

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

Analyse van het hergebruikpotentieel van leemstenen

Lucas Goossens
Stephano Muzyka

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

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



2023
2024

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

Analyse van het hergebruikpotentieel van leemstenen

Lucas Goossens
Stephano Muzyka

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

BEGELEIDER :

ir. Erik PELICAEN



KU LEUVEN

Woord vooraf

Deze masterproef markeert de voltooiing van de gezamenlijke masteropleiding Industriële Ingenieurswetenschappen aan de Universiteit Hasselt en KU Leuven. We willen graag enkele personen bedanken die dit mogelijk hebben gemaakt. Ten eerste onze promotor, prof. dr. ing. Bram Vandoren, die verantwoordelijk is voor de algemene coördinatie binnen de Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen van UHasselt. Daarnaast zijn wij dank verschuldigd aan ir. Erik Pelicaen, die ons tijdens deze masterproef begeleid heeft. Ook dr. ing. Rik Steensels en medewerkers van de onderzoeksgroep CERG willen we bedanken voor de hulp bij de experimenten. Verder zijn we ir. Johan Horckmans dankbaar voor het beschikbaar stellen van verschillende materialen en apparatuur vanuit het Technologiecentrum. Tot slot willen we Bart Dreesen bedanken voor het verzorgen het masterproefseminarie.

Inhoud

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	7
Lijst van figuren	9
Abstract	11
Abstract in English	13
1. Inleiding	15
2. Literatuurstudie	17
2.1 Leem	17
2.2 Cement als bindmiddel	17
2.3 Hechttingsmechanisme	17
2.4 Invloed van water op hechtsterkte	18
2.5 De oppervlaktetextuur van CEB's	18
2.6 Hechtsterkte na hergebruik	19
2.7 Deconstructiemethodes	19
2.8 Buigtrek- en schuifsterkte van traditioneel metselwerk	19
3. Methodologie	21
3.1 Doelstelling	21
3.2 Materialen	22
3.2.1 Gestabiliseerde perssteen	22
3.2.2 Vormsteen	23
3.2.3 Leemmortel	24
3.2.4 Lijmmortel	24
3.2.5 Bastaardmortel	25
3.2.6 Consistentie mortels	25
3.3 Buigtreksterkte	26
3.3.1 EN 1052-5	26
3.3.2 Proefopstelling bond wrench-test exploratiefase	28
3.3.3 Proefopstelling vernieuwde bond wrench-test	30
3.4 Schuifsterkte	31
3.4.1 NBN EN 1052-3	31
3.4.2 Proefopstelling schuifsterketest	32
3.5 Manuele demontage	33
3.6 Druksterkte	34
3.6.1 EN 772-1:2011+A1	34
3.6.2 Proefopstelling druksterkte test	34
3.7 Langdurige belasting	35
3.8 Initiële waterabsorptie	36

3.8.1 EN 772-11	36
3.8.2 Proefopstelling initiële waterabsorptie test	37
4. Resultaten en discussie	39
4.1 Exploratiefase	39
4.1.1 Metselen proefstukken	39
4.1.2 Buigtreksterkte exploratiefase	40
4.2 Buig- en druksterkte mortels	43
4.2 Buigtreksterkte	45
4.2.1 Proefstukken specifieke buigtreksterkte	45
4.2.2 Analyse specifieke buigtreksterkte	47
4.2.3 Analyse faalmodi specifieke buigtreksterkte	50
4.2.4 Proefstukken buigtreksterkte na recuperatie	51
4.2.5 Analyse buigtreksterkte na recuperatie	52
4.2.6 Analyse faalmodi buigtreksterkte na recuperatie	54
4.3 Schuifsterkte	54
4.3.1 Proefstukken specifieke schuifsterkte	54
4.3.2 Analyse specifieke schuifsterkte	56
4.3.3 Analyse faalmodi specifieke schuifsterkte	58
4.3.4 Proefstukken schuifsterkte na recuperatie	60
4.3.5 Analyse schuifsterkte na recuperatie	60
4.3.6 Analyse faalmodi schuifsterkte na recuperatie	62
4.4 Hechtsterkte	63
4.5 Recuperatiepotentieel	63
4.5.1 Faalmodi	64
4.5.2 Recuperatiepercentage	67
4.5 Technische prestatie voor hergebruik	77
4.5.1 Proefstukken druksterkte na langdurige belasting	77
4.5.2 Analyse druksterkte na langdurige belasting	78
4.5.3 Analyse buigtreksterkte na langdurige belasting	82
4.6 Waterabsorptie voor en na recuperatie	84
5. Evaluatie hergebruikpotentieel	87
5.1 CEB-EM	87
5.2 CEB-EAM	88
5.3 CEB-BME	89
5.4 MEB-EM	89
5.5 MEB-EAM	90
6. Besluit	93
Referentielijst	95

Bijlagen	97
Bijlage A: Uitgebreide resultaten bond wrench-test specifieke waarden p.XX.....	97
Bijlage B: Uitgebreide resultaten bond wrench-test na recuperatie p.XX.....	98
Bijlage C: Uitgebreide resultaten bond wrench-test na langdurige belasting p.XX	98
Bijlage D: Uitgebreide resultaten druktesten na langdurige belasting p.XX	99
Bijlage E: Uitgebreide resultaten initiële waterabsorptie p.XX	101

Lijst van tabellen

Tabel 1: Minimale schuifsterkte voor traditioneel metselwerk [10]	20
Tabel 2: Minimale buigtreksterkte voor traditioneel metselwerk [10]	20
Tabel 3: Technische eigenschappen CEB [11]	22
Tabel 4: Technische eigenschappen MEB [11]	23
Tabel 5: Technische eigenschappen EM [11]	24
Tabel 6: Technische eigenschappen EAM [11]	24
Tabel 7: Technische eigenschappen BME [11]	25
Tabel 8: Resultaten flow table test	25
Tabel 9: Mortelsamenstelling exploratiefase	39
Tabel 10: Resultaten flow table test exploratiefase	39
Tabel 11: Buigtreksterkte exploratiefase MEB-EM	40
Tabel 12: Buigtreksterkte exploratiefase CEB-EM	40
Tabel 13: Buigtreksterkte exploratiefase MEB-EAM	41
Tabel 14: Buigtreksterkte exploratiefase CEB-EAM	41
Tabel 15: Buigtreksterkte exploratiefase MEB-ECM	41
Tabel 16: Buigtreksterkte exploratiefase CEB-ECM	41
Tabel 17: Buigtreksterkte exploratiefase MEB-ESM	42
Tabel 18: Buigtreksterkte exploratiefase CEB-ESM	42
Tabel 19: Resultaten buig- en druksterktes mortelbalkjes	45
Tabel 20: Samenstelling mortel buigtreksterkte	47
Tabel 21: Parameters bond wrench-test	47
Tabel 22: Buigtreksterkte CEB-EAM	48
Tabel 23: Buigtreksterkte CEB-BME	48
Tabel 24: Buigtreksterkte CEB-EM	48
Tabel 25: Buigtreksterkte MEB-EAM	48
Tabel 26: Buigtreksterkte MEB-EM	49
Tabel 27: Parameters bond wrench-test	52
Tabel 28: Buigtreksterkte CEB-EAM-EM	52
Tabel 29: Buigtreksterkte CEB-BME-EM	52
Tabel 30: Buigtreksterkte MEB-EAM-EAM	52
Tabel 31: Samenstelling mortel schuifsterkte	56
Tabel 32: Schuifsterkte CEB-EAM	56
Tabel 33: Schuifsterkte CEB-BME	56
Tabel 34: Schuifsterkte CEB-EM	57
Tabel 35: Schuifsterkte MEB-EAM	57
Tabel 36: Schuifsterkte MEB-EM	57
Tabel 37: Schuifsterkte CEB-BME-EAM	60
Tabel 38: Schuifsterkte CEB-EM-EAM	60
Tabel 39: Schuifsterkte CEB-BME-EM	60
Tabel 40: Schuifsterkte CEB-EAM-EM	61
Tabel 41: Schuifsterkte MEB-EAM-EAM	61
Tabel 42: Toleranties beschadigingen [19]	64
Tabel 43: Faalmodi manuele demontage	64
Tabel 44: Voorbeelden van faalmodi van BF (bottom face)	65
Tabel 45: Recuperatiepercentage MEB-EM	67
Tabel 46: Recuperatiepercentage MEB- EAM	69
Tabel 47: Recuperatiepercentage CEB-EM	71
Tabel 48: Recuperatiepercentage CEB-EAM	73
Tabel 49: Recuperatiepercentage CEB-BME	74
Tabel 50: Druksterkte na langdurige belasting CEB-Horizontaal	78

Tabel 51: Druksterkte na langdurige belasting CEB-EM-Horizontaal	79
Tabel 52: Druksterkte na langdurige belasting CEB-EAM-Horizontaal	79
Tabel 53: Druksterkte na langdurige belasting CEB-BME-Horizontaal	79
Tabel 54: Druksterkte na langdurige belasting CEB-Verticaal	80
Tabel 55: Druksterkte na langdurige belasting CEB-EM-Verticaal	80
Tabel 56: Buigtreksterkte CEB-EM90	82
Tabel 57: Buigtreksterkte CEB-BME90	82
Tabel 58: Waterabsorptiecoëfficiënt	85

Lijst van figuren

Figuur 1: Mechanische verankering van cementproducten in baksteenporiën	18
Figuur 2: Grafische weergave methodologie	21
Figuur 3: Geperste gestabiliseerde leemsteen	23
Figuur 4: Vormstenen	23
Figuur 5: Flow table test	26
Figuur 6: Bond wrench-test	27
Figuur 7: Bond wrench-test detail.....	27
Figuur 8: Faalmodi bond wrench-test	28
Figuur 9: Proefopstelling bond wrench-test exploratiefase	29
Figuur 10: Proefopstelling bond wrench test exploratiefase met kleine klem.....	29
Figuur 11: Vernieuwde automatische bond wrench-test	30
Figuur 12: Vooraanzicht vernieuwde bond wrench-test	30
Figuur 13: Type A en type B schuifsterktetest	31
Figuur 14: Proefopstelling schuifsterktetest.....	31
Figuur 15: Faalmodi schuifsterktetest	32
Figuur 16: Proefopstelling schuifsterktetest.....	33
Figuur 17: Proefopstelling manuele demontage voor persstenen in verticaal strekverband	34
Figuur 18: Proefopstelling drukproeven met behulp van de verplaatsingsmeter.....	35
Figuur 19: Langdurige belasting a) zuiltjes b) coupletten	36
Figuur 20: Droging van de proefstukken	36
Figuur 21: Proefopstelling initiële waterabsorptie	37
Figuur 22: Gemetste coupletten met voorbelasting.....	40
Figuur 23: Gemiddelde buigtreksterkte per steen-mortelcombinatie in de exploratiefase.....	42
Figuur 24: Droging mortelbalkjes	43
Figuur 25: Voorbeeld driepuntsbuigproef mortelbalkje	44
Figuur 26: Voorbeeld drukproef mortelbalkje.....	44
Figuur 27: Illustratie CEB-couplet en MEB-couplet voor EM- en BME-mortel	46
Figuur 28: Illustratie CEB-couplet en MEB-couplet voor EAM-mortel.....	46
Figuur 29: Resultaten specifieke buigtreksterkte	49
Figuur 30: Faalmodi specifieke buigtreksterkte	50
Figuur 31: Visualisatie faalmodi a) CEB-EAM1 FM A5 en b) MEB-EM2 FM A3	51
Figuur 32: Resultaten buigtreksterkte na recuperatie	53
Figuur 33: Faalmodi gerecupereerde coupletten	54
Figuur 34: Illustratie CEB-triplet en MEB-triplet voor EM- en BME-mortel	55
Figuur 35: Illustratie CEB-triplet en MEB-triplet voor EAM-mortel	55
Figuur 36: Resultaten specifieke schuifsterkte	58
Figuur 37: Faalmodi specifieke schuifsterkte	59
Figuur 38: Visualisatie faalmodus A4 a) MEB-EAM2 en b) BME-EAM6	59
Figuur 39: Resultaten schuifsterkte na recuperatie	61
Figuur 40: Faalmodi gerecupereerde tripletten.....	62
Figuur 41: Hechtsterkte in functie van de verschillende steen- mortelcombinaties	63
Figuur 42: Toleranties beschadigingen	64
Figuur 43: Faalmodi strekverband MEB-EM	68
Figuur 44: Faalmodi kopverband MEB-EM	68
Figuur 45: Faalmodi strekverband MEB-EAM	70
Figuur 46: Faalmodi kopverband MEB-EAM	70
Figuur 47: Faalmodi strekverband horizontaal CEB-EM	72
Figuur 48: Faalmodi strekverband verticaal CEB-EM	72
Figuur 49: Faalmodi strekverband horizontaal CEB-EAM	73
Figuur 50: Faalmodi strekverband verticaal CEB-EAM	74

Figuur 51: Faalmodi strekverband horizontaal CEB-BME	75
Figuur 52: Faalmodi strekverband verticaal CEB-BME	75
Figuur 53: Recuperatiepercentage in functie van steen-mortelcombinatie.....	76
Figuur 54: Visualisatie zuilen	78
Figuur 55: Druksterkte horizontaal	81
Figuur 56: Druksterkte verticaal	81
Figuur 57: Resultaten buigtreksterkte na langdurige belasting.....	83
Figuur 58: Faalmodi coupletten na langdurige belasting	84
Figuur 59: Analyse hergebruikpotentieel CEB-EM	88
Figuur 60: Analyse hergebruikpotentieel CEB-EAM	88
Figuur 61: Analyse hergebruikpotentieel CEB-BME	89
Figuur 62: Analyse hergebruikpotentieel MEB-EM	90
Figuur 63: Analyse hergebruikpotentieel MEB-EAM	90

Abstract

De bouwsector, die een aanzienlijk deel van de wereldwijde CO₂-uitstoot, uitputting van grondstoffen en afvalproductie veroorzaakt, heeft behoefte aan duurzamere bouwpraktijken. Circulair bouwen biedt hiervoor oplossingen door onder andere het hergebruiken of recyclen van materialen waardoor er een gesloten en duurzamere materialenkringloop gevormd wordt. Dit onderzoek richt zich op het hergebruikpotentieel van leemstenen, met als doel het afval te verminderen en daarmee ook de behoefte aan grondstoffenwinning te verminderen.

Het hergebruikpotentieel wordt geanalyseerd door enerzijds de hechtsterkte tussen de leemsteen en de mortel te bepalen en te koppelen aan het recuperatiepercentage van leemstenen door deconstructie van kleine muurtjes. Anderzijds worden enkele mechanische eigenschappen van gerecupereerde leemstenen bepaald om hun geschiktheid voor hergebruik te controleren. Hiervoor zijn er verschillende steen-mortelcombinaties gebruikt waarbij vorm- en persstenen worden gecombineerd met leemmortel, leemlijmmortel en een bastaardmortel.

De resultaten tonen aan dat persstenen met de leemmortel het gunstigste blijkt voor hergebruik. Deze combinatie heeft gunstige faalmodi omdat ze de arbeid van het zuiveringsproces verminderen, een minimale verandering van de buigtreksterkte na langdurige belasting en een hoog recuperatiepercentage. Echter, de druksterkte van deze combinatie vertoont een vermindering in druksterkte na langdurige belasting, wat verder onderzoek vereist naar de tolerantie van deze daling.

Abstract in English

The construction sector, which accounts for a significant portion of global CO₂ emissions, resource depletion, and waste production, needs more sustainable building practices. Circular construction offers solutions by reusing or recycling materials, thereby creating a closed and more sustainable material cycle. This research focuses on the reuse potential of earth blocks, aiming to reduce waste and thus the need for resource extraction.

The reuse potential is analyzed by determining the bond strength between the earth blocks and the mortar and linking it to the recovery rate of earth blocks by deconstructing small walls. Additionally, some mechanical properties of recovered earth blocks are determined to check their suitability for reuse. Various brick-mortar combinations are used, combining molded and compressed earth blocks with earth mortar, earth adhesive mortar, and a bastard mortar.

The results show that compressed earth blocks with earth mortar are the most favorable for reuse. This combination has favorable failure modes as they reduce the labor of the cleaning process, exhibit minimal changes in flexural strength after prolonged loading, and have a high recovery rate. However, the compressive strength of this combination shows a reduction in compressive strength after prolonged loading, which requires further investigation into the tolerance of this decrease.

1. Inleiding

In een wereld waarin wordt gestreefd naar een volledig CO₂-neutrale samenleving, is het essentieel om de impact van de bouwsector in overweging te nemen. In 2019 was de bouwsector verantwoordelijk voor maar liefst 40% van de totale uitstoot van broeikasgassen [1]. Daarnaast verbruikt de bouwsector meer dan 36% van de eindenergie in de wereld [2]. Bovendien verbruikt de bouwsector aanzienlijk veel energie en water, wat extra druk legt op onze natuurlijke hulpbronnen. Dit is vooral problematisch in ontwikkelingslanden, waar de bouwsector een belangrijke economische rol speelt. Hier is het aannemen van duurzame productiestrategieën cruciaal om zowel de uitstoot van broeikasgassen te verminderen als het verbruik van energie en water te beperken. ¹

Het is dus duidelijk dat er dringend behoefte is aan innovatieve en duurzame benaderingen in de bouwsector om de milieu-impact te verminderen en bij te dragen aan een CO₂-neutrale toekomst.

Circulair bouwen is een benadering in de bouwsector die gericht is op het minimaliseren van afval, het efficiënt gebruik van hulpbronnen en het hergebruik van materialen en componenten [1]. Het doel is om een duurzamere materialenkringloop te creëren. Een strategie van circulariteit is het hergebruik van materialen. In dat geval houdt circulair bouwen in dat gebouwen en constructies zo ontworpen en gebouwd zijn dat de materialen waaruit ze zijn opgebouwd gedemonteerd en hergebruikt kunnen worden. Dit in plaats van simpelweg te worden afgebroken en gestort wanneer ze niet langer nodig zijn. Dit bevordert een gesloten kringloopsysteem en draagt bij aan milieubescherming. Daarnaast zijn er nog andere aspecten van circulair bouwen, zoals het recyclen of herstellen van materialen. In dit project wordt verder onderzoek gedaan naar hergebruik. Dit houdt in dat bouwcomponenten zoals metselstenen gedemonteerd worden en opnieuw worden gebruikt, in plaats van afbraak en recycling. Hergebruik staat hoger in de hiërarchie van circulariteit dan recycling, omdat recycling meer energieverbruik met zich meebrengt en mogelijk extra grondstoffen vereist.

Niettemin is hergebruik altijd eenvoudig, omdat materialen die hergebruikt worden grondig gereinigd moeten worden en dezelfde kwaliteit en prestaties als voorheen moeten behouden. Dit houdt in dat stenen niet geverfd of gebeitst mogen worden maar er mogen ook geen restanten van cement, lijm of isolatiemateriaal aan de stenen blijven zitten [3].

Leembouw kent ondertussen al verscheidene technieken, waaronder leemsteenmetselwerk. Leem is een lokaal beschikbare natuurlijke grondstof die minder afhankelijk is van fossiele brandstoffen of minder energie-intensieve processen vereist om te worden omgezet in bouwmaterialen. Vanwege de lagere hechtsterkte van leemsteenmetselwerk willen we met dit onderzoek nagaan of deze eigenschap gunstig is voor hergebruik.

Leemstenen die met leemmortel zijn gemetseld, vertonen doorgaans een lagere hechtsterkte in vergelijking met hedendaags metselwerk met cement- of lijm mortel. Deze eigenschap kan echter het potentieel voor hergebruik vergroten aangezien de hechtsterkte voor conventioneel metselwerk vaak te hoog ligt om het metselwerk te ontmantelen zonder schade aan de stenen.

¹ Een praktisch voorbeeld hiervan is het waterverbruik bij de bouw: gemiddeld wordt er 350 liter water gebruikt om een metselwerkverband van 1 m² te maken. Het grootste deel van dit water wordt gebruikt voor het maken van mortel en voor de nabehandeling van de muren na het metselen [20].

Dit onderzoek richt zich op het onderzoeken van het hergebruikpotentieel van leemstenen, d.m.v. effectieve deconstructiemethoden die kunnen worden toegepast om bestaand leemsteenmetselwerk te demonteren. Daarom worden verschillende eigenschappen van leemsteenmetselwerk onderzocht, zoals de buigtrek- en schuifsterkte. Deze eigenschappen zijn een belangrijke parameter die directe invloed heeft op de structurele integriteit van metselwerk. Het bepaalt de weerstand tegen mechanische belastingen en heeft implicaties voor de veiligheid en duurzaamheid van een gebouw. Voor hergebruik is de ideale hechtsterkte dus een hechtsterkte waarbij demontage zonder beschadigingen mogelijk blijft, maar een voldoende sterkte en stabiliteit van het metselwerk ook blijft behouden. Het meten van de hechtsterkte zal niet alleen onthullen welke leemstenen in combinatie met de juiste mortel geschikt zijn voor bepaalde toepassingen de bouw, maar zal ook inzicht verschaffen in welke deconstructiemethoden het meest efficiënt kunnen worden toegepast. Daarnaast zal de druk- en buigtreksterkte van de gerecupereerde leemstenen na langdurige belasting worden onderzocht. Het is cruciaal dat deze eigenschappen behouden blijven, omdat hergebruik van de stenen vereist dat ze dezelfde mechanische eigenschappen hebben als voorheen.

2. Literatuurstudie

2.1 Leem

Leem is een natuurlijk materiaal dat terug te vinden is in de bodem. Het is een mix tussen klei, silt en zand. De eigenschappen van het leem worden bepaald door de hoeveelheid klei in de leem. Indien er meer dan 14% klei in de leem aanwezig is, zal de leem niet meer dienen als bouw materiaal omdat deze dan te vet is. Bij droging van leem zal deze natuurlijk uitharden. Leem heeft ook een aantal voordelen. Het is een natuurlijk en duurzaam materiaal waar niet snel tekorten van zullen komen. Daarnaast is het zeer hard na droging waardoor het makkelijk bewerkbaar is. Leem is een materiaal met een zeer kleine doorlatendheid en zal langzaam zetten bij grote belastingen [4].

2.2 Cement als bindmiddel

Cement is een poeder dat zal fungeren als bindmiddel in mortel. Er zijn drie groten groepen die onderscheiden kunnen worden. De eerste groep is de portlandcement, deze soort zal snel uitharden. De tweede groep is de portlandvlieggascement, deze soort staat er om bekend om langzamer uit te harden maar uiteindelijk wel een hogere dichtheid te behalen. Ten slotte bestaat er ook nog een hoogovencement, deze soort zal een zeer hoge dichtheid behalen waardoor agressieve stoffen niet kunnen binnendringen in het uitgeharde geheel. Het principe van cement is de volgende: Indien cement in contact komt met water zal deze beginnen reageren. Door deze chemische reactie zullen zich in de poriën tussen de cementmortels kristallen vormen. De gevormde kristallen komen vervolgens in contact met de steenoppervlakken en er zal een fysisch-mechanische verbinding ontstaan. Deze reactie zal blijven doorgaan tot de mortel volledig is uitgehard [5].

2.3 Hechtingsmechanisme

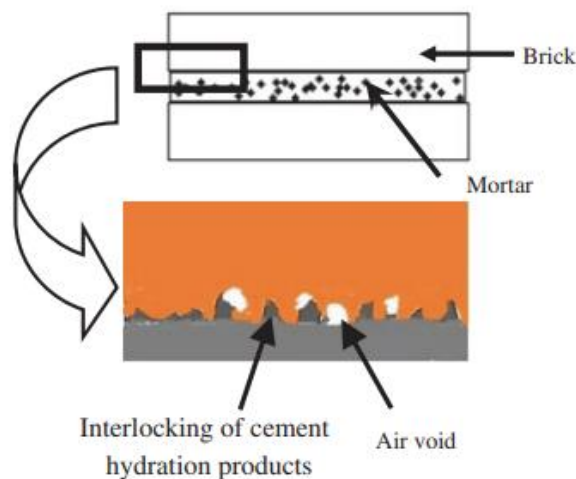
Om het potentieel voor hergebruik van leemstenen te beoordelen, is het essentieel de hechtsterkte te onderzoeken, oftewel de binding tussen de mortel en de leemsteen. Deze hechtsterkte bepaalt de mate van moeilijkheid bij het demonteren van het metselwerk en of de leemstenen al dan niet beschadigd raken tijdens dit demotageproces.

Tijdens het bouwen met metselwerk worden stenen of bouwblokken zorgvuldig op een vers aangebracht mortelbed gelegd. Deze verse mortel is een mengsel dat doorgaans componenten bevat zoals cement of kalk, fijne aggregaten (zoals zand), water en soms specifieke toevoegingen die de eigenschappen ervan verbeteren. Het belangrijkste proces dat optreedt nadat de het mortel is aangebracht, is de hydratatie van het bindmiddel, vaak cement, dat essentieel is voor het uithardingsproces. Tijdens deze hydratatie worden cementeuze materialen gevormd, zoals silicaat- en aluminahydraten, die cruciaal zijn voor de sterkte en duurzaamheid van het mortel [6].

Deze verse mortel bevat een aanzienlijke hoeveelheid water, verrijkt met hydratatieproducten, die door droge of slechts gedeeltelijk verzadigde stenen of bouwblokken wordt opgenomen via capillaire werking. Dit opnameproces zorgt ervoor dat de cementeuze materialen zich afzetten in de kleine poriën van de stenen of blokken, zoals geïllustreerd in Figuur 1. Daarnaast ontwikkelen deze materialen zich ook op het grensvlak tussen de steen of het blok en de mortel, binnen de poriën van de metsel eenheid.

Wanneer de mortel uithardt, kristalliseren deze hydratatieproducten en vormen een sterke mechanische binding tussen de metsel eenheid en de mortel [6].

Er is nog geen specifieke literatuur over de hechtingsmechanismen van leemmortel en leemlijmmortel. Het is aannemelijk dat bij leemmortel een vergelijkbaar mechanisme optreedt waarbij kleideeltjes niet chemisch hydrateren, maar wel uitharden in de poriën. Dit resulteert in een veel zwakkere interlocking. Bij leemlijmmortel speelt de morteldikte waarschijnlijk een rol, waarbij methylcellulose chemische verbindingen aangaat en beter als lijm functioneert.



Figuur 1: Mechanische verankering van cementproducten in baksteenporiën [6]

2.4 Invloed van water op hechtsterkte

Tijdens het bouwen van metselwerk is het gebruik van water essentieel. Wat niet algemeen geweten is, is dat de vochtigheid van de stenen een invloed heeft op de capaciteiten van het metselwerk. Zo is uit eerder onderzoek gebleken dat de hechtsterkte tussen de steen en de mortel met wel 70% kan verschillen door een verschil in vochtigheid tussen de gebruikte stenen. Een optimaal vochtgehalte zorgt voor een betere penetratie van de gebruikte mortel in de stenen waardoor er een betere hechting zal ontstaan [7]. Indien de vochtigheid van de steen te hoog is, zal de mortel 'drijven' op de steen waardoor deze niet zal penetreren en er minder binding zal zijn. Indien de vochtigheid van de steen te laag is zal de steen te veel water uit de mortel zuigen waardoor de mortel zal uitdrogen en de binding tussen de twee componenten zal dalen [7].

Daarnaast kan de vochtigheid ook een invloed hebben op het demonteren van het metselwerk. Indien deze vochtigheid niet aanleunt bij de optimale vochtigheid zal de adhesie tussen de twee componenten dalen. Deze daling van de adhesie is een gevolg van het ontstaan van poriënwaterspanning op het contactvlak tussen de steen en de mortel [7].

2.5 De oppervlaktetextuur van CEB's

De oppervlaktestructuur van cementgestabiliseerde geperste leemblokken heeft ook invloed op manier waarop de mortel hecht. Over het algemeen resulteert een ruwere structuur in een betere hechting dan

een glad oppervlak. Factoren zoals het cementgehalte en de dichtheid van de blokken beïnvloeden deze porositeit. [6] toont aan dat factoren zoals het cementgehalte de porositeit verkleinen, wat goed is voor een betere hechting met mortel. De poriegrootte kan variëren, waarbij kleinere poriën doorgaans leiden tot een zwakkere hechting.

2.6 Hechtsterkte na hergebruik

In dit onderzoek wordt tevens onderzocht hoe de hechtsterkte verandert of constant blijft na hergebruik. Zoals te zien is in Figuur 1, kunnen dichte poriën ervoor zorgen dat een nieuw mortelbed zich minder goed kan hechten na hergebruik, wat kan leiden tot een afname in hechtsterkte. Hoewel een onderzoek aantoont dat hergebruikte bakstenen een hogere buigtreksterkte kunnen hebben dan nieuwe bakstenen [8].

Dit benadrukt het belang van reinigingsmethoden en toont het potentieel van hergebruikte leemstenen om te worden ingezet in bouwconstructies zonder verschil in technische eigenschappen voor en na gebruik.

2.7 Deconstructiemethodes

Om leemstenen te kunnen hergebruiken, moeten ze gedemonteerd worden. Deze demontage moet geschikt zijn en ook toegepast kunnen worden op een werf. Een onderzoek heeft gezocht naar methodes die ingezet kunnen worden om bakstenen te recupereren. De ponsmethode en de zaagmethode werden toegepast om de bakstenen te herwinnen. Deze methodes werden toegepast op bakstenen met een cementmortel. Uit deze studie bleek dat 95% van de stenen hergebruikt kan worden [9].

Deze studie bevestigt dat deconstructie en hergebruik niet alleen technisch uitvoerbaar zijn voor dit onderzoek, maar ook kunnen bijdragen aan een reductie van bouw- en sloopafval en de bevordering van een duurzamere bouwpraktijk. Echter, in het onderzoek wordt gebruikgemaakt van geavanceerde technieken die in de praktijk moeilijk opschaalbaar toe te passen zijn.

2.8 Buigtrek- en schuifsterkte van traditioneel metselwerk

De eigenschappen van metselwerk worden door drie factoren bepaald:

- De kenmerken van de gebruikte materialen,
- De afstemming van deze materialen op elkaar,
- De uitvoering van het metselwerk.

Zoals reeds besproken is de hechtsterkte tussen de mortel en de gebruikte stenen een belangrijk kenmerk van metselwerk. Hechtsterkte kan op basis van productnormen verdeeld worden in initiële schuifsterkte en de buigtreksterkte. Deze productnormen staan beter bekend als: NBN EN 1996-1-1. Deze norm behandelt zowel de ontwerpwaarden voor de initiële schuifsterkte als voor de buigtreksterkte voor traditioneel metselwerk. De waarden voor de schuifsterkte zijn weergegeven in Tabel 1 en de waarden voor de buigtreksterkte zijn weergegeven in Tabel 2 [10].

Tabel 1: Minimale schuifsterkte voor traditioneel metselwerk [10]

Metselstenen	f_{vko} (N/mm ²)			
	Mortel voor algemene toepassing met de gegeven sterkteklasse		Lijmmortel (lintvoeg $\geq 0,5$ mm en ≤ 3 mm)	Lichtgewichtmortel
Baksteen	M10 - M20	0,30	0,30	0,15
	M2,5 - M9	0,20		
	M1 - M2	0,10		

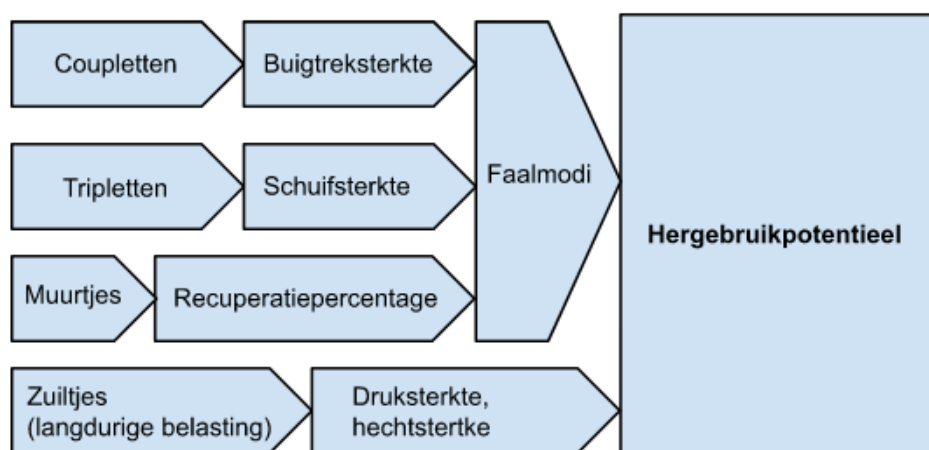
Tabel 2: Minimale buigtreksterkte voor traditioneel metselwerk [10]

Metselstenen		f_{xk1} (N/mm ²)		f_{xk2} (N/mm ²)	
		Mortel voor algemene toepassing $f_m \geq 10$ N/mm ²	Lijmmortel	Mortel voor algemene toepassing $f_m \geq 10$ N/mm ²	Lijmmortel
Metselbaksteen	Groep 1	0.20	0.50	0.40	0.90 (0.80)
	Groep 2	0.20	0.20	0.50 (0.30)	0.50 (0.30)

3. Methodologie

3.1 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is het analyseren van welke steen-mortelcombinatie het best in aanmerking komt voor hergebruik en wat de prestaties zijn van de leemstenen voor en na een langdurige belasting. Dit wordt onderzocht aan de hand van factoren zoals de buigtrek- en schuifsterkte van het metselwerk, de handmatige demontage en de bijkomende faalmodus, het reinigingsproces van de individuele stenen en de druk- en hechtsterkte na langdurige belasting. Figuur 2 geeft de methodologie grafisch weer.



Figuur 2: Grafische weergave methodologie

Met behulp van deze grafische weergave is het mogelijk om de onderzoeksvragen te overlopen en te kaderen binnen dit onderzoek. In dit onderzoek zijn er drie grote onderzoeksvragen:

- 1. Wat is de specifieke hechtsterkte van verschillende leemsteen-mortelcombinaties en de hechtsterkte bij hergebruik?**

Om leemsteenmetselwerk kwantitatief te kunnen karakteriseren is het noodzakelijk om onderzoek te doen naar de buigtrek- en schuifsterkte tussen de leemstenen en de gebruikte mortels. Om waarden voor de buigtreksterkte te verkrijgen is het nodig om een bond wrench-test uit te voeren. Voor de schuifsterkte te achterhalen is een schuifproef noodzakelijk. In dit onderzoek zijn deze proeven uitgevoerd om te achterhalen wat de capaciteiten zijn van het leemsteenmetselwerk. Samen met de andere proeven kan er een indicatie gegeven worden wat de beste steen-mortelcombinaties zijn om leemsteenmetselwerk te kunnen hergebruiken. Hetzelfde principe wordt ook toegepast op hergebruikte steen-mortelcombinaties.

- 2. Wat is het recuperatiepercentage van verschillende leemsteen-mortelcombinaties in relatie tot de hechtsterkte?**

Het recuperatiepercentage van de leemstenen wordt in dit onderzoek bepaald op basis van de demontage van verschillende muurtjes van leemsteenmetselwerk. Deze muurtjes bevatten diverse steen-mortelcombinaties en verschillende metselwerkverbanden. Het doel van deze demontage is te achterhalen hoeveel stenen effectief gerecupereerd kunnen worden na het ontmantelen van de

muurtjes. Vervolgens wordt het recuperatiepercentage gekoppeld aan de hechtsterkte per steen-mortelcombinatie.

3. Wat is de invloed van langdurige belasting op de druksterkte en buigtreksterkte van gerecupereerde leemstenen?

Ten slotte is het de bedoeling om een vergelijking te maken tussen de druksterkte van leemstenen vóór en na hergebruik. Dit is belangrijk om te verifiëren dat de leemstenen niet ondermaats presteren vooraleer ze hergebruikt zullen worden. Daarnaast worden de stenen gecontroleerd op het behoud van buigtreksterkte na langdurige belasting. De schuifsterkte na langdurige belasting is in dit onderzoek niet behandeld vanwege een tekort aan materialen.

3.2 Materialen

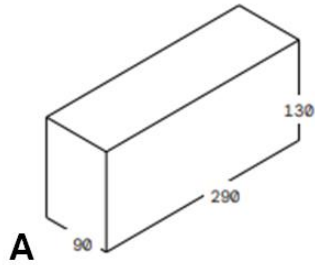
In deze paragraaf wordt de samenstelling en de eigenschappen van de gebruikte materialen besproken, gebaseerd op de technische specificaties van BC Materials, de producent van alle in dit onderzoek gebruikte materialen.

3.2.1 Gestabiliseerde perssteen

- Loessleem:
 - Loessleem is een fijnkorrelig sediment dat wordt gewonnen uit bouwplaatsen als een minerale reststroom. Dit materiaal wordt hergebruikt.
- Gewassen gebroken beton:
 - Gebroken beton, gewonnen uit sloopwerken, wordt gereinigd en hergebruikt. Dit materiaal fungeert als een minerale reststroom en draagt bij aan de structurele integriteit van de leemsteen.
- Rijnzand:
 - Rijnzand wordt toegevoegd voor zijn uniforme korrelgrootte, die bijdraagt aan de consistentie en sterkte van de leemsteen.
- Cement (CEM III 42,5):
 - Een kleine hoeveelheid cement (3,85%) wordt toegevoegd om de leemsteen te stabiliseren en zijn druksterkte te verhogen.

Tabel 3: Technische eigenschappen CEB [11]

Eigenschap	Waarde
Densiteit	1970/1970 kg/m ³
Druksterkte	9 N/mm ²
Initiële wateropzuiging	IW 2
Druksterkte van gemetselde halfblokken	7 N/mm ²



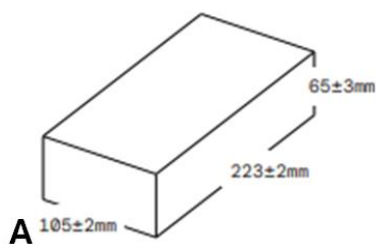
Figuur 3: Geperste gestabiliseerde leemsteen [11]

3.2.2 Vormsteen

- Alluviale Klei van de Schelde:
 - Deze klei wordt gewonnen uit de rivier de Schelde en vormt de basis van de leemmortel. Alluviale klei heeft plastische eigenschappen, wat bijdraagt aan de verwerkbaarheid van de mortel.
- Loessleem
- Baksteenafval:
 - Baksteenafval, afkomstig van sloop- en bouwafval, wordt gereinigd en vermalen tot een bruikbare fractie.

Tabel 4: Technische eigenschappen MEB [11]

Eigenschap	Waarde
Densiteit	1620 kg/m ³
Druksterkte	2,5 N/mm ²
Druksterkte van gemetselde halfblokken	1,9 N/mm ²



Figuur 4: Vormstenen [11]

3.2.3 Leemmortel

Leemmortel is samengesteld uit een mengsel van natuurlijke grondstoffen, met focus op circulariteit en duurzaamheid. De voornaamste componenten zijn:

- Klei van Dordogne:
 - Dit is een specifieke kleisoort afkomstig uit de Dordogne-regio. Klei speelt een rol in de cohesie en plasticiteit van de mortel.
- Loessleem
- Brusseliaanzand:
 - Brusseliaanzand is een type zand afkomstig uit bouwplaatsen, eveneens een minerale reststroom. Het wordt toegevoegd om de mortel de benodigde structuur en sterkte te geven.
- Rijnzand

Tabel 5: Technische eigenschappen EM [11]

Eigenschap	Waarde
Densiteit	1,8 kg/m ³
Druksterkte	2,5 N/mm ²
Sterkteklasse	M2, 5
Initiële Afschuifsterkte	0,04 N/mm ²

3.2.4 Lijmmortel

- Loessleem
- Brusseliaanzand
- Cellulose:
 - Cellulose wordt toegevoegd om de mortel extra flexibiliteit en hechting te geven, wat essentieel is voor de stabiliteit en duurzaamheid van de constructies waarin het wordt gebruikt.

Tabel 6: Technische eigenschappen EAM [11]

Eigenschap	Waarde
Densiteit	1,6 kg/m ³
Druksterkte	2,5 N/mm ²
Sterkteklasse	M2, 5
Initiële Afschuifsterkte	0,2 N/mm ²

3.2.5 Bastaardmortel

Voor de bastaardmortel wordt gebruik gemaakt van een leemadditief dat wordt toegevoegd aan een bastaardmortel met sterkteklasse M10. Het leemadditief is een kleinere fractie van de gewone leemmortel met als samenstelling:

- Loessleem

Tabel 7: Technische eigenschappen BME [11]

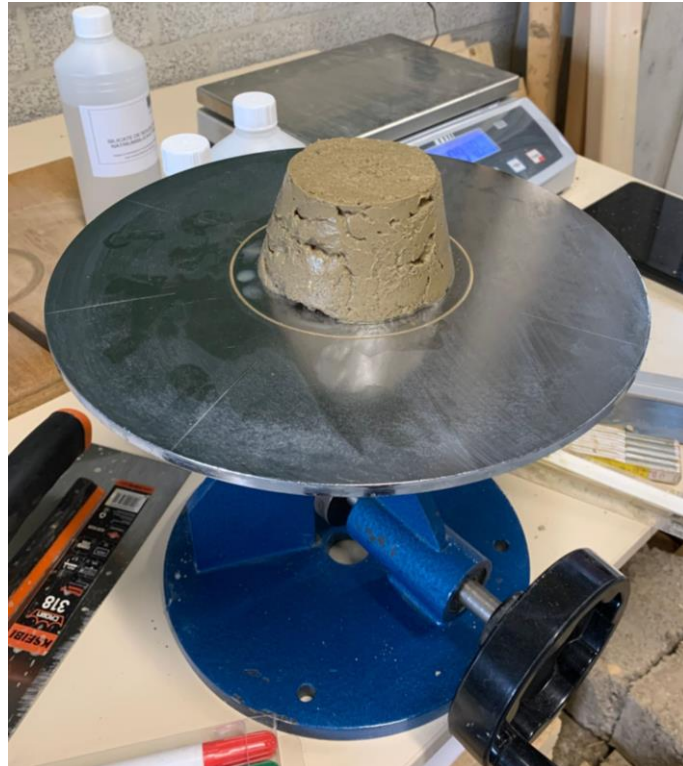
Eigenschap	Waarde
Densiteit	1,6 kg/m ³
Druksterkte	4,5 N/mm ²
Sterkteklasse	M4, 5
Initiële Afschuifsterkte	0,1 N/mm ²

3.2.6 Consistentie mortels

De mate van consistentie van de mortel is een indicator voor hoe gemakkelijk de verse metselmortel kan worden verwerkt, zoals vastgesteld volgens de norm EN 1015-3 via de flowtafeltest [12]. Het proces van deze test wordt weergegeven in Figuur 5. Bovendien tonen de resultaten in Tabel 8 de flowwaarden van de drie verschillende mortels die zijn gebruikt. De leemlijmmortel (EAM) kan niet nauwkeurig worden bepaald vanwege zijn hoge kleverigheid, waardoor deze aan de kegel blijft plakken bij het optillen, wat resulteert in onbetrouwbare metingen.

Tabel 8: Resultaten flow table test

Mortel	Gemiddelde gebruikte diameter (mm)
EM	150
EAM	/(niet te bepalen)
BME	161

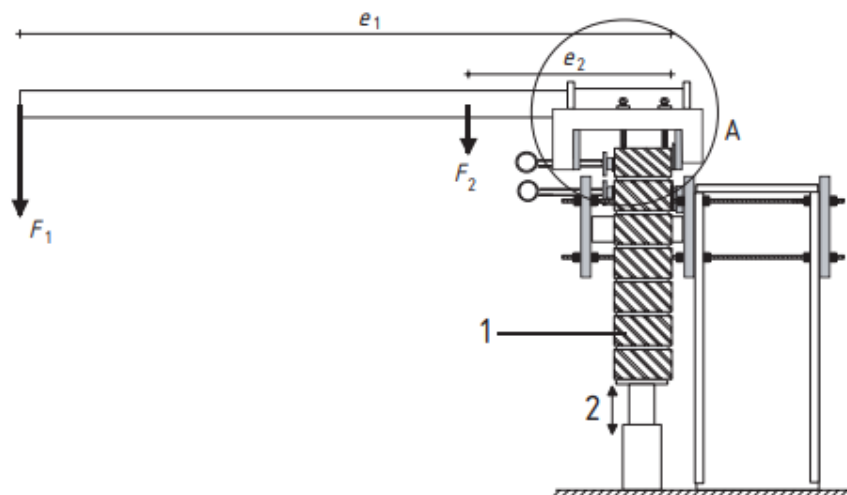


Figuur 5: Flow table test

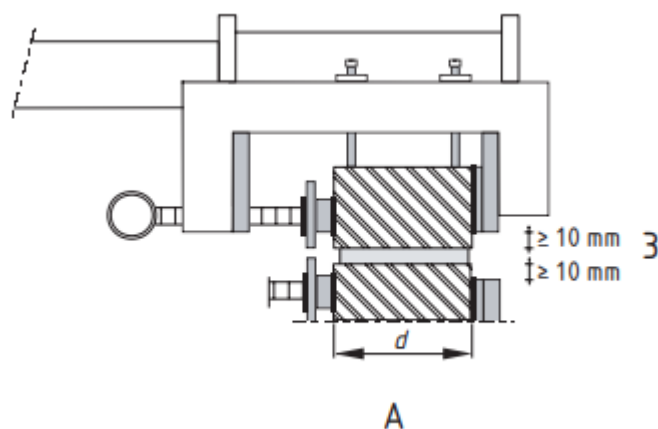
3.3 Buigtreksterkte

3.3.1 EN 1052-5

De hechtsterkte voor dit onderzoek wordt bepaald aan de hand van EN 1052-5. De onderste steen wordt als eerst geklemd. De test wordt uitgevoerd door het specimen in het frame te klemmen, zodanig dat de bovenste unit vrij is van andere belastingen dan die welke door de klem worden toegepast. De kracht wordt geleidelijk verhoogd door de hefboom om een buigmoment te creëren, zodat het falen binnen twee tot vijf minuten optreedt. Dit wordt gedaan tot het moment dat de bovenste unit van de rest van het specimen loskomt, waarbij de hechtsterkte wordt gemeten. De verplaatsingssnelheid voor alle testen in dit onderzoek bedraagt twee millimeter per minuut. De proefopstelling is te zien in Figuur 6 en Figuur 7 [13].



Figuur 6: Bond wrench-test [13]



Figuur 7: Bond wrench-test detail [13]

De hechtsterkte wordt verkregen met formule:

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

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

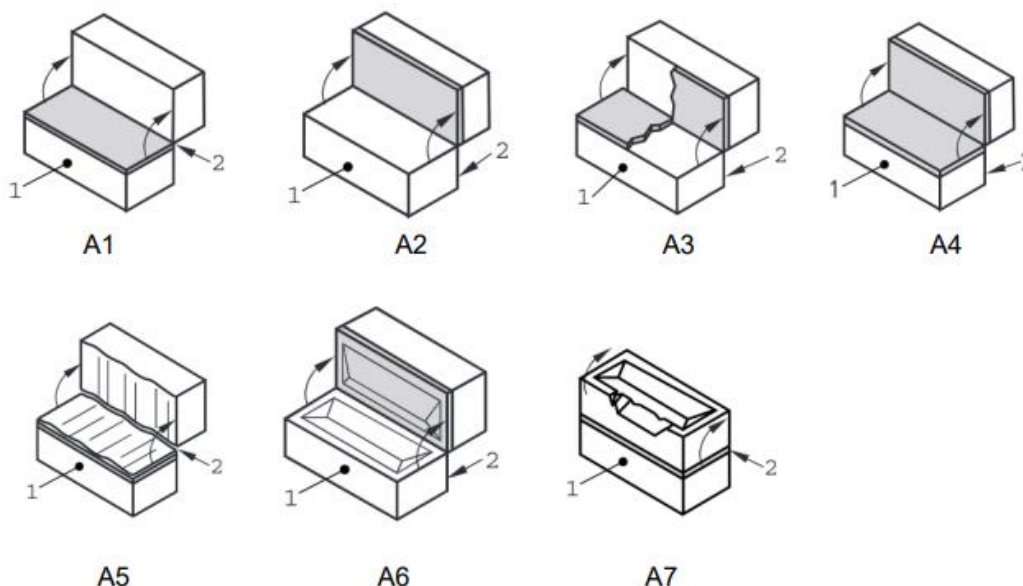
en

- b gemiddelde breedte van de mortelvoeg in mm;
- d gemiddelde diepte van het proefstuk in mm;
- e₁ afstand van de kracht F₁ tot het trekvlak van het proefstuk in mm;
- e₂ afstand van de kracht F₂ tot het trekvlak van het proefstuk in mm;
- F₁ aangebrachte kracht in N;
- F₂ eigengewicht van de klem in N;
- W gewicht van de afgebroken steen en de aanhangende mortel in N [13].

In EN 1052-5 worden verschillende faalmodi beschreven die kunnen optreden. Deze kunnen worden geconstateerd wanneer de steen-mortelcombinatie faalt. De 7 faalmodi worden hieronder beschreven:

- A1: falen op grensvlak tussen mortel en bovenste steen;
- A2: falen op grensvlak tussen mortel en onderste steen;
- A3: falen op beide grensvlakken;
- A4: spanningsbreuk binnen de mortellaag;
- A5: spanningsbreuk binnen de steen bij het grensvlak;
- A6: breuk op grensvlak tussen mortel en de onderste eenheid bij *frogged* steen;
- A7: verbrijzeling/afschuiving van de eenheid die ingeklemd is [13].

In dit onderzoek kunnen Faalmodi 6 en 7 niet worden gerealiseerd, aangezien uitsluitend vlakke stenen worden gebruikt.



Figuur 8: Faalmodi bond wrench-test [13]

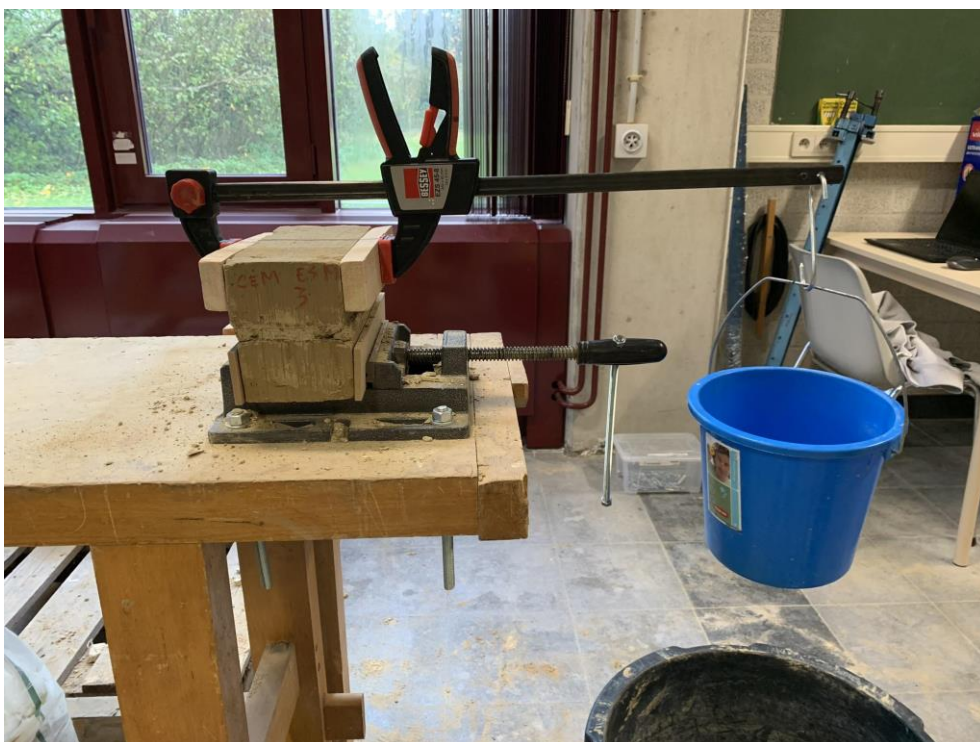
3.3.2 Proefopstelling bond wrench-test exploratiefase

Tijdens de exploratiefase wordt de bond wrench-test toegepast op de gemaakte coupletten. De procedure houdt in dat de onderste steen wordt vastgezet in een bankschroef, terwijl een klem op de bovenste steen wordt aangebracht. Volgens EN 1052-5 moet de hefboomarm minimaal 100 cm bedragen, de gebruikte arm voldoet aan deze eis. Aan het einde van de klem wordt een emmer gehangen, die tijdens de test wordt gevuld met zand, totdat het proefstuk bezwijkt [13]. Houten plaatjes worden ingezet om de lasten van de klem en de bankschroef evenredig te spreiden over de hele breedte van de stenen. De opstelling van deze test is afgebeeld in Figuur 9. Een andere hefboomarm werd toegepast voor de zwakkere coupletten, aangezien de grote hefboomarm reeds te veel kracht uitoefende vanwege zijn eigen gewicht, waardoor het een buitensporig grote hefboom werd. Deze armlengte wijkt af van hetgeen in de norm wordt voorgeschreven.



Figuur 9: Proefopstelling bond wrench-test exploratiefase

In Figuur 10 is te zien dat de kleine klem alleen aan de zijkanten contact maakt met de bovenste steen, zonder de top ervan te raken. Dit ontwerp kan leiden tot problemen: als de klem enigszins excentrisch is geplaatst en er belasting wordt toegepast, kan deze om zijn contactpunten met de steen draaien, wat kan resulteren in het falen van de proefopstelling. Dit is een afwijking van norm EN 1052-5, die voorschrijft dat er kleine blokjes tussen de klem en de bovenste steen geplaatst moeten worden om dergelijke rotatie te voorkomen [13].



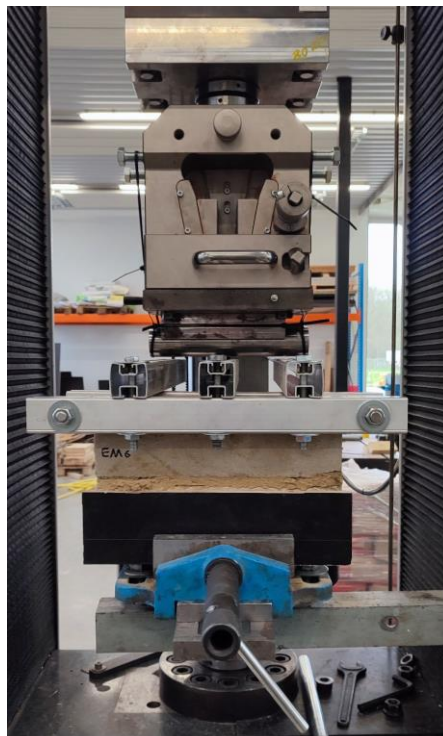
Figuur 10: Proefopstelling bond wrench test exploratiefase met kleine klem

3.3.3 Proefopstelling vernieuwde bond wrench-test

Er is besloten om een vernieuwde bond wrench-test te ontwikkelen omdat tijdens de exploratiefase een gebrek aan precisie werd geconstateerd. De vernieuwde bond wrench-test is te zien in Figuur 11. De vernieuwde bond wrench-test wordt volledig automatisch uitgevoerd door een drukbank. Hierdoor is er consistent een gelijkmatige toename van kracht, wat het mogelijk maakt om de maximale kracht nauwkeuriger vast te stellen. De drukbank stopt automatisch wanneer een plotselinge daling in kracht wordt waargenomen. De bovenklem wordt nu vervangen door een op maat gemaakte klem, die ook van bovenaf de steen vastklemt om rotatie te voorkomen.



Figuur 11: Vernieuwde automatische bond wrench-test



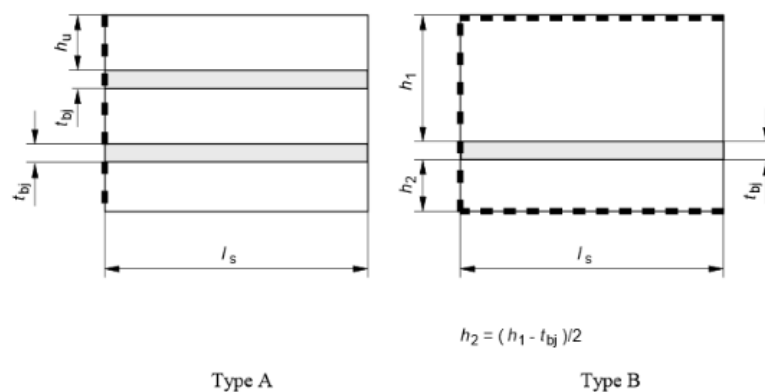
Figuur 12: Vooraanzicht vernieuwde bond wrench-test

3.4 Schuifsterkte

3.4.1 NBN EN 1052-3

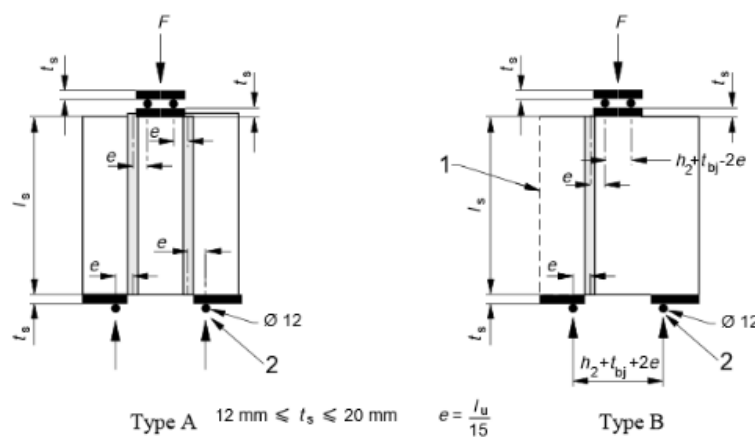
De schuifsterkte voor dit onderzoek wordt vastgesteld aan de hand van de richtlijnen uiteengezet in EN 1052-3. Aangezien de lengte van de stenen minder dan 300 mm bedraagt, wordt gebruik gemaakt van een type A proefopstelling [14].

Specifieke eisen: De dikte van de mortel dient zich te bevinden binnen een bereik van 8 mm tot 15 mm (de leemmortel wijkt af van deze waarde). Onze proefstukken worden consequent gemetseld met een morteldikte van 10 ± 2 mm. Er moet een voordruk worden aangebracht op alle stenen, en moet uniform liggen tussen $2.0 \times 10^{-3} N/mm^2$ en $5.0 \times 10^{-3} N/mm^2$. Het testen dient plaats te vinden wanneer de mortels volledig zijn uitgehard, conform een periode van 28 dagen met een tolerantie van ± 1 dag [14].



Figuur 13: Type A en type B schuifsterktest [14]

Figuur 14 toont de proefopstelling voor het meten van de schuifsterkte. Een triplet wordt geplaatst waarbij de buitenste twee stenen worden ondersteund. Zo kan een van bovenaf toegepaste kracht alleen op de middelste steen drukken.



Figuur 14: Proefopstelling schuifsterktest [14]

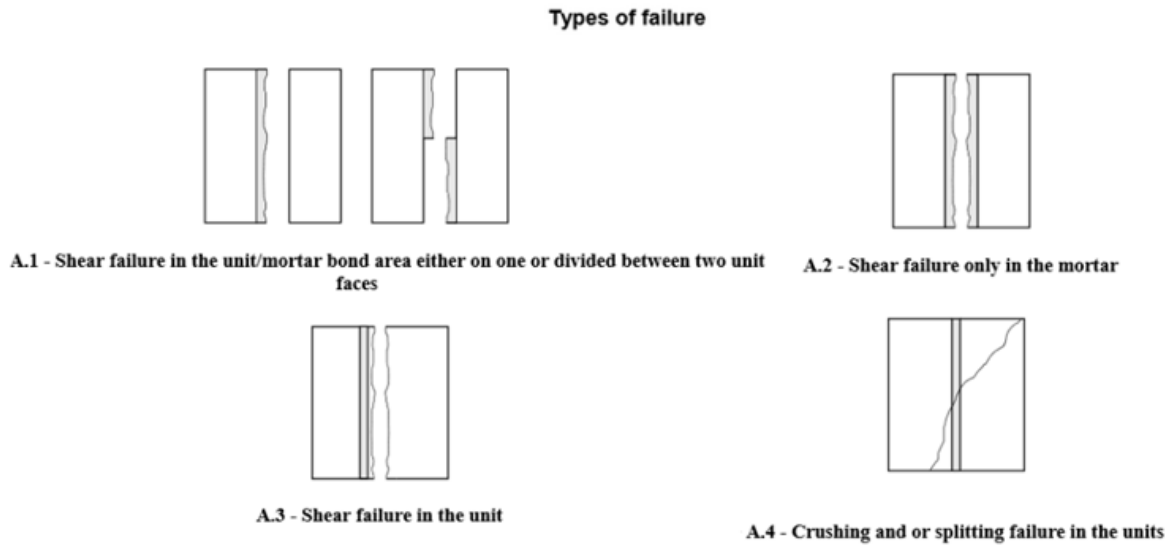
De schuifsterkte wordt verkregen met onderstaande formule:

$$f_{voi} = F_{i,max} / 2A_i \quad (2)$$

Waarin

- f_{v0i} schuifsterkte van een individuele monster (N/mm^2);
 $F_{i,max}$ maximale bereikte schuifsterkte (N);
 A_i dwarsdoorsnede van het monster (mm^2) [14].

Figuur 15 toont de verschillende faalmodi die kunnen optreden bij het falen van de stenen in de schuifsterktetest.



Figuur 15: Faalmodi schuifsterktetest [14]

3.4.2 Proefopstelling schuifsterktetest

Om de schuifsterkte te bepalen volgens de norm EN 1052-3 wordt opnieuw de drukbank gebruikt, zoals te zien in Figuur 16. Hierbij wordt een constructie gemaakt waarin de twee buitenste stenen worden ondersteund door de proefopstelling. De middelste steen en de mortel moeten vrij zijn en verticaal kunnen uitschuiven. Van bovenaf wordt een gelijkmatig toenemende kracht toegepast, die stopt wanneer er een breuk optreedt. Tijdens deze opstelling is het belangrijk ervoor te zorgen dat het balkje dat kracht uitoefent op het triplet in het midden correct wordt geplaatst. Daarnaast is symmetrie zeer belangrijk, een gelijke verdeling van krachten is noodzakelijk om op beide steenvlakken dezelfde interne spanningen te krijgen. De maximale kracht wordt gemonitord, en aan de hand van formule 2 kan de schuifsterkte van de steen-mortelcombinaties worden berekend.



Figuur 16: Proefopstelling schuifsterketest

3.5 Manuele demontage

Om de manuele demontage uit te voeren, is er een niet gestandaardiseerde proefopstelling ontwikkeld. De muurtjes zijn vooraf gemetseld met verschillende combinaties qua mortel en stenen, waarbij er voor elke combinatie twee metselwerkverbanden zijn uitgevoerd. Voor de persstenen waren dit een verticaal en een horizontaal strekverband en voor de vormstenen een strekverband en een kopverband.

Om de muurtjes te demonteren is een klopboommachine met een beitel erop gebruikt, waarbij er consistent op dezelfde oriëntatie is gemikt. Dit is altijd op de intersectie tussen de horizontale en de verticale voegen gebeurd om de muurtjes op een gelijkaardige manier te demonteren en de efficiëntie te verhogen door mogelijks meerdere stenen tegelijk te ontmantelen. Doordat hier nog geen gestandaardiseerde methode voor bestaat, werd geopteerd voor een gangbare methode voor gecontroleerde deconstructie in de praktijk.



Figuur 17: Proefopstelling manuele demontage voor persstenen in verticaal strekverband

3.6 Druksterkte

3.6.1 EN 772-1:2011+A1

De druktesten zijn uitgevoerd aan de hand van EN 772-1:2011+A1. Het principe van deze proef is dat het proefstuk na hergebruik wordt getest op de druksterkte. De druksterkte wordt bepaald met behulp van een drukbank. Het proefstuk wordt tussen twee platen gelegd en gedrukt tot falen. Het drukken wordt uitgevoerd door een gelijkmatig verdeelde belasting te laten oplopen tot het proefstuk is gefaald.

Specifieke eisen: het is belangrijk dat van elke steensoort minstens zes proefstukken getest kunnen worden. Daarnaast is het belangrijk dat de snelheid voor deze proef gelijk is aan $0,3 \frac{N/mm^2}{s}$ [15]. Deze snelheid is bepaald aan de hand van de druksterkte van de steen.

De druksterkte wordt vervolgens bepaald door de maximale kracht te delen door het belaste oppervlak. Het is dus belangrijk dat het belaste oppervlak zeer nauwkeurig opgemeten wordt. De uiteindelijke druksterkte wordt verkregen door de gemiddelde waarde te nemen van de zes proefstukken. Dit met een nauwkeurigheid van $0,1 N/mm^2$.

3.6.2 Proefopstelling druksterkte test

De drukproeven zijn uitgevoerd met een drukbank. Wat voor deze proeven belangrijk is, is dat het proefstuk altijd in het midden van de proefbank geplaatst wordt. Op deze manier wordt de druk altijd gelijk verdeeld over het oppervlak van het proefstuk. Zoals te zien is op Figuur 18 is er gebruik gemaakt

van een verplaatsingsmeter. Dankzij deze verplaatsing kan direct de drukspanning bepaald worden in plaats van de druksterkte van de leemstenen.



Figuur 18: Proefopstelling drukproeven met behulp van de verplaatsingsmeter

3.7 Langdurige belasting

Voor de proefopstelling van de langdurige belasting is ervoor gekozen om 90 dagen een belasting toe te voegen om de werkelijkheid op een zo realistisch mogelijke manier te benaderen. De proef was oorspronkelijk ook bedoeld om kruipvervorming te meten.

Het doel hiervan is om uiteindelijk te kunnen achterhalen of de leemstenen na de langdurige belasting nog dezelfde mechanische eigenschappen bezitten. Zo zijn er voor de verschillende steen-mortelcombinaties telkens drie zuiltjes gemetst en onder belasting geplaatst. Deze zuiltjes zijn te zien in Figuur 19a. Na de belasting van 90 dagen zijn deze handmatig gedemonteerd zoals besproken in “3.5 Manuele demontage”. Ook zijn er 12 coupletten gemetst en langdurig belast, dit is te zien in Figuur 19b. Vervolgens zijn er drukproeven en buigtrekproeven uitgevoerd op de gerecupereerde leemstenen. De proefopstelling van deze drukproeven wordt besproken in “3.6.2 Proefopstelling druksterkte test”.



Figuur 19: Langdurige belasting a) zuiltjes b) coupletten

3.8 Initiële waterabsorptie

3.8.1 EN 772-11

Vervolgens is de initiële waterabsorptie bepaald aan de hand van EN 772-11. Het principe van deze proef is het achterhalen hoeveel water het proefstuk opneemt in een tijdspanne van één minuut. In Figuur 20 is te zien hoe het proefstuk op voorhand gedroogd wordt, waarbij er in een tijdspanne van 24 uur, minder dan 0,1% van de totale massa verdwenen mag zijn. Indien het verschil groter is dan 0,1% wordt het proefstuk verder gedroogd in de oven met een temperatuur van $105\text{ C}^{\circ} \pm 5\text{ C}^{\circ}$ [16].



Figuur 20: Droging van de proefstukken

Na de droging in de oven kan de test beginnen. Tijdens de test zal het proefstuk eerst gewogen worden om de droge massa te bepalen. Vervolgens zal het proefstuk voor één minuut in een waterlaag van een halve centimeter geplaatst worden. In deze tijdspanne zal het proefstuk water opnemen en dus een grotere massa krijgen. Na één minuut wordt het proefstuk uit het water genomen, droog geveegd met een doek en opnieuw gewogen. Het verschil in massa wordt vervolgens gebruikt om de initiële waterabsorptie coëfficiënt te bepalen aan de hand van formule 3:

$$c_{w,i} = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{A_s * t} * 10^3 [kg / (m^2 * min)] \quad (3)$$

Waarin:

$c_{w,i}$ = de initiële waterabsorptie coëfficiënt voor leemstenen [$kg / (m^2 * min)$];

$m_{so,s}$ = de massa van het proefstuk na het onderdompelen [g];

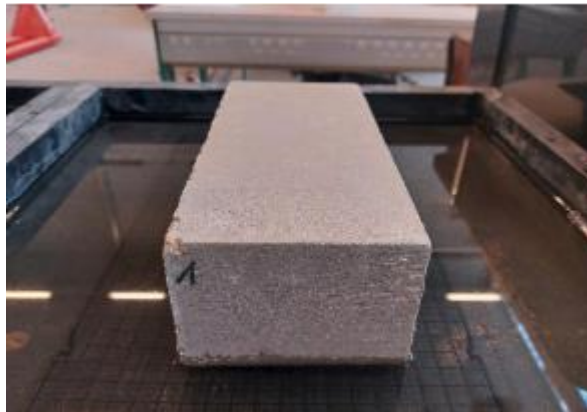
$m_{dry,s}$ = de droge massa van het proefstuk [g];

A_s = het oppervlak dat ondergedompeld wordt in water [mm^2];

t = tijd van onderdompelen [min] [16].

3.8.2 Proefopstelling initiële waterabsorptie test

De proefopstelling om de initiële waterabsorptie te bepalen bestaat uit een schaal met een rooster in geplaatst. In Figuur 21 is te zien hoe de schaal gevuld is met water zodat de leemsteen in een waterlaag van een halve centimeter staat indien deze op het rooster wordt geplaatst. Vervolgens wordt de steen gedurende één minuut in het water geplaatst en wordt de natte steen gewogen om de natte massa te kunnen bepalen [16].



Figuur 21: Proefopstelling initiële waterabsorptie [17]

4. Resultaten en discussie

4.1 Exploratiefase

In de exploratiefase van dit onderzoek was het doel om vertrouwd te raken met de materialen en technieken die in de uiteindelijke onderzoeksfase zouden worden toegepast. Daarnaast is het cruciaal om problemen die zich tijdens de proeven in de exploratiefase voordoen, te identificeren zodat deze tijdens de onderzoeksfase van deze thesis vermeden kunnen worden. De resultaten van de exploratiefase geven bovendien al een indicatie van de orde van grootte voor de buigtreksterkte en schuifsterkte tussen de verschillende steen-mortelcombinaties.

4.1.1 Metselen proefstukken

Tijdens de exploratiefase zijn er in totaal 32 coupletten gemetseld met verschillende steen-mortelcombinaties. In Tabel 9 is de samenstelling van de verschillende mortels weergegeven.

Tabel 9: Mortelsamenstelling exploratiefase

EM (leemmortel)	EAM (leemlijmmortel)	ECM (leemmortel met cement)	ESM (leemmortel met sodiumslicaat additief)
30 kg leemmortel 6,85 l water	20 kg leemlijmmortel 6,7 l water	20 kg leemmortel 5,20 l water 1,6 kg cement	20 kg leemmortel 5,7 l water 2 kg silicaat

Bovenstaande mortels zijn vervolgens ook gecontroleerd met de flow table test. De waarden hiervan zijn te vinden in Tabel 10.

Tabel 10: Resultaten flow table test exploratiefase

EM (leemmortel)	EAM (leemlijmmortel)	ECM (leemmortel met cement)	ESM (leemmortel met silicaat additief)
138,5 mm	141 mm	154 mm	123 mm

De bovenstaande waarden zijn gemiddelden van twee verschillende meetpunten die loodrecht ten opzichte van elkaar zijn gemeten. Deze consistenties zijn door ons vastgesteld op basis van de verwerkbaarheid van de mortel.

Tijdens de exploratiefase zijn twee soorten stenen gebruikt: ongestabiliseerde persstenen en ongestabiliseerde vormstenen, beide geproduceerd door BC Materials. Let dus op, tijdens de exploratiefase is er dus niet gebruik gemaakt van de gestabiliseerde persstenen die reeds beschreven zijn in paragraaf "3.2.1 Gestabiliseerde perssteen". De gebruikte vormstenen in deze fase zijn wel al beschreven in "3.2.1 Vormstenen". Voorbeelden van de gemetselde coupletten zijn weergegeven in Figuur 22.



Figuur 22: Gemetste coupletten met voorbelasting

4.1.2 Buigtreksterkte exploratiefase

In de eerste testreeksen van de exploratiefase is gebruik gemaakt van de bond wrench-test. De waarden voor de toegevoegde belasting F_1 en de uiteindelijke buigtreksterkte F_{wi} van de verschillende steen-mortelcombinaties zijn weergegeven in Tabel 11 tot en met Tabel 18.

Tabel 11: Buigtreksterkte exploratiefase MEB-EM

	MEB-EM			
Proefstuk	MEB-EM.1	MEB-EM.2	MEB-EM.3	MEB-EM.4
Toegevoegde belasting F_1 [N]	6,53	1,72	10,4	7,15
Buigtreksterkte F_{wi} [N/mm ²]	0,00901	0,00254	0,0142	0,00983
Gemiddelde buigtreksterkte [N/mm ²]	0,00889			
Standaardafwijking	0,00416			
Faalmodi	A1	A2	A3	A3

Tabel 12: Buigtreksterkte exploratiefase CEB-EM

	CEB-EM			
Proefstuk	CEB-EM.1	CEB-EM.2	CEB-EM.3	CEB-EM.4
Toegevoegde belasting F_1 [N]	/	13,2	38,8	13,4
Buigtreksterkte F_{wi} [N/mm ²]	/	0,0263	0,0595	0,0263
Gemiddelde buigtreksterkte [N/mm ²]	0,0374			
Standaardafwijking	0,0156			
Faalmodi	A2	A2	A2	A2

Tabel 13: Buigtreksterkte exploratiefase MEB-EAM

	MEB-EAM			
Proefstuk	MEB-EAM.1	MEB-EAM.2	MEB-EAM.3	MEB-EAM.4
Toegevoegde belasting F ₁ [N]	195	/	155	/
Buigtreksterkte F _{wi} [N/mm ²]	0,468	/	0,369	/
Gemiddelde buigtreksterkte [N/mm ²]	0,419			
Standaardafwijking	0,0494			
Faalmodi	A3	A5	A3	A3

Tabel 14: Buigtreksterkte exploratiefase CEB-EAM

	CEB-EAM			
Proefstuk	CEB-EAM.1	CEB-EAM.2	CEB-EAM.3	CEB-EAM.4
Toegevoegde belasting F ₁ [N]	65,0	75,0	111	/
Buigtreksterkte F _{wi} [N/mm ²]	/	/	0,147	/
Gemiddelde buigtreksterkte [N/mm ²]	0,147			
Standaardafwijking	/			
Faalmodi	A5	A5	A5	A5

Tabel 15: Buigtreksterkte exploratiefase MEB-ECM

	MEB-ECM			
Proefstuk	MEB-ECM.1	MEB-ECM.2	MEB-ECM.3	MEB-ECM.4
Toegevoegde belasting F ₁ [N]	/	8,91	7,24	7,92
Buigtreksterkte F _{wi} [N/mm ²]	/	0,0119	0,0104	0,0106
Gemiddelde buigtreksterkte [N/mm ²]	0,0110			
Standaardafwijking	0,000683			
Faalmodi	A1	A3	A3	A3

Tabel 16: Buigtreksterkte exploratiefase CEB-ECM

	CEB-ECM			
Proefstuk	CEB-ECM.1	CEB-ECM.2	CEB-ECM.3	CEB-ECM.4
Toegevoegde belasting F ₁ [N]	/	4,43	23,1	34,5
Buigtreksterkte F _{wi} [N/mm ²]	/	0,00316	0,0154	0,0251
Gemiddelde buigtreksterkte [N/mm ²]	0,0146			
Standaardafwijking	0,00897			
Faalmodi	A3	A1	A3	A3

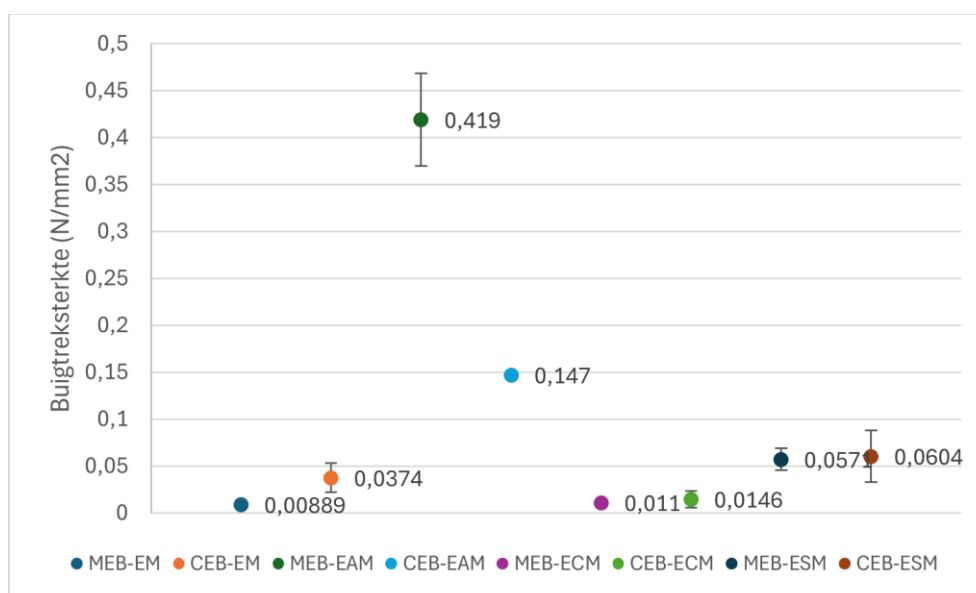
Tabel 17: Buigtreksterkte exploratiefase MEB-ESM

Proefstuk	MEB-ESM			
	MEB-ESM.1	MEB-ESM.2	MEB-ESM.3	MEB-ESM.4
Toegevoegde belasting F ₁ [N]	42,8	54,0	31,6	/
Buigtreksterkte F _{wi} [N/mm ²]	0,0576	0,0710	0,0426	/
Gemiddelde buigtreksterkte [N/mm ²]	0,0571			
Standaardafwijking	0,0116			
Faalmodi	A4	A4	A4	/

Tabel 18: Buigtreksterkte exploratiefase CEB-ESM

Proefstuk	CEB-ESM			
	CEB-ESM.1	CEB-ESM.2	CEB-ESM.3	CEB-ESM.4
Toegevoegde belasting F ₁ [N]	129	43,1	14,2	51,7
Buigtreksterkte F _{wi} [N/mm ²]	0,0944	0,0653	0,0175	0,0644
Gemiddelde buigtreksterkte [N/mm ²]	0,0604			
Standaardafwijking	0,0275			
Faalmodi	A4	A4	A3	A3

Op basis van Tabel 11 tot en met Tabel 18 kan een analyse worden uitgevoerd. Figuur 23 toont de resulterende grafiek, waarin de gemiddelde waarde van de exploratieve buigtreksterkte voor elke steen-mortelcombinatie is geplott. De spreiding van de gemiddelde buigtreksterktes wordt weergegeven met behulp van verticale foutbalken, die de standaardafwijking aangeven.



Figuur 23: Gemiddelde buigtreksterkte per steen-mortelcombinatie in de exploratiefase

In zowel Tabel 11 tot en met Tabel 18 en Figuur 23 is het duidelijk dat op twee resultaten na, alle waarden rond dezelfde grootteorde schommelen. Enkel de combinaties waarbij er gebruik is gemaakt van de leemlijmmortel hebben hogere waarden voor de buigtreksterkte in deze fase van het onderzoek. Daarnaast zijn er voor verschillende proefstukken geen waarden gevonden voor de buigtreksterkte. Dit door verschillende redenen zoals falen tijdens transport van proefstukken of falen van proefstukken tijdens het plaatsen in de proefopstelling. Voor de combinatie van de persstenen met de leemlijmmortel

had het niet behalen van een buigtreksterkte een andere reden. Voor de proefstukken CEB-EAM.1 en CEB-EAM.2 is er een faalmode behaald van A5. Deze faalmode wil, zoals reeds besproken in paragraaf 3.3.1, zeggen dat de verbinding tussen de steen en de mortel niet zal falen. In dit geval zal de perssteen zelf falen, de reden hiervoor is dat de adhesie tussen de perssteen en de leemlijmmortel groter zal zijn dan de cohesie tussen de deeltjes van de perssteen zelf. Om deze resultaten op een kwalitatieve manier te bespreken is er verder onderzoek nodig. De waarden voor de standaarddeviaties zijn te groot of niet aanwezig waardoor de waarden moeilijk te interpreteren zijn.

4.2 Buig- en druksterkte mortels

Om een dieper inzicht te krijgen in de eigenschappen van de mortel, wordt een drukproef en een driepuntsbuigproef uitgevoerd door middel van een belasting op uitgeharde gegoten mortelprisma's, zoals beschreven in EN 1015-11. Deze prisma's worden gevormd met gestandaardiseerde mallen, zoals afgebeeld in Figuur 24, die voldoen aan de afmetingen gespecificeerd in de norm, namelijk 160 mm x 40 mm x 40 mm [18]. Deze test wordt uitgevoerd op de drie soorten mortels die in dit onderzoek gebruikt worden. De mortelbalkjes worden gevuld met dezelfde batch die wordt gebruikt voor de andere testen, waardoor consistentie wordt gewaarborgd en betrouwbare resultaten worden verkregen. Bovendien wordt de mortel gemengd met een gestandaardiseerde mortelmixer.

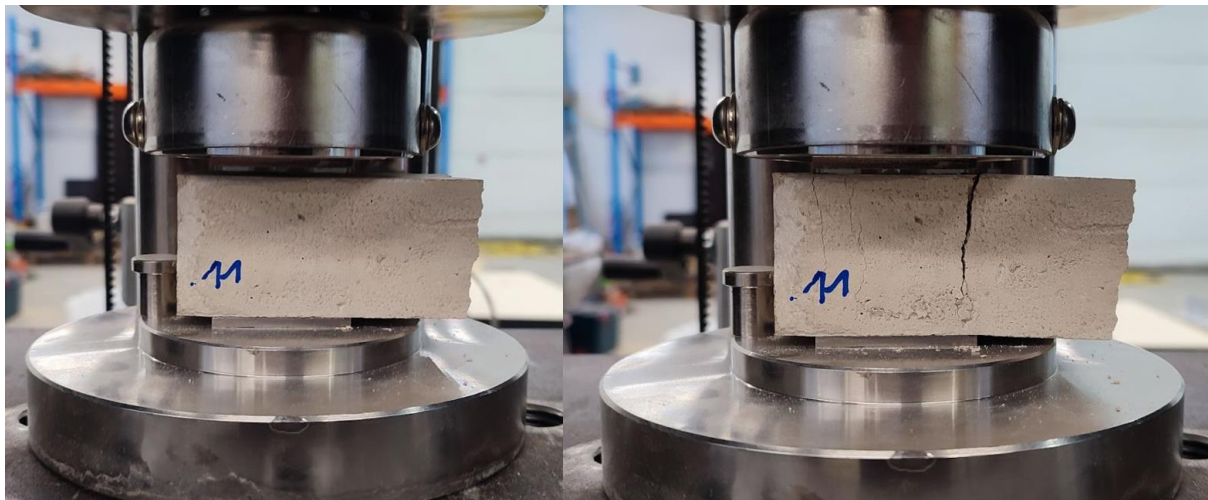


Figuur 24: Droging mortelbalkjes

Na een uithardingstijd van 28 dagen wordt de buig- en druksterkte gemeten [18]. De buigsterkte van de mortel wordt eerst bepaald door middel van een driepuntsbuigproef, geïllustreerd in Figuur 25. De balkjes breken in tweeën, waarna elk deel onder een drukpers wordt geplaatst om de druksterkte van de mortel te meten. Deze procedure wordt weergegeven in Figuur 26.



Figuur 25: Voorbeeld driepuntsbuigproef mortelbalkje



Figuur 26: Voorbeeld drukproef mortelbalkje

Zoals te zien op Figuur 25 en Figuur 26 is het belangrijk om de mortelbalkjes zo te plaatsen dat de evenwijdige zijden van het balkje altijd van boven en van onder georiënteerd zijn, zodat de belasting altijd gelijk aangrijpt over het oppervlak. Tabel 19 geeft alle resultaten van de buig- en drukproeven op de mortelbalkjes. Voor elk proefstuk zijn de gemiddelde sterktes en de standaardafwijkingen per mortelsoort getoond.

Tabel 19: Resultaten buig- en druksterktes mortelbalkjes

Buigsterkte fb				Druksterkte fc			
Markering	fb (Mpa)	fb,mean (MPa)	SD (MPa)	Markering	σ_c (MPa)	fc,mean (MPa)	SD (MPa)
BME1	3,248	2.588	0,357	BME1	17,692	18,746	1,310
BME2	2,171			BME2	16,896		
BME3	2,643			BME3	17,762		
EAM1	2,012	1,775	0,168	EAM1	3,464	3,368	0,243
EAM2	1,661			EAM2	3,606		
EAM3	1,653			EAM3	3,034		
EM1	1,070	1,214	0,105	EM1	3,251	3,178	0,409
EM2	1,316			EM2	3,610		
EM3	1,257			EM3	2,408		

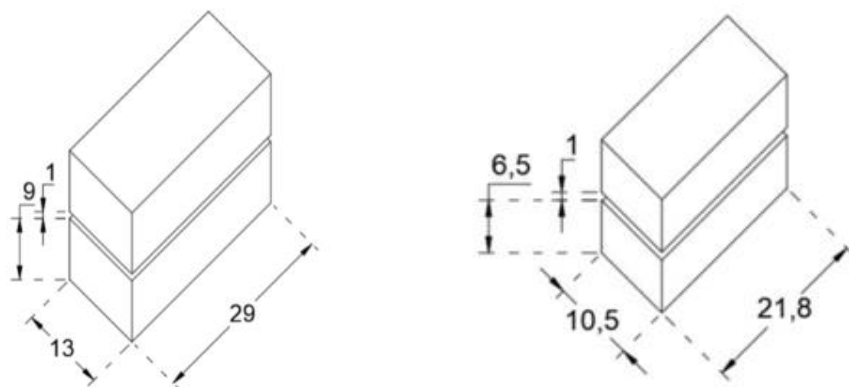
Uit Tabel 19 blijkt dat BME-mortel de hoogste gemiddelde buig- en druksterkte heeft, gevolgd door EAM-mortel. Deze resultaten zijn niet verrassend, aangezien de bastaardmortel cement bevat en daardoor een sterkere structuur biedt. De lijmortel scoort op vlak van de druksterkte vergelijkbaar met de leemmortel. De leemmortel heeft echter de laagste buigsterkte. Omwille van het reeds falen van mortelbalkjes alvorens het uitvoeren van de driepuntsbuigproef verschilt het aantal geteste proefstukken ten opzichte van de drukproef.

4.2 Buigtreksterkte

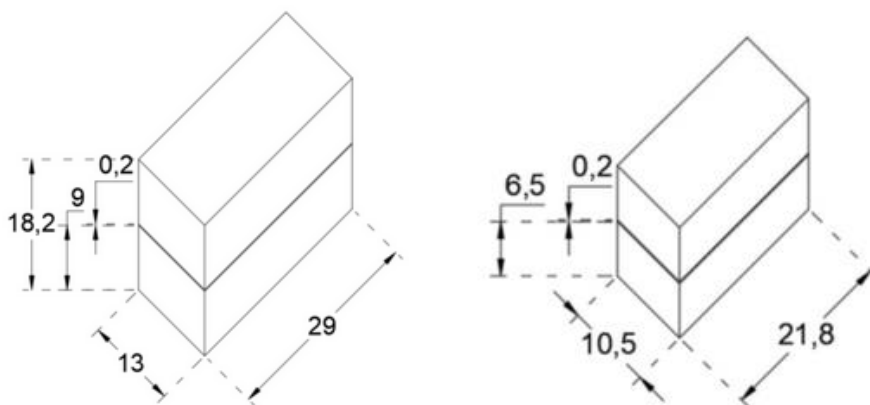
De buigtreksterkte wordt bepaald om een inschatting te kunnen maken over de capaciteiten van het leemsteenmetselwerk. Samen met de schuifsterkte, die in paragraaf 4.3 verder besproken wordt, geeft de buigtreksterkte een indicatie over de hechtsterkte tussen de gebruikte stenen en mortels.

4.2.1 Proefstukken specifieke buigtreksterkte

In dit onderzoek zijn proefstukken vervaardigd met twee verschillende soorten stenen: persstenen (CEB's) en vormstenen (MEB's). Om de bond wrench-test uit te kunnen voeren, zijn er coupletten als proefstukken gebruikt. Figuur 27 toont de afmetingen van de proefstukken met leem- en bastaardmortel, waarbij elke voeg een dikte van 10 mm heeft. Figuur 28 illustreert de afmetingen van de met lijmortel vervaardigde stenen blokken, waarbij elke voeg eveneens een dikte van 2 mm heeft.



Figuur 27: Illustratie CEB-couplet en MEB-couplet voor EM- en BME-mortel



Figuur 28: Illustratie CEB-couplet en MEB-couplet voor EAM-mortel

De ingrediënten voor mortels worden nauwkeurig afgemeten en gemixt met een genormeerde planetaire betonmixer. De samenstelling van de mortels is weergegeven in Tabel 20.

Tabel 20: Samenstelling mortel buigtreksterkte

Mortel		Samenstelling
Ongestabiliseerde Leemmortel	EM	<ul style="list-style-type: none"> ● 25 kg leemmortel ● 4,5 l water ● 10 min mengen
Leemlijmmortel	EAM	<ul style="list-style-type: none"> ● 25 kg leemlijmmortel ● 8 l water ● 10 min mengen
Bastaardmortel	BME	<ul style="list-style-type: none"> ● 25 leemmortel ● 8,3 kg leemadditief ● 6.125 l water ● 10 min mengen

Tabel 20 geeft weer dat voor alle mortels 25kg aan basismateriaal is gebruikt. Vervolgens is er voor de bastaardmortel nog een leemadditief toegevoegd om de kleine fractie van de granulaten te vergroten. Deze kleine fractie zorgt voor een hogere sterkte en een betere verwerkbaarheid van de mortel zelf. Nadat de coupletten zijn gemetseld, wordt er onmiddellijk een voordruk aangebracht die volgens [13] tussen de $0.002 N/mm^2$ en $0.005 N/mm^2$ moet liggen.

Tabel 20 geeft weer dat voor alle mortels 25kg aan basismateriaal is gebruikt. Vervolgens is er voor de bastaardmortel nog een leemadditief toegevoegd om de kleine fractie van de granulaten te vergroten. Deze kleine fractie zorgt voor een hogere sterkte en een betere verwerkbaarheid van de mortel zelf. Nadat de coupletten zijn gemetseld, wordt er onmiddellijk een voordruk aangebracht die volgens [13] tussen de $0.002 N/mm^2$ en $0.005 N/mm^2$ moet liggen.

4.2.2 Analyse specifieke buigtreksterkte

De buigtreksterkte wordt bepaald aan de hand van formule 1 in paragraaf 3.3.1. Parameters F_1 en W volgen uit de resultaten van de bond wrench-testen. De andere parameters uit de formule zijn afhankelijk van de opstelling en de gebruikte steen. Deze parameters zijn weergegeven in Tabel 21.

Tabel 21: Parameters bond wrench-test

Parameter	CEB	MEB	Eenheid
F2	23,720	23,720	N
e1	362	330	mm
e2	112	108	mm
b	290	220	mm
d	120	100	mm

In Tabel 21 valt op dat de waarde van F_2 gelijk is voor zowel de CEB als voor de MEB. Dit komt doordat voor beide soorten proefstukken dezelfde klem is gebruikt om de testen uit te voeren. De resultaten van de bond wrench-testen zijn weergegeven in Tabel 22 tot en met Tabel 26. Voor elk specifiek couplet zijn zowel de faalmodus als de buigtreksterkte vermeld. Daarnaast wordt voor elke soort ook de gemiddelde buigtreksterkte, samen met de bijbehorende standaardafwijking, weergegeven. In bijlage A zijn de volledige tabellen met alle specifieke waarden opgenomen.

Tabel 22: Buigtreksterkte CEB-EAM

CEB-EAM	Faalmode	f_{wi} [N/mm^2]	gem. f_{wi} [N/mm^2]	σ [N/mm^2]
CEB-EAM1	A5	0,315	0,314	0,136
CEB-EAM2	A5	0,295		
CEB-EAM3	A4	0,331		

Tabel 23: Buigtreksterkte CEB-BME

CEB-BME	Faalmode	f_{wi} [N/mm^2]	gem. f_{wi} [N/mm^2]	σ [N/mm^2]
CEB-BME1	A1	0,189	0,171	0,0497
CEB-BME2	A3	0,216		
CEB-BME3	A2	0,173		
CEB-BME4	A1	0,186		
CEB-BME5	A1	0,182		
CEB-BME6	A1	0,208		
CEB-BME7	A1	0,0819		
CEB-BME8	A1	0,219		
CEB-BME9	A1	0,0819		

Tabel 24: Buigtreksterkte CEB-EM

CEB-EM	Faalmode	f_{wi} [N/mm^2]	gem. f_{wi} [N/mm^2]	σ [N/mm^2]
CEB-EM1	A2	0,0358	0,0389	0,0178
CEB-EM2	A2	0,019		
CEB-EM3	A3	0,0426		
CEB-EM4	A2	0,0475		
CEB-EM5	A2	0,0306		
CEB-EM6	A2	0,058		

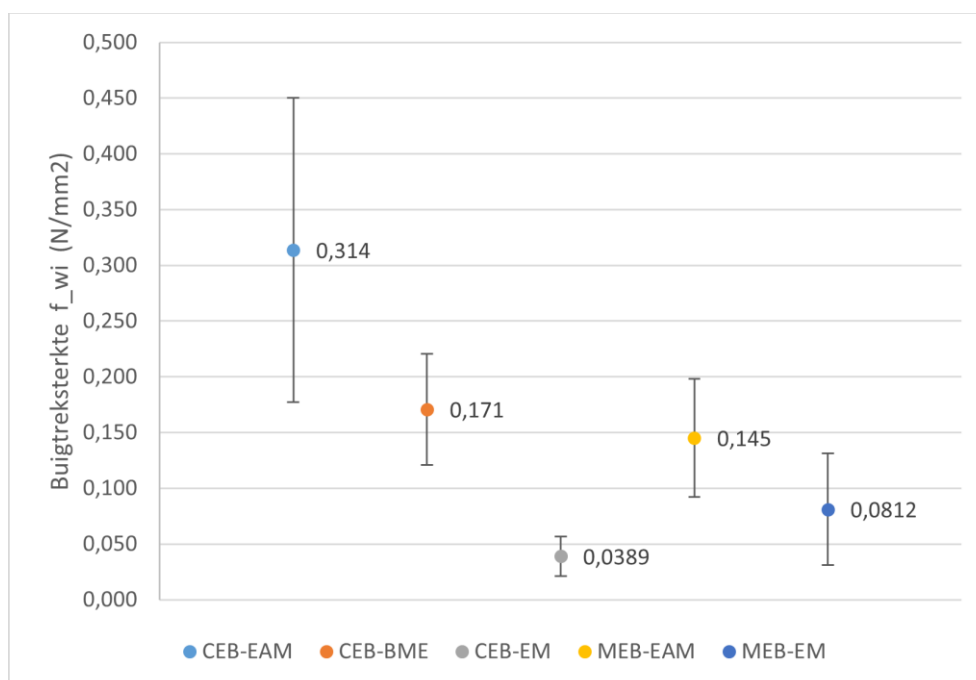
Tabel 25: Buigtreksterkte MEB-EAM

MEB-EAM	Faalmode	f_{wi} [N/mm^2]	gem. f_{wi} [N/mm^2]	σ [N/mm^2]
MEB-EAM1	A3	0,0859	0,145	0,053
MEB-EAM2	A3	0,21		
MEB-EAM3	A3	0,25		
MEB-EAM4	A2	0,108		
MEB-EAM5	A3	0,12		
MEB-EAM6	A3	0,136		
MEB-EAM7	A2	0,0895		
MEB-EAM8	A3	0,173		
MEB-EAM9	A3	0,144		

Tabel 26: Buigtreksterkte MEB-EM

MEB-EM	Faalmode	f_{wi} [N/mm^2]	gem. f_{wi} [N/mm^2]	σ [N/mm^2]
MEB-EM1	A3	0,0261	0,0812	0,0503
MEB-EM2	A3	0,0533		
MEB-EM3	A2	0,0403		
MEB-EM4	A3	0,166		
MEB-EM5	A3	0,131		
MEB-EM6	A3	0,0707		

Op basis van Tabel 22 tot en met Tabel 26 kan een analyse worden uitgevoerd. Figuur 29 toont de resulterende grafiek, waarin de gemiddelde waarde voor elke steen- mortelcombinatie is geplot. De spreiding van de gemiddelde buigtreksterktes wordt weergegeven met behulp van verticale foutbalken, die de standaardafwijking aangeven.



Figuur 29: Resultaten specifieke buigtreksterkte

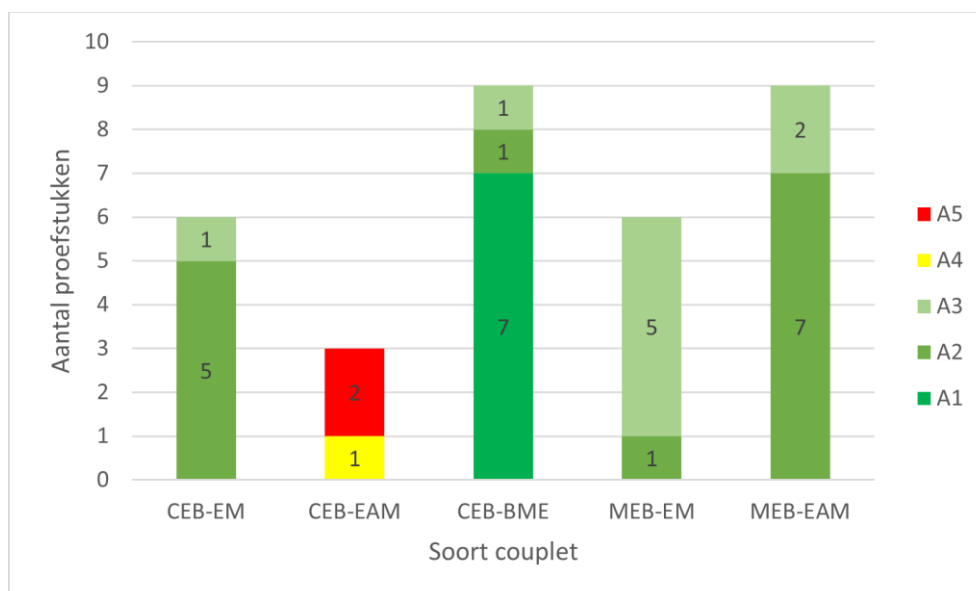
De resultaten uit Figuur 29 tonen aan dat de perssteen in combinatie met de lijm mortel de hoogste gemiddelde buigtreksterkte bezit. Dit wordt gevolgd door dezelfde perssteen in combinatie met de bastaardmortel. De hoge buigtreksterkte van de perssteen met lijm mortel gaat echter gepaard met een grote spreiding in de resultaten. Dit is te wijten aan het feit dat slechts drie proefstukken van deze combinatie zijn getest, wat de nauwkeurigheid van de gemiddelde waarde beperkt. Deze variabiliteit in het aantal proefstukken is te wijten aan het verlies van enkele proefstukken tijdens het transport of tijdens het plaatsen in de proefopstelling. Daarnaast blijkt uit de gevonden resultaten dat lijm mortel in combinatie met vormstenen een lagere buigtreksterkte heeft dan de persstenen met bastaardmortel. Beide soorten leemstenen met leem mortel vertonen de laagste buigtreksterkte. Interessant is dat de buigtreksterkte van de vormsteen hoger is in vergelijking met de perssteen voor een combinatie met de leem mortel. Als de gevonden resultaten van de buigtreksterkte voor het leemsteen metselwerk vergeleken worden met de waarden uit NBN EN 1996-1-1, dan kan besloten worden dat enkel de combinatie CEB-BME in de buurt komt van de normwaarden. Beide combinaties met de lijm mortel zitten lager dan $0,50 N/mm^2$ [10]. Deze vergelijking moet wel met voldoende nuance bekeken worden. Voor traditioneel metselwerk voldoen deze buigtreksterktes van het leemsteen metselwerk niet, maar het is

ook niet de bedoeling om leemsteenmetselwerk het traditionele metselwerk te laten vervangen. Met de gedachte dat de buigtreksterkte lager ligt dan de normwaarden voor traditioneel metselwerk zullen er nog steeds toepassingen zijn waar het leemsteenwerk gebruikt zou kunnen worden.

4.2.3 Analyse faalmodi specifieke buigtreksterkte

Op basis van NBN EN 1052-5 kan er voor elk gefaald proefstuk na de bond wrench-test een faalmodus bepaald worden. De verschillende gevallen zijn weergegeven in Figuur 8 van paragraaf 3.3.1. Aan de hand van de kleuren is te zien hoe wenselijk de faalmodi zijn voor hergebruik.

Faalmodi A1 en A2 zijn op basis van hergebruik het meest gewenst, omdat hierbij altijd één steen mortelvrij blijft en er dus geen schoonmaakwerk nodig is. De koppeling faalt door de zwakke hechting tussen het mortelbed en de steen. Daarna volgt faalmodus A3, waarbij mortel op beide steenoppervlakken achterblijft, waardoor beide stenen schoongemaakt moeten worden. Net als bij faalmodi A1 en A2 faalt hierbij de hechting tussen steen en mortel, waardoor de steen geen beschadiging oploopt en dus hergebruikt zou kunnen worden. Faalmodus A4 volgt hierna en is de laatste faalmodus die nog hergebruikt zou kunnen worden, hoewel dit minder gewenst is. Dit komt doordat de mortel op beide steenoppervlakken volledig blijft kleven, wat een intensievere schoonmaak vereist. Bij deze faalmodus is de hechting tussen de morteldeeltes zwakker dan de hechting van de mortel met de steen. Faalmodus A5 betekent dat de steen beschadigd is en dus niet hergebruikt kan worden. Hierbij is de adhesie tussen de mortel en de steen hoger dan de cohesie tussen de deeltjes in de steen zelf, waardoor de mortel steenfragmenten met zich meebrengt bij het falen. De verschillende faalmodi die resulteren uit de resultaten van de bond wrench-test zijn in Figuur 30 uitgezet.



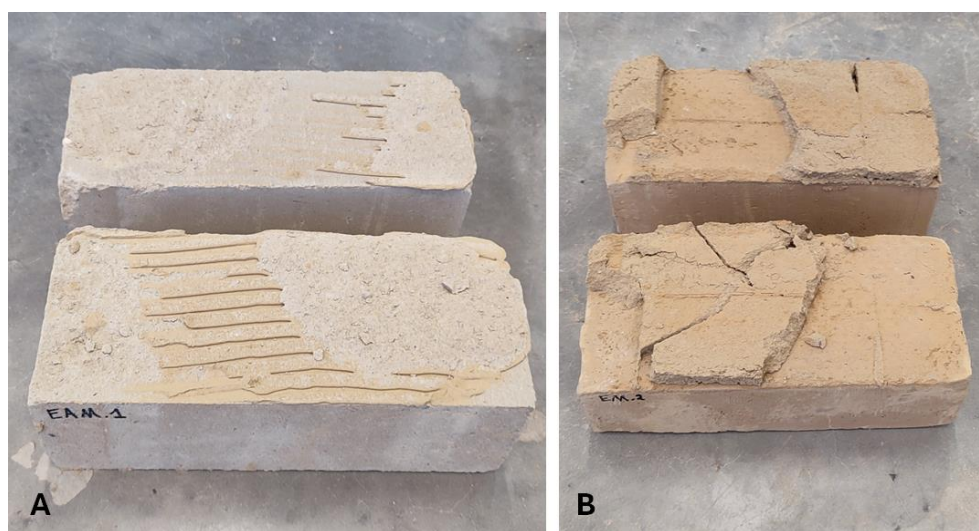
Figuur 30: Faalmodi specifieke buigtreksterkte

De eerste combinatie van mortel en steen, de CEB-EM, vertoont volgens de resultaten in vijf van de zes gevallen een faalmodus van A2 en in het resterende geval een faalmodus van A3. De combinatie met de hoogste buigtreksterkte scoort volgens de faalmodi het slechtst; na de bond wrench-test zijn twee van de drie stenen niet meer herbruikbaar. Figuur 31.a visualiseert faalmodus A5. De tweede sterkste steen-mortelcombinatie, gemeten naar de buigtreksterkte, scoort goed in vergelijking met de CEB-EAM. Deze CEB-BME-combinatie vertoont voornamelijk faalmodus A1, wat gunstig is voor hergebruik. De MEB-EM steen-mortelcombinatie geeft, net zoals met de perssteen, goede resultaten. In vijf van de zes gevallen heeft de combinatie een faalmodus A3, gevisualiseerd in Figuur 31.b, wat

minder efficiënt is dan de CEB-EM combinatie omdat beide stenen schoongemaakt moeten worden. Tenslotte vertoont de MEB-EAM steen-mortelcombinatie in de meeste gevallen faalmodus A2, wat betekent dat slechts één steen schoongemaakt hoeft te worden.

Belangrijk hierbij te vermelden is dat deze conclusies gebaseerd zijn op een statische proefopstelling waarbij de belasting geleidelijk toeneemt. Dit is niet vergelijkbaar met de praktijk, waar dynamische belastingen optreden, zoals bij het gebruik van een hamerboor op muurtjes. Indien een deconstructietechniek ontwikkeld zou worden die de statische proefopstelling benadert door uitsluitend buigtrekspanning toe te passen, zouden deze resultaten mogelijk waardevolle informatie kunnen bieden over het recuperatiepotentieel.

Aanbevelingen voor verder onderzoek omvatten het volgende: Ten eerste, onderzoek naar het effect van dynamische belastingen zoals trillingen en impact. Ten tweede, verdere studies naar de methoden om mortel te verwijderen zonder schade aan de stenen.



Figuur 31: Visualisatie faalmodi a) CEB-EAM1 FM A5 en b) MEB-EM2 FM A3

4.2.4 Proefstukken buigtreksterkte na recuperatie

In deze paragraaf worden de resultaten beschreven die zijn verkregen door een aantal stenen te recupereren met een nieuw mortelbed en vervolgens de buigtreksterkte opnieuw te onderzoeken. De notatie die hierbij is gebruikt, werkt als volgt: eerst wordt de gebruikte steensoort genoemd, vervolgens de soort mortel die voorheen werd aangebracht, en ten slotte de naam van de nieuwe mortel waarmee het couplet is vervaardigd. De stenen werden opnieuw gemetseld met de zijde die voorheen ook met mortel bedekt was. De mortelsamenstelling om de buigtreksterkte te bepalen is identiek en wordt weergegeven in Tabel 20.

De nieuwe combinaties zijn geselecteerd op basis van enkele zinvolle combinaties waarbij een verandering in buigtreksterkte werd verwacht. Door tijdgebrek konden slechts een beperkt aantal combinaties worden gemaakt. Eén van de geteste combinaties was CEB-EM-EAM, maar de coupletten faalden en er kwamen geen bruikbare waarden uit de tests. Daarnaast werden de combinaties niet opnieuw gemaakt met dezelfde mortel, maar willekeurig gekozen, aangezien dit ook in de praktijk kan gebeuren. Dit benadert realistisch de variabiliteit en onverwachte omstandigheden die tijdens bouw- en herstelwerkzaamheden kunnen optreden.

4.2.5 Analyse buigtreksterkte na recuperatie

De buigtreksterkte wordt bepaald aan de hand van formule 1 in paragraaf 3.3.1. Parameters F_1 en W volgen uit de bond wrench-testen. De andere parameters zijn afhankelijk van de opstelling en de gebruikte steen. Deze parameters zijn weergegeven in Tabel 27.

Tabel 27: Parameters bond wrench-test

Parameter	CEB	MEB	Eenheid
F2	23,720	23,720	N
e1	396	378	mm
e2	112	108	mm
b	290	220	mm
d	120	100	mm

De resultaten van de bond wrench-testen zijn weergegeven in Tabel 28 tot en met Tabel 30. Voor elk specifiek couplet zijn zowel de faalmodus als de buigtreksterkte vermeld. Daarnaast wordt voor elke soort ook de gemiddelde buigtreksterkte, samen met de bijbehorende standaardafwijking, weergegeven. In bijlage B zijn de volledige tabellen met alle specifieke waarden opgenomen.

Tabel 28: Buigtreksterkte CEB-EAM-EM

CEB-EAM-EM	Faalmode	$f_{wi} [N/mm^2]$	gem. $f_{wi} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
CEB-EAM-EM1	A1	0,0486	0,0538	0,0297
CEB-EAM-EM2	A2	0,054		
CEB-EAM-EM3	A3	0,0981		
CEB-EAM-EM4	A1	0,0146		

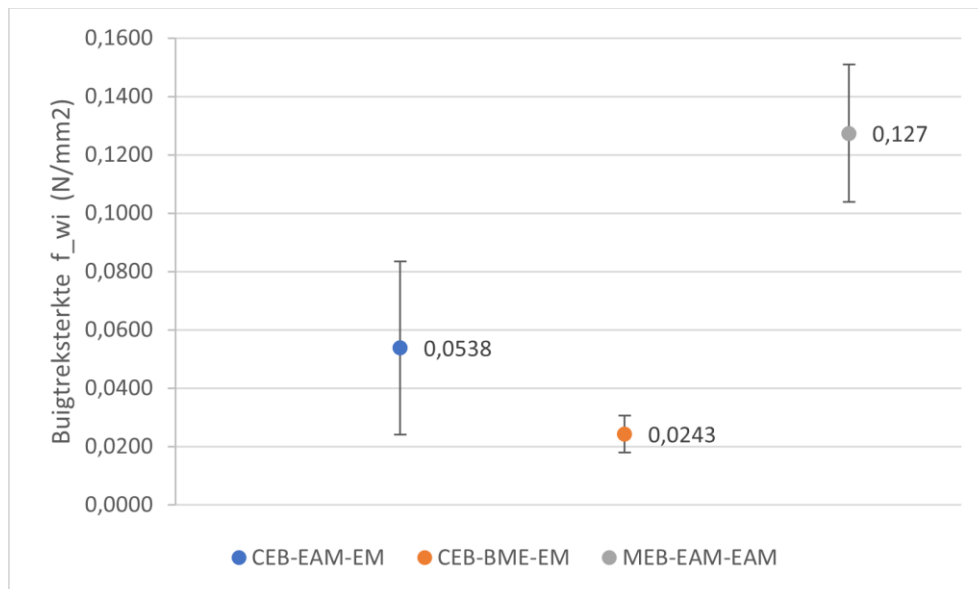
Tabel 29: Buigtreksterkte CEB-BME-EM

CEB-BME-EM	Faalmode	$f_{wi} [N/mm^2]$	gem. $f_{wi} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
CEB-BME-EM1	A1	0,0322	0,0243	0,00625
CEB-BME-EM2	A2	0,0236		
CEB-BME-EM3	A1	0,017		

Tabel 30: Buigtreksterkte MEB-EAM-EAM

MEB-EAM-EAM	Faalmode	$f_{wi} [N/mm^2]$	gem. $f_{wi} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
MEB-EAM-EAM1	A3	0,149	0,127	0,0236
MEB-EAM-EAM2	A3	0,091		
MEB-EAM-EAM3	A3	0,122		
MEB-EAM-EAM4	A2	0,147		

Op basis van Tabel 28 tot en met Tabel 30 kan een analyse worden uitgevoerd van de buigtreksterktes van de verschillende steen-mortelcombinaties. Figuur 32 toont de resulterende grafiek, waarin de gemiddelde waarde voor elke gerecupereerde steen- mortelcombinatie is geplote. De spreiding van de gemiddelde buigtreksterktes wordt weergegeven met behulp van verticale foutbalken, die de standaardafwijking aangeven.



Figuur 32: Resultaten buigtreksterkte na recuperatie

Uit de gegevens in Figuur 32 blijkt dat de vormsteen met twee keer lijmortel (MEB-EAM-EAM) de hoogste waarde behaalt met een gemiddelde buigtreksterkte van 0,127 MPa. Dit wordt gevolgd door de combinatie CEB-EAM-EM met 0,0538 MPa en de combinatie CEB-BME-EM met 0,0243 MPa. Hoewel er een grote spreiding te zien is voor de CEB-EAM-EM, maakt deze variabiliteit de interpretatie van de waarde moeilijk.

Wanneer de buigtreksterkte van de specifieke coupletten wordt vergeleken met die van de gerecupereerde coupletten, is er een aanzienlijk verschil te zien, vooral bij de coupletten vervaardigd met leemmortel. De combinatie CEB-EAM-EM heeft een hogere gemiddelde buigtreksterkte in vergelijking met het specifieke couplet CEB-EM. Deze toename kan te wijten zijn aan de cellulose in de lijmortel, die bij opnieuw bevochtigen en hergebruik mogelijk een betere hechting met de leemmortel bevordert.

In tegenstelling hiermee vertoont de combinatie CEB-BME-EM een daling van de gemiddelde buigtreksterkte ten opzichte van de specifieke coupletten. Deze daling kan worden toegeschreven aan het feit dat de poriën bij de eerste keer metselen gevuld zijn met bastaardmortel, die vervolgens verhardt en zich mechanisch vastklemt in de poriën. Hierdoor kan de nieuwe mortel zich goed hechten door middel van vergrendeling met de poriën. Na het reinigen voor hergebruik blijven de poriën echter gevuld, waardoor de nieuwe mortel niet voldoende kan binnendringen in de poriën, wat leidt tot een vermindering van de buigtreksterkte. Deze bevinding is beschreven in de Literatuurstudie, paragraaf 2.3. Daarnaast vertoont de combinatie MEB-EAM-EAM een lichte daling in gemiddelde buigtreksterkte ten opzichte van de specifieke waarde. Hoewel deze daling zeer klein is, kan deze eveneens worden toegeschreven aan het hechtingsmechanisme met de poriën.

4.2.6 Analyse faalmodi buigtreksterkte na recuperatie

Op basis van NBN EN 1052-5 kan er voor elk gefaald proefstuk na de bond wrench-test een faalmodus bepaald worden. De verschillende gevallen zijn weergegeven in Figuur 8 van paragraaf 3.3.1. Aan de hand van de kleuren is te zien hoe wenselijk de faalmodi zijn voor hergebruik.



Figuur 33: Faalmodi gerecupereerde coupletten

Figuur 33 toont de grafiek die elke voorkomende faalmode plot bij de verschillende combinaties. Wat op het eerste gezicht opvalt, is dat de coupletten met een nieuwe mortellaag van leemmortel ongeveer hetzelfde patroon van faalmodi vertonen. In vergelijking met de faalmodi voor CEB-EM uit paragraaf 4.2.3, komt bij de hergemetselde coupletten faalmodus A1 voor, terwijl dit bij CEB-EM niet het geval is. Faalmodus A3 is ook niet aanwezig voor CEB-BME-EM, wat mogelijk resulteert door daling van de buigtreksterkte. Ten slotte is te zien dat de combinatie MEB-EAM-EAM een tegengesteld resultaat vertoont ten opzichte van de combinatie MEB-EAM. Uit de twee grafieken van de faalmodi kan geconcludeerd worden dat elke steen-mortelcombinatie gunstig is voor hergebruik, met uitzondering van de combinatie van persstenen en lijm mortel.

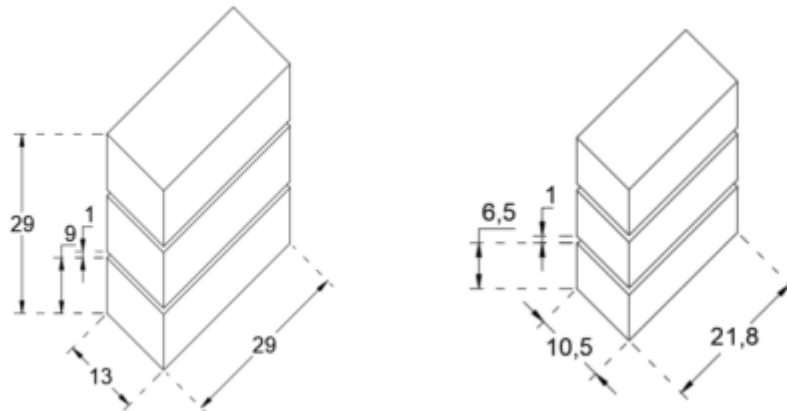
Deze observaties suggereren dat de keuze van mortellaag en de wijze van hergebruiken invloed hebben op de faalmodi en de uiteindelijke sterkte van de gemetselde structuren. Verdere onderzoeken zijn nodig om de oorzaken en mechanismen achter deze verschillen te begrijpen.

4.3 Schuifsterkte

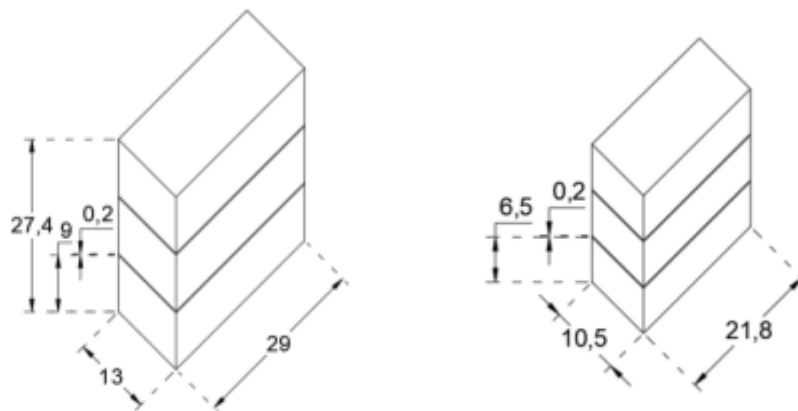
4.3.1 Proefstukken specifieke schuifsterkte

Om de schuifproeven te kunnen uitvoeren wordt er met tripletten gewerkt als proefstukken. In dit onderzoek zijn deze vervaardigd met twee verschillende soorten stenen, de CEB's en de MEB's. Deze zijn gecombineerd met de drie reeds besproken mortels, de leemmortel, de leemlijmmortel en tot slot de bastaardmortel. In totaal zijn er 35 tripletten gemaakt. In Tabel 32 tot en met Tabel 36 is te zien dat niet alle gemaakte proefstukken getest zijn. De proefstukken die ontbreken zijn voor of tijdens het plaatsen in de proefopstelling gefaald. De verschillende tripletten zijn weergegeven in Figuur 34 en 35.

Hier valt op dat de tripletten deels verschillen van elkaar. Figuur 34 illustreert de tripletten die zijn gebruikt met leemmortel en bastaardmortel. De afbeelding aan de linkerzijde toont het CEB-triplet, terwijl de afbeelding aan de rechterzijde het MEB-triplet weergeeft. Tijdens het metselen werd consistent een voeg van 10 mm aangehouden. Daarnaast zijn alle tripletten nauwgezet waterpas geplaatst, zowel horizontaal als verticaal, om optimale nauwkeurigheid bij de experimenten te waarborgen. Figuur 35 illustreert een triplet waarbij een leemlijmmortel wordt toegepast, de tussenvoegen zijn hierbij ongeveer 2 mm dik. In Tabel 31 zijn de mortelsamenstellingen weergegeven die voor de tripletten gebruikt zijn.



Figuur 34: Illustratie CEB-triplet en MEB-triplet voor EM- en BME-mortel



Figuur 35: Illustratie CEB-triplet en MEB-triplet voor EAM-mortel

Tabel 31: Samenstelling mortel schuifsterkte

Mortel		Samenstelling
Ongestabiliseerde Leemmortel	EM	<ul style="list-style-type: none"> • 25 kg leemmortel • 4,5 l water • 10 min mengen
Leemlijmmortel	EAM	<ul style="list-style-type: none"> • 25 kg leemlijmmortel • 8 l water • 10 min mengen
Bastaardmortel	BME	<ul style="list-style-type: none"> • 25 leemmortel • 8,3 kg leemadditief • 6.125 l water • 10 min mengen

Nadat de coupletten zijn gemetseld, wordt er onmiddellijk een voordruk aangebracht die volgens [13] tussen de $2.0 \cdot 10^{-3} N/mm^2$ en $5.0 \cdot 10^{-3} N/mm^2$ moet liggen.

4.3.2 Analyse specifieke schuifsterkte

De schuifsterkte wordt bepaald aan de hand van formule 2, zoals beschreven in paragraaf 3.4.1. Hierbij wordt de maximale kracht, waarbij falen optreedt en die door de drukbank wordt geregistreerd, gedeeld door twee keer de parallelle dwarsdoorsnede. Tabel 32 tot en met 36 presenteert deze resultaten, inclusief de gemiddelde schuifsterkte en de bijbehorende standaardafwijking.

Tabel 32: Schuifsterkte CEB-EAM

CEB-EAM	Faalmode	$f_{v0i} [N/mm^2]$	Gem. $f_{v0i} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
CEB-EAM1	A1	0,293	0,279	0,0392
CEB-EAM2	A1	0,249		
CEB-EAM3	A1	0,271		
CEB-EAM4	A1	0,357		
CEB-EAM5	A1	0,271		
CEB-EAM6	A1	0,235		

Tabel 33: Schuifsterkte CEB-BME

CEB-BME	Faalmode	$f_{v0i} [N/mm^2]$	Gem. $f_{v0i} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
CEB-BME1	A1	0,141	0,125	0,0289
CEB-BME2	A1	0,168		
CEB-BME3	A1	0,081		
CEB-BME4	A1	0,145		
CEB-BME5	A1	0,107		
CEB-BME6	A1	0,109		

Tabel 34: Schuifsterkte CEB-EM

CEB-EM	Faalmode	$f_{v0i} [N/mm^2]$	Gem. $f_{v0i} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
CEB-EM1	A1	0,0123	0,0262	0,0151
CEB-EM2	A1	0,0225		
CEB-EM3	A1	0,0137		
CEB-EM4	A1	0,054		
CEB-EM5	A1	0,0288		

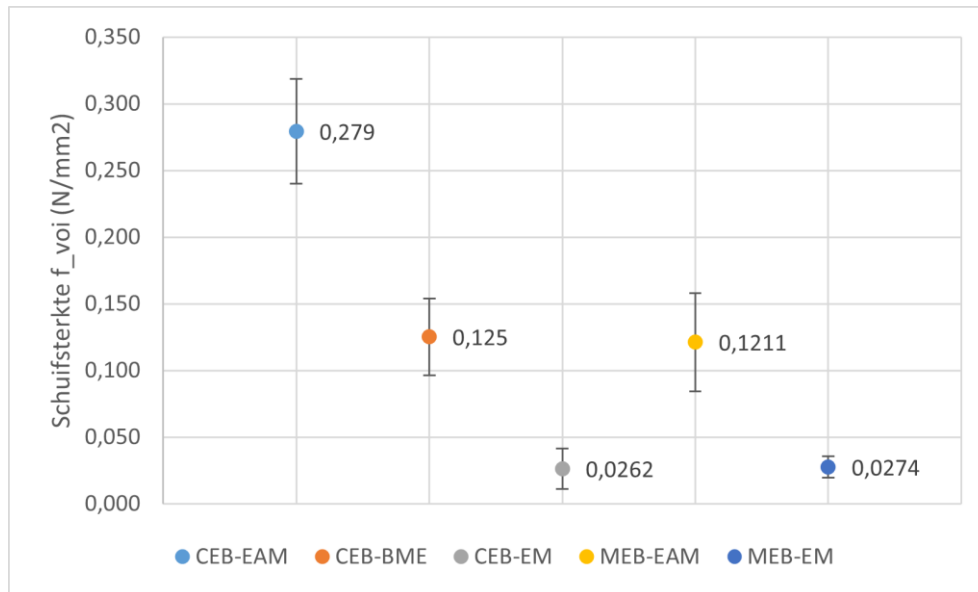
Tabel 35: Schuifsterkte MEB-EAM

MEB-EAM	Faalmode	$f_{v0i} [N/mm^2]$	Gem. $f_{v0i} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
MEB-EAM1	A1	0,1281	0,121	0,0369
MEB-EAM2	A4	0,0939		
MEB-EAM3	A1	0,1015		
MEB-EAM4	A4	0,1745		
MEB-EAM5	A1	0,0693		
MEB-EAM6	A4	0,1595		

Tabel 36: Schuifsterkte MEB-EM

MEB-EM	Faalmode	$f_{v0i} [N/mm^2]$	Gem. $f_{v0i} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
MEB-EM1	A1	0,034	0,0274	0,00811
MEB-EM2	A1	0,0152		
MEB-EM3	A1	0,0252		
MEB-EM4	A1.1	0,0355		

Op basis van Tabel 32 tot en met Tabel 36 kan een analyse worden uitgevoerd. Figuur 36 toont de resulterende grafiek. In de grafiek staan steeds de gemiddelde waarden voor de verschillende steen-mortelcombinaties. De spreiding van de gemiddelde schuifsterktes wordt weergegeven met behulp van verticale foutbalken.



Figuur 36: Resultaten specifieke schuifsterkte

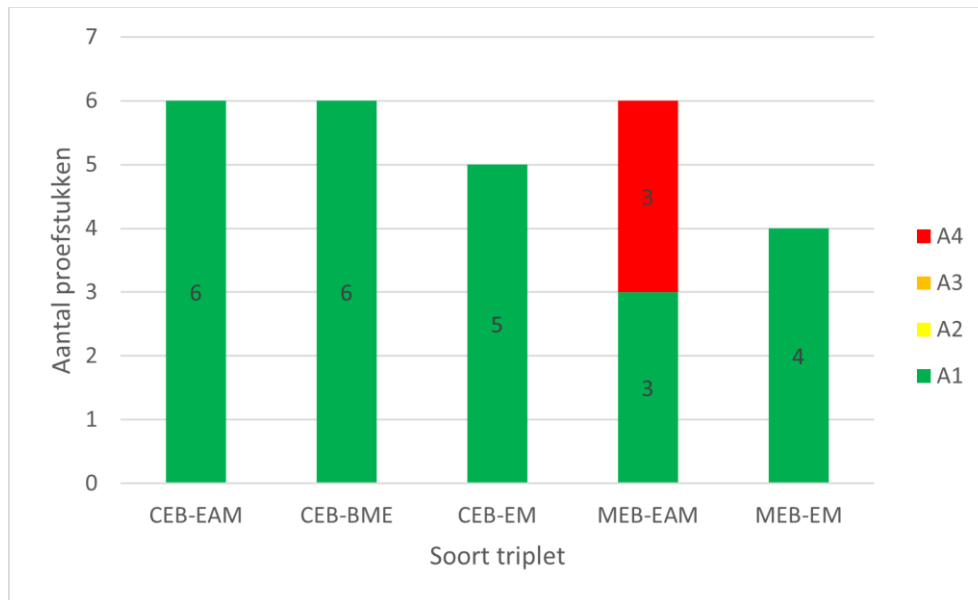
Uit Figuur 36 kan worden afgeleid dat de perssteen in combinatie met lijm mortel de hoogste schuifsterkte vertoont van alle geteste proefstukken. De hogere schuifsterkte bij het gebruik van leemlijmmortel kan worden verklaard door de aanwezigheid van een bindmiddel in de mortel. Bindmiddelen bevorderen de adhesie tussen de stenen en de mortel. In leemmortel fungeert klei als een natuurlijk bindmiddel, maar dit is minder sterk dan methylcellulose of cement. Hierdoor is de klei minder effectief in het versterken van de hechting en de algehele sterkte van de mortel. De combinatie van perssteen met bastaardmortel en de vormsteen in combinatie met de leemlijmmortel volgen met waarden die ongeveer de helft hiervan bedragen. Tot slot kan worden vastgesteld dat beide soorten stenen in combinatie met leemmortel de laagste hechtsterkte vertonen. Wat opvalt is dat de schuifsterktes van de leemmortel in combinatie met de verschillende stenen ongeveer gelijk is. Ook de spreiding van beide waarden is zeer klein. Voor de leemlijmmortel is dit anders, de waarden liggen verder uit elkaar en er zit een grotere spreiding op.

Als de gevonden resultaten van de schuifsterkte voor het leemsteenmestelwerk vergeleken worden met de waarden uit NBN EN 1996-1-1, dan kan besloten worden dat enkel de combinatie CEB-EAM in de buurt komt van de normwaarden [10]. Ook hier moet deze vergelijking wel met voldoende nuance bekeken worden. Voor traditioneel metselwerk voldoen deze schuifsterktes van het leemsteenmetselwerk niet, maar het is ook niet de bedoeling om leemsteenmetselwerk het traditionele metselwerk te laten vervangen. Met de gedachte dat de schuifsterkte lager ligt dan de normwaarden voor traditioneel metselwerk zullen er nog steeds toepassingen zijn waar het leemsteenwerk gebruikt zou kunnen worden. Het onderzoek is beperkt door het falen van de proefstukken tijdens transport of tijdens het plaatsen van de proefstukken in de proefopstelling. Hierdoor zijn er niet voor elke combinatie evenveel proefstukken getest waardoor de standaardafwijking kan verschillen tussen de verschillende waarden. In volgende onderzoeken kan er extra onderzoek gedaan worden naar de faalmodi voor de verschillende combinaties. Vooral voor de combinatie tussen de persstenen en de leemlijmmortel. Indien de leemstenen zonder beschadigingen zouden kunnen loskomen en toch een hoge schuifsterkte kunnen behouden zou dit zeer gunstig kunnen zijn.

4.3.3 Analyse faalmodi specifieke schuifsterkte

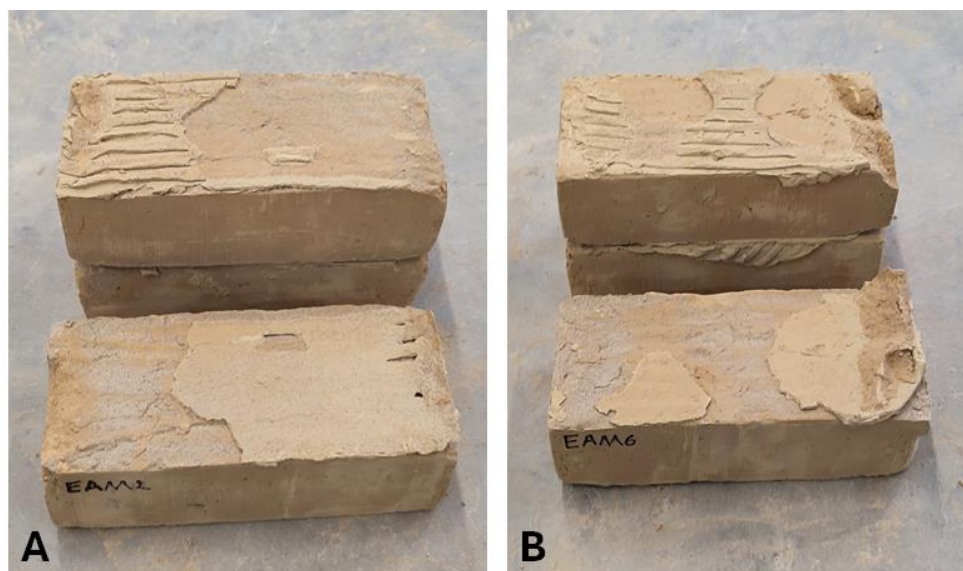
Op basis van NBN EN 1052-3 kan er voor elk gefaald proefstuk na de schuifsterketest een faalmodus bepaald worden [14]. De verschillende gevallen zijn weergegeven in Figuur 15 van paragraaf 3.4.1.

Faalmodi A1 en A2 zijn de enige gewenste faalmodi. Faalmodi 3 en 4 wijzen daarentegen op het falen van de steen.



Figuur 37: Faalmodi specifieke schuifsterkte

Uit Figuur 37 blijkt dat elke steen-mortelcombinatie, met uitzondering van de vormstenen met lijm mortel, na de proeven een A1-faalmodus vertoont. De combinatie MEB-EAM vertoont echter een afwijkend resultaat met een A4-faalmodus, wat wijst op het falen van de steen. Dit kan komen doordat de vormstenen geen bindmiddel bevatten, in tegenstelling tot de persstenen. De adhesie tussen mortel en steen is groter dan de lokale cohesie van de steen waar het faalt. Figuur 38 visualiseert de optredende A4-faalmodus bij de combinaties MEB-EAM2 en MEB-EAM6.



Figuur 38: Visualisatie faalmodus A4 a) MEB-EAM2 en b) BME-EAM6

4.3.4 Proefstukken schuifsterkte na recuperatie

Vervolgens worden de stenen van bovenstaande proeven gerecupereerd en opnieuw gemetseld als tripletten. Deze tripletten kunnen dan opnieuw gecontroleerd worden op schuifsterkte. De notatie die hierbij is gebruikt, werkt als volgt: eerst wordt de gebruikte steensoort genoemd, vervolgens de soort mortel die voorheen werd aangebracht, en ten slotte de naam van de nieuwe mortel waarmee het triplet is vervaardigd. De stenen werden opnieuw gemetseld met de zijde die voorheen ook met mortel bedekt was. De mortelsamenstelling voor de schuifsterkteproeven is identiek en wordt weergegeven in Tabel 31.

4.3.5 Analyse schuifsterkte na recuperatie

De resultaten van de schuifsterktes zijn weergegeven in Tabel 37 tot en met Tabel 41. Voor elk specifiek triplet zijn zowel de faalmodus als de schuifsterkte vermeld. Daarnaast wordt voor elke soort ook de gemiddelde schuifsterkte, samen met de bijbehorende standaardafwijking weergegeven.

Tabel 37: Schuifsterkte CEB-BME-EAM

CEB-BME-EAM	Faalmode	$f_{v0i} [N/mm^2]$	Gem. $f_{v0i} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
CEB-BME-EAM1	A2	0,363	0,297	0,0659
CEB-BME-EAM2	A1	0,305		
CEB-BME-EAM3	A2	0,331		
CEB-BME-EAM4	A1	0,189		

Tabel 38: Schuifsterkte CEB-EM-EAM

CEB-EM-EAM	Faalmode	$f_{v0i} [N/mm^2]$	Gem. $f_{v0i} (N/mm^2)$	$\sigma [N/mm^2]$
CEB-EM-EAM1	A3	0,253	0,281	0,05
CEB-EM-EAM2	A1	0,276		
CEB-EM-EAM3	A1	0,364		
CEB-EM-EAM4	A1	0,231		

Tabel 39: Schuifsterkte CEB-BME-EM

CEB-BME-EM	Faalmode	$f_{v0i} [N/mm^2]$	Gem. $f_{v0i} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
CEB-BME-EM1	A1	0,02903	0,019	0,0082
CEB-BME-EM2	A1	0,019		
CEB-BME-EM3	A1	0,00886		

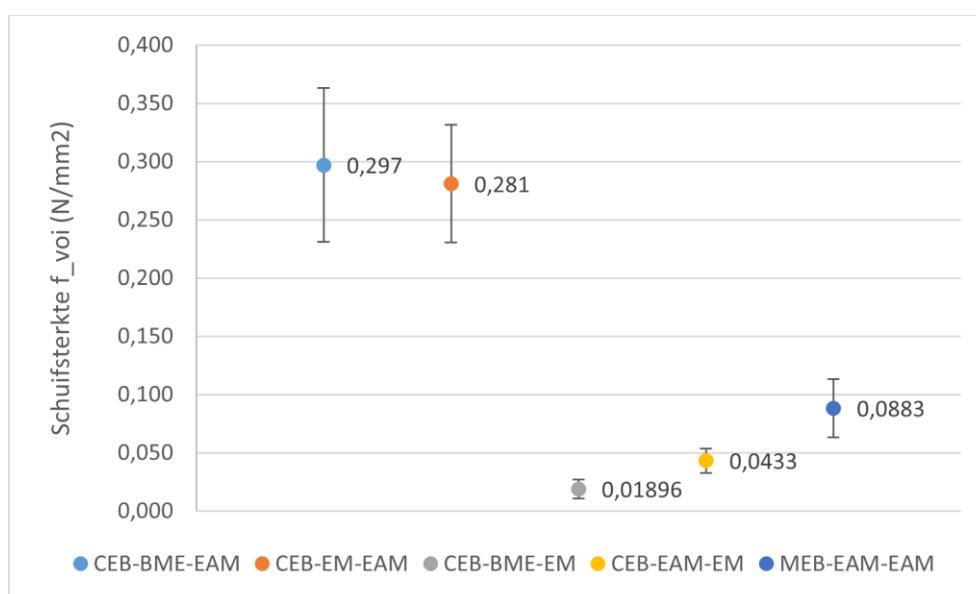
Tabel 40: Schuifsterkte CEB-EAM-EM

CEB-EAM-EM	Faalmode	$f_{voi} [N/mm^2]$	Gem. $f_{voi} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
CEB-EAM-EM1	A1	0,0371	0,0433	0,0105
CEB-EAM-EM2	A1	0,058		
CEB-EAM-EM3	A1	0,0348		

Tabel 41: Schuifsterkte MEB-EAM-EAM

MEB-EAM-EAM	Faalmode	$f_{voi} [N/mm^2]$	Gem. $f_{voi} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
MEB-EAM-EAM1	A1	0,117	0,0883	0,0251
MEB-EAM-EAM2	A1	0,0969		
MEB-EAM-EAM3	A1	0,0913		
MEB-EAM-EAM4	A1.2	0,0481		

Op basis van Tabel 37 tot en met Tabel 41 kan een analyse worden uitgevoerd van de schuifsterktes van de verschillende steen- mortelcombinaties. Figuur 39 toont de resulterende grafiek, waarin de gemiddelde waarden voor elke gerecupereerde steen- mortelcombinatie zijn geplott. De spreiding van de gemiddelde schuifsterktes wordt weergegeven met behulp van verticale foutbalken, die de standaardafwijking aangeven.



Figuur 39: Resultaten schuifsterkte na recuperatie

In Figuur 39 is te zien dat er twee waarden van de schuifsterkte boven de andere uitsteken. Dit zijn de waarden waarbij een leemlijmmortel is gecombineerd met een CEB. Vervolgens komt de andere combinatie met de leemlijmmortel, deze keer gecombineerd met een MEB. De twee laagste waarden zijn de combinaties met de leemmortel.

Wanneer de steen-mortelcombinaties worden vergeleken met de gemiddelde specifieke waarden voor schuifsterkte, blijkt dat beide persstenen, opnieuw vervaardigd met lijm mortel, na recuperatie een hogere gemiddelde schuifsterkte hebben dan de specifieke waarden. De spreiding is echter ook groter.

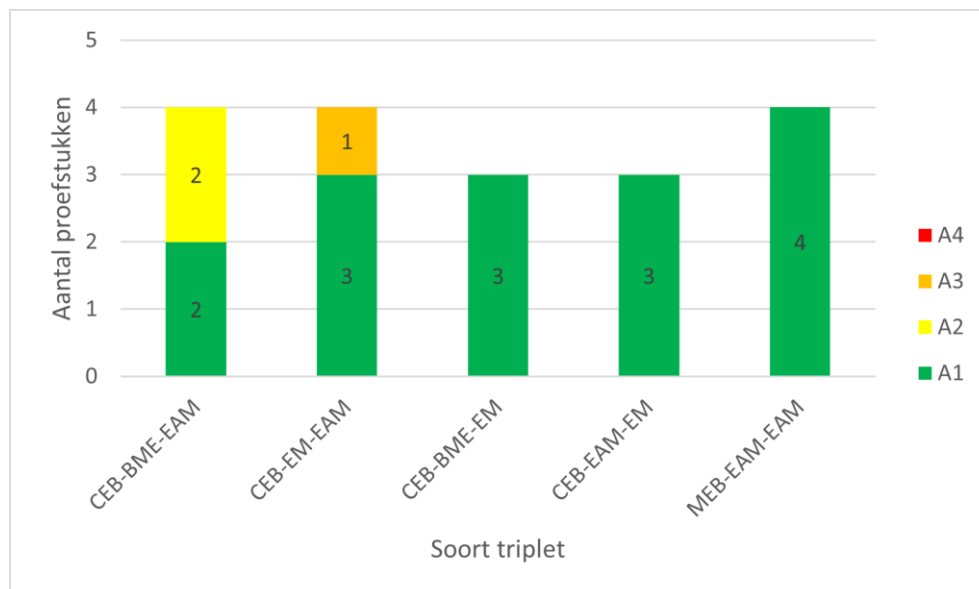
Dit staat in contrast met de eerdere veronderstelling dat de poriën van de steen na hermitselen gevuld zijn, waardoor het nieuwe mortelbed minder goed mechanisch kan hechten.

Bij de combinatie van perssteen met leemmortel, oorspronkelijk vervaardigd met bastaardmortel, is er een degradatie in schuifsterkte te zien, vergelijkbaar met de eerder waargenomen afname in buigtreksterkte. Dit kan worden toegeschreven aan de reeds gevulde poriën met bastaardmortel. Daarentegen vertonen persstenen die eerst met lijmortel en daarna met leemmortel waren gemetseld, een stijging van ongeveer het dubbele in schuifsterkte. Dit kan te wijten zijn aan de reactivering van cellulose, wat zorgt voor een sterkere hechting.

Vormstenen die twee keer met lijmortel zijn gemetseld, vertonen een degradatie in gemiddelde schuifsterkte, wat in tegenstelling is tot de persstenen gemetseld met lijmortel.

4.3.6 Analyse faalmodi schuifsterkte na recuperatie

De faalmodi van de proeven zijn ook geanalyseerd. Figuur 40 toont een grafiek die de verschillende faalmodi bij elke steen-mortelcombinatie na hergebruik plot.



Figuur 40: Faalmodi gerecupereerde tripletten

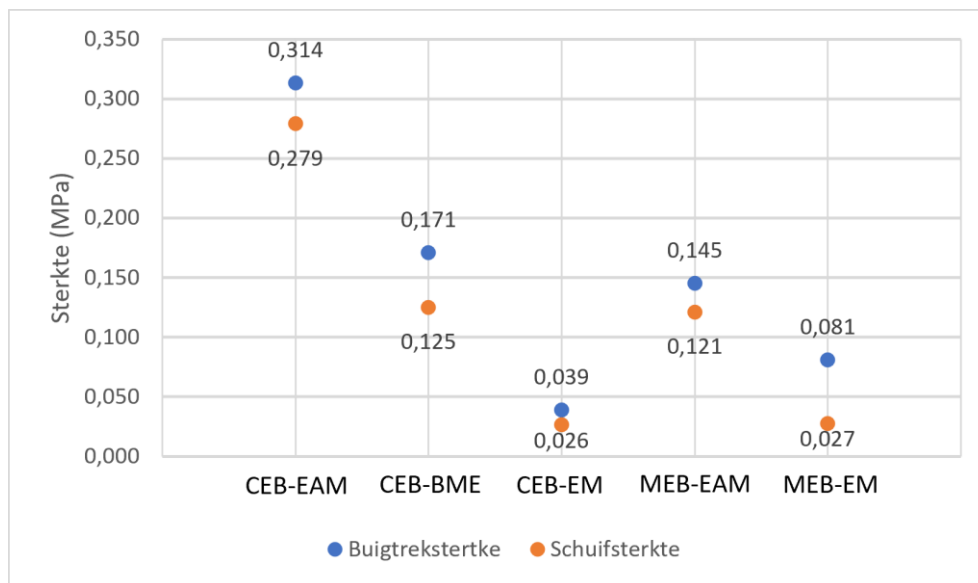
Uit Figuur 40 is te zien dat de eerste combinatie CEB-BME-EAM twee keer faalmodus A1 en twee keer A2 heeft, terwijl dit voor de specifieke volledig faalmodus 1 is. De gerecupereerde gemiddelde schuifsterkte is niet veel verschillend ten opzichte van de karakteristieke. De twee faalmodi A2 komen bij de gerecupereerde voor bij de twee hoogste waarden.

Wat nog opvalt in de grafiek, is dat er bij de CEB-EM-EAM-combinatie één keer een faalmodus van A3 voorkomt, wat wijst op dat de steen faalt. De bijbehorende optredende schuifspanning bij deze faalmodus is immers niet van dezelfde orde als die van de andere combinaties. Dit verschijnsel kan te maken hebben met praktische uitvoering of met fouten in de productie van de stenen.

Wat ook nog opvalt, is dat bij de specifieke er bij de MEB-EAM-combinatie de helft faalmodus A4 heeft uit zes proefstukken. In tegenstelling tot de gerecupereerde MEB-EAM-EAM-combinatie, waar alleen faalmodus A1 voorkomt.

4.4 Hechtsterkte

Er zijn twee soorten hechtsterkte (buigtreksterkte en schuifsterkte), die zuiver bepaald kunnen worden aan de hand van de bond wrench-test en de schuifsterkteproef. Bij ontmanteling met een klophamerboor hebben deze waarschijnlijk een gezamenlijk effect op de faalmodi en het recuperatiepercentage. De resultaten voor de specifieke waarden hebben, zoals te zien is in Figuur 41, ongeveer dezelfde grootte. De waarden wijken niet veel van elkaar af, behalve bij de MEB-EM, waarvan de schuifsterkte bijna de helft bedraagt.



Figuur 41: Hechtsterkte in functie van de verschillende steen- mortelcombinaties

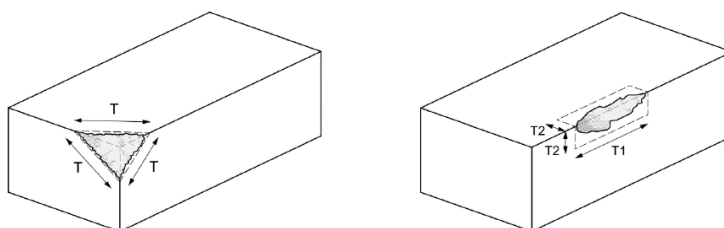
De buigtreksterkte is voor elke steen-mortelcombinatie hoger dan de schuifsterkte. Een verklaring hiervoor is dat bij een buigbelasting een niet-uniforme spanningsverdeling ontstaat over de doorsnede van het metselwerk. De maximale trekspanningen bevinden zich aan de onderkant van de buigbalk (waar de trek optreedt), terwijl de bovenkant in druk staat. Deze niet-uniforme spanningsverdeling zorgt ervoor dat het metselwerk in staat is om hogere trekspanningen te weerstaan in een lokaal gebied voordat het bezwijkt. Bij een schuifbeweging ontstaat er daarentegen een uniforme spanningsverdeling over het schuifvlak. Schuifspanningen werken parallel aan het vlak van het materiaal en veroorzaken een uniform verdeelde belasting over de doorsnede, wat sneller tot bezwijken leidt.

4.5 Recuperatiepotentieel

Met behulp van de manuele deconstructie van de muurtjes is het mogelijk om het recuperatiepotentieel van de verschillende steen-mortelcombinaties te beoordelen. Dit werd enerzijds gedaan aan de hand van de opmeting van beschadigingen en of die al dan niet binnen de toleranties vallen volgens de Franse norm voor leemstenen (XP P13-901) [19]. Deze toleranties zijn weergegeven in Tabel 42, Figuur 42 geeft extra verduidelijking bij de tabel. Bij twijfel werden een visuele inspectie en kwalitatieve beoordeling doorslaggevend. Anderzijds werd een analyse van faalmodi op alle steenvlakken uitgevoerd, waarbij aan elke faalmodus een kleurcode werd toegekend die het potentieel tot hergebruik weerspiegelt op basis van schade en arbeid van het zuiveringsproces.

Tabel 42: Toleranties beschadigingen [19]

Location of defect	T	T1	T2
Length allowed(mm)	20	30	5



Figuur 42: Toleranties beschadigingen [19]

4.5.1 Faalmodi



De faalmodi in deze thesis zijn opgesteld aan de hand van EN 1052-5. In deze norm zijn er in totaal 7 faalmodi gedefinieerd, waarbij er twee faalmodi voor frogged stenen zijn [12]. Deze worden dus niet opgenomen in het onderzoek. De faalmodi zijn reeds besproken in paragraaf 3.3.1. Tijdens het demontageproces treedt er echter geen zuivere buigtreksterkte op. Hierdoor zijn er faalmodi ontstaan die niet onder de bovenstaande vallen. Daarom is er besloten om voor deze thesis nieuwe faalmodi te creëren. In totaal zijn er tien faalmodi bepaald waarbij elke faalmode een kleur heeft gekregen. De kleur geeft weer hoe goed de ontmantelde steen in aanmerking komt om hergebruikt te worden. Tabel 43 geeft voor elke faalmode een korte uitleg en een indicatie over de intensiteit van het kuisen. Vervolgens geeft Tabel 44 voor elke faalmode een voorbeeld zodat de faalmodi gevisualiseerd kunnen worden.

Tabel 43: Faalmodi manuele demontage

FM1	falen van het hechtingsvlak van de steen en de mortel	mortel blijft volledig aan het aanliggende steenvlak hangen	1 steenvlak kuisen
FM2	falen van het hechtingsvlak van de steen en de mortel	mortel blijft volledig aan het beschouwde steenvlak hangen	1 steenvlak kuisen
FM3	falen van het hechtingsvlak van de steen en de mortel	mortel blijft gedeeltelijk aan het aanliggende en beschouwde steen hangen	2 steenvlakken kuisen
FM4	falen van de mortel	mortel blijft volledig aan het aanliggende en beschouwde steenvlak hangen	2 steenvlakken kuisen
FM5	falen van het beschouwde steenvlak	steen en mortel blijven gedeeltelijk of volledig aan het aanliggende steenvlak hangen; <u>breuk grenzend aan minimum twee andere vlakken</u>	Beschouwd: 1 steenvlak beschadigd Aanliggend: 1 steenvlak kuisen

FM6	falen van het aanliggende steenvlak	steen en mortel blijven gedeeltelijk of volledig aan het beschouwde steenvlak hangen; <u>breuk grenzend aan minimum twee andere vlakken</u>	Beschouwd: 1 steenvlak kuisen Aanliggend: 1 steenvlak beschadigd
FM7	falen van het beschouwde steenvlak	steen en mortel blijven gedeeltelijk aan het aanliggende steenvlak hangen; <u>breuk grenzend aan maximum één ander vlak</u>	2 steenvlakken kuisen
FM8	falen van het aanliggende steenvlak	steen en mortel blijven gedeeltelijk aan het beschouwde steenvlak hangen; <u>breuk grenzend aan maximum één ander vlak</u>	Beschouwd: 1 steenvlak beschadigd Aanliggend: 1 steenvlak kuisen
FM9	falen van het beschouwde en aanliggende steenvlak	steen en mortel blijven gedeeltelijk aan het aanliggende en beschouwde steenvlak hangen; <u>breuk van het beschouwde steenvlak is grenzend aan minimum twee andere vlakken</u>	2 steenvlakken beschadigd
FM10	falen van het beschouwde en aanliggende steenvlak	steen en mortel blijven gedeeltelijk aan het aanliggende en beschouwde steenvlak hangen; <u>breuk van het beschouwde steenvlak is grenzend aan maximum één ander vlak</u>	2 steenvlakken kuisen

Tabel 44: Voorbeelden van faalmodi van BF (bottom face)

FM1	FM2
 A photograph of a rectangular concrete block with a rough, weathered top surface. The block is marked with the handwritten number 'F2.4' on its right side. It is resting on a gravel surface.	 A photograph of a rectangular concrete block with a smooth top surface and a rough bottom surface. The block is marked with the handwritten number 'G8.3' on its right side. It is resting on a gravel surface.
FM3	FM4



FM5



FM6



FM7



FM8



FM9



FM10









Uit Tabel 43 en Tabel 44 is dus duidelijk af te leiden dat hoe donkerder groen, hoe meer de steen zal neigen tot hergebruik en hoe roder, hoe minder de steen zal neigen tot hergebruik.

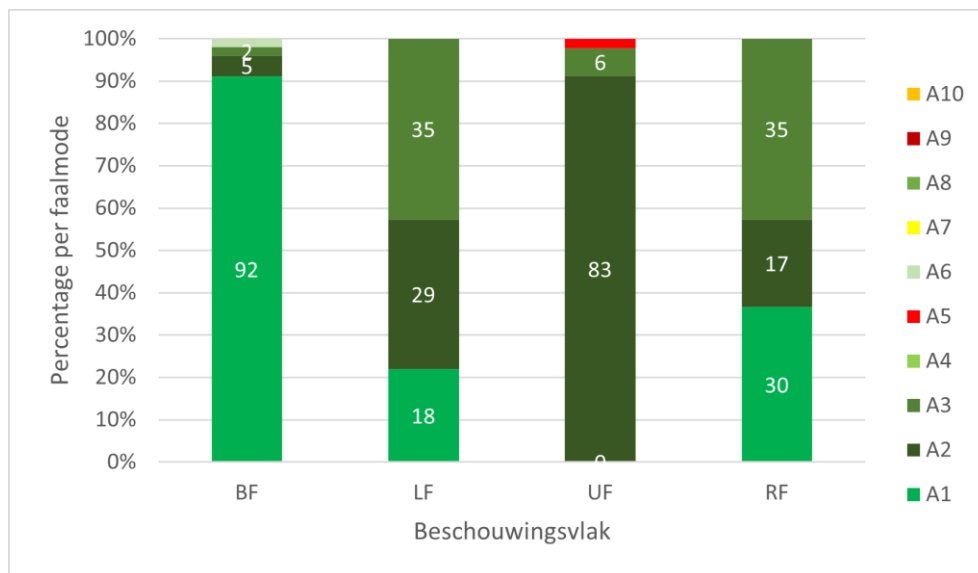
4.5.2 Recuperatiepercentage

Om het recuperatiepercentage te bepalen is er gebruik gemaakt van een niet gestandaardiseerde methode. Er zijn muurtjes gemetseld in verschillende verbanden met verschillende steenmortelcombinaties om deze naderhand te kunnen demonteren met een klopboorhamer. De klopboorhamer is altijd op de intersectie tussen de horizontale en de verticale voegen bevestigd om de muurtjes op een gelijkaardige manier te demonteren en de efficiëntie te verhogen door mogelijk meerdere stenen tegelijk te ontmantelen. De zuivering van de aparte stenen is vervolgens gebeurd door het gebruik van een klopboorhamer en een plamuurmes. In totaal zijn er tien verschillende muurtjes gemetseld waarbij voor elk muurtje een datasheet is bijgehouden over de faalmodi en de beschadigingen. In Tabel 45 worden de hoeveelheid gerecupereerde stenen weergegeven voor de MEB-EM combinatie.

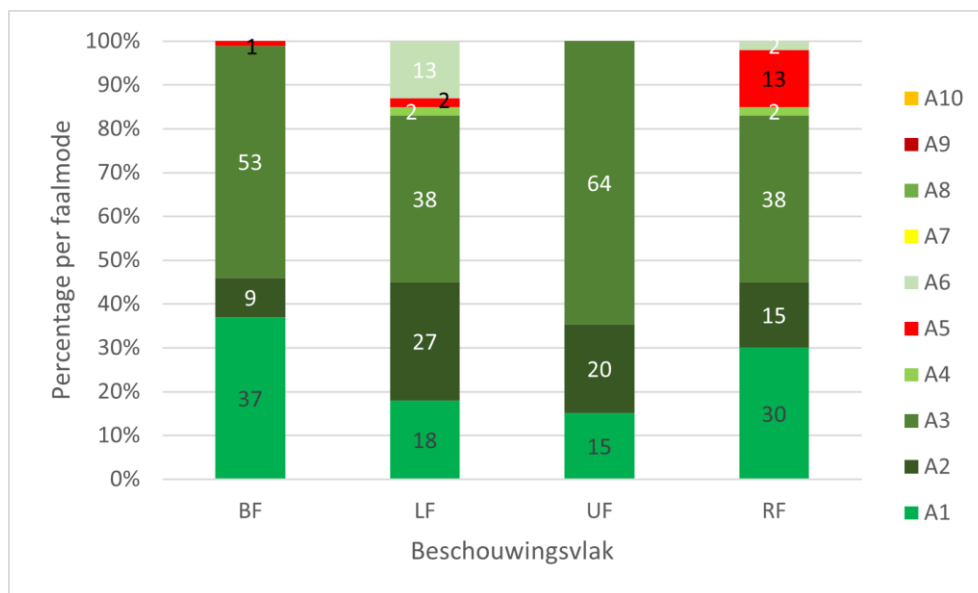
Tabel 45: Recuperatiepercentage MEB-EM

	MEB-EM			
legverband	strekverband		kopverband	
aantal stenen	66		68	
				
	deconstructie	zuivering	deconstructie	zuivering
aantal kapotte stenen	0	7	9	4
% gerecupereerd	89,4		80,9	
				

In Tabel 45 is te zien dat voor beide metselwerkverbanden het recuperatiepercentage boven de 80% ligt. Wat echter opvalt, is dat bij het strekverband geen stenen zijn beschadigd tijdens de deconstructie. Bij het kopverband is dit wel het geval, een mogelijke verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de gebruikte leemstenen bij het kopverband een groter moment moeten opnemen tijdens het ontmantelen van de muurtjes. Vervolgens zijn in Figuur 43 en Figuur 44 voor beide metselwerkverbanden de faalmodi weergegeven voor de verschillende vlakken van de gebruikte stenen. In de komende grafieken hebben de faalmodi allemaal verschillende kleuren gekregen zodat er onderscheid gemaakt kan worden tussen de uitgekomen faalmodi. Let hier echter wel op, de faalmodi komen overeen met de faalmodi uit paragraaf 4.5.1.



Figuur 43: Faalmodi strekverband MEB-EM







Figuur 44: Faalmodi kopverband MEB-EM

In het algemeen komen in Figuur 43 en 44 veel meer groen voor dan rood. Dit is een positief teken voor het hergebruikpotentieel. Er is wel een groot verschil tussen de faalmodi van de rechterkant van de stenen. Bij het kopverband is er dertien procent dat een faalmode A5 heeft, wat betekent dat deze allemaal beschadigd zijn en niet in aanmerking komen voor hergebruik. Voor het strekverband valt het

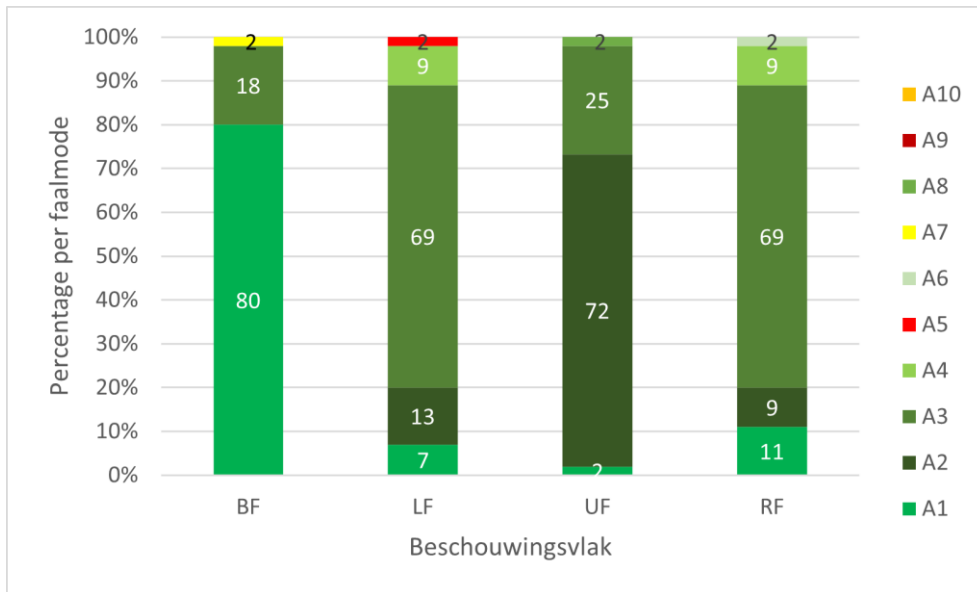
op dat slechts enkele procenten van de stenen een beschadiging hebben opgelopen. Deze beschadigingen ontstonden bij het kuisen van de leemstenen. Tijdens deconstructie zijn er geen stenen beschadigd geraakt. De redenen hiervoor zijn de lage waarden van de buigtreksterkte en de schuifsterkte voor de combinaties met leemmortel. Deze lage waarden duiden er op dat de adhesie tussen de steen en de mortel veel kleiner is dan de cohesie van de vormsteen. Hierdoor zal het falen altijd op het contactoppervlak van de steen en de mortel liggen.

Vervolgens kan dit proces ook voor de combinatie MEB-EAM gedaan worden. Deze combinatie heeft ook twee metselwerkverbanden, enerzijds het strekverband en anderzijds het kopverband. De waarden voor het recuperatiepotentieel zijn terug te vinden in Tabel 46.

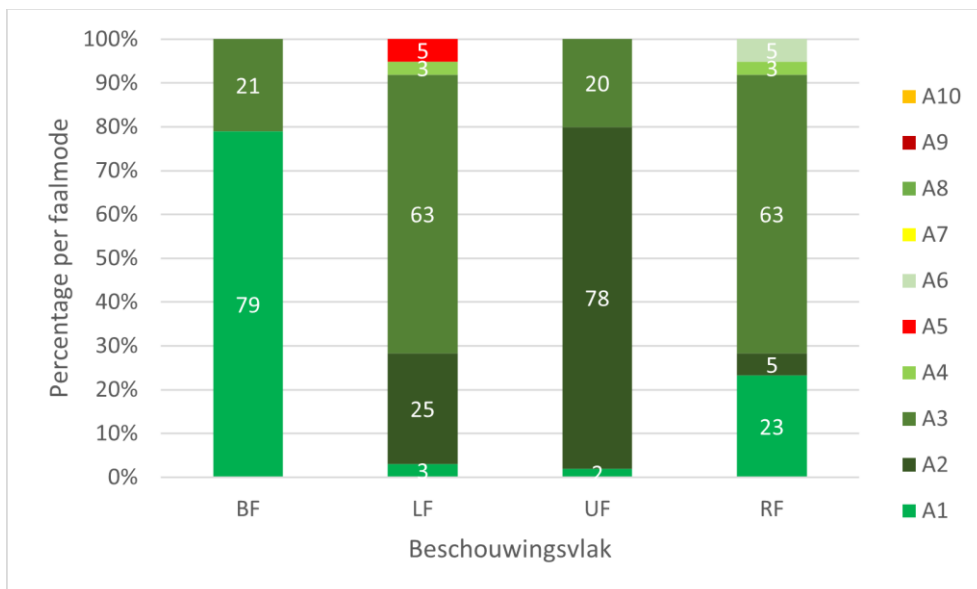
Tabel 46: Recuperatiepercentage MEB- EAM

	MEB-EAM			
legverband	strekverband		kopverband	
aantal stenen	66		68	
				
	deconstructie	zuivering	deconstructie	zuivering
aantal kapotte stenen	0	5	2	5
% gerecupereerd	92,4		89,7	
				

In Tabel 46 is te zien dat het recuperatiepercentage voor beide metselwerkverbanden boven de 85% procent ligt. Daarnaast zijn er voor het strekverband opnieuw geen stenen beschadigd tijdens deconstructie. Bij het kopverband is dit wel het geval. De reden hiervoor is dezelfde als bij het kopverband van de steen- mortelcombinatie van MEB-EM, ook hier is het moment dat op de steen komt groter dan bij het strekverband. Vervolgens geven Figuur 45 en Figuur 46 de faalmodi weer voor zowel het strekverband als het kopverband met de combinatie MEB-EAM.



Figuur 45: Faalmodi strekverband MEB-EAM






Figuur 46: Faalmodi kopverband MEB-EAM

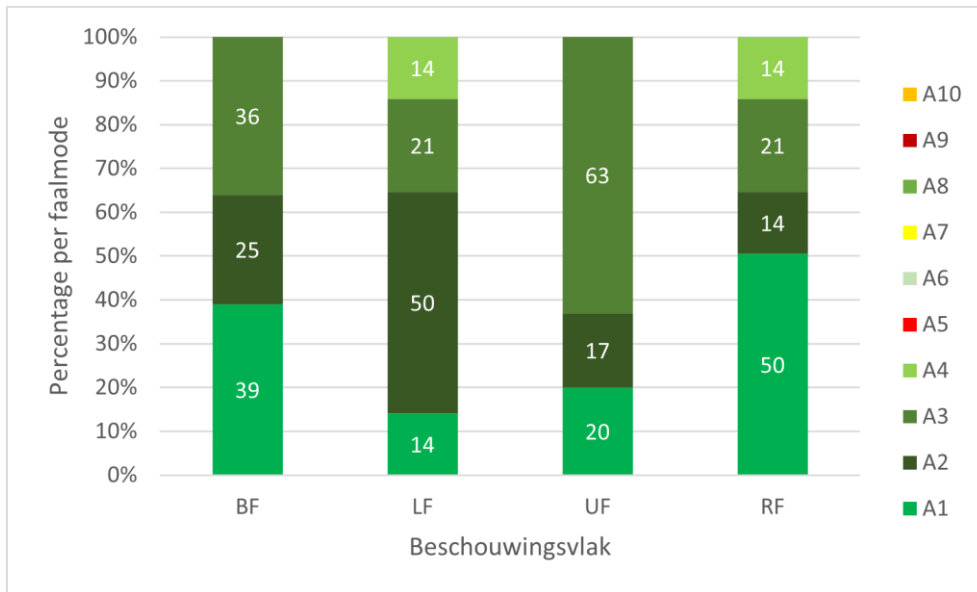
In Figuur 45 en Figuur 46 zijn weer veel groene faalmodi aanwezig. Dit duidt op een hoog recuperatiepercentage met weinig kuiswerk. Daarnaast is er voor deze combinatie van MEB-EAM voor beide metselwerkverbanden een zeer grote gelijkenis tussen de faalmodi. Zo is er voor de onderkant van de stenen een grote hoeveelheid aan A1 en A2, voor de linkerkant een grote hoeveelheid aan A3, voor de bovenkant een grote hoeveelheid aan A2 en A3 en is er aan de rechterkant van de stenen een grote hoeveelheid aan A3 als faalmode.

Als derde combinatie wordt de steen- mortelcombinatie CEB-EM besproken. In Tabel 47 zijn de recuperatiepercentages weergegeven. Bij de combinaties met de CEB's is er echter gebruikgemaakt van andere metselwerkverbanden. Het zijn in dit geval beide strekverbanden, maar nu is er een horizontaal en een verticaal strekverband. Dit is visueel zichtbaar in Tabel 47.

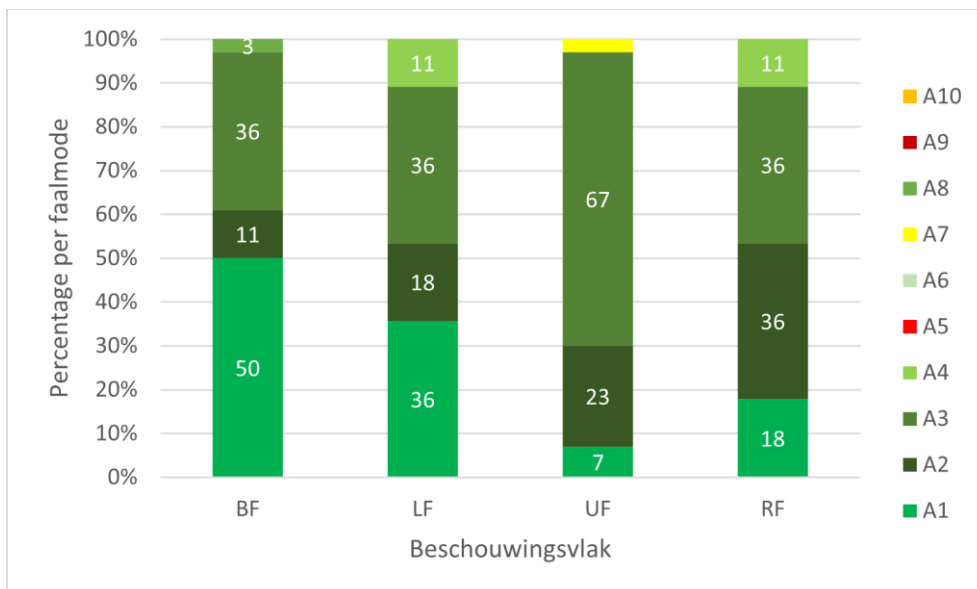
Tabel 47: Recuperatiepercentage CEB-EM

	CEB-EM			
legverband	strekverband horizontaal		strekverband verticaal	
aantal stenen	36		36	
				
	deconstructie	zuivering	deconstructie	zuivering
aantal kapotte stenen	1	0	2	1
% gerecupereerd	97,2		91,7	
				

Tabel 47 geeft weer dat voor beide metselwerkverbanden het recuperatiepercentage boven de 90% ligt. Wat opvalt is dat er voor het horizontaal strekverband geen enkele steen beschadigd is tijdens het zuiveren van de gedemonteerde CEB's. Vervolgens worden de faalmodi van deze CEB-EM combinatie in de twee metselwerkverband getoond in Figuur 47 en Figuur 48.



Figuur 47: Faalmodi strekverband horizontaal CEB-EM



Figuur 48: Faalmodi strekverband verticaal CEB-EM

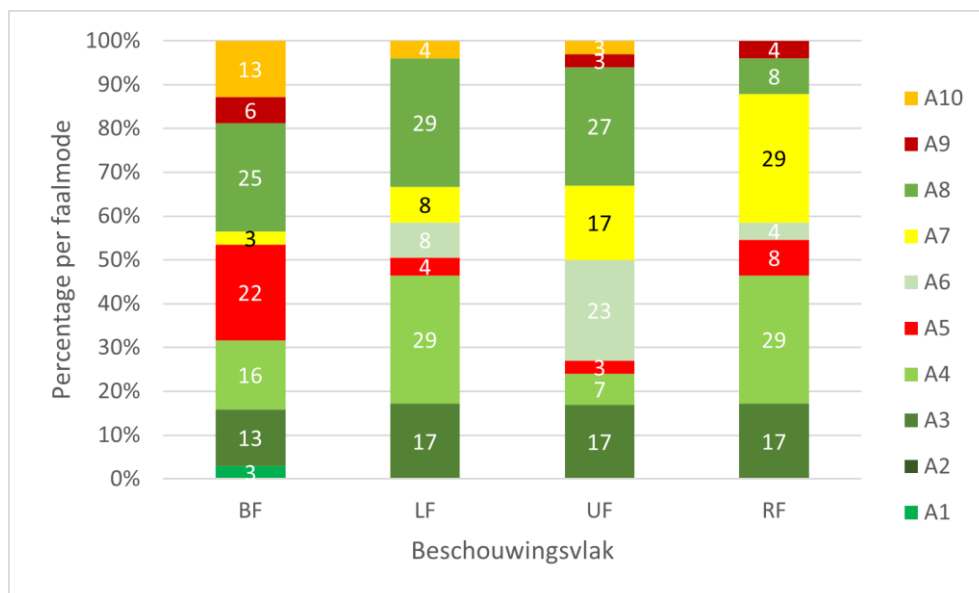
Wat opvalt in Figuur 47 en Figuur 48 is dat voor beide metselwerkverbanden geen rode faalmode aanwezig is. Voor deze combinaties zijn de faalmodi A1, A2 en A3 de meest voorkomende. Ook hier is de reden voor de gunstige faalmodi het feit dat de waarden voor de buigtreksterkte en de schuifsterkte voor de combinaties met leemmortel zeer laag zijn. Omdat de hechtsterkte tussen steen en mortel lager is dan de cohesie van de steen zelf zal het falen altijd tussen steen en mortel gebeuren.

Net zoals bij de vormstenen is er ook een combinatie bij de persstenen met de leemlijmmortel. De waarden voor deze combinatie van het recuperatiepercentage zijn uitgezet in Tabel 48.

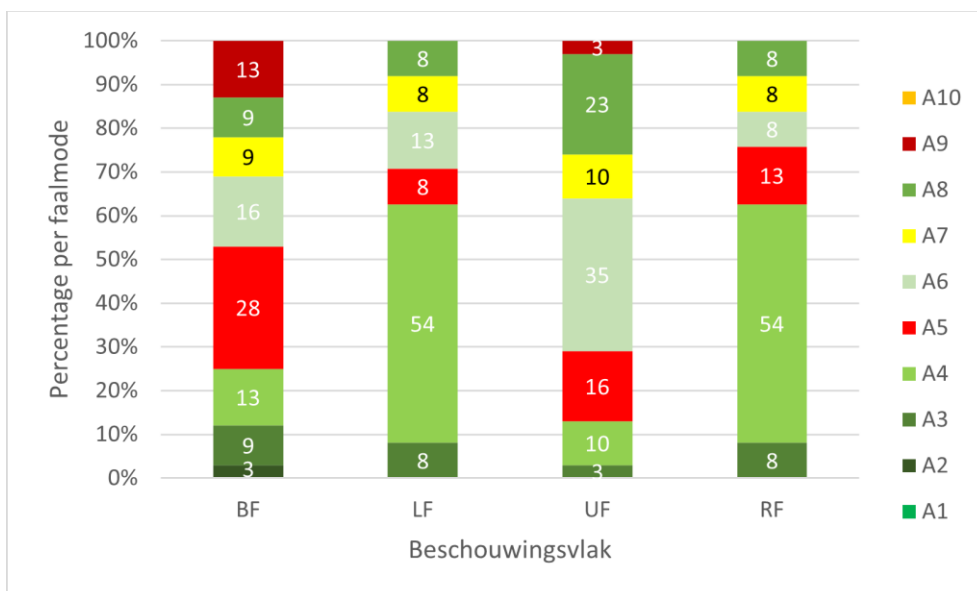
Tabel 48: Recuperatiepercentage CEB-EAM

	CEB-EAM			
legverband	strekverband horizontaal		strekverband verticaal	
aantal stenen	36		36	
				
	deconstructie	zuivering	deconstructie	zuivering
aantal kapotte stenen	28	0	21	3
% gerecupereerd	22,2		33,3	
				

In Tabel 48 is te zien dat de recuperatiepercentages voor deze steen- mortelcombinatie 22,2% en 33,3% bedragen. Wat opvalt is dat deze lagere percentages worden veroorzaakt door een hoog aantal beschadigde stenen bij deconstructie voor beide metselwerkverbanden. Dit is opnieuw te linken aan de hechtsterkte tussen de steen en de mortel. Voor de combinatie van CEB-EAM zijn zowel de hoogste buigtreksterkte als de hoogste schuifsterkte gemeten. Figuur 49 en 50 geven de gekregen faalmodi van de deconstructie van de CEB-EAM combinatie weer.



Figuur 49: Faalmodi strekverband horizontaal CEB-EAM






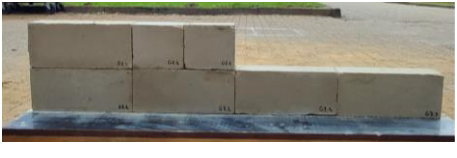
Figuur 50: Faalmodi strekverband verticaal CEB-EAM

In Figuur 49 en 50 is waar te nemen dat voor de CEB-EAM combinatie een grote verscheidenheid aan faalmodi verkregen is. Zo zijn er voor elke kant van de stenen wel enkele percentages van faalmodi die niet recupereerbaar zijn. Dit probleem is het grootst aan de onderkant van de stenen. Dit kwam door het beschadigen van de steen met de klopboor. Voor deze combinatie is het de eerste keer nodig geweest om gebruik te maken van de nieuwe faalmodi. De oorzaak hiervoor was het samen los komen van verschillende stenen waardoor er, samen met de hoge hechtsterkte tussen steen en mortel, beschadigingen ontstonden aan de steenoppervlakken.

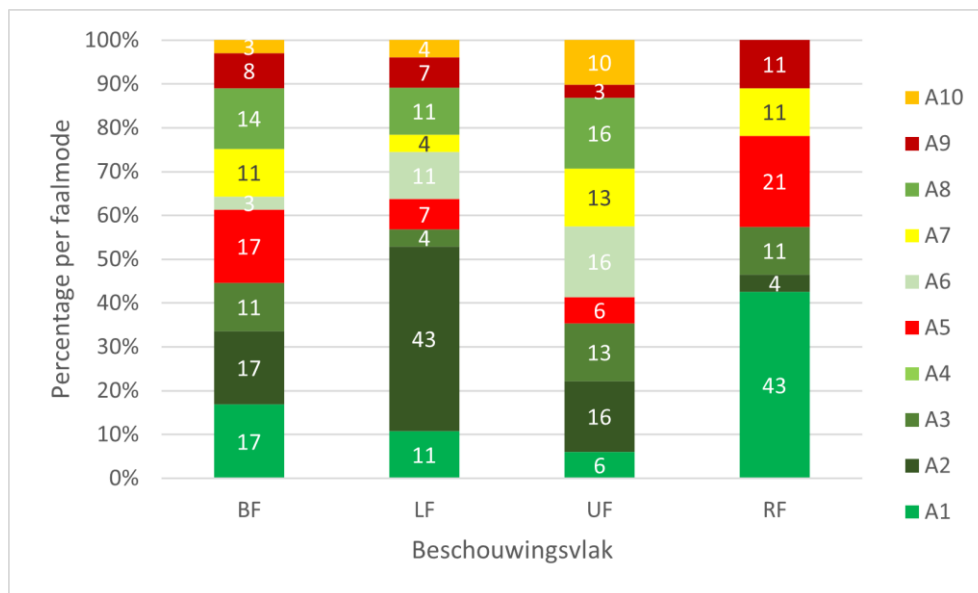
Tot slot is er de steen- mortelcombinatie CEB-BME, de waarden voor het recuperatiepercentage zijn weergegeven in Tabel 49. Deze combinatie heeft zoals de twee voorgaande combinaties met de CEB's een horizontaal en een verticaal strekverband.

Tabel 49: Recuperatiepercentage CEB-BME

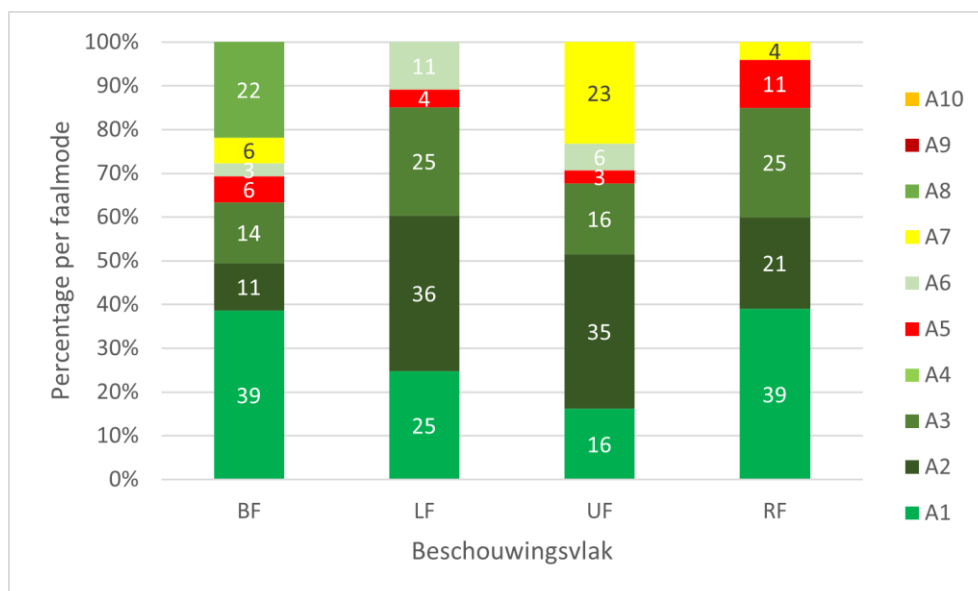
	CEB-BME			
legverband	strekverband horizontaal		strekverband verticaal	
aantal stenen	36		36	
				
	deconstructie	zuivering	deconstructie	zuivering
aantal kapotte stenen	25	9	25	4

% gerecupereerd	5,6	19,4
		

Tabel 49 toont dat de waarden van het recuperatiepercentage slechts 5,6% en 19,4% bedragen. Ook deze waarden zijn zeer laag en vooral te wijten aan het hoge beschadigingspercentage bij de deconstructie van de muurtjes. Vervolgens geven Figuur 51 en Figuur 52 de faalmodi weer in procenten.



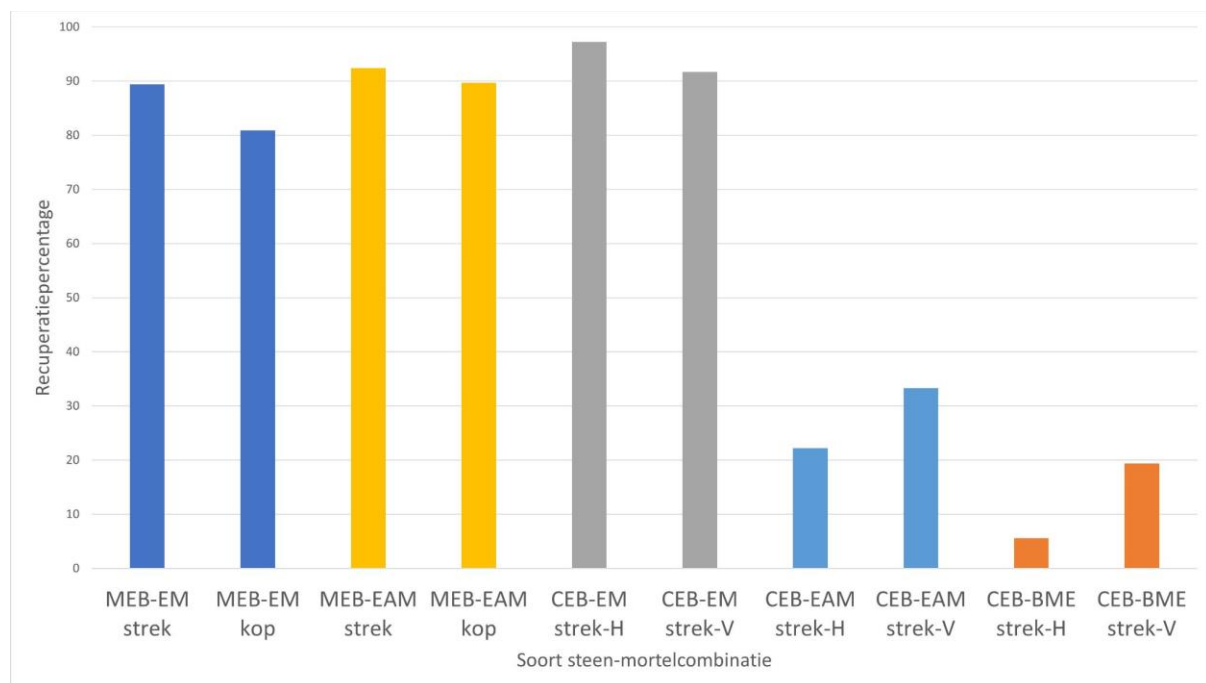
Figuur 51: Faalmodi strekverband horizontaal CEB-BME



Figuur 52: Faalmodi strekverband verticaal CEB-BME

Op Figuur 51 is over het algemeen te zien dat ook hier een grote verscheidenheid zit tussen de verschillende faalmodi. Hierbij zitten zowel rode, die hergebruik onmogelijk maken, als gele, waarbij hergebruik minder waarschijnlijk is, en groene, waarbij hergebruik mogelijk is. Bij het strekverband in verticale richting is in Figuur 52 te zien dat er meer groene faalmodi aanwezig zijn, bijgevolg zal het recuperatiepercentage van het verticale strekverband hoger liggen dan het recuperatiepercentage van het horizontale strekverband. De reden hiervoor is dat het contactoppervlak voor het horizontaal strekverband groter is dan dat van het verticaal strekverband. Hierdoor zal er meer hechting ontstaan tussen steen en mortel waardoor deze moeilijker te demonteren zijn.

In Figuur 53 zijn de recuperatiepercentages uitgezet in functie van de verschillende steen-mortelcombinaties.



Figuur 53: Recuperatiepercentage in functie van steen-mortelcombinatie

In het algemeen komen de verschillende metselwerkverbanden binnen de combinaties goed met elkaar overeen. Enkel voor de combinaties CEB-EAM en CEB-BME zit er een verschil dat groter is dan 10% tussen de verbanden. De reden hiervoor is de hoge hechtsterkte tussen de perssteen en de mortel. Door de hoge hechtsterkte en een verschil in contactoppervlak zal er dus een grotere hechting optreden waardoor de adhesie tussen de perssteen en de mortel groter zal zijn dan de cohesie tussen de deeltjes van de persstenen zelf. Dit resulteert in meer beschadigingen waardoor het recuperatiepercentage zal dalen. Daarnaast valt het op dat de combinatie tussen de vormstenen en de leemlijmmortel een zeer hoog recuperatiepercentage blijft behouden. De reden hier van kan zijn dat de adhesie tussen de vormstenen en de leemlijmmortel niet groot is, daarnaast zijn de poriën van de vormsteen groter dan die van de persstenen. Hierdoor zal er minder oppervlakte zijn om te hechten ten opzichte van de persstenen. Ondanks een gelijkaardige grootte van de buigtreksterkte en de schuifsterkte tussen de MEB-EAM en de CEB-BME blijft het recuperatiepercentage van de MEB-EAM rond de combinaties met de leemmortel. Dit terwijl de leemmortel een lage waarde toont voor de hechtsterkte.

Hoewel de resultaten van het recuperatiepercentage een duidelijke verdeling hebben, is het belangrijk om deze met de nodige nuance te bekijken. De methode die in dit onderzoek gebruikt is, is slechts een eerste exploratie van een proefopstelling om het recuperatiepercentage te kunnen bepalen. Hierdoor zijn er een aantal factoren die niet gecontroleerd zijn, zoals de kracht die op de boor werd geplaatst of

de hoek die boor maakte met de muur die niet altijd constant was. De faalmodi zijn bepaald op basis van de normen voor schuifsterkte en buigtreksterkte. Echter, aangezien er een aantal nieuwe soorten faalmodi voorkwamen, zijn deze gegroepeerd naargelang hun gelijkenissen. Dit onderzoek vormt een eerste basis voor een toekomstige methodologie waarbij er meerdere parameters te controleren zullen zijn en het aantal onzekerheden zal verminderen.

Daarnaast zou het een mooie toevoeging zijn om in toekomstig onderzoek te werken met een energiemeter om de gebruikte energie voor het demonteren en het zuiveren van de stenen te kunnen bepalen. Ook de tijd die nodig is om de verschillende proeven uit te voeren inclusief het zuiveren van de stenen zou een goede indicatie kunnen zijn voor de beoordeling van het hergebruikpotentieel van de verschillende combinaties. Dit brengt echter ook een aantal onzekerheden mee zoals de nauwkeurigheid van de energiemeter. Voor het demonteren van de muurtjes waarbij er leemmortel is gebruikt is er niet veel energie verbruikt waardoor een grote nauwkeurigheid voor de energiemeter nodig is. Daarnaast is de tijd die nodig is voor het ontmantelen ook afhankelijk van de energie die de persoon zelf in het demontage- en kuisproces steekt.

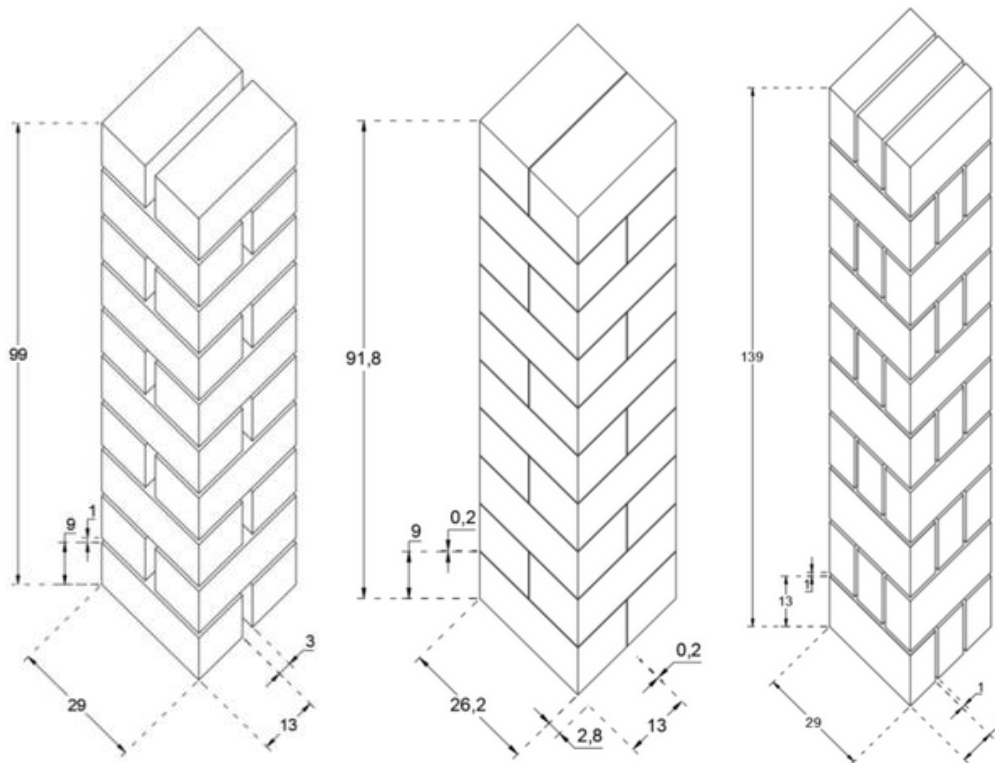
4.5 Technische prestatie voor hergebruik

Om de invloed van langdurige belasting op de druksterkte op leemstenen te onderzoeken, wordt gebruikgemaakt van de proefopstelling zoals beschreven in paragraaf 3.7. Na de langdurige belasting zijn de stenen gedemonteerd, waarbij alle onbeschadigde stenen gerecupereerd en vervolgens onderworpen zijn aan een druktest met behulp van de drukbank. Voor deze proef werden zowel horizontaal als verticaal belaste stenen gebruikt, die eveneens in dezelfde positie onder druk werden belast. Ook wordt de buigtreksterkte berekend op coupletten die gedurende dezelfde periode onder langdurige belasting met dezelfde druk hebben gestaan.

4.5.1 Proefstukken druksterkte na langdurige belasting

Voor dit deel van het onderzoek werden zuilen gemetseld. In totaal zijn vier zuilen vervaardigd, elk gemaakt van persstenen en verschillende soorten mortel: leemmortel, lijm mortel en bastaardmortel. De samenstelling van de mortels is identiek aan die in de voorgaande proeven en wordt na het maken van elke batch geverifieerd op consistentie.

Figuur 54 illustreert de verschillende zuilen. Links wordt een zuil getoond die is gemetseld met leemmortel en bastaardmortel. De zuil in het midden is gemetseld met lijm mortel, en de zuil rechts is gemetseld met leemmortel, maar in een verticaal metselverband. Om te voorkomen dat de stenen voor de zuil met lijm mortel uitsteken vanwege de dunne voeg van de lijm mortel, zijn de persstenen 2,8 cm afgezaagd.



Figuur 54: Visualisatie zuilen

4.5.2 Analyse druksterkte na langdurige belasting

De druksterkte na langdurige belasting op de CEB's wordt automatisch berekend door het geïntegreerde programma van de drukbank. Dit programma maakt gebruik van de ingevoerde gegevens over de afmetingen en het gewicht van de stenen. De resultaten van deze proeven zijn weergegeven in Tabel 50 tot en met Tabel 55, inclusief de gemiddelde druksterkte en de bijbehorende standaardafwijking. De volledige gegevens van de resultaten zijn toegevoegd in Bijlage D.

Tabel 50: Druksterkte na langdurige belasting CEB-Horizontaal

Specimen	Fmax [kN]	σ_D [MPa]	σ_{AVG} [MPa]	SD [MPa]
CEB2	857,34	24,20	25,66	4,20
CEB3	759,59	21,10		
CEB4	791,89	22,00		
CEB5	1108,55	30,79		
CEB6	859,66	23,88		
CEB7	1160,22	31,97		

Tabel 51: Druksterkte na langdurige belasting CEB-EM-Horizontaal

Specimen	Fmax [kN]	σ_D [MPa]	σ_{AVG} [MPa]	SD [MPa]
EMH4	655,81	19,43	16,76	4,01
EMH9	459,35	13,77		
EMH6	537,95	16,06		
EMH12	587,80	17,41		
EMH15	787,56	23,24		
EMH17	352,25	10,63		

Tabel 52: Druksterkte na langdurige belasting CEB-EAM-Horizontaal

Specimen	Fmax [kN]	σ_D [MPa]	σ_{AVG} [MPa]	SD [MPa]
EAM6	689,36	20,41	24,21	2,96
EAM3	819,06	24,65		
EAM9	839,84	25,07		
EAM15	888,10	26,80		
EAM17	668,71	20,26		
EAM16	926,75	28,07		

Tabel 53: Druksterkte na langdurige belasting CEB-BME-Horizontaal

Specimen	Fmax [kN]	σ_D [MPa]	σ_{AVG} [MPa]	SD [MPa]
BME17	857,32	25,29	24,76	3,40
BME16	877,20	25,78		
BME12	628,20	18,39		
BME15	849,61	25,74		
BME1	970,20	28,62		
BME13	999,41	29,25		

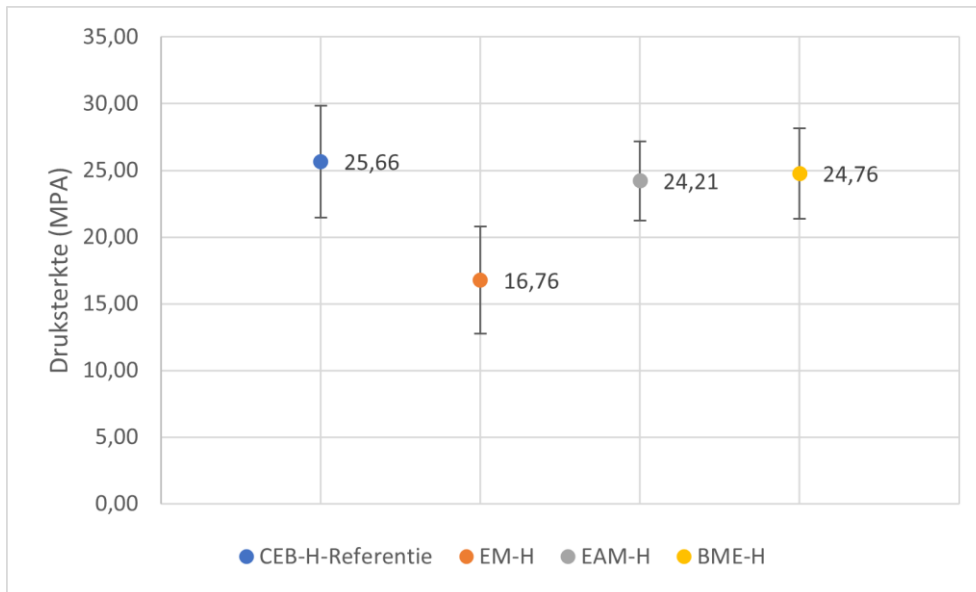
Tabel 54: Druksterkte na langdurige belasting CEB-Verticaal

Specimen	Fmax [kN]	σ_D [MPa]	σ_{AVG} [MPa]	SD [MPa]
CEBV1	635,50	26,85	18,54	4,78
CEBV2	469,77	18,54		
CEBV3	569,16	22,13		
CEBV4	374,89	14,63		
CEBV5	420,82	16,60		
CEBV6	318,20	12,51		

Tabel 55: Druksterkte na langdurige belasting CEB-EM-Verticaal

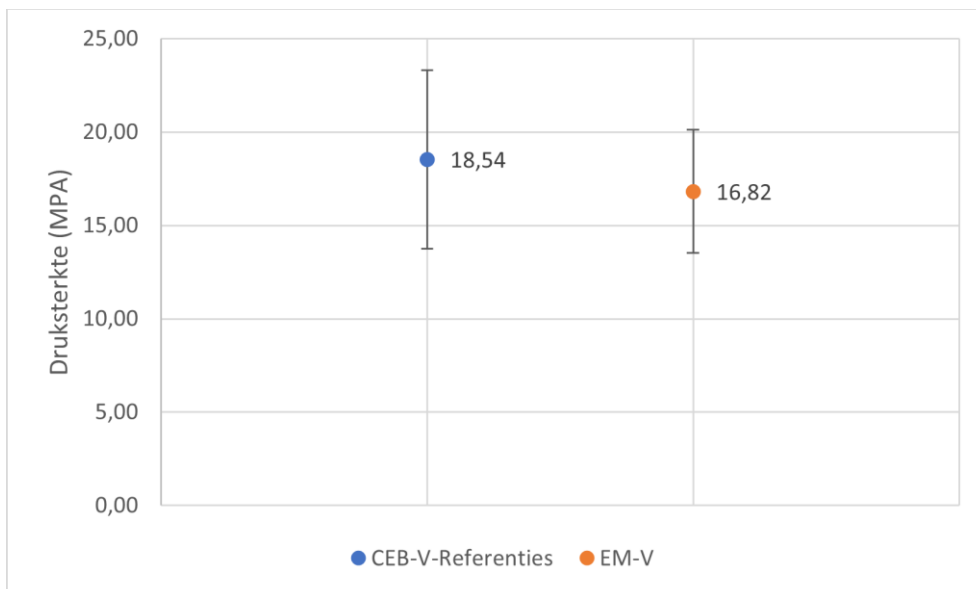
Specimen	Fmax [kN]	σ_D [MPa]	σ_{AVG} [MPa]	SD [MPa]
EMV1	507,61	20,26	16,82	3,30
EMV4	492,53	19,43		
EMV6	471,27	18,66		
EMV10	291,58	11,50		
EMV13	331,02	13,11		
EMV15	455,09	17,96		

Op basis van de bovenstaande tabellen kan een analyse worden uitgevoerd van de druksterktes van de verschillende steen-mortelcombinaties. Figuur 55 toont de resulterende grafiek, waarin de gemiddelde waarden voor elke steen-mortelcombinatie zijn geplote. De spreiding van de gemiddelde buigtreksterktes wordt weergegeven met behulp van verticale foutbalken, die de standaardafwijking aangeven. Figuur 56 geeft hetzelfde weer, maar dan voor de verticaal belaste persstenen.



Figuur 55: Druksterkte horizontaal

Figuur 55 toont de gemiddelde waarde van de druksterkte voor de verschillende combinaties in vergelijking met de onbelaste CEB-H blokken. Uit deze gegevens kan worden afgeleid dat de combinaties met leemlijmmortel (EAM) en bastaardmortel (BME) in de buurt komen van de onbelaste blokken (CEB-H), maar toch een daling van de druksterkte vertonen. De lijm mortel vertoont een daling van 5,6% en de bastaardmortel een daling van 3,5%. De leemmortel heeft een gemiddelde druksterkte van 16,76 MPa, wat 34,69% lager is dan die van de onbelaste blokken.



Figuur 56: Druksterkte verticaal

In dit onderzoek zijn voor de verticaal belaste stenen alleen die met leemmortel gebruikt. Figuur 56 geeft de resultaten weer. De waarde van de onbelaste CEB-blokken is beduidend lager dan die van de horizontaal belaste blokken. Terwijl de druksterkte van de verticaal belaste blokken met leemmortel vrijwel gelijk is aan die van de horizontaal belaste blokken, is de daling in druksterkte bij verticale belasting gelijk aan 9,2% in vergelijking met de 16,76% bij horizontale belasting. Deze daling van de druksterkte van de persstenen met leemmortel kan te wijten zijn aan het verticale verband. In verticaal

verband zijn er telkens drie stenen die de lasten per steenlaag dragen, in plaats van twee stenen in horizontaal verband.²

4.5.3 Analyse buigtreksterkte na langdurige belasting

De resultaten van de coupletten die langdurig zijn belast, zijn weergegeven in Tabel 56 en Tabel 57. In totaal waren er 12 coupletten langdurig belast, echter 6 coupletten zijn kapot gegaan tijdens transport of bij het plaatsen in de proefbank. Van de 4 coupletten CEB-EAM90 kon slechts één getest worden, omdat de andere drie coupletten faalden bij het plaatsen van het bovenste frame van de proefopstelling. Dit probleem deed zich niet voor bij de gewone CEB-EAM coupletten die niet langdurig belast waren. De volledige gegevens zijn terug te vinden in bijlage C.

Tabel 56: Buigtreksterkte CEB-EM90

CEB-EM90	Faalmode	$f_{wi} [N/mm^2]$	gem. $f_{wi} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
CEB-EM90.1	A2	0,0311	0,0363	0,0052
CEB-EM90.2	A2	0,0416		

Tabel 57: Buigtreksterkte CEB-BME90

CEB-BME90	Faalmode	$f_{wi} [N/mm^2]$	gem. $f_{wi} [N/mm^2]$	$\sigma [N/mm^2]$
CEB-BME90.1	A2	0,338	0,396	0,0423
CEB-BME90.2	A2	0,438		
CEB-BME90.3	A1	0,412		

Op basis van de gegevens uit Tabel 56 en Tabel 57 kan er een grafiek worden gemaakt die de gemiddelde waarden voor de buigtreksterktes weergeeft, samen met de bijbehorende spreiding, die de standaardafwijking aangeeft. Deze grafiek is te zien in Figuur 57.

² De degradatie in het horizontaal en verticaal verband met de leemmortel kan ook te maken hebben met de onzekerheid in dit onderzoek of de persstenen uit 4% of 6% cement bestaan. Hierdoor kunnen geen conclusies worden gegeven over deze resultaten.



Figuur 57: Resultaten buigtreksterkte na langdurige belasting

Uit Figuur 57 blijkt dat de buigtreksterkte voor CEB-EM90 gemiddeld 0,0363 MPa bedraagt. Aangezien er slechts twee waarden voor deze combinatie beschikbaar zijn, is deze waarde moeilijker te interpreteren. De gemiddelde buigtreksterkte voor CEB-BME90 bedraagt daarentegen 0,396 MPa, wat ongeveer 11 keer sterker is dan de andere combinatie. Dit hogere resultaat duidt op een veel betere prestatie van de CEB-BME90 combinatie in termen van buigtreksterkte, immer slechter op vlak van potentiële recuperatie.

Uit de resultaten van de buigtreksterkte na langdurige belasting blijkt dat de buigtreksterkte van de combinatie CEB-EM voor en na langdurige belasting weinig verandert. Dit suggereert dat de langdurige belasting geen significante invloed heeft op de hechtsterkte van deze combinatie.

Daarentegen vertoont de combinatie CEB-BME na langdurige belasting een significante stijging in buigtreksterkte, wat aangeeft dat deze combinatie aanzienlijk beter presteert na langdurige belasting. Deze verbetering kan ten eerste te maken hebben met het feit dat de mortel gedurende 90 dagen kan uitharden, wat 60 dagen langer is dan bij de specifieke meting, waarbij mogelijk de kalk in de bastaardmortel verder carboniseert. Ten tweede kan dit te maken hebben met de verbeterde mechanische vergrendeling en hechting van de mortel aan de steenoppervlakken gedurende de langere uithardingsperiode.

Voor de combinatie CEB-EAM90 konden helaas niet voldoende proefstukken worden getest, omdat de coupletten faalden tijdens transport en/of bij het plaatsen in de proefbank. Dit probleem deed zich niet voor bij de specifieke metingen met dezelfde combinatie. De enige verkregen waarde voor CEB-EAM90 bedraagt 0,015 MPa, terwijl de gemiddelde waarde voor de niet-belaste coupletten 0,314 MPa bedraagt. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de langdurig belaste blokken met lijm mortel significant verslechteren in buigtreksterkte. Mogelijk zorgt de aanhoudende druk hier voor een hoog spanningsverschil tussen de perssteen en de leemlijm mortel, waardoor excessieve wrijving ontstaat die potentieel de verbinding verbreekt.

Algemeen kan er geconcludeerd worden dat de steekproef voor dit deel van het onderzoek te klein is. Er zijn namelijk slechts vijf proefstukken met bruikbare waarden getest, wat onvoldoende is om statistisch conclusies te trekken. Een grotere steekproef zou nodig zijn om de variabiliteit en betrouwbaarheid van de resultaten te verbeteren. Dit zou ook helpen om de mogelijke oorzaken van

afwijkingen beter te begrijpen conclusies te trekken over de prestaties van de verschillende steen-mortelcombinaties onder langdurige belasting.



Figuur 58: Faalmodi coupletten na langdurige belasting

In Figuur 58 is het percentage van de voorkomende faalmodi geplot voor elk van de twee steen-mortelcombinaties. Hieruit blijkt dat bij de CEB-EM90 alleen faalmodus A2 voorkomt. Voor de combinatie CEB-BME90 is faalmodus A2 verantwoordelijk voor 67% van de gevallen, terwijl de resterende 33% door faalmodus A1 wordt vertegenwoordigd.

4.6 Waterabsorptie voor en na recuperatie

Zoals reeds in de literatuurstudie besproken zou de waterabsorptie een rol kunnen spelen op de hechtsterkte van het leemsteenmetselwerk. Daarom is het in dit onderzoek belangrijk om te controleren wat de invloed is van het hergebruik op de initiële waterabsorptie. Op deze manier zou het mogelijk kunnen zijn om een indicatie te kunnen geven voor de hechtsterkte voor en na hergebruik van de leemstenen. Het is namelijk zo dat hoe dichter de ideale vochtigheid benaderd wordt, hoe hoger de hechtsterkte tussen de steen en de mortel zal zijn.

De initiële waterabsorptie is voor twaalf verschillende proefstukken bepaald. Hierbij zitten zes nieuwe proefstukken en zes reeds gebruikte proefstukken. De gebruikte persstenen hebben in de vorige toepassing een bastaardmortel op hun testoppervlak gehad. De geteste oppervlakken zijn gezuiverd en vervolgens zijn de persstenen gedroogd om de initiële waterabsorptie te kunnen bepalen. In Tabel 58 zijn de waarden voor de initiële waterabsorptie van de twaalf proefstukken weergegeven. Vervolgens zijn in bijlage E alle gegevens die nodig zijn voor het bepalen van de initiële waterabsorptie raadpleegbaar.

Tabel 58: Waterabsorptiecoëfficiënt

CEB	$c_{w,i}$ [kg/(m ² min)]	gem. $c_{w,i}$ [kg/(m ² min)]	σ [kg/(m ² min)]
CEB1	1,6	2,2	0,8
CEB2	3,1		
CEB3	1,7		
CEB4	3,4		
CEB5	1,7		
CEB6	1,7		
CEB-BME1	1,3	1,6	0,8
CEB-BME2	1,1		
CEB-BME3	2,4		
CEB-BME4	1,4		
CEB-BME5	0,6		
CEB-BME6	2,7		

Wat opvalt in Tabel 58 is dat voor de proefstukken na hergebruik toch een duidelijke zakking geconstateerd kan worden. De gemiddelde waarde van de nieuwe proefstukken ligt namelijk 30% hoger dan de gemiddelde waarde van de hergebruikte proefstukken. Daarnaast is de standaardafwijking voor beide soorten gelijk, wat er op duidt dat voor beide soorten proefstukken een even grote afwijking is van de gemiddelde waarden, hierdoor is het mogelijk om de gemiddelde waarden rechtstreeks te vergelijken. De oorzaak van deze vermindering kan te wijten zijn aan de verdichting van de steenoppervlakken. In het proces van de zuivering is het mogelijk dat de poriën aan het oppervlak van de steen verstopt blijven door mortelresten. Hierdoor vermindert het aantal poriën die hechting bewerkstelligen, waardoor er minder capillaire zuiging zal optreden tijdens het waterabsorptieproces. Dit fenomeen zou kunnen betekenen dat de hechtsterkte na hergebruik ook zal dalen. Door de verdichte poriën zal bij een volgende keer metselen de gerecupereerde steen minder water met bindmiddelen opzuigen. Dit zal resulteren in een lager interlocking-effect tussen de leemsteen en de mortel.

Voor deze tests zijn er toch enkele beperkingen, zo is de steekproef van de stenen klein. Daarnaast was het moeilijk om voor al de stenen exact evenveel water toe te voegen en deze ook exact 1 min in het water te plaatsen. Ondanks deze beperkingen is er een identieke standaardafwijking behaald. Dit toont aan dat de nauwkeurigheid wel hoog ligt. Voor toekomstig onderzoek zou het handig zijn om dit voor meerdere combinaties uit te voeren. In deze thesis is er enkel met CEB's gewerkt die reeds gebruikt waren met een bastaardmortel, omdat het de enige steen is waarbij zo'n verschil duidelijk merkbaar zou zijn. Bij CEB-EM of CEB-EAM stenen zou gedurende de onderdompeling van 1 min, de resterende mortel aan de steen oplossen, waardoor het verschil in gewicht een combinatie van verlies aan mortel en een winst aan water is. Dit zou vertekende resultaten geven van de eigenlijke capillaire opzuiging.

5. Evaluatie hergebruikpotentieel

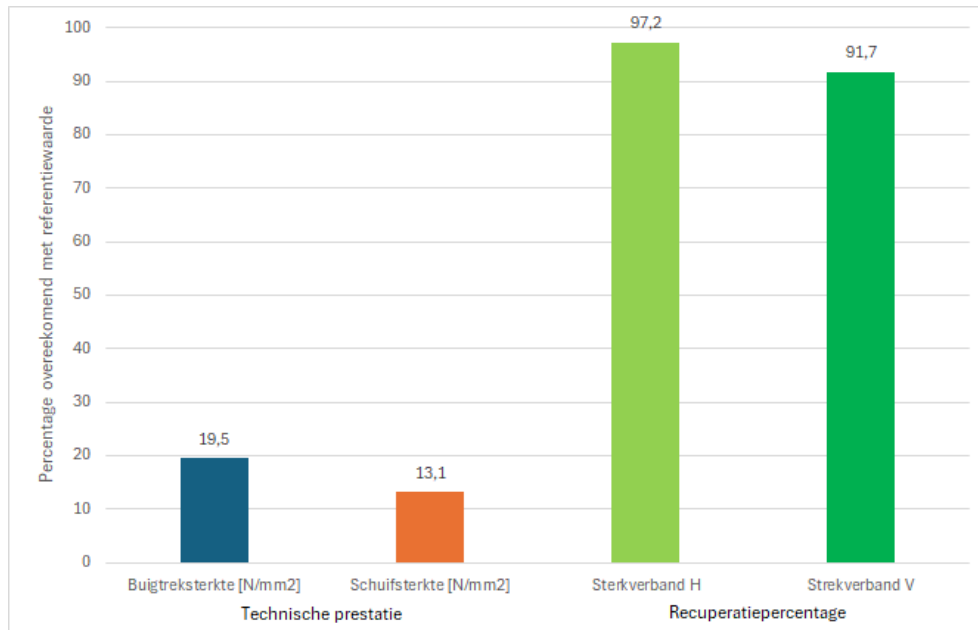
Om een definitief oordeel te kunnen vellen over het hergebruikpotentieel van de verschillende steen-mortelcombinaties, is gebruik gemaakt van de verschillende eigenschappen die in dit onderzoek zijn bepaald: de hechtsterkte (buigtreksterkte en schuifsterkte), de hechtsterkte van gerecupereerde leemstenen, de hechtsterkte na langdurige belasting, het recuperatiepercentage, de arbeid en duur van het recuperatieproces, en de druksterkte na langdurige belasting.

Om de buigtreksterkte en schuifsterkte van leemsteenmetselwerk te interpreteren, werd een vergelijking gemaakt met de norm NBN EN 1996-1-1 [9]. Hoewel deze norm richtlijnen biedt voor traditioneel metselwerk en geen specifieke waarden bevat voor leemsteenmetselwerk, zullen de resultaten van het leemsteenmetselwerk worden vergeleken met de waarden die gelden voor traditioneel metselwerk. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt tussen de lijm mortel en een mortel M10. De stenen worden vergeleken met stenen uit groep 1, wat niet-dragende gevelstenen zijn. Het is belangrijk op te merken dat de vergelijking wordt gemaakt op basis van de structurele toepassing. In dit geval betekent dit dat hogere waarden voor de buigtreksterkte en de schuifsterkte voordelig zijn voor structurele toepassingen. Echter, voor hergebruik is dit niet wenselijk.

Voor de buigtreksterktes van de leemsteen- en leemmortelcombinaties is gekeken hoeveel procent van de normwaarden wordt behaald. De referentiewaarde van de buigtreksterkte voor de leemmortel en de bastaardmortel is $0,20 \text{ N/mm}^2$, terwijl deze voor de leemlijmmortel $0,50 \text{ N/mm}^2$ bedraagt [9]. Ook voor de waarden van de schuifsterkte is een vergelijking gemaakt met NBN EN 1996-1-1. De referentiewaarde voor de leemmortel is $0,20 \text{ N/mm}^2$, en voor zowel de bastaardmortel als de leemlijmmortel is deze $0,30 \text{ N/mm}^2$ [9]. Vervolgens worden de waarden voor de druksterkte na langdurige belasting vergeleken met de experimentele druksterkte van de persstenen, welke $25,66 \text{ MPa}$ bedraagt.

5.1 CEB-EM

De verschillende factoren voor de combinatie van de persstenen en de leemmortel zijn vervolgens uitgezet in Figuur 59.

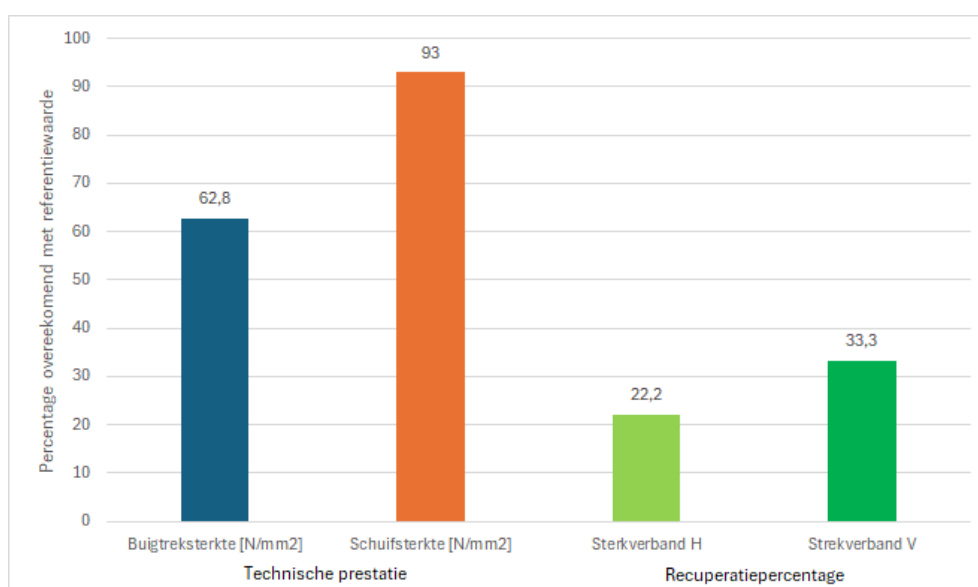


Figuur 59: Analyse hergebruikpotentieel CEB-EM

Voor de combinatie CEB-EM valt op dat twee factoren laag scoren, terwijl twee factoren hoog scoren. De factoren die ondermaats presteren zijn de buijtreksterkte en de schuifsterkte. Het is belangrijk om de waarden van de buijtreksterkte en schuifsterkte te nuanceren. De experimentele resultaten zijn namelijk vergeleken met normwaarden die oorspronkelijk niet voor leemsteenmetselwerk ontwikkeld zijn. Voor toepassingen waarbij minder buijtreksterkte en schuifsterkte vereist zijn, zouden deze waarden mogelijk toereikend zijn. De twee factoren die hoog scoren zijn het recuperatiepercentage voor beide verbanden. Voor beide verbanden kan meer dan 90% van de stenen gerecupereerd worden.

5.2 CEB-EAM

Ook voor deze combinaties is er een samenvattende grafiek gemaakt. Deze is weergegeven in Figuur 60.

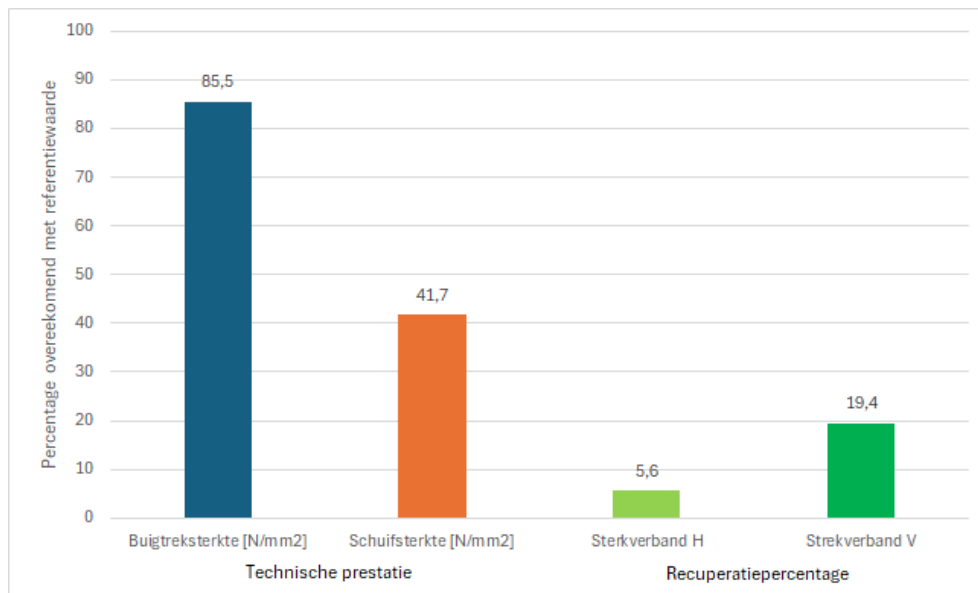


Figuur 60: Analyse hergebruikpotentieel CEB-EAM

Figuur 60 geeft duidelijk weer dat er voor deze combinatie slechts één factor een hoge score krijgt. Enkel de schuifsterkte komt in de buurt van de referentiewaarden. De buigtreksterkte behaald slechts 62,8% van de te halen referentiewaarde, voor de leemlijmmortel is dit eerder aan de lage kant omdat deze kan worden vergeleken met een referentiewaarde van een gewone lijmortel. Ook het recuperatiepercentage van deze combinatie ligt zeer laag, waardoor het hergebruikpotentieel zal dalen.

5.3 CEB-BME

Voor de laatste combinatie met de persstenen is ook een samenvattende grafiek opgesteld. Figuur 61 geeft deze weer.

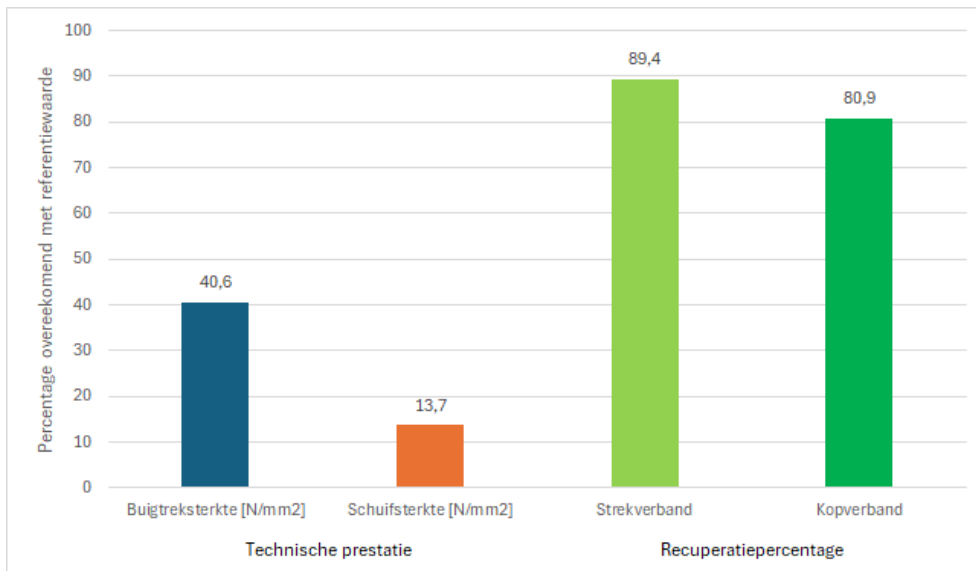


Figuur 61: Analyse hergebruikpotentieel CEB-BME

Figuur 61 toont een zeer positieve waarde voor de buigtreksterkte. Er zijn echter drie cruciale factoren die bijzonder laag scoren. Zo wordt voor de schuifsterkte nog niet de helft van de referentiewaarde bereikt, en is het recuperatiepercentage van de persstenen extreem laag. Het probleem met deze combinatie is dat er vrijwel geen stenen hergebruikt kunnen worden, omdat ze beschadigd raken tijdens het demontageproces.

5.4 MEB-EM

Er is ook een samenvattende grafiek gemaakt voor de combinatie van vormstenen en leemmortel. Figuur 62 toont deze resultaten.

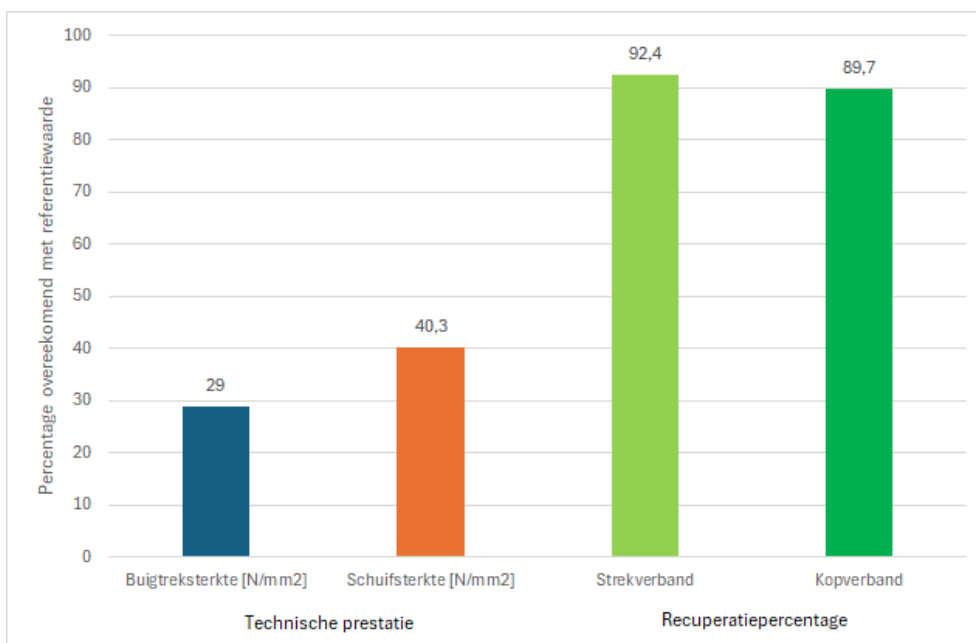


Figuur 62: Analyse hergebruikpotentieel MEB-EM

In Figuur 62 valt op dat voor deze combinatie twee factoren zeer hoog, maar ook twee factoren zeer laag scoren. De buigtreksterkte haalt slechts 40,6% van de referentiewaarde. De schuifsterkte presteert nog slechter en haalt slechts 13,7% van de referentiewaarde. Dit komt doordat, net zoals bij de combinatie van persstenen en leemmortel, de buigtrek- en schuifsterkte worden vergeleken met normwaarden voor traditioneel metselwerk. Voor toepassingen waarbij de hechtsterkte tussen de leemstenen en het metselwerk geen grote rol speelt, zou ook deze combinatie geschikt kunnen zijn voor hergebruik. Zeker omdat bij deze combinatie ook het recuperatiepercentage boven de 80% ligt.

5.5 MEB-EAM

Ten slotte is er ook voor de combinatie van de vormstenen en de leemlijmmortel een samenvattende grafiek opgesteld. Figuur 63 toont deze resultaten.



Figuur 63: Analyse hergebruikpotentieel MEB-EAM

Figuur 63 toont aan dat de combinatie van vormstenen met leemlijmmortel zowel twee minder gunstige als twee beter presterende factoren heeft. Net zoals bij de combinatie van vormstenen met leemmortel, scoort deze combinatie niet goed op zowel buigtreksterkte als schuifsterkte. Het verschil tussen de combinaties is echter dat de combinatie met leemlijmmortel slechter presteert op buigtreksterkte, maar beter op schuifsterkte. Dit gaat gepaard met een hoger recuperatiepercentage, wat gunstiger is voor het hergebruikpotentieel.

6. Besluit

Deze studie heeft de potentiële herbruikbaarheid van leemstenen vanuit een technisch perspectief onderzocht, met als doel de milieu-impact van de bouwsector te verminderen door materiaalhergebruik te bevorderen. Dit werd geanalyseerd door het beoordelen van de hechtsterkte, het recuperatiepotentieel en de mechanische eigenschappen van leemstenen na langdurige belasting.

Deze studie toont aan dat het hoogste recuperatiepotentieel wordt bereikt door het gebruik van persstenen in combinatie met leemmortel. Deze combinatie resulteert in de laagste buigtreksterkte en de laagste schuifsterkte, wat wijst op een positieve invloed op de demontage. Bovendien vertoont deze steen-mortelcombinatie de meest gewenste faalmodi, waarbij bij de meerderheid van de stenen de mortel slechts aan één zijde verwijderd hoeft te worden. Echter, de druksterkte van de persstenen in combinatie met leemmortel vertoont een degradatie, wat een negatief effect heeft op het hergebruik van de steen. Deze degradatie kan echter ook te wijten zijn aan fabrieksfouten, waarbij sommige persstenen in dit onderzoek zwakker of sterker zijn. Daarom kan de degradatie van de druksterkte niet met zekerheid worden vastgesteld. Daarentegen verandert de buigtreksterkte na langdurige belasting bijna niet. Ondanks de mogelijke degradatie van de druksterkte, biedt de combinatie van persstenen en leemmortel veelbelovende resultaten voor hergebruik in de bouwsector, wat bijdraagt aan een vermindering van de milieu-impact. Verdere onderzoeken zijn echter nodig om de variabiliteit in de druksterkte te verifiëren.

Verder kan geconcludeerd worden dat de perssteen in combinatie met leemlijmmortel en bastaardmortel niet geschikt is voor hergebruik op basis van het recuperatiepercentage. De persstenen met bastaardmortel vertoonden na langdurige belasting een stijging in buigtreksterkte, waarbij de waarde de genormeerde waarde overtreft, maar dit ging gepaard met een laag recuperatiepercentage. De perssteen met leemlijmmortel vertoonde na langdurige belasting een significante daling in buigtreksterkte, waarbij voor deze speciemens geen waarde kon worden vastgesteld door te zwakke proefstukken, in tegenstelling tot de niet langdurig belaste proefstukken. Hieruit kan besloten worden dat ook deze combinatie niet geschikt is voor hergebruik. Voor verder onderzoek is het aangeraden om meer proefstukken te voorzien om deze resultaten nader te onderzoeken en te bevestigen.

De vormstenen in combinatie met leemmortel en leemlijmmortel vertonen, naast de persstenen met leemmortel, een hoog recuperatiepercentage. Aangezien deze twee combinaties dicht bij de genormeerde waarde voor metselwerk komen, hebben ze een hoger potentieel voor hergebruik. Echter, de vormstenen zijn niet getest na langdurige belasting, waardoor er geen volledige vergelijking kan gemaakt worden. Het is aan te raden om dit aspect in verder onderzoek te behandelen.

Deze studie biedt waardevolle inzichten in de herbruikbaarheid van leemstenen in de bouwsector. De bevindingen onderstrepen het potentieel van specifieke steen-mortelcombinaties voor hergebruik, wat kan bijdragen aan een duurzamere bouwpraktijk. Belangrijk te vermelden vanuit de analyse van de technische prestatie ten opzichte van het hergebruikpotentieel is dat er steeds een compromis gemaakt moet worden tussen de structurele capaciteit en de toepassingsmogelijkheden van de leemsteen-mortelcombinatie ten opzichte van het hergebruikpotentieel ervan. Desalniettemin zijn verdere onderzoeken noodzakelijk om de lange-termijneffecten en de variabiliteit van de mechanische eigenschappen volledig te begrijpen en te optimaliseren.

Referentielijst

- [1] „Wat is circulair bouwen?,” Vlaanderen-circulair, [Online]. Available: <https://bouwen.vlaanderen-circulair.be/nl/wat-is-het>. [Geopend 11 november 2023].
- [2] B.-E. Bazar, M. Park, H.-S. Lee, I. Yoon en J. Cho, „Determining retrofit technologies for building energy performance,” *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2020.
- [3] P.-P. v. d. Berg, „Circulaire materialen sluiten de kringloop in de bouw,” *Kampc*, [Online]. Available: <https://www.kampc.be/artikel/2019/01/17/Circulaire-materialen-sluiten-de-kringloop-in-de-bouw#:~:text=Technische%20materialen%20die%20veel%20worden,met%20cement%2C%20lijm%20of%20pur.> [Geopend 11 november 2023].
- [4] „Leem,” [Online]. Available: <https://www.joostdevree.nl/shtmls/leem.shtml>. [Geopend 22 mei 2024].
- [5] „Cement en Bindmiddelen,” *Betonhuis*, [Online]. Available: <https://betonhuis.nl/betonhuis/cement-en-bindmiddelen>. [Geopend 23 mei 2024].
- [6] B. V. V. Reddy, „Compressed Earth Block & Rammed Earth Structures,” *Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering*, 2022.
- [7] P. Walker, „Bond Characteristics of Earth Block Masonry,” *ASCE Library*, 1999.
- [8] G. L. F. Benachio, M. d. C. D. Freitas en S. F. Tavares, „Circular economy in the construction industry: A systematic literature review,” *Elsevier*, 2020.
- [9] K. Zhou, Y. W. H.-M. Chen, D. Lam, A. Ajayebi en P. Hopkinson, „Developing advanced techniques to reclaim existing end of service life (EoS) bricks – An assessment of reuse technical viability,” *Developments in the Built Environment*, 2020.
- [10] „NBN EN 1996-1-1: Design of masonry structures,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/589349>. [Geopend mei 2024].
- [11] BC materials, [Online]. Available: <https://bcmaterials.org/>. [Geopend 15 mei 2024].
- [12] „NBN EN 1015-3/A2: 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/289225>. [Geopend 20 mei 2024].
- [13] „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/educationAll?PdfMeta%5BNORMNR%5D=EN+1052-5+&PdfMeta%5BJAAR_UITGAVE%5D=&PdfMeta%5BTITEL_EN%5D=&PdfMeta_page=1. [Geopend 22 mei 2024].
- [14] „NBN EN 1052-3/A1: Methods of test for masonry - Part 3: Determination of initial shear strength,” [Online]. Available: https://edu.mynbn.be/pdfMeta/educationAll?PdfMeta%5BNORMNR%5D=EN+1052-3&PdfMeta%5BJAAR_UITGAVE%5D=&PdfMeta%5BTITEL_EN%5D=&PdfMeta_page=1. [Geopend 17 april 2024].
- [15] „NBN EN 772-1+A1: Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/540678?l=E>. [Geopend 22 mei 2024].
- [16] „NBN EN 772-11: Methods of test for masonry units - Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water...,” [Online]. Available: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/400610?l=E>. [Geopend 22 mei 2024].

- [17] S. Gielen en F. Spooren, „Montage en demontage van ongebakken leemstenen: verkenning van het circulaire,” 2023.
- [18] „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 18 mei 2024].
- [19] „XP P13-901: Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception,” [Online]. [Geopend 2 juni 2024].
- [20] L. Ordener, „Empreinte carbone du béton : origines et conséquences,” [Online]. Available: <https://www.concretedispatch.eu/blog/empreinte-carbone-beton/>. [Geopend 12 december 2023].

Bijlagen

Bijlage A: Uitgebreide resultaten bond wrench-test specifieke waarden p. 47

CEB-EM	b (mm)	d (mm)	F1 (N)	F2 (N)	W (kg)	e2 (mm)	e1 (mm)	Faalmode	fwi (N/mm ²)
CEB-EM1	290	120	86,2	23,721	7,318	112	362	A2	0,0358
CEB-EM2	290	120	44,8	23,721	7,291	112	362	A2	0,019
CEB-EM3	290	120	103	23,721	6,312	112	362	A3	0,0426
CEB-EM4	290	120	115	23,721	6,185	112	362	A2	0,0475
CEB-EM5	290	120	73,3	23,721	5,56	112	362	A2	0,0306
CEB-EM6	290	120	141	23,721	6,165	112	362	A2	0,058

CEB-EAM	b (mm)	d (mm)	F1 (N)	F2 (N)	W (kg)	e2 (mm)	e1 (mm)	Faalmode	fwi (N/mm ²)
CEB-EAM1	290	120	775	23,721	6,097	112	362	A5	0,315
CEB-EAM2	290	120	727	23,721	5,939	112	362	A5	0,295
CEB-EAM3	290	120	814	23,721	6,135	112	362	A4	0,331

CEB-BME	b (mm)	d (mm)	F1 (N)	F2 (N)	W (kg)	e2 (mm)	e1 (mm)	Faalmode	fwi (N/mm ²)
CEB-BME1	290	120	465	23,721	6,365	112	362	A1	0,189
CEB-BME2	290	120	530	23,721	6,919	112	362	A3	0,216
CEB-BME3	290	120	425	23,721	7,2095	112	362	A2	0,173
CEB-BME4	290	120	456	23,721	6,626	112	362	A1	0,186
CEB-BME5	290	120	448	23,721	6,493	112	362	A1	0,182
CEB-BME6	290	120	511	23,721	6,469	112	362	A1	0,208
CEB-BME7	290	120	200	23,721	6,3965	112	362	A1	0,0819
CEB-BME8	290	120	539	23,721	6,768	112	362	A1	0,219
CEB-BME9	290	120	200	23,721	6,561	112	362	A1	0,0819

MEB-EM	b (mm)	d (mm)	F1 (N)	F2 (N)	W (kg)	e2 (mm)	e1 (mm)	Faalmode	fwi (N/mm ²)
MEB-EM1	220	120	32,8	23,721	2,583	108	330	A3	0,0261
MEB-EM2	220	120	70,7	23,721	2,871	108	330	A3	0,0533
MEB-EM3	220	120	52,6	23,721	3,147	108	330	A2	0,0403
MEB-EM4	220	120	227	23,721	3,188	108	330	A3	0,166
MEB-EM5	220	120	179	23,721	2,856	108	330	A3	0,131
MEB-EM6	220	120	94,9	23,721	2,805	108	330	A3	0,0707

MEB-EAM	b (mm)	d (mm)	F1 (N)	F2 (N)	W (kg)	e2 (mm)	e1 (mm)	Faalmode	fwi (N/mm ²)
MEB-EAM1	220	120	116	23,721	2,5735	108	330	A3	0,0859
MEB-EAM2	220	120	289	23,721	2,5725	108	330	A3	0,21
MEB-EAM3	220	120	344	23,721	2,616	108	330	A3	0,25

MEB-EAM4	220	120	147	23,721	2,5985	108	330	A2	0,108
MEB-EAM5	220	120	149	23,721	2,5195	108	330	A3	0,12
MEB-EAM6	220	120	186	23,721	2,576	108	330	A3	0,136
MEB-EAM7	220	120	121	23,721	2,658	108	330	A2	0,0895
MEB-EAM8	220	120	238	23,721	2,637	108	330	A3	0,173
MEB-EAM9	220	120	196,6	23,721	2,6065	108	330	A3	0,144

Bijlage B: Uitgebreide resultaten bond wrench-test na recuperatie p. 52

CEB-EAM-EM	b (mm)	d (mm)	F1 (N)	F2 (N)	W (kg)	e2 (mm)	e1 (mm)	Faalmode	fwi (N/mm ²)
CEB-EAM-EM1	290	120	105	23,721	6,383	112	396	A1	
CEB-EAM-EM2	290	120	117	23,721	7,261	112	396	A2	0,0538
CEB-EAM-EM3	290	120	214	23,721	6,592	112	396	A3	
CEB-EAM-EM4	290	120	30,2	23,721	6,657	112	396	A1	

CEB-BME-EM	b (mm)	d (mm)	F1 (N)	F2 (N)	W (kg)	e2 (mm)	e1 (mm)	Faalmode	fwi (N/mm ²)
CEB-BME-EM1	290	120	69	23,721	6,392	112	396	A1	
CEB-BME-EM2	290	120	50	23,721	7,158	112	396	A2	0,0243
CEB-BME-EM3	290	120	35,4	23,721	6,472	112	396	A1	

MEB-EAM-EAM	b (mm)	d (mm)	F1 (N)	F2 (N)	W (kg)	e2 (mm)	e1 (mm)	Faalmode	fwi (N/mm ²)
MEB-EAM-EAM1	220	100	173	23,721	2,574	108	378	A3	0,149
MEB-EAM-EAM2	220	100	104	23,721	2,599	108	378	A3	0,091
MEB-EAM-EAM3	220	100	141	23,721	2,614	108	378	A3	0,122
MEB-EAM-EAM4	220	100	170	23,721	3,01	108	378	A2	0,147

Bijlage C: Uitgebreide resultaten bond wrench-test na langdurige belasting p.82

CEB-EM90	b (mm)	d (mm)	F1 (N)	F2 (N)	W (kg)	e2 (mm)	e1 (mm)	Faalmode	fwi (N/mm ²)
CEB-EM90.1	290	120	64,7	23,721	6,926	112	405	A2	0,0363
CEB-EM90.2	290	120	87,1	23,721	6,906	112	405	A2	

CEB-BME90	b (mm)	d (mm)	F1 (N)	F2 (N)	W (kg)	e2 (mm)	e1 (mm)	Faalmode	fwi (N/mm ²)
CEB-BME90.1	290	120	723	23,721	7,254	112	405	A2	
CEB-BME90.2	290	120	937	23,721	7,339	112	405	A2	0,396
CEB-BME90.3	290	120	880	23,721	6,697	112	405	A1	

Bijlage D: Uitgebreide resultaten drukttesten na langdurige belasting p. 78

Specimen	l (mm)	w (mm)	h (mm)	S0 (cm ²)	m (kg)	ρ (g/cm ³)	Fmax (kN)	σD (MPa)	σAVG (MPa)	SD (MPa)	COV (%)
CEBV1	269	88	127	236,72	6,121	2,036	635,50	26,85	18,54	4,78	25,80
CEBV2	288	88	126	253,44	6,487	2,031	469,77	18,54			
CEBV3	289	89	128	257,21	6,681	2,029	569,16	22,13			
CEBV4	288	89	128	256,32	6,378	1,944	374,89	14,63			
CEBV5	288	88	129	253,44	6,390	1,955	420,82	16,60			
CEBV6	289	88	126	254,32	6,363	1,986	318,20	12,51			

Specimen	l (mm)	w (mm)	h (mm)	S0 (cm ²)	m (kg)	ρ (g/cm ³)	Fmax (kN)	σD (MPa)	σAVG (MPa)	SD (MPa)	COV (%)
EMH4	270	125	89	337,50	5,991	1,995	655,81	19,43	16,76	4,01	23,94
EMH9	269	124	89	333,56	5,766	1,942	459,35	13,77			
EMH6	268	125	89	335,00	5,815	1,950	537,95	16,06			
EMH12	268	126	88	337,68	5,942	2,000	587,80	17,41			
EMH15	269	126	88	338,94	5,969	2,001	787,56	23,24			
EMH17	268	124	88	332,32	5,623	1,923	352,25	10,63			

Specimen	l (mm)	w (mm)	h (mm)	S0 (cm ²)	m (kg)	ρ (g/cm ³)	Fmax (kN)	σD (MPa)	σAVG (MPa)	SD (MPa)	COV (%)
EAM6	268	126	89	337,68	5,905	1,965	689,36	20,41	24,21	2,96	12,23
EAM3	268	124	88	332,32	5,974	2,043	819,06	24,65			
EAM9	268	125	88	335,00	5,944	2,016	839,84	25,07			
EAM15	263	126	88	331,38	6,094	2,090	888,10	26,80			

EAM17	262	126	88	330,12	5,857	2,016	668,71	20,26			
EAM16	262	126	88	330,12	6,151	2,117	926,75	28,07			

Specimen	l (mm)	w (mm)	h (mm)	S0 (cm ²)	m (kg)	ρ (g/cm ³)	Fmax (kN)	σD (MPa)	σAVG (MPa)	SD (MPa)	COV (%)
BME17	269	126	88	338,94	6,141	2,059	857,32	25,29	24,76	3,40	13,72
BME16	270	126	89	340,20	6,197	2,047	877,20	25,78			
BME12	269	127	88	341,63	5,974	1,987	628,20	18,39			
BME15	269	127	88	341,63	6,049	2,012	849,61	25,74			
BME1	269	126	88	338,94	6,099	2,045	970,20	28,62			
BME13	269	127	88	341,63	6,127	2,038	999,41	29,25			

Specimen	l (mm)	w (mm)	h (mm)	S0 (cm ²)	m (kg)	ρ (g/cm ³)	Fmax (kN)	σD (MPa)	σAVG (MPa)	SD (MPa)	COV (%)
CEBV1	269	88	127	236,7 2	6,121	2,036	635,50	26,85	18,54	4,78	25,80
CEBV2	288	88	126	253,4 4	6,487	2,031	469,77	18,54			
CEBV3	289	89	128	257,2 1	6,681	2,029	569,16	22,13			
CEBV4	288	89	128	256,3 2	6,378	1,944	374,89	14,63			
CEBV5	288	88	129	253,4 4	6,390	1,955	420,82	16,60			
CEBV6	289	88	126	254,3 2	6,363	1,986	318,20	12,51			

Specimen	l (mm)	w (mm)	h (mm)	S0 (cm ²)	m (kg)	ρ (g/cm ³)	Fmax (kN)	σD (MPa)	σAVG (MPa)	SD (MPa)	COV (%)
EMV1	288	87	127	250,56	6,52 4	2,050	507,61	20,26	16,82	3,30	19,63
EMV4	288	88	128	253,44	6,60 4	2,036	492,53	19,43			
EMV6	287	88	127	252,56	6,52 7	2,035	471,27	18,66			
EMV10	288	88	126	253,44	6,27	1,964	291,58	11,50			

					2							
EMV13	287	88	126	252,56	6,36 0	1,999	331,02	13,11				
EMV15	288	88	127	253,44	6,34 4	1,971	455,09	17,96				

Bijlage E: Uitgebreide resultaten initiële waterabsorptie p.84

CEB	mdry,s [g]	mso,s [g]	As [m ²]	l1 [mm]	l2 [mm]	l gem [mm]	b1 [mm]	b2 [mm]	b gem [mm]	t [min]	cw,i [kg/(m ² min)]	gem. cw,i [kg/(m ² min)]	σ [kg/(m ² min)]
CEB1	6224,1	6282,9	36907,7807	288,82	288,97	288,90	127,73	127,78	127,76	1	1,6	2,2	0,8
CEB2	5997,5	6110,2	36532,0174	288,74	288,75	288,75	126,23	126,81	126,52	1	3,1		
CEB3	5908,1	5970,7	36111,7456	288,5	289,08	288,79	124,87	125,22	125,05	1	1,7		
CEB4	6009,8	6135,3	36900,9983	288,62	289,29	288,96	127,6	127,81	127,71	1	3,4		
CEB5	6117,2	6179,7	36473,5466	289,98	290,37	290,18	125,64	125,75	125,70	1	1,7		
CEB6	5922,3	5982,7	36151,2573	288,72	288,73	288,73	125,13	125,29	125,21	1	1,7		
CEB-BME1	6155,8	6203,4	37052,4945	289,6	289,3	289,45	127,92	128,1	128,01	1	1,3	1,6	0,8
CEB-BME2	5946,5	5985,3	36870,6543	289,02	288,46	288,74	127,77	127,62	127,70	1	1,1		
CEB-BME3	5934,2	6020,2	36334,7082	288,67	288,69	288,68	125,73	126	125,87	1	2,4		
CEB-BME4	5919,5	5956,3	25653,5172	289,34	288,8	289,07	88,96	88,53	88,75	1	1,4		
CEB-BME5	6167,0	6183,2	25802,5794	289,84	289,44	289,64	88,76	89,41	89,09	1	0,6		
CEB-BME6	5989,2	6058,0	25693,8100	288,39	288,61	288,50	88,92	89,2	89,06	1	2,7		