

# Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:  
bouwkunde

## **Masterthesis**

**Montage en demontage van ongebakken leemstenen: verkenning van het circulaire  
potentieel van aardemetselwerk**

**Siebe Gielen  
Frederic Spooren**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## **PROMOTOR :**

Prof. dr. ir. Elke KNAPEN

## **BEGELEIDER :**

ir. Erik PELICAEN

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek  
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



**2022**  
**2023**

# Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:  
bouwkunde

## ***Masterthesis***

***Montage en demontage van ongebakken leemstenen: verkenning van het circulaire potentieel van aardemetselwerk***

**Siebe Gielen**

**Frederic Spooren**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## **PROMOTOR :**

Prof. dr. ir. Elke KNAPEN

## **BEGELEIDER :**

ir. Erik PELICAEN



**KU LEUVEN**



## Woord vooraf

Deze masterthesis vormt het sluitstuk van de gezamenlijke masteropleiding industriële ingenieurswetenschappen aan de Universiteit Hasselt en KU Leuven. Voorafgaand aan deze scriptie willen we dan ook enkele mensen bedanken die dit mogelijk gemaakt hebben. Allereerst willen we graag onze promotor prof. dr. ir. Elke Knapen bedanken voor het organiseren van deze masterscriptie aan de faculteit Architectuur van de UHasselt. Daarnaast zijn we onze begeleider ir. Erik Pelicaen ook dankbaar voor zijn begeleiding gedurende het volledige traject. Ook danken we dr. ing. Rik Steensels en de andere medewerkers van het CERG-bouwlabo voor het faciliteren van en het begeleiden bij enkele proeven. Vervolgens zijn we ir. Johan Horckmans dankbaar voor het beschikbaar stellen van enkele materialen en apparaten uit het technologiecentrum. Verder hebben wij het Brussels bedrijf BC Materials enkele keren bezocht en leverden zij ook verschillende materialen die gebruikt werden in dit onderzoek. Ook hen willen we dus bedanken. Tot slot zouden we graag prof. dr. ing. Bram Vandoren bedanken voor het organiseren van dit opleidingsonderdeel alsook Bart Dreesen voor het doceren van de lessen van het masterproefseminarie.





# Inhoud

<b>Woord vooraf .....</b>	<b>1</b>
<b>Lijst van tabellen.....</b>	<b>7</b>
<b>Lijst van figuren.....</b>	<b>9</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>13</b>
<b>Abstract in English .....</b>	<b>15</b>
<b>1 Inleiding .....</b>	<b>17</b>
1.1 Algemene ecologische context.....	17
1.1.1 Vlinderdiagram EMF .....	17
1.1.2 De 9 R's .....	18
1.1.3 De 24 ontwerprichtlijnen voor veranderingsgericht bouwen OVAM.....	19
1.2 Levenscyclus leemsteenmetselwerk .....	20
1.2.1 Productfase.....	21
1.2.2 Constructiefase.....	21
1.2.3 Gebruiksfase .....	21
1.2.4 End-of-life fase .....	21
1.3 Technieken aardebouw .....	21
1.3.1 Rammed earth .....	21
1.3.2 Cob.....	22
1.3.3 Wattle and daub .....	23
1.3.4 Leemsteenmetselwerk.....	23
<b>2 Literatuurstudie .....</b>	<b>25</b>
2.1 Mortels in leemsteenmetselwerk.....	25
2.1.1 Kalkmortels .....	25
2.1.2 Leemmortels .....	26
2.2 Leem op materiaalniveau .....	26
2.2.1 Compositie van grondstoffen .....	26
2.2.2 Granulometrie .....	27
2.2.3 Fysische eigenschappen .....	28
2.3 Technische prestaties leemstenen en leemsteenwanden .....	28
2.4 Hechting leemsteen-mortel en demontage.....	29
2.4.1 Hechtingsmechanisme .....	29
2.4.2 Te onderzoeken eigenschappen mortel en stenen .....	30
2.4.3 Invloed van water op hechting .....	30
<b>3 Methodologie .....</b>	<b>31</b>

3.1 Doelstelling.....	31
3.2 Bond wrench test.....	31
3.3 Proefopstelling .....	34
3.3.1 Proefopstelling exploratiefase.....	34
3.3.2 Proefopstelling testreeks 1 en testreeks 2.....	35
<b>4 Exploratiefase.....</b>	<b>37</b>
4.1 Metselen van proefstukken .....	37
4.2 Resultaten exploratiefase .....	39
4.3 Discussie exploratiefase.....	40
<b>5 Eigenschappen leemstenen.....</b>	<b>41</b>
5.1 Vochtgehalte .....	41
5.2 Capillaire waterabsorptie .....	42
5.3 Waterabsorptie .....	44
<b>6 Eigenschappen mortel .....</b>	<b>47</b>
6.1 Consistentie.....	47
6.2 Luchtgehalte.....	47
6.3 Buig -en druksterkte.....	48
<b>7 Testreeks 1: hechtsterkte na 7 dagen .....</b>	<b>53</b>
7.1 Metselen van proefstukken .....	53
7.2 Resultaten testreeks 1 .....	58
7.3 Analyse hechtsterkte .....	64
7.3.1 Hechtsterkte per mortel-leemsteencombinatie .....	64
7.3.2 Hechtsterkte alle leemsteen-mortelcombinaties.....	69
7.4 Analyse faalmodi .....	70
7.4.1 Algemene analyse .....	70
7.4.2 Invloed van water bij demontage op faalmodi.....	74
<b>8 Testreeks 2: hechtsterkte na 28 dagen .....</b>	<b>77</b>
8.1 Metselen van proefstukken .....	77
8.2 Resultaten testreeks 2.....	81
8.3 Analyse hechtsterkte .....	83
8.3.1 Hechtsterkte per mortel-leemsteencombinatie .....	83
8.3.2 Hechtsterkte alle leemsteen-mortelcombinaties.....	89
8.3.3 Vergelijking hechtsterkte na 7 dagen en 28 dagen.....	90
8.4 Analyse faalmodi .....	91
8.4.1 Algemene analyse .....	91
8.4.2 Invloed van water bij demontage op faalmodi.....	94



8.4.3 Vergelijking faalmodi na 7 dagen en 28 dagen.....	95
8.5 Manuele demontage.....	96
8.6 Zuiveringsproces.....	98
<b>9 Besluit.....</b>	<b>105</b>
<b>Bibliografie.....</b>	<b>107</b>
<b>Bijlagen.....</b>	<b>111</b>
Bijlage A: Verklaring formule bond wrench test p.32.....	111
Bijlage B: Uitgebreide resultaten buig- en druksterkte mortelbalkjes p.51.....	113
Bijlage C: Uitgebreide resultaten testreeks 1 p.58, 63.....	114
Bijlage D: Uitgebreide resultaten testreeks 2 p.81.....	119



## Lijst van tabellen

Tabel 1: Recuperatiepotentieel aan de hand van faalmodi.....	33
Tabel 2: Samenstelling gebruikte mortels exploratiefase .....	37
Tabel 3: Markering coupletten.....	37
Tabel 4: Markering muurtjes .....	38
Tabel 5: Testresultaten vochtgehalte MEB's en VEB's.....	41
Tabel 6: Testresultaten capillaire waterabsorptiecoëfficiënt per minuut VEB's .....	42
Tabel 7: Testresultaten capillaire waterabsorptiecoëfficiënt per seconde VEB's en MEB's.....	43
Tabel 8: Testresultaten waterabsorptie VEB's .....	44
Tabel 9: Resultaten flow test.....	47
Tabel 10: Resultaten buig- en druksterktes mortelbalkjes .....	51
Tabel 11: Samenstelling gebruikte mortels testreeks 1 .....	54
Tabel 12: Combinatiematrix testreeks 1 .....	55
Tabel 13: Markering en verduidelijking coupletten testreeks 1 .....	56
Tabel 14: Parameters proefopstelling per testcombinatie testreeks 1 .....	58
Tabel 15: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties MEB-M0 en FMEB-M0.....	59
Tabel 16: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties MEB-M8 en FMEB-M8.....	59
Tabel 17: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties VEB4-M0.....	60
Tabel 18: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties VEB4-M8.....	61
Tabel 19: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties VEB4-EG .....	62
Tabel 20: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties VEB4-SS .....	63
Tabel 21: Samenstelling gebruikte mortels testreeks 2.....	77
Tabel 22: Combinatiematrix testreeks 2 .....	78
Tabel 23: Markering en verduidelijking coupletten testreeks 2.....	79
Tabel 24: Parameters proefopstelling per leemsteen testreeks 2 .....	81
Tabel 25: Resultaten bond wrench test na 28 dagen combinaties met FMEB's.....	81
Tabel 26: Resultaten bond wrench test na 28 dagen combinatie VEB4-M0 .....	82
Tabel 27: Resultaten bond wrench test na 28 dagen combinatie VEB4-M8 .....	82
Tabel 28: Resultaten bond wrench test na 28 dagen combinatie VEB4-EG.....	83
Tabel 29: Resultaten bond wrench test na 28 dagen combinatie VEB4-SS.....	83
Tabel 30: Resultaten iteratief proces.....	97
Tabel 31: Legende beoordeling materiaalgebruik.....	99
Tabel 32: Resultaten zuiveringsproces .....	99



## Lijst van figuren

Figuur 1: Vlinderdiagram EMF .....	18
Figuur 2: 24 ontwerprichtlijnen voor veranderingsgericht bouwen van OVAM.....	20
Figuur 3: Schematische voorstelling rammed earth.....	22
Figuur 4: Visualisatie rammed earth.....	22
Figuur 5: a) vervaardigen muur uit cob en b) visualisatie cob.....	23
Figuur 6: Toepassing wattle and daub .....	23
Figuur 7: a) vervaardigen adobe kleiblokken en b) visualisatie adobe blokken .....	24
Figuur 8: Samengedrukte aardeblokken .....	24
Figuur 9: Leemmortel versterkt met dierenharen.....	26
Figuur 10: De textuurdriehoek.....	28
Figuur 11: Mechanische interlock tussen steen en mortel, a) vochtabsorptie door steen en b) schematische weergave mechanische interlock .....	29
Figuur 12: Grafische weergave methodologie .....	31
Figuur 13: Proefopstelling bond wrench test .....	32
Figuur 14: Faalmodi na uitvoeren bond wrench test.....	33
Figuur 15: Proefopstelling bond wrench test in exploratiefase.....	34
Figuur 16: Proefopstelling bond wrench test testreeks 1 en 2 .....	35
Figuur 17: Schematische voorstelling bond wrench test.....	36
Figuur 18: Aangepaste proefopstelling (F)MEB's .....	36
Figuur 19: Coupletten a) ongestabiliseerde leemmortel en b) gestabiliseerde leemmortel en lijm mortel .....	38
Figuur 20: Muurtje a) ongestabiliseerde leemmortel en b) kalkmortel.....	38
Figuur 21: Proefstuk met ongestabiliseerde leemmortel a) voor demontage en b) na demontage .....	39
Figuur 22: Proefstuk met gestabiliseerde leemmortel a) voor demontage en b) na demontage .....	39
Figuur 23: Proefstuk met lijm mortel a) voor demontage en b) na demontage .....	39
Figuur 24: Proefstuk met kalkmortel a) voor demontage en b) na demontage .....	40
Figuur 25: Hechtingsoppervlak kleisteen met a) ongestabiliseerde leemmortel en b) lijm mortel.....	40
Figuur 26: Proef capillaire waterabsorptiecoëfficiënt VEB's.....	42
Figuur 27: Proef capillaire waterabsorptiecoëfficiënt VEB's en MEB's .....	43
Figuur 28: Afwijking a) VEB9 en b) VEB12 .....	45
Figuur 29: Waterabsorptie VEB's gedurende 90 minuten .....	45
Figuur 30: Flow test sodiumsilicaat gestabiliseerde leemmortel .....	47
Figuur 31: Test luchtgehalte van mortel a) voor toevoegen van alcohol en b) na toevoegen van alcohol .....	48
Figuur 32: Verse mortelbalkjes afgedekt of ingepakt met PE-folie.....	49
Figuur 33: Proefstukken mortelbalkjes a) mortel EG, b) mortel SS, c) mortel M0 en d) mortel M8 ...	49
Figuur 34: Driepuntbuigproef van a) proefstuk M8 voor falen en b) proefstuk SS na falen .....	50
Figuur 35: Drukproef van a) proefstuk M0 voor falen en b) proefstuk SS na falen .....	50
Figuur 36: Schadepatronen a) na buigproef en b) na buig- en drukproef .....	50
Figuur 37: a) vibro-gecompacteerde leemsteen, b) solide vormsteen en c) frogged vormsteen.....	53
Figuur 38: a) droge leemmortel en b) mengproces .....	54
Figuur 39: a) sodiumsilicaat, b) leemlijmmortel en c) CEM II/B-LL 42,5 N.....	54
Figuur 40: Gemetste coupletten testreeks 1 (deel 1).....	57
Figuur 41: Gemetste coupletten testreeks 1 (deel 2).....	58
Figuur 42: Hechtsterkte combinatie FMEB-M8 .....	64



Figuur 43: Hechtsterkte combinatie VEB4-M0 .....	65
Figuur 44: Hechtsterkte combinatie VEB4-M8 .....	66
Figuur 45: Hechtsterkte combinatie VEB4-EG .....	67
Figuur 46: a) coupletten ondergedompeld bij demontage en b) proefstuk VEB4-EG-v-15'-24 met opgeloste leemlijmmortel.....	68
Figuur 47: Hechtsterkte combinatie VEB4-SS .....	68
Figuur 48: Hechtsterkte na 7 dagen alle combinaties met VEB's .....	69
Figuur 49: Algemene analyse faalmodi testreeks 1 .....	70
Figuur 50: Visualisatie faalmodi a) combinatie FMEB-M0 faalmodus A6 en b) combinatie MEB-M0 faalmodus A2.....	71
Figuur 51: Visualisatie faalmodi combinatie FMEB-M8 a) faalmodus A6 en b) faalmodus A1 .....	72
Figuur 52: Visualisatie faalmodi combinatie MEB-M8 a) faalmodus A1, b) faalmodus A2 en c) faalmodus A3.....	72
Figuur 53: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-M0 a) faalmodus A1, b) faalmodus A2 en c) faalmodus A3.....	72
Figuur 54: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-M8 a) faalmodus A1, b) faalmodus A3, c) faalmodus A4 en d) faalmodus A7 .....	73
Figuur 55: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-EG a) faalmodus A1, b) faalmodus A2, c) faalmodus A3, d) faalmodus A4, e) faalmodus A5 en f) faalmodus A7.....	73
Figuur 56: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-SS a) faalmodus A1, b) faalmodus A2, c) faalmodus A3 en d) faalmodus A4 .....	74
Figuur 57: Faalmodi demontage coupletten in droge en natte toestand testreeks 1.....	75
Figuur 58: a) gestandaardiseerde panmixer en b) mengproces.....	78
Figuur 59: Gemetste proefstukken testreeks 2.....	80
Figuur 60: Hechtsterkte combinatie FMEB .....	84
Figuur 61: Hechtsterkte combinatie VEB4-M0 .....	85
Figuur 62: Hechtsterkte combinatie VEB4-M8 .....	86
Figuur 63: Vochtfronten in mortel van couplet a) VEB4-M8-1"-1'.1, b) VEB4-M8-1"-1'.2 en c) VEB4-M8-1"-1'.3.....	87
Figuur 64: Vochtfronten in mortel van couplet a) VEB4-M8-1"-15'.1, b) VEB4-M8-1"-15'.2 en c) VEB4-M8-1"-15'.3.....	87
Figuur 65: Hechtsterkte combinatie VEB4-EG .....	87
Figuur 66: Hechtsterkte combinatie VEB4-SS .....	88
Figuur 67: Hechtsterkte na 28 dagen alle leemsteen-mortelcombinaties met VEB's.....	89
Figuur 68: Vergelijking hechtsterkte na 7 dagen en 28 dagen van combinatie a) VEB4-M0, b) VEB4- M8, c) VEB4-EG, d) VEB4-SS en e) FMEB-M8.....	90
Figuur 69: Algemene analyse faalmodi testreeks 2 .....	92
Figuur 70: Visualisatie faalmodi a) combinatie FMEB-M0 faalmodus A6, b) combinatie FMEB-M8 faalmodus A6 en c) combinatie FMEB-M8 faalmodus A1 .....	93
Figuur 71: Visualisatie faalmodi combinatie FMEB-EG a) faalmodus A4 en b) faalmodus A7 .....	93
Figuur 72: Visualisatie faalmodi combinatie FMEB-SS a) faalmodus A3 en b) faalmodus A4 .....	93
Figuur 73: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-M0 a) faalmodus A1, b) faalmodus A2 en c) faalmodus A3.....	94
Figuur 74: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-M8 a) faalmodus A1, b) faalmodus A2 en c) faalmodus A3.....	94
Figuur 75: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-EG a) faalmodus A3, b) faalmodus A4 en c) faalmodus A7.....	94

Figuur 76: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-SS a) faalmodus A2, b) faalmodus A3 en c) faalmodus A4..... 94

Figuur 77: Faalmodi demontage coupletten in droge en natte toestand testreeks 2..... 95

Figuur 78: Klemmen gebruikt voor iteratief demontageproces a) stenenklem, b) korte klem en c) lange klem ..... 96

Figuur 79: a) gebruikte materiaal (staalborstel, hamer en spatel) en b) effect van staalborstel op steenoppervlak ..... 98

Figuur 80: Combinatie FMEB-M0 a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken ..... 100

Figuur 81: Combinatie FMEB-M8 a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken ..... 101

Figuur 82: Combinatie FMEB-SS a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken ..... 101

Figuur 83: Combinatie FMEB-EG a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken ..... 101

Figuur 84: Combinatie VEB4-M0 a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken ..... 102

Figuur 85: Combinatie VEB4-M8 a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken ..... 102

Figuur 86: Combinatie VEB4-EG a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken ..... 102

Figuur 87: Combinatie VEB4-SS a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken ..... 103

Figuur 88: Alle zuiver gemaakte vibro-compactieelemstenen..... 103



## Abstract

De bouwsector is op zoek naar meer duurzame en ecologische manieren van bouwen om zijn milieu-impact te verkleinen. Deze masterproef onderzoekt in dit kader het circulaire potentieel van ongebakken aardemetselwerk, met de focus op montage en demontage van leemsteenmetselwerk.

De demontagecapaciteit wordt onderzocht met de bond wrench test die uitgevoerd wordt op coupletten. Hierbij worden handvormleemstenen (FMEB's) en vibro-compactielemstenen (VEB's) gecombineerd met leemlijmmortel (EG) ongestabiliseerde (M0), cement-gestabiliseerde (M8) en sodiumsilicaat-gestabiliseerde (SS) leemmortel. De demontagecapaciteit van het leemsteenmetselwerk wordt geëvalueerd aan de hand van de hechtsterkte en de faalmodi die volgen uit de bond wrench test. Door proefstukken gedurende een variërende tijd onder te dompelen wordt ook de invloed van water bij montage en demontage onderzocht. Verder wordt ook het zuiveringsproces van de stenen geanalyseerd.

Er wordt besloten dat de mortel EG (met FMEB's en VEB's) de hoogste hechtsterkte oplevert. Dit zorgt voor ongewenste faalmodi bij demontage en dus een laag recuperatiepotentieel. De mortels M0, M8 en SS daarentegen lenen zich beter tot het demonteren omdat de respectievelijke hechtsterktes lager zijn. Verder wordt besloten dat voor M0, M8 en SS de hechtsterkte afneemt naarmate de coupletten langer ondergedompeld worden bij demontage. Ten slotte leveren de mortels M0 en M8 de meest gewenste faalmodi op, gevolgd door de mortel SS waarbij in verschillende gevallen het falen gebeurt in de mortel.



## Abstract in English

The construction industry is looking for more sustainable and ecological methods of building to reduce its environmental impact. In this context, this master's thesis investigates the circular potential of unfired earth masonry, with a focus on assembly and disassembly of earthen masonry.

The disassembly capacity is investigated by performing the bond wrench test on couplets. In these test specimens, hand-formed clay bricks (FMEB) and vibro-compaction bricks (VEB) are combined with earth glue mortar (EG) unstabilized (M0), cement-stabilized (M8) and sodium silicate-stabilized (SS) loam mortar. The disassembly capacity of the earthen masonry is evaluated on the basis of the bond strength and failure modes that follow from the bond wrench test. By immersing specimens for varying periods of time, the influence of water during assembly and disassembly is also investigated. Furthermore, the purification process of the bricks is also analyzed.

It is concluded that the mortar EG (both with FMEB and VEB) provides the highest bond strength. This causes undesirable failure modes during disassembly and thus low recovery potential. In contrast, mortars M0, M8 and SS are more suitable for disassembly since their respective bond strengths are lower. It is further concluded that for M0, M8 and SS the bond strength decreases the longer the couplets are immersed during disassembly. Finally, mortars M0 and M8 provide the most desirable failure modes, followed by mortar SS, in which in several cases the failure occurs in the mortar itself.



# 1 Inleiding

## 1.1 Algemene ecologische context

Klimaatveranderingen zijn een feit en zijn vandaag de dag niet meer weg te denken. Schadelijke gassen zoals koolstofdioxide en methaangas zorgen voor het broeikasgaseffect waarbij ook de bouw zijn bijdrage doet aan de productie van deze gassen. Daarnaast kampt de bouwsector met een tekort aan grondstoffen en dreigen verschillende bouwgrondstoffen in de nabije toekomst uitgeput te raken [1].

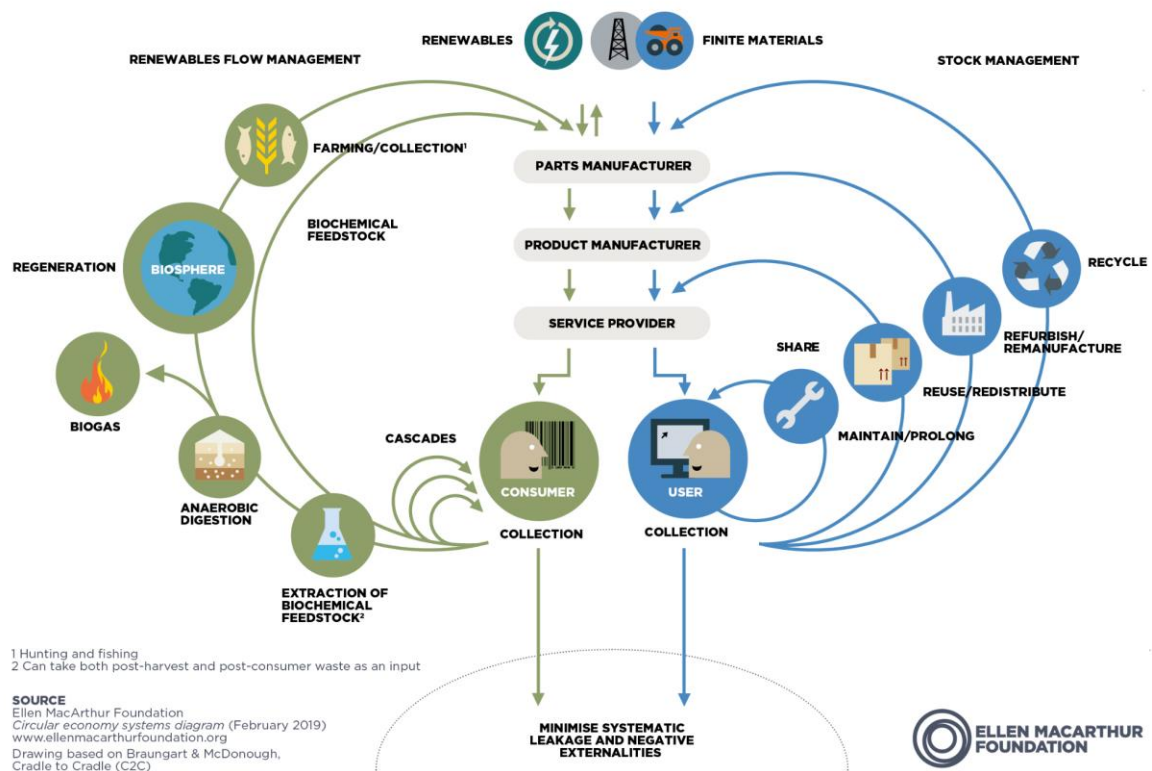
Uit onderzoek blijkt dat de gebouwde omgeving vandaag verantwoordelijk is voor 25-40% van de wereldwijde uitstoot van koolstofdioxide [2]. Verder is deze sector verantwoordelijk voor een kwart van de totale afvalberg [1]. Dit ecologisch probleem is te wijten aan het lineaire economisch model dat de bouwsector uitvoerig toepast. In dit model start het constructieproces bij het ontginnen van (natuurlijke) grondstoffen om deze vervolgens chemisch te veranderen en om te zetten in bouwmaterialen. Deze bouwmaterialen worden dan verwerkt in constructies. Dit gebeurt op zo een manier waarbij het in een latere levensfase van de constructie onmogelijk wordt om de bouwmaterialen te demonteren en/of te hergebruiken. Deze manier van bouwen zorgt ervoor dat de chemisch gewijzigde grondstoffen aan het einde van de levenscyclus van een bouwproduct niet kunnen terugkeren naar hun oorspronkelijke toestand. Dit werkt de uitputting van natuurlijke grondstoffen en de toename van de afvalberg in de hand [1], [2].

Om deze ecologische crisis aan te pakken, focust de bouwsector de laatste jaren meer en meer op het circulaire potentieel van bouwmaterialen en constructiemethodes. Hierbij streeft de bouwsector naar een regeneratief systeem waarin bouwmaterialen een zo hoog mogelijke kwaliteit behouden en in een gesloten cyclus terecht komen. Dit uit zich in het hergebruiken van bouwmaterialen door de montage- en demontagecapaciteiten van materialen te optimaliseren, maar ook door het gebruik van regeneratieve bouwmaterialen zoals aarde, stro en hennep [1], [2]. Bovendien vergt de verwerking van deze bouwmaterialen een zeer laag energieverbruik en gaat dit gepaard met een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot [3].

### 1.1.1 Vlinderdiagram EMF

Deze circulaire economie is door de Ellen MacArthur foundation vertaald naar een Vlinderdiagram, weergegeven in Figuur 1. Het vlinderdiagram bestaat uit twee hoofdcycli. De biologische cyclus enerzijds geeft het proces weer waarbij biologisch afbreekbare materialen teruggevoerd worden naar de aarde om de natuur te regenereren. Anderzijds visualiseert de technologische cyclus dat materialen en producten circuleren door ze te hergebruiken, recycleren, demonteren ... [4].





Figuur 1: Vlinderdiagram EMF [4]

De technische cyclus telt vier verschillende cycli die elk een verschillend niveau van hergebruik voorstellen, waarbij idealiter een zo klein mogelijke cirkel doorlopen wordt om zo het aantal bewerkingsstappen en de nodige arbeid en energie te minimaliseren. In de biologische cyclus wordt gebruik gemaakt van verschillende cascades om hergebruik te illustreren. Dit betekent dat wanneer een product niet langer kan voldoen aan de huidige functie, het in een andere toepassing gebruikt wordt. Een belangrijke opmerking hierbij is dat tijdens het cascaderen de kwaliteit van het product vermindert en energieverlies optreedt [4].

Aarde als bouw materiaal kan geplaatst worden in de technische cyclus van het vlinderdiagram van EMF. Doordat ongebakken aarde of leemstenen in tegenstelling tot gebakken aardeblokken geen chemische reactie ondergaan, kan ongebakken aarde wel hergebruikt worden. Zo kan het aardewerk hergebruikt worden in een andere toepassing (reuse), deels gedemonteerd worden om de kwaliteit te verhogen (remanufacturer) of volledig afgebroken worden tot de grondstof aarde die het oorspronkelijk was (recycle) [5].

### 1.1.2 De 9 R's




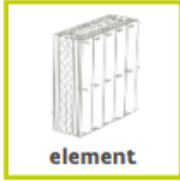


Door middel van het toepassen van de 9 R's (R0: refuse, R1: reduce, R2: reuse, R3 repair, R4 refurbish, R5: remanufacture, R6: repurpose, R7: recycle, R8: recover, R9: remine) wordt een circulaire economie bekomen [5]. Het concept refuse wordt toegepast door producenten door het weigeren gebruik te maken van schadelijke grondstoffen en het ontwikkelen van nieuwe producten om afval te voorkomen. Zo weigert men bij de productie van compressed earth blocks de blokken te bakken in de oven vermits er op deze manier geen extra schadelijke gassen in de atmosfeer komen. Bij reduce wordt de productie van afval vermeden tijdens het productieproces. Vervolgens wordt het product opnieuw gebruikt voor

dezelfde toepassing bij het concept reuse. Bij een muur bestaande uit ongebakken leemstenen worden dan de stenen in zijn geheel opnieuw gebruikt in de muur van het volgende project. Het concept repair focust op het verlengen van de leeftijd van het product. Een muur uit ongebakken leemstenen moet op regelmatige basis hersteld worden vermits die gevoeliger is voor erosie dan een muur uit gebakken kleistenen [6]. Verder wordt de term refurbish gebruikt wanneer een product dat uit meerdere componenten bestaat intact blijft waarbij de componenten gerepareerd of vervangen worden. Een voorbeeld van refurbish is de renovatie van een huis. Daarnaast is remanufacture van toepassing wanneer de volledige structuur van een meercomponentenproduct wordt gedemonteerd, gecontroleerd, gereinigd en indien nodig vervangen of gerepareerd in een industrieel proces. Bij het concept repurpose wordt een product hergebruikt door het een andere functie te geven in een volgende toepassing. Zo kan een klassieke metselwerkmuur van gebakken kleistenen verbrijzeld worden tot steenpuin en dienen als onderfundering bij de aanleg van een nieuwe weg. Vervolgens duidt recycle op het terugwinnen van de grondstof. Zo kunnen compressed earth blocks verpulverd worden waardoor de leem opnieuw bruikbaar is om nieuwe blokken mee te maken. De term recover staat voor het verbranden van materialen om energie terug te winnen. Tot slot betekent remine het ophalen van materialen na de stortfase met als doel hier waardevolle componenten uit te winnen [5].

### **1.1.3 De 24 ontwerprichtlijnen voor veranderingsgericht bouwen OVAM**

Om het hiervoor beschreven materiaalbewust bouwen in verschillende cycli te stimuleren heeft de OVAM (Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij) in samenspraak met verschillende architectenbureaus 24 richtlijnen uitgeschreven voor veranderingsgericht bouwen. De matrix in Figuur 2 geeft deze richtlijnen weer die op element-, gebouw- of wijkniveau geordend zijn [7]. Enkele richtlijnen die relevant zijn voor deze thesis worden onder de matrix meer uitgebreid aangehaald.

Een eerste belangrijke richtlijn is de omkeerbaarheid van een verbinding op elementniveau. Zo zorgt een cementmortel voor een onomkeerbare verbinding waardoor demontage van de aardestenen en het daaropvolgende hergebruik uitgesloten wordt. Een kalkmortel biedt daarentegen wel een omkeerbaarheid van de verbinding en hergebruik van het aardemateriaal [7]. Ook is de herbruikbaarheid een zeer relevante richtlijn. Aarde is een materiaal dat veel verschillende toepassingen kent en verwerkt kan worden in verschillende technieken zoals beschreven in paragraaf 1.3. Het hergebruik van ongebakken aarde kent dus een groot toepassingsdomein waardoor de hoeveelheid bouwafval beperkt wordt [7].

	 <b>interfaces</b>	 <b>sub-onderdelen</b>	 <b>compositie</b>
 <b>element</b>	<b>1.1.1</b> omkeerbaarheid <b>1.1.2</b> eenvoud <b>1.1.3</b> snelheid	<b>1.2.1</b> duurzaamheid <b>1.2.2</b> hergebruik <b>1.2.3</b> compatibiliteit	<b>1.3.1</b> gelaagdheid <b>1.3.2</b> onafhankelijkheid <b>1.3.3</b> prefabricatie
 <b>gebouw</b>	<b>2.1</b> omkeerbaarheid	<b>2.2.1</b> demonteerbaarheid <b>2.2.2</b> herbruikbaarheid <b>2.2.3</b> uitbreidbaarheid	<b>2.3.1</b> veranderlijke functieverdeling
 <b>wijk</b>	<b>3.1.1</b> eenvoud <b>3.1.2</b> evolutie	<b>3.2.1</b> hergebruik <b>3.2.2</b> dimensionering <b>3.2.3</b> demonteerbaarheid	<b>3.3.1</b> ruimtelijke structuur <b>3.3.2</b> polyvalente ruimten <b>3.3.3</b> diversiteit <b>3.3.4</b> inbreiding functie- wijziging
<b>extra fiche ventilatie</b>			

Figuur 2: 24 ontwerprichtlijnen voor veranderingsgericht bouwen van OVAM [7]

In de context van metselwerk zorgt het chemisch veranderen van materialen door verbranding voor de uitputting van grondstoffen vermits hierdoor demontage en hergebruik van materialen onmogelijk wordt [2]. Bij aardebouw is geen energie nodig om de stenen te bakken waardoor het materiaal op chemisch niveau niet van samenstelling verandert en hergebruik van de materialen wel mogelijk is. Vaak worden materialen zoals beton en gebakken kleistenen gebruikt in structuren waar geen hoge materiaalsterktes vereist zijn. Niet dragende muren kunnen dus op een alternatieve methode vervaardigd worden die het mogelijk maakt de muur te demonteren en de bouwmaterialen te hergebruiken in de toekomst. Deze manier van bouwen vraagt om een mindswitch waarbij men vertrekt vanuit de nodige eigenschappen van een constructie, om hier vervolgens een gepast materiaal voor te kiezen. Doordat de druksterkte van beton en metselwerk niet altijd vereist zijn in een bepaalde constructie, komt aarde in aanmerking als functioneel equivalent bouw materiaal met een lage milieu-impact.

## 1.2 Levenscyclus leemsteenmetselwerk

Om de duurzaamheid en het circulaire potentieel van leemsteenmetselwerk in kaart te brengen, is het van essentieel belang om de levenscyclus van leemsteenmetselwerk en de impact van elke fase te beschrijven. De verschillende fases in deze levenscyclus zijn voornamelijk de productfase, de constructiefase, de gebruiksfase en de end-of-life fase [8].

### 1.2.1 Productfase

In de eerste fase van de levenscyclus van leemsteenmetselwerk wordt gefocust op het product zelf. Om de milieu-impact te beperken is het van groot belang om grondstoffen te gebruiken die in de omgeving ontgonnen kunnen worden. Transport heeft immers een grote impact op de milieuvervuiling van het proces. Daarnaast wordt een proces doorlopen om deze grond tot een leemsteen te verwerken. Zo wordt de ontgonnen grond eerst gedroogd, waarna de grond wordt geplet en gezeefd om zo de juiste korrelgrootte te bekomen. Vervolgens wordt de grond gemengd met water en eventueel kalk ter stabilisatie. Dit mengsel wordt daarna a.d.h.v. een hydraulische pers vervaardigd tot een samengedrukte leemsteen die gedroogd en uitgehard wordt onder omgevingsomstandigheden. Ten slotte worden de stenen gestapeld op paletten, verpakt en uiteindelijk verzonden naar de klant of opgestapeld in het magazijn. Belangrijk hierbij op te merken is dat ook de impact van de administratieve diensten in rekening gebracht dient te worden [8].

### 1.2.2 Constructiefase

In de constructiefase is opnieuw het transport een in rekening te brengen factor. De leemstenen zelf alsook het materieel dienen vervoerd te worden naar de werf. Hoe dichterbij deze werf zich bevindt, hoe lager de milieu-impact van deze fase. Daarnaast heeft het vervaardigen van de constructie zelf ook een invloed. De stenen worden door een metser gestapeld en met een mortel aan elkaar gehecht. De stenen hebben een voldoende hoge afwerkingsgraad waardoor een afwerkingslaag in pleister of kalk niet noodzakelijk is. Indien dit wel gewenst is, resulteert dit in een hogere milieu-impact tijdens de constructiefase [8].

### 1.2.3 Gebruiksfase

In de gebruiksfase is onderhoud de enige relevante operatie om in acht te nemen. Wederom is transport van leem en klein materiaal om het onderhoud uit te voeren de belangrijkste factor betreffende de milieu-impact. Dit onderhoud bestaat voornamelijk uit het witwassen van de muren [8].

### 1.2.4 End-of-life fase

De effecten in de end-of-life fase van aardematerialen zijn lager dan de conventionele bouwmaterialen aangezien ze gemakkelijk kunnen worden gerecycleerd in een nieuwe materiaalkringloop met dezelfde functie als de vorige of kunnen worden teruggevoerd naar de natuurlijke omgeving tegen zeer lage milieukosten [8].

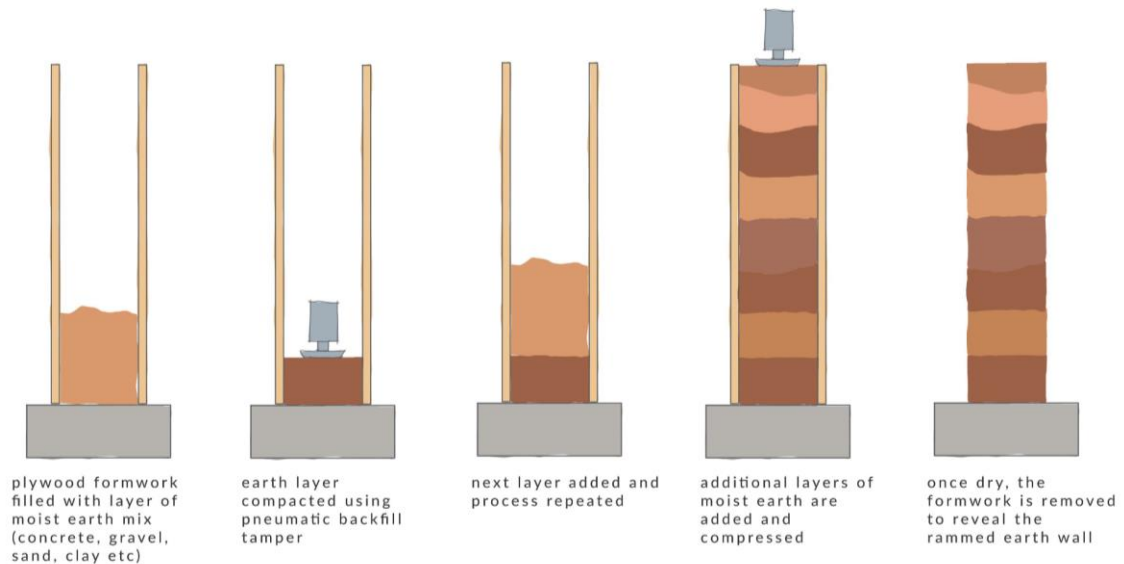
## 1.3 Technieken aardebouw

In deze paragraaf worden verschillende technieken van aardebouw beschreven. Voornamelijk worden de technieken rammed earth, cob en wattle and daub toegelicht. Ten slotte wordt ook het klassieke leemsteenmetselwerk en de verschillende soorten leemstenen besproken.

### 1.3.1 Rammed earth

Rammed earth is het aandrukken van opeenvolgende lagen aarde in een bekisting. Deze techniek wordt gebruikt voor het vervaardigen van funderingen, muren en vloeren uit natuurlijke grondstoffen zoals aarde, krijt, kalk of grind. Met rammed earth kunnen zowel dragende als niet-dragende structuren vervaardigd worden. Verder kunnen ook gestampte of samengeperste leemblokken vervaardigd worden

met deze techniek [9]. Een schematische voorstelling en een visualisatie van rammed earth zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 3 en Figuur 4.



*Figuur 3: Schematische voorstelling rammed earth [10]*



*Figuur 4: Visualisatie rammed earth [11]*

### 1.3.2 Cob

Cob is een bouwtechniek waarbij het materiaal bestaat uit een mengeling van ongebakken aarde, water en stro of andere vergelijkbare natuurlijke vezels. Dit mengsel wordt op traditionele wijze gemengd met de voeten en is daarom zeer arbeidsintensief. Het mengsel kan ook vervaardigd worden met mechanische mixers. Cob wordt niet uitgevoerd in de vorm van bouwblokken, maar wordt in een geheel geheel handmatig aangebracht op de werf zonder bekisting. Cob wordt vooral toegepast in herstellingswerken. Ook het vervaardigen van dragende en niet-dragende muren is mogelijk [9]. Het vervaardigen van een muur uit cob en een visualisatie hiervan is weergegeven in Figuur 5.





Figuur 5: a) vervaardigen muur uit cob [12] en b) visualisatie cob [13]

### 1.3.3 Wattle and daub

Bij wattle and daub wordt een aardemengsel tegen en rond een geweven lattenstructuur aangedrukt. Dit wordt frequent uitgevoerd in panelen waarbij gelijktijdig aan beide zijden van de geweven latten de klei in bolvormige gehelen aangedrukt wordt. Op deze manier wordt een homogene massa gevormd. Door het flexibele karakter van deze aardetechniek, is het mogelijk om zware structurele bewegingen op te vangen en de houten structurele elementen te ondersteunen. Wattle and daub vindt zijn toepassing vooral bij het invullen van skeletstructuren [6], [13]. Een voorbeeld hiervan is zichtbaar in Figuur 6.



Figuur 6: Toepassing wattle and daub [14]

### 1.3.4 Leemsteenmetselwerk

Leemsteenmetselwerk bestaat uit kleine bouwelementen (leemstenen) die op elkaar geplaatst worden volgens een bepaald bindingspatroon en samengebonden worden met een bepaald bindmiddel. De leemstenen kunnen gefabriceerd worden door onder andere Adobe of MEB's (moulded earth blocks) en het samendrukken van de aarde CEB's (compressed earth blocks). Ook is een verdichting van de leemstenen mogelijk door vibro-compactie tot VEB's (vibro-compacted earth blocks), waarbij door hydraulische trilnaalden de holtes tussen de aardedeeltjes verkleind worden [15].

Adobe is een techniek om kleiblokken te maken met een hoge hoeveelheid aan klei en stro. Deze blokken bestaan uit een mengeling van zand, klei, stro en water. De adobe blokken worden vervaardigd in een mal tot vormstenen en vervolgens gedroogd in de zon [16]. Het vervaardigen van de blokken en een visualisatie hiervan is weergegeven in Figuur 7.

Verder zijn adobe stenen een brandveilig, duurzaam, biologisch afbreekbaar en niet-toxisch bouw materiaal dat voldoende thermische massa aan gebouwen geeft om thermische prestaties te garanderen. Een lage geluidsoverdracht is een bijkomend voordeel van de massa van de blokken [16].



*Figuur 7: a) vervaardigen adobe kleiblokken [17] en b) visualisatie adobe blokken [18]*

Daarnaast kan leemsteenmetselwerk vervaardigd worden met samengedrukte aardeblokken (compressed earth blocks of CEB). Dit is een bouw materiaal bestaande uit een mengsel van anorganische ondergrond, niet-uitzettende klei, zand en toeslagmateriaal. De aardeblokken dienen bevochtigd te worden waarna ze mechanisch onder hoge druk geperst worden tot de resulterende samengedrukte aardblok [9], zichtbaar in Figuur 8.



*Figuur 8: Samengedrukte aardeblokken [18]*

Het productieproces van samengedrukte aardeblokken of leemstenen is vergelijkbaar met het productieproces van gebakken aardeblokken, behalve dat bij samengedrukte aardeblokken de stenen niet gebakken maar samengedrukt worden. Deze samendrukking kan uitgevoerd worden door manuele of gemotoriseerde persen. Manuele persen zijn lichte persen die handmatig bestuurd worden en een productie output leveren van 300 tot 500 blokken per dag. Gemotoriseerde persen daarentegen worden aangestuurd door een motor en kunnen een productie output van 800 blokken per dag halen. Beide persen kunnen mechanisch of hydraulisch werken [19].

Afhankelijk van de soort en afmetingen van de gebruikte persen, kunnen gedrukte leemstenen van verschillende dimensies geproduceerd worden. Doordat massieve blokken de meest voorkomende vorm zijn en het gewicht dus een bepalende factor is, wordt het gewicht gelimiteerd tot tussen de 6 en 8 kg per blok. Verder is de meest voorkomende afmeting 295 mm x 140 mm x 90 mm. Ook is het aan de hand van gesofisticeerde perstechnieken mogelijk om holle of geperforeerde blokken te produceren die gebruikt worden in gewapend metselwerk of als verloren bekisting [19].



## 2 Literatuurstudie

### 2.1 Mortels in leemsteenmetselwerk

De mortel in het leemsteenmetselwerk verbindt de leemstenen met elkaar en zorgt voor een goede mechanische hechting. De verticale en horizontale voegen zorgen voor het overbrengen en verdelen van de belasting over de gehele muur. De mechanische prestaties van de mortel moeten compatibel zijn met die van de leemstenen. Zo houdt een te geringe sterkte van de mortel het risico voor erosie en scheuren van de mortel in. Een te hoge sterkte van de mortel daarentegen kan zorgen voor het stagneren van water op de zichtbare mortelmatrix waardoor de leemstenen scheuren. Dit resulteert in het breken van de leemstenen [19].

Mortels worden gemaakt door het mengen van een bindmiddel met granulaten, een toeslagstof (zand) en water. De meest gebruikte bindmiddelen in mortels zijn kalk en cement. Deze bindmiddelen kunnen ook gecombineerd worden om mortels te bekomen met vooropgestelde eigenschappen. Verder kan zuivere leem gebruikt worden als bindmiddel in de zogenaamde leemmortels [20].

Ten slotte kunnen ook cementloze mortels gemaakt worden die geactiveerd worden door het toevoegen van sodiumsilicaat. Sodiumsilicaat zorgt voor een toename van de druksterkte wanneer het toegevoegd wordt aan mortels met vliegassen en hoogovenslakken. Sodiumsilicaat zorgt er echter wel voor een afname van de verwerkbaarheid van de mortel tijdens het metselen [21].

#### 2.1.1 Kalkmortels

Kalkmortels zijn mortelsamenstellingen waarbij kalk als bindmiddel gebruikt wordt. Kalkmortels worden bereid met twee soorten bindmiddelen: luchtkalk (calciumhydroxide) of hydraulische kalk. Hydraulische kalk bestaat voor beperkt aandeel uit calciumhydroxide en voornamelijk uit calciumsilicaat. Calciumhydroxide ontstaat door het zogenaamd ‘blussen’ van ongebluste kalk met water. Ongebluste kalk wordt verkregen door het verbranden van kalksteen of schelpen [20].

De verharding van kalkmortels geschiedt in twee fases. In de eerste fase verdampt een deel van het water naar de lucht en wordt het andere deel van het water door de steen opgezogen. Het verdwijnen van het water zorgt voor compactie van het materiaal en een toename van de capillaire krachten. Vervolgens start in de tweede fase de chemische binding. Deze chemische binding komt enerzijds voor in de vorm van carbonatie bij luchtkalk en anderzijds in de vorm van carbonatie en hydratatie bij hydraulische kalk. In het tweede geval vinden beide chemische verhardingsprocessen gelijktijdig plaats [20].

De eigenschappen van de kalkmortels worden bepaald door zowel de grondstoffen als hun mengverhoudingen. Kalkmortels zijn elastischer dan de hedendaagse cementmortels waardoor vervormingen in het metselwerk worden toegelaten zonder scheurvorming. Ten tweede zijn kalkmortels minder dichte mortels dan cementmortels waardoor vorstschade vermeden kan worden. Verder is een aanzienlijk tragere binding van kalkmortels ten opzichte van cementmortels een typerende eigenschap. Ten slotte is metselwerk opgetrokken uit kalkmortel eenvoudiger te recupereren dan metselwerk uit klassieke cementmortel. Vooral bij gebruik van luchtkalk kan bij de sloop van een gebouw de steen schoongebikt en hergebruikt worden. Daarentegen zijn cementmortels doorgaans harde mortels.



Hierdoor zullen de stenen veelal breken bij de afbraak van het metselwerk waardoor de stenen niet meer hergebruikt kunnen worden [20].

Verder vindt kalk zijn toepassing in hedendaagse cementmortels als toevoeging van fijne fractie met een grote specifieke oppervlakte. Hierdoor neemt de verwerkbaarheid toe van mortels waarin grovere zandsoorten gebruikt worden [20].

## 2.1.2 Leemmortels

Leemmortel is een traditionele mortel bestaande uit leem en zand, vaak in de verhouding (1:3). Voor het produceren van deze mortels wordt doorgaans 20 tot 25% water toegevoegd. Afhankelijk van de soort klei kunnen verschillende kleuren bekomen worden om zo het uitzicht van historische mortels te evenaren. Verder kan dierenhaar toegevoegd worden aan de leemmortel (3 kg per m<sup>3</sup> mortel) om de mechanische eigenschappen van de mortel te verbeteren. Dit is zichtbaar in Figuur 9 [22].



*Figuur 9: Leemmortel versterkt met dierenharen [22]*

Ook kunnen natuurlijke polymeren zoals wrongel, (ruwe) suiker, plantaardige gom... toegevoegd worden aan leemmortel. Uit onderzoek naar verschillende historische gebouwen waarin deze natuurlijke polymeren verwerkt zijn, blijkt dat deze bijdragen aan een hogere duurzaamheid en weerbaarheid van de mortel en het metselwerk [23].

## 2.2 Leem op materiaalniveau

### 2.2.1 Compositie van grondstoffen

De belangrijkste componenten van leem zijn klei, zand en silt. Verder kunnen ook grinddeeltjes voorkomen. Klei gedraagt zich als het bindmiddel en zorgt voor een goede hechting tussen de grotere grondstoffen, terwijl silt en zand voornamelijk als vulmiddel fungeren. De componenten van leem kunnen in verschillende verhoudingen voorkomen en karakteriseren zo de leemsoort. Wanneer klei de dominante grondstof is, wordt de leem een kleiachtige leem genoemd. Deze naamgeving gebeurt op analoge wijze wanneer silt of zand dominant zijn. Verder wordt, afhankelijk van het percentage aan zand, klei of silt, de aarde een magere of rijke leem genoemd [24].

## Klei

Het bestanddeel klei is een grondstof afkomstig van de erosie van verschillende mineralen. De meest voorkomende kleimineralen zijn kaolinit, illiet en montmorilloniet. Deze mineralen bevatten water in de vorm van hydroxylgroepen en zijn gekenmerkt door hun lamellaire en kristallijne structuur. De kleideeltjes kunnen ingedeeld worden op basis van hun vorm in de volgende groepen: vlokken, latten, naalden en zeshoeken. Ook bezitten de kleimineralen uitwisselbare kationen waarvan de hoeveelheid bepalend is voor de druksterkte en bindingskracht van de leem. Andere chemische componenten van klei zijn gehydrateerde ijzeroxides, die de karakteristieke gele of rode kleur van de klei veroorzaken [24], [25].

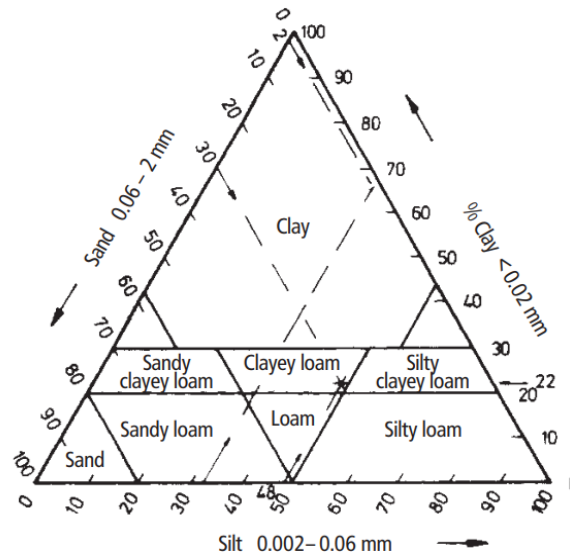
Ook treedt interactie op tussen de kleimineralen en water. Door zwakke Vanderwaalsbindingen ontstaat een hoge aantrekkingskracht tussen de kleimineralen en het polaire water. Deze kleimineralen worden expanderend of zwellend genoemd en kunnen een volumetoename tot 75% veroorzaken. De wateropname door klei is afhankelijk van de waterdampdruk en de temperatuur in de omgeving en is dus vrij omkeerbaar. Zo kan het geadsorbeerde water uit de klei verdreven worden bij temperaturen boven 110 °C. Daarnaast hebben kleideeltjes, door hun plaatvormige structuur, een zeer groot oppervlak in verhouding tot hun volume: gemiddeld verhouden beiden zich met een factor 20. Hoe groter deze verhouding is, hoe meer interactie tussen het klei-oppervlak en de omgeving kan plaatsvinden en hoe belangrijker de rol van het klei-oppervlak wordt [25].

## Silt, zand en grind

De eigenschappen van silt, zand en grind zijn volledig verschillend ten opzichte van die van klei. Deze componenten worden gevormd uit erosie door stenen of erosie door water, waardoor respectievelijk scherpe of afgeronde aggregaten ontstaan. Ten slotte hebben silt, zand en grind geen bindende krachten en fungeren deze voornamelijk als vulmiddel [24].

### 2.2.2 Granulometrie

Het bestanddeel klei wordt gedefinieerd door een korreldiameter kleiner dan 0,002 mm. Daarnaast heeft silt een korreldiameter van 0,002 mm tot 0,06 mm en zand van 0,06 mm tot 2 mm. Alle deeltjes met een korrelgrootte groter dan 2 mm worden gravel genoemd. De korrelverdeling van verschillende leemsoorten kan uitgedrukt worden aan de hand van een zeefkromme en een textuurdriehoek. Een zeefkromme geeft de korreldiameter weer in functie van de procentuele doorval van de zeven met een variërende maaswijdte. Daarnaast geeft een textuurdriehoek op zijn drie assen het percentage weer van het aandeel aan klei, silt en zand. Ten slotte kan dan elke samenstelling en verhouding van deze componenten gevisualiseerd worden door een punt in deze driehoek [24]. De textuurdriehoek is zichtbaar in Figuur 10.



Figuur 10: De textuurdriehoek [24]

### 2.2.3 Fysische eigenschappen

De fysische eigenschappen van leem hangen af van de locatie waar de leem ontgonnen wordt. Zo zijn grindberg-leemsoorten geschikter voor het maken van aangestampte aarde terwijl rivierleem slibrijker zijn. Hierdoor zijn rivierleem zwakker bij samendrukking en minder weerbestendig [24].

De porositeit van leem hangt af van het totaal volume aan poriën in de leem. De vorm van de poriën heeft een invloed op de fysische eigenschappen. Hoe groter de poriën hoe meer dampdiffusie kan plaatsvinden en hoe hoger de weerstand van leem tegen vriezen. Verder zijn de cohesieve krachten van leem afhankelijk van de soortelijke oppervlakte van klei. Deze soortelijke oppervlakte varieert van 10 m<sup>2</sup>/g voor kaoliniet tot 1000 m<sup>2</sup>/g voor montmorilloniet. De cohesieve krachten zorgen voor de binding van de partikels, de druksterkte en de treksterkte. De elasticiteitsmodulus van leem bevindt zich tussen 600 en 850 kg/mm<sup>2</sup>. Tot slot hangt de densiteit van aarde af van de hoeveelheid droog massavolume (poriën inbegrepen). De densiteit van vers gegraven grond bedraagt 1000 tot 1500 kg/m<sup>3</sup>. In de vorm van aangestampte aarde bedraagt de densiteit 1700 tot 2200 kg/m<sup>3</sup> [24].

## 2.3 Technische prestaties leemstenen en leemsteenwanden

In dragende toepassingen is het van groot belang dat het metselwerk een voldoende hoge druksterkte heeft. De druksterkte hangt af van de volgende factoren:

- de kwaliteit van de leemstenen zelf;
- de kwaliteit van het metselwerk (interactie tussen blok, bindingspatroon en mortel);
- de vorm van het metselwerk (geschiktheid voor het overbrengen van de krachten);
- de detaillering van het metselwerk (bescherming tegen vochtigheid);
- de kwaliteit van de uitvoering van het metselwerk [19].

De druksterkte van aardeblokken en aangestampte aardewanden varieert van 0,5 tot 5 N/mm<sup>2</sup>. Zo heeft de Brickette van het bedrijf BC Materials een druksterkte van 2 tot 4 N/mm<sup>2</sup> [26]. Deze druksterkte hangt niet alleen af van de hoeveelheid klei maar ook van de korrelgrootte van het silt, zand en de grotere aggregaten. Ook de bereidingswijze en verdichting hebben een invloed op de druksterkte [24].

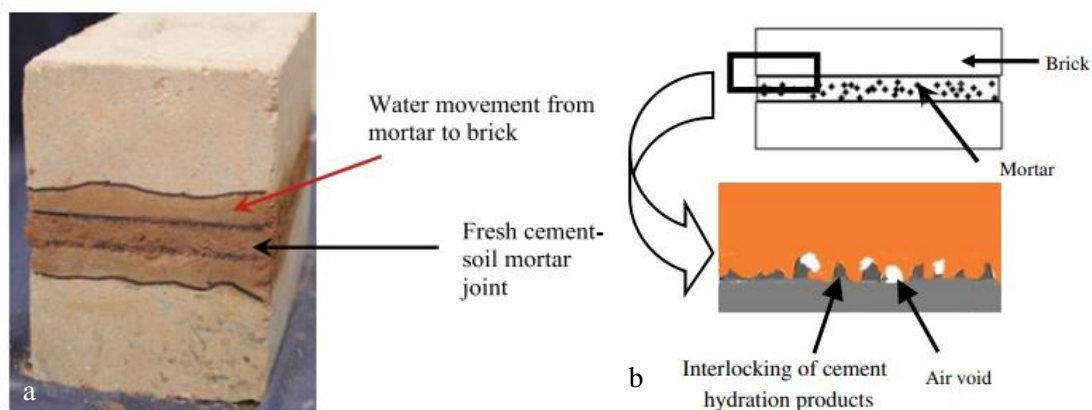
## 2.4 Hechting leemsteen-mortel en demontage

Om het recuperatiepotentieel van leemsteenmetselwerk te bepalen, is het nodig om de demontagecapaciteit van leemstenen te onderzoeken. Die demontagecapaciteit is afhankelijk van de hechting tussen de leemstenen en de mortel. De hechting bepaalt namelijk hoe moeilijk of eenvoudig de leemstenen te demonteren zijn en of de leemstenen al dan niet beschadigd worden tijdens het demontageproces.

### 2.4.1 Hechtingsmechanisme

De hechting tussen leemstenen en een gestabiliseerde mortel kan verklaard worden door twee verschijnselen. Enerzijds vindt een mechanische interlock plaats van de hydratatieproducten van het cement in de poriën van de steen. Anderzijds ontstaat een chemische reactie tussen de pozzolaanrijke materialen in de steen en het vrije calciumhydroxide in de mortel [27].

De hechting door de mechanische interlock treedt op doordat tijdens het metselen de verse mortel, die een hoog gehalte aan waterhoudend cement bevat, in contact komt met het droog of licht verzadigd steenoppervlak. De steen absorbeert dan het water uit de mortel waardoor cementdeeltjes in de poriën van de steen terecht komen. Ten slotte ontstaat dan een mechanische interlock door de uitharding van de hydratatieproducten van de mortel [27]. Dit hechtingsmechanisme is weergegeven in Figuur 11.



Figuur 11: Mechanische interlock tussen steen en mortel, a) vochtabsorptie door steen en b) schematische weergave mechanische interlock [27]

Vervolgens is ook de oppervlaktetextuur van de stenen een invloedrijke factor op de hechtsterkte tussen de mortel en de stenen. Zo zorgt een ruw steenoppervlak voor een betere hechting dan een glad steenoppervlak. Dit verband valt te verklaren door het feit dat de hechting tussen de mortel en de steen deels te wijten is aan de mechanische interlock waarbij de ettringietnaalden uit de mortel zich verankeren in de poriën van de steen. Deze verankering neemt dus beter plaats in een poreus oppervlak. Ook kan de ruwheid in verband gebracht worden met het cementgehalte in de steen: hoe hoger het cementgehalte, hoe minder poreus het steenoppervlak is. De verklaring hiervan is dat het cement een dichte laag vormt over de grond- en zanddeeltjes waardoor het oppervlak gladder wordt [27].

Ten slotte heeft volgens [27] eveneens de waterabsorptie van de steen uit de mortel en de snelheid ervan een invloed op de hechtsterkte tussen beiden. Wanneer de verse mortel met de droge of licht verzadigde steen in contact komt, gebeurt gedurende het eerste uur een snelle absorptie van water door de steen. Hierdoor daalt het water-bindmiddelgehalte van de mortel drastisch. Deze trend stabiliseert zich na ongeveer een uur, ongeacht het initiële vochtgehalte van de steen [27].

## 2.4.2 Te onderzoeken eigenschappen mortel en stenen

Om de hechting tussen de leemstenen en de mortel te kunnen onderzoeken, is het aangewezen de consistentie, het luchtgehalte, de buig- en druksterkte, het vochtgehalte en de capillaire waterabsorptie van de gebruikte mortel te bepalen [27], [28], [29], [30]. Ten eerste wordt de consistentie van de verse mortel beproefd volgens NBN EN 1015-3. Deze flowtest maakt gebruik van een flowtafel en drukt de consistentie van de mortel uit in een flowwaarde [31]. Het luchtgehalte van de verse mortel wordt bepaald conform NBN EN 1015-7, waarbij gebruik gemaakt wordt van een drukkamer met drukmeter of de alcoholmethode [32]. Vervolgens wordt de buig- en druksterkte van de uitgeharde mortel bepaald volgens NBN EN 1015-11. Deze mortelproefstukken zijn prismatisch met afmetingen 40 mm x 40 mm x 160 mm en dienen een gelijke droogtijd te hebben als de mortel van de uiteindelijke gemetste proefstukken [33]. Ten slotte dienen de mortel en de mengprocedure te voldoen aan NBN EN 998-2 en NBN EN 1015-2 [34], [35].

Naast de morteleigenschappen hebben ook de eigenschappen en prestaties van de stenen een invloed op de hechting tussen beiden. Zo wordt het vochtgehalte, de capillaire opzuiging en de absorptie van de stenen bepaald, om het effect van absorptie op de hechting bij montage en demontage te analyseren. Deze eigenschappen worden bepaald volgens respectievelijk NBN EN 772-10, NBN EN 772-11 en NBN EN 772-21 [36], [37], [38].

## 2.4.3 Invloed van water op hechting

Bij het metselen dient bijzondere aandacht besteed te worden aan het bevochtigen van de stenen. Zo blijkt uit eerder onderzoek dat de bindingssterkte tussen de mortel en de steen met 70% kan toenemen door het bevochtigen van de stenen tot het optimale vochtgehalte. Het bevochtigen van de steen zorgt namelijk voor een betere penetratie van de mortelspecie in het oppervlak van de steen [39]. Dit optimale vochtgehalte is afhankelijk van de combinatie steen-mortel. Wanneer enerzijds de steen te droog is, ontstaat het risico dat er een teveel aan water uit de mortel gezogen wordt waardoor de adhesie tussen de mortel en de steen gereduceerd wordt. Wanneer anderzijds de steen te nat is, dreigt de mortel te drijven op de steen waardoor ook de adhesie vermindert [39].

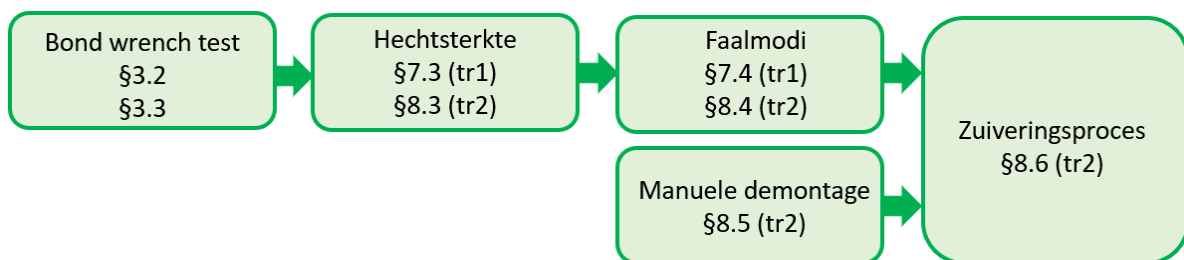
Het bevochtigen van het metselwerk voor de demontage kan mogelijks ook een invloed hebben op het demontageproces. Zo daalt de bindingssterkte tussen de mortel en de steen bij een toenemend vochtgehalte. Deze reductie van de bindingssterkte is een gevolg van het feit dat poriënwaterspanningen ontstaan in de mortel en stenen bij het toevoegen van water. Ook heeft water een invloed op de zwellings- en de vloeibaarheid van ongestabiliseerde klei [39].

### 3 Methodologie

#### 3.1 Doelstelling

De bouwsector wordt actueel geconfronteerd met een ecologische crisis. Om deze crisis aan te pakken, doet de bouwsector onderzoek naar het circulaire potentieel van bouwmaterialen en constructiemethodes. De doelstelling van dit onderzoek is dus het onderzoeken van de demontagecapaciteit van ongebakken leemsteenmetselwerk. Dit wordt geanalyseerd aan de hand van de hechtsterkte van het metselwerk, de resulterende faalmodi, een manuele demontage en het zuiveringsproces van de afzonderlijke stenen. Ook de invloed van water op dit recuperatiepotentieel wordt onderzocht.

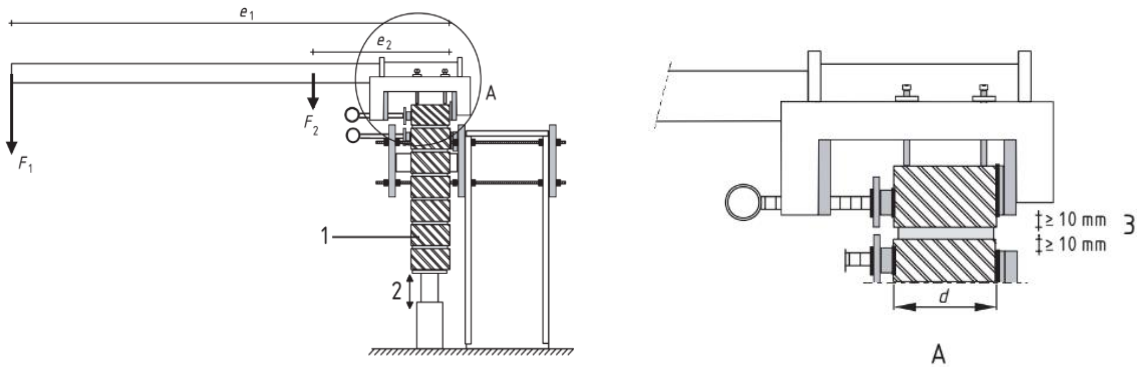
Figuur 12 geeft een grafische weergave van de gehanteerde methodologie binnen dit onderzoek. Ook is een verwijzing zichtbaar naar de paragrafen waarin de betreffende methodes beschreven en geanalyseerd worden. Dit onderzoek wordt uitgevoerd in twee testreeksen. In onderstaande figuur wordt dan ook een onderscheid gemaakt tussen de methodes toegepast in testreeks 1 (tr1) en testreeks 2 (tr2).



Figuur 12: Grafische weergave methodologie

#### 3.2 Bond wrench test

De hechtsterkte van metselwerk wordt bepaald met de bond wrench test aan de hand van NBN EN 1052-5. De proefstukken nodig voor de bond wrench test bestaan uit twee leemstenen die op elkaar gemetseld worden met een mortelspecie. Vervolgens wordt de onderste steen van het proefstuk ingeklemd en wordt op de bovenste steen een klem bevestigd die dienstdoet als hefboom om een buigend moment op het proefstuk uit te oefenen. Dit buigend moment wordt vergroot tot de twee stenen loskomen van elkaar. De karakteristieke waarde, berekend uit de maximale spanningen die de proefstukken bereiken, wordt beschouwd als de hechtsterkte van het metselwerk. De proefopstelling voor de bond wrench test wordt weergegeven in Figuur 13 [30].



Figuur 13: Proefopstelling bond wrench test [30]

De hechtsterkte van de mortel-steenverbinding kan vervolgens bepaald worden aan de hand van formule 1 en 2. De afleiding en verklaring van deze formule worden toegelicht in bijlage A.

$$f_{wi} = \frac{F_1 e_1 + F_2 e_2 - \frac{2}{3} d \left( F_1 + F_2 + \frac{W}{4} \right)}{Z} \quad (1)$$

Waarin  $Z = \frac{bd^2}{6}$  (2)

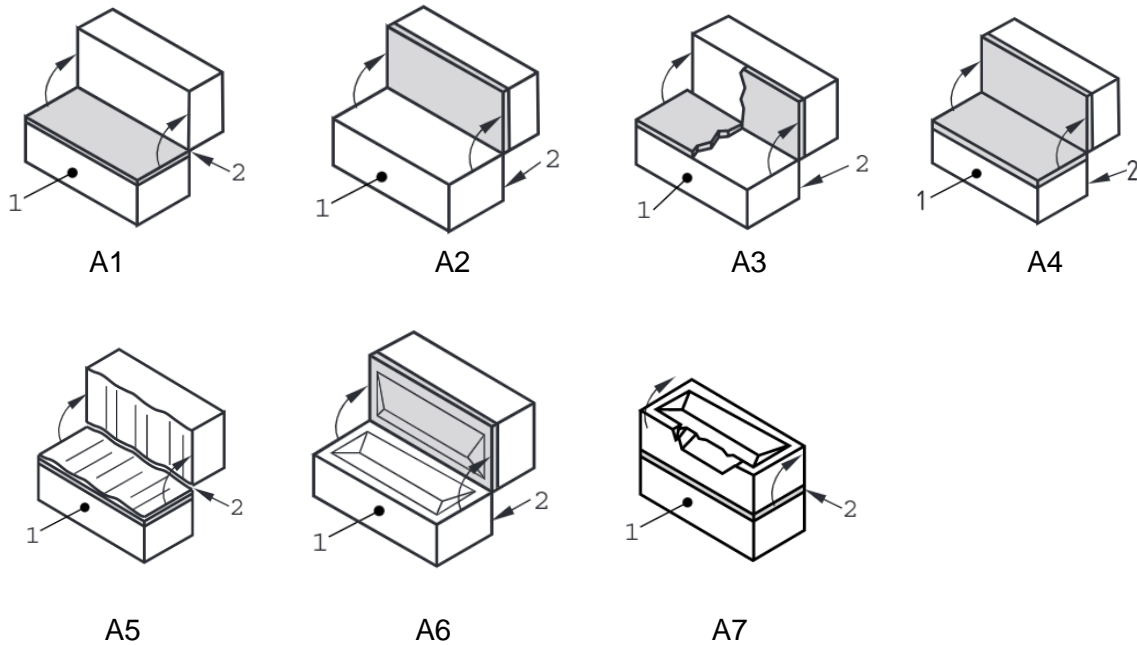
- en
- b gemiddelde breedte van de mortelvoeg in mm;
  - d gemiddelde diepte van het proefstuk in mm;
  - e<sub>1</sub> afstand van de kracht F<sub>1</sub> tot het trekvlak van het proefstuk in mm;
  - e<sub>2</sub> afstand van de kracht F<sub>2</sub> tot het trekvlak van het proefstuk in mm;
  - F<sub>1</sub> aangebrachte kracht in N;
  - F<sub>2</sub> eigengewicht van de klem in N;
  - W gewicht van de afgebroken steen en de aanhangende mortel in N [30].

Na het uitvoeren van de testen kunnen de volgende zeven faalmodi onderscheiden worden zoals weergegeven in Figuur 14:

- A1: breuk op het grensvlak tussen mortel en de bovenste eenheid;
- A2: breuk op het grensvlak tussen mortel en de onderste eenheid;
- A3: breuk op het grensvlak tussen mortel en beide eenheden;
- A4: spanningsbreuk in het mortelbed;
- A5: spanningsbreuk binnen de eenheid nabij het grensvlak;
- A6: breuk op het grensvlak tussen mortel en de onderste eenheid bij frogged steen;
- A7: verbrijzeling/afschuiving van de eenheid die ingeklemd is [30].

De faalmodi A1, A2, A3 en A6 komen voor wanneer de hechtsterkte tussen de mortel en de steen kleiner is dan de treksterkte van de mortel. De breuk treedt dus op ter hoogte van het mortel-steenoppervlak. Verder wordt de faalmodus A4 veroorzaakt wanneer de hechtsterkte tussen de mortel en de steen groter is dan de treksterkte van de mortel. Hierdoor treedt er breuk op in de mortelvoeg. Ten slotte worden de faalmodi A5 en A6 verklaard doordat de hechtsterkte tussen de mortel en de steen samen met de treksterkte van de mortel groter zijn dan de treksterkte van de steen. Hierdoor ontstaat een breuk in de steen.





Figuur 14: Faalmodi na uitvoeren bond wrench test [30]

Op basis van deze faalmodi kan het faalgedrag van het metselwerk gekwalificeerd en geëvalueerd worden. Hoe eenvoudiger de mortel loskomt bij zo min mogelijk beschadiging van de stenen, hoe hoger de demontagecapaciteit van het leemsteenmetselwerk. Het recuperatiepotentieel in functie van de faalmodi zijn in Tabel 1 weergegeven.

Tabel 1: Recuperatiepotentieel aan de hand van faalmodi

gewenst	1 steen mortelvrij	faling in mortel-steenvlak	A1
			A2
			A6
matig	0 stenen mortelvrij	faling in mortelvlak	A3
ongewenst	1 steen kapot	faling in steen	A4
			A5
			A7

Faalmodi A1, A2 en A6 uit Figuur 14 zijn het meest gunstig voor de demontagecapaciteit vermits het proefstuk faalt op het grensvlak tussen de mortel en de stenen en hierdoor minstens één steen mortelvrij komt. Faalmodi A5 en A7 zijn daarentegen het minst gewenst aangezien in deze gevallen de breuk optreedt in de steen waardoor het recuperatiepotentieel van deze steen verloren is. Ook wijzen deze faalmodi op het feit dat de hechting tussen de stenen en mortel sterker is dan de steen zelf, waardoor de mortel zeer moeilijk te verwijderen is van de niet beschadigde steen.

Bij Tabel 1 dient opgemerkt te worden dat faalmodi A1, A2 en A6 met een licht kleurverschil aangeduid worden, terwijl ze even gewenst zijn. Ditzelfde geldt voor faalmodi A5 en A7.

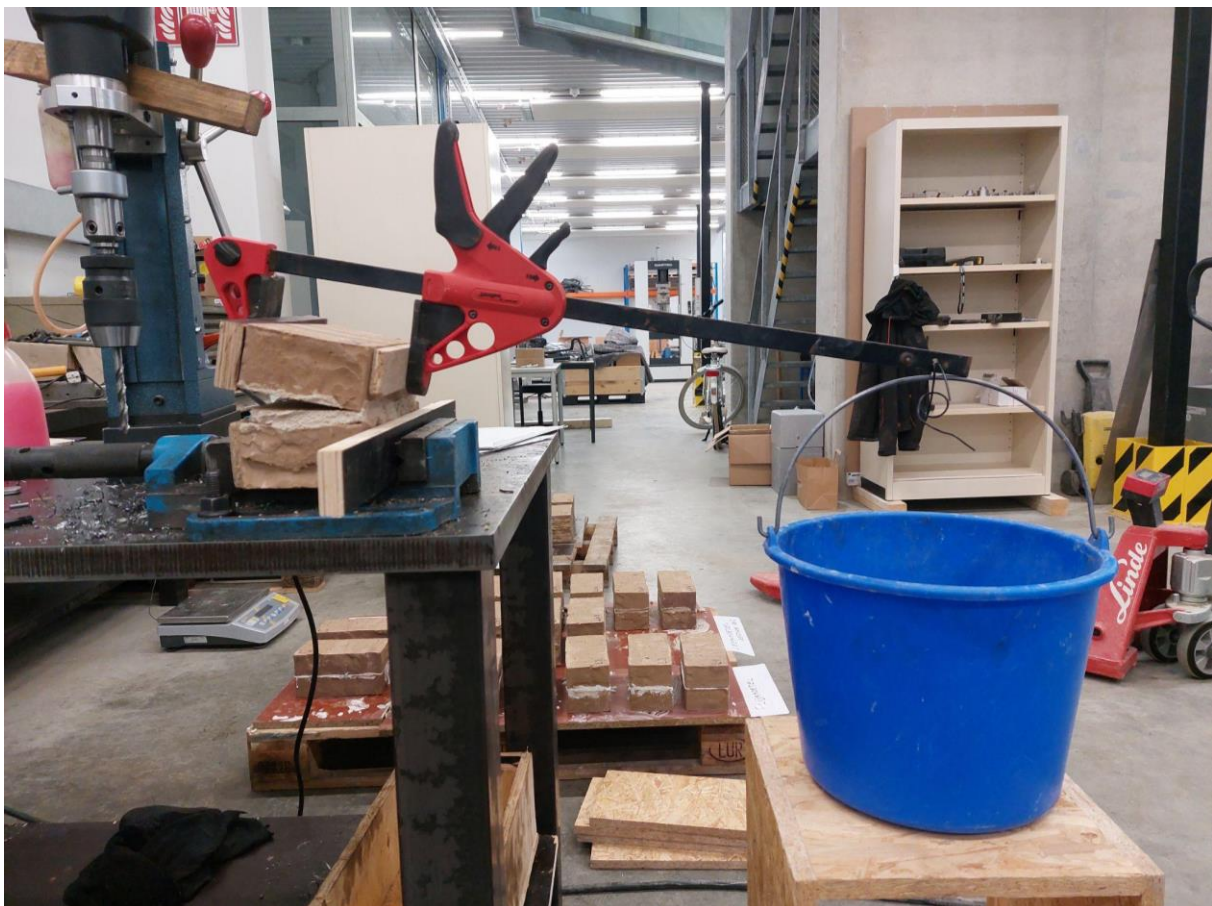


### 3.3 Proefopstelling

Zoals eerder vermeld gebeurt de kwantificering van de hechtsterkte op basis van de bond wrench test. De opstelling van deze test benadert zo goed mogelijk de norm, maar wordt in de exploratiefase vereenvoudigd tot het gebruik van de toen beschikbare materialen.

#### 3.3.1 Proefopstelling exploratiefase

In de exploratiefase wordt de bond wrench test enkel uitgevoerd op de coupletten en dus niet op de muurtjes. Hierbij wordt de onderste steen ingeklemd in een bankschroef en wordt op de bovenste steen een klem bevestigd. Volgens [30] moet de klem een hefboomsarm hebben van minstens 100 cm. Deze klem heeft een hefboomsarm van 65 cm en voldoet hier dus niet aan. Aan het uiteinde van deze klem wordt een emmer bevestigd die tijdens het uitvoeren van de proef gevuld wordt met zand tot het proefstuk faalt. Ten slotte worden houten plaatjes gebruikt om de belastingen van de klem en de bankschroef gelijkmatig te verdelen over de volledige breedte van de stenen. Deze proefopstelling is weergegeven in Figuur 15.



*Figuur 15: Proefopstelling bond wrench test in exploratiefase*

Verder kan op deze figuur waargenomen worden dat de klem enkel aan beide zijanten in contact is met de bovenste steen en deze steen dus niet bovenaan raakt. Dit kan ervoor zorgen dat wanneer de klem lichtjes excentrisch geplaatst wordt en een belasting aangebracht wordt, de klem kan roteren rond zijn contactpunten met de steen waardoor de proefopstelling faalt. Ook dit wijkt af van NBN EN 1052-5 waarin met enkele blokjes tussen de bovenste steen en de klem deze rotatie onmogelijk gemaakt wordt.

### 3.3.2 Proefopstelling testreeks 1 en testreeks 2

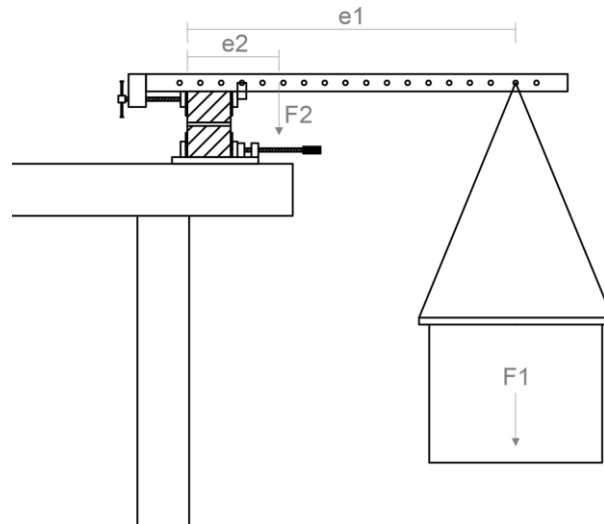
Bij de proefopstelling van testreeks 1 en testreeks 2 wordt een klem gebruikt met een hefboomsarm van 100 cm, zoals voorgeschreven in NBN EN 1052-5. Verder wordt, in de plaats van een kleine emmer, een metselkuip met kettingen opgehangen aan het uiteinde van de klem. Dit omdat een betere hechting en dus een hoger gewicht te verwachten is bij de coupletten bestaande uit VEB's. Ook zijn in deze opstelling houten plaatjes mee ingeklemd om de reactiekrachten van de bankschroef en de klem gelijkmatig te verdelen over de stenen. Figuur 16 visualiseert deze proefopstelling.



*Figuur 16: Proefopstelling bond wrench test testreeks 1 en 2*

Figuur 17 geeft de schematische voorstelling van de proefopstelling weer. Hierop zijn ook de aangrijpende krachten met de respectievelijke excentriciteiten aangeduid.





*Figuur 17: Schematische voorstelling bond wrench test*

Tijdens het beproeven van de combinaties FMEB-M0 en MEB-M0 van testreeks 1 wordt ondervonden dat de voorgaande proefopstelling te zwaar blijkt te zijn. De proefstukken falen bijna allemaal ten gevolge van het eigengewicht van de grote klem. Daarom wordt besloten om vanaf dan alle coupletten gemaakt uit FMEB's en MEB's van testreeks 1 en 2 te beproeven met de kleine klem waaraan een kleine emmer gehangen wordt. Op die manier wordt afgeweken van de genormaliseerde proefopstelling, maar kan wel een meetbaar resultaat waargenomen worden. Deze vereenvoudigde proefopstelling is weergegeven in Figuur 18.



*Figuur 18: Aangepaste proefopstelling (F)MEB's*

## 4 Exploratiefase

De exploratiefase neemt plaats voor de uiteindelijke proeven van deze thesis. In deze fase wordt geëxperimenteerd met reeds beschikbare materialen om een beter overzicht te krijgen van het te onderzoeken onderwerp. Ook zorgt deze fase ervoor dat moeilijkheden tijdens het beproeven op voorhand gedetecteerd kunnen worden waardoor ze bij het uitvoeren van de uiteindelijke relevante proeven geen hinder vormen. Ten slotte kunnen via de resultaten van de exploratiefase de onderzoeksvragen van de scriptie verder toegespitst worden.

### 4.1 Metselen van proefstukken

De stenen die gebruikt worden in de exploratiefase zijn ongebakken kleistenen van de fabrikant Vandersanden. Deze stenen worden geproduceerd op identiek dezelfde wijze als de gebakken kleistenen van Vandersanden, maar worden vlak voor het bakproces uit het productieproces gehaald.

Daarnaast worden verschillende mortels gecombineerd met deze ongebakken kleistenen. Deze mortels met hun samenstellingen zijn in Tabel 2 weergegeven. De leemmortel is afkomstig van het bedrijf BC Materials en de lijmortel is een mortel die gebruikt wordt voor kalk-hennepblokken.

Tabel 2: Samenstelling gebruikte mortels exploratiefase

Ongestabiliseerde leemmortel	Gestabiliseerde leemmortel	Kalkmortel	Lijmmortel
5/6 leemmortel 1/6 water	5/6 leemmortel 1/6 water 10% kalk	3/6 wit rivierzand 2/6 kalk 1/6 water	5/6 lijmortel 1/6 water

Er worden twee types proefstukken gemetseld: enerzijds worden er ‘coupletten’ gemaakt waarbij twee stenen op elkaar gemetseld worden en anderzijds worden kleine muurtjes gemetseld in halfsteensverband van twee stenen breed en drie steenlagen hoog.

De coupletten worden gemetseld met de ongebakken kleistenen van Vandersanden en drie verschillende mortels: de ongestabiliseerde leemmortel, de gestabiliseerde leemmortel en de lijmortel. Van elke kleisteen-mortelcombinatie worden tien proefstukken gemetseld waarvan de markering zichtbaar is in Tabel 3. Daarnaast worden de coupletten weergegeven in Figuur 19.

Tabel 3: Markering coupletten

	Ongestabiliseerde leemmortel	Gestabiliseerde leemmortel	Lijmmortel
Ongebakken kleisteen	LO.1 - LO.10	LG.1 - LG.10	L.1 - L.10



Figuur 19: Coupletten a) ongestabiliseerde leemmortel en b) gestabiliseerde leemmortel en lijm mortel

Verder worden de muurtjes gemetseld met de ongebakken kleistenen van Vandersanden en twee morteltypes: de ongestabiliseerde leemmortel en de kalkmortel. Er worden drie muurtjes gemetseld voor beide kleisteen-mortelcombinaties waarvan de markering zichtbaar is in Tabel 4. Daarnaast worden de muurtjes weergegeven in Figuur 20.

Tabel 4: Markering muurtjes

	Ongestabiliseerde leemmortel	Kalkmortel
Ongebakken kleisteen	A.L.1 A.L.2 A.L.3	A.K.1 A.K.2 A.K.3



Figuur 20: Muurtje a) ongestabiliseerde leemmortel en b) kalkmortel

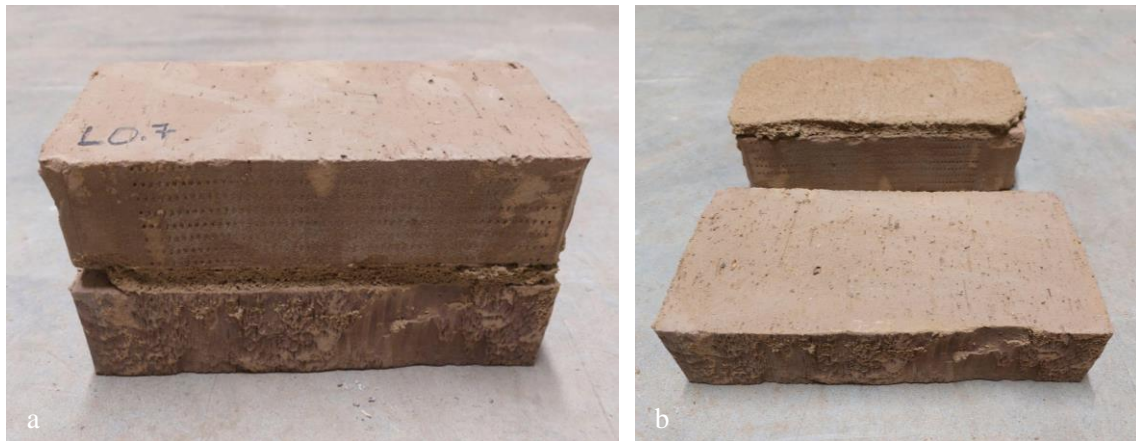
De mortels worden met de hand gemengd in een emmer na het toevoegen van de grondstoffen met een maatcilinder. Vervolgens worden de proefstukken gemetseld. Tijdens het metselen worden de stenen bevochtigd door ze 3 seconden lang 1 centimeter onder te dompelen in een emmer water voor een betere hechting tussen de kleistenen en de mortel.

Na het metsen wordt de genormeerde droogtijd van 28 dagen gerespecteerd voordat de proeven plaatsvinden. De proeven worden uitgevoerd volgens de proefopstelling beschreven in paragraaf 3.3.1.

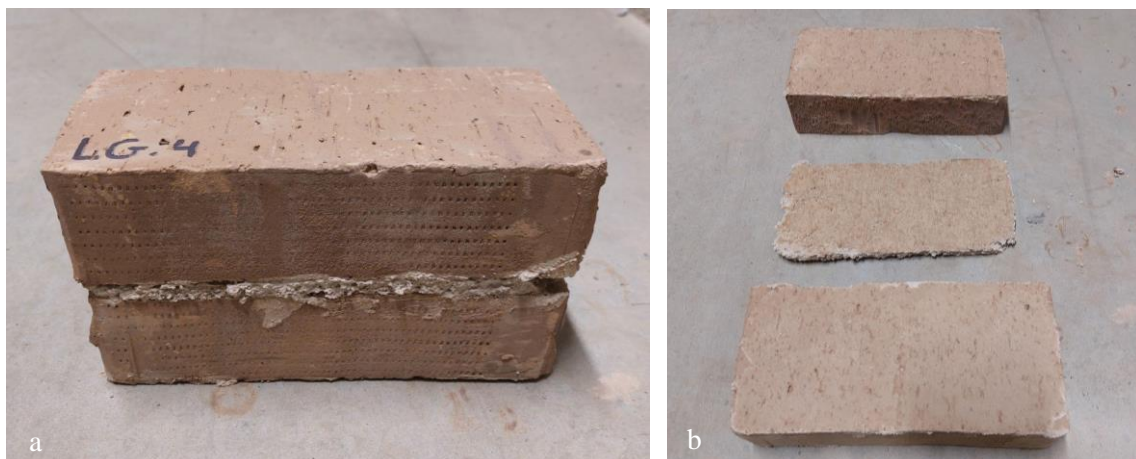


## 4.2 Resultaten exploratiefase

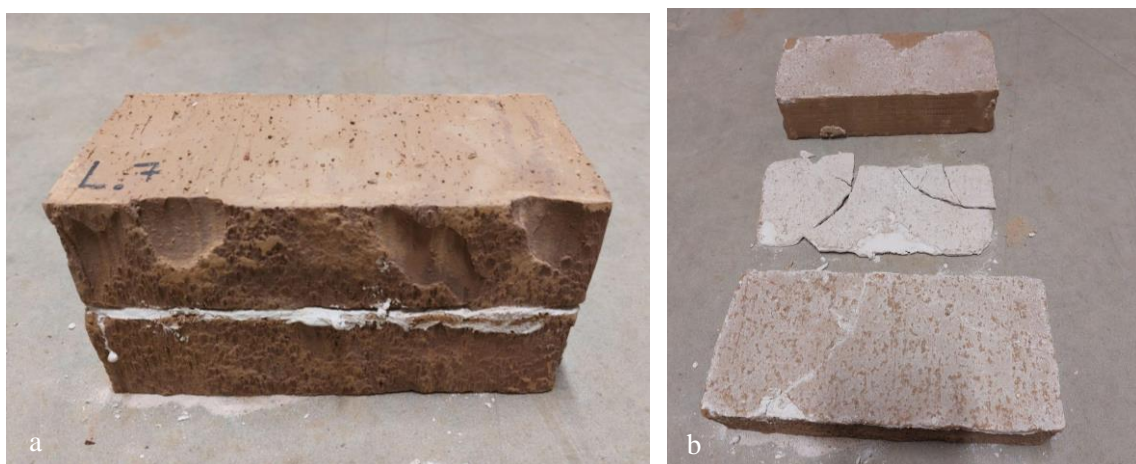
Bij het uitvoeren van de bond wrench test wordt ondervonden dat de hechting tussen de stenen en de gebruikte mortels onmeetbaar klein is. Zo blijkt het eigengewicht van de klem en het hierdoor veroorzaakte moment al te groot te zijn om de hechting tussen de stenen en de mortels te verzekeren. Ook blijkt dat de stenen en de mortel eenvoudig te demonteren zijn met de hand door slechts een kleine inspanning. Enkele resultaten van de gedemonteerde proefstukken zijn in Figuur 21 t.e.m. Figuur 24 weergegeven.



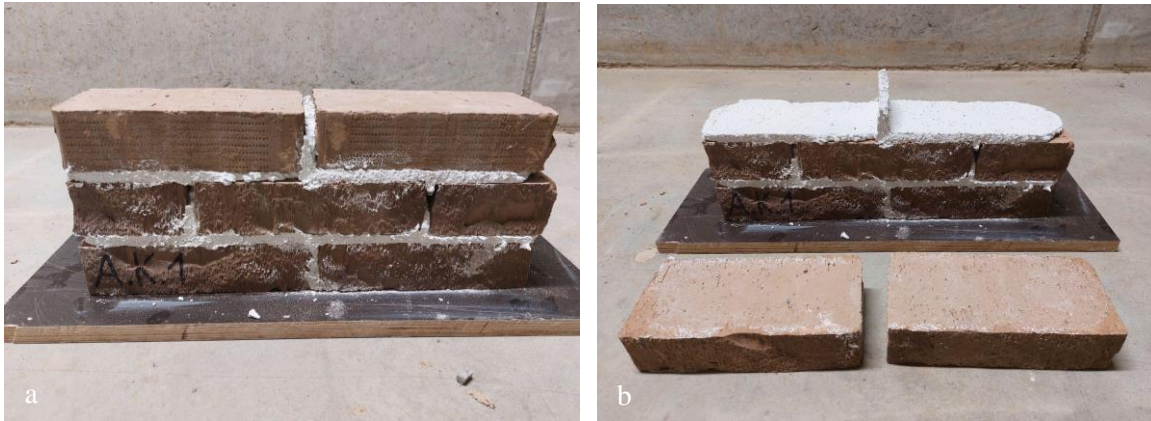
Figuur 21: Proefstuk met ongestabiliseerde leemmortel a) voor demontage en b) na demontage



Figuur 22: Proefstuk met gestabiliseerde leemmortel a) voor demontage en b) na demontage



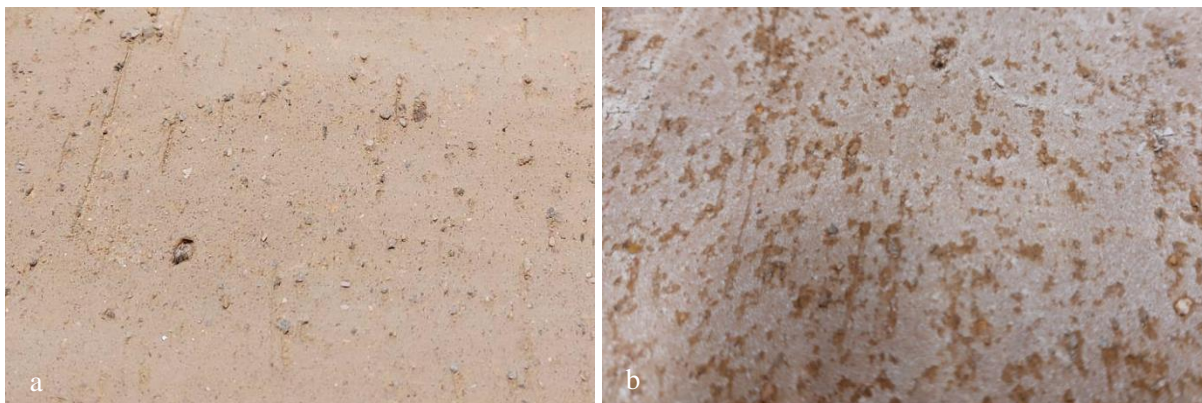
Figuur 23: Proefstuk met lijm mortel a) voor demontage en b) na demontage



Figuur 24: Proefstuk met kalkmortel a) voor demontage en b) na demontage

### 4.3 Discussie exploratiefase

De lage hechtsterkte tussen de kleistenen en de mortels heeft een aantal oorzaken. Ten eerste is het oppervlak van de ongebakken kleistenen zeer vlak en weinig poreus. Dit komt doordat de stenen niet gebakken worden in het productieproces. In een normaal productieproces worden de kleistenen gebakken. Tijdens het bakproces verdwijnt het restvocht en het kristalwater dat chemisch gebonden is aan de klei. Hierdoor verkrijgt de baksteen zijn poreuze structuur. Zo bereiken kleiige bakstenen een maximale porositeit bij temperaturen tussen 850 en 900 °C [40]. Dankzij deze poriën kunnen mortels beter de steen binnendringen en op deze wijze tijdens het uitharden een betere hechting verzekeren. Het ontbreken van voldoende poriën is dus een mogelijke verklaring voor de lage hechtsterkte [27]. Figuur 25 geeft het weinig-poreuze oppervlak weer van enkele proefstukken.



Figuur 25: Hechtingsoppervlak kleisteen met a) ongestabiliseerde leemmortel en b) lijmmortel

Ten tweede werden de stenen onvoldoende bevochtigd tijdens het metselen. Na het onderdompelen van de stenen werd waargenomen dat de stenen na korte tijd een droog oppervlak vertoonden. Dit wil zeggen dat de stenen nog te veel water opnemen om te metselen. Deze wateropname zorgt ervoor dat tijdens het metselen de stenen water van de mortel opnemen waardoor de mortel op het contactvlak kleisteen-mortel uitdroogt en bros wordt. Hierdoor wordt een goede hechting tussen stenen en mortel belemmerd. Deze hoge wateropname is te wijten aan het hoge kleigehalte in de stenen. Er ontstaat namelijk, ten gevolge van zwakke Vanderwaalsbindingen, een sterke aantrekkingskracht tussen kleimineralen en het polaire water. Hierdoor kunnen kleimineralen gemakkelijk en snel water opnemen [25].

## 5 Eigenschappen leemstenen

### 5.1 Vochtgehalte

Het vochtgehalte van de vormstenen (MEB) en de vibro-gecompacteerde stenen (VEB) wordt bepaald volgens NBN EN 772-10 door de stenen te drogen tot constante massa [36]. Hierbij worden de stenen in een oven gedroogd op  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  tot het verschil in massa na een tijdsinterval van 24 uur kleiner is dan 0,2%. Vervolgens wordt het vochtgehalte  $w_s$  berekend. Tot slot worden het gemiddeld vochtgehalte en de standaardafwijking  $\sigma$  berekend voor de MEB's en de VEB's. Het vochtgehalte wordt bepaald voor 6 vormstenen en 12 vibro-gecompacteerde stenen. Een overzicht van de bepaling van het vochtgehalte wordt weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Testresultaten vochtgehalte MEB's en VEB's

	$m_{0,s}$ [g]	$m$ [g]	$m_{dry,s}$ [g]	verschil tussen dag 6 en 7 [%]	$w_s$ [%]	gem. $w_s$ [%]	$\sigma$ [%]
	dag 0	dag 6	dag 7				
MEB1	2939,8	2883,1	2882,9	0,007%	1,97%	1,97%	0,008%
MEB2	2879,1	2824,0	2823,7	0,011%	1,96%		
MEB3	2877,7	2822,2	2821,9	0,011%	1,98%		
MEB4	2856,7	2802,2	2801,7	0,018%	1,96%		
MEB5	2836,3	2782,2	2782,0	0,007%	1,95%		
MEB6	2935,2	2878,6	2878,5	0,003%	1,97%		
VEB1	6975,3	6451,0	6450,8	0,003%	8,13%	7,69%	0,36%
VEB2	6749,2	6280,1	6279,4	0,011%	7,48%		
VEB3	7045,7	6508,6	6507,7	0,014%	8,27%		
VEB4	6965,5	6456,6	6455,7	0,014%	7,90%		
VEB5	6819,2	6349,2	6348,7	0,008%	7,41%		
VEB6	6782,9	6310,6	6309,9	0,011%	7,50%		
VEB7	7055,1	6549,9	6549,2	0,011%	7,72%		
VEB8	7016,0	6484,7	6483,8	0,014%	8,21%		
VEB9	6663,2	6227,4	6226,7	0,011%	7,01%		
VEB10	6939,7	6452,7	6451,9	0,012%	7,56%		
VEB11	6963,6	6473,1	6472,1	0,015%	7,59%		
VEB12	6756,9	6286,7	6286,1	0,010%	7,49%		

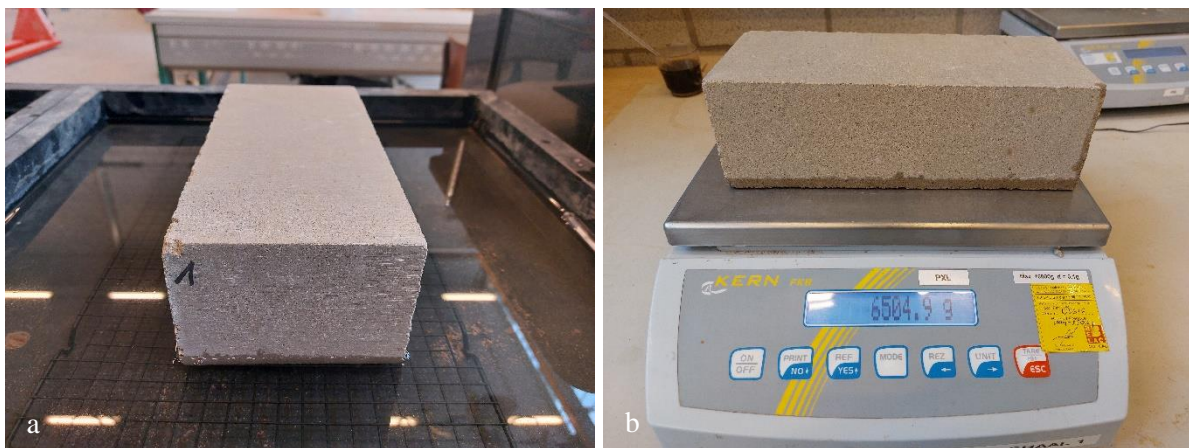
In kolom 5 is zichtbaar dat de metingen op dag 6 en 7 een gewichtsverlies opleveren van minder dan 0,2 % waaruit besloten wordt dat de stenen ovdroog zijn. Het gemiddelde vochtgehalte wordt berekend en bedraagt voor de MEB's 1,97% en voor de VEB's 7,69%. De spreiding is respectievelijk 0,008% en 0,36%. Uit deze resultaten blijkt dat het vochtgehalte van de VEB's gebruikt in deze masterthesis bijna 4 keer hoger ligt dan die van de MEB's. Ten slotte is ook de spreiding aanzienlijk lager en bijna verwaarloosbaar bij de ongestabiliseerde handvormstenen.



## 5.2 Capillaire waterabsorptie

In deze paragraaf wordt de bepaling van de capillaire waterabsorptie aan de hand van NBN EN 772-11 toegelicht [37]. Specifiek wordt de initiële waterabsorptiecoëfficiënt  $c_{w,i}$  van de leemstenen berekend. Dit is een maat voor het gewicht aan water dat een materiaal per oppervlakte-eenheid en per tijdseenheid kan absorberen. Voor de VEB's wordt deze proef uitgevoerd gedurende 1 minuut en 1 seconde, terwijl bij de MEB's dit enkel voor 1 seconde gedaan wordt. Dit om de reden dat de ongestabiliseerde handvormstenen oplossen in water.

Om deze initiële waterabsorptiecoëfficiënt per minuut te bepalen, wordt de steen met het legvlak gedurende 1 minuut in het water geplaatst over een diepte van 5 mm. Deze test is uitgevoerd met zes van de twaalf ovdroge VEB's die beschreven zijn in paragraaf 5.1. De werkwijze wordt getoond in Figuur 26. Op deze figuur is het absorptiefront ook duidelijk zichtbaar.



Figuur 26: Proef capillaire waterabsorptiecoëfficiënt VEB's

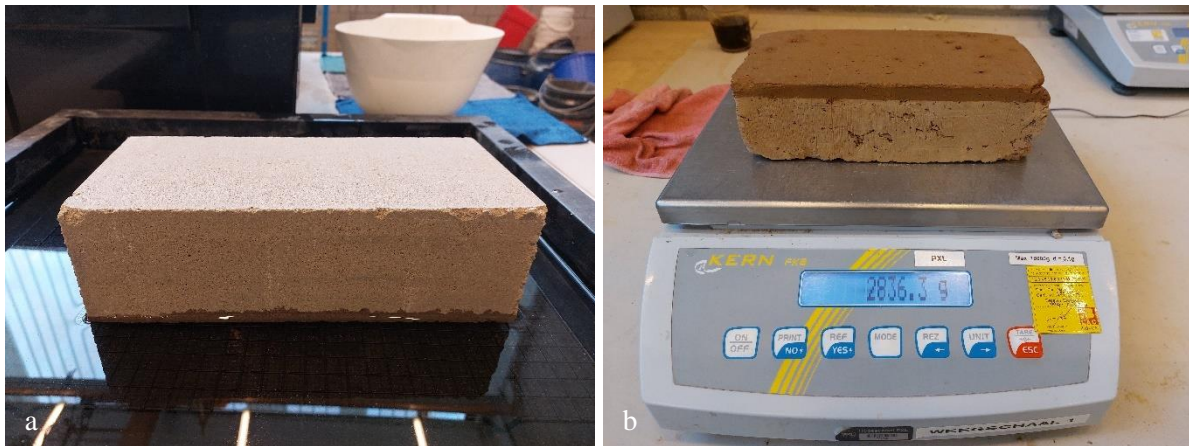
De resultaten van deze proef zijn zichtbaar in Tabel 6. Aan de hand van het droge gewicht  $m_{dry,s}$ , het gewicht na de opzuiging  $m_{so,s}$  en de oppervlakte van het legvlak  $A_s$  van de stenen kan de initiële waterabsorptiecoëfficiënt  $c_{w,i}$  berekend worden. Hiervan wordt ook het gemiddelde en de spreiding  $\sigma$  berekend.

Tabel 6: Testresultaten capillaire waterabsorptiecoëfficiënt per minuut VEB's

	$m_{dry,s}$ [g]	$m_{so,s}$ [g]	$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	$t$ [min]	$c_{w,i}$ [kg/(m <sup>2</sup> min)]	gem. $c_{w,i}$ [kg/(m <sup>2</sup> min)]	$\sigma$ [kg/(m <sup>2</sup> min)]
VEB1	6450,8	6505,1	0,0382	1	1,42	1,88	0,45
VEB2	6279,4	6376,3	0,0381	1	2,54		
VEB3	6507,7	6558,1	0,0382	1	1,32		
VEB4	6455,7	6516,8	0,0382	1	1,60		
VEB5	6348,7	6430,2	0,0382	1	2,13		
VEB6	6309,9	6395,2	0,0381	1	2,24		

Uit deze tabel kan een gemiddelde initiële waterabsorptiecoëfficiënt voor de vibro-gecompacteerde leemstenen van 1,88 kg/(m<sup>2</sup>min) gehaald worden met een spreiding van 0,45 kg/(m<sup>2</sup>min). Daarnaast wordt van de MEB's en VEB's ook de initiële waterabsorptiecoëfficiënt per seconde bepaald. Deze test volgt dezelfde werkwijze als hierboven beschreven, alleen worden de proefstukken nu slechts 1 seconde

gedipt in het water over 5 mm. Deze test is uitgevoerd met de andere zes ovendroge VEB's en de zes ovendroge MEB's die beschreven zijn in paragraaf 5.1. De proef is weergegeven in Figuur 27. Ook is op deze figuur het absorptiefront duidelijk zichtbaar.



Figuur 27: Proef capillaire waterabsorptiecoëfficiënt VEB's en MEB's

De resultaten van deze proef zijn zichtbaar in Tabel 7. De verklaring van de grootheden is dezelfde als die van Tabel 6.

Tabel 7: Testresultaten capillaire waterabsorptiecoëfficiënt per seconde VEB's en MEB's

	$m_{dry,s}$ [g]	$m_{so,s}$ [g]	$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	t [s]	$c_{w,i}$ [kg/(m <sup>2</sup> s)]	gem. $c_{w,i}$ [kg/(m <sup>2</sup> s)]	$\sigma$ [kg/(m <sup>2</sup> s)]
VEB7	6549,2	6563,5	0,0381	1	0,38	0,64	0,24
VEB8	6483,8	6499,6	0,0382	1	0,41		
VEB9	6226,7	6265,9	0,0382	1	1,03		
VEB10	6451,9	6475,3	0,0382	1	0,61		
VEB11	6472,1	6492,3	0,0381	1	0,53		
VEB12	6286,1	6320,4	0,0382	1	0,90		
MEB1	2882,9	2898,9	0,0277	1	0,58	0,57	0,03
MEB2	2823,7	2840,1	0,0269	1	0,61		
MEB3	2821,9	2836,3	0,0270	1	0,53		
MEB4	2801,7	2817,5	0,0272	1	0,58		
MEB5	2782,0	2797,8	0,0266	1	0,59		
MEB6	2878,5	2892,9	0,0271	1	0,53		

Hieruit wordt een gemiddelde initiële waterabsorptiecoëfficiënt voor de VEB's en MEB's van respectievelijk 0,64 kg/(m<sup>2</sup>s) en 0,57 kg/(m<sup>2</sup>s) gehaald. Deze waarden liggen dicht bij elkaar, terwijl geconcludeerd wordt dat de spreiding op de resultaten van de MEB's veel kleiner is, namelijk 0,03 kg/(m<sup>2</sup>s) ten opzichte van 0,24 kg/(m<sup>2</sup>s) bij de VEB's.

### 5.3 Waterabsorptie

De waterabsorptie wordt bepaald volgens NBN EN 772-21 [38]. De waterabsorptie wordt bepaald door ovendroge stenen gedurende 24 uur volledig in water onder te dompelen. Uit het verschil in massa (na 24 uur onderdompeling – ovendroog) wordt de waterabsorptie berekend. Dit gebeurt enkel voor de VEB's vermits die niet mogelijk is voor de MEB's. De MEB's lossen immers op in water na korte onderdompeling. Zes van de twaalf ovendroge VEB's die beschreven zijn in paragraaf 5.1 worden gebruikt.

Om het waterabsorptiegedrag gedurende de eerste 90 minuten in kaart te brengen worden de stenen in korte tijdsintervallen gewogen en terug ondergedompeld. Deze testresultaten zijn zichtbaar in Tabel 8. Daarnaast geeft Figuur 29 het verloop weer van de gemiddelde waterabsorptie van de 6 VEB's.

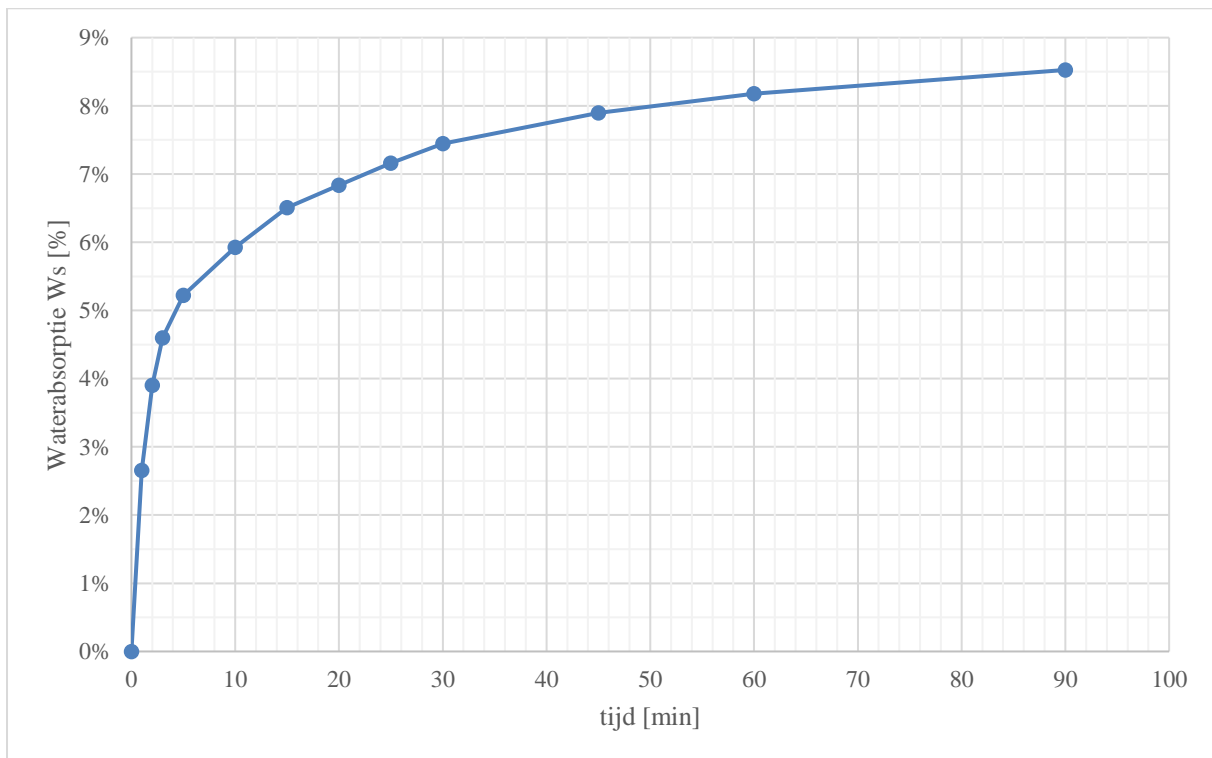
Tabel 8: Testresultaten waterabsorptie VEB's

t [min]	W <sub>s</sub> [%]						
	1	2	3	5	10	15	20
VEB7	1,71%	2,76%	3,40%	3,93%	4,50%	4,98%	5,33%
VEB8	1,82%	2,78%	3,35%	3,87%	4,46%	4,99%	5,19%
VEB9	5,18%	6,95%	7,89%	8,80%	9,81%	10,61%	11,11%
VEB10	1,89%	2,86%	3,53%	4,15%	4,84%	5,42%	5,83%
VEB11	1,83%	3,09%	3,79%	4,37%	5,02%	5,61%	5,79%
VEB12	3,50%	4,95%	5,63%	6,21%	6,90%	7,44%	7,76%
gem. W <sub>s</sub> [%]	<b>2,65%</b>	<b>3,90%</b>	<b>4,60%</b>	<b>5,22%</b>	<b>5,92%</b>	<b>6,51%</b>	<b>6,83%</b>
t [min]	W <sub>s</sub> [%]						
	25	30	45	60	90	24 uur	
VEB7	5,62%	5,88%	6,31%	6,62%	7,05%	8,76%	
VEB8	5,43%	5,65%	6,01%	6,30%	6,72%	7,66%	
VEB9	11,53%	11,90%	12,53%	12,75%	12,76%	13,17%	
VEB10	6,20%	6,55%	7,04%	7,38%	7,84%	8,62%	
VEB11	6,12%	6,42%	6,86%	7,15%	7,59%	8,39%	
VEB12	8,05%	8,28%	8,63%	8,87%	9,20%	11,33%	
gem. W <sub>s</sub> [%]	<b>7,16%</b>	<b>7,45%</b>	<b>7,90%</b>	<b>8,18%</b>	<b>8,53%</b>	<b>9,65%</b>	

Uit bovenstaande tabel zijn afwijkende absorptiewaardes waarneembaar van proefstuk VEB9 en VEB12. Dit is mogelijks te wijten aan een afwijking in de productiesamenstelling van deze stenen. Zo is in beide stenen een houtachtig materiaal zichtbaar aan de zijkant, zoals weergegeven in Figuur 28. Dit houtachtig materiaal is volledig uitgedroogd tijdens het droogproces in de oven en neemt daarna bij onderdompeling in water onmiddellijk zeer veel water op. Hierdoor stijgt de hoeveelheid geabsorbeerd water van de steen sneller dan bij de andere proefstukken.



Figuur 28: Afwijking a) VEB9 en b) VEB12



Figuur 29: Waterabsorptie VEB's gedurende 90 minuten

Figuur 29 toont dat de waterabsorptie van de vibro-gecompacteerde leemstenen parabolisch verloopt. Zo stijgt gedurende de eerste 10 minuten de waterabsorptie tot 5,92%, terwijl in de volgende 80 minuten de waterabsorptie stijgt tot slechts 8,53%. Daarnaast bedraagt de waterabsorptie na 24 uur 9,65%. Aan de hand van deze resultaten kan dus geconcludeerd worden dat de waterabsorptie van vibro-gecompacteerde leemstenen asymptotisch verloopt tot een waarde van ongeveer 10%.

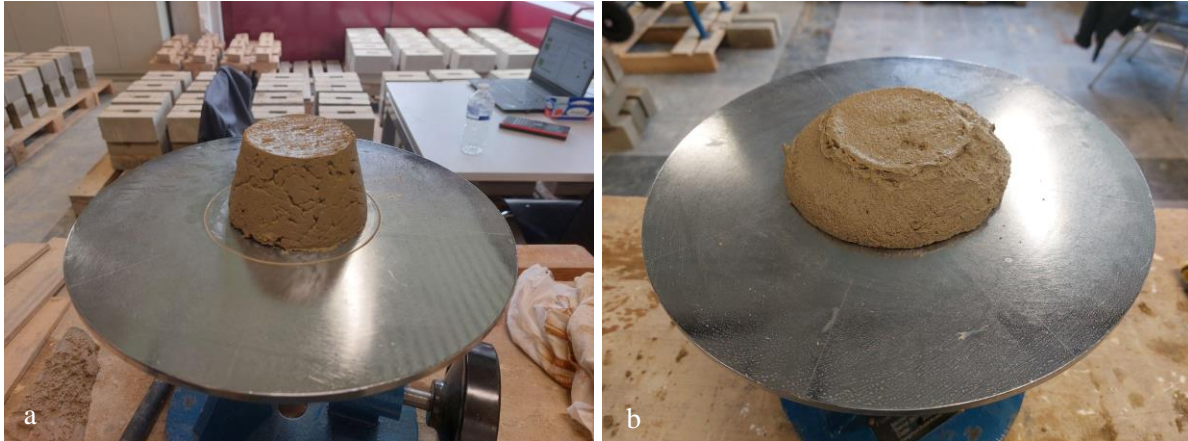




## 6 Eigenschappen mortel

### 6.1 Consistentie

De consistentie van de mortel is een maat voor de verwerkbaarheid van verse metselmortel en wordt bepaald volgens NBN EN 1015-3 aan de hand van de flow table test [31]. In Figuur 30 is het verloop van deze test zichtbaar. Daarnaast geeft Tabel 9 de resultaten weer van de flowwaarde van de vier gebruikte mortels.



Figuur 30: Flow test sodiumsilicaat gestabiliseerde leemmortel

Tabel 9: Resultaten flow test

	d1 [mm]	d2 [mm]	flow
M0	139	141	140
M8	172	172	172
SS	112	109	111
EG	136	136	136

In Tabel 9 is een lage flowwaarde van 111 weergegeven voor de met sodiumsilicaat gestabiliseerde leemmortel. Dit is te wijten aan het sodiumsilicaat dat ervoor zorgt dat de leemmortel zeer snel verhardt. Ten slotte dient opgemerkt te worden dat bij de flowtest van lijm mortel een deel van de mortel aan de mal is blijven plakken door het zuigend karakter van de mortel. Hierdoor bevat de kegelvorm minder mortel en is de uiteindelijke flowwaarde van 136 vermoedelijk lager dan de werkelijke flowwaarde van de lijm mortel.

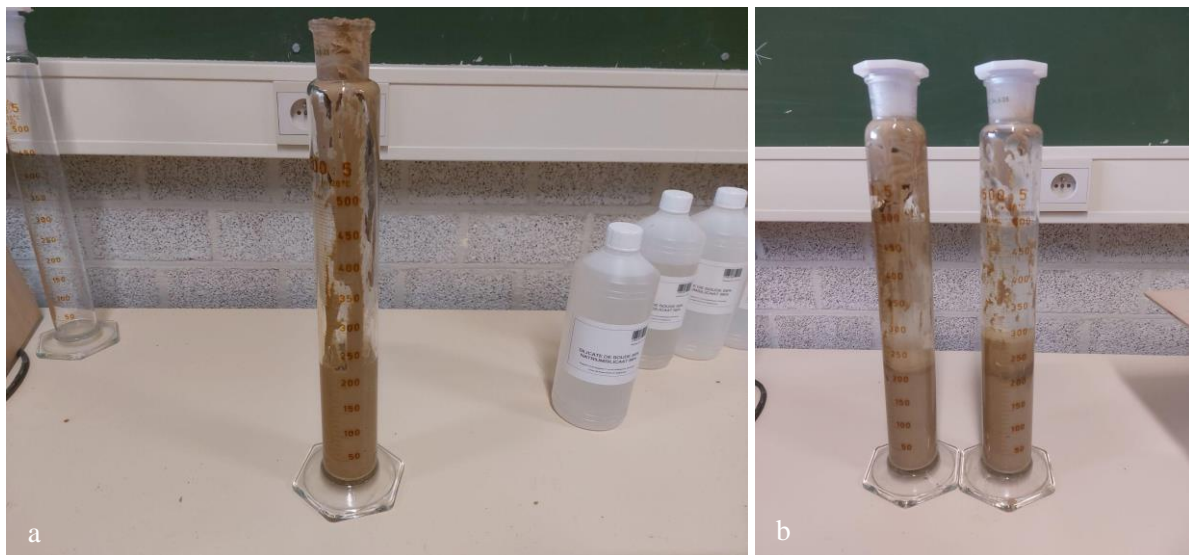
### 6.2 Luchtgehalte

Het luchtgehalte van verse mortel wordt bepaald aan de hand van NBN EN 1015-7. Deze test kan uitgevoerd worden aan de hand van de druktest (methode A, voor luchtgehaltes lager dan 20%) en een alcoholtest (methode B, voor luchtgehaltes hoger dan 20%) [32]. Doordat het genormeerde apparaat met betrekking tot methode A niet ter beschikking was, is de alcoholtest gebruikt om het luchtgehalte van de mortels te bepalen.

Bij het bepalen van het luchtgehalte van de mortels met behulp van de alcoholtest worden er twee problemen vastgesteld waardoor het luchtgehalte niet bepaald kon worden. Ten eerste is er geen

wijziging in volume waar te nemen na het toevoegen van het alcohol-watmengsel. Dit betekent dat vermoedelijk het luchtgehalte in de geteste mortels te laag is om de alcoholtest uit te voeren. Deze oorzaak kan gestaafd worden met het onderzoek uit [41] waarin een luchtgehalte van 3% bepaald werd voor gestabiliseerde en ongestabiliseerde aardmortels. Ten tweede blijft er mortel aan de wanden van de maatcilinder kleven wanneer deze gevuld wordt met mortel. Hierdoor komt deze mortel niet onderaan in de maatcilinder terecht en kan deze mortel dus ook niet in rekening gebracht worden bij het aflezen van het volume, dat tot op 1 ml nauwkeurig moet gebeuren. Wanneer in een volgende fase de alcohol toegevoegd wordt en de maatcilinder geschud wordt, komt de mortel los van de wanden en zorgt dit dus voor een volumetoename in plaats van volumeafname.

Figuur 31 visualiseert het probleem van de mortel die aan de cilinderwanden blijft hangen.



*Figuur 31: Test luchtgehalte van mortel a) voor toevoegen van alcohol en b) na toevoegen van alcohol*

### 6.3 Buig -en druksterkte

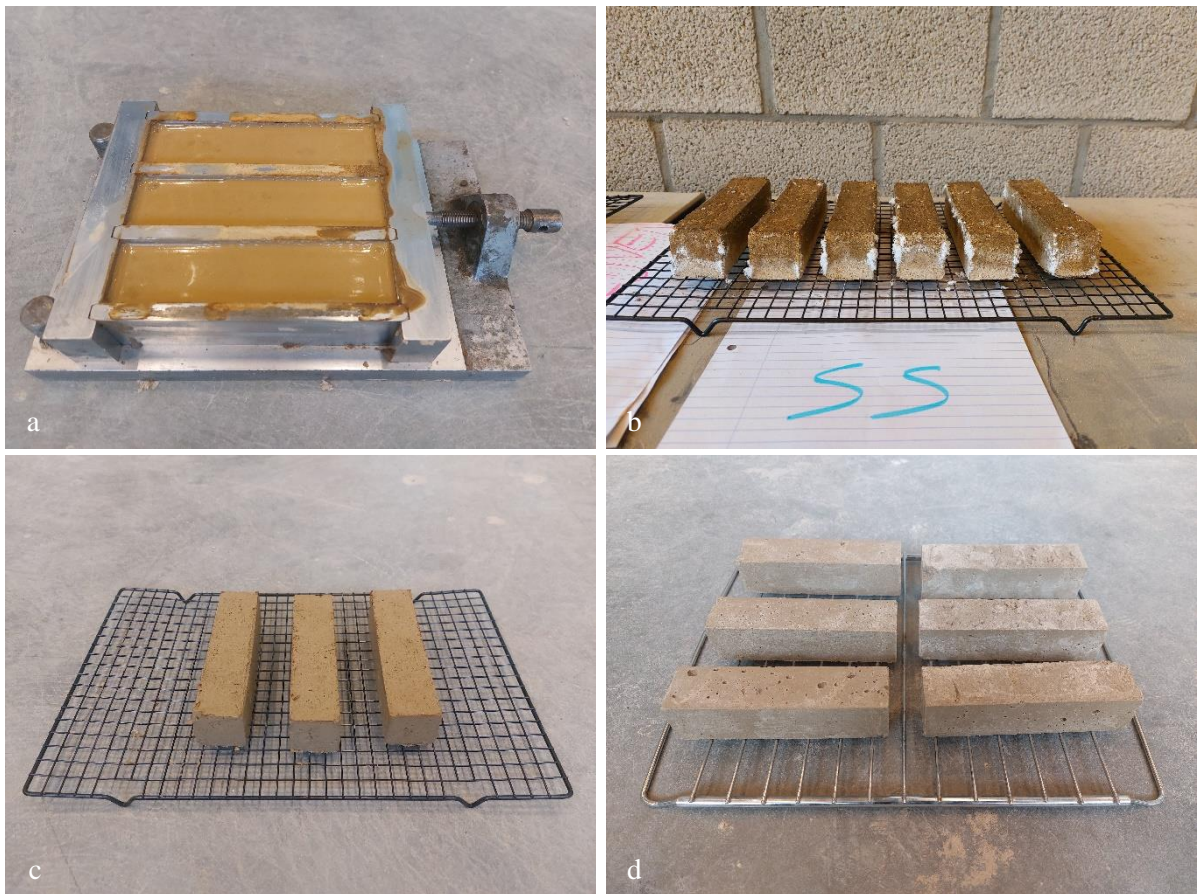
De buig- en druksterkte van de mortels worden bepaald volgens NBN EN 1015-11. Deze norm schrijft prismatische (balkvormige) mortelproefstukken voor van 160 mm x 40 mm x 40 mm die in genormeerde mallen vervaardigd worden [33]. De hiervoor gebruikte mortel wordt voorbereid in batches van 2 kg droge mortel volgens NBN EN 1015-2 en gemengd volgens de gestandaardiseerde mortelmixer die beschreven staat in NBN EN 196-1 [35], [42]. Van elke mortel worden drie mortelbalkjes gemaakt om de buig- en druksterkte te bepalen.

In Figuur 32 zijn de verse mortelbalkjes zichtbaar. Alle mortelbalkjes worden bedekt met een PE-folie om te snelle uitdroging aan de bovenzijde die zorgt voor scheurtjes te vermijden. De proefstukken met cement gestabiliseerde mortel worden, zoals beschreven in NBN EN 1015-11, volledig afgesloten in een PE-zak. Na enkele dagen worden de PE-zakjes verwijderd zodat de proefstukken verder kunnen drogen. De deels verharde proefstukken zijn zichtbaar in Figuur 33. Hierbij wordt na enkele dagen ondervonden dat de leemlijmmortel deels uit de mallen is gestroomd en er zich een waterlaagje vormt boven op de balkjes. Er wordt dus besloten dat deze drie balkjes, die zichtbaar zijn in Figuur 33, niet verder bruikbaar zijn voor beproevingen.





Figuur 32: Verse mortelbalkjes afgedekt of ingepakt met PE-folie



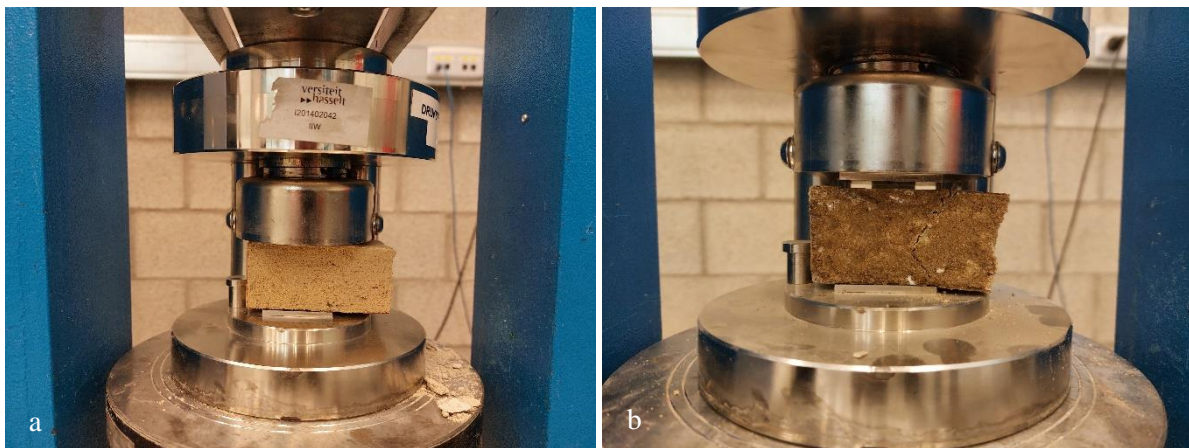
Figuur 33: Proefstukken mortelbalkjes a) mortel EG, b) mortel SS, c) mortel M0 en d) mortel M8



Na een droogtijd van 28 dagen wordt volgens NBN EN 1015-11 de buig- en druksterkte bepaald. Eerst wordt de buigsterkte van de mortel getest op basis van een driepuntbuigproef, die ter illustratie weergegeven is in Figuur 34. De balkjes breken hierbij door twee, waarna elke helft onder een drukpers geplaatst wordt om vervolgens de druksterkte van de mortel te bepalen. Deze test is zichtbaar in Figuur 35. Alle proefstukken na beide testen zijn terug te vinden in Figuur 36, waarop ook de breuk- en faalpatronen duidelijk zichtbaar zijn.



Figuur 34: Driepuntbuigproef van a) proefstuk M8 voor faling en b) proefstuk SS na faling



Figuur 35: Drukproef van a) proefstuk M0 voor faling en b) proefstuk SS na faling



Figuur 36: Schadepatronen a) na buigproef en b) na buig- en drukproef

De resultaten van beide testen zijn zichtbaar in Tabel 10. Per proefstuk is hierin de buig- en druksterkte zichtbaar, alsook een gemiddelde sterkte en standaardafwijking per mortel. De gedetailleerde resultaten zijn terug te vinden in bijlage B. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de buigsterkte van alle cement-gestabiliseerde en twee van de sodiumsilicaat-gestabiliseerde mortelbalkjes onmeetbaar klein blijken te zijn waardoor hier geen resultaten van zichtbaar zijn in de tabel. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat tijdens het bepalen van de juiste flowwaarde, deze flowtest verschillende keren uitgevoerd dient te worden. Cement en sodiumsilicaat beginnen snel aan het uithardingsproces en hun binding met leem wordt verzwakt door het afwisselend stil te laten staan en weer te mengen.

Tabel 10: Resultaten buig- en druksterktes mortelbalkjes

Buigsterkte fb				Druksterkte fc			
Markering	fb [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. fb [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]	Markering	fc [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. fc [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
M0-1	1,62	1,57	0,12	M0-1.1	3,11	2,91	0,27
				M0-1.2	2,94		
M0-2	1,69			M0-2.1	2,98		
				M0-2.2	2,53		
M0-3	1,40			M0-3.1	2,83		
				M0-3.2	3,07		
M8-1	/	/	/	M8-1.1	0,61	0,58	0,05
M8-2	/			M8-1.2	0,57		
				M8-2.1	0,56		
M8-3	/			M8-2.2	0,64		
				M8-3.1	0,59		
SS-1	1,26			M8-3.2	0,53		
		SS-1.1	0,59	0,71	0,08		
SS-2	/	SS-1.2	0,75				
		SS-2.1	0,75				
SS-3	/	SS-2.2	0,73				
		SS-3.1	0,75				
		SS-3.2	0,71				

Uit bovenstaande tabel kan besloten worden dat de ongestabiliseerde mortel veruit de hoogste druksterkte heeft van 2,91 N/mm<sup>2</sup>. De druksterkte van cement-gestabiliseerde mortel blijkt het laagst te zijn met 0,58 N/mm<sup>2</sup>. Deze waarde ligt iets lager dan die van sodiumsilicaat-gestabiliseerde mortel met een druksterkte van 0,71 N/mm<sup>2</sup>. Verder is op te merken dat de mortels M8 en SS een zeer lage spreiding kennen van respectievelijk 0,05 N/mm<sup>2</sup> en 0,08 N/mm<sup>2</sup>. Daarnaast is zichtbaar in deze tabel dat de ongestabiliseerde leemmortel een buigsterkte heeft van 1,57 N/mm<sup>2</sup> met een spreiding van 0,12 N/mm<sup>2</sup>. De lagere buigsterkte van proefstuk M0-3 van 1,40 N/mm<sup>2</sup> is mogelijkst te verklaren door het feit dat dit proefstuk doorgescheurd werd tijdens het droogproces waardoor het resterende deel van het balkje niet perfect onder de buigpers geplaatst kon worden. De buigsterkte van de twee gestabiliseerde mortels blijkt onmeetbaar klein te zijn. In overeenstemming met [43], kan wel besloten worden dat de buigsterkte van de mortels toeneemt met een stijgende druksterkte.



## 7 Testreeks 1: hechtsterkte na 7 dagen

Na de exploratiefase volgen de uiteindelijke testfases, die opgedeeld worden in twee reeksen. In de eerste reeks worden verschillende proefstukken gemetseld en gedemonteerd bij verschillende watergehaltes om zo een bereik af te bakenen waarin het optimale watergehalte van de stenen bij montage en demontage zich bevindt.

### 7.1 Metselen van proefstukken

In deze testreeks worden proefstukken vervaardigd met drie verschillende stenen: met cement (4%) gestabiliseerde vibro-gecompacteerde leemstenen (VEB4), ongestabiliseerde solide vormleemstenen (MEB) en ongestabiliseerde frogged vormleemstenen (FMEB). De vibro-gecompacteerde leemstenen hebben afmetingen van 290 mm x 125 mm x 90 mm, de frogged handvormstenen zijn 240 mm x 110 mm x 70 mm en de solide handvormstenen zijn 220 mm x 100 mm x 70 mm. Al deze leemstenen zijn afkomstig van BC Materials, maar zijn nog niet op de markt gebracht omwille van nog in de toekomst geplande optimalisatie van de samenstelling en de vormvastheid. De gebruikte stenen worden in onderstaande Figuur 37 weergegeven.



*Figuur 37: a) vibro-gecompacteerde leemsteen, b) solide vormsteen en c) frogged vormsteen*

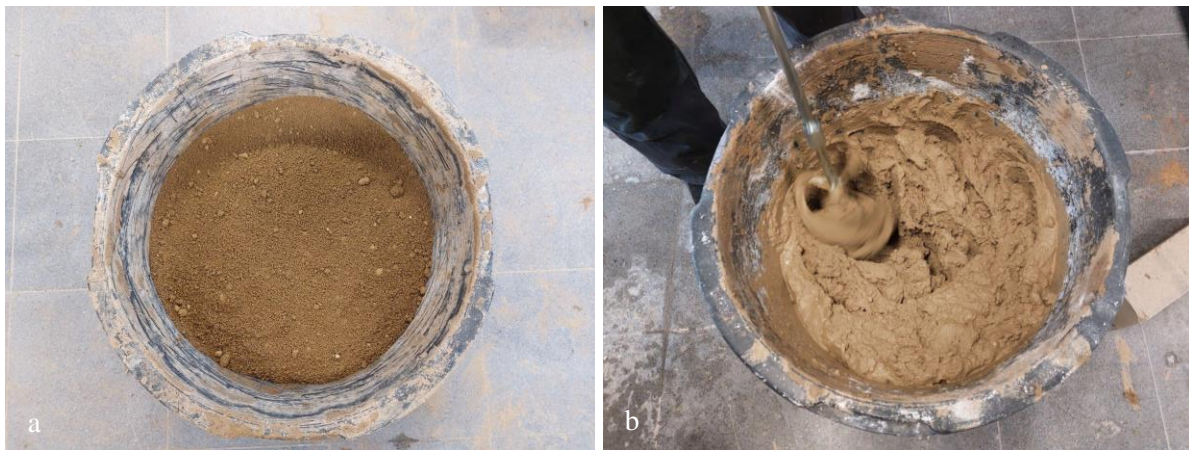
Naast deze stenen is de leemmortel van BC Materials en de leemlijmmortel van CLAYTEC gebruikt om de proefstukken in deze eerste testreeks te vervaardigen. De leemmortel is ongestabiliseerd en gestabiliseerd met cement of sodiumsilicaat toegepast. De samenstellingen van deze mortels zijn zichtbaar in Tabel 11.

De leemmortels worden in batches van 20 kg droge leemmortel voorbereid en de leemlijmmortel in batches van 5 kg droge lijmortel. Deze mortels worden na het toevoegen van eventuele stabilisatoren en water 10 minuten gemixt met een staafmixer in een metselkuip. Dit mengproces kan variëren aangezien het niet geautomatiseerd gebeurt. De droge leemmortel, de leemlijmmortel, de stabilisatoren en het mengproces worden weergegeven in Figuur 38 en Figuur 39.



Tabel 11: Samenstelling gebruikte mortels testreeks 1

Mortel		Samenstelling
Ongestabiliseerde leemmortel	M0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 kg droge leemmortel</li> <li>• 4 l water</li> </ul>
Gestabiliseerde leemmortel met cement	M8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 kg droge leemmortel</li> <li>• 1,6 kg (+8%) cement CEM II/B-LL 42,5 N</li> <li>• 5 l water</li> </ul>
Gestabiliseerde leemmortel met sodiumsilycaat	SS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 kg droge leemmortel</li> <li>• 2,0 kg sodiumsilycaat (36%-oplossing)</li> <li>• 2,6 l water</li> </ul>
Lijmmortel	EG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 kg droge lijmmortel</li> <li>• 1,6 l water</li> </ul>



Figuur 38: a) droge leemmortel en b) mengproces



Figuur 39: a) sodiumsilycaat, b) leemlijmmortel en c) CEM II/B-LL 42,5 N

Door vervolgens de vier mortels te combineren met de drie soorten stenen kan een matrix opgesteld worden zoals zichtbaar is in Tabel 12. Deze matrix geeft de verschillende steen-mortelcombinaties weer waarvan coupletten gemetst worden. In totaal worden er 162 proefstukken vervaardigd voor deze eerste reeks proeven.



Tabel 12: Combinatiematrix testreeks 1

	MEB	FMEB	VEB4
M0	MEB-M0 totaal: 9	FMEB-M0 totaal: 9	VEB4-M0 totaal: 18
M8	MEB-M8 totaal: 9	FMEB-M8 totaal: 9	VEB4-M8 totaal: 42
SS	/	/	VEB4-SS totaal: 33
EG	/	/	VEB4-EG totaal: 33

Binnen éénzelfde combinatie wordt vervolgens een onderscheid gemaakt in voordruk en onderdompelingstijd bij zowel montage als demontage om zo de invloed hiervan op de hechtsterkte te onderzoeken. Ook worden van elke specifieke combinatie drie proestukken vervaardigd om zo de spreiding en nauwkeurigheid van de resultaten in rekening te brengen. Volgens [30] dient elk proefstuk onmiddellijk na het metselen voorbelast te worden door een druk gelegen tussen 0,002 N/mm<sup>2</sup> en 0,005 N/mm<sup>2</sup>. Voor de coupletten vervaardigd uit de VEB's komt dit overeen met een voorbelasting van twee extra VEB's of één snelbouwsteen uit het labo bovenop het couplet. Voor de coupletten vervaardigd uit de (F)MEB's komt dit overeen met een voorbelasting van drie extra (F)MEB's bovenop het couplet.

De gedetailleerde markeringen van de coupletten zijn opgesomd in Tabel 13. Ook is in deze tabel het aantal identieke coupletten en de onderdompelingswijze weergegeven. Hieronder worden nog enkele verduidelijkingen opgesomd.

- v : voorbelasting op proefstuk na het metsen
- 1" legvlak : legvlak van stenen gedurende 1 seconde ondergedompeld (over 5 mm)
- vol. : onderdompeling van de volledige steen



Tabel 13: Markering en verduidelijking coupletten testreeks 1

markering	onderdompeling	aantal
<b>FMEB-M0</b>		
FMEB-M0	/	3
FMEB-M0-v	/	3
FMEB-M0-v-1"	1" legvlak montage	3
		9
<b>MEB-M0</b>		
MEB-M0	/	3
MEB-M0-v	/	3
MEB-M0-v-1"	1" legvlak montage	3
		9
<b>FMEB-M8</b>		
FMEB-M8	/	3
FMEB-M8-v	/	3
FMEB-M8-v-1"	1" legvlak montage	3
		9
<b>MEB-M8</b>		
MEB-M8	/	3
MEB-M8-v	/	3
MEB-M8-v-1"	1" legvlak montage	3
		9
<b>VEB4-M0</b>		
VEB4-M0	/	3
VEB4-M0-v	/	3
VEB4-M0-v-1"	1" legvlak montage	3
VEB4-M0-v-1'	1' vol. montage	3
VEB4-M0-v-5'	5' vol. montage	3
VEB4-M0-v-15'	15' vol. montage	3
		18
<b>VEB4-M8</b>		
VEB4-M8	/	3
VEB4-M8-v-1"	1" legvlak montage	6
VEB4-M8-v-1"-15'	1" legvlak montage + 15' vol. demontage	3
VEB4-M8-v-1"-24	1" legvlak montage + 24h vol. demontage	3
VEB4-M8-v-1'	1' vol. montage	3
VEB4-M8-v-1'-15'	1' vol. montage + 15' vol. demontage	3
VEB4-M8-v-1'-24	1' vol. montage + 24h vol. demontage	3
VEB4-M8-v-5'	5' vol. montage	3
VEB4-M8-v-5'-15'	5' vol. montage + 15' vol. demontage	3
VEB4-M8-v-5'-24	5' vol. montage + 24h vol. demontage	3
VEB4-M8-v-15'	15' vol. montage	3
VEB4-M8-v-15'-15'	15' vol. montage + 15' vol. demontage	3
VEB4-M8-v-15'-24	15' vol. montage + 24h vol. demontage	3
		42

<b>VEB4-EG</b>		
VEB4-EG	/	3
VEB4-EG-v-1"	1" legvlak montage	3
VEB4-EG-v-1'	1' vol. montage	3
VEB4-EG-v-1'-15'	1' vol. montage + 15' vol. demontage	3
VEB4-EG-v-1'-24	1' vol. montage + 24h vol. demontage	3
VEB4-EG-v-5'	5' vol. montage	3
VEB4-EG-v-5'-15'	5' vol. montage + 15' vol. demontage	3
VEB4-EG-v-5'-24	5' vol. montage + 24h vol. demontage	3
VEB4-EG-v-15'	15' vol. montage	3
VEB4-EG-v-15'-15'	15' vol. montage + 15' vol. demontage	3
VEB4-EG-v-15'-24	15' vol. montage + 24h vol. demontage	3
		33
<b>VEB4-SS</b>		
VEB4-SS	/	3
VEB4-SS-v-1"	1" legvlak montage	3
VEB4-SS-v-1'	1' vol. montage	3
VEB4-SS-v-1'-15'	1' vol. montage + 15' vol. demontage	3
VEB4-SS-v-1'-24	1' vol. montage + 24h vol. demontage	3
VEB4-SS-v-5'	5' vol. montage	3
VEB4-SS-v-5'-15'	5' vol. montage + 15' vol. demontage	3
VEB4-SS-v-5'-24	5' vol. montage + 24h vol. demontage	3
VEB4-SS-v-15'	15' vol. montage	3
VEB4-SS-v-15'-15'	15' vol. montage + 15' vol. demontage	3
VEB4-SS-v-15'-24	15' vol. montage + 24h vol. demontage	3
		33
<b>TOTAAL</b>		<b>162</b>

Wel dient opgemerkt te worden dat de notatie van de coupletten uit bovenstaande tabel niet altijd exact overeenkomt met de markeringen op de coupletten die te zien zijn in enkele figuren. Dit is te wijten aan praktische vereenvoudiging en conformiteit in de volledige scriptie. Figuur 40 en Figuur 41 tonen een deel van de vervaardigde proefstukken.



Figuur 40: Gemetste coupletten testreeks 1 (deel 1)



Figuur 41: Gemetste coupletten testreeks 1 (deel 2)

## 7.2 Resultaten testreeks 1

De hechtsterkte van de proefstukken wordt bepaald aan de hand van formule 1 en 2 in paragraaf 3.2. Parameters  $F_1$  en  $W$  volgen uit de bond wrench testen, terwijl de overige parameters afhankelijk zijn van de opstelling van de test en de testcombinatie. Deze parameters zijn weergegeven in Tabel 14.

Tabel 14: Parameters proefopstelling per testcombinatie testreeks 1

parameter	MEB-M0	FMEB-M0	MEB-M8	FMEB-M8	VEB4	eenheid
$F_2$	34,28	34,28	11,21	11,21	34,28	N
$e_1$	935	945	620	620	950	mm
$e_2$	285	285	210	210	265	mm
$d$	100	110	100	110	125	mm
$b$	220	240	220	240	290	mm
$Z$	366667	484000	366667	484000	755208	mm <sup>3</sup>

De resultaten van de bond wrench testen na 7 dagen per leemsteen-mortelcombinatie zijn zichtbaar in Tabel 15 t.e.m. Tabel 20. Per specifiek couplet zijn de faalmodus, de droogtijd, de parameters  $F_1$  en  $W$  en de hechtsterkte weergegeven. Ten slotte is per drie identieke coupletten de gemiddelde hechtsterkte en de spreiding hierop berekend. De hechtsterkte wordt berekend volgens [30] en formule (1). De gedetailleerde resultaten zijn bijgevoegd in bijlage C. De tabellen hieronder geven enkel een overzicht van de belangrijkste resultaten.

Tabel 15: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties MEB-M0 en FMEB-M0

MEB-M0	Faalmode	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
MEB-M0.1	A2	0,0191	/	/
MEB-M0.2	A2	0,0190		
MEB-M0.3	A2	0,0190		
MEB-M0-v.1	A2	0,0191	/	/
MEB-M0-v.2	A2	0,0191		
MEB-M0-v.3	A2	0,0191		
MEB-M0-v-1".1	A2	0,0191	/	/
MEB-M0-v-1".2	A2	0,0191		
MEB-M0-v-1".3	A2	0,0191		
<b>FMEB-M0</b>				
FMEB-M0.1	A6	0,0137	/	/
FMEB-M0.2	A6	0,0137		
FMEB-M0.3	A6	0,0137		
FMEB-M0-v.1	A6	0,0137	/	/
FMEB-M0-v.2	A6	0,0136		
FMEB-M0-v.3	A6	0,0137		
FMEB-M0-v-1".1	A6	0,0137	/	/
FMEB-M0-v-1".2	A6	0,0137		
FMEB-M0-v-1".3	A6	0,0137		

Tabel 16: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties MEB-M8 en FMEB-M8

MEB-M8	Faalmode	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
MEB-M8.1	A2	0,0031	/	/
MEB-M8.2	A2	0,0031		
MEB-M8.3	A2	0,0031		
MEB-M8-v.1	A2	0,0031	/	/
MEB-M8-v.2	A1	0,0033		
MEB-M8-v.3	A2	0,0031		
MEB-M8-v-1".1	A2	0,0031	0,0062	0,0044
MEB-M8-v-1".2	A2	0,0031		
MEB-M8-v-1".3	A3	0,0124		
<b>FMEB-M8</b>				
FMEB-M8.1	A6	0,0019	0,0037	0,0025
FMEB-M8.2	A6	0,0019		
FMEB-M8.3	A2	0,0072		
FMEB-M8-v.1	A6	0,0060	0,0070	0,0017
FMEB-M8-v.2	A1	0,0094		
FMEB-M8-v.3	A6	0,0056		
FMEB-M8-v-1".1	A6	0,0114	0,0085	0,0022
FMEB-M8-v-1".2	A1	0,0083		
FMEB-M8-v-1".3	A6	0,0059		



Tabel 17: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties VEB4-M0

VEB4-M0	Faalmode	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-M0.1	A3	0,0459	0,0512	0,0079
VEB4-M0.2	A1	0,0623		
VEB4-M0.3	A1	0,0453		
VEB4-M0-v.1	A2	0,0666	0,0575	0,0162
VEB4-M0-v.2	A2	0,0712		
VEB4-M0-v.3	A1	0,0347		
VEB4-M0-v-1".1	A2	0,0981	0,1049	0,0089
VEB4-M0-v-1".2	A1	0,1174		
VEB4-M0-v-1".3	A1	0,0992		
VEB4-M0-v-1'.1	A2	0,0638	0,0665	0,0053
VEB4-M0-v-1'.2	A1	0,0739		
VEB4-M0-v-1'.3	A1	0,0619		
VEB4-M0-v-5'.1	A1	0,0346	0,0335	0,0217
VEB4-M0-v-5'.2	A3	0,0596		
VEB4-M0-v-5'.3	A3	0,0064		
VEB4-M0-v-15'.1	A1	0,0065	0,0250	0,0131
VEB4-M0-v-15'.2	A1	0,0343		
VEB4-M0-v-15'.3	A1	0,0342		

Tabel 18: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties VEB4-M8

VEB4-M8	Faalmode	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-M8.1	A1	0,0066	0,0066	0,0000
VEB4-M8.2	A1	0,0066		
VEB4-M8.3	A1	0,0066		
VEB4-M8-v-1".1	A1	0,0555	0,0607	0,0360
VEB4-M8-v-1".2	A1	0,1135		
VEB4-M8-v-1".3	A1	0,0479		
VEB4-M8-v-1".4	A1	0,0658		
VEB4-M8-v-1".5	A1	0,0469		
VEB4-M8-v-1".6	A1	0,0346		
VEB4-M8-v-1"-15'.1	A3	0,0235	0,0311	0,0060
VEB4-M8-v-1"-15'.2	A3	0,0381		
VEB4-M8-v-1"-15'.3	A1	0,0318		
VEB4-M8-v-1"-24.1	A1	0,0610	0,0483	0,0127
VEB4-M8-v-1"-24.2	A1	0,0309		
VEB4-M8-v-1"-24.3	A1	0,0530		
VEB4-M8-v-1'.1	A3	0,0596	0,0745	0,0130
VEB4-M8-v-1'.2	A1	0,0912		
VEB4-M8-v-1'.3	A1	0,0726		
VEB4-M8-v-1'-15'.1	A3	0,0564	0,0875	0,0304
VEB4-M8-v-1'-15'.2	A1	0,1288		
VEB4-M8-v-1'-15'.3	A3	0,0773		
VEB4-M8-v-1'-24.1	A7	0,0859	0,0660	0,0259
VEB4-M8-v-1'-24.2	A3	0,0828		
VEB4-M8-v-1'-24.3	A1	0,0294		
VEB4-M8-v-5'.1	A1	0,0578	0,0696	0,0147
VEB4-M8-v-5'.2	A4	0,0904		
VEB4-M8-v-5'.3	A1	0,0606		
VEB4-M8-v-5'-15'.1	A1	0,0341	0,0433	0,0130
VEB4-M8-v-5'-15'.2	A1	0,0618		
VEB4-M8-v-5'-15'.3	A1	0,0341		
VEB4-M8-v-5'-24.1	A1	0,0886	0,0582	0,0242
VEB4-M8-v-5'-24.2	A1	0,0293		
VEB4-M8-v-5'-24.3	A1	0,0567		
VEB4-M8-v-15'.1	A1	0,0933	0,0798	0,0111
VEB4-M8-v-15'.2	A4	0,0800		
VEB4-M8-v-15'.3	A1	0,0661		
VEB4-M8-v-15'-15'.1	A4	0,0452	0,0515	0,0046
VEB4-M8-v-15'-15'.2	A1	0,0555		
VEB4-M8-v-15'-15'.3	A3	0,0539		
VEB4-M8-v-15'-24.1	A1	0,0811	0,0828	0,0042
VEB4-M8-v-15'-24.2	A1	0,0787		
VEB4-M8-v-15'-24.3	A1	0,0886		



Tabel 19: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties VEB4-EG

VEB4-EG	Faalmode	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-EG.1	A7	0,1443	0,1828	0,0276
VEB4-EG.2	A7	0,2070		
VEB4-EG.3	A7	0,1972		
VEB4-EG-v-1".1	A7	0,2296	0,2142	0,0108
VEB4-EG-v-1".2	A7	0,2066		
VEB4-EG-v-1".3	A7	0,2066		
VEB4-EG-v-1'.1	A7	0,2221	0,2402	0,0262
VEB4-EG-v-1'.2	A7	0,2213		
VEB4-EG-v-1'.3	A7	0,2773		
VEB4-EG-v-1'-15'.1	A3	0,0240	0,0248	0,0011
VEB4-EG-v-1'-15'.2	A1	0,0240		
VEB4-EG-v-1'-15'.3	A3	0,0264		
VEB4-EG-v-1'-24.1	/	0	0,0000	0,0000
VEB4-EG-v-1'-24.2	/	0		
VEB4-EG-v-1'-24.3	/	0		
VEB4-EG-v-5'.1	A4	0,0242	0,0492	0,0182
VEB4-EG-v-5'.2	A4	0,0564		
VEB4-EG-v-5'.3	A4	0,0671		
VEB4-EG-v-5'-15'.1	A4	0,0326	0,0357	0,0085
VEB4-EG-v-5'-15'.2	A4	0,0271		
VEB4-EG-v-5'-15'.3	A4	0,0473		
VEB4-EG-v-5'-24.1	A4	0,0330	0,0321	0,0055
VEB4-EG-v-5'-24.2	A4	0,0383		
VEB4-EG-v-5'-24.3	A4	0,0250		
VEB4-EG-v-15'.1	A4	0,0482	0,0413	0,0121
VEB4-EG-v-15'.2	A5	0,0514		
VEB4-EG-v-15'.3	A4	0,0242		
VEB4-EG-v-15'-15'.1	A4	0,0241	0,0241	0,0000
VEB4-EG-v-15'-15'.2	A2	0,0240		
VEB4-EG-v-15'-15'.3	A4	0,0241		
VEB4-EG-v-15'-24.1	/	0	0,0000	0,0000
VEB4-EG-v-15'-24.2	/	0		
VEB4-EG-v-15'-24.3	/	0		

Tabel 20: Resultaten bond wrench test na 7 dagen combinaties VEB4-SS

VEB4-SS	Faalmode	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-SS.1	A3	0,0528	0,0511	0,0022
VEB4-SS.2	A3	0,0525		
VEB4-SS.3	A4	0,0480		
VEB4-SS-v-1".1	A4	0,0895	0,0882	0,0011
VEB4-SS-v-1".2	A4	0,0396		
VEB4-SS-v-1".3	A3	0,0868		
VEB4-SS-v-1'.1	A4	0,0436	0,0352	0,0078
VEB4-SS-v-1'.2	A2	0,0371		
VEB4-SS-v-1'.3	A1	0,0249		
VEB4-SS-v-1'-15'.1	A3	0,0163	0,0181	0,0013
VEB4-SS-v-1'-15'.2	A3	0,0188		
VEB4-SS-v-1'-15'.3	A3	0,0193		
VEB4-SS-v-1'-24.1	A4	0,0142	0,0094	0,0067
VEB4-SS-v-1'-24.2	/	0		
VEB4-SS-v-1'-24.3	A4	0,0142		
VEB4-SS-v-5'.1	A3	0,0270	0,0358	0,0072
VEB4-SS-v-5'.2	A3	0,0358		
VEB4-SS-v-5'.3	A3	0,0446		
VEB4-SS-v-5'-15'.1	A3	0,0219	0,0226	0,0037
VEB4-SS-v-5'-15'.2	A4	0,0274		
VEB4-SS-v-5'-15'.3	A3	0,0185		
VEB4-SS-v-5'-24.1	A3	0,0143	0,0048	0,0067
VEB4-SS-v-5'-24.2	/	0		
VEB4-SS-v-5'-24.3	/	0		
VEB4-SS-v-15'.1	A1	0,0243	0,0309	0,0055
VEB4-SS-v-15'.2	A3	0,0379		
VEB4-SS-v-15'.3	A3	0,0307		
VEB4-SS-v-15'-15'.1	/	/	/	/
VEB4-SS-v-15'-15'.2	/	/		
VEB4-SS-v-15'-15'.3	/	/		
VEB4-SS-v-15'-24.1	/	/	0,0158	0,0013
VEB4-SS-v-15'-24.2	A3	0,0142		
VEB4-SS-v-15'-24.3	A4	0,0174		

Zoals zichtbaar in bijlage C is in deze testreeks een droogtijd aangehouden van slechts 6 of 7 dagen. Dit omwille van tijdsgebrek en omdat volgens [39] de hechtsterkte (van proefstukken met cementgestabiliseerde mortels) slechts weinig varieert na een droogtijd van enkele dagen. Hierbij wordt dus afgeweken van de norm NBN EN 1052-5 die een droogtijd van 28 dagen voorschrijft [30]. Deze afwijking kan mogelijks een invloed hebben op de testresultaten. Vooral op de proefstukken waarvan de stenen ondergedompeld worden voor montage kan deze invloed groot zijn omdat dit het droogproces van de mortel vertraagt.

## 7.3 Analyse hechtsterkte

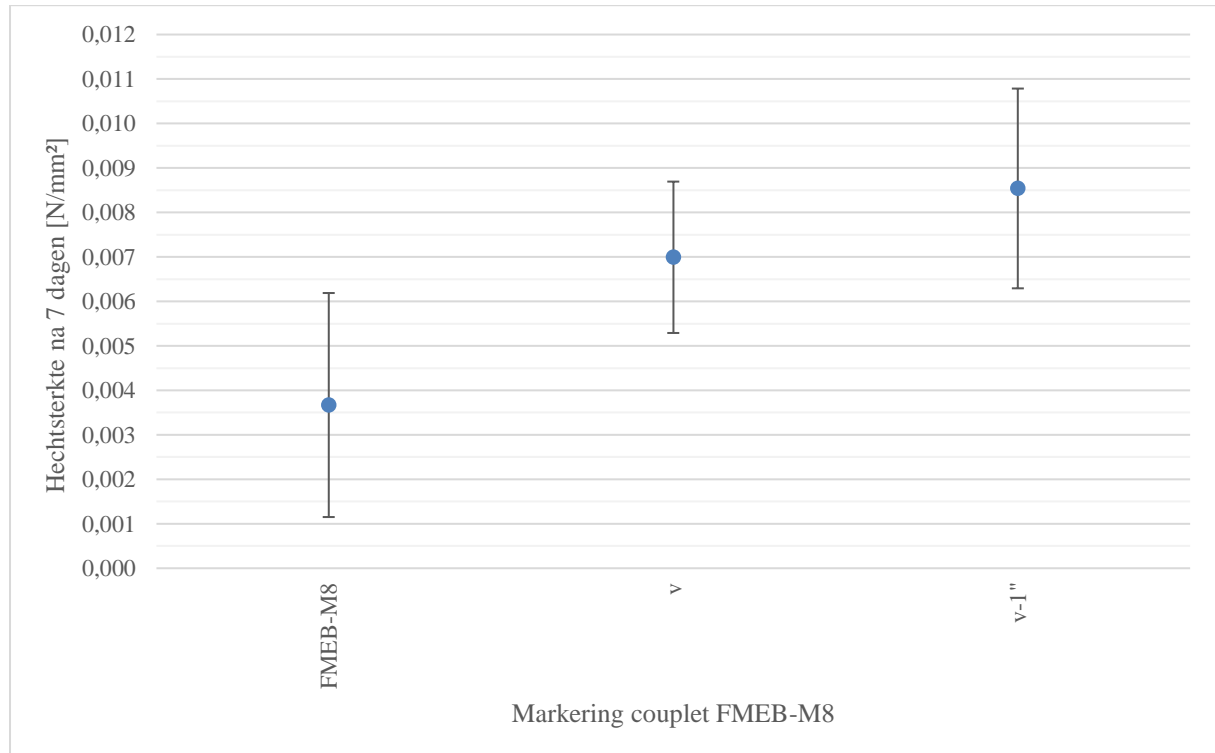
### 7.3.1 Hechtsterkte per mortel-leemsteencombinatie

Op basis van bovenstaande tabellen kan een analyse gemaakt worden van de hechtsterktes van de verschillende coupletten. Hierbij wordt ook de invloed van de voorbelasting en de onderdompelingstijden geanalyseerd. Dit gebeurt aan de hand van grafieken die opgesteld worden op basis van Tabel 15 t.e.m. Tabel 20. Hierin wordt elk trio van identieke coupletten afgebeeld op de x-as en wordt de gemiddelde hechtsterkte van het betreffende trio geprojecteerd op de y-as. De spreiding op de gemiddelde hechtsterktes wordt ten slotte weergegeven aan de hand van verticale foutbalkjes.

Uit Tabel 15 blijkt dat de hechting van de coupletten bestaande uit de handvormstenen en ongestabiliseerde leemmortel ((F)MEB-M0) verwaarloosbaar is. Het eigengewicht van de klem is voldoende om deze proefstukken te doen falen waardoor de aangebrachte belasting  $F_1$  steeds 0 kN is. De berekende hechting voor de MEB's en FMEB's van respectievelijk  $0,0191 \text{ N/mm}^2$  en  $0,0137 \text{ N/mm}^2$  komen enkel tot stand door de waarde van  $W$  in te vullen in formule (1). Een nauwkeurige analyse van deze combinatie is daarom niet mogelijk met de gehanteerde proefopstelling.

Verder worden de resultaten van de coupletten met handvormstenen en cement-gestabiliseerde leemmortel ((F)MEB-M8) geanalyseerd. In

Tabel 16 is zichtbaar dat enkel de coupletten met frogged handvormstenen een meetbare hechting vertonen, met uitzondering van het couplet MEB-M8-v-1".3. De resultaten van de hechtsterkte van de coupletten FMEB-M8 zijn grafisch weergegeven in Figuur 42.



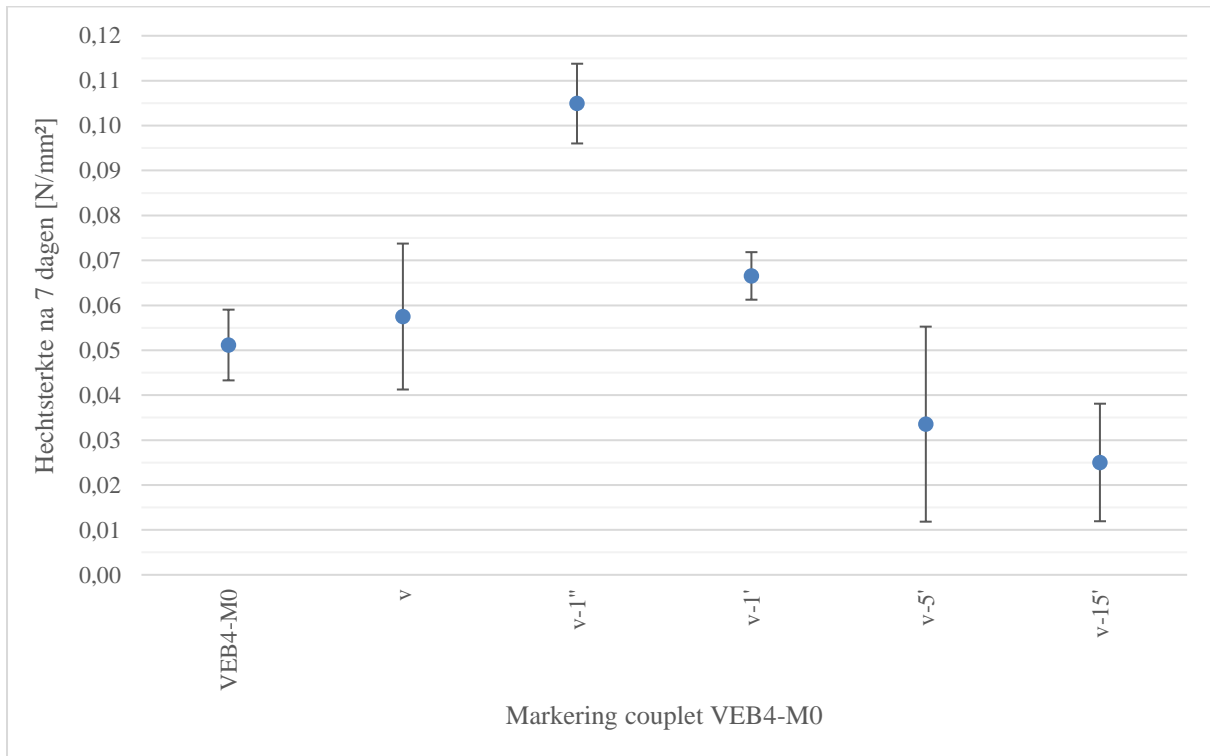
Figuur 42: Hechtsterkte combinatie FMEB-M8

Algemeen kan besloten worden dat de frogged handvormstenen beter hechten dan de solide handvormstenen waarvan de hechting verwaarloosbaar blijkt te zijn. Vervolgens kan uit Figuur 42



geconcludeerd worden dat de coupletten FMEB-M8 een zeer lage hechtsterkte hebben, gaande van 0,0037 N/mm<sup>2</sup> tot 0,0085 N/mm<sup>2</sup>. Ook is de spreiding op deze resultaten zeer hoog in verhouding tot de gemiddelde hechtsterkte. Daarnaast is op te merken dat het plaatsen van de voordruk de hechting bijna doet verdubbelen van 0,0037 N/mm<sup>2</sup> tot 0,0070 N/mm<sup>2</sup>. Ten slotte kan uit deze figuur afgeleid worden dat het onderdompelen van het legvlak gedurende 1 seconde de hechtsterkte bevordert.

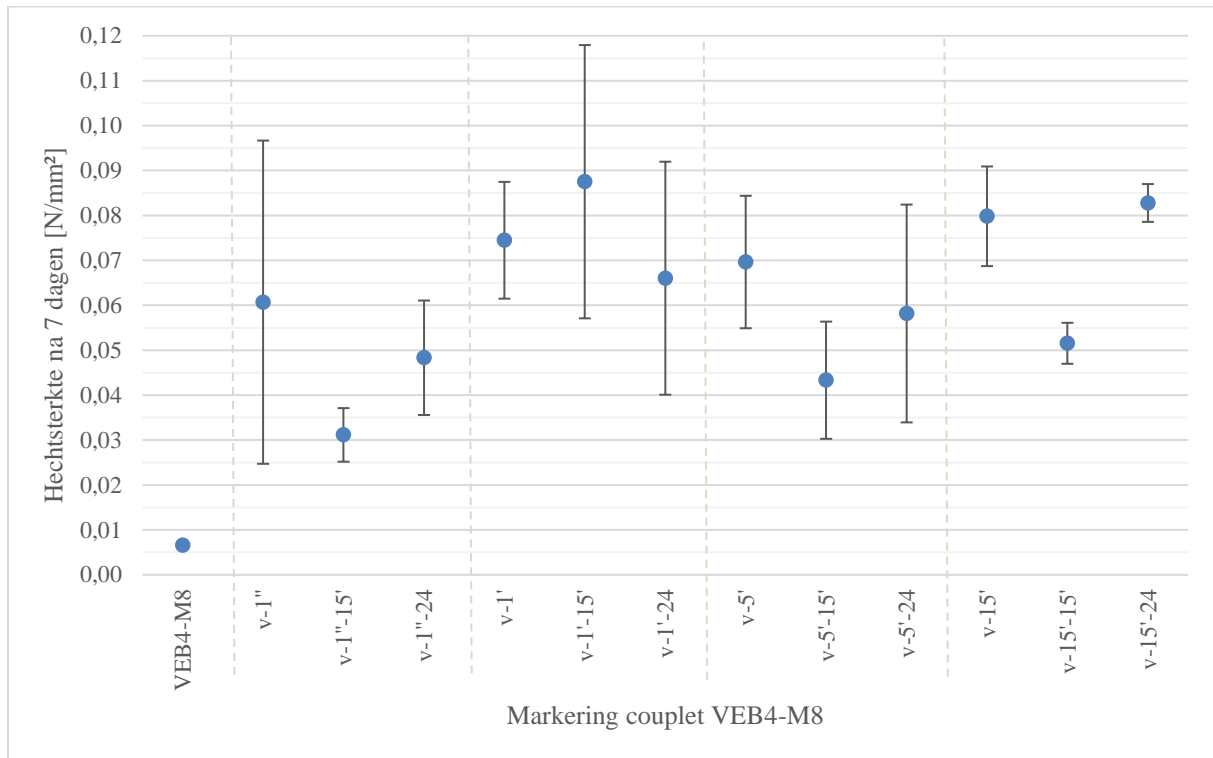
Hieronder geeft Figuur 43 de hechtsterktes van de coupletten VEB4-M0 grafisch weer.



Figuur 43: Hechtsterkte combinatie VEB4-M0

Uit Figuur 43 kan besloten worden dat de voordruk en de onderdompeling gedurende 1'' van het legvlak de hechtsterkte vergroten, tot een maximale waarde van 0,1049 N/mm<sup>2</sup>. Verder kan geconcludeerd worden dat de stenen onderdompelen gedurende 1' bij montage (0,0665 N/mm<sup>2</sup>) de hechting doet toenemen t.o.v. droge montage (0,0575 N/mm<sup>2</sup>). Wanneer de stenen bij montage langer dan 1' ondergedompeld worden, bijvoorbeeld 5' of 15', dan daalt de hechting tot respectievelijk 0,0335 N/mm<sup>2</sup> en 0,0250 N/mm<sup>2</sup>. Een algemene tendens wordt dan waargenomen: hoe langer de stenen ondergedompeld worden bij montage, hoe lager de hechtsterkte is. Dit gedrag staat in contrast met de trend beschreven in [39], waarbij (tot aan het optimaal vochtgehalte van de stenen) een langere onderdompelingstijd voor een hogere hechtsterkte zorgt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat bij een onderdompelingstijd van 5' en 15' het optimaal vochtgehalte van de stenen overschreden wordt, waardoor te veel water aanwezig is en de mortel drijft op de steen [39]. Ook kan deze tendens te wijten zijn aan de ongestabiliseerde mortel die een langere droogperiode vereist en aan het feit dat de stenen bij montage ondergedompeld worden en zo het droogproces van de mortel vertragen. Ten slotte is een relatief lage spreiding op te merken bij bovenstaande resultaten.

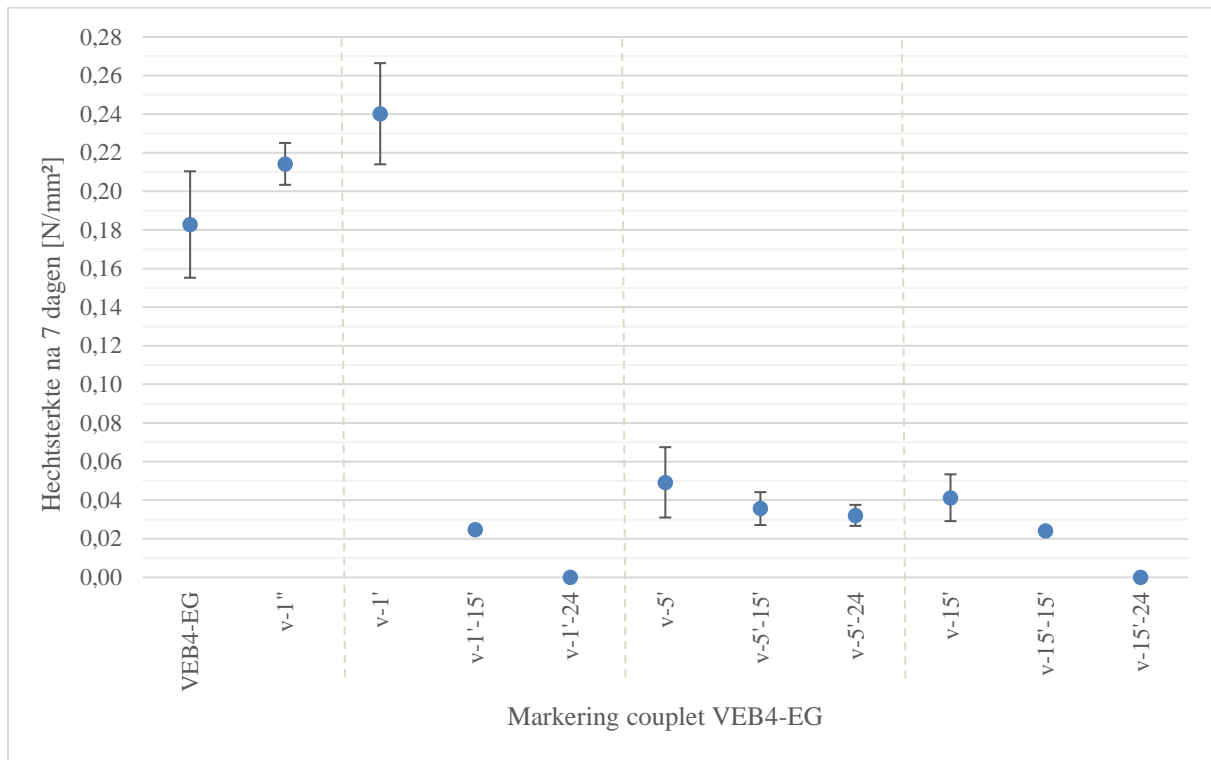
Vervolgens is in Figuur 44 de hechtsterkte van de combinatie VEB4-M8 zichtbaar. De verticale streeplijnen op deze grafiek groeperen de coupletten met dezelfde onderdompelingstijd bij montage.



Figuur 44: Hechtsterkte combinatie VEB4-M8

Uit bovenstaande figuur kan geconcludeerd worden dat ook bij deze combinatie de voordruk en onderdompeling van het legvlak de hechtsterkte bevorderen. Daarnaast is er geen algemeen verband vast te stellen tussen de hechtsterkte en de onderdompelingstijden bij montage en demontage. Ten slotte is zichtbaar dat de standaarddeviatie op deze resultaten voor verschillende coupletten zeer hoog is, waaruit besloten kan worden dat de berekende gemiddelde waarden van de hechtsterktes een lage nauwkeurigheid hebben.

Figuur 45 geeft de hechtsterkte weer van de combinaties VEB4-EG.



Figuur 45: Hechtsterkte combinatie VEB4-EG

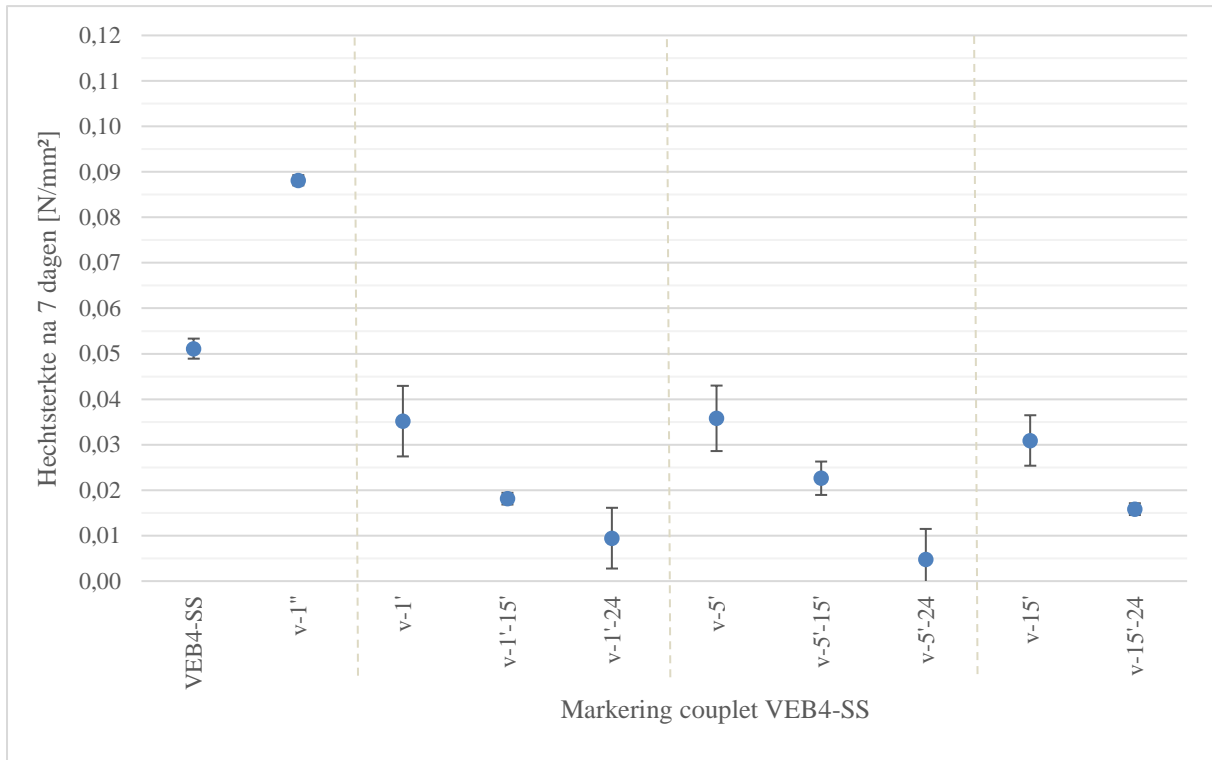
Ten eerste kan ook uit Figuur 45 besloten worden dat de voorbelasting en de onderdempeling van het legvlak voor 1'' de hechtsterkte vergroten. Verder is zichtbaar dat het onderdempelen van de stenen bij montage gedurende 1' een hoge hechtsterkte van 0,2402 N/mm<sup>2</sup> oplevert, terwijl het onderdempelen bij demontage lage hechtsterktes met een maximum van 0,0492 N/mm<sup>2</sup> oplevert. De combinatie VEB4-EG is dus zeer interessant wat betreft het recuperatiepotentieel. Algemeen is ook zichtbaar dat hoe langer de onderdempeling bij demontage, hoe lager de hechtsterkte is en dus hoe beter demonteerbaar het couplet is. Dit kan te wijten zijn aan de korte droogtijd van 7 dagen waardoor bij onderdempeling de mortel opnieuw plastisch wordt en de coupletten bijgevolg eenvoudig demonteerbaar zijn. Daarnaast blijkt dat de spreiding bij de combinatie VEB4-EG zeer laag is en verder daalt naarmate de onderdempeling langer duurt. Een kanttekening bij deze resultaten is dat de ondergedompelde coupletten eenvoudig over elkaar kunnen schuiven door de natte leemlijmmortel. De hechtsterkte die toch uit de bond wrench test bekomen wordt, is dus eerder het gevolg van de zuigkracht van de natte leemlijmmortel die de stenen bij elkaar houdt wanneer een kleine kracht op deze coupletten uitgeoefend wordt.

Ten slotte dient bij deze resultaten opgemerkt te worden dat in het geval van de drie coupletten van VEB4-EG-v-1'-24 en VEB4-EG-v-15'-24 de leemlijmmortel tijdens het onderdempelen bij demontage opgelost werd in het water waardoor deze coupletten niet getest konden worden en de hechting dus 0 N/mm<sup>2</sup> bedraagt. In Tabel 19 zijn deze zes proefstukken daarom in het rood gearceerd. Ten slotte zijn de coupletten ondergedompeld in de bakken gevuld met water en een couplet van de reeks VEB4-EG-v-15'-24 met opgeloste leemlijmmortel zijn weergegeven in Figuur 46.



Figuur 46: a) coupletten ondergedompeld bij demontage en b) proefstuk VEB4-EG-v-15'-24 met opgeloste leemlijmmortel

Vervolgens visualiseert Figuur 47 de hechtsterkte van de combinatie VEB4-SS.



Figuur 47: Hechtsterkte combinatie VEB4-SS

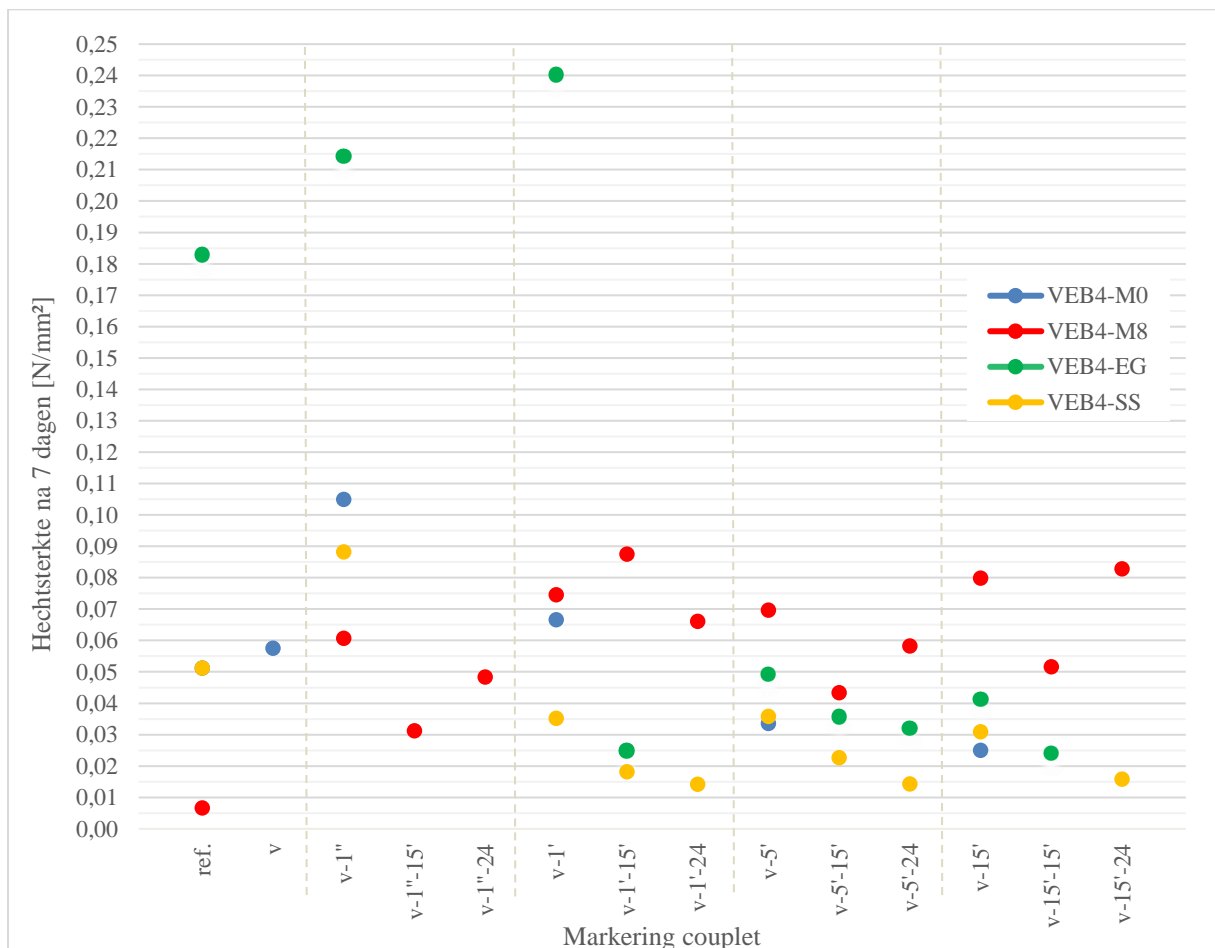
Ook uit deze resultaten volgt de conclusie dat de voordruk en onderdompeling van het legvlak gedurende 1'' de hechtsterkte vergroten, tot een maximum van 0,0882 N/mm<sup>2</sup>. In Figuur 47 is ook een duidelijk verschil waar te nemen tussen de invloed van het onderdompelen bij montage en demontage. Enerzijds kan geconcludeerd worden dat de hechtsterkte daalt wanneer de onderdompelingstijd bij demontage toeneemt. Anderzijds is zichtbaar dat de onderdompelingstijd bij montage geen invloed heeft op de hechtsterkte. Daarnaast is de spreiding bij deze coupletten zeer laag met een maximum van 0,0078 N/mm<sup>2</sup> voor de reeks VEB4-SS-v-1'. Mogelijks heeft de korte droogtijd dus een kleinere invloed op deze hechtsterktes in vergelijking met de andere combinaties.

Ten laatste is ook bij deze testcombinatie de mortel bij enkele coupletten losgekomen in de bakken met water tijdens het onderdompelen bij demontage. Specifiek betreft dit één couplet uit het trio VEB4-SS-v-1'-24 en twee coupletten uit het trio VEB4-SS-v-5'-24. Deze coupletten zijn dus niet getest en zijn in

het rood aangeduid in Tabel 20. Daarnaast is ook het proefstuk VEB4-SS-v-1”2 in het rood aangeduid doordat een hoek van de steen afgebroken is waardoor de hechtsterkte beïnvloed wordt. Daarnaast zijn enkele proefstukken beschadigd geraakt doordat tijdens het drogen een ligger van de houten rekken is doorgescheurd. Dit betreft de drie coupletten van reeks VEB4-SS-v-15’-15’ en het couplet VEB4-SS-v-15’-24.1. Ook deze vier coupletten zijn aangeduid in het rood en worden niet in rekening gebracht bij de analyse.

### 7.3.2 Hechtsterkte alle leemsteen-mortelcombinaties

Vervolgens wordt de hechtsterkte van alle gemetste coupletten bestaande uit VEB’s geanalyseerd. Zo worden de verschillende mortels met elkaar vergeleken in functie van de onderdompelingstijden en de voorbelasting. Enkel de coupletten gemetst met de vibro-compactielemstenen worden in deze analyse beschouwd. De analyse is grafisch weergegeven in Figuur 48. De eerste markering op de x-as, genaamd ‘ref.’, is het couplet in droge toestand zonder onderdompeling en voordruk.



Figuur 48: Hechtsterkte na 7 dagen alle combinaties met VEB’s

Aan de hand van Figuur 48 wordt, zoals eerder geconcludeerd, bevestigd dat het aanbrengen van de voordruk en het onderdompelen van het legvlak van de stenen gedurende 1” de hechtsterkte verhogen bij alle mortel-leemsteencombinaties. Bij de combinatie VEB4-M0 en VEB4-SS hebben deze coupletten zelfs de hoogste hechtsterkte met een waarde van respectievelijk 0,1049 N/mm² en 0,0882 N/mm². Daarnaast kan uit Figuur 48 besloten worden dat de combinatie VEB4-M8 wijst op demontageëigenschappen die de analyse volgens [39] weerleggen. Zo heeft deze leemsteen-mortelcombinatie enerzijds de hoogste hechtsterkte wanneer deze bij demontage 15’ of 24h



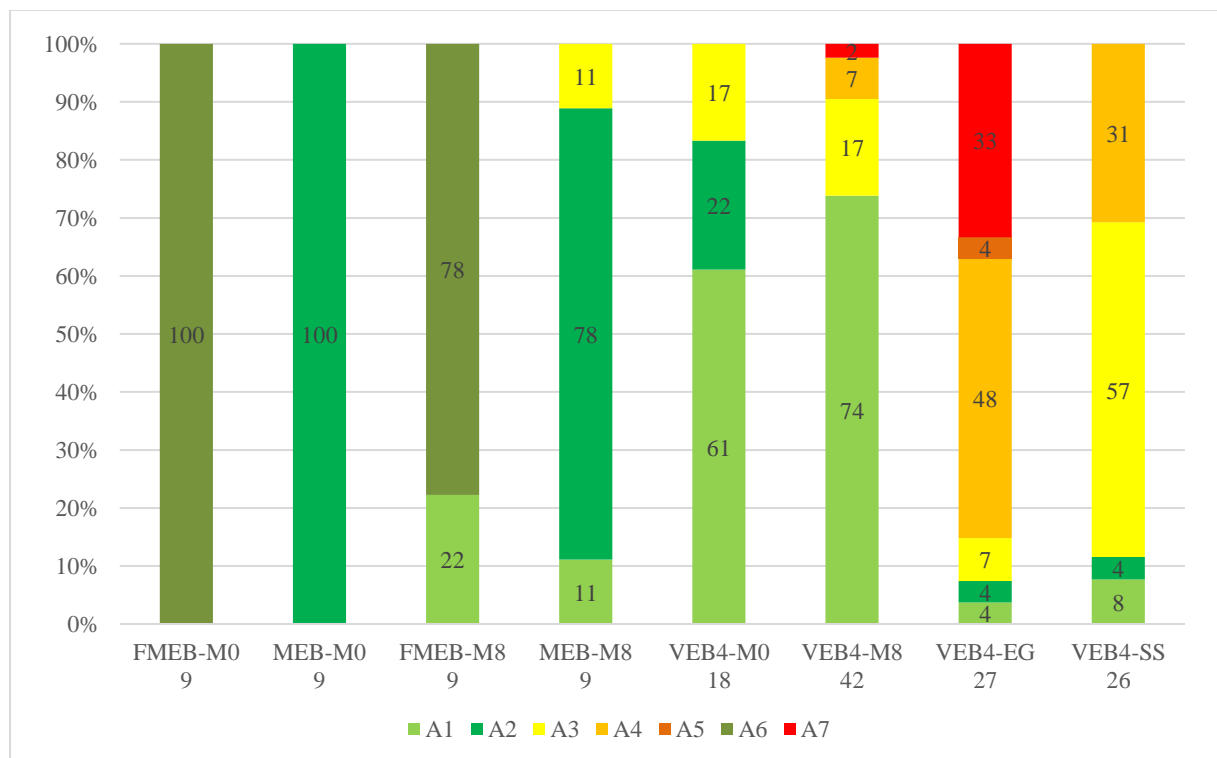
ondergedompeld wordt, ongeacht de onderdampingstijd bij montage. Mogelijks heeft de verdere hydratatie van cement na 7 dagen een invloed hierop. Anderzijds is de hechting van deze combinatie het laagst bij montage in droge toestand en met onderdamping van het legvlak van de stenen, respectievelijk slechts 0,0066 N/mm<sup>2</sup> en 0,0607 N/mm<sup>2</sup>. Het gebrek aan hydratatie van cement na 7 dagen kan hiervan een oorzaak zijn. Ten slotte kan besloten worden dat bij het onderdampen bij montage en demontage over het algemeen de coupletten met sodiumsilicaat gestabiliseerde leemmortel (VEB4-SS) de laagste hechtsterkte hebben. Daarna hebben de coupletten met leemlijmmortel (VEB4-EG) een hogere hechtsterkte en hechten de coupletten met cement-gestabiliseerde leemmortel het meest. Bij onderdamping bij demontage is de meest gewenste combinatie VEB4-SS, met de laagste hechtsterkte.

## 7.4 Analyse faalmodi

In deze paragraaf volgt een analyse van de faalmodi van de coupletten die het gevolg zijn van de bond wrench test. De verschillende mogelijke faalmodi zijn weergegeven in Figuur 14 van paragraaf 3.2. Ook zijn in Tabel 1 de faalmodi weergegeven in functie van het recuperatiepotentieel en de eventuele schade aan de mortels en stenen.

### 7.4.1 Algemene analyse

Figuur 49 geeft een algemene analyse weer van de faalmodi. Hierin wordt per leemsteen-mortelcombinatie gevisualiseerd wat het percentage is van het aantal keer dat een faalmodus voorkomt. Wel dient opgemerkt te worden dat het aantal coupletten per combinatie sterk verschilt, waardoor dit de interpretatie van de percentages kan beïnvloeden. Om dit te vermijden zijn het aantal coupletten waarvan de faalmodi geanalyseerd kon worden weergegeven op de x-as, onder de markering van de combinaties.



Figuur 49: Algemene analyse faalmodi testreeks 1

Bij de frogged MEB's met ongestabiliseerde mortel (FMEB-M0) komt voor alle proefstukken de faalmodus A6 voor waarbij één steen telkens mortelvrij is. Ook bij de niet-frogged MEB's met ongestabiliseerde mortel (MEB-M0) is de faalmodus bij alle proefstukken gelijk. De faalmodus is A2 wat betekent dat steeds één steen volledig mortelvrij is. Beide faalmodi zijn ter visualisatie weergegeven in Figuur 50. Het gebruik van gestabiliseerde leemmortel bij de vormstenen zorgt ervoor dat de faalmodi niet meer uniform zijn voor alle proefstukken. Wel kan geconstateerd worden dat bij de proefstukken FMEB-M8 de meerderheid (78%) faalt volgens A6 en de overige 22% volgens A1. Deze faalmodi zijn zichtbaar in Figuur 51. Bij de solide MEB's met cement-gestabiliseerde leemmortel faalt het overgrote deel van de proefstukken (78%) volgens faalmodus A2. Verder treden er 11% faalmodus A1 en 11% faalmodus A3 op. Zie Figuur 52 voor enkele voorbeelden van de optredende faalmodi.

Ten derde treedt bij de VEB's met ongestabiliseerde leemmortel telkens een breuk op tussen de steen en de voeg. Wanneer bij de VEB's cement-gestabiliseerde leemmortel wordt gebruikt neemt de kans op een ongewenste faalmodus toe. Hierbij faalt 2% van de proefstukken volgens faalmodus A7 en 7% volgens faalmodus A4. Verder falen de meerderheid van de proefstukken (74%) volgens dezelfde faalmodus (A1) als bij de VEB's met ongestabiliseerde leemmortel. De faalmodi van deze combinaties zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 53 en Figuur 54.

Wanneer leemlijmmortel wordt gebruikt bij het metselen van de vibro-gecompacteerde stenen dan zijn de stenen bij 37% van de proefstukken beschadigd na het uitvoeren van de bond wrench test. Hierbij moet wel vermeld worden dat dit de proefstukken waren die in volledig droge toestand ontmanteld werden. Wanneer de proefstukken nat gemaakt werden bij demontage trad er voornamelijk faalmodus A4 op. Deze faalmodi zijn terug te vinden in Figuur 55. Tot slot zijn 88% van de proefstukken met sodiumsilicaat-gestabiliseerde mortel (VEB4-SS) niet volledig mortelvrij na demontage met de bond wrench test. Wel dient opgemerkt te worden dat de stenen onbeschadigd waren na de testen. Zie Figuur 56 voor een visualisatie van de faalmodi.



Figuur 50: Visualisatie faalmodi a) combinatie FMEB-M0 faalmodus A6 en b) combinatie MEB-M0 faalmodus A2



*Figuur 51: Visualisatie faalmodi combinatie FMEB-M8 a) faalmodus A6 en b) faalmodus A1*

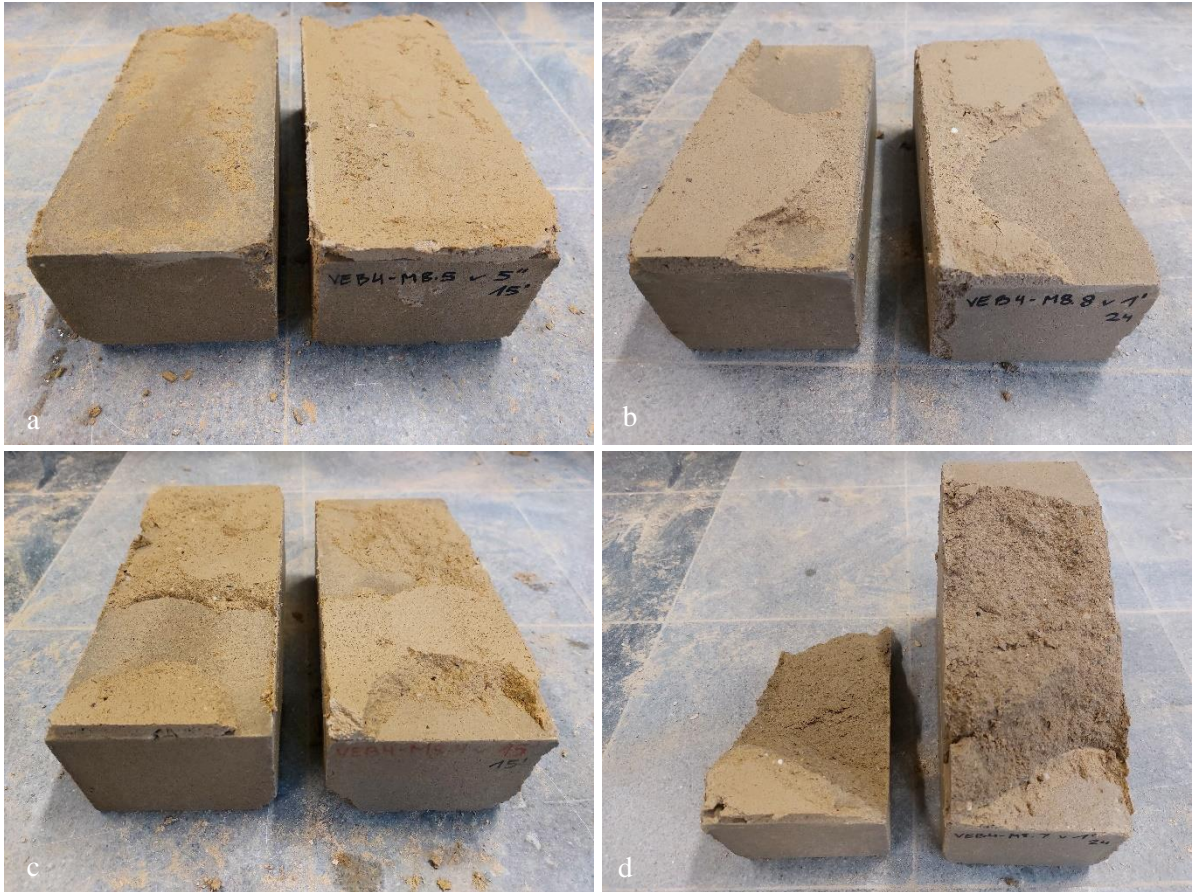


*Figuur 52: Visualisatie faalmodi combinatie MEB-M8 a) faalmodus A1, b) faalmodus A2 en c) faalmodus A3*

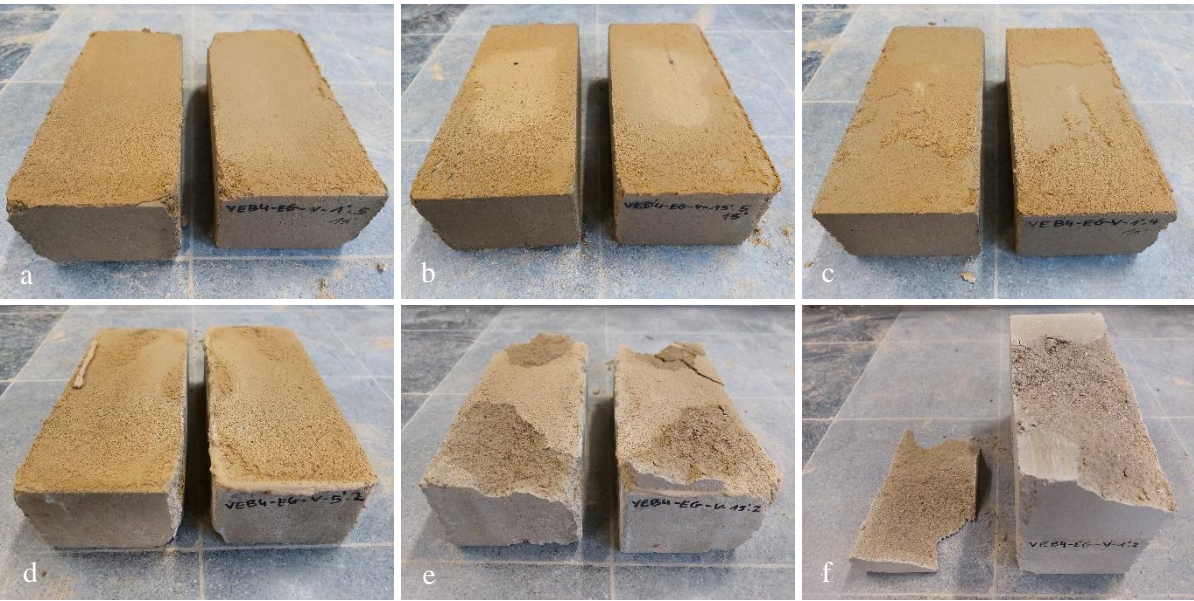


*Figuur 53: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-M0 a) faalmodus A1, b) faalmodus A2 en c) faalmodus A3*



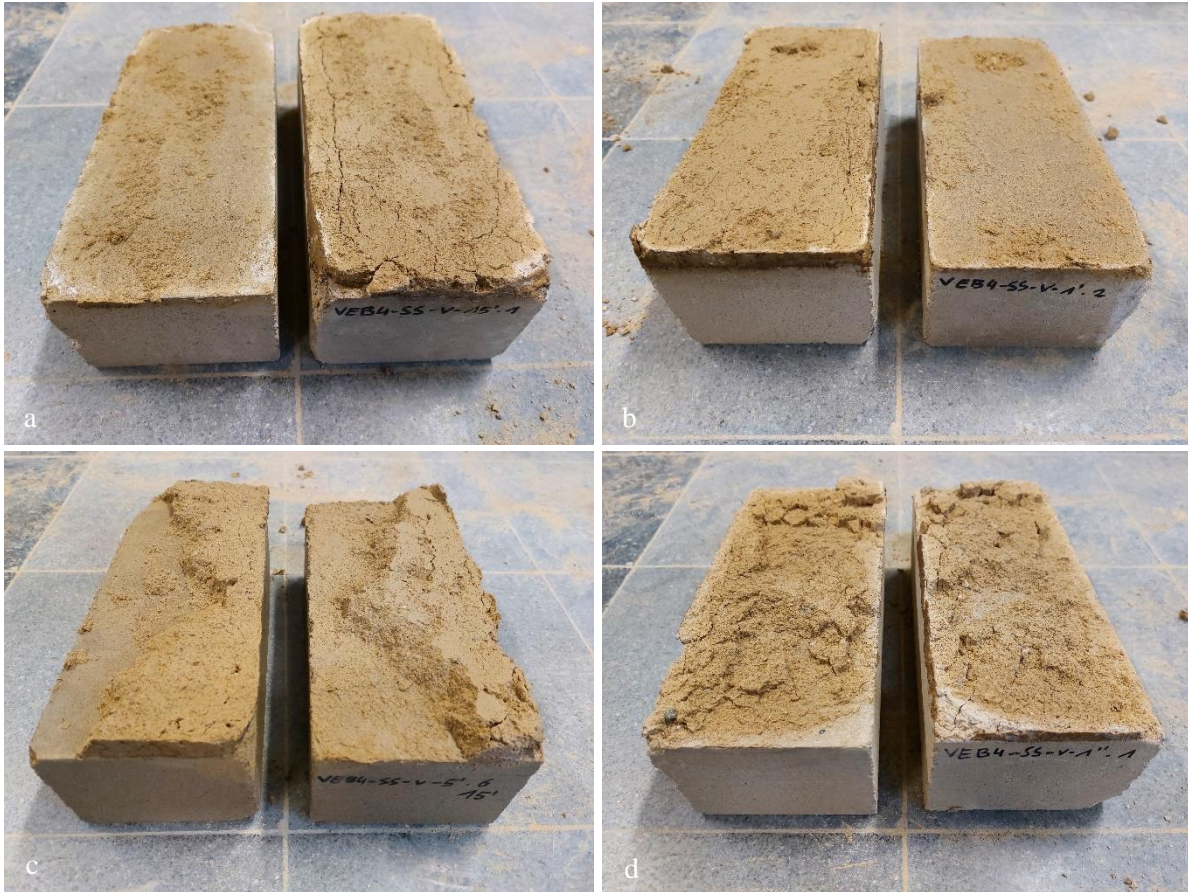


Figuur 54: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-M8 a) faalmodus A1, b) faalmodus A3, c) faalmodus A4 en d) faalmodus A7



Figuur 55: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-EG a) faalmodus A1, b) faalmodus A2, c) faalmodus A3, d) faalmodus A4, e) faalmodus A5 en f) faalmodus A7



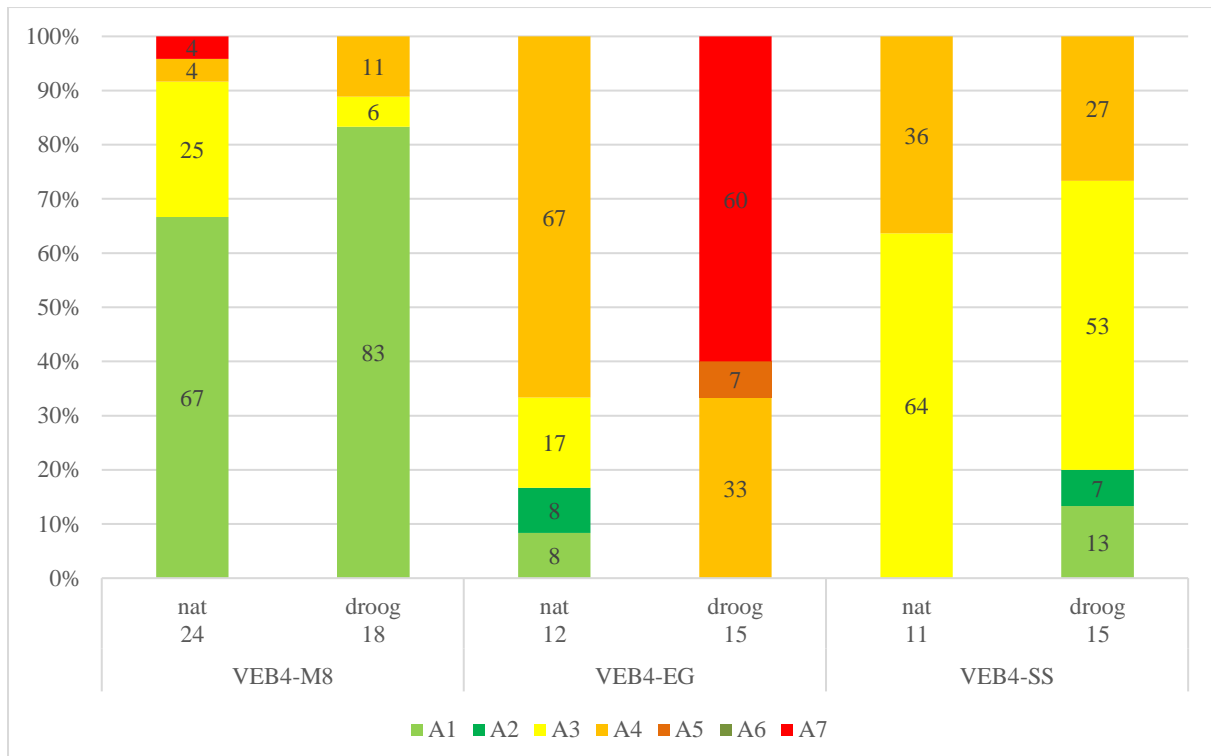


Figuur 56: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-SS a) faalmodus A1, b) faalmodus A2, c) faalmodus A3 en d) faalmodus A4

### 7.4.2 Invloed van water bij demontage op faalmodi

Naast de algemene analyse van de faalmodi, wordt een onderscheid gemaakt tussen de faalmodi die voortkomen uit proefstukken die droog gedemonteerd worden en proefstukken die gedemonteerd worden na onderdompeling van 15' of 24 uur. Deze analyses zijn weergegeven in Figuur 57. Hierbij dient opgemerkt te worden dat deze analyse enkel focust op de VEB's aangezien de ongestabiliseerde (F)MEB's oplossen in water en dus niet ondergedompeld worden bij demontage. Ditzelfde geldt voor de combinatie VEB4-M0 waarbij de ongestabiliseerde leemmortel ook oplost in water waardoor ook deze coupletten niet ondergedompeld worden. Het aantal coupletten per combinatie zijn hier ook op de x-as zichtbaar.





Figuur 57: Faalmodi demontage coupletten in droge en natte toestand testreeks 1

Uit de analyse van de VEB4-M8 coupletten blijkt dat de faalmodi bij droge demontage gewenster zijn dan de faalmodi bij natte demontage. Zo levert droge demontage in 83% van de gevallen faalmodus A1 op waarbij één steen mortelvrij is, terwijl dit slechts 67% is bij onderdompeling voor demontage. Onderdompeling bij demontage heeft dus geen positieve invloed op de faalmodus van deze leemsteen-mortelcombinatie. Ook is zichtbaar in Figuur 57 dat in 4% van de proeven faalmodus A7 bekomen wordt waarbij één steen faalt en dus niet hergebruikt kan worden. Hieruit kan geconcludeerd worden dat bij onderdompeling bij demontage van de combinatie VEB4-M8 minder gewenste faalmodi verkregen worden.

Vervolgens kunnen enkele besluiten getrokken worden uit de resultaten van de coupletten met leemlijmmortel (EG). Zo blijkt uit Figuur 57 dat de proefstukken onderdompelen voor demontage een zeer positieve invloed heeft op de faalmodi die gunstig zijn voor hergebruik. Zo kan in 16% van de gevallen een mortelvrije steen bekomen worden (faalmodi A1 en A2) en wordt in de andere gevallen de steen nooit beschadigd met faalmodus A3 of A4. Wanneer deze coupletten droog gedemonteerd worden levert dit nooit een mortelvrije steen op. In 67% van de proeven faalt de steen waardoor ze hun recuperatiepotentieel verliezen.

Ten slotte blijkt uit de analyse van de coupletten VEB4-SS dat de faalmodi gewenster zijn wanneer de proefstukken droog gedemonteerd worden. Uit Figuur 57 blijkt dat bij onderdompeling bij montage in geen geval een mortelvrije steen bekomen wordt en enkel faalmodi A3 (64%) en faalmodi A4 (36%) voorkomen. Dit terwijl bij droge demontage in 20% van de gevallen een mortelvrije steen bekomen wordt bij faalmodi A1 en A2 met respectievelijk 13% en 7%. Voor de sodiumsilicaat-gestabiliseerde coupletten heeft onderdompeling bij demontage dus geen positief effect op de faalmodi.



## 8 Testreeks 2: hechtsterkte na 28 dagen

Aan de hand van de resultaten van testreeks 1, kunnen er combinaties en proefstukken geselecteerd worden die in testreeks 2 getest worden. De motivatie van deze gekozen combinaties en onderdompelingstijden is verder in deze paragraaf terug te vinden. In tegenstelling tot testreeks 1 wordt in deze testreeks wel een droogtijd van 28 dagen voorzien zodat de uiteindelijk gekozen proefstukken standaardconforme resultaten opleveren.

### 8.1 Metselen van proefstukken

In deze testreeks wordt enkel gebruik gemaakt van de met cement-gestabiliseerde vibro-gcompacteerde leemstenen en de frogged handvormstenen uit testreeks 1, beiden zichtbaar in Figuur 37. De solide handvormstenen uit testreeks 1 zijn minder van toepassing op de bouwmarkt en worden daarom buiten beschouwing gelaten in deze testreeks. Ook blijkt uit de resultaten van testreeks 1 dat een betere hechting bekomen wordt bij de frogged MEB's dan bij de solide MEB's. Verder is de samenstelling van de vibro-compactiestenen door de fabrikant licht gewijzigd waardoor deze niet exact dezelfde is als de samenstelling uit de vorige testreeks. Invloeden op de resultaten ten gevolge van deze wijziging worden niet verwacht.

Vervolgens worden ook dezelfde mortels gebruikt als in voorgaande testreeks: leemlijmmortel, ongestabiliseerde leemmortel en gestabiliseerde leemmortel met cement of sodiumsilicaat. Deze zijn weergegeven in Figuur 38 en Figuur 39. Wel moet opgemerkt worden dat de droge leemmortel die gebruikt wordt in deze testreeks uit een gesloten zak komt waardoor deze minder heeft kunnen drogen en vochtiger is in vergelijking met de leemmortel uit testreeks 1. Omwille van deze reden kan de hoeveelheid toegevoegd water van de bereide mortels afwijken ten opzichte van het toegevoegd water uit testreeks 1. De mortelsamenstellingen uit testreeks 2 zijn weergegeven in Tabel 21. Daarnaast worden de mortels bereid in batches van 30 kg in een panmixer zoals beschreven in NBN EN 1015-2 [35]. Een mengtijd volgens de fabrikant BC Materials van 10 minuten wordt hierbij gehanteerd. De gestandaardiseerde panmixer en het mengproces zijn te zien in Figuur 58.

Tabel 21: Samenstelling gebruikte mortels testreeks 2

Mortel		Samenstelling
Ongestabiliseerde leemmortel	M0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30 kg droge leemmortel</li> <li>• 4,5 l water</li> </ul>
Gestabiliseerde leemmortel met cement	M8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30 kg droge leemmortel</li> <li>• 2,4 kg (+8%) cement CEM II/B-LL 42,5 N</li> <li>• 6,2 l water</li> </ul>
Gestabiliseerde leemmortel met sodiumsilicaat	SS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30 kg droge leemmortel</li> <li>• 3,0 kg sodiumsilicaat (36%-oplossing)</li> <li>• 5,5 l water</li> </ul>
Leemlijmmortel	EG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30 kg droge lijmmortel</li> <li>• 9,6 l water</li> </ul>



Figuur 58: a) gestandaardiseerde panmixer en b) mengproces

Vervolgens is de combinatiematrix van testreeks 2 weergegeven in Tabel 22. De vier mortels zijn hierin gecombineerd met de vibro-compactiesteen en de frogged handvormsteen. Zoals weergegeven in deze tabel worden in testreeks 2 in totaal 88 coupletten gemetst.

Tabel 22: Combinatiematrix testreeks 2

	FMEB	VEB4
M0	FMEB-M0 totaal: 4	VEB4-M0 totaal: 16
M8	FMEB-M8 totaal: 4	VEB4-M8 totaal: 20
SS	FMEB-SS totaal: 4	VEB4-SS totaal: 16
EG	FMEB-EG totaal: 4	VEB4-EG totaal: 20

Ook in deze testreeks varieert de onderdompelingstijd bij montage en demontage binnen eenzelfde combinatie. De voorbelasting zoals beschreven in [30] wordt nu op elk couplet geplaatst vermits de invloed hiervan al beschreven kan worden aan de hand van de resultaten van testreeks 1. De markering “v” die wijst op deze voorbelasting zal daarom niet meer genoteerd worden. Verder worden nu vier proefstukken per specifieke combinatie vervaardigd. Van drie proefstukken wordt de hechtsterkte bepaald op basis van de bond wrench test, terwijl het vierde couplet gedemonteerd wordt aan de hand van een manuele demontage met gereedschap. Zo worden ook verschillende demontagetechnieken onderzocht die in de praktijk eenvoudig uitvoerbaar zijn.

De gedetailleerde markeringen van de coupletten zijn opgesomd in Tabel 23. Ook is in deze tabel het aantal identieke coupletten en de onderdompelingswijze weergegeven. Enkele verduidelijkingen bij deze markeringen zijn dezelfde als in testreeks 1 en staan vermeld in paragraaf 7.1.

Tabel 23: Markering en verduidelijking coupletten testreeks 2

markering	onderdompeling	aantal
<b>FMEB-M0</b>		
FMEB-M0-1''	1'' legvlak montage	4
<b>FMEB-M8</b>		
FMEB-M8-1''	1'' legvlak montage	4
<b>FMEB-SS</b>		
FMEB-SS-1''	1'' legvlak montage	4
<b>FMEB-EG</b>		
FMEB-EG-1''	1'' legvlak montage	4
<b>VEB4-M0</b>		
VEB4-M0-1''	1'' legvlak montage	4
VEB4-M0-1''-1'	1'' legvlak montage + 1' vol. demontage	4
VEB4-M0-1'	1' vol. montage	4
VEB4-M0-15'	15' vol. montage	4
		16
<b>VEB4-M8</b>		
VEB4-M8-1''	1'' legvlak montage	4
VEB4-M8-1''-1'	1'' legvlak montage + 1' vol. demontage	4
VEB4-M8-1''-15'	1'' legvlak montage + 15' vol. demontage	4
VEB4-M8-1'	1' vol. montage	4
VEB4-M8-15'	15' vol. montage	4
		20
<b>VEB-SS</b>		
VEB4-SS-1''	1'' legvlak montage	4
VEB4-SS-1''-1'	1'' legvlak montage + 1' vol. demontage	4
VEB4-SS-1'	1' vol. montage	4
VEB4-SS-15'	15' vol. montage	4
		16
<b>VEB4-EG</b>		
VEB4-EG-1''	1'' legvlak montage	4
VEB4-EG-1''-1'	1'' legvlak montage + 1' vol. demontage	4
VEB4-EG-1''-15'	1'' legvlak montage + 15' vol. demontage	4
VEB4-EG-1'	1' vol. montage	4
VEB4-EG-15'	15' vol. montage	4
		20
<b>TOTAAL</b>		<b>88</b>

De coupletten gemetst met de frogged handvormstenen worden beperkt tot één variatie waarbij het legvlak van de stenen gedurende 1'' ondergedompeld wordt voor het metsen. Dit omdat enerzijds uit de resultaten van testreeks 1 blijkt dat deze variatie de beste hechting oplevert en anderzijds dit in de praktijk de meest gangbare methode is vermits bij volledige onderdompeling de stenen zouden oplossen in water. Verder wordt beslist om in de tweede testreeks de onderdompelingstijd bij montage of demontage constant te houden per specifieke combinatie, en dus niet beiden tegelijk te laten variëren. Zo zijn de onderdompelingstijden bij het metsen vastgelegd op 1' en 15'. Uit de resultaten van testreeks 1 volgt dat 1' onderdompeling in de meeste gevallen de beste hechting oplevert in vergelijking met 5'



en 15', en dat het verschil tussen 5' en 15' zeer klein is waarbij 15' toch zorgt voor een iets hogere hechting. Vervolgens worden de onderdompelingstijden bij demontage ook vastgelegd op 1' en 15' omdat dit praktisch het maximaal haalbare is. 1' onderdompeling is in de praktijk te benaderen door het metselwerk enige tijd nat te spuiten. De proefstukken 24 uur onderdompelen vlak voor demontage is in de praktijk niet uitvoerbaar en wordt daarom niet in beschouwing genomen in testreeks 2.

Ook hier dient opgemerkt te worden dat de notatie van de coupletten uit bovenstaande tabel niet altijd exact overeenkomt met de markeringen op de coupletten die te zien zijn in enkele figuren. Zoals eerder vermeld is dit te wijten aan praktische vereenvoudiging en conformiteit in de volledige scriptie.

Een overzicht van alle gemetste proefstukken uit testreeks 2 is zichtbaar in Figuur 59.



*Figuur 59: Gemetste proefstukken testreeks 2*

## 8.2 Resultaten testreeks 2

Zoals in vorige testreeks beschreven, volgt de hechtsterkte uit formule 1 en 2 in paragraaf 3.2. De parameters die afhankelijk zijn van de test en de proefopstelling zijn opgesomd in Tabel 24.

Tabel 24: Parameters proefopstelling per leemsteen testreeks 2

parameter	FMEB	VEB4	eenheid
F2	11,21	34,28	N
e1	620	950	mm
e2	210	265	mm
d	110	125	mm
b	240	290	mm
Z	484000	755208	mm <sup>3</sup>

De resultaten van de bond wrench testen na 28 dagen per leemsteen-mortelcombinatie zijn zichtbaar in Tabel 25 t.e.m. Tabel 29. De uitgebreide resultaten zijn bijgevoegd in bijlage D.

Tabel 25: Resultaten bond wrench test na 28 dagen combinaties met FMEB's

FROGGED	Faalmode	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
FMEB-M0-1".1	A6	0,0128	0,0134	0,0048
FMEB-M0-1".2	A6	0,0078		
FMEB-M0-1".3	A6	0,0194		
FMEB-M8-1".1	A1	0,0135	0,0129	0,0025
FMEB-M8-1".2	A1	0,0157		
FMEB-M8-1".3	A6	0,0096		
FMEB-SS-1".1	A3	0,0954	0,0708	0,0176
FMEB-SS-1".2	A4	0,0548		
FMEB-SS-1".3	A4	0,0623		
FMEB-EG-1".1	A4	0,1208	0,1116	0,0117
FMEB-EG-1".2	A4	0,1189		
FMEB-EG-1".3	A7	0,0951		



Tabel 26: Resultaten bond wrench test na 28 dagen combinatie VEB4-M0

VEB4-M0	Faalmode	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-M0-1".1	A3	0,1417	0,1220	0,0182
VEB4-M0-1".2	A2	0,0977		
VEB4-M0-1".3	A2	0,1265		
VEB4-M0-1"-1'.1	A1	0,0419	0,0320	0,0100
VEB4-M0-1"-1'.2	A2	0,0358		
VEB4-M0-1"-1'.3	A3	0,0184		
VEB4-M0-1'.1	A2	0,1127	0,1538	0,0296
VEB4-M0-1'.2	A1	0,1674		
VEB4-M0-1'.3	A3	0,1812		
VEB4-M0-15'.1	A3	0,0756	0,1263	0,0438
VEB4-M0-15'.2	A3	0,1206		
VEB4-M0-15'.3	A3	0,1826		

Tabel 27: Resultaten bond wrench test na 28 dagen combinatie VEB4-M8

VEB4-M8	Faalmode	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-M8-1".1	A1	0,0789	0,0795	0,0121
VEB4-M8-1".2	A1	0,0946		
VEB4-M8-1".3	A1	0,0650		
VEB4-M8-1"-1'.1	A3	0,0888	0,0669	0,0187
VEB4-M8-1"-1'.2	A1	0,0687		
VEB4-M8-1"-1'.3	A3	0,0432		
VEB4-M8-1"-15'.1	A1	0,0306	0,0301	0,0060
VEB4-M8-1"-15'.2	A1	0,0224		
VEB4-M8-1"-15'.3	A2	0,0372		
VEB4-M8-1'.1	A3	0,0828	0,0817	0,0048
VEB4-M8-1'.2	A3	0,0753		
VEB4-M8-1'.3	A3	0,0870		
VEB4-M8-15'.1	A3	0,0905	0,0905	0,0015
VEB4-M8-15'.2	A3	0,0887		
VEB4-M8-15'.3	A3	0,0924		

Tabel 28: Resultaten bond wrench test na 28 dagen combinatie VEB4-EG

VEB4-EG	Faalmode	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-EG-1".1	A7	0,4570	0,4211	0,0317
VEB4-EG-1".2	A7	0,4265		
VEB4-EG-1".3	A4	0,3798		
VEB4-EG-1"-1'.1	A4	0,4697	0,5105	0,0556
VEB4-EG-1"-1'.2	A4	0,4728		
VEB4-EG-1"-1'.3	A4	0,5891		
VEB4-EG-1"-15'.1	A7	0,2551	0,4598	0,1448
VEB4-EG-1"-15'.2	A7	0,5658		
VEB4-EG-1"-15'.3	A4	0,5586		
VEB4-EG-1'.1	A4	0,4625	0,3522	0,0850
VEB4-EG-1'.2	A4	0,2557		
VEB4-EG-1'.3	A4	0,3383		
VEB4-EG-15'.1	A4	0,4310	0,4948	0,0519
VEB4-EG-15'.2	A7	0,5582		
VEB4-EG-15'.3	A4	0,4951		

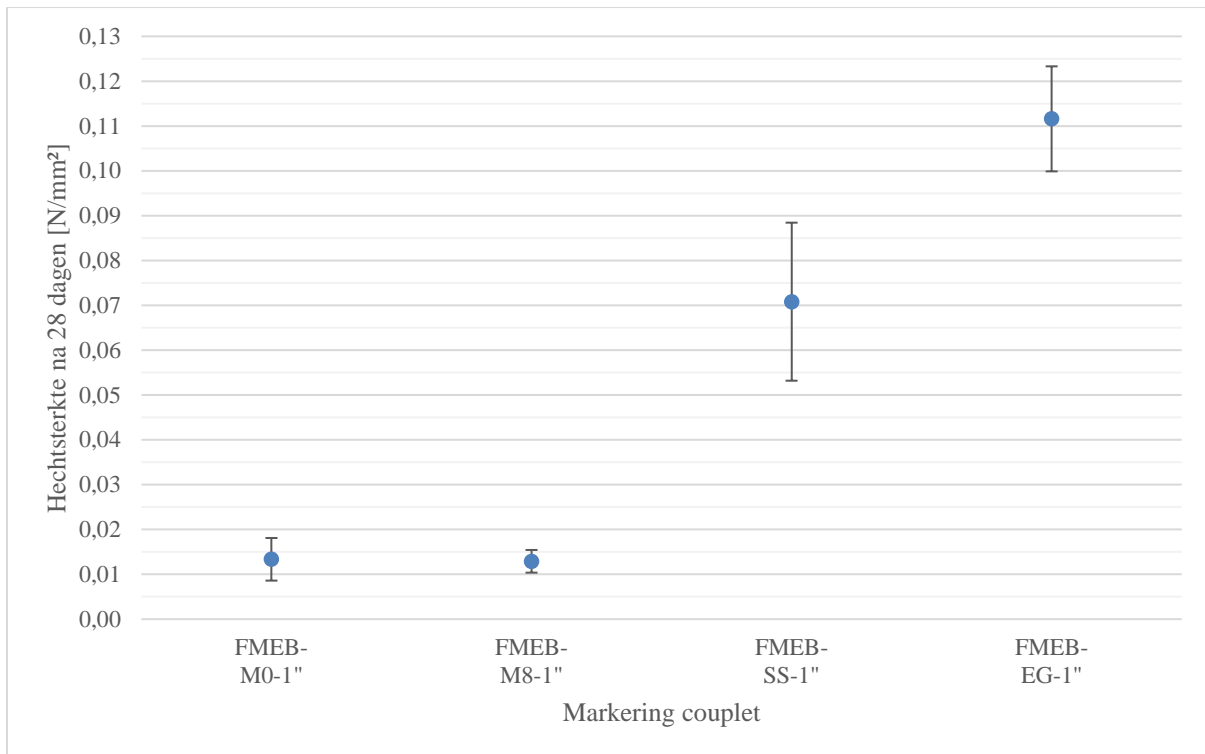
Tabel 29: Resultaten bond wrench test na 28 dagen combinatie VEB4-SS

VEB4-SS	Faalmode	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-SS-1".1	A3	0,1279	0,1423	0,0110
VEB4-SS-1".2	A4	0,1544		
VEB4-SS-1".3	A3	0,1445		
VEB4-SS-1"-1'.1	A3	0,0327	0,0327	0,0001
VEB4-SS-1"-1'.2	A4	0,0327		
VEB4-SS-1"-1'.3	A2	0,0325		
VEB4-SS-1'.1	A3	0,1130	0,1047	0,0231
VEB4-SS-1'.2	A3	0,0731		
VEB4-SS-1'.3	A4	0,1279		
VEB4-SS-15'.1	A4	0,1020	0,0943	0,0056
VEB4-SS-15'.2	A4	0,0922		
VEB4-SS-15'.3	A4	0,0887		

## 8.3 Analyse hechtsterkte

### 8.3.1 Hechtsterkte per mortel-leemsteencombinatie

Figuur 60 geeft een grafische weergave van de testresultaten van de proefstukken met de frogged MEB's. Hierin wordt de hechtsterkte die volgt uit de bond wrench test na 28 dagen weergegeven voor elke leemsteen-mortelcombinatie voor de proefstukken met de frogged MEB's. Ook is de spreiding op de resultaten gevisualiseerd door middel van de foutbalkjes.

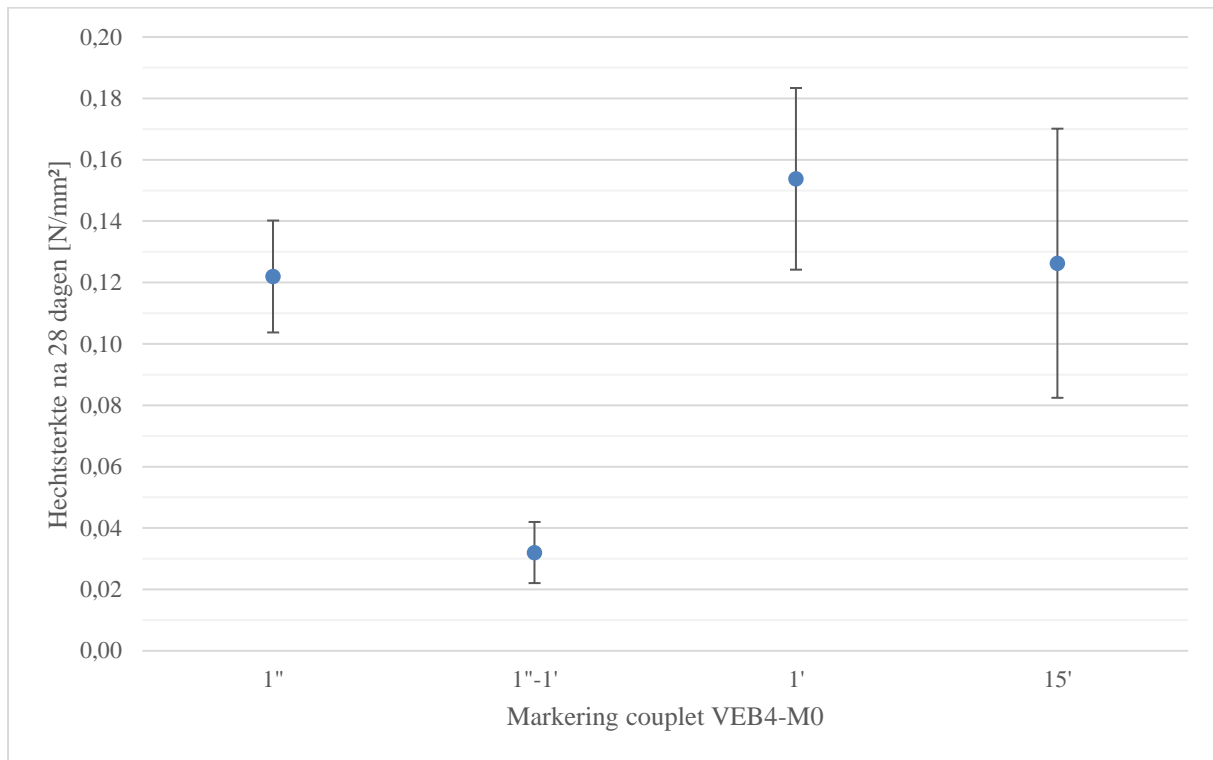


Figuur 60: Hechtsterkte combinatie FMEB

Uit Figuur 60 en Tabel 25 volgt dat voor de frogged MEB's zowel voor ongestabiliseerde als gestabiliseerde leemmortel de gemiddelde hechtsterktes nagenoeg gelijk zijn met 0,0134 N/mm<sup>2</sup> voor de proefstukken met ongestabiliseerde leemmortel en 0,0129 N/mm<sup>2</sup> voor de proefstukken met gestabiliseerde leemmortel. De respectievelijke spreidingen op de resultaten bedragen 0,0048 N/mm<sup>2</sup> en 0,0025 N/mm<sup>2</sup>. Verder vertonen de proefstukken die gemetseld zijn met de sodiumsilicaat gestabiliseerde leemmortel (FMEB-SS) en de leemlijmmortel (FMEB-EG) hogere hechtsterktes dan de proefstukken die gemetseld zijn met (on)gestabiliseerde leemmortel. Hierbij is de hechtsterkte voor de FMEB-EG proefstukken het grootst (0,1116 N/mm<sup>2</sup>). De spreiding op de resultaten van de frogged MEB's met sodiumsilicaat en leemlijmmortel is hoger dan de spreiding op de resultaten van de frogged MEB's met (on)gestabiliseerde leemmortel, zoals zichtbaar is in Tabel 25.



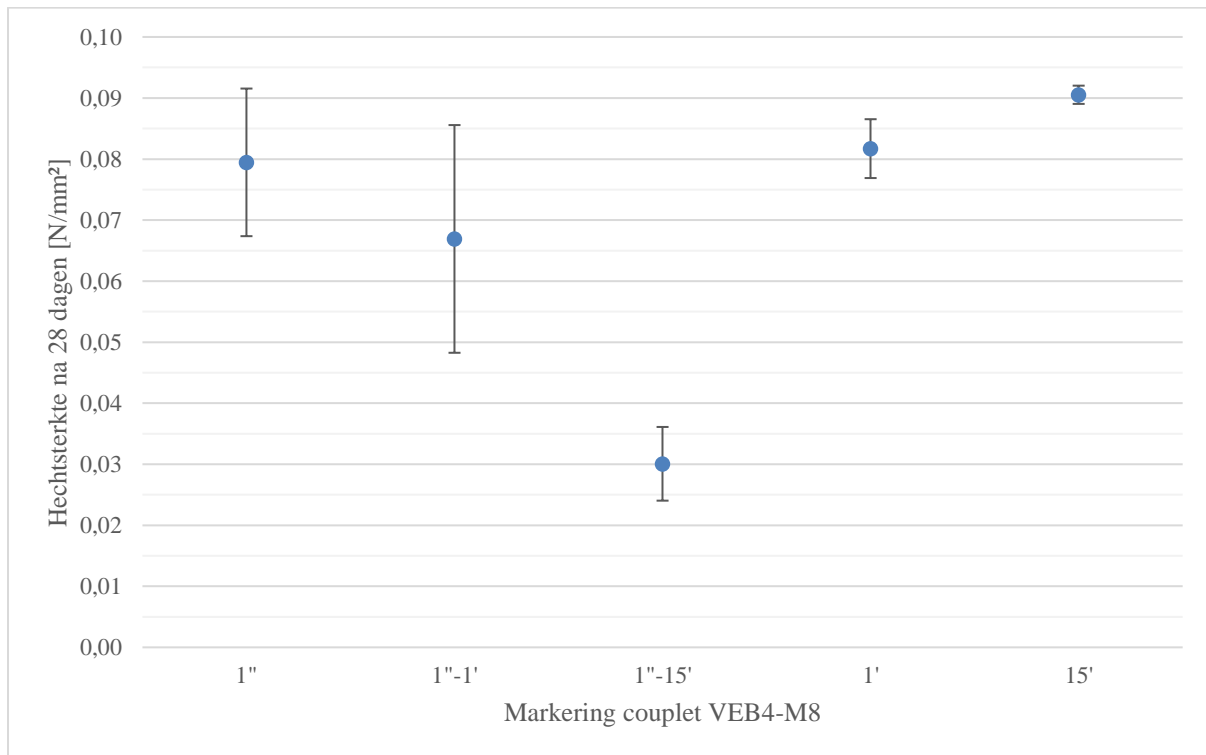
Vervolgens is op Figuur 61 de hechtsterkte zichtbaar van de leemsteen-mortelcombinatie VEB4-M0.



Figuur 61: Hechtsterkte combinatie VEB4-M0

Uit deze analyse en Tabel 26 blijkt dat wanneer de stenen met het legvlak één seconde in het water gedompeld worden bij montage, de coupletten een hechtsterkte bereiken van 0,1220 N/mm<sup>2</sup>. Als de coupletten vervolgens bij demontage 1' ondergedompeld worden, daalt de hechtsterkte sterk tot 0,0320 N/mm<sup>2</sup>. Verder kan geconcludeerd worden dat 1' onderdompelen bij montage de hoogste hechtsterkte oplevert (0,1538 N/mm<sup>2</sup>) en dat bij een langere onderdompeling van 15' deze waarde daalt tot 0,1263 N/mm<sup>2</sup>. Dit is geen lineair verband maar zal eerder stijgen tot een optimale onderdompelingstijd en weer dalen bij een langere onderdompelingstijd. Wel is op deze twee laatste gegevens een grote spreiding op te merken van respectievelijk 0,0296 N/mm<sup>2</sup> en 0,0438 N/mm<sup>2</sup>. Zoals hier zichtbaar en ook volgt uit [43], is de spreiding op de resultaten hoger bij een langere onderdompelingstijd bij montage.

De hechtsterkte voor de leemsteen-mortelcombinatie VEB4-M8 is zichtbaar in Figuur 62.



Figuur 62: Hechtsterkte combinatie VEB4-M8

Uit Figuur 62 en Tabel 27 volgt dat de hechtsterkte bij demontage daalt naarmate het vochtgehalte in de proefstukken stijgt. De hechtsterkte die volgt uit de bond wrench test voor de proefstukken VEB4-M8-1''-15' is het laagst en bedraagt 0,0301 N/mm<sup>2</sup>. Verder stijgt de hechtsterkte naarmate de onderdompelingstijd bij montage stijgt, waarbij de hechtsterkte voor de proefstukken VEB4-M8-15' het grootst is met 0,0905 N/mm<sup>2</sup>. Ook is de spreiding op deze resultaten kleiner (0,0015 N/mm<sup>2</sup>) dan voor de andere proefstukken.

Daarnaast is een zeer hoge spreiding van 0,0187 N/mm<sup>2</sup> op te merken voor de combinatie VEB4-M8-1''-1'. Dit komt doordat de drie identieke proefstukken van deze combinatie gelijktijdig ondergedompeld werden, maar niet op hetzelfde moment getest zijn. Hierdoor krijgt het water dat opgenomen wordt door het proefstuk de tijd om tussen de onderdompeling en de beproeving verder en dieper in de mortel te dringen, waardoor de hechtsterkte daalt. Zoals zichtbaar in Tabel 27 daalt de hechtsterkte bij deze drie identieke coupletten van 0,0888 N/mm<sup>2</sup> naar 0,0687 N/mm<sup>2</sup> en 0,0432 N/mm<sup>2</sup>. Het indringend vochtfront van deze coupletten is, in volgorde van de beproeving, zichtbaar in Figuur 63. Dit verschijnsel is veel minder merkbaar bij de combinatie VEB4-M8-1''-15' waarvan de spreiding slechts 0,0060 N/mm<sup>2</sup> bedraagt. Ook is zichtbaar in Figuur 64 dat de indringende vochtfronten zeer weinig verschillen in grootte.

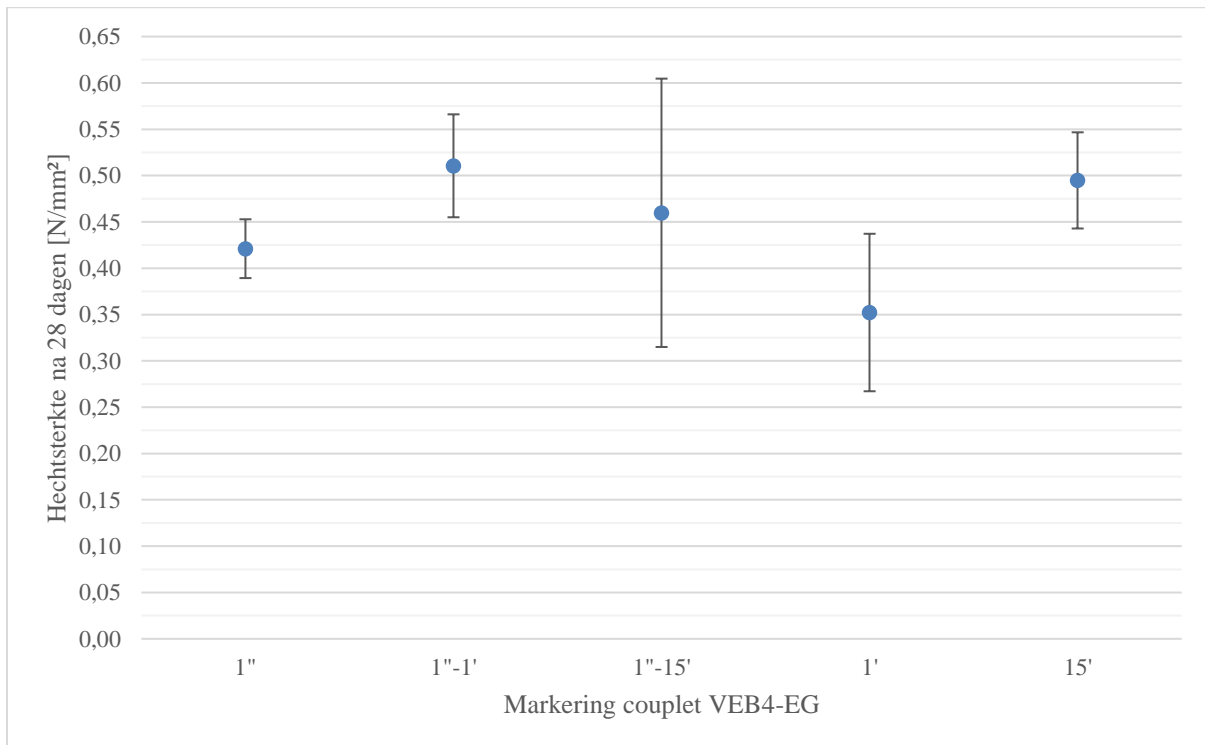


Figuur 63: Vochtfronten in mortel van couplet a) VEB4-M8-1"-1'.1, b) VEB4-M8-1"-1'.2 en c) VEB4-M8-1"-1'.3



Figuur 64: Vochtfronten in mortel van couplet a) VEB4-M8-1"-15'.1, b) VEB4-M8-1"-15'.2 en c) VEB4-M8-1"-15'.3

Daarnaast toont Figuur 65 een grafische weergave van de resultaten van de leemsteen-mortelcombinatie VEB4-EG.

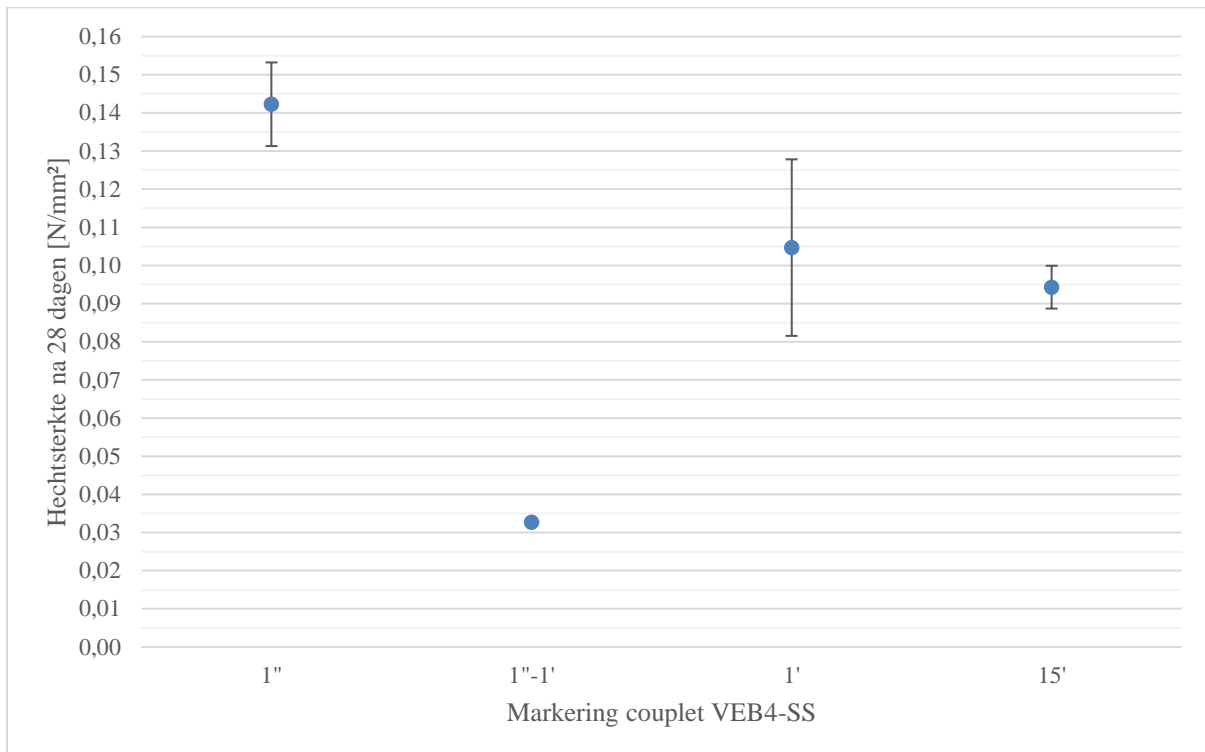


Figuur 65: Hechtsterkte combinatie VEB4-EG

Uit bovenstaande figuur en Tabel 28 kan geconcludeerd worden dat de hechtsterkte van de coupletten VEB4-EG-1''-1' de hoogste hechtsterkte bereiken van 0,5105 N/mm<sup>2</sup>. Wanneer deze coupletten van de serie 1'' niet of 15 minuten ondergedompeld worden bij demontage, ligt de hechtsterkte lager, respectievelijk een waarde van 0,4211 N/mm<sup>2</sup> en 0,5105 N/mm<sup>2</sup>. Deze laatste waarde zou mogelijks te

wijten zijn aan het feit dat verschillende coupletten van deze combinatie faalden volgens faalmodus A7 waarbij de stenen het begaven. Hierdoor zijn ook grote spreidingen zichtbaar en kan de echte hechtsterkte niet opgemeten worden. Ten slotte kan bij deze combinatie besloten worden dat de hechtsterkte toeneemt als de coupletten langer ondergedompeld worden bij montage. Zo bedragen de hechtsterktes bij 1' en 15' onderdompeling respectievelijk 0,3522 N/mm<sup>2</sup> en 0,4948 N/mm<sup>2</sup>.

Tot slot geeft Figuur 66 de hechtsterkte en de bijhorende spreiding weer voor de leemsteen-mortelcombinatie VEB4-SS.

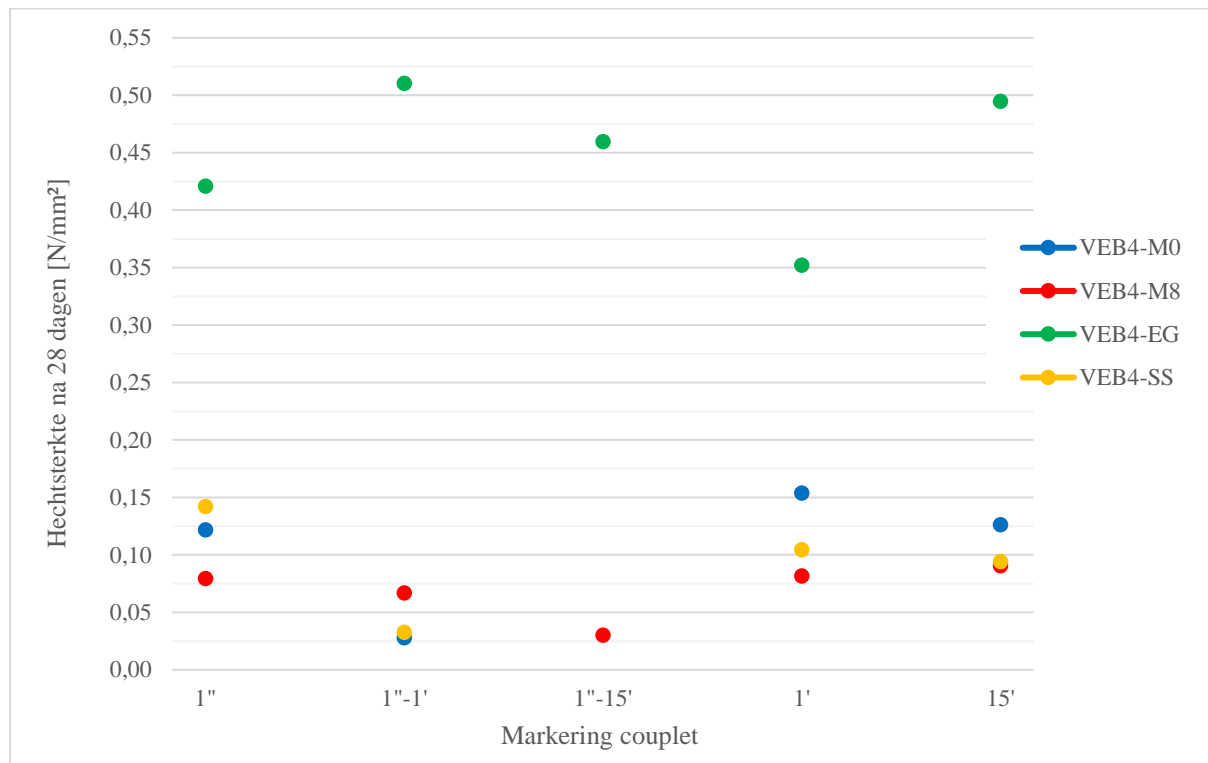


Figuur 66: Hechtsterkte combinatie VEB4-SS

In deze grafiek en in Tabel 29 is zichtbaar dat wanneer de stenen 1'' met het legvlak ondergedompeld worden bij montage een hoge hechtsterkte van 0,1423 N/mm<sup>2</sup> bereikt wordt bij droge demontage en een lage hechtsterkte van 0,0327 N/mm<sup>2</sup> bij natte demontage van 1 minuut. Ook is zichtbaar dat 1' onderdompeling bij montage voor een lagere hechting zorgt (0,1047 N/mm<sup>2</sup>) dan de dip van 1''. Ook daalt de hechting verder tot 0,0943 N/mm<sup>2</sup> bij een onderdompelingsduur van 15' bij montage. Over het algemeen kan dus besloten worden dat voor de combinatie VEB4-SS de hechting daalt als het watergehalte of de onderdompelingstijd bij montage toeneemt.

### 8.3.2 Hechtsterkte alle leemsteen-mortelcombinaties

Ook bij deze testreeks wordt een analyse gemaakt van alle leemsteen-mortelcombinaties die gemetseld werden met VEB's. De grafische weergave hiervan is zichtbaar in Figuur 67.



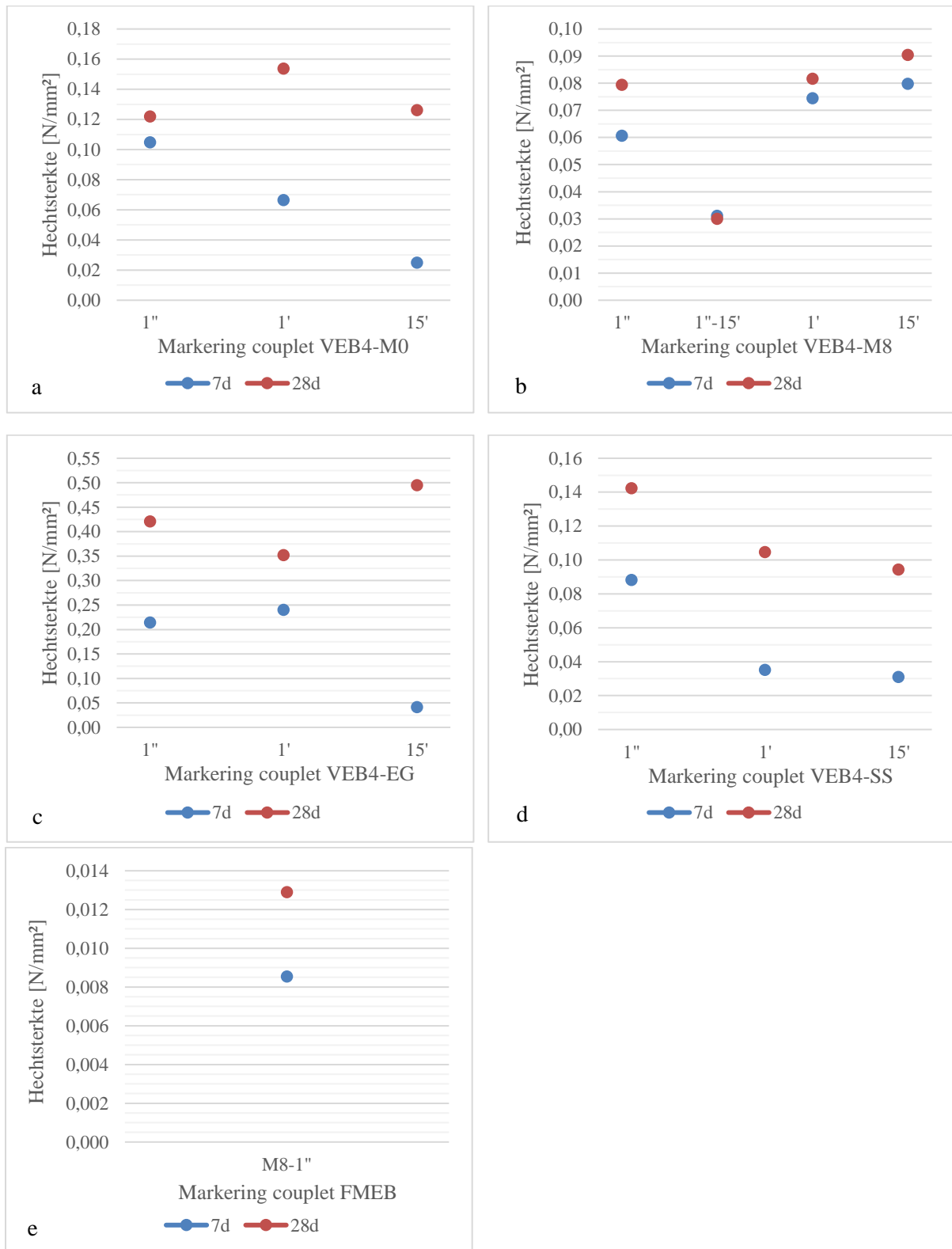
Figuur 67: Hechtsterkte na 28 dagen alle leemsteen-mortelcombinaties met VEB's

Uit deze analyse blijkt dat bij de combinaties met mortels M0, M8 en SS dezelfde trend verschijnt bij de serie 1'': hoe langer de onderdompeling bij demontage, hoe lager de hechtsterkte. Daarnaast stijgt de hechtsterkte bij de mortels M8 en EG wanneer de coupletten bij montage langer ondergedompeld worden. Bij de mortels M0 en SS is het omgekeerde verband zichtbaar. Bij deze combinaties daalt de hechtsterkte dus als de onderdompeling bij montage stijgt, zoals ook volgt uit [43]. Daarnaast kan besloten worden dat de coupletten die gemetseld worden met de leemlijmmortel veruit de hoogste hechtsterkte bereiken in alle gevallen. Ten slotte is bij de onderdompelingen bij montage (1' en 15') zichtbaar dat buiten de leemlijmmortel de mortel M0 het beste hecht, gevolgd door respectievelijk SS en M8. Dit bevestigt de analyse uit [43], waaruit blijkt dat de hechtsterkte toeneemt bij een stijgende druksterkte. Zoals weergegeven in Tabel 10 bedragen de druksterktes van de mortels M0, SS en M8 respectievelijk 2,91 N/mm<sup>2</sup>, 0,71 N/mm<sup>2</sup> en 0,58 N/mm<sup>2</sup>.



### 8.3.3 Vergelijking hechtsterkte na 7 dagen en 28 dagen

Ook zijn enkele identieke coupletten gemaakt in testreeks 2 zoals in testreeks 1. Zo kan het verschil in hechtsterkte tussen een droogtijd van 7 dagen vergeleken worden met die van 28 dagen. Dit is zichtbaar in Figuur 68.



Figuur 68: Vergelijking hechtsterkte na 7 dagen en 28 dagen van combinatie a) VEB4-M0, b) VEB4-M8, c) VEB4-EG, d) VEB4-SS en e) FMEB-M8

Uit bovenstaande figuur kan geconcludeerd worden dat de droogtijd een grote invloed heeft op de hechtsterkte. Zo blijkt dat in elk geval (met uitzondering van VEB4-M8-1''-15') de hechtsterkte significant groter is na een droogtijd van 28 dagen ten opzichte van een droogtijd van 7 dagen. Dit spreekt de analyse volgens [39] tegen, waarin staat dat de hechtsterkte al na enkele dagen constant blijft. Hierbij dient opgemerkt te worden dat bij de combinaties met VEB's de coupletten die vergeleken worden allemaal ondergedompeld worden bij montage, met uitzondering van de coupletten met markering 1''. De natte stenen vertragen dus het droogproces waardoor na 7 dagen de optimale hechtsterkte niet bereikt kan worden. Ook kan dit grote verschil tussen de hechtsterktes te wijten zijn aan de verschillende droogcondities van beide testreeksen. Zoals zichtbaar in Figuur 40 en Figuur 41 werden een deel van de proefstukken van testreeks 1 in een metalen kast geplaatst die gedurende de eerste dagen gesloten werd. Hierdoor stijgt de relatieve vochtigheid in de kast zeer snel en zou het kunnen dat tijdens het droogproces de ene steen het losgelaten vocht opneemt van de andere steen. In testreeks 2 werden de proefstukken daarentegen in de open laboruimte geplaatst zoals zichtbaar in Figuur 59.

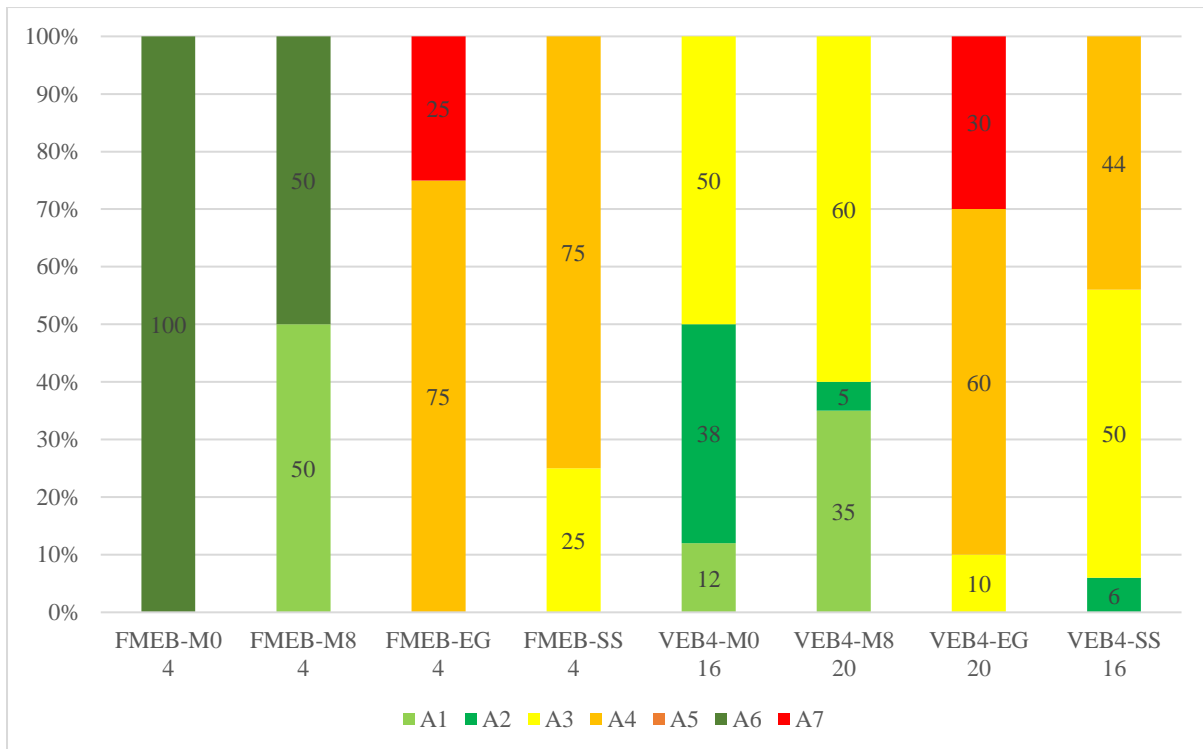
Verder kan in Figuur 68 b en d waargenomen worden dat de tendens tussen de hechtsterkte en de onderdompelingstijd enkel volledig hetzelfde is voor de combinaties VEB4-M8 en VEB4-SS. Dit zou het gevolg kunnen zijn van de stabilisatoren in beide mortels die het uithardingsproces bevorderen. Dit is vooral zichtbaar bij de combinatie met cement-gestabiliseerde leemmortel waarbij het verschil in hechtsterktes zich beperkt tot een maximum van 0,0188 N/mm<sup>2</sup>. Op deze combinatie heeft de droogperiode dus het minste invloed.

In Figuur 68 a is bij de combinatie VEB4-M0 een andere evolutie in hechtsterkte op te merken tussen de coupletten met markering 1'' en 1'. Na 28 dagen blijkt de hechtsterkte te stijgen in plaats van te dalen, zoals het geval was na 7 dagen. Ook dit kan te wijten zijn aan de korte droogperiode waarin de ondergedompelde en dus natte stenen het droogproces van de ongestabiliseerde mortel vertragen. Na 28 dagen is de mortel zodanig verhard dat het water bij onderdompeling van de coupletten minder diep kan indringen in de mortel dan bij onderdompeling na 7 dagen, wat ervoor zorgt dat het midden van de mortelvoeg droog blijft en het demonteren van de stenen niet in dezelfde mate vereenvoudigd wordt dan bij onderdompeling na 7 dagen. Verder is zichtbaar dat het couplet VEB4-EG-15' een zeer lage hechtsterkte bereikt na 7 dagen ten opzichte van die na 28 dagen. Dit wijst op het feit dat dit couplet nog absoluut niet droog was na 7 dagen waardoor de hechtsterkte sterk afneemt. Ten slotte is zichtbaar in Figuur 68 e dat ook de hechtsterkte van de coupletten bestaande uit FMEB's hoger is na 28 dagen ten opzichte van die na 7 dagen.

## 8.4 Analyse faalmodi

### 8.4.1 Algemene analyse

Figuur 69 geeft een algemene analyse weer van de faalmodi voor testreeks 2. Voor elke leemsteen-mortelcombinatie wordt het percentage van het aantal keer dat een faalmodus voorkomt gevisualiseerd. Net zoals in testreeks 1 dient in testreeks 2 opgemerkt te worden dat het aantal coupletten per combinatie sterk verschilt, waardoor dit de interpretatie van de percentages kan beïnvloeden. Ook hier wordt dus het aantal coupletten waarvan de faalmodi geanalyseerd kon worden weergegeven op de x-as.



Figuur 69: Algemene analyse faalmodi testreeks 2

Uit de analyse in Figuur 69 volgt dat alle proefstukken bestaande uit de frogged MEB's met ongestabiliseerde leemmortel (FMEB-M0) falen volgens faalmodus A6. Hierbij treedt de breuk op ter hoogte van het grensvlak tussen de mortel en de onderste frogged steen. Wanneer de frogged stenen worden gemetseld met gestabiliseerde leemmortel (FMEB-M8) dan faalt de helft van de proefstukken volgens faalmodus A1 en de helft van de proefstukken volgens A6. Beide combinaties met hun faalmodi zijn weergegeven in Figuur 70.

Ten tweede volgt uit de analyse van de faalmodi van de proefstukken die gemetseld zijn met de frogged MEB's dat leemlijmmortel (FMEB-EG) een negatieve invloed heeft op het recuperatiepotentieel van het metselwerk. Bij 25% van de proefstukken is de bovenste steen beschadigd (faalmodus A7) en bij 75% van de proefstukken zal de mortel verwijderd moeten worden van beide stenen (faalmodus A4), zoals zichtbaar in Figuur 71. Verder zorgt het metselen met sodiumsilicaat-gestabiliseerde mortel (FMEB-SS) ervoor dat 75% van de proefstukken faalt volgens A4 en 25% volgens A3. Hier zal dus bij het zuiver maken van de stenen bij driekwart van de proefstukken de mortel verwijderd moeten worden van beide stenen. Deze faalmodi zijn visualiseerbaar in Figuur 72.

Ten vierde hebben de coupletten VEB4-M0 en VEB4-M8 gelijkaardige faalmodi die voorkomen in gelijkaardige percentages. In 50% van de gevallen komt de faalmodus A3 voor bij de proefstukken met ongestabiliseerde mortel. Voor de proefstukken met cement-gestabiliseerde mortel bedraagt dit percentage 60%. De rest van de proefstukken van het type VEB4-M0 en VEB4-M8 falen volgens faalmodi A1 en A2 waarbij telkens één steen volledig mortelvrij is. Beide faalmodi zijn zichtbaar in respectievelijk Figuur 73 en Figuur 74.

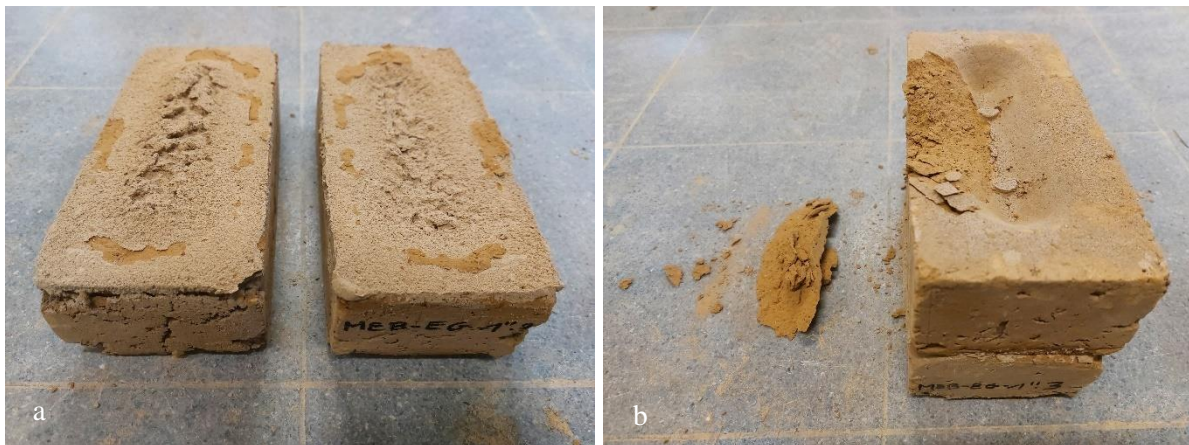
Vervolgens toont Figuur 69 dat de vibro-gecompacteerde leemstenen in combinatie met de leemlijmmortel (VEB4-EG) in 30% van de gevallen falen volgens faalmodus A7, wat wederom ongewenst is voor het recuperatiepotentieel wanneer een hefboom gebruikt wordt. Verder falen meer

dan de helft van de VEB4-EG coupletten volgens faalmodus A4. In 10% van de gevallen komt faalmodus A3 voor. Deze voorkomende faalmodi zijn weergegeven in Figuur 75.

Ten slotte volgt uit de algemene analyse dat de helft van de proefstukken van het type VEB4-SS falen volgens faalmodus A3. In 44% van de gevallen treedt de breuk op in de mortel (faalmodus A4) en bij 6% van de proefstukken is de onderste steen van het couplet mortelvrij (faalmodus A2), zoals zichtbaar in Figuur 76.



Figuur 70: Visualisatie faalmodi a) combinatie FMEB-M0 faalmodus A6, b) combinatie FMEB-M8 faalmodus A6 en c) combinatie FMEB-M8 faalmodus A1



Figuur 71: Visualisatie faalmodi combinatie FMEB-EG a) faalmodus A4 en b) faalmodus A7



Figuur 72: Visualisatie faalmodi combinatie FMEB-SS a) faalmodus A3 en b) faalmodus A4





Figuur 73: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-M0 a) faalmodus A1, b) faalmodus A2 en c) faalmodus A3



Figuur 74: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-M8 a) faalmodus A1, b) faalmodus A2 en c) faalmodus A3



Figuur 75: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-EG a) faalmodus A3, b) faalmodus A4 en c) faalmodus A7

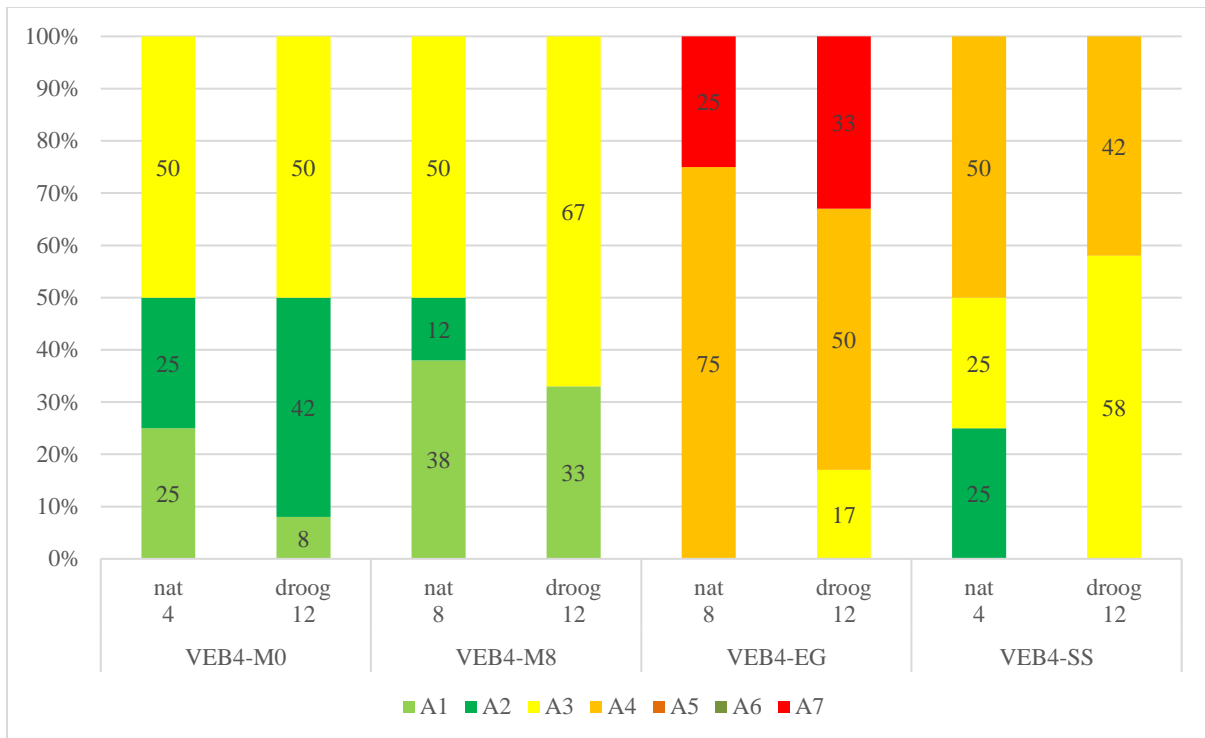


Figuur 76: Visualisatie faalmodi combinatie VEB4-SS a) faalmodus A2, b) faalmodus A3 en c) faalmodus A4

### 8.4.2 Invloed van water bij demontage op faalmodi

Figuur 77 geeft een vergelijking weer tussen de faalmodi bij demontage in droge en natte toestand voor elk type proefstuk. Zoals in testreeks 1 worden in testreeks 2 enkel de coupletten bestaande uit de vibrogecompacteerde leemstenen weergegeven vermits de frogged MEB's niet ondergedompeld worden bij demontage. De x-as geeft het aantal coupletten per combinatie weer.





Figuur 77: Faalmodi demontage coupletten in droge en natte toestand testreeks 2

Uit Figuur 77 volgt dat voor VEB4-M0 weinig verschillen zijn waar te nemen in percentages waarin de faalmodi voorkomen. Zowel in droge als in natte toestand faalt de helft van de proefstukken volgens faalmodus A3. Verder komt bij demontage na onderdompeling faalmodus A2 17% meer voor dan demontage in droge toestand. Voor de VEB4-M8 coupletten zijn de faalmodi bij demontage in droge toestand gelijkaardig aan de faalmodi bij demontage na onderdompeling. In droge toestand komt faalmodus A2 12% voor. Na onderdompeling komt deze faalmodus bij de proefstukken in natte toestand niet meer voor.

Vervolgens volgt uit de vergelijking droge-natte toestand van de VEB4-EG coupletten dat het percentage aan schadegevallen aan de steen (faalmodus A7) stijgt van 25% naar 33%. Het aandeel proefstukken dat faalt volgens faalmodus A4 daarentegen daalt van 75% naar 50%. Verder komt faalmodus A3 voor bij 17% van de coupletten die gedemonteerd worden in natte toestand. Ten slotte kan voor VEB4-SS vastgesteld worden dat het percentage dat overeenkomt met faalmodus A3 bij demontage in natte toestand meer dan dubbel zo hoog is dan bij demontage in droge toestand. Ook kan geconstateerd worden dat de faalmodus A2 enkel voorkomt bij demontage in droge toestand (25%). Het percentage voor faalmodus A4 is bij demontage in natte toestand 8% lager dan bij demontag in droge toestand.

### 8.4.3 Vergelijking faalmodi na 7 dagen en 28 dagen

Wanneer de faalmodi na 7 en 28 dagen met elkaar vergeleken worden (respectievelijk Figuur 49 en Figuur 69), worden weinig verschillen geconstateerd. Zo zijn bij de combinatie FMEB-M0 na beide termijnen alle faalmodi gelijk aan modus A6. Bij de combinatie FMEB-M8 daalt het aandeel van faalmodus A6 van 78% (na 7 dagen) naar 50% (na 28 dagen). Toch heeft deze daling weinig betekenis binnen het circulaire aspect aangezien de andere optredende faalmodus A1 even gewenst is als faalmodus A6.

Verder blijkt uit beide figuren dat bij de VEB's met ongestabiliseerde en cement-gestabiliseerde leemmortel het aandeel aan faalmodus A3 sterk toeneemt, respectievelijk met 33% en 43%. Bij de combinatie VEB4-M8 gaat deze stijging van faalmodus A3 ten koste van de minder gewenste faalmodi A4 en A7. Ten slotte zijn bij de leemsteen-mortelcombinaties VEB4-SS en VEB4-EG geen significante verschillen op te merken tussen de faalmodi die bereikt worden na 7 dagen en 28 dagen.

## 8.5 Manuele demontage

Zoals eerder kort besproken worden in testreeks 2 vier identieke coupletten gemetst van elke specifieke combinatie. Op dit vierde couplet wordt een iteratief proces toegepast om zo verschillende demontagetechnieken uit te proberen die in de praktijk eenvoudig toepasbaar zijn. Dit proces bestaat uit vijf verschillende methoden die in een vastgelegde volgorde getest worden op de coupletten tot deze gedemonteerd zijn.

De vijf verschillende methodes zijn demonteren met:

- de hand;
- een stenenklem;
- een korte klem (hefboomsarm van 65 cm)
- een lange klem (hefboomsarm van 100 cm)
- hamer (en beitel).

De stenenklem, de korte en de lange klem zijn zichtbaar in Figuur 78.



*Figuur 78: Klemmen gebruikt voor iteratief demontageproces a) stenenklem, b) korte klem en c) lange klem*

De proefstukken werden bij dit proces ingeklemd in de bankschroef om zo het inklemmend gedrag van een steen in metselwerk te benaderen. Tijdens het uitvoeren van deze testen kon opgemerkt worden dat met de stenenklem geen kracht uitgeoefend kon worden op de stenen. Bij een kleine uitgeoefende kracht verschoof het verstelbare gedeelte van deze klem waardoor geen grip vastgehouden kon worden.

Tabel 30 geeft de resultaten weer van dit iteratief proces. Per couplet wordt daarin met een 'X' aangeduid bij welke methode uit dit proces het proefstuk het heeft begeven en de twee stenen uit elkaar gehaald kunnen worden. Om de moeilijkheidsgraad van de handeling te visualiseren worden meerdere X'en gebruikt om een moeizamere handeling aan te duiden. De kolom van de grijper is omwille van bovenvermelde reden grijs gemarkeerd en wordt dus niet in rekening gebracht. Verder is ook de faalmodus van elk couplet weergegeven in deze tabel.



Tabel 30: Resultaten iteratief proces

Coupletten	hand	grijper	korte klem	lange klem	hamer (en beitel)	faalmodus
FMEB						
FMEB-M0-1".4	X					A6
FMEB-M8-1".4	X					A6
FMEB-SS-1".4	XX					A4
FMEB-EG-1".4			XX			A4
VEB4-M0						
VEB4-M0-1".4			X			A2
VEB4-M0-1"-1'.4			X			A3
VEB4-M0-1'.4			X			A2
VEB4-M0-15'.4			X			A3
VEB4-M8						
VEB4-M8-1".4			X			A1
VEB4-M8-1"-1'.4			X			A3
VEB4-M8-1"-15'.4			X			A3
VEB4-M8-1'.4			X			A3
VEB4-M8-15'.4			X			A3
VEB4-EG						
VEB4-EG-1".4					XX	A3
VEB4-EG-1"-1'.4					XX	A4
VEB4-EG-1"-15'.4					XX	A4
VEB4-EG-1'.4					XX	A7
VEB4-EG-15'.4					XX	A3
VEB4-SS						
VEB4-SS-1".4				X		A3
VEB4-SS-1"-1'.4	XX					A4
VEB4-SS-1'.4				X		A3
VEB4-SS-15'.4	XX					A3

Zoals hierboven zichtbaar zijn de combinaties FMEB-M0, FMEB-M8 en FMEB-SS met de hand demonteerbaar wanneer de onderste steen ingeklemd wordt. Bij de ongestabiliseerde leemmortel en de cement-gestabiliseerde leemmortel is zeer weinig kracht nodig en wordt faalmodus A6 verkregen, terwijl de handmatige demontage bij de combinatie FMEB-SS meer kracht vereist en faalmodus A4 oplevert. Het couplet met de leemlijmmortel is niet demonteerbaar met de hand en wordt met de korte klem en een hefboomeffect losgemaakt. Ook deze combinatie levert faalmodus A4 op.

Daarnaast worden de coupletten uit de reeks VEB4-M0 alle vier met de korte klem gedemonteerd waarbij weinig kracht nodig is. Hierbij wordt faalmodus A2 verkregen bij de coupletten die droog gedemonteerd worden en faalmodus A3 bij de coupletten die ondergedompeld worden bij demontage. In beide gevallen faalt het proefstuk dus tussen de mortel en de stenen. Vervolgens wordt dezelfde demontagemethode toegepast op alle proefstukken uit de combinatie VEB4-M8. Dit levert in alle gevallen, met uitzondering van couplet VEB4-M8-1".4, faalmodus A3 op.

Verder kunnen de proefstukken met de leemlijmmortel met geen enkele klem gedemonteerd worden. Wanneer de hamer en de beitel gebruikt worden, geraken de stenen beschadigd door de sterk

geconcentreerde puntlast van de beitel. Wel kunnen deze coupletten op een alternatieve wijze en zonder (veel) beschadiging van de stenen gedemonteerd worden. Hierbij wordt het couplet met de zijkant op de tafel geplaatst en wordt met een rubberen hamer op de lange zijde van één van de twee stenen geslagen. Door de sterke schokbelasting lossen beide stenen zonder veel schade na enkele slagen. Bij deze proeven worden vooral faalmodi A3 en A4 bekomen, met een uitzondering van faalmodus A7 bij het proefstuk VEB4-EG-1'.4. Deze faalmodus werd bekomen na een poging tot demontage met de lange klem. De moeizame demontage aan de hand van dit iteratief proces komt overeen met de hoge hechtsterktes die verkregen werden uit de bond wrench testen van deze combinatie.

Ten slotte zijn bij de combinatie VEB4-SS twee coupletten handmatig gedemonteerd, waarbij veel kracht nodig is. De andere twee coupletten zijn met de lange klem gedemonteerd waarbij slechts een kleine kracht vereist is. Drie keer faalmodus A3 en één keer faalmodus A4 worden hierbij bekomen.

## 8.6 Zuiveringsproces

Nadat alle coupletten gedemonteerd zijn, wordt iedere steen zuivergemaakt en wordt dit proces gedocumenteerd. Op deze manier kan een analyse gemaakt worden van hoe snel en eenvoudig de mortel van de steen verwijderd kan worden zodat een zuivere steen aan het einde van dit proces overblijft. Deze stenen kunnen dan op het einde van hun gebruiksfase hergebruikt worden in een volgende leemsteenmetselwerk wand.

Dit zuiveringsproces gebeurt aan de hand van twee stappen waarbij ten eerste de mortel verwijderd wordt met hamer en spatel en indien nodig, in een tweede stap de steen zuiver geborsteld wordt met een staalborstel. Het gebruikte materiaal is zichtbaar in Figuur 79 a en het effect van de staalborstel op het steenoppervlak is ter illustratie zichtbaar in Figuur 79 b.



*Figuur 79: a) gebruikte materiaal (staalborstel, hamer en spatel) en b) effect van staalborstel op steenoppervlak*

Hoe goed de mortel verwijderd wordt van de steen wordt per specifieke combinatie beoordeeld aan de hand van een kleurensysteem. Het gebruik van hamer en spatel kent vier gradaties terwijl voor de staalborstel enkel aangeduid wordt of dit materiaal nodig is of niet. De verklaring van elke beoordelingsgradatie is zichtbaar in Tabel 31.

Tabel 31: Legende beoordeling materiaalgebruik

Hamer en spatel		mortel is zeer snel/eenvoudig verwijderbaar
		mortel is snel/eenvoudig verwijderbaar
		mortel is traag/moeilijk verwijderbaar
		mortel is zeer traag/moeilijk tot niet verwijderbaar
staalborstel		staalborstel is niet nodig
		staalborstel is nodig

Hierbij kan vermeld worden dat bij de hamer en spatel de kleuren groen, geel en oranje ongeveer overeenkomen met een zuiveringstijd van respectievelijk 5 sec, 10 sec en 20 sec. Het is belangrijk hierbij te vermelden dat deze cijfers enkel als indicatief beschouwd mogen worden en niet volgen uit een exacte timing.

De resultaten van deze zuiveringsprocedure zijn terug te vinden in Tabel 32.

Tabel 32: Resultaten zuiveringsproces

Combinatie	hamer en spatel	staalborstel
FMEB		
FMEB-M0-1"		
FMEB-M8-1"		
FMEB-SS-1"		
FMEB-EG-1"		
VEB4-M0		
VEB4-M0-1"		
VEB4-M0-1"-1'		
VEB4-M0-1'		
VEB4-M0-15'		
VEB4-M8		
VEB4-M8-1"		
VEB4-M8-1"-1'		
VEB4-M8-1"-15'		
VEB4-M8-1'		
VEB4-M8-15'		
VEB4-EG		
VEB4-EG-1"		
VEB4-EG-1"-1'		
VEB4-EG-1"-15'		
VEB4-EG-1'		
VEB4-EG-15'		
VEB4-SS		
VEB4-SS-1"		
VEB4-SS-1"-1'		
VEB4-SS-1'		
VEB4-SS-15'		



Uit de resultaten van de FMEB's blijkt dat de ongestabiliseerde leemmortel zeer makkelijk te verwijderen is met hamer en spatel en dat het gebruik van de staalborstel niet nodig is. Na de bond wrench test blijkt de onderste steen al volledig zuiver te zijn, zoals zichtbaar in Figuur 80. Verder is ook de cement-gestabiliseerde mortel zeer makkelijk te verwijderen met hamer en spatel. Wel is hier de staalborstel nodig om de morteldeeltes die in de poriën van de steen gedrongen zijn te verwijderen. Dit proces is zichtbaar in Figuur 81. In de hierboven besproken gevallen breekt de mortel af in relatief grote stukken, zoals ook te zien is in beide figuren. Vervolgens verloopt de met sodiumsilicaat gestabiliseerde mortel verwijderen moeizamer. Vooral de mortel uit de holte van de frogged steen halen is moeilijk, waardoor deze combinatie een oranje kleur krijgt. De staalborstel is ook in dit geval nodig en het zuiveringsproces is weergegeven in Figuur 82. Verder blijkt het zeer moeilijk om de FMEB's met leemlijmmortel zuiver te krijgen. Doordat deze mortel zeer dun is en het steenoppervlak ruw is, is het onderscheid tussen de mortel en de stenen zeer onduidelijk. Ook kon de leemlijmmortel in dit geval niet uit de holtes van de frogged stenen verwijderd worden, waardoor deze stenen niet gerecupereerd kunnen worden en de combinatie de kleur rood krijgt. Dit probleem is ook zichtbaar in Figuur 83.

Uit de analyse van de VEB's blijkt dat in elk geval de staalborstel nodig is om de mortelrestjes te verwijderen van het steenoppervlak. De combinatie met ongestabiliseerde leemmortel blijkt zeer goed zuiver te maken waardoor het de kleurcode groen krijgt. De mortel breekt in dit geval af in relatief grote stukken, zoals zichtbaar in Figuur 84. Daarnaast zijn de VEB's met cement-gestabiliseerde leemmortel iets moeilijker zuiver te krijgen dan de FMEB's met cement-gestabiliseerde leemmortel. De kleur geel wordt hieraan toegekend en het zuiveringsproces is zichtbaar in Figuur 85. Verder is de leemlijmmortel moeilijk verwijderbaar. Doordat deze mortel zeer dun is kan de hamer niet gebruikt worden en wordt de mortel enkel afgeschraapt met de spatel. Het resultaat hiervan is zichtbaar in Figuur 86. Daarnaast blijken de coupletten met sodiumsilicaat-gestabiliseerde mortel makkelijk zuiver te krijgen. Wanneer de coupletten bij demontage ondergedompeld worden, blijkt dit het zuiveringsproces te bevorderen. In enkele gevallen is de hamer niet nodig en kunnen de deeltjes mortel gewoon afgeschraapt worden met de spatel. Deze combinatie is zichtbaar in Figuur 87. Ten slotte blijken de VEB's eenvoudiger af te borstelen dan de FMEB's. Dit komt door het onregelmatige en korrelige oppervlak van de handvormstenen.



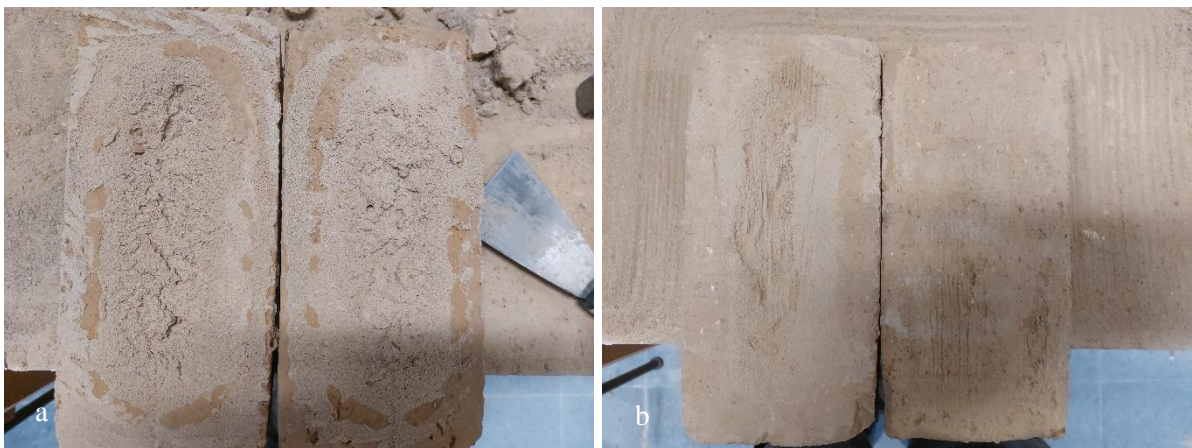
Figuur 80: Combinatie FMEB-M0 a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken



*Figuur 81: Combinatie FMEB-M8 a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken*



*Figuur 82: Combinatie FMEB-SS a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken*



*Figuur 83: Combinatie FMEB-EG a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken*





Figuur 84: Combinatie VEB4-M0 a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken



Figuur 85: Combinatie VEB4-M8 a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken



Figuur 86: Combinatie VEB4-EG a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken





*Figuur 87: Combinatie VEB4-SS a) voor zuiver maken en b) na zuiver maken*

Ten slotte zijn alle zuivergemaakte vibro-compactiestenen zichtbaar in Figuur 88. Doordat in geen enkel geval schade optreedt tijdens het zuiveringsproces, kunnen de stenen in deze toestand gerecupereerd worden in nieuw leemsteenmetselwerk.



*Figuur 88: Alle zuiver gemaakte vibro-compactieleemstenen*





## 9 Besluit

Dit onderzoek had als doel om de demontagecapaciteit en het recuperatiepotentieel van ongebakken leemsteenmetselwerk te onderzoeken. Dit werd geanalyseerd aan de hand van de hechtsterkte van het metselwerk, de resulterende faalmodi, een manuele demontage en het zuiveringsproces van de afzonderlijke stenen. Ook de invloed van water op dit recuperatiepotentieel werd onderzocht.

Het hoogste recuperatiepotentieel wordt verkregen bij de leemstenen gecombineerd met ongestabiliseerde en cement-gestabiliseerde leemmortel. Zo wordt bij de combinaties FMEB-M0 en FMEB-M8 de laagste hechtsterkte bekomen wat wijst op een goede demontagecapaciteit. Ook worden bij deze leemsteen-mortelcombinaties de meest gewenste faalmodi verkregen waarbij de mortel slechts verwijderd dient te worden van één steen. Verder blijken deze frogged handvormstenen in combinatie met ongestabiliseerde leemmortel het eenvoudigst zuiver te maken, waarbij geen staalborstel vereist is. Bij de combinatie FMEB-M8 moet het steenoppervlak wel afgeborsteld worden maar verloopt het zuiveringsproces ook zeer snel. Ook bij de vibro-compactielemstenen is het recuperatiepotentieel het hoogst wanneer de stenen gemetst worden met ongestabiliseerde leemmortel (VEB4-M0). Zo daalt de hechtsterkte wanneer water toegevoegd wordt bij (montage en demontage). Verder vertoont deze combinatie de meest gewenste faalmodi van de VEB's, waarbij in de helft van de gevallen na beproeving al één steen mortelvrij is. Ten slotte verloopt ook het zuiveringsproces het eenvoudigst bij de leemsteen-mortelcombinatie VEB4-M0.

Verder wordt besloten dat de FMEB's met de mortels M0, M8 en SS het meest eenvoudig met de hand gedemonteerd worden vermits de hechtsterktes van de respectievelijke leemsteen-mortelcombinaties laag genoeg zijn om de stenen manueel van elkaar te nemen. Daarentegen is voor de demontage van de VEB's wel gereedschap nodig om de muur te ontmantelen. Uit dit onderzoek blijkt dat voor de demontage van de coupletten VEB4-M0 en VEB4-M8 een kleine hefboom nodig is zodat de stenen onbeschadigd van elkaar komen. Hiervoor werd een klem gebruikt die telkens opnieuw afgesteld moest worden op de steen. In de toekomst zou een eenvoudig apparaat ontwikkeld kunnen worden waarbij maar één keer de klem afgesteld moet worden op de steen en zo het rendement tijdens het demonteren aanzienlijk zal stijgen. Wel dient opgemerkt te worden dat dit onderzoek voornamelijk de nadruk gelegd heeft op een hefboom maar er zou evenwel geopteerd kunnen worden om de stenen (van de VEB4-M0 en VEB4-M8 coupletten) met een rubberen hamer los te tikken.

Daarnaast heeft water, zowel bij montage als demontage, in verschillende gevallen een gunstig effect op het hergebruik van ongebakken leemsteenmetselwerk. Zo daalt de hechtsterkte van de leemsteen-mortelcombinaties VEB4-M0 en VEB4-SS wanneer water toegevoegd wordt in de constructiefase. Ook zorgt een langere onderdompelingstijd bij demontage voor een lagere hechtsterkte bij de vibro-compactiestenen gecombineerd met M0, M8 en SS. Hierbij valt wel op dat bij de combinatie VEB4-M8 de indringingstijd die water heeft tussen het onderdompelen en het beproeven een grote invloed heeft op de hechtsterkte: hoe meer tijd hiertussen, hoe lager de hechtsterkte is en dus hoe interessanter voor de demontagecapaciteit. Vervolgens blijkt dat het gunstig effect van water ook betrekking heeft op de faalmodi. Zo worden bij de combinatie VEB4-SS gewenste faalmodi verkregen wanneer de proefstukken bij demontage langer ondergedompeld worden, waardoor ook het zuiveringsproces van deze coupletten eenvoudiger verloopt. Bij de proefstukken met ongestabiliseerde leemmortel is dit effect niet op te merken.

Vervolgens volgt uit dit onderzoek dat de leemlijmmortel eerder afgeraden wordt wanneer deze gebruikt wordt in een muur die op latere leeftijd gedemonteerd moet worden. De leemlijmmortel heeft veruit de hoogste hechtsterkte (zowel bij FMEB als VEB4) wat zorgt voor enerzijds een hoge energievereiste tijdens demontage en anderzijds een hoog risico op beschadigde stenen. Zowel bij de coupletten met de frogged handvormstenen als bij de coupletten met vibro-gecompacteerde stenen kwam faalmodus A7 vaak voor. Het risico op gebroken stenen neemt zelfs toe wanneer de coupletten ondergedompeld worden tijdens demontage. Ook het zuiver maken van de stenen na demontage verloopt moeizaam door de hoge hechtsterkte van de leemlijmmortel. Afbraak en recyclage van metselwerk met leemlijmmortel zouden dus een betere optie zijn binnen het kader van een circulaire economie.

Ook volgt uit deze scriptie dat de combinaties met solide MEB's een lagere hechting hebben dan de combinaties met frogged MEB's (FMEB's). Al dient wel opgemerkt te worden dat deze conclusie enkel getrokken kan worden op basis van de enige drie meetbare resultaten van de coupletten FMEB-M8-v-1". Ten slotte wordt besloten dat de hechtsterkte na een droogtijd van 28 dagen groter is dan de hechtsterkte na een droogtijd van 7 dagen. Ook is op te merken dat de resultaten van de combinaties VEB4-M0 en VEB4-EG na 7 dagen andere verbanden aantonen dan de resultaten na 28 dagen. Zo is het effect van water bij demontage na 7 dagen veel groter dan bij demontage na 28 dagen.

Voor verder onderzoek kan aanbevolen worden een droogtijd van 28 dagen voor alle proefstukken te respecteren. Bij verkorting hiervan dient de conditionering van de droogomgeving op de juiste manier te gebeuren, wat niet het geval was in testreeks 1 van dit onderzoek. Ook blijkt dat na 28 dagen de spreiding op de resultaten in sommige gevallen relatief groot is. Bij verder onderzoek is het dus aan te bevelen meer identieke proefstukken te vervaardigen en te testen, om zo een nauwkeurigere statistische analyse uit te kunnen voeren. De Europese standaard van de bond wrench test schijft een lot van tien identieke proefstukken voor.

## Bibliografie

- [1] G. Luiz Fritz Benachio, M. do Carmo Duarte Freitas en S. Fernando Tavares, „Circular economy in the construction industry: A systematic literature review,” Elsevier, 2020.
- [2] F. Pomponi en A. Moncaster, „Circular economy for the built environment: A research framework,” Elsevier, 2017.
- [3] Q. Piattoni, E. Quagliarini en S. Lenci, „Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks,” Elsevier, 2011.
- [4] „Ellen Macarthur Foundation,” [Online]. Available: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>. [Geopend 5 December 2022].
- [5] D. Reike, W. J.V. Vermeulen en S. Witjes, „The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options,” Elsevier, 2018.
- [6] E. Pelicaen, B. Janssens en E. Knapen, „Circular building with raw earth: A qualitative assessment of two cases in Belgium,” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021.
- [7] OVAM, „24 Ontwerprichtlijnen Veranderingsgericht Bouwen,” [Online]. Available: [www.lne.be/bouw-gezond](http://www.lne.be/bouw-gezond). [Geopend 5 December 2022].
- [8] J. Fernandes, M. Peixoto, R. Mateus en H. Gervásio, „Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks,” Elsevier, 2019.
- [9] H. Schroeder, Sustainable building with earth, Springer, 2015.
- [10] „A Guide to Rammed Earth Construction - First In Architecture,” [Online]. Available: <https://www.firstinarchitecture.co.uk/rammed-earth-construction/>. [Geopend 16 Augustus 2022].
- [11] „Rammed earth walls: natural and sustainable living,” [Online]. Available: <https://risedesignstudio.co.uk/blog/index.php/2019/04/15/rammed-earth-walls/>. [Geopend 16 Augustus 2022].
- [12] „Green Architecture & Building Products,” [Online]. Available: <https://www.solaripedia.com/713/25/material.html>. [Geopend 16 Augustus 2022].
- [13] I. Pritchett, „Wattle and Daub,” [Online]. Available: <https://www.buildingconservation.com/articles/wattleanddaub/wattleanddaub.htm>. [Geopend 16 Augustus 2022].
- [14] „How I Made my Wattle and Daub Bathroom,” [Online]. Available: <https://www.themudhome.com/wattle-and-daub.html>. [Geopend 16 Augustus 2022].
- [15] D. A. Niza, C. P. Sales, M. Quattrone, R. G. Pileggi en S. C. Angulo, „Laboratory Compaction Method for Dry-Consistency Concretes.,” ACI Materials Journal, 2022.
- [16] A. . M. A. Alsakkaf, „The effects of different properties of limestone on the mechanical properties of adobe,” B. ENG(HONS.) CIVIL ENGINEERING, 2019.

- [17] „Building with the Adobe Brick Technique,” [Online]. Available: <https://www.solidearth.co.nz/earthbuilding-information/building-with-adobe-brick-technique/>. [Geopend 16 Augustus 2022].
- [18] „Compressed Soil Earth Brick,” Indiamart, [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/compressed-soil-earth-brick-21111463391.html>. [Geopend 16 Augustus 2022].
- [19] H. Guillaud, T. Joffroy en P. Odul, „Compressed Earth Blocks: Manual of Design and Construction,” CRATerre- EAG, 1995.
- [20] K. van Balen, B. van Bommel, R. van Hees, M. van Hunen, J. van Rhijn en M. van Rooden, Kalkboek: het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden, 2003.
- [21] K.-H. Yang, J.-K. Song, A. F. Ashour en E.-T. Lee, „Properties of cementless mortars activated by sodium silicate,” Elsevier, 2008.
- [22] „Lime Mortar | Haired & Unhaired Lime Putty Mortar.,” [Online]. Available: <https://www.mikewye.co.uk/product/lime-mortar/>. [Geopend 20 Augustus 2022].
- [23] A. O. Pintea en D. L. Manea, „New types of mortars obtained by adding traditional mortars with natural polymers to increase physico-mechanical performances,” Elsevier, 2019.
- [24] G. Minke, Building with Earth, Birkhäuser, 2013.
- [25] E. Avrami, H. Guillaud en M. Hardy, Terra Literature Review-An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation, The Getty Conservation Institute, 2008.
- [26] „BC Materials,” [Online]. Available: [https://www.bcmaterials.org/en\\_32\\_products.html](https://www.bcmaterials.org/en_32_products.html).
- [27] B. V. V. Reddy, „Compressed Earth Block & Rammed Earth Structures,” Springer, 2022.
- [28] P. Walker en T. Stace, „Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars,” Springer, 1997.
- [29] B. V. V. Reddy en A. Gupta, „Strength and Elastic Properties of Stabilized Mud Block Masonry Using Cement-Soil Mortars,” ASCE Library, 2006.
- [30] „NBN EN 1052-5: Methods of test for masonry - Part 5: Determination of bond strength by the bond wrench method.,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/266104?l=E>. [Geopend 21 Februari 2023].
- [31] „NBN EN 1015-3: Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/165395?l=E>. [Geopend 21 Februari 2023].
- [32] „NBN EN 1015-7: Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar.,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/106269?l=E>. [Geopend 21 Februari 2023].
- [33] „NBN EN 1015-11: Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/577942?l=E>. [Geopend 21 Februari 2023].
- [34] „NBN EN 998-2: Specification for mortar for masonry - Part 2: Masonry mortar.,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/561478?l=E>. [Geopend 21 Februari 2023].

- [35] „NBN EN 1015-2: Proeven voor metselmortel - Deel 2: Monsterneming van mortels en aanmaken van proefmortels,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/106266?l=E>. [Geopend 7 april 2023].
- [36] „NBN EN 772-10: Methods of test for masonry units - Part 10: Determination of moisture content of calcium silicate and autoclaved aerated concrete units.,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/106483?l=E>. [Geopend 21 Februari 2023].
- [37] „NBN EN 772-11: Metselsteenproeven - Deel 11: Bepaling van de capillaire waterabsorptie van betonmetselstenen, cellenbetonsteen, metselstenen van kunststeen en natuursteen, alsook van de initiële waterabsorptie van metselbaksteen,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/400610?l=E>. [Geopend 0 April 2023].
- [38] „NBN EN 772-21: Metselsteenproeven - Deel 21: Bepaling van de waterabsorptie van metselbaksteen en kalkzandsteen door koud-water-absorptie,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/400613?l=E>. [Geopend 7 April 2023].
- [39] P. Walker, „Bond Characteristics of Earth Block Masonry,” ASCE Library, 1999.
- [40] „joostdevree.nl,” [Online]. Available: [https://www.joostdevree.nl/shtmls/baksteen\\_fabricage.shtml#drogen](https://www.joostdevree.nl/shtmls/baksteen_fabricage.shtml#drogen). [Geopend 21 Februari 2023].
- [41] K. Stathopoulos, M. Apostolopoulou en A. Bakolas, „Enhancement of water resistance of earthen mortars through stabilization,” Elsevier, 2021.
- [42] „NBN EN 196-1: Beproevingmethoden voor cement - Deel 1: Bepaling van de sterkte,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/264218?l=E>. [Geopend 7 April 2023].
- [43] S. Barr, W. McCarter en B. Suryanto, „Bond-strength performance of hydraulic lime and natural cement,” Elsevier, 2015.
- [44] „Building a Cob House: A \$7,000 Dream House Made of Earth,” [Online]. Available: [https://www.iowasource.com/2008/11/03/home\\_garden2008\\_11\\_cob/](https://www.iowasource.com/2008/11/03/home_garden2008_11_cob/). [Geopend 16 Augustus 2022].
- [45] H. Binici, O. Aksogan, M. N. Bodur, E. Akca en S. Kapur, „Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials,” Elsevier, 2007.
- [46] „NBN EN 772-1: Methods of test for masonry units- Part 1: Determination of compressive strenght.,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/540678?l=E>. [Geopend 21 Februari 2023].
- [47] K. Zhou, H.-M. Chen, Y. Wang, D. Lam, A. Ajayebi en P. Hopkinson, „Developing advanced techniques to reclaim existing end of service life,” Elsevier, 2020.
- [48] S. Singh en P. Munjal, „Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick,” Elsevier, 2017.





## Bijlagen

### Bijlage A: Verklaring formule bond wrench test p.32

Met de formule van de bond wrench test wordt de hechtsterkte berekend van een mortel-steen verbinding (later testvlak genoemd) aan de hand van een uitgeoefend moment op het proefstuk. De hechtsterkte wordt dan bepaald op basis van de buigspanning die ten gevolge van enkelvoudige buiging uitgeoefend wordt op het couplet. De formule van deze buigspanning is hieronder zichtbaar.

$$\sigma_b = \frac{M_b \cdot y}{I} = \frac{M_b}{Z}$$

met voor een rechthoekige doorsnede  $Z = \frac{b \cdot d^2}{6}$

Waarin:	$\sigma_b$	buigspanning ten gevolge van enkelvoudige buiging in N/mm <sup>2</sup> ;
	$M_b$	buigmoment rond centroïde van testvlak in Nmm;
	$y$	loodrechte afstand tot neutrale as in mm;
	$I$	traagheidsmoment van testvlak in mm <sup>4</sup> ;
	$Z$	weerstandbiedenmoment rond centroïde van testvlak in mm <sup>3</sup> ;
	$b$	gemiddelde breedte van het testvlak in mm;
	$d$	gemiddelde diepte van het testvlak in mm.

Om de uiteindelijke hechtsterkte te verkrijgen, wordt de axiale drukspanning op het testvlak ten gevolge van de volledige constructie berekend en van bovenstaande buigspanning afgetrokken. Deze drukspanning wordt berekend volgens onderstaande formules.

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

met  $A = b \cdot d$

en  $F = W + F_1 + F_2$

Waarin:	$\sigma_c$	drukspanning ten gevolge van axiale druk in N/mm <sup>2</sup> ;
	$A$	oppervlakte van het legvlak in mm <sup>2</sup> ;
	$F$	totale drukkracht op het testvlak in N;
	$W$	gewicht van de afgebroken steen en de aanhangende mortel in N;
	$F_1$	aangebrachte kracht in N;
	$F_2$	eigengewicht van de klem in N.

De hechtsterkte wordt dan berekend volgens onderstaande formule. Deze formulevorm is ook terug te vinden in [39] en wordt ook in andere literatuur veelvuldig gebruikt om de hechtsterkte te kwantificeren.

$$f_{wi} = \sigma_b - \sigma_c = \frac{M_b}{Z} - \frac{F}{A}$$

De volledige afleiding van bovenstaande formule tot de formule die toegepast wordt in deze scriptie en volgt uit NBN EN 1052-5 is hieronder weergegeven.

$$f_{wi} = \frac{M_b}{Z} - \frac{F}{A}$$

Het momentenevenwicht wordt uitgeschreven rond het rotatiecentrum dat zich in het midden van de mortelvoeg bevindt. Doordat de excentriciteiten  $e_1$  en  $e_2$  gedefinieerd zijn tot aan het uiteinde van het proefstuk (zie Figuur 13), moet hier nog de helft van de morteldiepte van afgetrokken worden.

$$f_{wi} = \frac{F_1 \cdot \left(e_1 - \frac{d}{2}\right) + F_2 \cdot \left(e_2 - \frac{d}{2}\right)}{Z} - \frac{W + F_1 + F_2}{A}$$

Daarna worden beide termen omgevormd naar een gelijke noemer en worden de haakjes uitgewerkt.

$$f_{wi} = \frac{F_1 e_1 + F_2 e_2 - F_1 \frac{d}{2} - F_2 \frac{d}{2}}{Z} - \frac{(W + F_1 + F_2) \cdot \frac{d}{6}}{Z}$$

$$f_{wi} = \frac{F_1 e_1 + F_2 e_2 - F_1 \frac{d}{2} - F_2 \frac{d}{2} - \frac{d}{6} \cdot (W + F_1 + F_2)}{Z}$$

In bovenstaande formule worden vervolgens de 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> term in de teller op de noemer 6 geplaatst zodat deze daarna opgenomen kunnen worden binnen de haakjes.

$$f_{wi} = \frac{F_1 e_1 + F_2 e_2 - F_1 \frac{3}{6} d - F_2 \frac{3}{6} d - \frac{d}{6} \cdot (W + F_1 + F_2)}{Z}$$

$$f_{wi} = \frac{F_1 e_1 + F_2 e_2 - \frac{d}{6} \cdot (W + F_1 + F_2 + 3 \cdot F_1 + 3 \cdot F_2)}{Z}$$

$$f_{wi} = \frac{F_1 e_1 + F_2 e_2 - \frac{d}{6} \cdot (W + 4 \cdot F_1 + 4 \cdot F_2)}{Z}$$

Ten slotte wordt de volledige laatste term tussen haakjes in de teller vermenigvuldigd met een factor 4/4 waardoor de uiteindelijke formulevorm, zoals gebruikt in deze scriptie en in NBN EN 1052-5, bekomen wordt.

$$f_{wi} = \frac{F_1 e_1 + F_2 e_2 - \frac{4}{6} d \cdot \left(\frac{W}{4} + \frac{4 \cdot F_1}{4} + \frac{4 \cdot F_2}{4}\right)}{Z}$$

$$f_{wi} = \frac{F_1 e_1 + F_2 e_2 - \frac{2}{3} d \cdot \left(\frac{W}{4} + F_1 + F_2\right)}{Z}$$

## Bijlage B: Uitgebreide resultaten buig- en druksterkte mortelbalkjes p.51

Resultaten buigsterkte:

Startbelasting: 0,001 kN

Snelheid: 0,010 kN/sec

(OM = onmeetbaar)

Markering	F [N]	l [mm]	b [mm]	d [mm]	fb [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. fb [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
M0-1	626	100,00	39,06	38,48	1,62	1,57	0,12
M0-2	660	100,00	39,09	38,75	1,69		
M0-3	542	100,00	39,53	38,32	1,40		
M8-1	OM	100,00	40,72	39,80	/	/	/
M8-2	OM	100,00	40,70	39,85	/		
M8-3	OM	100,00	40,42	39,71	/		
SS-1	502	100,00	39,98	38,73	1,26	/	/
SS-2	OM	100,00	39,69	38,81	/		
SS-3	OM	100,00	39,99	39,05	/		

Resultaten druksterkte:

Startbelasting: 0,010 kN (M0) en 0,001 kN (M8 en SS)

Snelheid: 0,050 kN/sec (M0), 0,020 kN/sec (M8) en 0,010 kN/sec (SS)

Markering	F [N]	fc [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. fc [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
M0-1.1	4973	3,11	2,91	0,27
M0-1.2	4696	2,94		
M0-2.1	4770	2,98		
M0-2.2	4044	2,53		
M0-3.1	4521	2,83		
M0-3.2	4913	3,07		
M8-1.1	969	0,61	0,58	0,05
M8-1.2	913	0,57		
M8-2.1	888	0,56		
M8-2.2	1025	0,64		
M8-3.1	950	0,59		
M8-3.2	844	0,53		
SS-1.1	950	0,59	0,71	0,08
SS-1.2	1197	0,75		
SS-2.1	1197	0,75		
SS-2.2	1164	0,73		
SS-3.1	1194	0,75		
SS-3.2	1131	0,71		



**Bijlage C: Uitgebreide resultaten testreeks 1 p.58, 63**

MEB-M0	Faalmode	droogtijd [dagen]	F1 [N]	W [N]	f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
MEB-M0.1	A2	6	0	29,76	0,0191	/	/
MEB-M0.2	A2	6	0	30,56	0,0190		
MEB-M0.3	A2	6	0	30,41	0,0190		
MEB-M0-v.1	A2	6	0	29,10	0,0191	/	/
MEB-M0-v.2	A2	6	0	28,27	0,0191		
MEB-M0-v.3	A2	6	0	28,68	0,0191		
MEB-M0-v-1".1	A2	6	0	29,50	0,0191	/	/
MEB-M0-v-1".2	A2	6	0	28,56	0,0191		
MEB-M0-v-1".3	A2	6	0	28,21	0,0191		
<b>FMEB-M0</b>							
FMEB-M0.1	A6	6	0	33,81	0,0137	/	/
FMEB-M0.2	A6	6	0	34,23	0,0137		
FMEB-M0.3	A6	6	0	35,03	0,0137		
FMEB-M0-v.1	A6	6	0	34,26	0,0137	/	/
FMEB-M0-v.2	A6	6	0	35,48	0,0136		
FMEB-M0-v.3	A6	6	0	35,11	0,0137		
FMEB-M0-v-1".1	A6	6	0	35,34	0,0137	/	/
FMEB-M0-v-1".2	A6	6	0	34,98	0,0137		
FMEB-M0-v-1".3	A6	6	0	34,21	0,0137		

MEB-M8	Faalmode	droogtijd [dagen]	F1 [N]	W [N]	f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
MEB-M8.1	A2	6	0	28,28	0,0031	/	/
MEB-M8.2	A2	6	0	27,75	0,0031		
MEB-M8.3	A2	6	0	27,77	0,0031		
MEB-M8-v.1	A2	6	0	28,20	0,0031	/	/
MEB-M8-v.2	A1	6	0	24,64	0,0033		
MEB-M8-v.3	A2	6	0	28,42	0,0031		
MEB-M8-v-1".1	A2	6	0	27,34	0,0031	0,0062	0,0044
MEB-M8-v-1".2	A2	6	0	28,29	0,0031		
MEB-M8-v-1".3	A3	6	6,11	26,46	0,0124		
<b>FMEB-M8</b>							
FMEB-M8.1	A6	6	0	33,41	0,0019	0,0037	0,0025
FMEB-M8.2	A6	6	0	34,02	0,0019		
FMEB-M8.3	A2	6	4,79	35,42	0,0072		
FMEB-M8-v.1	A6	6	3,64	34,99	0,0060	0,0070	0,0017
FMEB-M8-v.2	A1	6	6,46	28,43	0,0094		
FMEB-M8-v.3	A6	6	3,35	34,65	0,0056		
FMEB-M8-v-1".1	A6	6	8,48	35,15	0,0114	0,0085	0,0022
FMEB-M8-v-1".2	A1	6	5,50	28,96	0,0083		
FMEB-M8-v-1".3	A6	6	3,60	34,51	0,0059		





VEB4-M0	Faalmode	droogtijd [dagen]	F1 [N]	W [N]	$f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. $f_{wi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-M0.1	A3	6	34,26	61,18	0,0459	0,0512	0,0079
VEB4-M0.2	A1	6	48,56	60,95	0,0623		
VEB4-M0.3	A1	6	33,76	60,36	0,0453		
VEB4-M0-v.1	A2	6	52,58	71,02	0,0666	0,0575	0,0162
VEB4-M0-v.2	A2	6	56,47	67,28	0,0712		
VEB4-M0-v.3	A1	6	24,51	61,18	0,0347		
VEB4-M0-v-1".1	A2	6	79,92	68,43	0,0981	0,1049	0,0089
VEB4-M0-v-1".2	A1	6	96,60	60,27	0,1174		
VEB4-M0-v-1".3	A1	6	80,76	62,09	0,0992		
VEB4-M0-v-1'.1	A2	6	50,13	70,93	0,0638	0,0665	0,0053
VEB4-M0-v-1'.2	A1	6	58,78	63,79	0,0739		
VEB4-M0-v-1'.3	A1	6	48,20	61,30	0,0619		
VEB4-M0-v-5'.1	A1	6	24,51	63,50	0,0346	0,0335	0,0217
VEB4-M0-v-5'.2	A3	6	46,32	66,23	0,0596		
VEB4-M0-v-5'.3	A3	6	0,00	65,51	0,0064		
VEB4-M0-v-15'.1	A1	6	0,00	62,69	0,0065	0,0250	0,0131
VEB4-M0-v-15'.2	A1	6	24,18	62,00	0,0343		
VEB4-M0-v-15'.3	A1	6	24,18	63,52	0,0342		



VEB4-M8	Faalmode	droogtijd [dagen]	F1 [N]	W [N]	f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-M8.1	A1	6	0,00	59,23	0,0066	0,0066	0,0000
VEB4-M8.2	A1	6	0,00	60,97	0,0066		
VEB4-M8.3	A1	6	0,00	60,01	0,0066		
VEB4-M8-v-1".1	A1	6	42,68	63,46	0,0555	0,0607	0,0360
VEB4-M8-v-1".2	A1	6	93,23	61,47	0,1135		
VEB4-M8-v-1".3	A1	6	36,08	62,78	0,0479		
VEB4-M8-v-1".4	A1	7	51,79	67,26	0,0658		
VEB4-M8-v-1".5	A1	7	35,20	64,64	0,0469		
VEB4-M8-v-1".6	A1	7	24,49	64,31	0,0346		
VEB4-M8-v-1"-15'.1	A3	7	14,93	66,77	0,0235	0,0311	0,0060
VEB4-M8-v-1"-15'.2	A3	7	27,75	72,22	0,0381		
VEB4-M8-v-1"-15'.3	A1	7	22,11	65,78	0,0318		
VEB4-M8-v-1"-24.1	A1	7	47,70	70,11	0,0610	0,0483	0,0127
VEB4-M8-v-1"-24.2	A1	7	21,40	68,71	0,0309		
VEB4-M8-v-1"-24.3	A1	7	40,67	68,73	0,0530		
VEB4-M8-v-1'.1	A3	6	46,25	64,01	0,0596	0,0745	0,0130
VEB4-M8-v-1'.2	A1	6	73,86	63,96	0,0912		
VEB4-M8-v-1'.3	A1	6	57,68	65,28	0,0726		
VEB4-M8-v-1'-15'.1	A3	7	43,61	68,03	0,0564	0,0875	0,0304
VEB4-M8-v-1'-15'.2	A1	7	106,59	63,84	0,1288		
VEB4-M8-v-1'-15'.3	A3	7	61,86	69,10	0,0773		
VEB4-M8-v-1'-24.1	A7	7	68,30	26,22	0,0859	0,0660	0,0259
VEB4-M8-v-1'-24.2	A3	7	66,61	68,24	0,0828		
VEB4-M8-v-1'-24.3	A1	7	19,98	64,38	0,0294		
VEB4-M8-v-5'.1	A1	6	44,76	64,20	0,0578	0,0696	0,0147
VEB4-M8-v-5'.2	A4	6	73,28	69,54	0,0904		
VEB4-M8-v-5'.3	A1	6	47,16	62,47	0,0606		
VEB4-M8-v-5'-15'.1	A1	7	24,11	66,04	0,0341	0,0433	0,0130
VEB4-M8-v-5'-15'.2	A1	7	48,24	66,35	0,0618		
VEB4-M8-v-5'-15'.3	A1	7	24,11	65,46	0,0341		
VEB4-M8-v-5'-24.1	A1	7	71,62	66,78	0,0886	0,0582	0,0242
VEB4-M8-v-5'-24.2	A1	7	19,90	65,79	0,0293		
VEB4-M8-v-5'-24.3	A1	7	43,77	65,62	0,0567		
VEB4-M8-v-15'.1	A1	6	75,68	65,49	0,0933	0,0798	0,0111
VEB4-M8-v-15'.2	A4	6	64,19	67,54	0,0800		
VEB4-M8-v-15'.3	A1	6	52,01	65,49	0,0661		
VEB4-M8-v-15'-15'.1	A4	7	33,83	69,36	0,0452	0,0515	0,0046
VEB4-M8-v-15'-15'.2	A1	7	42,80	65,79	0,0555		
VEB4-M8-v-15'-15'.3	A3	7	41,44	68,20	0,0539		
VEB4-M8-v-15'-24.1	A1	7	65,12	66,83	0,0811	0,0828	0,0042
VEB4-M8-v-15'-24.2	A1	7	62,94	65,70	0,0787		
VEB4-M8-v-15'-24.3	A1	7	71,60	67,08	0,0886		



VEB4-EG	Faalmode	droogtijd [dagen]	F1 [N]	W [N]	f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-EG.1	A7	7	118,88	14,99	0,1443	0,1828	0,0276
VEB4-EG.2	A7	7	173,27	1,70	0,2070		
VEB4-EG.3	A7	7	165,27	26,29	0,1972		
VEB4-EG-v-1".1	A7	7	193,18	12,51	0,2296	0,2142	0,0108
VEB4-EG-v-1".2	A7	7	173,15	13,63	0,2066		
VEB4-EG-v-1".3	A7	7	173,25	17,36	0,2066		
VEB4-EG-v-1'.1	A7	7	186,63	10,83	0,2221	0,2402	0,0262
VEB4-EG-v-1'.2	A7	7	185,80	7,55	0,2213		
VEB4-EG-v-1'.3	A7	7	234,70	10,30	0,2773		
VEB4-EG-v-1'-15'.1	A3	7	15,34	66,04	0,0240	0,0248	0,0011
VEB4-EG-v-1'-15'.2	A1	7	15,34	66,38	0,0240		
VEB4-EG-v-1'-15'.3	A3	7	17,42	66,21	0,0264		
VEB4-EG-v-1'-24.1	/	7	/	/	0	0,0000	0,0000
VEB4-EG-v-1'-24.2	/	7	/	/	0		
VEB4-EG-v-1'-24.3	/	7	/	/	0		
VEB4-EG-v-5'.1	A4	7	15,33	59,76	0,0242	0,0492	0,0182
VEB4-EG-v-5'.2	A4	7	43,45	60,68	0,0564		
VEB4-EG-v-5'.3	A4	7	52,79	63,77	0,0671		
VEB4-EG-v-5'-15'.1	A4	7	22,78	65,10	0,0326	0,0357	0,0085
VEB4-EG-v-5'-15'.2	A4	7	17,98	64,43	0,0271		
VEB4-EG-v-5'-15'.3	A4	7	35,57	65,40	0,0473		
VEB4-EG-v-5'-24.1	A4	7	23,15	64,71	0,0330	0,0321	0,0055
VEB4-EG-v-5'-24.2	A4	7	27,74	64,59	0,0383		
VEB4-EG-v-5'-24.3	A4	7	16,19	64,52	0,0250		
VEB4-EG-v-15'.1	A4	7	36,32	61,67	0,0482	0,0413	0,0121
VEB4-EG-v-15'.2	A5	7	39,06	61,83	0,0514		
VEB4-EG-v-15'.3	A4	7	15,32	58,30	0,0242		
VEB4-EG-v-15'-15'.1	A4	7	15,33	63,17	0,0241	0,0241	0,0000
VEB4-EG-v-15'-15'.2	A2	7	15,33	65,10	0,0240		
VEB4-EG-v-15'-15'.3	A4	7	15,33	64,28	0,0241		
VEB4-EG-v-15'-24.1	/	7	/	/	0	0,0000	0,0000
VEB4-EG-v-15'-24.2	/	7	/	/	0		
VEB4-EG-v-15'-24.3	/	7	/	/	0		



VEB4-SS	Faalmode	droogtijd [dagen]	F1 [N]	W [N]	f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-SS.1	A3	6	40,31	61,07	0,0528	0,0511	0,0022
VEB4-SS.2	A3	6	40,18	65,90	0,0525		
VEB4-SS.3	A4	6	36,19	63,95	0,0480		
VEB4-SS-v-1".1	A4	6	72,36	63,47	0,0895	0,0882	0,0011
VEB4-SS-v-1".2	A4	6	28,82	61,28	0,0396		
VEB4-SS-v-1".3	A3	6	69,98	64,83	0,0868		
VEB4-SS-v-1'.1	A4	7	32,51	70,92	0,0436	0,0352	0,0078
VEB4-SS-v-1'.2	A2	7	26,74	67,89	0,0371		
VEB4-SS-v-1'.3	A1	7	16,03	64,02	0,0249		
VEB4-SS-v-1'-15'.1	A3	7	8,82	73,80	0,0163	0,0181	0,0013
VEB4-SS-v-1'-15'.2	A3	7	10,89	69,77	0,0188		
VEB4-SS-v-1'-15'.3	A3	7	11,29	70,74	0,0193		
VEB4-SS-v-1'-24.1	A4	7	6,86	70,89	0,0142	0,0094	0,0067
VEB4-SS-v-1'-24.2	/	7	/	/	0		
VEB4-SS-v-1'-24.3	A4	7	6,86	70,01	0,0142		
VEB4-SS-v-5'.1	A3	7	17,91	65,75	0,0270	0,0358	0,0072
VEB4-SS-v-5'.2	A3	7	25,52	62,81	0,0358		
VEB4-SS-v-5'.3	A3	7	33,31	67,32	0,0446		
VEB4-SS-v-5'-15'.1	A3	7	13,57	70,04	0,0219	0,0226	0,0037
VEB4-SS-v-5'-15'.2	A4	7	18,33	66,22	0,0274		
VEB4-SS-v-5'-15'.3	A3	7	10,61	68,21	0,0185		
VEB4-SS-v-5'-24.1	A3	7	6,86	67,16	0,0143	0,0048	0,0067
VEB4-SS-v-5'-24.2	/	7	/	/	0		
VEB4-SS-v-5'-24.3	/	7	/	/	0		
VEB4-SS-v-15'.1	A1	6	15,37	58,42	0,0243	0,0309	0,0055
VEB4-SS-v-15'.2	A3	6	27,44	67,93	0,0379		
VEB4-SS-v-15'.3	A3	6	21,14	67,16	0,0307		
VEB4-SS-v-15'-15'.1	/	7	/	/	/	/	/
VEB4-SS-v-15'-15'.2	/	7	/	/	/		
VEB4-SS-v-15'-15'.3	/	7	/	/	/		
VEB4-SS-v-15'-24.1	/	7	/	/	/	0,0158	0,0013
VEB4-SS-v-15'-24.2	A3	7	6,86	67,86	0,0142		
VEB4-SS-v-15'-24.3	A4	7	9,69	70,88	0,0174		



## Bijlage D: Uitgebreide resultaten testreeks 2 p.81

FROGGED	Faalmode	droogtijd [dagen]	F1 [N]	W [N]	f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
FMEB-M0-1".1	A6	28	9,64	34,14	0,0128	0,0134	0,0048
FMEB-M0-1".2	A6	28	5,33	35,26	0,0078		
FMEB-M0-1".3	A6	28	15,57	34,36	0,0194		
FMEB-M8-1".1	A1	28	10,07	28,40	0,0135	0,0129	0,0025
FMEB-M8-1".2	A1	28	12,05	28,50	0,0157		
FMEB-M8-1".3	A6	28	6,83	34,51	0,0096		
FMEB-SS-1".1	A3	28	82,67	30,89	0,0954	0,0708	0,0176
FMEB-SS-1".2	A4	28	46,79	32,66	0,0548		
FMEB-SS-1".3	A4	28	53,39	30,39	0,0623		
FMEB-EG-1".1	A4	28	105,11	28,79	0,1208	0,1116	0,0117
FMEB-EG-1".2	A4	28	103,48	29,01	0,1189		
FMEB-EG-1".3	A7	28	81,39	0,70	0,0951		

VEB4-M0	Faalmode	droogtijd [dagen]	F1 [N]	W [N]	f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-M0-1".1	A3	28	118,02	73,06	0,1417	0,1220	0,0182
VEB4-M0-1".2	A2	28	79,75	74,38	0,0977		
VEB4-M0-1".3	A2	28	104,83	74,09	0,1265		
VEB4-M0-1"-1'.1	A1	28	30,93	66,04	0,0419	0,0320	0,0100
VEB4-M0-1"-1'.2	A2	28	25,73	72,92	0,0358		
VEB4-M0-1"-1'.3	A3	28	10,55	70,87	0,0184		
VEB4-M0-1'.1	A2	28	92,80	73,97	0,1127	0,1538	0,0296
VEB4-M0-1'.2	A1	28	140,29	66,76	0,1674		
VEB4-M0-1'.3	A3	28	152,50	72,52	0,1812		
VEB4-M0-15'.1	A3	28	60,39	69,07	0,0756	0,1263	0,0438
VEB4-M0-15'.2	A3	28	99,59	69,71	0,1206		
VEB4-M0-15'.3	A3	28	153,65	72,04	0,1826		

VEB4-M8	Faalmode	droogtijd [dagen]	F1 [N]	W [N]	f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-M8-1".1	A1	28	63,09	64,50	0,0789	0,0795	0,0121
VEB4-M8-1".2	A1	28	76,77	64,92	0,0946		
VEB4-M8-1".3	A1	28	51,03	67,18	0,0650		
VEB4-M8-1"-1'.1	A3	28	71,91	69,96	0,0888	0,0669	0,0187
VEB4-M8-1"-1'.2	A1	28	54,29	68,09	0,0687		
VEB4-M8-1"-1'.3	A3	28	32,25	72,61	0,0432		
VEB4-M8-1"-15'.1	A1	28	21,19	69,43	0,0306	0,0301	0,0060
VEB4-M8-1"-15'.2	A1	28	13,98	68,12	0,0224		
VEB4-M8-1"-15'.3	A2	28	27,08	78,03	0,0372		





VEB4-M8-1'.1	A3	28	66,70	71,92	0,0828	0,0817	0,0048
VEB4-M8-1'.2	A3	28	60,17	71,20	0,0753		
VEB4-M8-1'.3	A3	28	70,34	71,62	0,0870		
VEB4-M8-15'.1	A3	28	73,39	71,10	0,0905	0,0905	0,0015
VEB4-M8-15'.2	A3	28	71,73	66,93	0,0887		
VEB4-M8-15'.3	A3	28	75,03	71,35	0,0924		

VEB4-EG	Faalmode	droogtijd [dagen]	F1 [N]	W [N]	f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-EG-1".1	A7	28	391,25	9,05	0,4570	0,4211	0,0317
VEB4-EG-1".2	A7	28	364,49	1,27	0,4265		
VEB4-EG-1".3	A4	28	325,43	68,47	0,3798		
VEB4-EG-1"-1'.1	A4	28	403,78	67,82	0,4697	0,5105	0,0556
VEB4-EG-1"-1'.2	A4	28	406,45	68,62	0,4728		
VEB4-EG-1"-1'.3	A4	28	507,80	69,54	0,5891		
VEB4-EG-1"-15'.1	A7	28	215,08	0,71	0,2551	0,4598	0,1448
VEB4-EG-1"-15'.2	A7	28	485,86	0,20	0,5658		
VEB4-EG-1"-15'.3	A4	28	481,22	68,45	0,5586		
VEB4-EG-1'.1	A4	28	397,49	68,83	0,4625	0,3522	0,0850
VEB4-EG-1'.2	A4	28	217,22	64,81	0,2557		
VEB4-EG-1'.3	A4	28	289,29	68,93	0,3383		
VEB4-EG-15'.1	A4	28	370,00	66,33	0,4310	0,4948	0,0519
VEB4-EG-15'.2	A7	28	479,34	5,12	0,5582		
VEB4-EG-15'.3	A4	28	425,85	66,18	0,4951		

VEB4-SS	Faalmode	droogtijd [dagen]	F1 [N]	W [N]	f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	gem. f <sub>wi</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm <sup>2</sup> ]
VEB4-SS-1".1	A3	28	105,93	70,65	0,1279	0,1423	0,0110
VEB4-SS-1".2	A4	28	129,01	67,09	0,1544		
VEB4-SS-1".3	A3	28	120,31	67,16	0,1445		
VEB4-SS-1"-1'.1	A3	28	22,99	68,94	0,0327	0,0327	0,0001
VEB4-SS-1"-1'.2	A4	28	22,99	70,21	0,0327		
VEB4-SS-1"-1'.3	A2	28	22,99	75,61	0,0325		
VEB4-SS-1'.1	A3	28	92,88	66,45	0,1130	0,1047	0,0231
VEB4-SS-1'.2	A3	28	58,11	66,35	0,0731		
VEB4-SS-1'.3	A4	28	105,91	67,28	0,1279		
VEB4-SS-15'.1	A4	28	83,36	68,95	0,1020	0,0943	0,0056
VEB4-SS-15'.2	A4	28	74,90	73,19	0,0922		
VEB4-SS-15'.3	A4	28	71,80	68,78	0,0887		