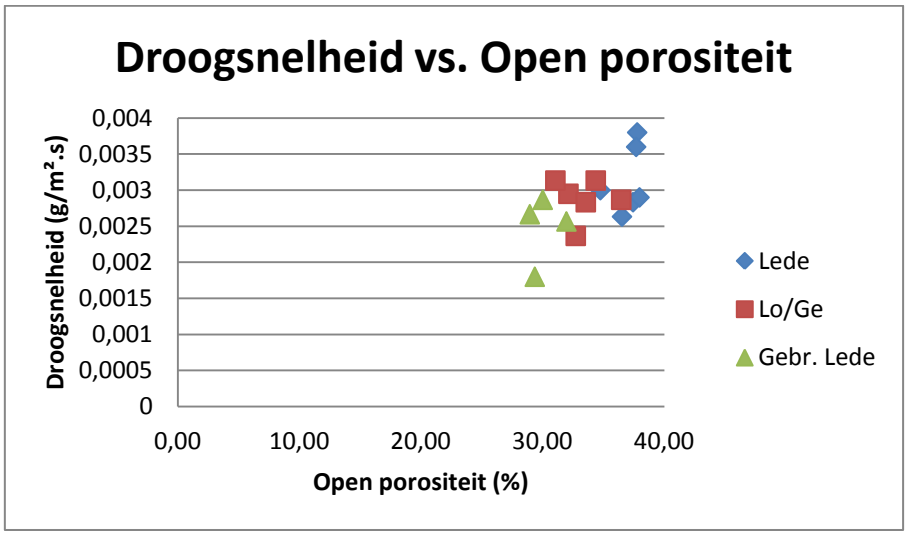
Figuur 73: Open porositeit versus druksterkte.

4.14.4 Porositeit versus droogsnelheid

De droogsnelheden van de samenstellingen kunnen gelinkt worden aan de porositeit en de connectiviteit van de poriën. Indien de porositeit en connectiviteit hoog is, zou de droogsnelheid eveneens hoog moeten zijn. De lage droogsnelheid van de mortels met een B/Ag van 5/15 komt overeen met hun lagere porositeit. De droogsnelheid zal bij deze mortels lager zijn, vermoedelijk doordat deze samenstellingen de beste stapeling benaderen en dat bij toevoeging van bindmiddel of aggregaat de porositeit en ook de droogsnelheid zal toenemen. Hoewel de open porositeit een duidelijke trend vertoont voor de mortels met Lo/Ge van reeks 1, worden deze verschillen niet waargenomen bij de droogsnelheid. Het omgekeerde kan gezegd worden voor de mortels met Lede zand van reeks 1 en voor de mortels met gebroken Ledesteen van reeks 2. Deze mortels hebben ongeveer dezelfde porositeit. De mortels met Lede zand volgen de trend, maar bij de mortels met gebroken

Ledesteen wordt het omgekeerde geobserveerd. De samenstellingen met een B/Ag van 5/15 hebben een hogere droogsnelheid en de mortels met een B/Ag van 5/18 een lagere.

Het uitzetten van de open porositeit tegenover de droogsnelheid is waar te nemen in Figuur 74. De determinatiecoëfficiënt (R^2) van de resultaten bedraagt slechts 0,3129, wat duidt op een zwak verband. Het zwakke verband tussen de droogsnelheid is mogelijk te wijten aan afwijkende waarden voor de droogsnelheid ten gevolge van het niet afplakken van de stalen. Een andere verklaring is dat het slechte verband tussen beide veroorzaakt wordt doordat de hoge open porositeit voornamelijk gesitueerd is in kleine poriën, die het water sterker vasthouden, waardoor de droogsnelheid verlaagd wordt zelf met een hogere open porositeit.



Figuur 74: Droogsnelheid versus open porositeit.

4.15 Compatibiliteit

Wanneer de geluidvoortplantingssnelheden voor de proefstukken vergeleken worden met de geluidvoortplantingssnelheid van de Ledesteen, zijn er enkele gelijkaardige waarden op te merken. Opvallend is wel dat het voornamelijk de mortels met een B/Ag van 5/12 (2 en 5) en 5/15 (3 en 6) zijn die een gelijkaardige geluidvoortplantingssnelheid hebben als de Ledesteen. De mortels met gebroken Ledesteen hebben hogere geluidvoortplantingssnelheden.

In vergelijking met de Ledesteen hebben alle mortels een veel lagere sterkte. Vermits de mortels echter geen dragende functie hebben, heeft dit echter niet zo een grote invloed op de compatibiliteit. Wel kan gezegd worden dat de sterkte van mortels Lede 1, Lo/Ge 1 en Lo/Ge 4 te laag is, wat er toe leidde dat deze verpulverd werden tijdens de druksterkte test.

Het vergelijken van de waterdampdoorlatendheid van de mortels met de waterdampdoorlatendheid voor de Ledesteen toont aan dat de waterdampdoorlatendheid van de mortels een orde groter is dan die van de Ledesteen. De bekomen δ-waarden zorgen ervoor dat op vlak van de waterdampdoorlatendheid, elke mortel compatibel beschouwd kan worden tegenover de Ledesteen. Hetzelfde kan gezegd worden voor de capillaire absorptie, waterabsorptie bij atmosferische druk en de droogsnelheid.

De hogere capillaire absorptie in vergelijking met de Ledesteen zal een positief effect hebben op de Ledesteen en een positief en negatief effect hebben op de mortel. De

capillaire absorptie waarden van de mortels zijn veel hoger, waardoor er vocht uit de steen kan gezogen worden, waardoor de chemische verwering van de steen door carbonatatie en sulfatatie verminderd wordt. Doordat de mortel het vocht opneemt zal dit ervoor zorgen dat de mortel voor een langere periode vochtig zal blijven, waardoor het hydratatie proces langer zal kunnen doorgaan en de mortel verder uithard. Het opnemen van vocht zorgt er echter ook voor dat de mortel gevoeliger wordt aan verwering ten gevolge van vorst-dooi cycli en chemische verwering. De algemeen hoge waterabsorptie bij atmosferische druk kan verklaard worden, door rekening te houden met de hoge porositeit die geobserveerd is in de fluorescentiebeelden van 4.2 en de hoge open porositeit (4.4). De hogere droogsnelheid zal zorgen dat de mortels zullen helpen de Ledesteen droog te houden en waardoor de verwering verminderd zal worden.

Vermits de Ledesteen een vrij heterogeen gesteente is, zal de permeabiliteit eveneens variëren. De permeabiliteit van de massieve Ledesteen (6,35 ± 9,56 mD) is lager dan alle gemeten waarden voor de permeabiliteit van de mortels, waardoor alle mortels compatibel zijn met de Ledesteen op vlak van de permeabiliteit. Wanneer echter rekening gehouden wordt met de permeabiliteit van de meer poreuze Ledesteen (156,82 ± 203,39 mD) hebben veel mortels lagere permeabiliteit. Mortels die een hogere permeabiliteit bezitten zijn Lede 1, Lo/Ge 1, Lo/Ge 4 en Lo/Ge 6. Indien men er van uitgaat dat de waarde van de poreuzere Ledesteen de bovengrens vormt voor de Ledesteen (wat waarschijnlijk niet het geval is), zijn enkel deze mortels (qua gaspermeabiliteit) compatibel voor alle Ledestenen. Indien men de waarden van de mortels met een gemiddelde waarde voor de Ledesteen vergelijkt, zijn mortels Lede 3 en 4 eveneens compatibel met de Ledesteen. Hieruit volgt dat de compatibiliteit van een mortel sterk afhankelijk is van welke variant van de Ledesteen hersteld wordt.

De thermische uitzettingscoëfficiënt van samenstellingen met Lo/Ge liggen het dichtst bij de thermische uitzettingscoëfficiënt van de Ledesteen. Vermits de thermische uitzettingscoëfficiënt voornamelijk afhankelijk is van de samenstelling is dit vrij opmerkelijk omdat het voornamelijk de chemische samenstelling van de mortels met Lede zand en gebroken Ledesteen zijn die chemisch het meest gelijkaardig zijn aan de Ledesteen. De reden waarom de thermische uitzettingscoëfficiënt van de samenstellingen met Lede zand en gebroken Ledesteen meer afwijken van de Ledesteen dan de mortels met Lo/Ge is waarschijnlijk het gevolg van het verschil in verdeling van het calcietcement. Vermits er geen grenswaarden ingesteld zijn voor het evalueren van de thermomechanische compatibiliteit, kan er enkel gesteld worden dat mortels Lo/Ge 2 en 3 het meest compatibel zullen zijn. In volgorde van compatibiliteit zijn de overige mortels: Lede 1, Gebr. Lede 2, Gebr. Lede 1, Lede 3 en Lede 2.

Uit de visuele evaluatie is op te maken dat qua textuur, de mortels met Lede zand en Lo/Ge sterk gelijken op de Ledesteen. Afwijkingen zijn te vinden in het voorkomen van kalknodules in Lede 1, Lede 3, Lo/Ge 1 en Lo/Ge 3, dewelke ook geobserveerd zijn in de slijpplaatjes. De mortels met gebroken Ledesteen wijken meer af, dit ten gevolge van het meer grofkorrelig zijn van het aggregaat.

De kleur van de mortels met Lede zand komt ook vrij goed overeen met de Ledesteen in onverweerde toestand. Na verwering zorgen de kalknodules er voor dat er geen exacte esthetische overeenkomst is met de Ledesteen. Lede 2 bevat geen nodules en zal hierdoor sterker gelijken op de Ledesteen, hoewel het nog steeds een iets bleker patina heeft. In niet-verweerde toestand zijn de mortels met Lo/Ge bleker en meer okerkleurig dan de Ledesteen

en is de typische grijs-groene kleur van de Ledesteen niet waargenomen, waardoor deze minder compatibel zijn. Na verwering bekomen deze mortels eveneens een okerkleurig patina, hetgeen echter bleker zal zijn dan het patina van de Ledesteen. De kleinere kalknodules zorgen bij deze mortels niet voor een esthetisch probleem. In onverweerde toestand zijn de mortels met gebroken Ledesteen veel bleker dan de Ledesteen en de overige mortels. Na de 30^{e} cyclus lijkt de mortel meer op de andere mortels en de Ledesteen, dit ten gevolge van de ontwikkeling van een okerkleurige patina. Visueel is Lede 2 het meest gelijkaardig aan de Ledesteen, gevolgd door Lo/Ge 2, dat een bleker patina ontwikkelt.

Vermits alle mortels compatibel zijn in functie van de waterdampdoorlatendheid, de capillaire absorptie, waterabsorptie bij atmosferische druk en de droogsnelheid, zullen deze eigenschappen niet bepalend zijn bij het determineren van de meest compatibele mortel.

Hoewel de thermische expansie coëfficiënt van Lede 1 zich het derde dichtst bij die van de Ledesteen bevindt, zal deze mortel, samen met mortel Lo/Ge 1, vanwege het brosse karakter en het voorkomen van grote kalknodules (in de petrografische analyse en in de visuele evaluatie), niet voldoende compatibel zijn met de Ledesteen.

Mortel Lede 3 wordt eveneens als onvoldoende compatibel geacht. Dit is het gevolg van de uitzonderlijk lage thermische uitzettingscoëfficiënt en het voorkomen van kalknodules die zorgen voor een esthetische disharmonie. Ten gevolge van de verschillende textuur en zijn meer afwijkende thermische uitzettingscoëfficiënt, zijn de mortels met gebroken Ledesteen eveneens incompatibel. Dit is hoofdzakelijk het gevolg van de grovere korrelgrootte.

Mortel Lede 2 wordt voor de meeste eigenschappen zeer compatibel geacht en zowel voor en na de verwering lijkt deze het sterkst op de Ledesteen. Helaas zal deze onvoldoende compatibel zijn met de Ledesteen doordat de mortel een veel hogere thermische uitzettingscoëfficiënt en een lagere permeabiliteit heeft. Indien de mortel wordt toegepast op plaatsen met relatief weinig en kleine temperatuurverschillen, kan deze wel als compatibel beschouwd worden.

De overblijvende mortels met Lo/Ge hebben licht afwijkende kleuren voor en na verwering. verder is er qua textuur een zekere overeenkomst tussen Lo/Ge 2 en 3 en de ledesteen. Lo/Ge 2 en 3 zijn zeer gelijkaardig, maar Lo/Ge 2 kan als meer compatibel beschouwd worden. De thermische uitzettingscoëfficiënt van Lo/Ge 2 is het meest gelijkaardig aan de Ledesteen en qua textuur is deze, door het afwezig zijn van kalknodules, meer gelijkend op de Ledesteen dan Lo/Ge 3. Verder is deze mortel ook sterker, wat zal zorgen voor een hogere duurzaamheid.

Indien de kalknodules weggewerkt zouden kunnen worden, door bijvoorbeeld een andere mengprocedure te volgen, zouden de mortels waar deze in voorkomen een betere esthetische compatibiliteit hebben. Het wegwerken van de nodules zal ook een invloed hebben op de technische eigenschappen. Hierdoor zouden de mortels zowel meer als minder compatibel kunnen worden.

5 Besluit

Deze thesis had als doel het ontwikkelen van een herstelmortel die compatibel was met de Ledesteen. De drie verschillende aggregaten zijn geëvalueerd door, voor elk aggregaat twee reeksen van telkens drie samenstellingen per aggregaat te maken. De meeste mortels hadden een goede consistentie, slechts enkelen waren te vloeibaar.

De evaluatie van de compatibiliteit werd uitgevoerd op basis van de technische en esthetische eigenschappen van de mortels. In het algemeen kan gesteld worden dat de meeste mortels petrografisch gelijken op de Ledesteen. Enkele mortels bestaan echter voor een groot deel uit kalknodules. Deze nodules zorgen er voor dat deze mortels op esthetisch vlak als niet compatibel beschouwd kunnen worden. Verder kunnen ze ook zorgen voor een grotere macroporositeit, met o.a. een lagere sterkte en een hoge permeabiliteit tot gevolg. Andere waargenomen verschillen zijn het hogere kalkgehalte van alle mortels, het ontbreken van fossielen en glauconiet bij mortels met Lo/Ge en de grovere korrelgrootte bij mortels met gebroken Ledesteen en Lo/Ge.

Het hogere kalkgehalte leidde er toe dat de mortels een hogere open porositeit en lagere schijnbare volumieke massa bekwamen dan de Ledesteen. Ten gevolge van de hoge open porositeit zijn de waterdampdoorlatendheid, capillaire absorptie, waterabsorptie bij atmosferische druk en de droogsnelheid voor alle mortels zeer hoog. Hierdoor kunnen alle mortels voor deze eigenschappen als compatibel beschouwd worden. De permeabiliteit van zowel de mortels als de Ledesteen is echter meer variabel. Hierdoor zijn alle mortels compatibel in vergelijking met de meer massieve variant maar slechts enkelen met de meer poreuze variant.

Het meest bepalende kenmerk van de fysische compatibiliteit is de thermische expansiecoëfficiënt. Hierbij vertonen de mortels met Lo/Ge de meest compatibele waarden. Enkele bekomen waarden waren echter onverwacht laag. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat dit het gevolg is van de sterke anisotropie van de thermische expansie van calciet. Waarom dit enkel zo een groot effect heeft bij deze mortels is niet zeker. Een verklaring kan mogelijks gevonden worden bij verder onderzoek.

Ter evaluatie van de esthetische compatibiliteit zijn de mortels getest op de verwering ten gevolge van thermische schok. Initieel hadden alle mortels een blekere kleur dan de Ledesteen. Na een aantal cycli ontwikkelde de Ledesteen een okerkleurig patina. Later vond er bij de mortels eveneens een kleurverandering plaats. Het patina van de mortels met Lede zand, lijkt hierbij het sterkst op het patina van de Ledesteen. De mortels met gebroken ledesteen ontwikkelden ook een zeer gelijkaardig patina, maar ten gevolge van de textuur, waren deze minder compatibel. De mortels met Lo/Ge ontwikkelen echter echter een patina dat bleker is dan het patina van de Ledesteen. Esthetisch is mortel Lede 2 het meest compatibel. Ten gevolge van zijn sterk afwijkende thermische expansie zal deze echter niet geschikt zijn voor het gebruik op plaatsen met relatief veel en grote temperatuurschommelingen.

Het gebruik van gebroken Ledesteen fragmenten als aggregaat was minder geslaagd. Mortels met gebroken Ledesteen bekomen in deze studie minder compatibele waarden dan de mortels met Lede zand of Lo/Ge. Dit is hoofdzakelijk het gevolg van de grovere korrelgrootte van het granulaat. Verder onderzoek zou kunnen nagaan of gebroken Ledesteen met een kleinere korrelgrootte beter geschikt zou zijn.

Uit deze thesis kan besloten worden dat herstelmortels compatibel kunnen zijn met de Ledesteen, ook doorheen de tijd. Het bekomen van een geschikte herstelmortel is hierbij echter niet enkel afhankelijk van eigenschappen van de mortel, maar ook van de heterogeniteit van de Ledesteen en externe invloeden. Om mortels met een betere compatibiliteit te bekomen is verder onderzoek vereist. Het belangrijkste esthetische probleem was de aanwezigehid van de kalknodules. Verder onderzoek zou kunnen trachten deze weg te werken en evalueren of de nieuwe mortels ook technisch compatibel zijn. Verder onderzoek zou moeten leiden naar een mortel die zowel de verkleuring vertoont van de mortels met Lede zand, als de technische compatibiliteit heeft van de mortels met Lo/Ge.

Referenties

Literatuur

Balegro. Technische fiche Balegemse steen. 2 p.

Barsottelli, M., Cellai, G., F., Fratini, F. & Manganelli Del Fà, C., 2001. The hygrometric behaviour of some artificial stone materials used as elements of masonry walls. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 34, p. 211-216

Beck, K. & Al-Mukhtar, M., 2008. Formulation and characterization of an appropriate lime-based mortar for use with a porous limestone. *Environmental Geology* 56, p. 715–727

Beyen, S., 2007. Impact van restauratiecharters op het restauratieproces en relatie met uitvoerders bij restauratie van monumenten. WTA syllabus: *Restauratie, onderhoud en beheer van monumenten*, Heusden-Zolder, I.1-I.10.

Bianco, N., Angela Calia, A., Denotarpietro, G. & Pietro Negro, P., 2013. Hydraulic mortar and problems related to the suitability for restoration. *Periodico di Mineralogia* 82, 3, p. 529-542

Birot, P., Henin, S. ,Guillien, Y., Delvert, J., 1962. *Contribution à l'étude de la désagrégation des roches*. Centre de documentation universitaire, Paris

Breda, K., 2005. De « carrière » van de architect. In : LAGROU, D. & DREESEN, R. (eds), *Eerste vlaams-nederlandse natuursteendag*. Syllabus, 1e bijdrage (5 p), Mol, België.

Camerman, C., 1945. S. d. L'altération des pierres de tailles par les fumées. Rapport préliminaire. Rapport complémentaire. *Service géologique de Belgique*. 147 + 120 p.

Camerman, C., 1957. *Beschrijving en gebruik in België en in Nederland van de Franse witte steen*. Hayez, Brussel, 100 p.

Cazalla, O., Rodriguez-Navarro, C., Sebastian, E., & Cultrone, G., 2000. Aging of Lime Putty: Effects on Traditional Lime Mortar Carbonation. J. *American Ceramic Society*., 83 [5], p. 1070–1076

Cizer, O., Van Balen, K., Van Gemert D. & Elsen, J., D., 2008. Blended lime-cement mortars for conservation purposes: Microstructure and strength development. *6th International*

Conference on Structural Analysis of Historical Constructions: Preserving Safety and Significance 2, p. 965-972

Cnudde, V., 2005. *Exploring the potential of X-ray Tomography as a new non-destructive research tool in conservation studies of natural building stones*. Doctoraatsproefschrift, UGent, 192 p.

Cnudde V., De Ceukelaire M., Dewanckele J., Everaert G., Jacobs P., Laleman M., C., 2009. *Gent…Steengoed*! Academia press, 416p.

Cochran, F., M. & Berner, R., A., 1996. Promotion of chemical weathering by higher plants: field observations on Hawaiian basalts, *Chemical Geology*, 132, 71–77.

Cultrone, G., Sebastián, E., & Ortege Huertas, M., 2005. Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes. *Cement and Concrete Research* 35,p. 2278-2289

De Ceukelaire, M. & Cnudde, V., 2009. *Ledesteen en Alternatieven – Inleiding tot een workshop*. Geological survey of Belgium. Professional paper 2009/1 N. 305: 149-154.

De Meuter, F. & Laga, P., 1976. Lithostratigraphy and biostratigraphy based on benthic foraminifera of the Neogene deposits of northern Belgium. *Bulletin de la Société belge de Géologie* 85(4), p. 133-152.

De Naeyer, A., 2002. New materials for safeguarding cultural heritage. In: *Workshop 10 ARIADNE new materials for safeguarding cultural heritage*.

De Timmerman, H., 2014. *Invloed van verwering van natuursteen op de permeabiliteit*. (niet-gepubliceerd bachelorprojectverslag, vakgroep Sedimentaire Geologie en Ingenieursgeologie, Universiteit Gent).

Dukhin, A., S. & Goetz, P., J., 2002. *Ultrasound for characterizing colloids – particle sizing, zeta potential, rheology*. 425 p.

Dusar, M., Dreesen, R. & De Naeyer, A. (2009). *Renovatie & restauratie. Natuursteen in vlaanderen, versteend verleden*. Kluwer, Mechelen, p. 562.

El Abassi, D., Faiz, B., Ibhi, A., Aboudaoud, I. & Aziam, S., 2013. Nondestructive characterization of ornamental rocks with ultrasound. *Civil and Environmental Research*, Vol.5, p. 21-25

Elert, K., Rodriguez-Navarro, C., Pardo, E., S., Hansen, E. en Cazalla, O., 2002. Lime mortars for the conservation of historic buildings. *Studies in Conservation*, Vol. 47, No. 1 (2002), pp. 62-75

Filomena, C., M., Hornung, J. & Stollhofen H., 2014. Assessing accuracy of gas-driven permeability measurements: a comparative study of diverse Hassler-cell and probe permeameter devices. *Solid Earth*, 5, p. 1–11

Fobe, B., 1986. *Petrografisch onderzoek van de coherente gesteenten van het Eoceen in Laag- en Midden België*. Doctoraatsproefschrift, UGent, 2 delen, p. 215 + p. 138.

Fobe, B., 1989. *Het Eoceen tussen Mol en Beringen*. Geologische Dienst van België, Professional paper, 239:13 p.

Fobe, B., 1990. Onderzoek van bruine banden in de Formatie van Lede, ontstaan door in situ-verwering van Balegemse steen. *Natuurwetenschappelijk Tijdschrift (Gent)*, vol. 72. P. 136-142.

Fobe, B. & Spiers, V., 1992. Sedimentology and facies distribution of the Lede Formation (Eocene) in Belgium and Northern France. *Contr. Tert. Quatern. Geol*., 29: p. 9-20.

Goossens, M., Elsen, J. & Laga, P., 2008. In het spoor van Cornelis Floris. Verslag steengroeventocht. Excursienota's. In *Icomos contact*, 21, nr.2, p. 16-23

Griswold, J. & Uricheck, S., 1998. Loss compensation methods for stone. *J Am Inst Cons* 37(1):89‑110

Gulinck, A. & Hacquaert, M., 1954. L'Eocene. In: FOURMARIER, P. (ed.) Prodrome d'une description géologique de la Belgique. *Société Géologique Belg*e, Liège, p. 451–493.

Hall, C. & Hoff, W., D., 2002. *Water Transport in Brick, Stone, and Concrete*. 318p.

Hansen, E., F., Rodríguez-Navarro, C., & Van Balen K., 2008. Lime putties and mortars: Insights into fundamental properties. *Studies in Conservation*, Vol. 53, No. 1, p. 9-23

Hassan, K., E., P.C. Robery, P., C. & Al-Alawi, L., 2000. Effect of hot-dry curing environment on the intrinsic properties of repair materials. *Cement & Concrete Composites* 22, p. 453-458

Herb, A., T., Grosse, C., U. & Reinhardt, H.-W., 2013. Ultrasonic testing device for mortar. *Otto-Graf-Journal* Vol. 10, p. 144-155

Holmes, S. & Wingate, M., 1997. *Building with lime: a practical introduction*. ITDG, London, 309p.

Isebaert, A., Van Parys, L., Cnudde, V., 2014. Composition and compatibility requirements of mineral repair mortars for stone ‑ A review. *Construction and Building Materials 59*. P. 39-50

Jacobs, P., 1975. *Bijdrage tot de lithostratigrafie van het Boven-Eoceen en het Onder-Oligoceen in noordwest België*. Doctoraatsproefschrift, R.U.G., 182 p.

Jacobs, P. & Sevens, E., 1991. Sedimentation model of Eocene continental shelf deposits offshore the Belgian Coast. *Abstracts Third Bi-annual Joint Meeting RCNPS-RCNNS*, Gent, Belgium. p. 37-39.

Jacobs, P. & Sevens, E., 1993. Middle Eocene sequence stratigraphy in the Balegem Quarry (Western Belgium, southern bight North Sea). *Bulletin van de Belgische Vereniging voor Geologie*, 102, 203-213.

Kaasschieter, J., P., H., 1961. Foraminifera of the Eocene of Belgium. *Verhandelingen van het Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen*, 147: 1-271.

Kahraman, S., Ulker, U. & Delibalta, M., S., 2007. A quality classification of building stones from P-wave velocity and its application to stone cutting with gang saws. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Volume 107, p. 427-430.

Klisinska-Kopacz, A., Tislova, R., Adamsk, G. & Kozłowski, R., 2010. Pore structure of historic and repair Roman cement mortars to establish their compatibility. *Journal of Cultural Heritage* 11. p. 404-410

Lanas, J. & Alvarez, J., I., 2003. Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research* 33, p. 1867–1876

Lanas, J., Pérez Bernal,J., L., Bello, M., A. & Alvarez Galindo, J., I., 2004. Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research* 34, 2191–2201

Lanas, J., Sirera, R. & Alvarez, J., I., 2005. Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments. *Thermochimica Acta* 429, p. 219–226

Lanas, J., Sirera, R. & Alvarez, J., I., 2006. Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions. *Cement and Concrete Research* 36, p. 961–970

Lawrence, R., M., Mays, T., J., Rigby, S., P., Walker, P. & D'Ayala, D., 2007. Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars. *Cement and Concrete Research* 37 1059–1069

Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., & Kilikoglou, V., 2005. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research* 35, P. 1577-1586

Maréchal, R. & Laga, P. (1988). *Voorstel lithostratigrafische indeling van het Paleogeen. Nationale commissies voor stratigrafie: Tertiar*. 207p.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E. & Anagnostopoulou, S., 2013. Optimization of compatible restoration mortars for the earthquake protection of Hagia Sophia. *Journal of Cultural Heritage* 14S, p. 147-152

Moropoulou, A., Cakmak, A. S., Biscontin, G., Bakolas, A., & Zendri, E., 2002. Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. *Construction and Building Materials* 16, p. 543–552

Moorehead, D., R., 1986. Cementation by the carbonatation of hydrated lime. *Cement and Concrete Research* 16, pp. 700-70

Mosquera, M.,J., Silva, T., B., Prieto, B & Ruiz-Herrera E., 2006. Addition of cement to lime-based mortars: Effect on pore structure and vapor transport. *Cement and Concrete Research* 36, p. 1635-1642

Mourlon, M., 1880. *Géologie de la Belgique*. t. 1, 317p.

Mourlon, M., 1888. Sur le Lédien de Lede, près d'Aost. *Société Royal Malacolique Belgique*, 23: xix-xxiii.

Pavía, S. & Toomey, B., 2008. ‚Influence of the aggregate quality on the physical properties of natural feebly-hydraulic lime mortars. *Materials and Structures* 41, 559–569

Pavía, S. & Tracy, E., 2006. A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars. *Materials and Structures* 39, p.391–398

Pecchioni, A., Malesani, P., Bellucci, B., & Fratini, F., 2005. Artificial stones utilized in Florence historical palaces between the XIX and XX centuries. *Journal of Cultural Heritage* 6, p. 227–233

Quirk, J., Leake, J., R., Banwart, S. A., Taylor, L., L., & Beerling, D., J., 2014. Weathering by tree-root-associating fungi diminishes under simulated Cenozoic atmospheric CO_2 decline. *Biosciences* 11, I. 2, p. 321-331. doi:10.5194/bgd-10-15779-2013

Quist, W., J., 2011. *Vervanging van Belgische steen, materiaalkeuze bij restauratie*. Doctoraatsproefschrift, T.U. Delft. 326 p.

Quist, W., J., 2012. Steenkeuze voor restauratie: 150 jaar ontwikkeling in Nederland en Vlaanderen. De Clercq, H, Van Gemert, D, Hees, Rvan (Eds.) *WTA-studiedag Natuursteen natuurlijk.* (pp. 1-14) s.l.: WTA-Nederland-Vlaanderen.

Shepard, M., 2009, Reservoir fluids, *in* M. Shepard, *Oil field production geology: AAPG Memoir 91*, p. 29-35.

Szemerey-Kiss, B., Török, A. & Siegesmund, S., 2013. The influence of binder/aggregate ratio on the pore properties and strength of repair mortars. *Environmental Earth Sciences* 69, p. 1439-1449

Teutonico, J.M., Charola, A.E., De Witte, E., Grasegger, G., Koestler, R.J., Laurenzi Tabasso, … Snethlage, R., Group Report 'How Can We Ensure the Responsible and Effective Use of Treatments (Cleaning, Consolidation, Protection)?', *Dahlem Workshop on Saving Our Architectural Heritage: Conservation of Historic Stone Structures*, Baer, N.S. and Snethlage, R. (Eds) (Chichester, John Wiley & Sons, 1997) 293-313.

Torraca, G., 2009. *Lectures on materials science for architectural conservation*. Los Angeles: J.P. Getty Trust, The Getty Conservation Institute

Van Balen, K., Papayanni, I., Van Hees, R., Binda, L. & Waldum, A., 2005. Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars. *Materials and Structures*, 38. 781-785.

Van Balen, K., Van Bommel, B., Van Hees, R., Van Hunen, M., Van Rhijn, J. & Van Rooden, M., 2003. *Kalkboek. Het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden*. Rijksdienst voor monumentenzorg, Zeist (NL)

Van Balen, K. & Van Gemert, D., 1994. Modelling lime mortar carbonation. *Materials and Structures* 27, p. 393-398.

Van der Kelen, I., 1996. *De Houtemse steen*. Darcos, 22 p.

Ventolà, L., Vendrell, M., & Giraldez, P., 2013. Newly-designed traditional lime mortar with a phase change material as an additive. *Construction and Building Materials* 47, p. 1210–1216

Vicat, L., J.,1837. *A practical and scientific treatise on calcareous mortars and cements*. John Weale Publ. herdrukt door Donhead, 1997.

Vindium engeneering. *TinyPerm II, Portable Air Permeameter*. User's Manual. 9p.

Vinguiry Inc., 2001. Material Safety Data Sheet, Phenolphthaleïne. 7p.

Von Konow, T., 2003. Aggregate grain size distribution: a major influence on many properties of lime mortars for restoration. In: *Euromat 2003 Symposium P2 Materials & Conservation of Cultural Heritage*, Lausanne.

Winnefeld, F. & Böttger, K., G., 2006. How clayey fines in aggregates influence the properties of lime mortars. *Materials and Structures* 39, p. 433-443

WTCB, 1997. *Natuursteen. Technische Voorlichting 205*, 145 p.

WTCB. *Natuursteen. Classificatie van gesteenten. Technische voorlichting 228*.

Normen

EN 196-1 (2005) Beproevingsmethoden voor cement – Deel 1: Bepaling van de sterkte

EN 459-1 (2010) Bouwkalk – Deel 1: Definities, specificaties en conformiteitscriteria

EN 1015-11 (1999): Beproevingsmethoden voor metselmortel – Deel 11: Bepalen van de buigsterkte en druksterkte van verharde mortel

EN 1925 (1999) *Natural Stone test methods – Determination of water absorption coefficient by capillarity*

EN 1936 (2006) Beproevingsmethoden voor natuursteen – Bepaling van de dichtheid en de schijnbare dichtheid en van de totale en open poreusheid

EN 12240 (2000) Beproevingsmethoden voor natuursteen - Petrografisch onderzoek

EN 13755 (2008) Beproevingsmethoden voor natuursteen – Bepaling van waterabsorptie bij atmosferische druk

EN 14579 (2004) *Natural stone test methods – Determination of sound speed propagation*

NBN EN 14066 (2013): Beproevingsmethoden voor natuursteen – Bepaling van de weerstand tegen veroudering door plotselinge temperatuurswisseling

NBN EN 15803 (2010) Instandhouding van cultureel erfgoed – Beproevingsmethoden – Bepaling van de waterdampdoorlatendheid (δp)

NEN 5950 (1995): Voorschriften Beton Technologie (VBT 1995) - Eisen, vervaardiging en keuring

Internetbronnen

Vanhellemont, Y., Van Peer, W. & Vernimme, N.. Opleiding restauratievakman moderne bouwchemie, Module Gevelreiniging. Geraadpleegd op 23/03/2014

https://www.onroerenderfgoed.be/assets/files/projects/downloads/Bijscholingsmodule_gevelreiniging.pdf

Gent.be (B), Korenmetershuis, geraadpleegd op 12/05/2014, http://www.gent.be/eCache/THE/1/464.cmVjPTQ0MTM2.html

Gent.be (A), Sint-Michielskerk, geraadpleegd op 12/05/2014, http://www.gent.be/eCache/THE/1/464.cmVjPTQ0NDg3.html

Bijlagen

Bijlage 1

Tabel 10: Geraadpleegde werken mortel samenstelling.

Referentie	onderzoek	bindmiddel	B/Ag	B/W	massa of volume
Cazalla et al. (2000)	aged hydrated lime	aged putty vs commercial	<1/4	-	-
Hassan, Robery & AL-Alawi (2000)	herstel mortels	portland cement	1/2,33	0,33	massa
Moropoulou et al. (2002)	crushed brick lime mortars		1/3	-	volume
Lanas & Alvarez (2003)	mechanisch gedrag van herstelmortels voor voegen	luchthardende kalk	1/1 tot 1/5	0,5 (voor 1/1) tot 1,2 (voor 1/5)	volume
Von Konow (2003)	invloed van korrelgrootte verdeling op resauratie mortels	kalk	1/4,5 en 1/8,5	-	massa
Lanas et al. (2004)	mechanische eigenschappen van mortels op basis van hydraulische kalk	NHL	1/1 tot 1/5	-	volume
Cultrone, Sebastián & Ortega Huertas (2005)	gedwongen en natuurlijke carbonatatie van kalkmortels	hydraulische en niet hydraulische kalk	1/3	1	volume
Lanas, Sirera & Alvarez (2005)	evaluatie van veranderingen in samenstelling van mortels in verschillende omgevingen	luchthardende en hydraulische	1	1/2	volume

Maravelaki-Kalaitzaki et al. (2005)	herstel mortels op basis van hydraulische kalk voor metselwerk	NHL 3,5	1/2 en 1/3	-	massa
Pecchioni et al. (2005)	evaluatie kunststeen uit 19e en 20e eeuw	hydraulische mortel	1/1, 1/3 en 2/3	-	-
Pavía & Treacy (2006)	vergelijkende studie vette kalk en zwak hydraulische kalk	vette kalk en NHL 2	1/2,5	1,5 (vette kalk) en 0,8 (NHL 2)	massa
Lanas, Sirera & Alvarez (2006)	evaluatie van het mechanisch gedrag van herstelmortels voor metselwerk	hydraulische kalk	1/1 tot 1/5	(1:2)	volume
Mosquera et al. (2006)	invloed van cement bijmenging op porie structuur en damptransport	luchthardende kalk met cement en NHL 3,5	1/3	1	volume
Winnefeld & Böttger (2006)	invloed van klei op mortel eigenschappen	CL 90	1/5	-	massa
		NHL 2	1/5	-	massa
		NHL 5	1/5	-	massa
		CL 90 met portland cement	1/5	-	massa
Pavia & toomey (2007)	invloed van aggregaat op fysische eigenschappen van mortel	zwakke hydraulische kalk (NHL 2)	1/3	0,55	-
Cizer et al. (2008)	evaluatie van kalk-cement mortels	portland, kalk hydraat, kalk putty	1/3	-	massa
Hansen, Rodriguez-Navarro & Van Balen (2008)	eigenschappen van gehydrateerde kalk en mortels voor metselwerk en pleisteren		1/3	-	volume
Beck & Al-Mukhtar (2008)	samenstelling en evaluatie van een kalkmortel	gehydrateerde kalk	5, 10, 15, 20, 30, 50, 80 % kalk	1/2	massa
Ventola, Vendrell & Giraldez (2013)	traditionele mortel met een fase veranderende bijmenging	kalk	1/3	1/1-1/2	volume
Moropoulou et al. (2013)	optimalisatie compatibliteit herstel mortels	NHL-2	1/2,3	-	-
Szemerey-Kiss, Török & Siegesmund (2013)	invloed van B/Ag op porie egenschappen en mechanische sterkte	hydrateerde kalk	70/30 en 50/50	-	massa%
Bianco et al. (2013)	restauratie mortel voor metselwerk	NHL 3,5	1/2,5	-	-

Bijlage 2

Figuur 75: Volumeverhoudingen Lede.

Figuur 76: Volumeverhoudingen Lo/Ge.

Figuur 77: Volumeverhoudingen Gebr. Lede.

Bijlage 3

Tabel 11: Gegevens carbonatatiediepte.

	staal nr.	1	2	3	4
Lede 1	1	x	x	x	x
	2	x	x	x	x
	3	x	x	x	x
	4	x	x	x	x
Lede 2	5	16	18	16	17
	6	9	14	12	10
	7	11	16	16	13
Lede 3	8	x	x	x	x
	9	x	x	x	x

	10	x	x	x	x
Lede 4	11	9	12	14	11
	12	11	11	16	15
	13	9	12	10	10
Lede 5	14	11	9	7	1
	15	8	9	8	8
	16	9	9	8	10
Lede 6	17	8	5	7	1
	18	7	9	6	4
	19	10	14	9	2
Lo/Ge 1	20	x	x	x	x
	21	x	x	x	x
	22	x	x	x	x
Lo/Ge 2	23	11	12	12	11
	24	13	11	12	11
	25	13	11	12	13
Lo/Ge 3	26	14	12	14	15
	27	16	15	15	11
	28	12	13	15	13
Lo/Ge 4	29	12	6	9	2
	30	11	7	11	7
	31	8	0	10	0
Lo/Ge 5	32	6	3	5	3
	33	5	3	6	4
	34	5	6	5	4
Lo/Ge 6	35	7	6	6	8
	36	6	5	5	3
	37	7	3	9	12
Gebr. Lede 1	38	x	x	x	x
	39	x	x	x	x
	40	x	x	x	x
Gebr. Lede 2	41	11	14	14	14
	42	12	12	13	13
	43	12	14	14	13
Gebr. Lede 4	44	4	4	8	7

	45	6	5	7	7
	46	6	8	7	3
Gebr. Lede 5	47	7	6	8	10
	48	9	11	8	9
	49	7	10	9	6

Bijlage 4

Tabel 12: Gegevens ter bepaling van de Schijnbare volumieke massa en open porositeit.

Staal nr.	m_d (g)	m_h (g)	m_s (g)	Schijnbare volumieke massa (kg/m³)	Open porositeit (%)
1	226,90	141,29	278,55	1649,76	37,63
2	203,15	126,55	248,90	1657,08	37,39
3	201,39	125,42	248,05	1638,97	38,05
4	207,16	129,01	255,19	1638,50	38,06
5	209,33	130,29	256,95	1649,39	37,60
6	210,13	130,70	258,27	1643,88	37,74
7	205,55	127,90	252,66	1644,27	37,76
8	191,04	118,80	234,18	1652,43	37,39
9	195,66	121,74	240,01	1651,04	37,50
10	220,71	137,30	270,62	1652,18	37,44
11	215,76	134,25	259,23	1722,90	34,78
12	224,08	139,46	268,51	1732,91	34,43
13	251,64	156,65	302,92	1716,94	35,06
14	202,52	125,62	249,36	1633,38	37,85
15	195,83	121,59	241,20	1633,96	37,93
16	179,78	111,66	221,78	1629,32	38,14
17	206,51	128,28	251,58	1671,51	36,55
18	220,37	137,00	268,51	1672,34	36,61
19	296,50	184,39	360,79	1677,48	36,45
20	233,33	145,05	279,42	1733,00	34,30
21	204,60	127,27	245,53	1726,63	34,61
22	220,26	136,89	263,62	1734,55	34,21
23	227,11	141,24	267,43	1796,15	31,95
24	242,73	150,93	286,59	1785,67	32,33

25	229,84	142,95	270,92	1792,45	32,10
26	238,89	148,67	280,17	1813,02	31,39
27	245,62	152,85	287,36	1822,38	31,03
28	249,36	155,17	291,17	1829,86	30,74
29	258,96	160,88	313,66	1691,60	35,80
30	218,71	135,66	266,97	1662,27	36,75
31	216,34	134,31	264,23	1661,85	36,86
32	232,48	143,96	277,07	1743,03	33,50
33	231,40	143,25	276,29	1735,85	33,74
34	111,97	69,62	133,24	1756,46	33,43
35	226,9	140,24	268,98	1758,94	32,69
36	223,52	138,21	265,09	1758,14	32,76
37	231,75	143,33	274,80	1759,23	32,75
38	228,78	143,14	269,27	1810,22	32,10
39	221,35	138,47	260,12	1815,93	31,87
40	211,42	132,26	248,54	1814,56	31,92
41	248,05	155,13	287,90	1864,53	30,01
42	254,14	158,88	295,28	1859,47	30,16
43	211,55	132,19	245,37	1865,41	29,88
44	239,74	149,52	277,58	1868,35	29,55
45	221,31	138,17	255,37	1884,53	29,06
46	234,69	146,38	271,60	1870,47	29,48
47	225,05	140,41	263,42	1825,87	31,19
48	228,52	142,70	256,74	1999,85	24,75
49	241,12	150,51	281,67	1834,69	30,92

Bijlage 5

Tabel 13: Gegevens geluidsvoortplantingssnelheid.

	staal nr.	L (mm)	T (µs)	V (km/s)
Lede 1	1	160,5	41,5	3,9
	2	159,5	44,2	3,6
	3	160,0	45,3	3,5
	4	160,0	44,2	3,6
Lede 2	5	159,0	37,2	4,3

	6	159,0	36,1	4,4
	7	159,0	35,8	4,4
Lede 3	8	159,5	39,3	4,1
	9	160,0	40,4	4,0
	10	159,5	40,4	3,9
Lede 4	11	159,5	43,4	3,7
	12	159,5	41,7	3,8
	13	159,5	43,3	3,7
Lede 5	14	160,0	39,5	4,1
	15	160,0	39,4	4,1
	16	160,0	39,2	4,1
Lede 6	17	160,0	41,5	3,9
	18	160,0	38,2	4,2
	19	160,0	38,2	4,2
Lo/Ge 1	20	160,0	60,1	2,7
	21	160,0	62,4	2,6
	22	160,0	64,3	2,5
Lo/Ge 2	23	160,0	30,6	5,2
	24	160,0	32,7	4,9
	25	160,0	31,0	5,2
Lo/Ge 3	26	160,0	36,3	4,4
	27	159,5	35,6	4,5
	28	159,5	35,0	4,6
Lo/Ge 4	29	160,0	76,8	2,1
	30	160,0	64,5	2,5
	31	160,0	63,0	2,5
Lo/Ge 5	32	159,5	34,0	4,7
	33	159,5	32,6	4,9
	34	159,5	33,3	4,8
Lo/Ge 6	35	161,0	43,4	3,7
	36	160,0	41,8	3,8
	37	160,0	39,9	4,0
Gebr. Lede 1	38	160,0	30,6	5,2
	39	160,0	30,7	5,2
	40	160,5	29,9	5,4

Gebr. Lede 2	41	161,0	25,2	6,4
	42	160,5	25,0	6,4
	43	161,0	25,7	6,3
Gebr. Lede 4	44	160,0	25,4	6,3
	45	160,0	25,8	6,2
	46	160,0	25,4	6,3
Gebr. Lede 5	47	160,0	27,3	5,9
	48	160,0	27,3	5,9
	49	160,0	26,6	6,0

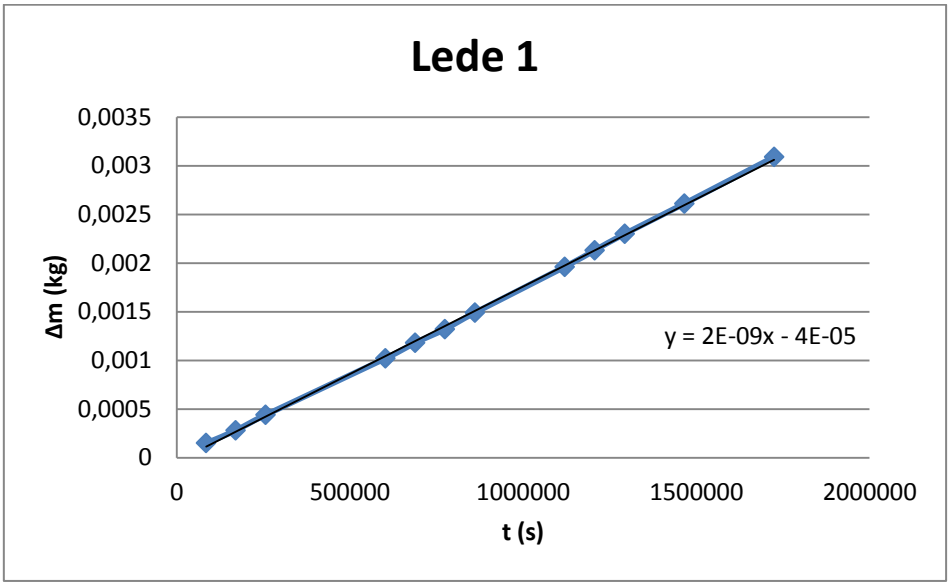
Bijlage 6

Tabel 14: Gegevens buig- en druksterkte.

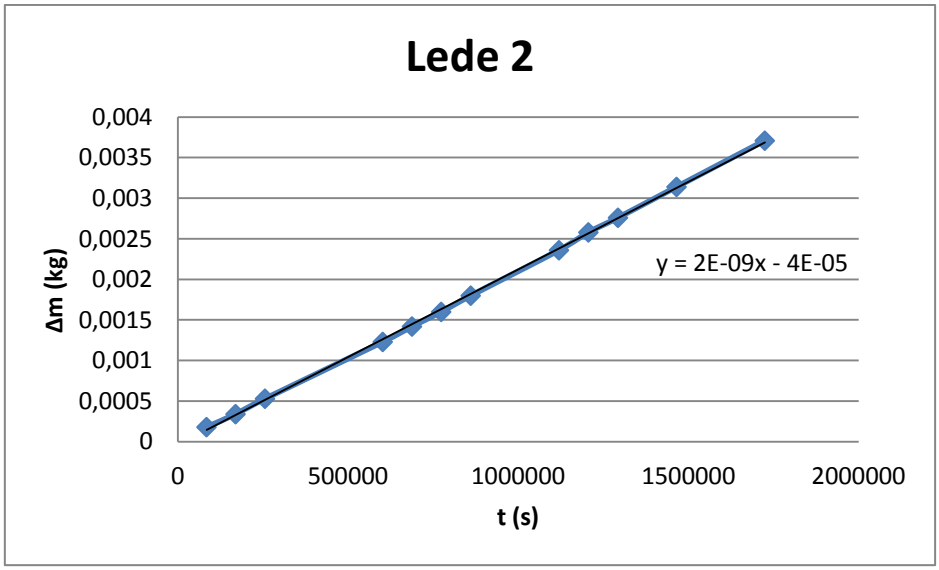
	staal nr.	d (mm)	b (mm)	Ff (kN)	Rf (MPa)	Fc (kN)	Rc (Mpa)
Lede 1	1	39,9	39,7	0,192	0,454	5,195	3,247
	2	40,0	40,0	0,201	0,472	6,551	4,094
	3	40,0	39,6	0,175	0,413	5,273	3,296
	4	40,4	39,6	0,175	0,405	6,097	3,811
Lede 2	5	39,4	39,3	0,366	0,899	14,11	8,819
	6	39,9	39,5	0,338	0,807	13,6	8,500
	7	39,6	39,0	0,392	0,961	10,29	6,431
Lede 3	8	39,7	37,0	0,233	0,600	9,174	5,734
	9	39,9	37,8	0,248	0,619	7,984	4,990
	10	39,9	39,6	0,263	0,626	9,794	6,121
Lede 4	11	39,8	40,7	0,219	0,509	9,649	6,031
	12	39,9	40,8	0,232	0,536	10,044	6,278
	13	40,0	40,3	0,213	0,495	10,035	6,272
Lede 5	14	40,0	39,9	0,172	0,404	10,982	6,864
	15	40,0	40,0	0,266	0,624	9,815	6,134
	16	40,0	40,0	0,290	0,681	11,02	6,888
Lede 6	17	39,7	40,8	0,208	0,486	11,25	7,031
	18	39,7	39,9	0,311	0,742	11,859	7,412
	19	39,6	40,4	0,351	0,831	13,532	8,458
Lo/Ge 1	20	39,9	40,0	0,148	0,349	6,369	3,981
	21	40,0	39,9	0,103	0,241	6,049	3,781

	22	39,9	39,7	0,150	0,355	6,028	3,768
Lo/Ge 2	23	39,8	40,3	0,490	1,151	21,773	13,608
	24	39,7	39,6	0,515	1,238	21,462	13,414
	25	40,0	40,5	0,450	1,042	18,457	11,536
Lo/Ge 3	26	39,9	40,0	0,292	0,687	14,18	8,863
	27	39,9	40,0	0,289	0,681	15,757	9,848
	28	39,8	40,2	0,315	0,742	17,514	10,946
Lo/Ge 4	29	40,0	39,8	0,001	0,002	4,15	2,594
	30	40,3	40,0	0,036	0,082	3,896	2,435
	31	40,0	40,0	0,086	0,201	3,836	2,398
Lo/Ge 5	32	40,0	40,0	0,381	0,892	14,249	8,906
	33	40,0	39,8	0,386	0,908	14,53	9,081
	34	39,9	40,0	0,391	0,921	15,006	9,379
Lo/Ge 6	35	40,3	40,3	0,162	0,370	9,669	6,043
	36	40,3	40,4	0,171	0,391	10,166	6,354
	37	40,0	40,3	0,203	0,471	10,312	6,445
Gebr. Lede 1	38	39,8	39,9	0,542	1,254	21,064	13,165
	39	40,3	39,8	0,516	1,216	20,555	12,847
	40	40,0	39,2	0,571	1,366	21,717	13,573
Gebr. Lede 2	41	40	39,5	0,935	2,219	35,614	22,259
	42	40	39	0,775	1,863	34,946	21,841
	43	40	37,5	0,742	1,854	32,405	20,253
Gebr. Lede 4	44	40	39,9	0,544	1,278	24,982	15,614
	45	39,9	40	0,545	1,284	22,615	14,134
	46	40,2	40,3	0,508	1,169	23,781	14,863
Gebr. Lede 5	47	40	41,2	0,562	1,280	23,694	14,809
	48	40	41,3	0,634	1,438	24,746	15,466
	49	39,9	41,4	0,353	0,803	25,249	15,781

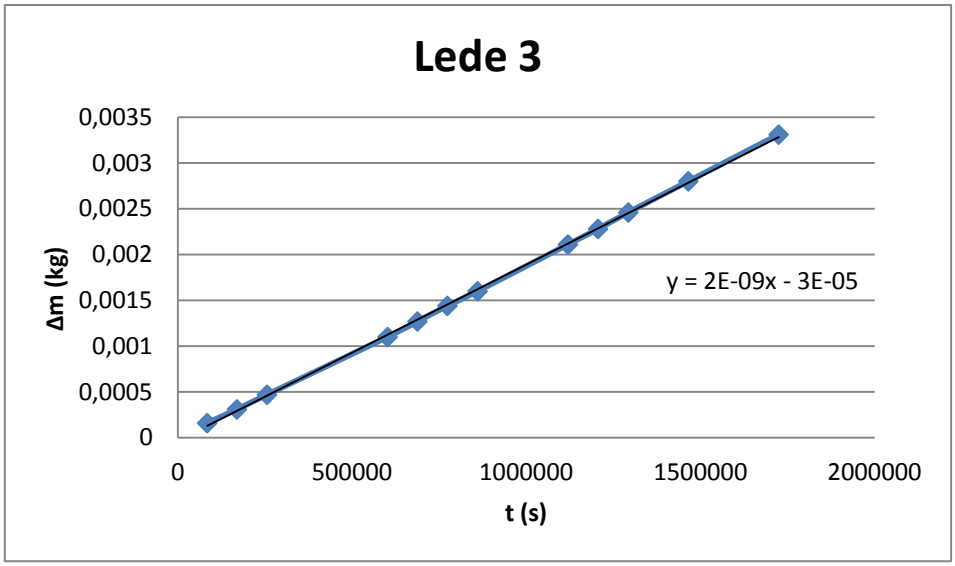
Bijlage 7



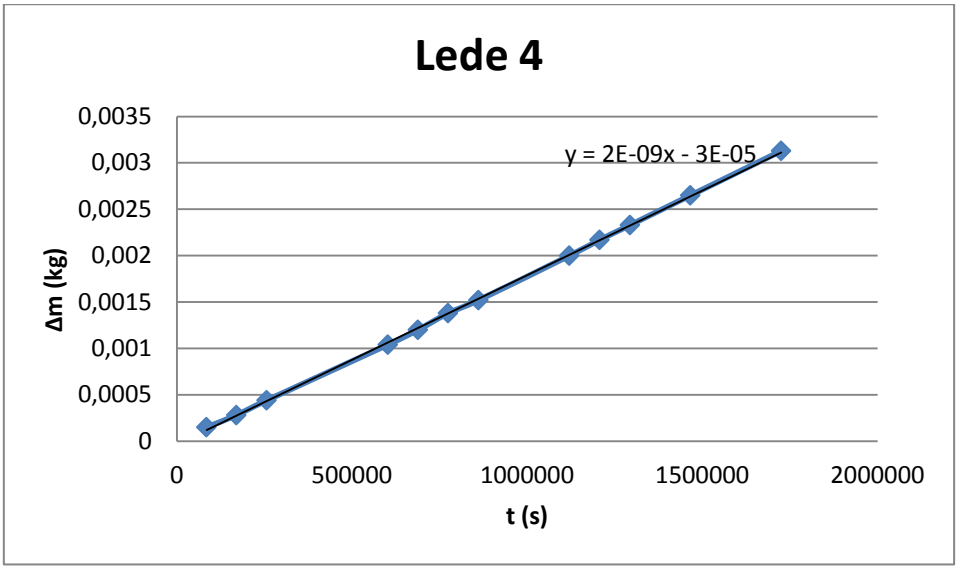
Figuur 78: Waterdampdoorlatendheid Lede 1.



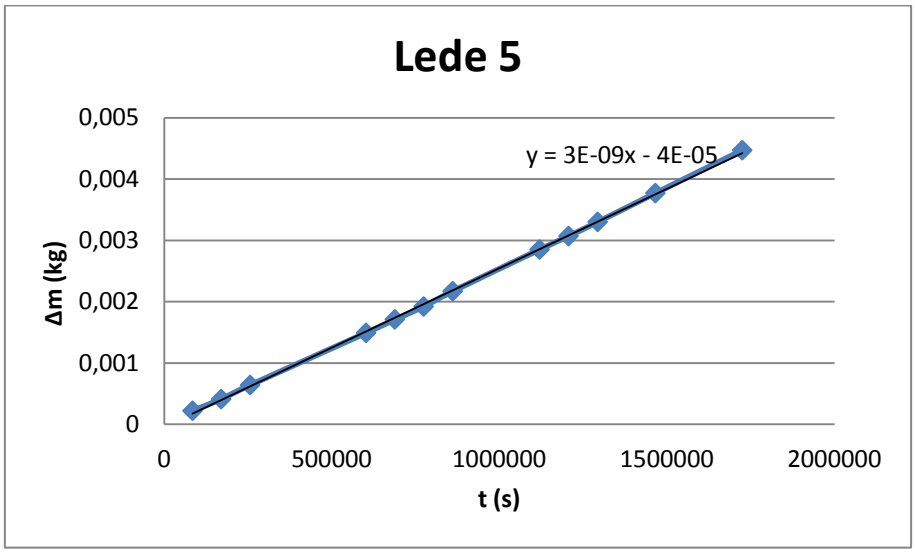
Figuur 79:Waterdampdoorlatendheid Lede 2.



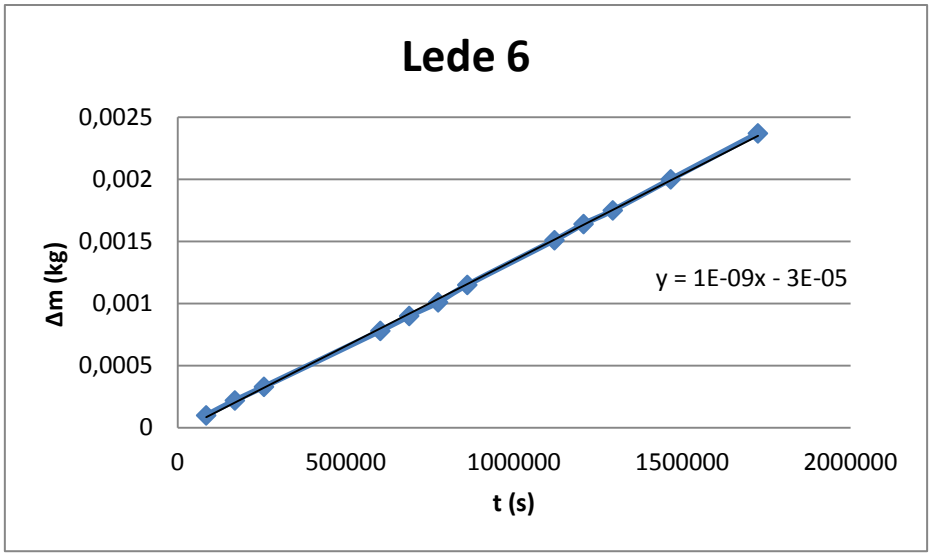
Figuur 80:Waterdampdoorlatendheid Lede 3.



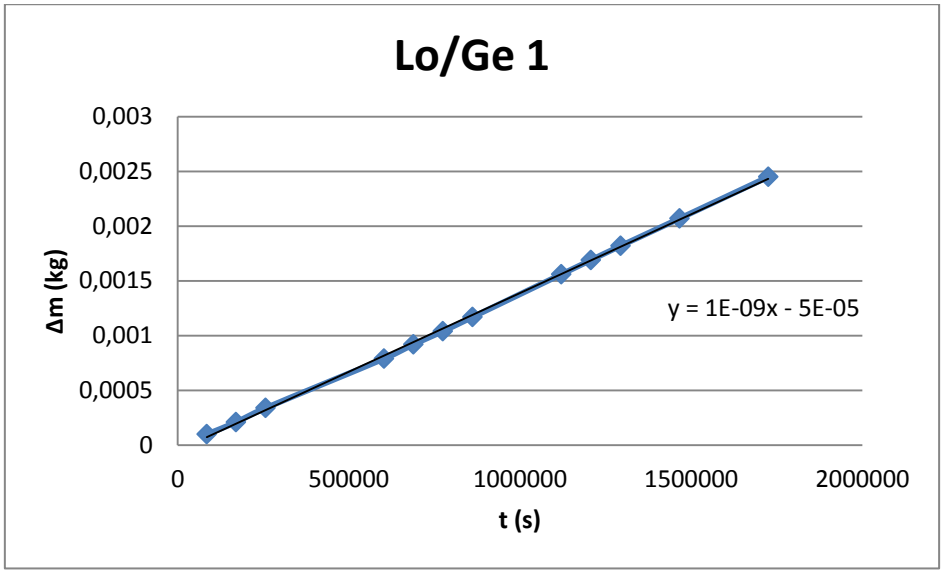
Figuur 81:Waterdampdoorlatendheid Lede 4.



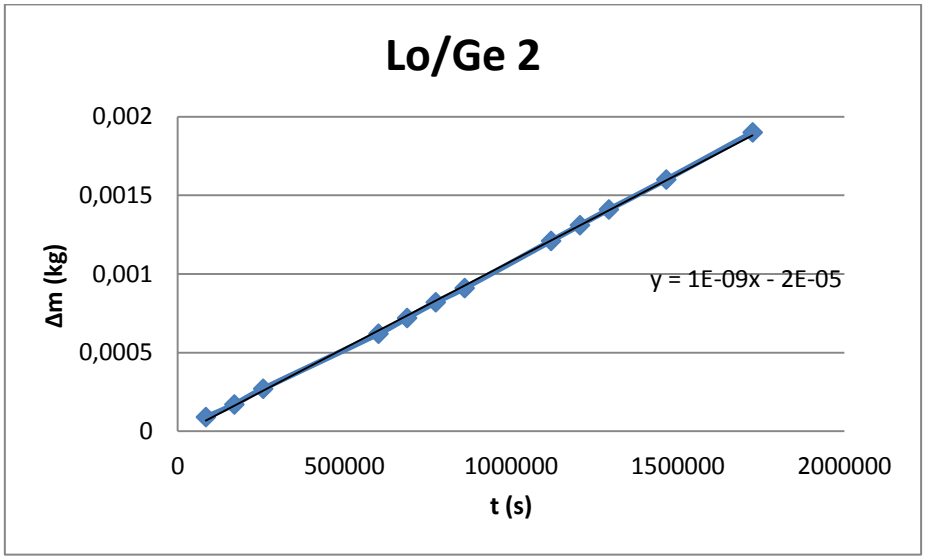
Figuur 82:Waterdampdoorlatendheid Lede 5.



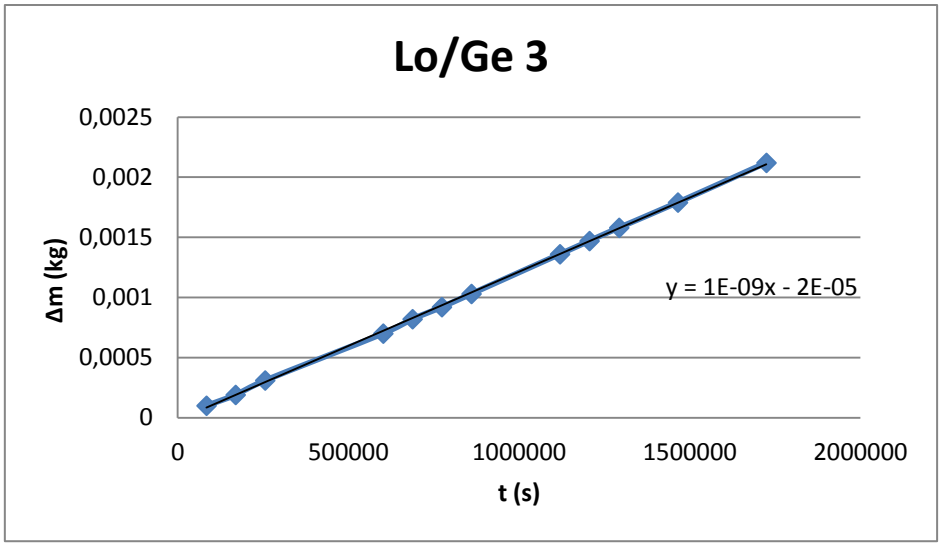
Figuur 83:Waterdampdoorlatendheid Lede 6.



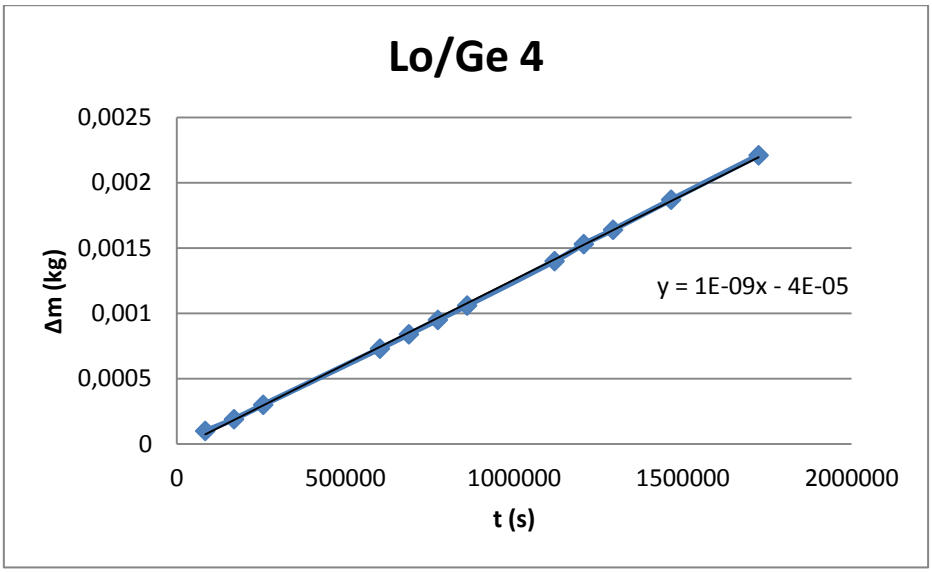
Figuur 84:Waterdampdoorlatendheid Lo/Ge 1.



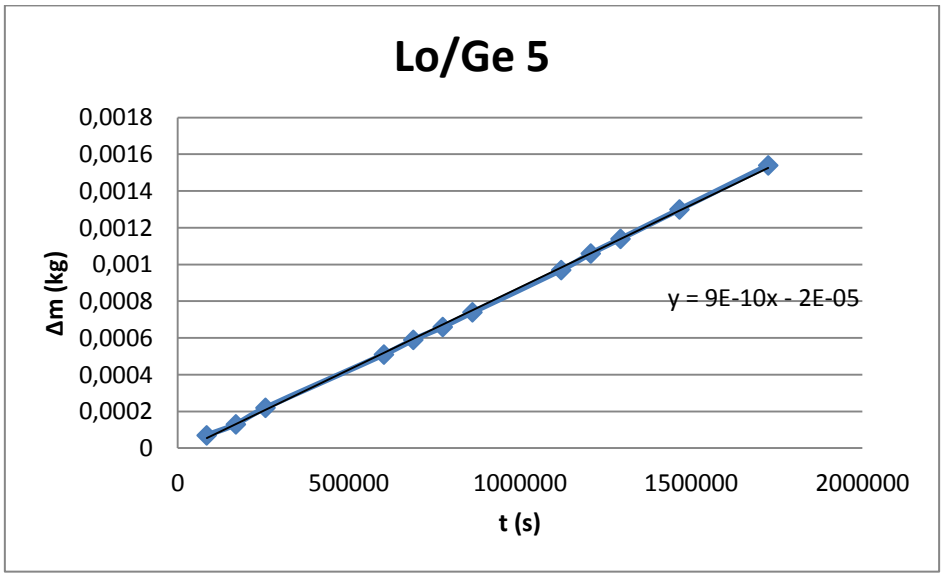
Figuur 85:Waterdampdoorlatendheid Lo/Ge 2.



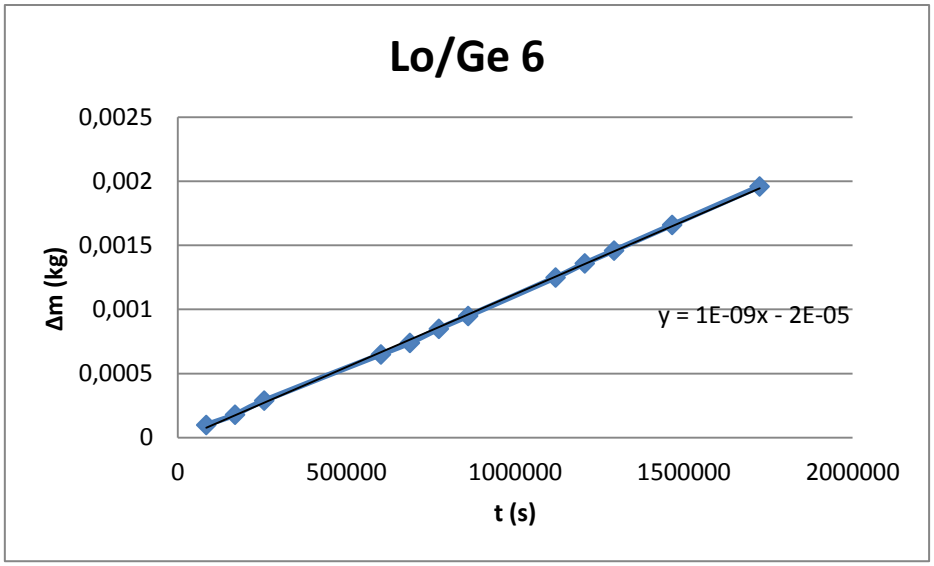
Figuur 86: Waterdampdoorlatendheid Lo/Ge 3.



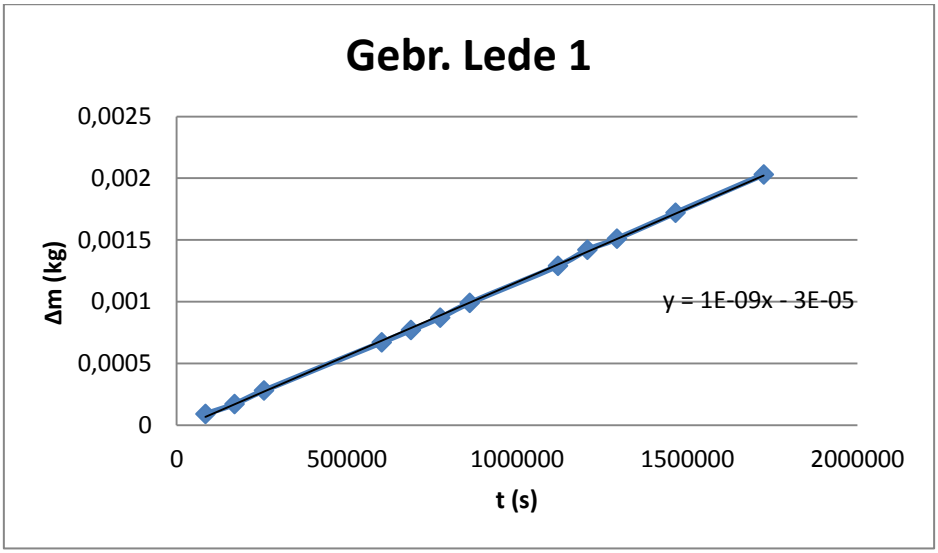
Figuur 87:Waterdampdoorlatendheid Lo/Ge 4.



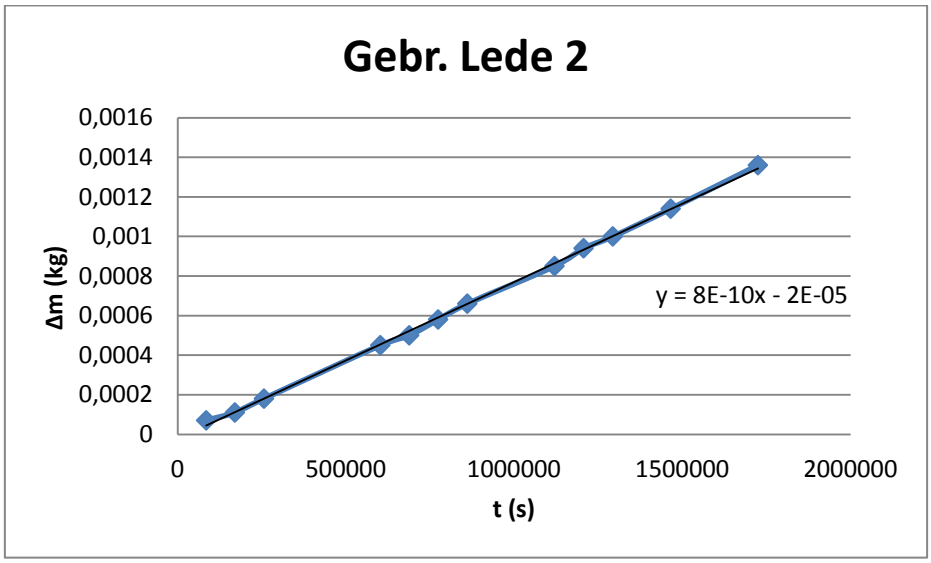
Figuur 88:Waterdampdoorlatendheid Lo/Ge 5.



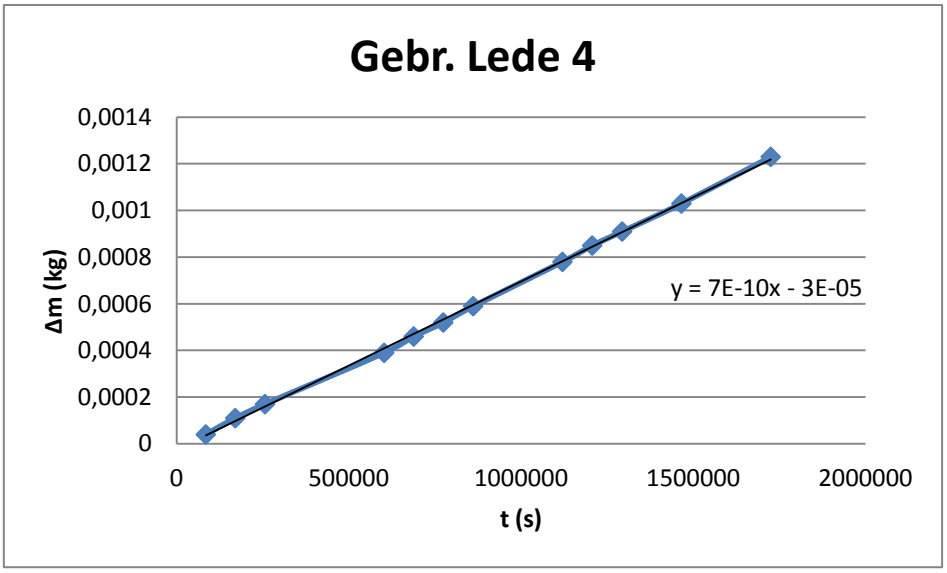
Figuur 89: Waterdampdoorlatendheid Lo/Ge 6



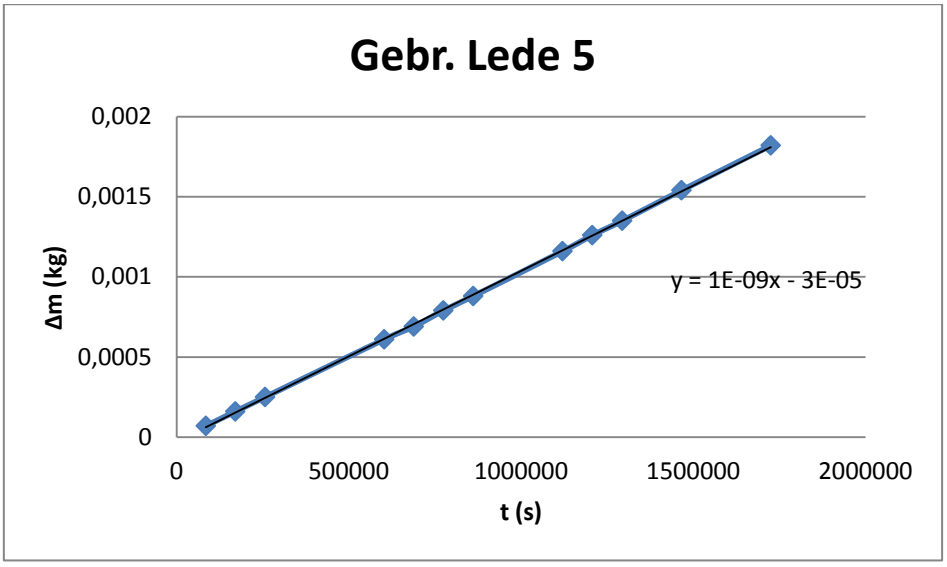
Figuur 90: Waterdampdoorlatendheid Gebroken Lede 1.



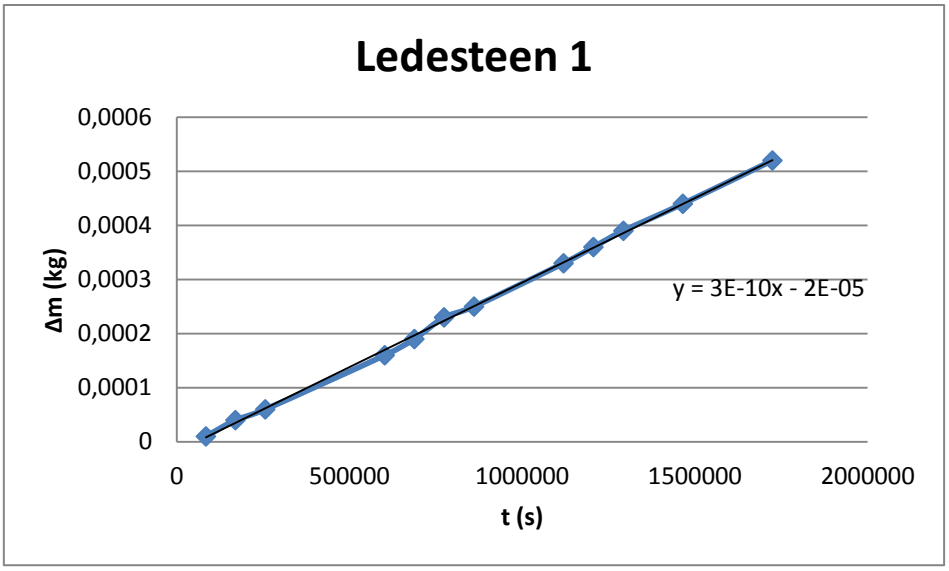
Figuur 91: Waterdampdoorlatendheid Gebroken Lede 2.



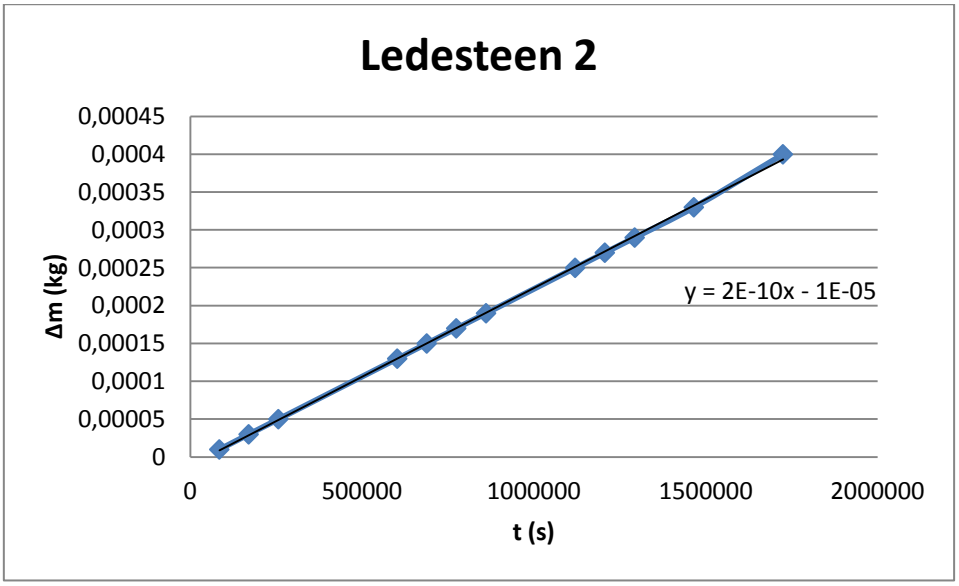
Figuur 92: Waterdampdoorlatendheid Gebroken Lede 4.



Figuur 93: Waterdampdoorlatendheid Gebroken Lede 5.

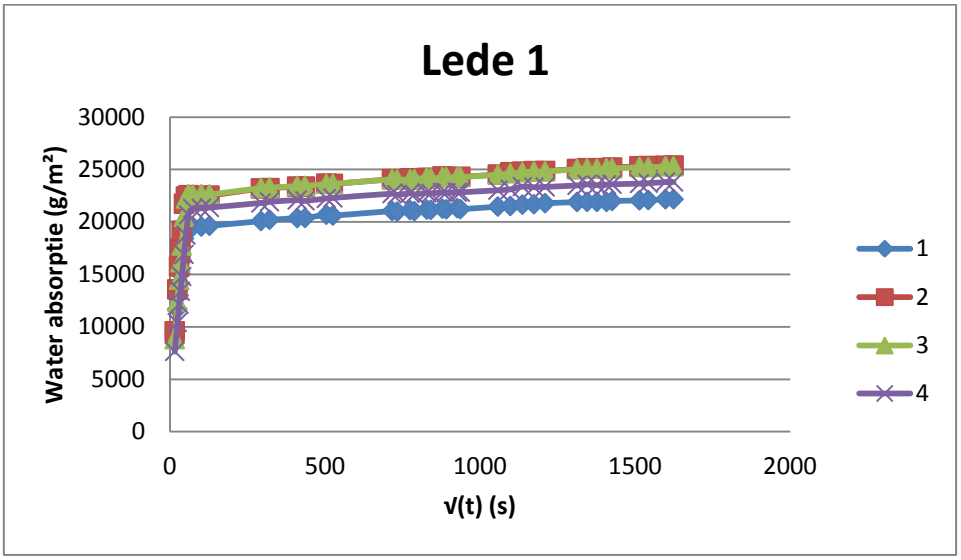


Figuur 94: Waterdampdoorlatendheid Ledesteen 1.

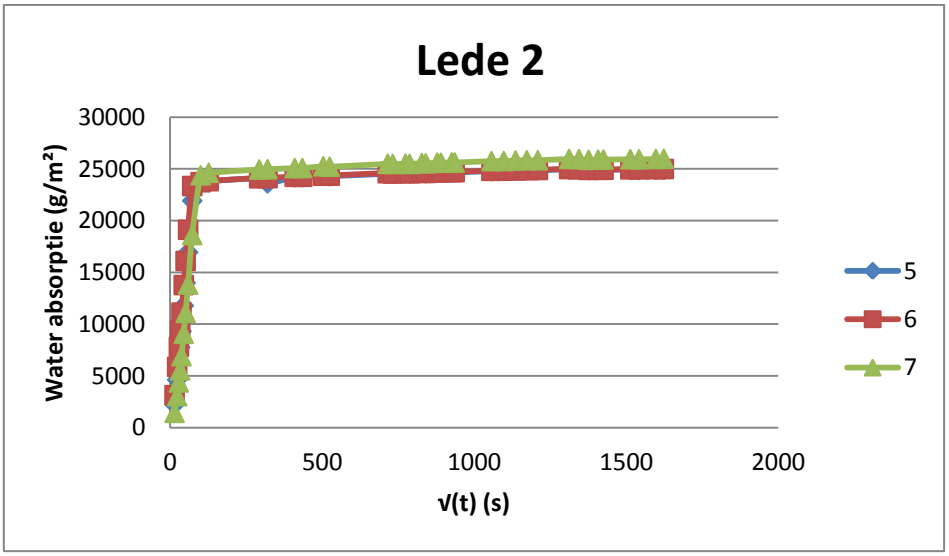


Figuur 95: Waterdampdoorlatendheid Ledesteen 2.

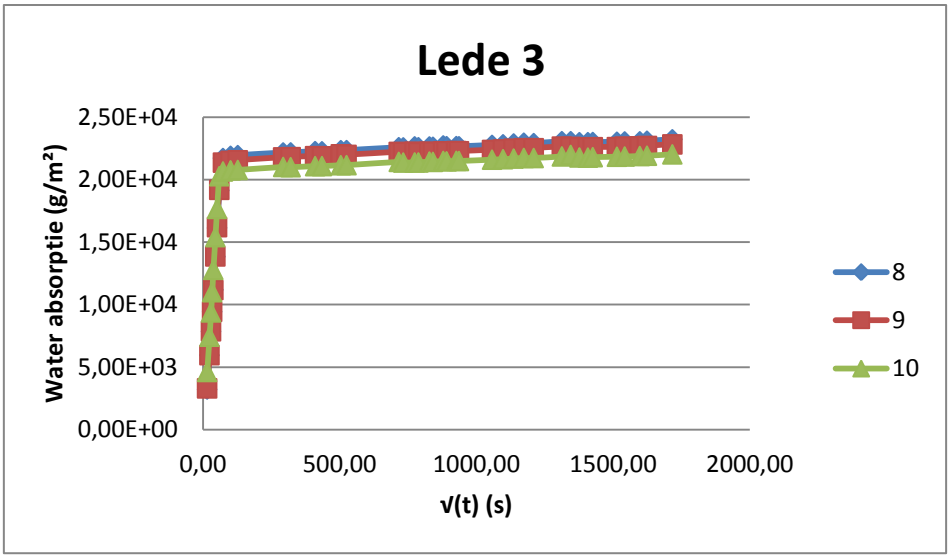
Bijlage 8



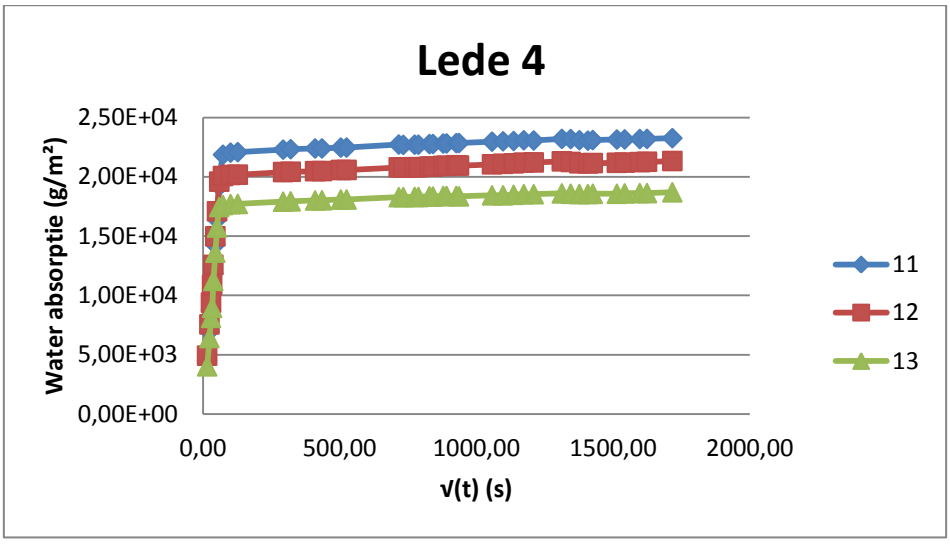
Figuur 96: Capillaire absorptie curve Lede 1.



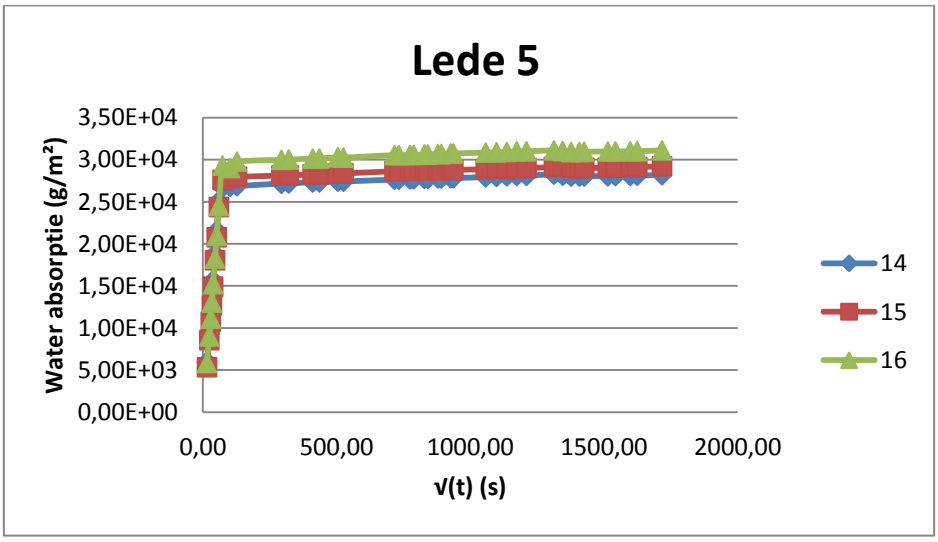
Figuur 97: Capillaire absorptie curve Lede 2.



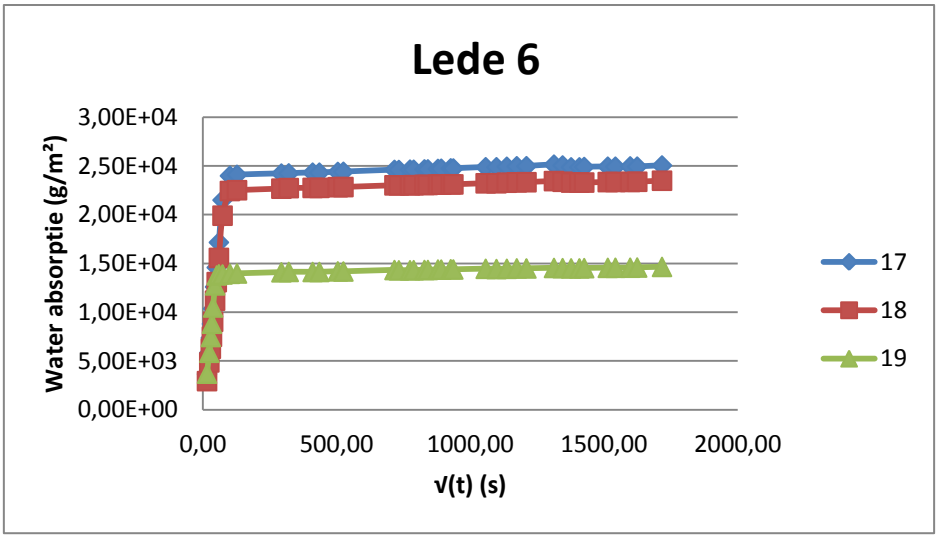
Figuur 98: Capillaire absorptie curve Lede 3.



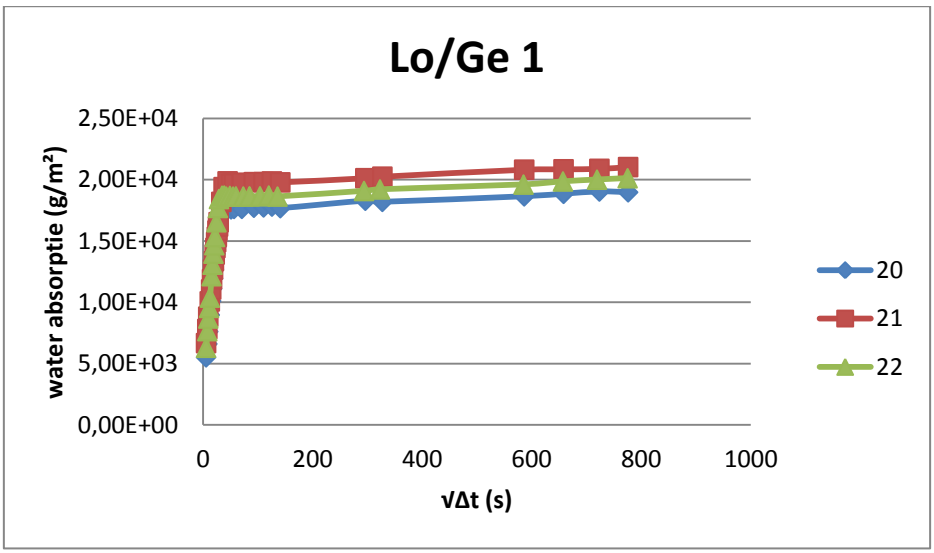
Figuur 99: Capillaire absorptie curve Lede 4.



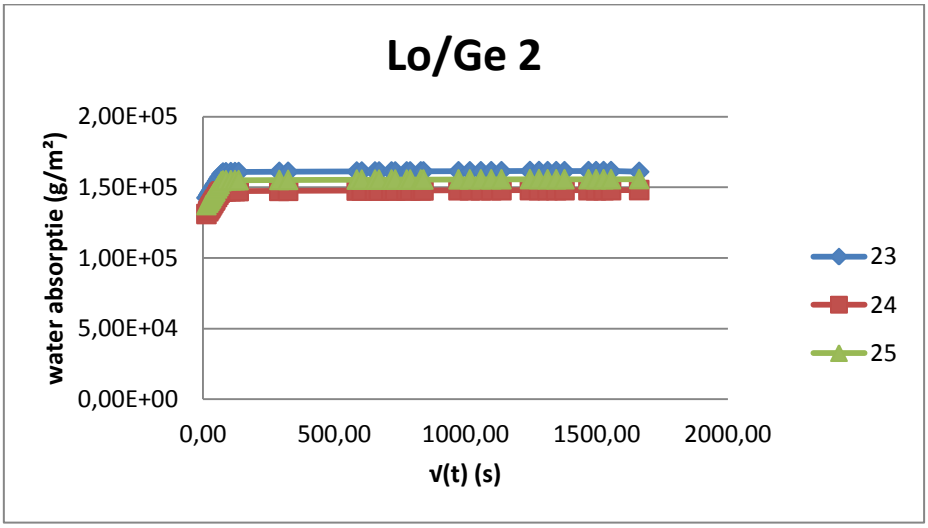
Figuur 100: Capillaire absorptie curve Lede 5.



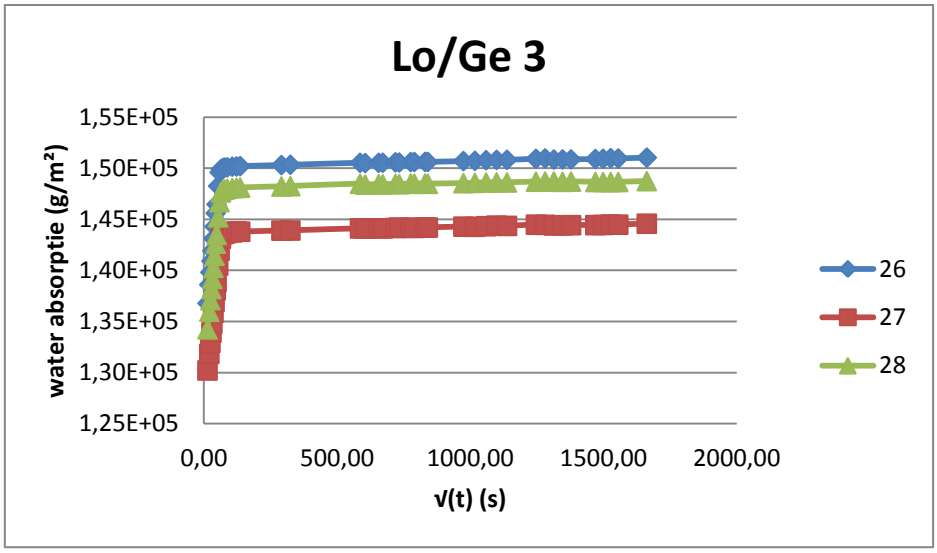
Figuur 101: Capillaire absorptie curve Lede 6.



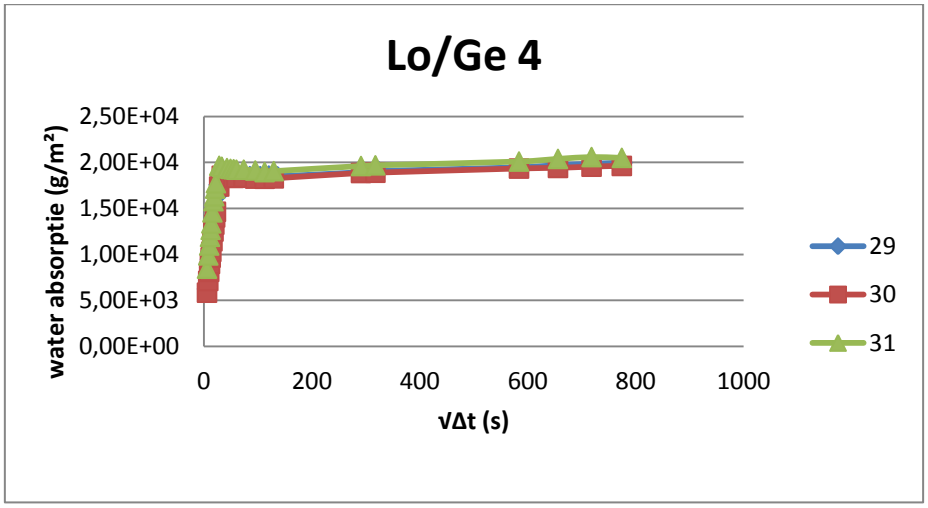
Figuur 102: Capillaire absorptie curve Lo/Ge 1.



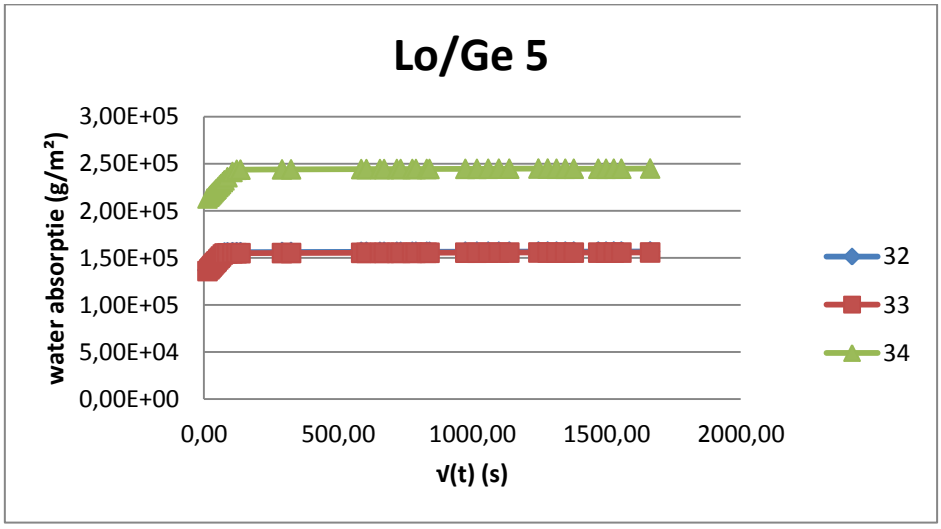
Figuur 103: Capillaire absorptie curve Lo/Ge 2.



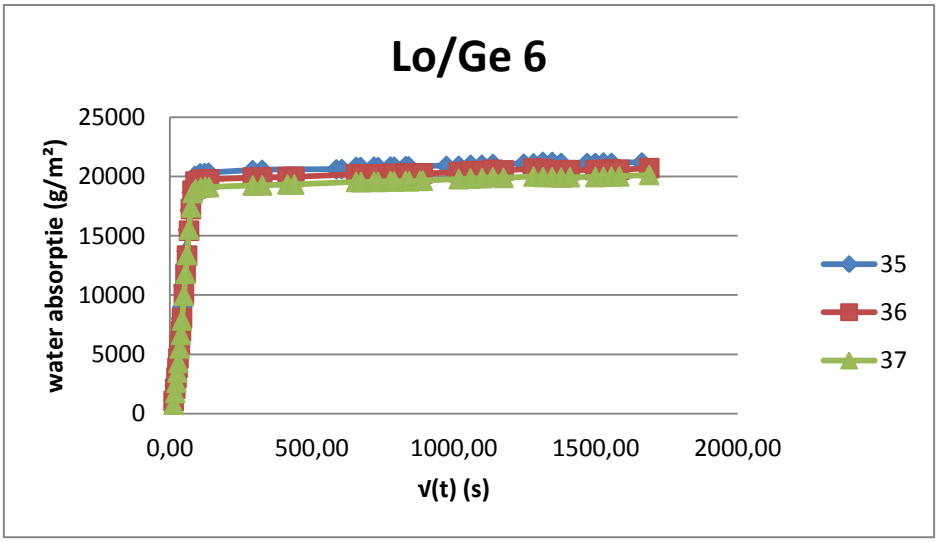
Figuur 104: Capillaire absorptie curve Lo/Ge 3.



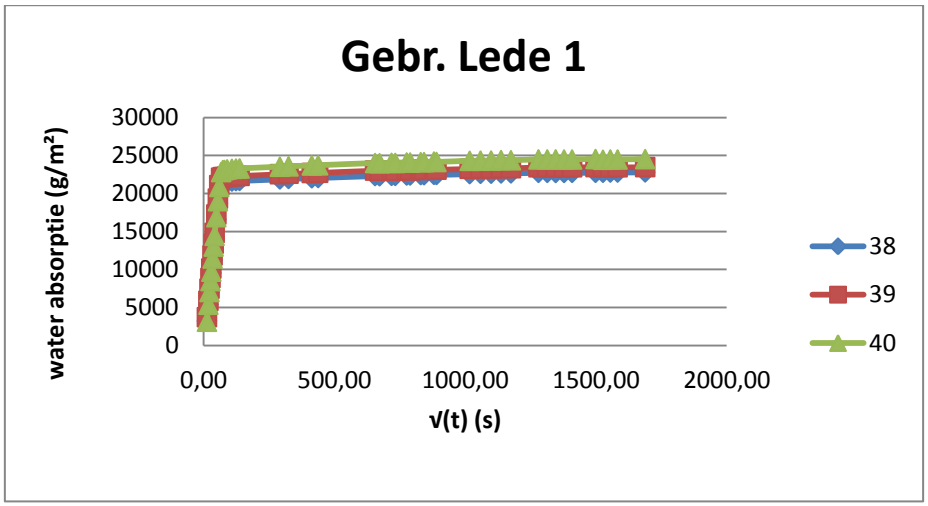
Figuur 105: Capillaire absorptie curve Lo/Ge 4.



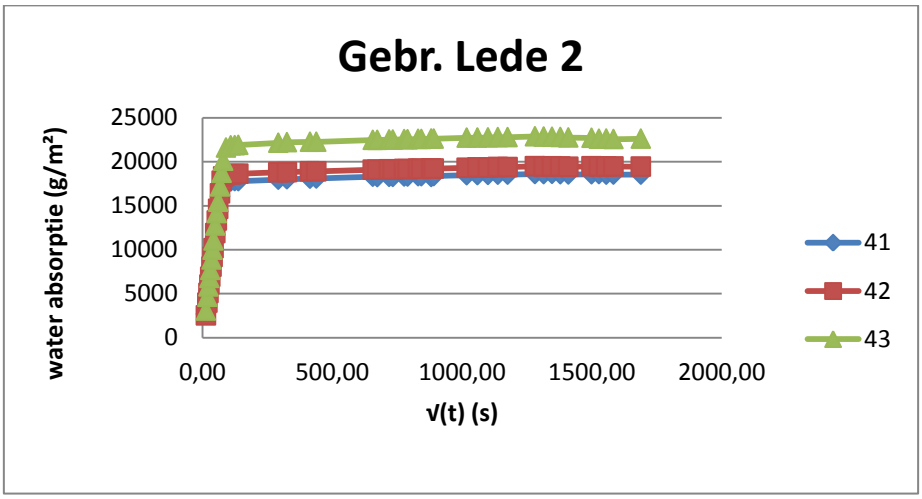
Figuur 106: Capillaire absorptie curve Lo/Ge 5.



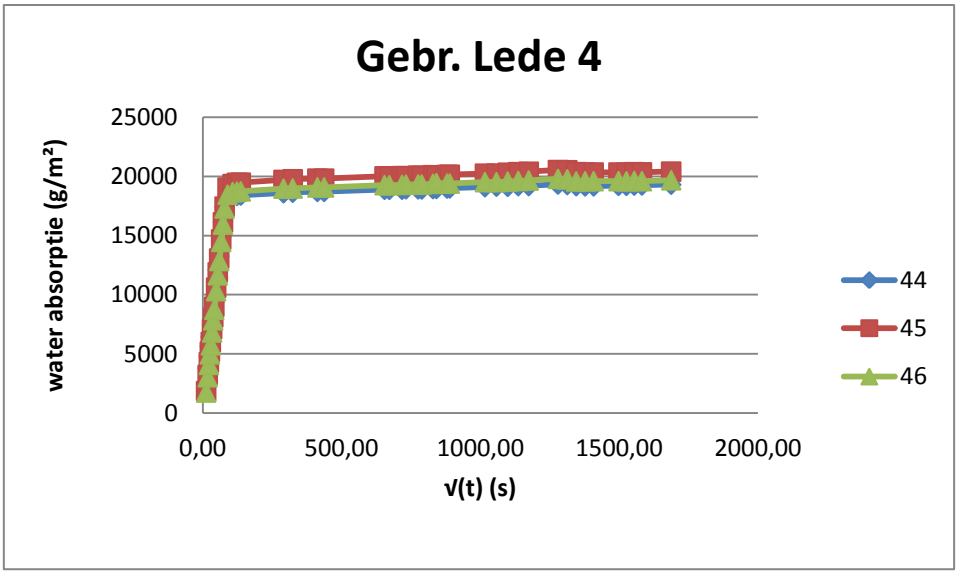
Figuur 107: Capillaire absorptie curve Lo/Ge 6.



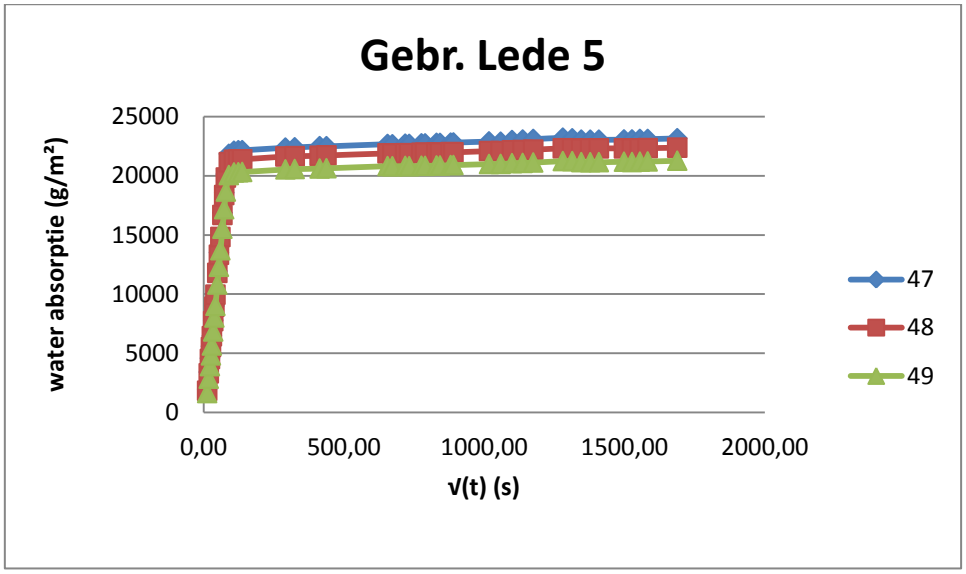
Figuur 108: Capillaire absorptie curve Gebr. Lede 1.



Figuur 109: Capillaire absorptie curve Gebr. Lede 2.



Figuur 110: Capillaire absorptie curve Gebr. Lede 3.



Figuur 111: Capillaire absorptie curve Gebr. Lede 4.

Bijlage 9

Tabel 15: Gegevens waterabsorptie bij atmosferische druk.

	Staal nr.	md	m	Ab		Staal nr.	md	m	Ab
Lede 1	1	139,33	165,52	18,80	Lo/Ge 3	27	193,77	218,69	12,86
	2	204,16	242,97	19,01		28	251,76	283,59	12,64
	3	202,37	241,87	19,52	Lo/Ge 4	29	260,98	302,8	16,02
	4	208,6	248,97	19,35		30	219,73	257,74	17,30
Lede 2	5	152,73	182,28	19,35		31	218,36	255,16	16,85
	6	212,12	252,81	19,18	Lo/Ge 5	32	235,93	271,66	15,14
	7	207,62	246,95	18,94		33	234,67	270,21	15,14
Lede 3	8	135,75	160,4	18,16		34	113,54	130,72	15,13
	9	197,31	231,81	17,49	Lo/Ge 6	35	229,6	260,23	13,34
	10	222,53	261,11	17,34		36	226,25	256,35	13,30
Lede 4	11	217,94	251,8	15,54		37	234,34	265,63	13,35
	12	226,26	260,89	15,31	Gebr. Lede 1	38	156,66	180,68	15,33
	13	254,42	293,75	15,46		39	222,93	256,59	15,10
Lede 5	14	205,69	246,34	19,76		40	212,95	245,52	15,29
	15	198,68	237,95	19,77	Gebr. Lede 2	41	181,53	206,27	13,63
	16	182,4	218,31	19,69		42	256,34	290,53	13,34
Lede 6	17	209,3	244,98	17,05		43	213,34	241,85	13,36
	18	223,14	261	16,97	Gebr. Lede 4	44	177,6	199,3	12,22
	19	300,23	351,16	16,96		45	223,39	250,31	12,05
Lo/Ge 1	20	171,41	198,24	15,65		46	236,99	265,88	12,19
	21	143	165,68	15,86	Gebr. Lede 5	47	227,38	258,76	13,80
	22	221,45	255,19	15,24		48	230,81	262,62	13,78
Lo/Ge 2	23	161,73	185,4	14,64		49	243,65	277,54	13,91
	24	245,42	280,81	14,42	Ledesteen	BAL2	283,09	290,26	2,53
	25	232,3	265,78	14,41		BAL4	280,39	289,69	3,32
Lo/Ge 3	26	162,21	183,96	13,41		BAL6	277,72	285,38	2,76

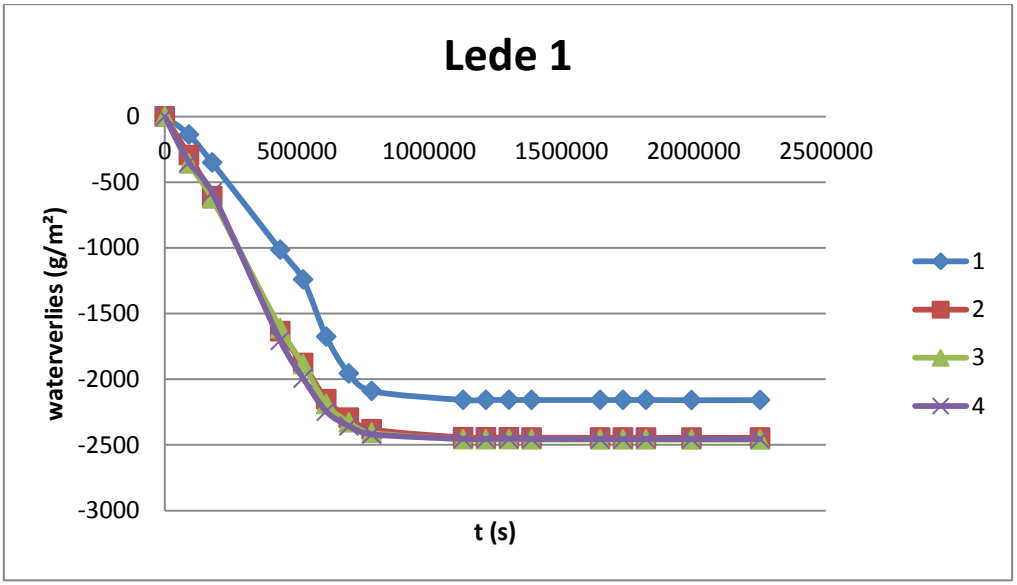
Bijlage 10

Tabel 16: Gegevens Permeabiliteit.

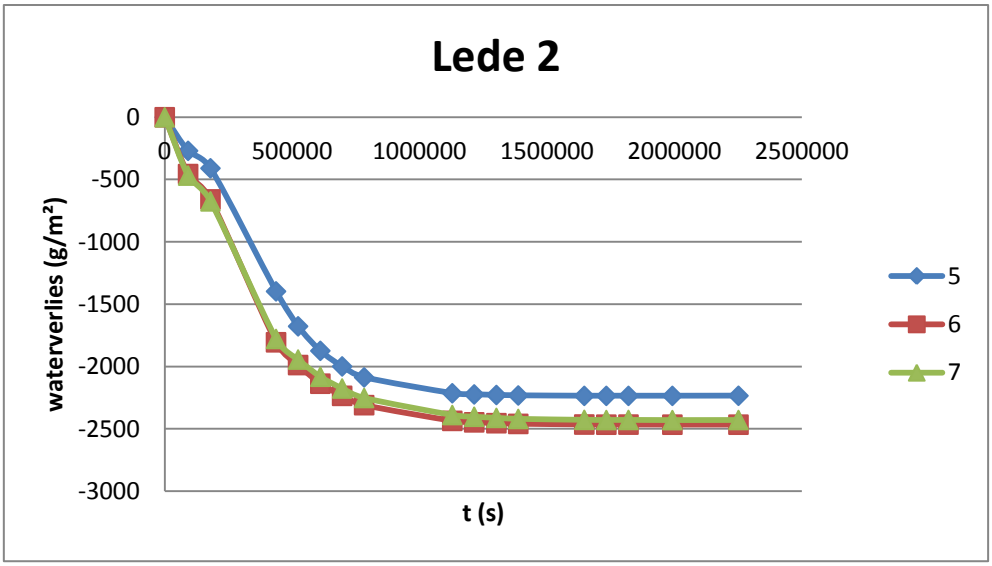
	Staal nr.	TinyPerm II waarden			Gem. T
Lede 1	1	10,02	9,88	9,91	9,936667
	2	9,57	9,61	9,65	9,61
	3	9,62	9,66	9,64	9,64
	4	9,98	9,95	9,965	9,965
Lede 2	5	12,19	12,12	12,11	12,14
	6	12,1	12,23	12,16	12,16333
	7	12,11	12,05	11,94	12,03333
Lede 3	8	11,32	11,16	11,28	11,25333
	9	11,21	11,51	11,31	11,34333
	10	11,21	11,55	11,31	11,35667
Lede 4	11	11,19	11,21	11,13	11,17667
	12	11,24	11,38	11,19	11,27
	13	11,4	11,56	11,46	11,47333
Lede 5	14	12,16	12,07	12,09	12,10667
	15	11,38	12,24	12,45	12,02333
	16	11,74	12,24	11,99	11,99
Lede 6	17	12,14	12,07	12,1	12,10333
	18	11,49	11,91	11,7	11,7
	19	11,36	11,86	11,6	11,60667
Lo/Ge 1	20	9,7	9,57	9,52	9,596667
	21	9,29	9,07	9,21	9,19
	22	8,82	9,1	9,01	8,976667
Lo/Ge 2	23	12,02	12,17	12,1	12,09667
	24	11,71	11,94	11,8	11,81667
	25	11,42	12,04	11,73	11,73
Lo/Ge 3	26	11,43	11,59	11,5	11,50667
	27	11,61	11,71	11,65	11,65667
	28	11,76	11,86	11,8	11,80667
Lo/Ge 4	29	9,62	9,37	9,53	9,506667
	30	9,25	9,18	9,69	9,373333
	31	9,32	9,42	9,52	9,42
Lo/Ge 5	32	11,67	11,41	11,6	11,56

	33	12,14	11,95	11,92	12,00333
	34	11,64	11,84	11,82	11,76667
Lo/Ge 6	35	11,28	11,04	11,3	11,20667
	36	11,49	11,62	11,26	11,45667
	37	10,9	10,29	11,15	10,78
Gebr. Lede 1	38	12,11	11,88	12,13	12,04
	39	12,19	12,08	11,95	12,07333
	40	11,75	11,7	11,81	11,75333
Gebr. Lede 2	41	11,78	12,08	11,91	11,92333
	42	11,82	11,88	11,79	11,83
	43	11,77	11,37	11,94	11,69333
Gebr. Lede 4	44	11,96	11,8	11,9	11,88667
	45	11,74	12,07	11,75	11,85333
	46	11,41	11,72	11,91	11,68
Gebr. Lede 5	47	11,74	12,11	11,7	11,85
	48	11,75	11,99	11,55	11,76333
	49	11,41	11,96	11,98	11,78333

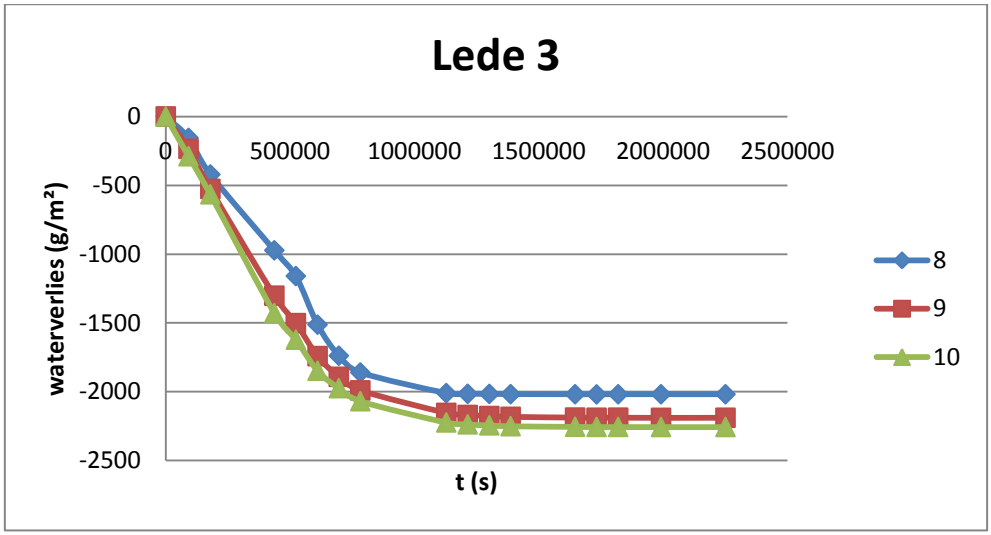
Bijlage 11



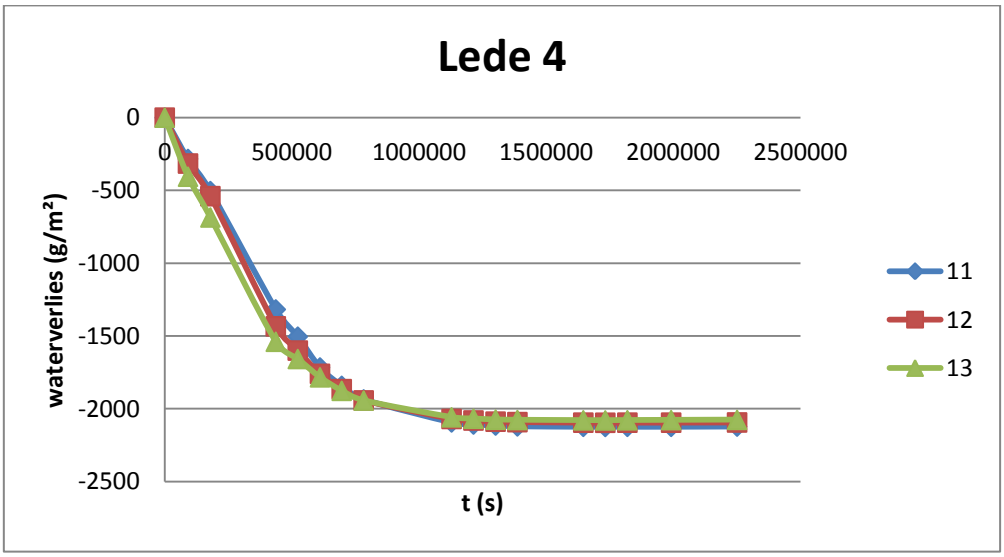
Figuur 112: Droogsnelheidscurve Lede 1.



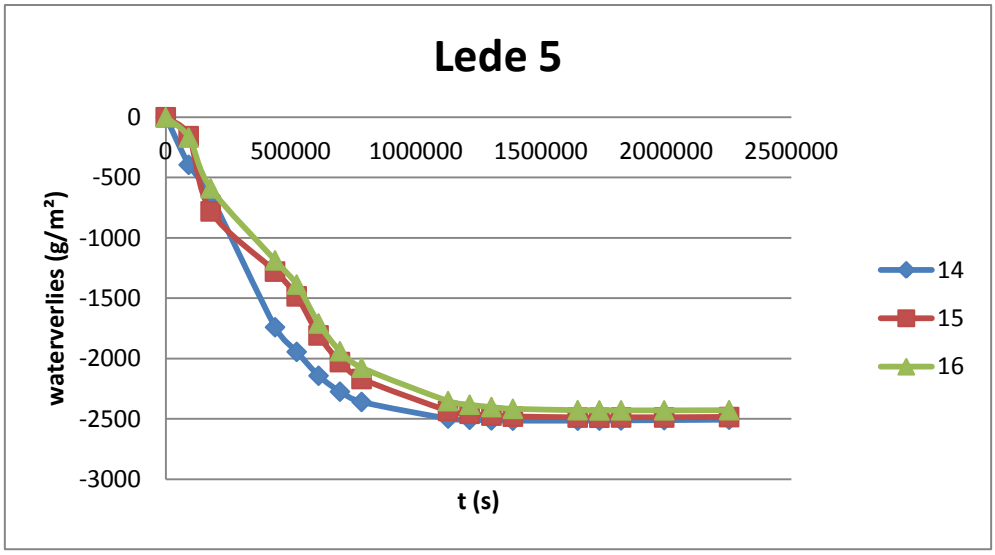
Figuur 113: Droogsnelheidscurve Lede 2.



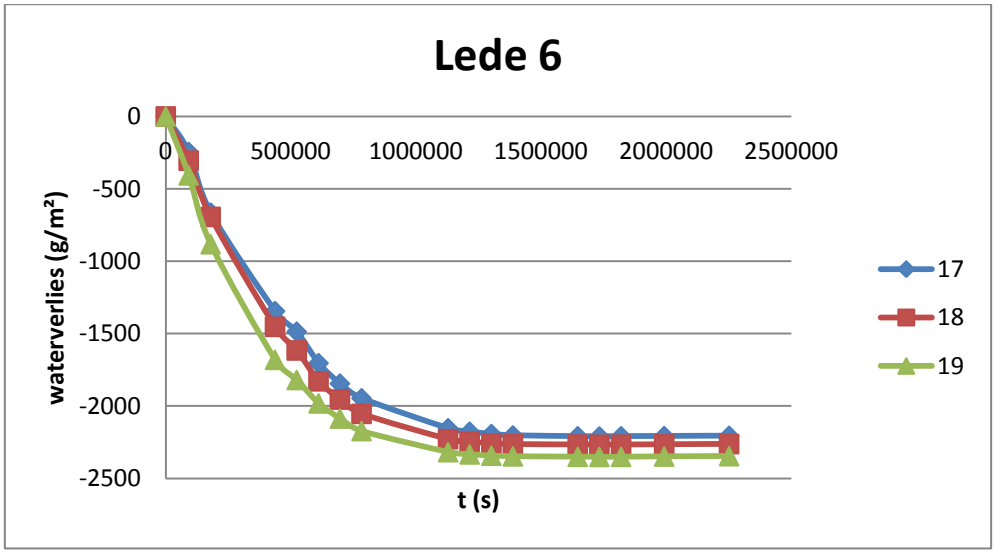
Figuur 114: Droogsnelheidscurve Lede 3.



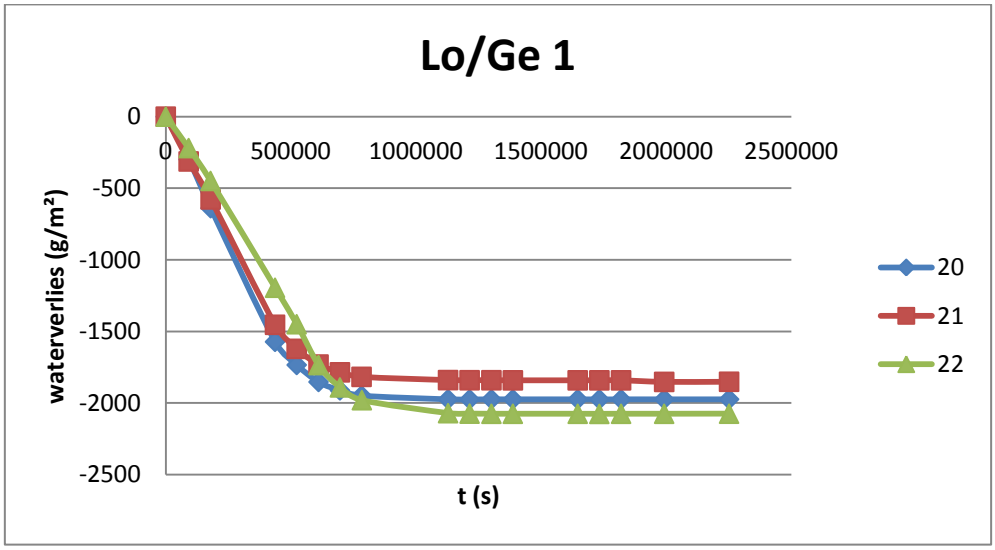
Figuur 115: Droogsnelheidscurve Lede 4.



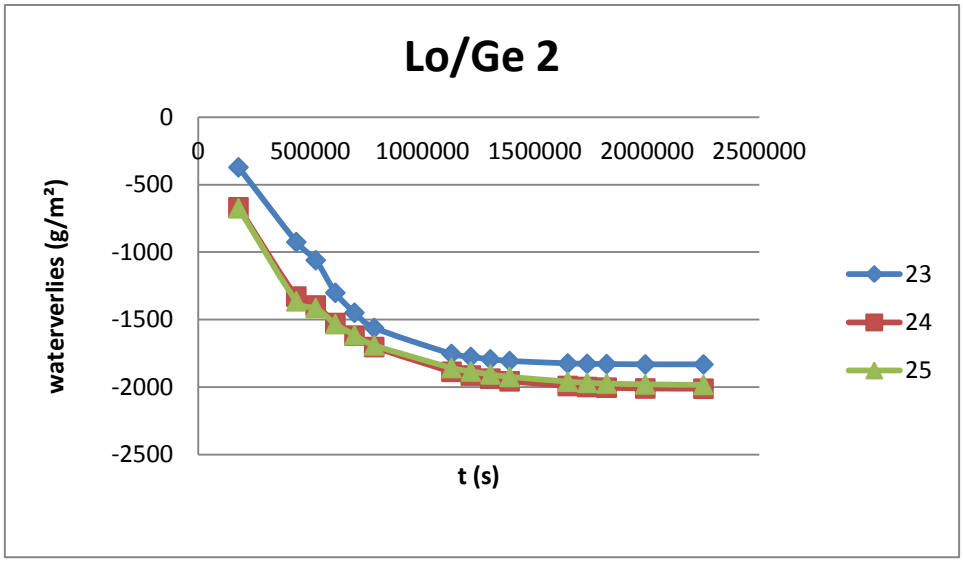
Figuur 116: Droogsnelheidscurve Lede 5.



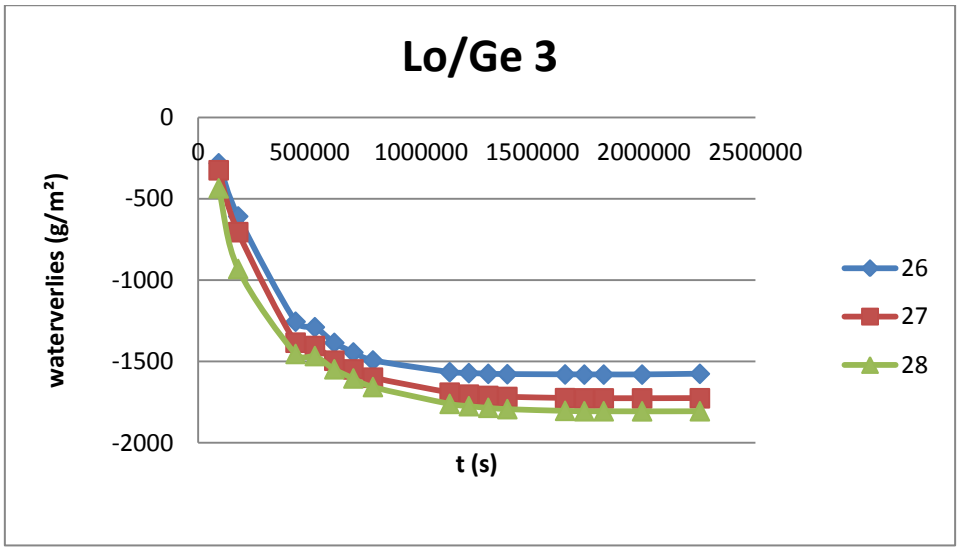
Figuur 117: Droogsnelheidscurve Lede 6.



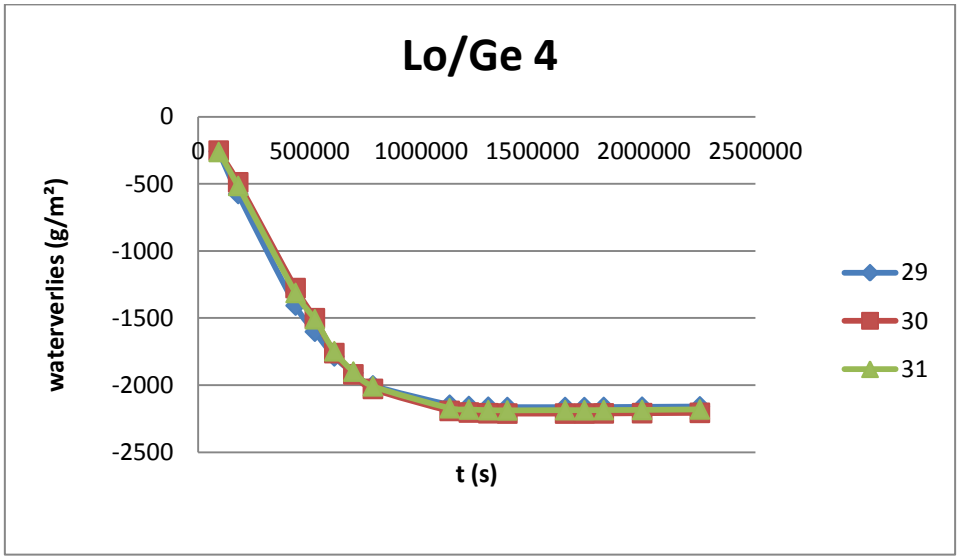
Figuur 118: Droogsnelheidscurve Lo/Ge 1.



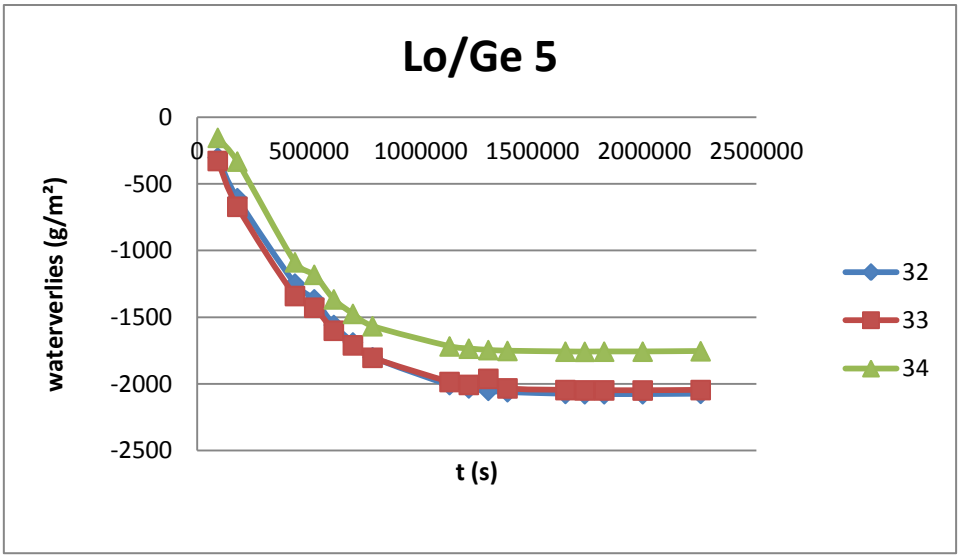
Figuur 119: Droogsnelheidscurve Lo/Ge 2.



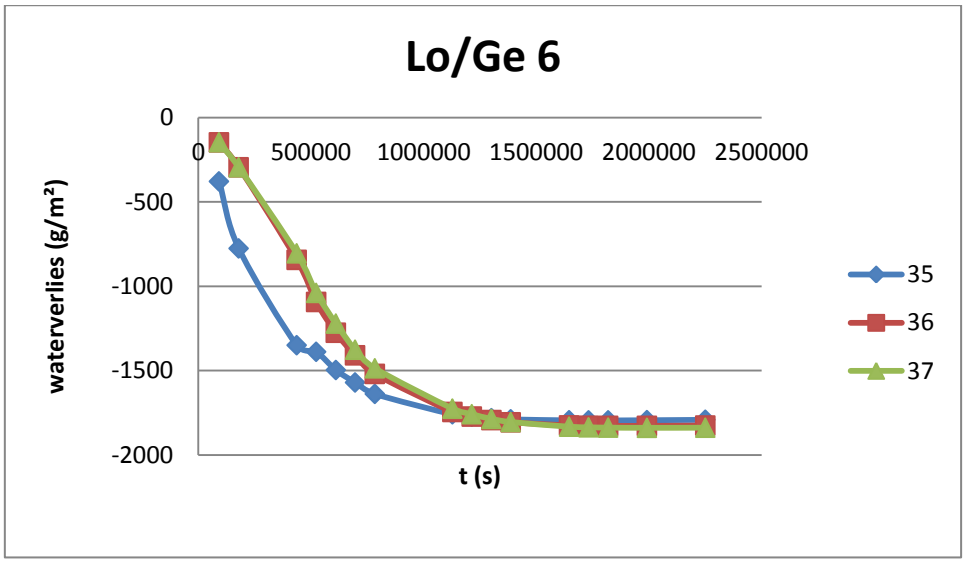
Figuur 120: Droogsnelheidscurve Lo/Ge 3.



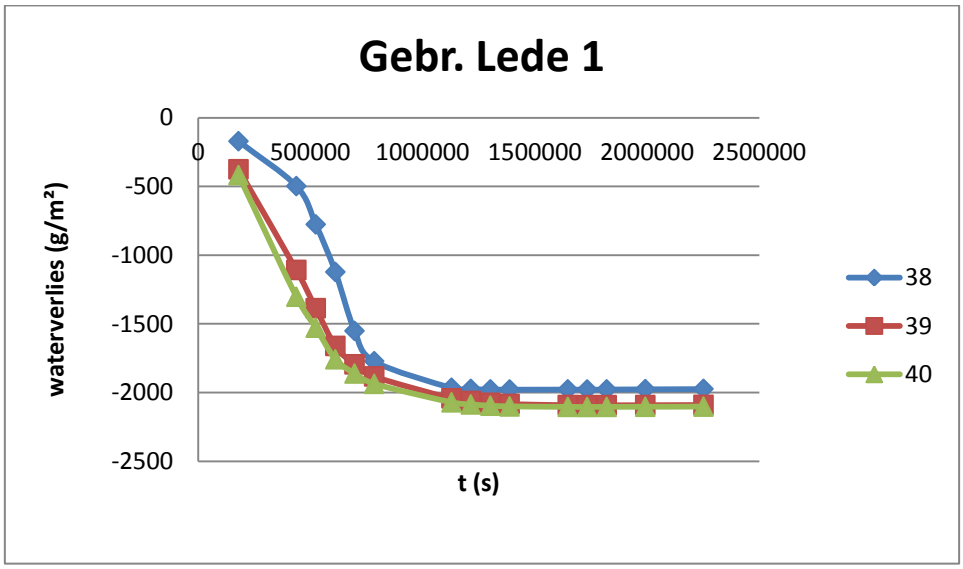
Figuur 121: Droogsnelheidscurve Lo/Ge 4.



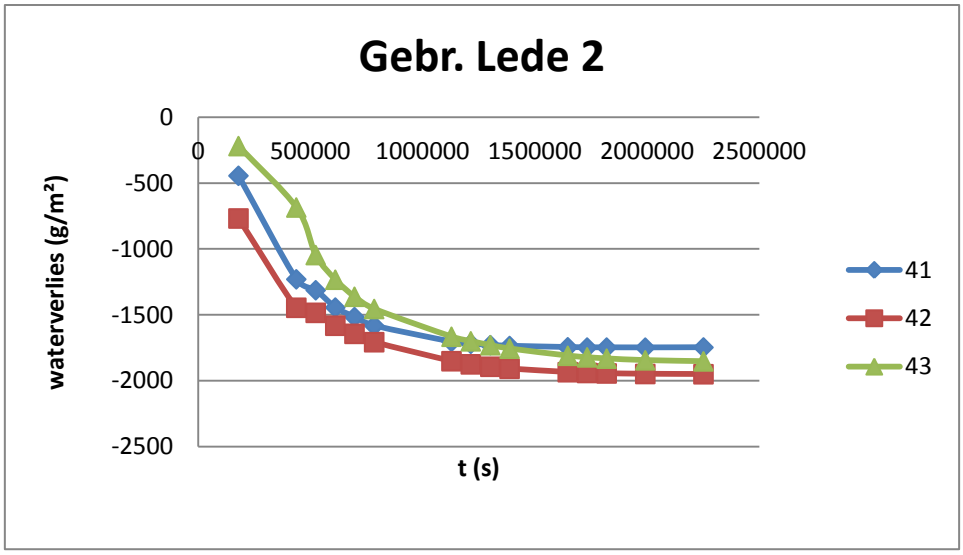
Figuur 122: Droogsnelheidscurve Lo/Ge 5.



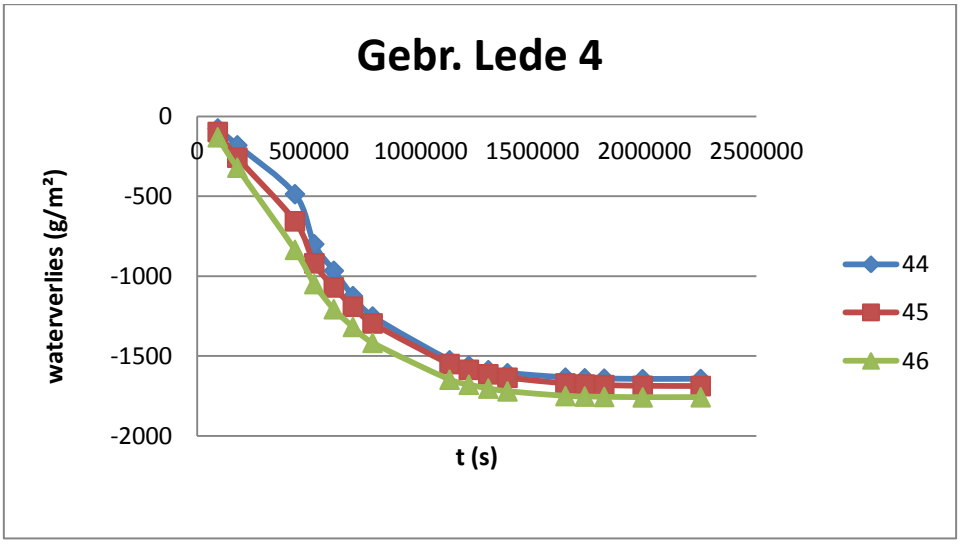
Figuur 123: Droogsnelheidscurve Lo/Ge 6.



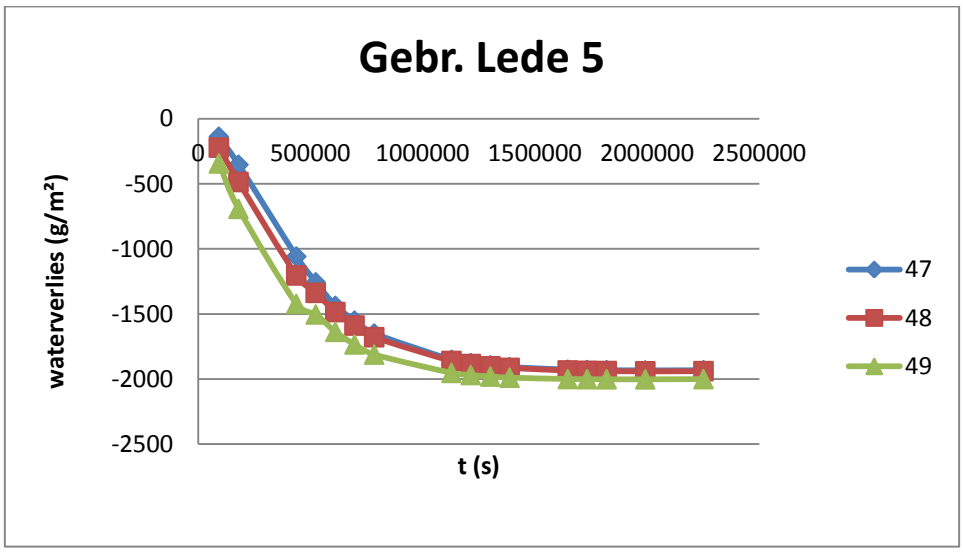
Figuur 124: Droogsnelheidscurve Gebr. Lede 1.



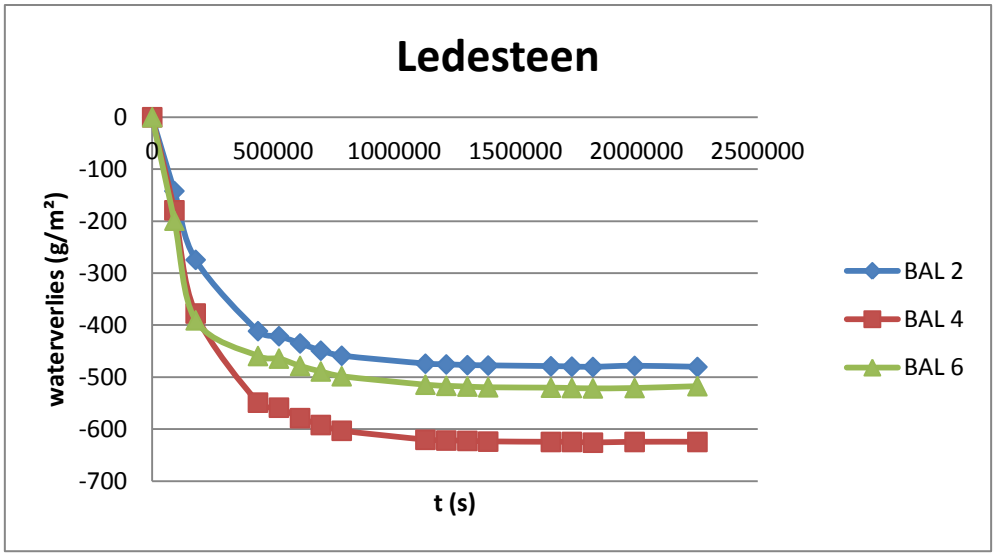
Figuur 125: Droogsnelheidscurve Gebr. Lede 2.



Figuur 126: Droogsnelheidscurve Gebr. Lede 4.

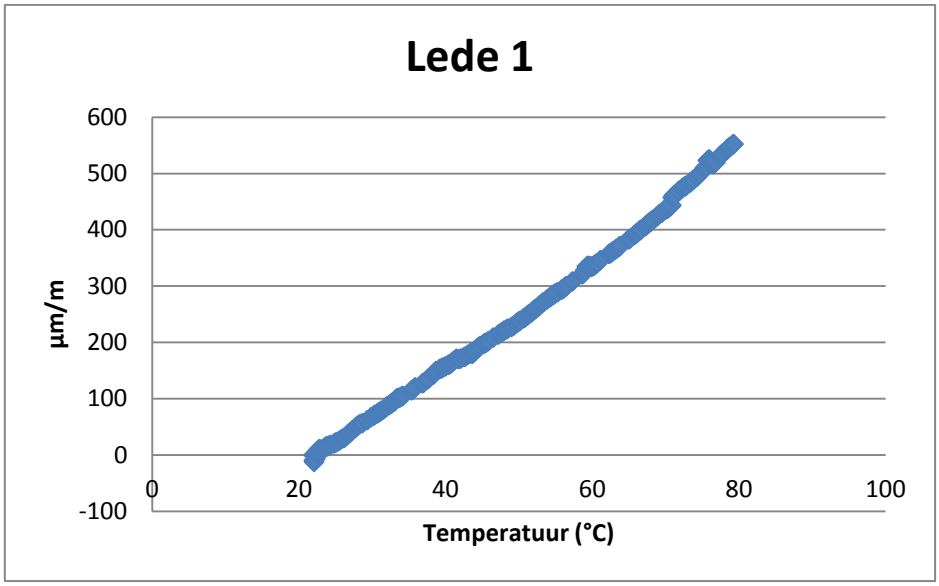


Figuur 127: Droogsnelheidscurve Gebr. Lede 5.

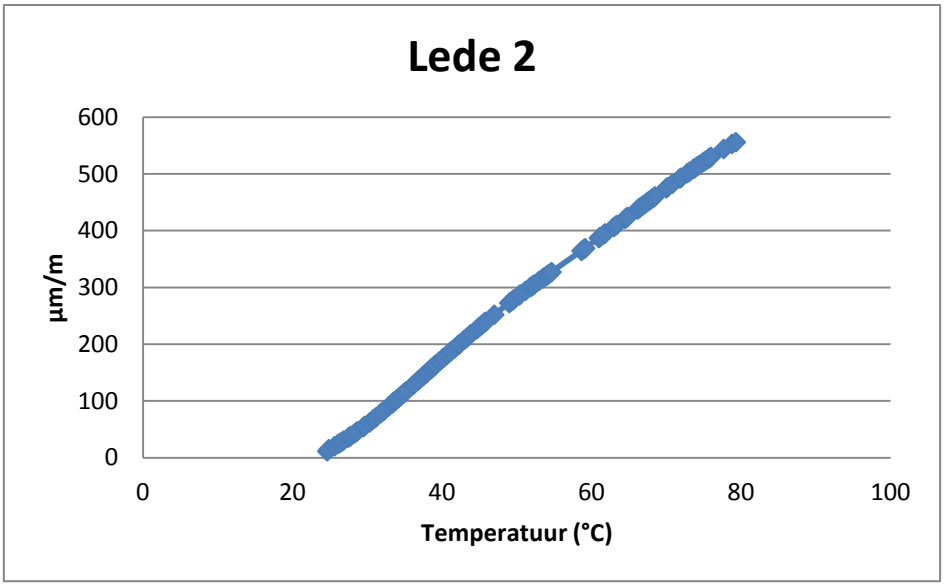


Figuur 128: Droogsnelheidscurve Ledesteen.

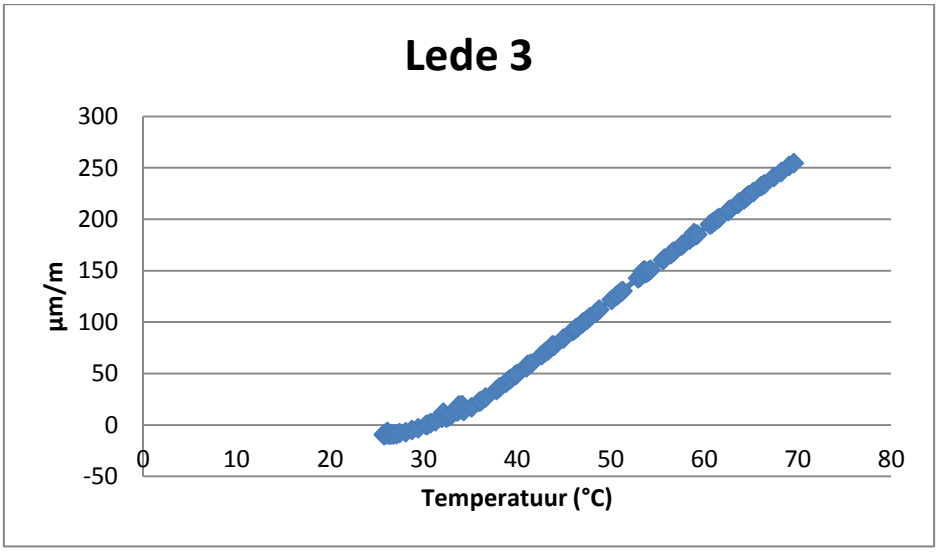
Bijlage 12



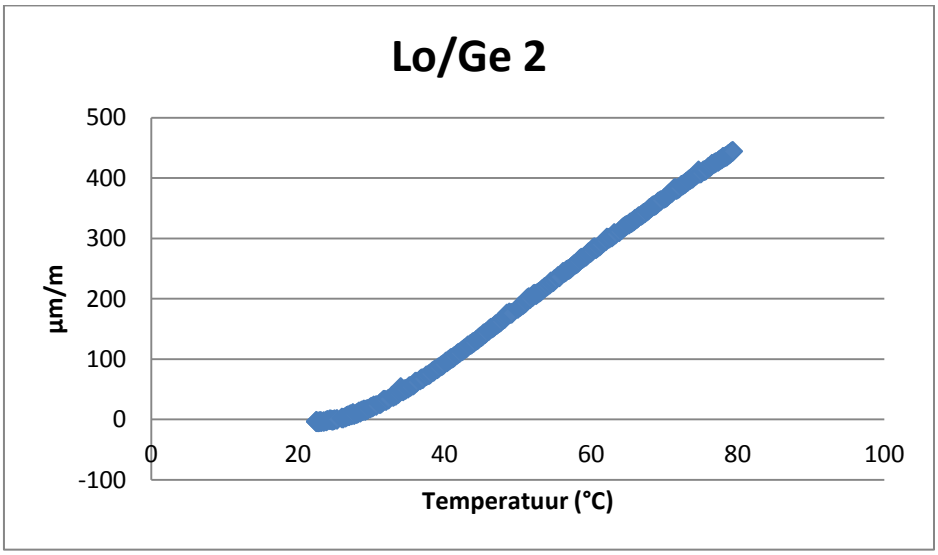
Figuur 129: : Curve thermische uitzetting Lede 1.



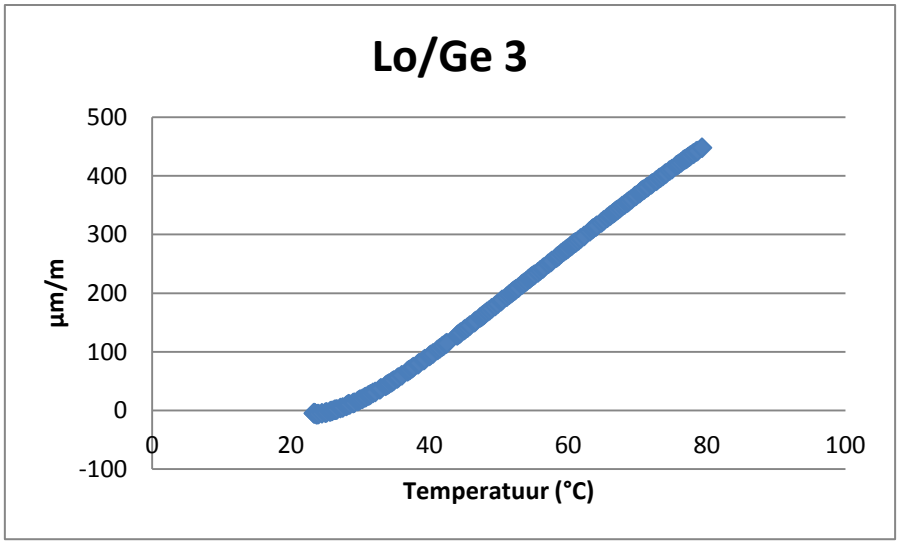
Figuur 130: : Curve thermische uitzetting Lede 2.



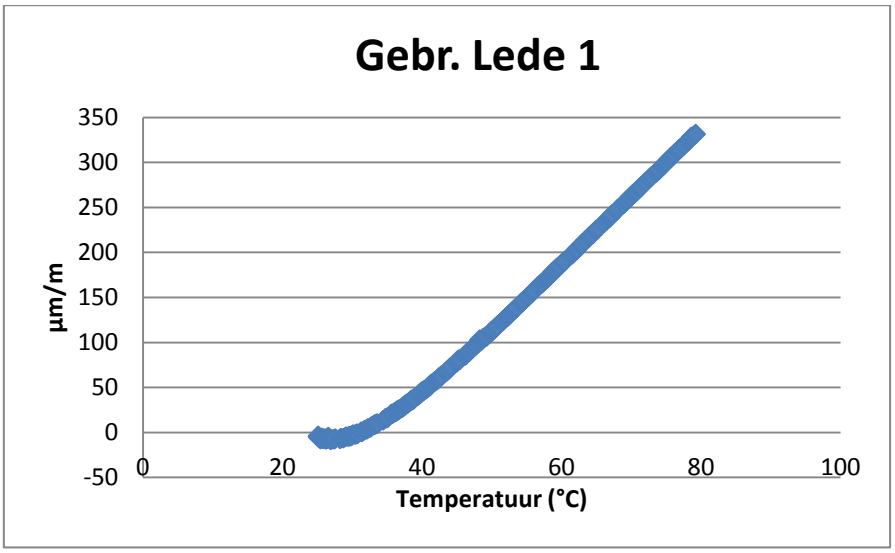
Figuur 131: : Curve thermische uitzetting Lede 3.



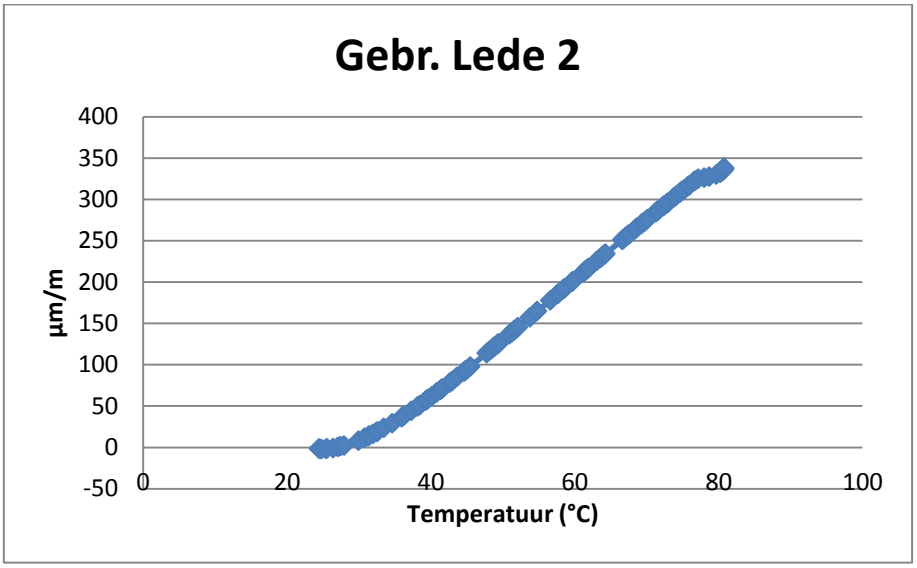
Figuur 132: Curve thermische uitzetting Lo/Ge 2.



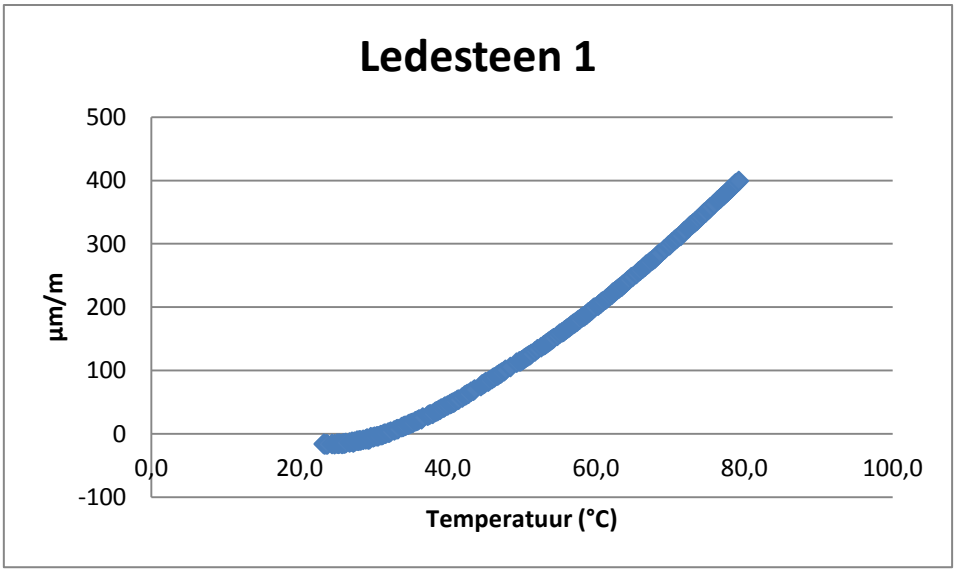
Figuur 133:Curve thermische uitzetting Lo/Ge 3.



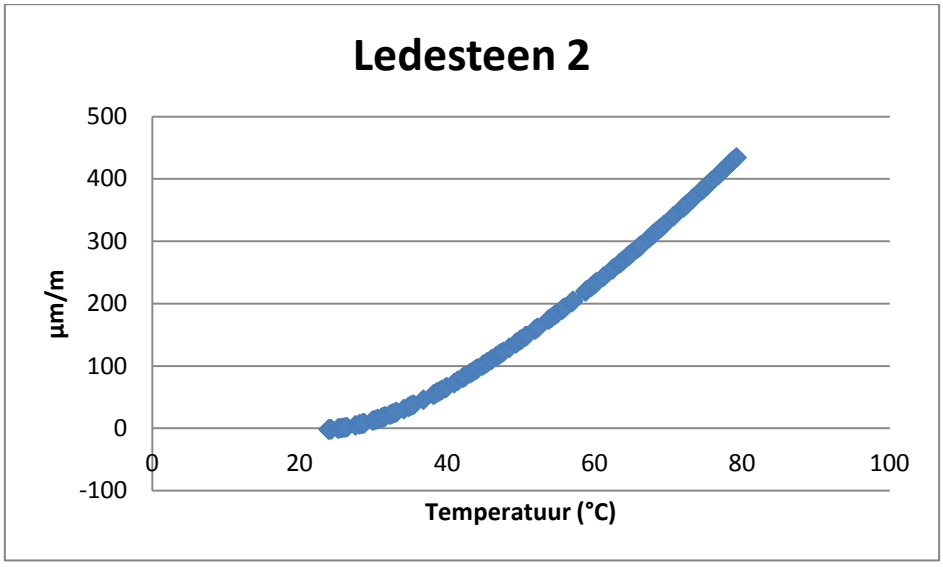
Figuur 134: Curve thermische uitzetting Gebr. Lede 1.



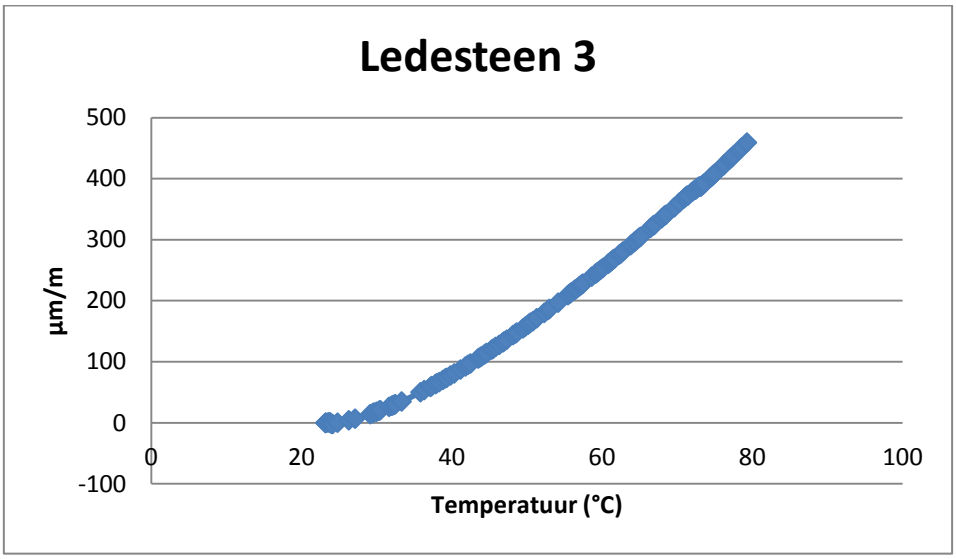
Figuur 135: Curve thermische uitzetting Gebr. Lede 2.



Figuur 136:Curve thermische uitzetting Ledesteen ± 5 % porositeit.



Figuur 137:Curve thermische uitzetting Ledesteen ± 10 % porositeit.



Figuur 138: Curve thermische uitzetting Ledesteen ± 15 % porositeit