

**Haalbaarheidsstudie  
biobeton (TESN221061)**

Eindrapportage



**creating with the power of nature**

PROJECTTITEL: Haalbaarheidsstudie biobeton (TESN221061)  
PROJECTCODE: 20215795/13285  
DOCUMENTTYPE: Eindrapportage  
PUBLICATIEDATUM: Oktober 2023  
PROJECTLEIDER: Dick Specht  
AUTEUR(S): Svenja Harms Dick Specht (Bioclear earth),  
Evelien de Visser (Strukton)  
COLLEGIALE TOETS: Sytze Keuning

Bioclear earth b.v.  
Rozenburglaan 13C; 9727 DL Groningen  
Telefoon: 050 571 84 55  
Email: [info@bioclearearth.nl](mailto:info@bioclearearth.nl)  
Website: [www.bioclearearth.nl](http://www.bioclearearth.nl)



Bioclear earth is gecertificeerd conform  
ISO 9001:2015.



Bioclear earth beschikt over de  
procescertificaten BRL SIKB 2000, BRL SIKB  
6000 en de onderliggende protocollen 2002 en  
6002.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk,  
fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder  
voorafgaande toestemming van Bioclear earth.

© Bioclear earth b.v.

Bioclear earth adviseert bedrijven, overheden en dienstverlenende  
organisaties op het terrein van Bodem, Water en Klimaat.

Op opdrachten aan Bioclear earth zijn van toepassing de Algemene  
Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan Bioclear earth, zoals  
gedeponeerd bij de Kamer van Koophandel te Groningen.

# Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Projectplan en besluit RVO	1
1.2	Aanleiding	2
1.2.1	Biobeton als duurzamer alternatief voor cementbeton	2
1.2.1	Stand der techniek en bestaande toepassingen	3
1.2.2	Bijdrage aan de doelstellingen van het RVO-programma	3
1.3	Doelstelling	4
1.4	Consortium haalbaarheidsonderzoek	4
1.5	Werkpakketten haalbaarheidsonderzoek	6
1.6	Wijzigingen	6
2	WP 1: Economische en commerciële haalbaarheid	7
2.1	Doelen werkpakket 1	7
2.2	Verrichte activiteiten	7
2.2.1	Verkenning vervangingspotentieel	7
2.2.2	Waardeketen Biobeton	10
2.2.3	Optimale productdimensies en markttoepassing	11
2.3	Conclusie	12
3	WP 2: Evaluatie duurzaamheid (LCA)	13
3.1	Doelen werkpakket 2	13
3.2	Achtergrondinformatie	13
3.3	Wijzigingen	14
3.4	Uitgangspunten en begrenzing LCA	14
3.5	Resultaten LCA	18
3.5.1	CO <sub>2</sub> -eq emissies	18
3.5.2	LCA resultaten	19
3.5.3	Ammoniakproductie en opschaling	20
3.5.4	Ammoniakrecycling	21
3.6	Conclusie	21
4	WP 3: Technische ontwikkeling en haalbaarheid	23
4.1	Doelen werkpakket 3	23
4.2	Achtergrondinformatie	24
4.2.1	Micro-organismen	24
4.2.2	MICP	25
4.2.3	Cementatie oplossing	27
4.3	Wijzigingen technisch onderzoek	27
4.4	Technisch onderzoek	28
4.4.1	Fasering technisch onderzoek	28
4.4.2	Parameters	28
4.4.3	Bereiden, storten en verdichten specie	28
4.4.4	Droogtemperatuur	29

4.4.5	Mengcultuur vs. monocultuur bacteriestammen	29
4.4.6	Vochtgehalte	29
4.4.7	Zandcompositie	30
4.4.8	Poedervormige toeslagmaterialen	31
4.4.9	Urease activiteit	32
4.5	Conclusie en vervolgstappen	32
5	Conclusies en aanbevelingen	34
5.1	Conclusies	34
5.2	Aanbevelingen	35

Bijlage 1 Referenties

Bijlage 2 Evaluatie duurzaamheid (WP2)

Bijlage 3 Specificatie proefstukken (WP3)

Bijlage 4 Foto's proefstukken (WP3)

Bijlage 5 Urease activiteit ontwikkeling (WP3)

Bijlage 6 Vergelijking urease activiteit versus resultaat proefstuk (WP3)

Bijlage 7 Artikel Beton- & Staalbouw, 2022-04

# 1 Inleiding

## 1.1 Projectplan en besluit RVO

Op 14 december 2021 heeft Bioclear earth, als penvoerder mede namens deelnemer Strukton Civiel Startup & Innovation Centre, het projectplan 'Haalbaarheidsstudie Biobeton' ingediend voor de regeling TSE-studies Industrie 2021. Op 19 april 2022 heeft Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) per brief met kenmerk TENS12230Y9U het besluit tot verlening subsidie genomen. Het referentienummer van dit besluit is TENS221061. De looptijd van het project, behorende bij het besluit, was van 1 april 2022 tot en met 31 maart 2023. Op 20 maart 2023 heeft RVO per brief 'Akkoord wijziging project' met kenmerk TENS1231MHHU ingestemd met wijziging (verlenging) van de projectduur tot 1 juni 2023.

Binnen deze haalbaarheidsstudie zijn drie werkpakketten uitgevoerd:

### ***WP1: Economische en commerciële haalbaarheid***

Binnen dit werkpakket is een marktonderzoek en brainstormsessie uitgevoerd om de meest geschikte technische toepassingen en markttoepassing te bepalen voor biobeton. Daarnaast is de commerciële potentie bepaald.

### ***WP2: Evaluatie duurzaamheid***

Binnen dit werkpakket is de duurzaamheid van biobeton geëvalueerd en vergeleken met conventioneel beton middels een LCA. Hierbij is, naast de CO<sub>2</sub>-footprint, ook gekeken naar andere milieu impact categorieën.

### ***WP3: Technische ontwikkeling en haalbaarheid***

Binnen dit werkpakket zijn de receptuur en het maakproces van biobeton op labschaal verbeterd en is de technische haalbaarheid geëvalueerd.

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Nationale regelingen EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

## 1.2 Aanleiding

### 1.2.1 Biobeton als duurzamer alternatief voor cementbeton

Cementbeton is een van de meest gebruikte bouwmaterialen op aarde en cement is een van de belangrijkste grondstoffen voor de productie van cementbeton (Meyer, 2009). Bij de productie van cement komt een relatief grote hoeveelheid kooldioxide (CO<sub>2</sub>) vrij. De cementproductie is goed voor ongeveer 6-8% van de wereldwijde CO<sub>2</sub>-uitstoot (Lehne & Preston, 2018) (6-8% van totale GHG emissies wereldwijd, 2,5% van de GHG emissies in NL). Daarom is het belangrijk om te zoeken naar alternatieven om deze emissies te verminderen en de klimaatimpact van cementbetonproductie te reduceren.

Tot de grootste uitstoters van CO<sub>2</sub> in Europa behoren de cementproducenten, zie onderstaande afbeelding.

**De grootste CO<sub>2</sub>-uitstoters in Europa**  
De CO<sub>2</sub>-uitstoot is in tonnen, de gratis rechten geven het percentage aan dat een bedrijf te veel kreeg (+) of wat bijgekocht moest worden. De top-honderd staat op groene.nl

	CO <sub>2</sub>	Gratis rechten
ArcelorMittal (staal)	49.939.713	-4%
Heidelberg (cement)	30.270.750	12%
LafargeHolcim (cement)	17.904.990	19%
ExxonMobil (olie)	17.354.458	-11%
ThyssenKrupp (staal)	15.411.121	27%
Total (olie)	14.941.661	-3%
Shell (olie)	14.590.446	-11%
Tata Steel Europe (staal)	13.164.836	0%
Voestalpine (staal)	12.255.822	-38%
ENI (chemie)	12.207.260	-16%

Bron: De Groene Amsterdammer, 03-06-2021, artikel "Hoe groen kan beton zijn?"

Biocementatie biedt een mogelijk alternatief en berust op Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP), een proces waarbij bacteriën calciumcarbonaat (CaCO<sub>3</sub>) rond hun cellen produceren, als een soort exoskelet. Wanneer deze bacteriën, samen met enkele chemicaliën, worden toegevoegd aan een mengsel van zand en andere mineralen, bindt de neerslag van calciumcarbonaat de korrels samen, waardoor een vast materiaal ontstaat dat op cementbeton lijkt (Konstantinou et al., 2021). Dit cementloze product heeft van ons de werknaam 'biobeton' gekregen.

Biobeton kan verder circulair gemaakt worden door er gerecyclede materiaalstromen, zoals granulaten, in te verwerken. Ook kan in biobeton nog extra CO<sub>2</sub> vastgelegd worden wanneer er biomassa in verwerkt wordt.

## 1.2.1 Stand der techniek en bestaande toepassingen

Elders in de wereld worden reeds BioBasedTiles geproduceerd met behulp van MICP, zoals door BioMason in de Verenigde Staten. Het is niet geheel duidelijk wat hiervoor het productieproces is en wat de volledige milieu-impact van het product is. Men beweert echter dat de producten drie keer sterker en 20 procent lichter zijn dan die van cementbeton, en bovendien een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot hebben dan cementbeton (StoneCycling, 2022). Andere bedrijven die biobeton of biocement produceren zijn NETICS, Fortera en Blue Planet Systems. Basilisk te Delft is producent van self healing concrete, een autonome reparatiemethode van cementbeton dat is gebaseerd op biocementatie.

De meest relevante patenten op gebied van (toepassing van) biocementatie voor de productie van biobeton-waren zijn:

- BioMason Inc: 'Production of masonry with bacteria, (US 9796626 B2, date of patent 24-10-2017).
- Murdoch university en Calcite Technology Pty Ltd: 'Microbial biocementation' (EP 1838642 B1, date of filling 20-12-2005).

## 1.2.2 Bijdrage aan de doelstellingen van het RVO-programma

De CO<sub>2</sub>-uitstoot moet worden teruggebracht om klimaatverandering een halt toe te roepen. In 2019 is het Klimaatakkoord vastgesteld met als belangrijkste doel om de CO<sub>2</sub>-uitstoot in 2030 met 49% te verminderen vergeleken met 1990. Om dit doel te behalen hebben het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat en ProRail samen de ambitie om in 2030 volledig klimaatneutraal te zijn en circulair te werken.

### **CO<sub>2</sub>-uitstoot cementbeton**

Wereldwijd is de CO<sub>2</sub>-uitstoot door betonproductie circa 6-8% van de totale GHG uitstoot. In Nederland is de bijdrage van de betonketen 2,8% (5,3MTon CO<sub>2</sub>-eq) van de nationale uitstoot. In totaal is hiervan 2,5% (4,7MTon CO<sub>2</sub>-eq) in gelijke delen afkomstig uit materiaalgebruik (2,2MTon aan CO<sub>2</sub>-eq door productie calciumoxide uit calciumcarbonaat) en energieverbruik (2,5MTon CO<sub>2</sub>-eq door gebruik aardgas benodigd voor verhitting). De overige 0,3% (0,5MTon CO<sub>2</sub>-eq) betreft transport waarop naar verwachting met biobeton niet bespaard gaat worden.

### **Vervangingspotentieel biobeton**

Bioclear earth en Strukton richten zich met biobeton op de GWW, civiele bouw en betonwaren industrie. Deze markt draagt voor circa 50% bij aan de totale betonemissies in Nederland<sup>2</sup>. Van deze markt zou 15% voor niet-constructieve toepassingen zijn. Een deel daarvan zou vervangen kunnen worden door biobeton.

### **Besparingspotentieel CO<sub>2</sub> door toepassing biobeton**

Biobeton vermindert directe emissies door geen gebruik te maken van CaO (cement) als grondstof die wordt geproduceerd uit CaCO<sub>3</sub> onder uitstoot van CO<sub>2</sub>. Hierdoor worden ook indirecte emissies verminderd doordat er geen verhoogde temperatuur nodig is voor het productieproces. Een verkennende LCA geeft aan dat biobeton de potentie heeft om de emissies van beton met circa 50% te verminderen (25-50 kg/m<sup>3</sup> biobeton met afvangen van ammoniak vs. 160 kg/m<sup>3</sup> beton als gemiddelde in de GWW en civiele sector). De grootste bijdrage aan de CO<sub>2</sub>-uitstoot van biobeton zijn het gebruikte ureum en calciumchloride.

### **Geschatte maximale bijdrage biobeton aan reductie CO<sub>2</sub>**

De maximale impact bij 25% vervangingspotentieel en 69%-84% besparing is een vermindering van 17%-21% van de uitstoot in de betonketen.

De totale besparing voor Nederland door het toepassen van biobeton wordt daarmee circa 1 Mton CO<sub>2</sub>-eq! Dat is een enorme reductie van circa 0,6% van de totale Nederlands broeikasgasemissies.

Biobeton heeft de potentie in zich om een belangrijke bijdrage te leveren aan de ingezette CO<sub>2</sub>-reductie. Deze haalbaarheidsstudie is nu een essentiële vervolgstap om aannames te valideren en voor te sorteren op een stap richting de eerste pilot projecten.

## **1.3 Doelstelling**

Het doel van de haalbaarheidsstudie is om voor biobeton zowel de technische als economische haalbaarheid in kaart te brengen en een geschikte productievorm/markttoepassing te selecteren. Hierbij wordt tevens de bijbehorende LCA geëvalueerd.

## **1.4 Consortium haalbaarheidsonderzoek**

### ***Bioclear earth***

Bioclear earth b.v. ([www.bioclearearth.nl](http://www.bioclearearth.nl)) is sinds 1988 een innovatiegericht MKB bedrijf op het gebied van milieubiotechnologie. De missie van Bioclear earth is 'Creating with the Power of Nature', het creëren van groene groei met behulp van de kracht van de natuur. In het verleden heeft Bioclear earth technieken als bioleaching en bioaugmentatie (het op grote schaal bijvoegen van op locatie gekweekte bacteriën aan de bodem voor saneringsdoeleinden) praktijkrijp gemaakt en als eerste succesvol op grote schaal toe weten te passen. Een belangrijk onderdeel van Bioclear earth is innovatie en technologieontwikkeling. Bioclear earth werkt aan nieuwe technieken om de energietransitie en de productie van groene grondstoffen uit biomassa reststromen mede mogelijk te maken. Dit doet Bioclear earth via het uitvoeren van toegepast onderzoek & ontwikkeling op lab-, pilot- en demonstratieschaal. Een belangrijk punt in deze trajecten is om het juiste waardemodel voor de klant te vinden. We besteden met ketenpartijen uitgebreid aandacht aan nieuwe concepten met als doel om kloppende product-marktcombinaties te vinden zodat de technieken naast hun duurzame karakter (planet) ook economisch (profit) en maatschappelijk (people) geaccepteerd zullen worden.



In ontwikkelconsortia vervult Bioclear earth vanuit haar initiërende en realiserende aanpak vaak een voortrekkersrol. De ambitie van Bioclear earth is om samen met partners marktrijpe technieken verder te brengen en uit te rollen om een zo groot mogelijke duurzame impact te hebben.

De ambitie van Bioclear earth is om het Biobeton proces via het doen van toegepast onderzoek samen met ketenpartijen door te ontwikkelen naar een marktrijpe techniek. Cementloos Biobeton is in 2018 door Bioclear earth gescout als veelbelovend alternatief voor conventioneel cementbeton gevolgd door een proof-of-principle in 2019 gegeven in het wetenschappelijke domein. Bioclear earth heeft de afgelopen 2 jaar gebruikt om een technologieconcept te definiëren en om ervaring op te doen met de productie van Biobeton.

In dit project vervult Bioclear earth de voortrekkersrol. Bioclear earth is aanvrager, penvoerder en coördinator en zal in alle werkpakketten activiteiten vervullen. Bioclear earth heeft kennis over microbiologie, biotechnologie, en procesontwikkeling en ketenontwikkeling en heeft een laboratorium voor het testen op labschaal.

### **Strukton Civiel Startup & Innovation centre**

De Strukton Groep (100 jaar) bestaat uit Strukton Rail, Strukton Civiel en de portfoliobedrijven. Strukton Civiel is een aannemer in de civiele en rail infrastructuur. Onder de portfoliobedrijven zijn een groot aantal productbedrijven actief. Dit zijn producenten die aan de gehele markt leveren. Een aantal hiervan zijn actief in de markt van beton, als leverancier van prefab beton (Strukton Prefab Beton), maar ook als leverancier van grondstoffen (GBN).

De ambitie van Strukton is om met innovaties en slimme oplossingen in de markt actief te zijn. Strukton Civiel heeft daarom een Startup & Innovation centre met als doel om innovaties die binnen het bedrijf (of in samenwerking) worden ontwikkeld op de markt te kunnen brengen.

Enkele succesvolle innovaties die door Strukton Civiel in de markt zijn geïntroduceerd zijn Greenfalt (asfalt dat bestaat uit een combinatie van hergebruikt asfalt en gerecycled ballastmateriaal in alle lagen van de constructie), Circuton (sloopbeton kan met de mobiele betonrecyclingsfabriek Circuton direct op locatie worden gerecycled en is direct in nieuw beton toepasbaar) en SolaRoad (zonnepanelen in het wegdek).

Strukton heeft al jaren als motto 'Samen denken in levensduur, voor projecten, mens en natuur'. Binnen alle bedrijfsonderdelen vindt verduurzaming plaats door uitstoot terug te dringen (CO<sub>2</sub>-reductie), goed te zorgen voor elkaar en onze zakelijke partners, duurzaam te innoveren en kringlopen van grondstoffen proberen te sluiten (circulair). Vanwege de opgave om de CO<sub>2</sub>-uitstoot te reduceren zijn we gaan kijken of we het aandeel CO<sub>2</sub> uit cement kunnen reduceren. Hieruit is de samenwerking met Bioclear earth ontstaan.

Strukton Civiel Startup & Innovation centre is in dit project een co-developer met technische kennis over beton (betontechnologie), kennis over het produceren van beton voor de markt én ook de kennis van deze betonmarkt.

## 1.5 Werkpakketten haalbaarheidsonderzoek

### *Werkpakket 1: Economische en commerciële haalbaarheid*

Binnen dit werkpakket is een marktonderzoek uitgevoerd om de meest geschikte productdimensies en markttoepassing te bepalen voor Biobeton. Daarnaast wordt de commerciële potentie bepaald waarbij o.a. de waardeketen wordt geïnventariseerd.

### *Werkpakket 2: Duurzaamheid*

Binnen dit werkpakket wordt de duurzaamheid van Biobeton geëvalueerd en vergeleken met conventioneel beton middels een LCA. Hierbij wordt naast de CO<sub>2</sub>-footprint ook de overige impact op het milieu in kaart gebracht.

### *Werkpakket 3: Technische ontwikkeling en haalbaarheid*

Binnen dit werkpakket wordt het receptuur voor de productie van Biobeton en het productieproces geoptimaliseerd en wordt de uiteindelijke technische haalbaarheid geëvalueerd.

## 1.6 Wijzigingen

Gedurende het haalbaarheidsonderzoek hebben er binnen de werkpakketten wijzigingen plaatsgevonden. Deze wijzigingen waren het gevolg van voortschrijdend inzicht en nieuwe onderzoeksresultaten.

## 2 WP 1: Economische en commerciële haalbaarheid

### 2.1 Doelen werkpakket 1

Binnen dit werkpakket is een marktonderzoek uitgevoerd om de meest geschikte productdimensies en markttoepassing te bepalen voor Biobeton. Hierbij worden voor een verscheidenheid aan praktijktoepassingen voor conventioneel non-constructief beton de vereiste producteigenschappen (met name druksterkte) vergeleken met de producteigenschappen van Biobeton. Daarnaast is het maximale vervangingspotentiaal in kaart gebracht.

Om de commerciële potentie te bepalen wordt de waardeketen uitgewerkt voor Biobeton. Hierbij zijn potentiële opdrachtgevers geïnterviewd en is bij hen de interesse voor Biobeton gepeild. Ook worden concurrentie kansen van andere CO<sub>2</sub>-besparende technieken geëvalueerd om een volledig beeld van de commerciële kansen te krijgen.

Het resultaat van het werkpakket is een waardeketen, stakeholders, techno-economische haalbaarheid en maximaal CO<sub>2</sub>-besparingspotentieel. Daarnaast zijn de optimale productdimensies en markttoepassing bepaald op basis van producteigenschappen aan de hand van marktonderzoek.

### 2.2 Verrichte activiteiten

#### 2.2.1 Verkenning vervangingspotentieel

##### *Omvang beton- en cementmarkt Nederland*

Beton is een veelgebruikt bouw materiaal in Nederland en de rest van de wereld. Beton bestaat grofweg uit zand, grind en cement. Met Biobeton bieden wij een alternatief voor cementgebonden beton dus richt ons onderzoek zich op deze markt. Wij maken hierbij onderscheid tussen de constructieve betonmarkt (beton met wapening vanaf sterkteklasse C20/25) en de non-constructieve betonmarkt.

Jaarlijks wordt er ca. 35 miljoen ton beton (goed voor 5 miljoen ton cement) gebruikt in Nederland<sup>1</sup>. Deze 35 miljoen ton vertegenwoordigt een waarde van ca. 4 miljard Euro, wat neerkomt op een gemiddelde prijs van ca. 100 EUR/ ton beton.

Het overgrote deel van het in Nederland gebruikte cement wordt verwerkt in beton. Bij een langjarig gemiddeld cementverbruik van circa 5 miljoen ton per jaar wordt jaarlijks in totaal 13 à 14 miljoen m<sup>3</sup> beton geproduceerd. De rest van het cement wordt gebruikt voor metselmortels, vloerspecies, zandcementstabilisaties en dergelijke.

Het Betonhuis heeft het cementverbruik in Nederland inzichtelijk gemaakt<sup>1</sup>. Zie onderstaande tabel met een verdeling per m<sup>3</sup> per sector op jaarbasis.

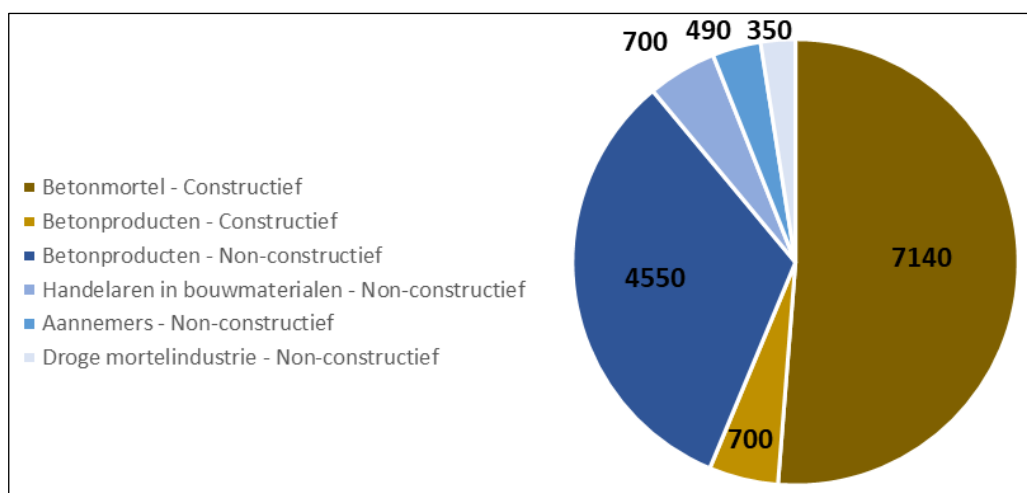
**Tabel 1. Verdeling per m3 (1.000 liter) naar producenten, sectoren en toepassingen (2020)**

Productleverancier	liter totaal	liter per sector	sector
Betonmortel	510	200	Woningbouw
		150	Utiliteitsbouw
		35	Agrarische bouw
		95	Grond- Weg en Waterbouw
		30	Overig
Betonproducten	375	140	Elementen voor woning- en utiliteitsbouw
		150	Straatstenen, tegels en metselstenen
		50	Heipalen
		35	Rioleringen en overige toepassingen
Handelaren in bouwmaterialen	50	50	Voor bouwaannemers en doe-het-zelvers
Aannemers	35	35	Voor GWW-aannemers voor onder meer betonwegen, busbanen, fietspaden
Droge mortelindustrie	25	25	Voor metsel- en vloerspecies

De betonmortelindustrie produceert hoofdzakelijk voor de constructieve betonmarkt (in het werk gestorte fundaties, vloeren, bruggen, viaducten en kademuren). M.u.v. van de heipalen categoriseren wij 'betonproducten' onder non-constructief beton. De overige drie productleveranciers categoriseren wij onder non-constructief beton. De categorisering resulteert in onderstaand cirkeldiagram. De jaarlijkse omvang van de non-constructief betonmarkt is dus circa 6 miljoen m<sup>3</sup>.

Voor het vervangingspotentieel gaan we in beginsel voor Biobeton uit van 5% van de non-constructieve betonmarkt wat neerkomt op 300.000 m<sup>3</sup>. Uitgaande van een betonprijs van 100 euro/ton wordt het vervangingspotentieel voor Biobeton 30 miljoen euro.

<sup>1</sup> Betonhuis – Betonmarkt in Nederland - <https://betonhuis.nl/cement/betonmarkt-nederland>



**Figuur 1. Jaarlijks aantal liters (x1.000) betonverbruik Nederland constructief en non-constructief**

#### *Productiekosten en verduurzaming bouwsector*

In 2021 is door de overheid een CO<sub>2</sub>-heffing ingevoerd voor ETS (Emissions Trading System) bedrijven. Concreet houdt dit in dat bedrijven die CO<sub>2</sub>-emissie uitstoten daarvoor een heffing moeten betalen. Deze heffing zal ook van toepassing zijn op de cement producerende bedrijven. In 2021 bedroeg deze heffing EUR 10,57 per ton. De verwachting is dat de hoogte van de heffing substantieel stijgt in de komende jaren, waardoor de prijs van cementgebonden beton verder zal gaan stijgen. Dit biedt kansen voor de productiekosten van Biobeton die hiermee niet lager hoeven te liggen dan cementgebonden beton.

Daarnaast is er een ontwikkeling ingezet in de bouwwereld waarbij aannemers beloofd worden om klimaat neutrale en circulaire producten toe te passen. De systematiek die hiervoor gehanteerd wordt is de Milieu Kosten Indicator (MKI). Met het toepassen van cementgebonden beton (hoe meer Portland cement hoe hoger de MKI-waarde) wordt het lastiger om projecten aan te nemen. Daarnaast zijn er zelfs plannen om het verduurzamen van beton verplicht te stellen in aanbestedingen vanaf 2023<sup>2</sup>. Dit biedt kansen voor Biobeton.

#### *Toepassing in een conservatieve bouwsector*

De bouwwereld, en de betonwereld in het bijzonder, hebben een conservatief karakter. Er gelden strenge voorschriften op het gebied van wet- en regelgeving (aanbestedingswet) en normeringen. De klant is gebonden aan de wetgeving en kan hierdoor niet vrij kiezen voor een product. Ook is voor de innovatieve/circulaire producten niet bewezen dat zij voldoen aan productnormeringen en de klant moet dan bereid zijn om hiervoor risico te willen lopen. Vanwege dit karakter heeft de sector moeite met de introductie en acceptatie van innovaties zoals Biobeton. Hier zal rekening mee moeten worden gehouden in de lancering en positionering van Biobeton.

<sup>2</sup> BETONAKKOORD voor DUURZAME GROEI - <https://www.betonakkoord.nl/het-betonakkoord-nieuwe-layout/>

### Soortgelijke toepassingen bacteriën i.r.t. beton

Er zijn binnen de bouwsector meerder partijen actief in de ontwikkeling van een product (beton) met bacteriën. Dit gaat om:

1. Basilisk – Zelfhelend beton – Delft, Nederland (<https://basiliskconcrete.com/>)  
Product ontwikkeld voor het herstellen van beton (scheuren tot 0,8 mm). Het is een zelfhelend product gebaseerd op micro-organismen die kalksteen produceren.
2. Biomason – decoratietegels – US – (<https://biomason.com/>)  
Hoogwaardige toepassing van biobeton in gevelbekleding (binnen-en buitengevels). Zij hebben een patent voor “Production of masonry with bacteria” (toepassing) in de VS. In Europa via Stonecycling waarvan de productie plaatsvindt in Amsterdam. Het basis patent is in handen van Murdoch University: Microbial biocementation. Het is een bewijs dat het (biocementatie) concept werkt en het dus mogelijk is om beton te maken o.b.v. bacteriën en er zijn investeringen vanuit de markt.

### Vergelijking praktijktoepassingen en Biobeton

Vanuit de verkenning van de markt en de resultaten in werkpakket 3 voor de ontwikkeling van Biobeton, komt sterk naar voren dat wij ons focussen op non-constructieve betonproducten. Hierbij gaat het om producten zoals trottoirtegels en halfverharding.

Product	Druksterkte
Trottoirtegel	C20/25
Halfverharding	C12/15
Gevelbekleding	C12/15
<b>Biobeton</b>	<C12/15 (C3)

## 2.2.2 Waardeketen Biobeton

Gedurende de looptijd van het onderzoekstraject zijn er gesprekken geweest met diverse stakeholders. Hieronder een opsomming met de belangrijkste uitkomsten:

### Betonproducten producent

- **Hibex.** Producent prefab betonelementen voor de bouw. Geen standaard product, maar variaties in vorm en kleur. Ze doen veel onderzoek in eigen betonlab en staan ervoor open om mee te denken/proeven doen op kleine schaal bij verder onderzoek Biobeton.
- **MBI.** Producent en leverancier van gevelstenen, betonstenen, trottoirbanden, tegels en bestratingsmaterialen. Sterk in het tuinsegment. MBI heeft 4 fabrieken, jaaromzet van 175M EUR. Het voordeel van de betonwarenindustrie is dat er minder rekenregels van toepassing zijn (niet-constructief beton). De vorst/dooi impact is wel van belang (product moet heel blijven). Er werd wel duidelijk aangegeven dat het bij nieuwe ontwikkelingen van belang is dat zij passen binnen de bestaande productieprocessen, waar snelheid en volume centraal staat. Mogelijkheden voor Biobeton als grondstabilisatiemiddel. Dit is een grote markt, ook in het tuinsegment.

- **Strukton Prefab.** De druk op de bouwwereld om te vergroenen wordt groter. Cement is een van de grotere CO<sub>2</sub> veroorzakers. De MKI, Milieu Kosten Indicator, wordt steeds belangrijker. Wanneer we kunnen aantonen dat we met biobeton een druksterkte van C20/25 kunnen halen zijn er veel mogelijkheden. We komen dan ook in de gelegenheid om met gespecialiseerde partijen productiefaciliteiten te ontwikkelen. De markt haakt dan aan en diverse marktsegmenten zullen in actie komen. Prijstechnisch is er ook een voordeel te behalen.

#### *Aannemer en architect*

- **Heavy Duty Pavement (HDP).** Gespecialiseerd in toepassingen grondverbetering- en stabilisatie (insitu) door middel van cementgebonden product en additief. Biobeton zou best een oplossing kunnen zijn, mits de draagkracht van de grond voldoende is, en dat het logistiek gezien werkt. Kun je het bv ook makkelijk weghalen? En blijft het ook sterk bij veel regen?
- **Frisbouw en Onix NL architecten.** Biobeton zou een optie kunnen zijn voor niet dragende onderdelen en wellicht als vloer.
- **Vloerverwarming Nederland.** Op zoek naar een duurzaam alternatief voor non-constructief schuim-beton. Markt vraagt er momenteel nog niet om maar er is een verandering waarneembaar. Prijzen cement worden ook steeds hoger.

#### *Consultant*

- **Nieuwton.** Bedrijf opgericht om te innoveren. Veel ervaring in betonindustrie. Er is interesse voor deelname aan ontwikkeling Biobeton.

#### *Onderzoeksinstituut*

- **TNO.** Neemt deel in verschillende onderzoekstrajecten voor circulair en duurzaam beton. Een voorbeeld is cementvervanging door bindmiddel uit aardappelschillen. Aardappelschil is de grootste biomassa-stroom in NL. In 2024 starten de eerste proeven. Universiteit Wageningen is aangesloten. In dit onderzoek wordt circulair zand en grind meegenomen als toeslagmateriaal. Er lopen geen onderzoeken in relatie tot bacteriën als cementvervanger. TNO komt dit ook nog niet veel tegen in de markt. In het buitenland schijnen er ook partijen bezig te zijn met bacteriën in beton. Basilisk heeft in NL een soortgelijk idee vanuit een andere toepassing.

#### *Waardeketen Biobeton*

Er is nog geen waardeketen op te stellen voor Biobeton omdat we in de ontwikkeling van het product (werkpakket 3) niet de verwachte eigenschappen hebben behaald. Wij hebben daarom vooral gekeken naar de technische/commerciële haalbaarheid van een nieuw product.

## 2.2.3 Optimale productdimensies en markttoepassing

De optimale productdimensies zijn nog niet vastgesteld. In WP 3 (Hs 4) is gewerkt aan de samenstelling en sterkte van biobeton. Op dit moment voldoet de sterkte voor de meeste toepassingen nog niet, behalve voor schuimbeton. Op basis van de producteigenschappen en door de productietechniek van het druppelen is het beste om ons op 'platte' producten te richten.

Dit gaat om de volgende markttoepassingen:

- Halfverharding / grondstabilisatie.
- Substituut voor Kalkzandsteenblokken.
- Trottoirtegels /bestratingsmateriaal.
- Trottoirbanden.
- Vloeren (schuimbeton).
- Gevelelementen / metselwerk.
- Voetpaden / fietspaden.

Daarnaast lijkt isolerend schuimbeton mogelijkheden te bieden aangezien dit slechts een lagedruksterkte vereist. Schuimbeton wordt o.a. gebruikt in het kader van isolatiemaatregelen van oudere woningen, waarbij na het verwijderen van de houten vloeren de onder liggende kruipruimtes vol te storten met een isolerende laag schuimbeton (400 kg/m<sup>3</sup>) waarop vloerverwarming kan worden gelegd, die kan worden aangesloten op een warmtepomp.

## 2.3 Conclusie

De stip aan de horizon is om een circulair en CO<sub>2</sub>-neutraal constructief beton te ontwikkelen, die in het werk gestort (in-situ) kan worden. In eerste instantie ligt de focus op laagwaardige toepassingen (niet constructief beton met lage druksterkte), die gekenmerkt worden door lagere tot geen normeringseisen. Een marktsegment die wij bijvoorbeeld kansrijk achten voor de introductie van Biobeton, is de betonwarenindustrie (bv tuinartikelen, tegels, trottoirbanden). De Betonwaren markt heeft wel te maken met zeer kleine marges en is gericht op massa dus moet er eerst vervolgonderzoek plaatsvinden. Het richten op meer hoogwaardige toepassingen (bijvoorbeeld samen met architecten) achten wij daarom ook kansrijk.

De meest kansrijke toepassing tot nu toe is schuimbeton vanwege de lage benodigde druksterkte.



## 3 WP 2: Evaluatie duurzaamheid (LCA)

### 3.1 Doelen werkpakket 2

De focus van dit werkpakket is de evaluatie en vergelijking van biobeton met conventioneel beton op het gebied van duurzaamheid met behulp van een LCA (Life Cycle Analysis).

Naast de CO<sub>2</sub>-footprint van biobeton worden ook andere milieueffecten bekeken, zoals de resulterende CO<sub>2</sub> en NH<sub>3</sub> footprint wanneer ureum wordt gebruikt. De beschikbaarheid van alternatieve, duurzamere bronnen voor de benodigde substraten zoals calcium en ureum zal ook in meer detail worden onderzocht.

De LCA is aangepast aan het huidige productieproces, gevalideerd en toegepast op ten minste drie scenario's:

1. Prefab Biobeton.
2. Biobeton toegepast op/in de bodem.
3. Alternatieve biocementatie routes.

De uitkomsten van de uitgevoerde LCA's worden vergeleken met een LCA voor conventioneel (non-constructief) beton. Hierbij zal tevens de verwachte verduurzaming binnen de conventionele betonsector (binnen 5 en 10 jaar) in acht worden genomen en worden afgezet tegen de LCA resultaten voor de verschillende Biobeton scenario's. Uitkomsten van de LCA's kunnen tevens als input dienen voor verdere optimalisatie van het receptuur of het productieproces voor Biobeton.

Het resultaat is een berekening van de maximale bijdrage aan de CO<sub>2</sub>-eq besparing in Nederland, bepaald op basis van het maximale vervangingspotentieel van Biobeton (zie WP1) en de resultaten uit de LCA's. Daarnaast worden uitkomsten uit de LCA als input gebruikt om de receptuur of het productieproces verder te optimaliseren qua duurzaamheid.

### 3.2 Achtergrondinformatie

Zoals reeds beschreven is het doel van dit hoofdstuk om een model te maken dat de duurzaamheid van biobeton analyseert, waarbij variabelen kunnen worden veranderd om te beoordelen of het mogelijk is om biobeton te produceren dat duurzamer is dan conventioneel beton. Dit is gedaan door middel van een life cycle assessment (LCA). Een LCA is een instrument dat kan worden gebruikt voor de milieubeoordeling van een product en het analyseert de duurzaamheid van de volledige levenscyclus (Europese Commissie, 2010). Het proces om biobeton te maken produceert voornamelijk koolstofdioxide en ammoniak (F. Røyne, 2017). Daarom werd de duurzaamheid voornamelijk beoordeeld door te kijken naar de CO<sub>2</sub>-equivalent (CO<sub>2</sub>-eq) emissies en het eutrofiëringspotentieel (EP).

### 3.3 Wijzigingen

Tijdens de uitvoering van dit werkpakket werden enkele wijzigingen aangebracht in het oorspronkelijke plan. In de LCA-analyse lag de nadruk op het scenario Prefab Biobeton. Twee verschillende componenten werden beoordeeld op hun duurzaamheid. Bodemaangepast biobeton en alternatieve biocement routes konden daarom niet worden beschouwd.

Naast de CO<sub>2</sub>-emissies werd ook het ammoniakemissieprobleem gekwantificeerd en beoordeeld. In plaats van te kijken naar alternatieven voor de benodigde substraten, werden maatregelen geanalyseerd die de geproduceerde ammoniak konden recycleren.

### 3.4 Uitgangspunten en begrenzing LCA

In dit werkpakket wordt een LCA uitgevoerd om de duurzaamheid van biobeton te analyseren. De nadruk zal liggen op de CO<sub>2</sub>-eq emissies en het eutrofiëringspotentieel, maar alle LCA impactcategorieën worden berekend. Deze studie voert de analyse uit voor prefab biobetonblokken, opgeschaald tot 1 m<sup>3</sup> zodat het vergeleken kan worden met conventioneel beton. Dit wordt de functionele eenheid van dit onderzoek.

De LCA is gebaseerd op een cradle-to-gate grens. Deze beslissing is genomen omdat het biobeton alleen in het laboratorium is geproduceerd en het product nog niet in de echte wereld is toegepast. Daarom zijn de gebruiksfase en de afvalfase niet bestudeerd. Wel wordt een hypothetische recyclingstap voor de ammoniakemissie besproken. De analyse omvat de milieu-impact van de inputs van biobeton en de outputs van het MICP-proces. De energiebehoeften voor het laboratorium, inclusief de verwarming, het licht en de gebruikte machines, worden niet meegenomen in deze LCA.

Om de duurzaamheid van biobeton te beoordelen, werd de EcoInvent 3.8 database in het programma SimaPro 9.4 gebruikt. De ingrediënten voor het biobeton zijn vastgesteld in het laboratorium van Bioclear earth. Deze ingrediënten zijn geselecteerd in SimaPro en voor elk ingrediënt is het gewicht ingesteld op één kg. Vervolgens werd om het global warming potential (GWP) te bepalen de berekeningsmethode "Single Issue IPCC 2021 GWP100" geselecteerd.

Tabel 1 toont de waarden voor het GWP, gemeten in CO<sub>2</sub>-eq/kg, die uit SimaPro werden gehaald.

**Tabel 1. Het global warming potential (GWP) voor één kg van elk biobeton -ingrediënt, overgenomen uit SimaPro 9.4, EcoInvent database 3.8. Merk op dat voor elektriciteit het GWP wordt weergegeven als CO<sub>2</sub>-eq/kWh in plaats van CO<sub>2</sub>-eq/kg.**

Product/process	Product/process name in SimaPro 9.4, EcoInvent database 3.8	GWP (CO <sub>2</sub> -eq/kg)
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	Calcium chloride {RER}  soda production, solvay process   APOS, S	0.443
<b>Urea</b>	Urea {RER}  market for urea   APOS, S	1.17
<b>HCl</b>	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RER}  market for   APOS, S	0.51
<b>Sand</b>	Sand {RoW}  market for sand   APOS, S	0.0112
<b>Gravel</b>	Gravel, round {RoW}  market for gravel, round   APOS, S	0.0108
<b>Limestone powder</b>	Limestone, crushed, washed {RoW}  market for limestone, crushed, washed   APOS, S	0.0053
<b>Silica sand</b>	Silica sand {GLO}  market for   APOS, S	0.0395
<b>Soy peptone</b>	Soybean {RoW}  market for soybean   APOS, S	0.169
<b>Fodder yeast</b>	Protein feed, 100% crude {GLO}  fodder yeast to generic market for protein feed   APOS, S	0.483
<b>Electricity (1 kWh)</b>	Electricity, medium voltage {NL}  market for   APOS, S	0.514

Voor elektriciteit worden de emissies weergegeven als CO<sub>2</sub>-eq/kWh. Deze waarden werden vervolgens geëxporteerd naar Excel om de verschillende samenstellingen van biobeton te berekenen. Daarnaast werd de "Global ReCiPe 2016 Midpoint (H)" berekeningsmethode geselecteerd om de milieu-impact te vinden voor elke LCA impactcategorie. In dit geval werd de gewichtsinput van een specifieke samenstelling gekozen in plaats van één kg.

In SimaPro is het vaak mogelijk om meerdere verschillende productiemethoden te selecteren voor elke input. Calciumchloride (CaCl<sub>2</sub>) wordt gewoonlijk geproduceerd als een bijproduct van het solvayproces (Røyne et al., 2019), en daarom is ervoor gekozen om CaCl<sub>2</sub>-productie via het solvayproces te selecteren in SimaPro. Voor verschillende van de inputs is gekozen voor het "markt"-proces, omdat dit een gemiddelde bevat voor het benodigde transport in een bepaalde regio. Als benadering voor kalksteenpoeder werd "Kalksteen, gebroken, gewassen" gekozen. Voor pepton en voedergist, die nodig zijn als input voor de bacteriecultuur, werden "Soja" en "Eiwitvoer, 100% ruw" geselecteerd als de dichtstbijzijnde benadering.

In de biobetontegel worden verschillende fracties zand en grind gebruikt. Aangezien deze fracties niet beschikbaar zijn in SimaPro, werd aangenomen dat ze allemaal hetzelfde proces zijn.

### Biobeton compositie

De eerste samenstelling, samenstelling A, is gemaakt met de injectiemethode. De inputs staan vermeld als samenstelling A in Tabel 2. De tweede samenstelling is die van een recenter geproduceerde biobetontegel, waarbij de premixmethode werd toegepast. Deze wordt in Tabel 2 weergegeven als Samenstelling B. Het wordt beschouwd als de meest "optimale" samenstelling die tot nu toe is uitgetoet.

Tabel 2. De ingrediëntinput (kg/m<sup>3</sup>) voor samenstelling A en B.

Product/proces	Input (kg/m <sup>3</sup> )	
	Compositie A	Compositie B
CaCl <sub>2</sub>	250	26.1
Ureum	73.6	10.7
HCl	17.7	0
Zand	975	1068.4
Gravel	975	0
Kalksteenpoeder	0	0
Silica zand	0	177.8
Sojaboon	8	8
Gist	5	5
Elektriciteit (1 kWh)	15	15

Voor beide samenstellingen werd aangenomen dat de ingrediënten en de energie die nodig zijn voor het kweken van bacteriën gelijk blijven. Kalksteenpoeder werd in geen van de onderzochte samenstellingen gebruikt, maar omdat het in het verleden is gebruikt, is het toch meegenomen in deze analyse.

### Ammoniakrecycling

Ammoniak kan worden gebruikt als meststof en het zou dus mogelijk kunnen zijn om het op te vangen en te transporteren naar een fabriek die meststoffen produceert. Dit kan via een luchtwasser, die 99% van de ammoniak kan opvangen (Emis Vito, 2020). Dit betekent dat ammoniak niet vrijkomt in de natuur en de schadelijke ammoniakemissie, in ieder geval gedeeltelijk wordt vermeden als onderdeel van de productie van biobeton. Bovendien kan een deel van de CO<sub>2</sub>-eq emissies van ureum dan worden toegewezen aan de productie van kunstmest. In de LCA werden de ammoniakemissies van het MICP-proces handmatig toegevoegd aan de categorie 'eutrofiëring van zoet water' door ze om te rekenen naar PO<sub>4</sub>-eq (fosfaatequivalent). De conversiefactor werd overgenomen van (Environdec, 2022).

### Vergelijking met conventioneel beton

Nadat de analyse is afgerond, is een vergelijking gemaakt met bestaand conventioneel beton. Strukton heeft LCA's geleverd van meerdere betontypen, waarvan er drie worden gebruikt in deze vergelijking. Deze boomtypes zijn een 'standaard' betontype, het meest gebruikte betontype, een 'groen' beton met een lagere cementinput en een betontype met een lage druksterkte. Dit beton heeft een druksterkte tussen 12-15 megapascal (MPa). In een studie van Bioclear earth was de maximale druksterkte die werd gevonden voor biobeton 1,39 MPa.

De LCA's van conventioneel beton worden geleverd als een MKI (Milieu Kosten Indicator), wat vergelijkbaar is met een LCA, maar het vermeldt ook de totale kosten van de veroorzaakte milieuschade, in euro's (€). Het idee was om het biobeton om te zetten naar een MKI, om een goede vergelijking mogelijk te maken. Bovendien hebben de MKI's van Strukton een cradle-to-grave systeemgrens, dus moesten ze worden aangepast om ze vergelijkbaar te maken met de cradle-to-gate grenzen van de LCA van biobeton. Dit is gedaan door de fasen A1 tot en met A3 van de MKI te selecteren, die overeenkomen met de input van grondstoffen en het productieproces. Dit betekent dat de gebruiksfase en de recyclage-/afvalfasen buiten beschouwing worden gelaten. De MKI's zijn door Strukton gemaakt met behulp van de Nationale Milieu Database (NMD, 2023).

Onlangs zijn de LCA-standaarden in Europa herzien en zijn nieuwe impactcategorieën toegevoegd (Ecochain, 2021). Terwijl de huidige studie gebruik maakt van de nieuwste bijgewerkte LCA-standaarden, gebruiken de MKI's van Strukton een oudere LCA-standaard. Dit komt volgens Ecochain omdat de MKI's nog niet bijgewerkt kunnen worden naar de nieuwste versie. Het is daarom moeilijk om de nieuwe LCA te vergelijken met een oudere LCA, omdat veel impactcategorieën anders zijn. Het is echter wel mogelijk om de CO<sub>2</sub>-eq waarden te vergelijken.

Om de andere impactcategorieën te kunnen vergelijken, is besloten om het conventionele beton te berekenen in SimaPro, met behulp van de nieuwste LCA-standaarden. Vanwege de beperkingen van de SimaPro database is ervoor gekozen om alleen de cementeringsstap van biobeton en conventioneel beton te vergelijken. Voor biobeton omvat dit de bacteriën en de chemicaliën die nodig zijn voor het MICP-proces. Voor conventioneel beton omvat dit alleen het cement. De GWP per kg cement is te zien in Tabel 3.

**Tabel 3. Het global warming potential (GWP) voor één kg hoogovencement 'CEM III/B', overgenomen uit SimaPro 9.4, Ecolnvent database 3.8.**

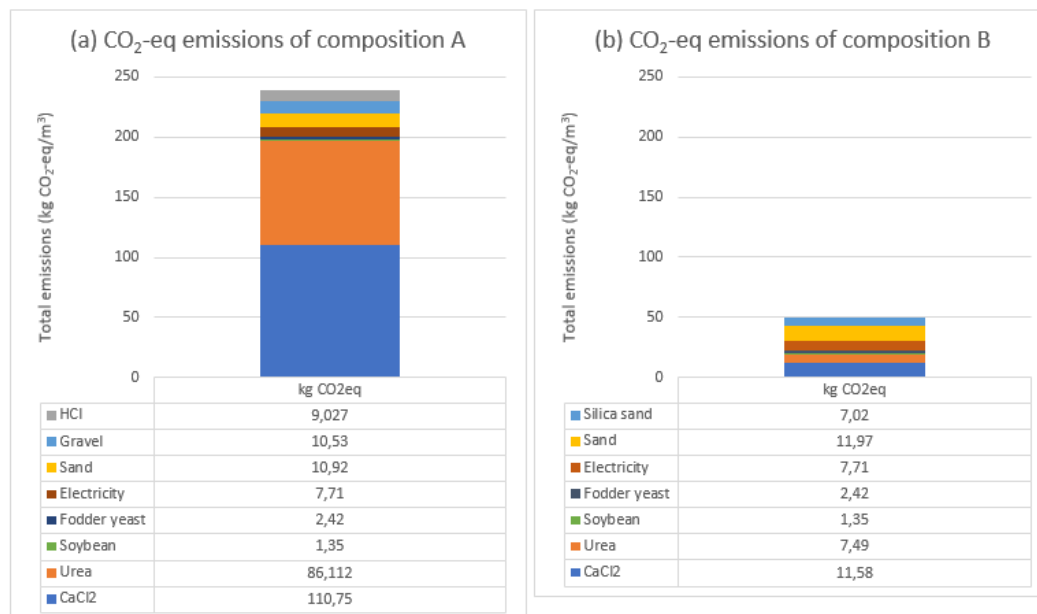
Product/process	Product/process name in SimaPro 9.4, Ecolnvent database 3.8	GWP per kg product (CO <sub>2</sub> -eq/kg)
<b>Blast furnace cement 'CEM III/B'</b>	Cement, blast furnace slag 66-80% {Europe without Switzerland}  cement production, blast furnace slag 66-80%   APOS, S	0.357

Voor deze vergelijking is gekozen voor beton met een lage sterkte, omdat dit een toepassing heeft die het dichtst in de buurt komt van biobeton. Er is gekozen voor een totaal van 290 kg voor CEM III/B als input, omdat dit de hoeveelheid is die volgens Strukton in één kubieke meter 'lage druksterkte' beton wordt gestopt.

## 3.5 Resultaten LCA

### 3.5.1 CO<sub>2</sub>-eq emissies

Figuur 1 toont de totale CO<sub>2</sub>-eq emissies voor biobeton tegels met samenstelling A en samenstelling B. Voor samenstelling A werd de injectiemethode gebruikt, terwijl voor samenstelling B de premixmethode werd gebruikt.



Figuur 1. De totale CO<sub>2</sub>-eq emissies (kg) per m<sup>3</sup> voor de samenstellingen A en B.

Figuur 1 laat zien dat de totale uitstoot voor samenstelling A 238,8 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup> is, terwijl samenstelling B een totale CO<sub>2</sub>-eq van 54,5 kg/m<sup>3</sup> heeft. Hieruit blijkt dat de nieuwe samenstelling de CO<sub>2</sub>-eq-uitstoot met meer dan vier keer heeft verminderd. Dit kan voornamelijk worden toegeschreven aan het feit dat de nieuwe productiemethode veel minder calciumchloride en ureum vereist. De premix methode is minder verspillend met zijn inputs en is efficiënter in het omzetten van calcium en ureum in calciumcarbonaat. In samenstelling A zijn calciumchloride en ureum verantwoordelijk voor het grootste deel van de CO<sub>2</sub>-eq emissies, terwijl zand, grind en zoutzuur (HCl) de andere grootste bijdragen leveren. Calciumchloride en ureum vertegenwoordigen in totaal 82% van de totale CO<sub>2</sub>-eq. emissies. Samenstelling B heeft een relatief gelijkmatige verdeling van de emissies over de verschillende inputs.

Dit betekent dat optimalisaties kunnen worden toegepast in elk deel van deze samenstelling, en dat ze een relatief groot effect zouden hebben op de totale emissies. De soja en gist die nodig zijn voor de groei van de bacteriën hebben een relatief kleine invloed op de totale CO<sub>2</sub>-eq emissies.

Figuur 1 en Figuur 2 in de Bijlage 2 tonen het SimaPro stroomdiagram met de relatieve bijdragen van de inputs.

### 3.5.2 LCA resultaten

Tabel 4 geeft de totale LCA-resultaten voor een kubieke meter biobeton, evenals biobeton met de inputs voor alleen cementering, en als laatste het conventionele cement van het type 'CEM III/B'.

**Tabel 4. Cradle-to-gate life cycle analysis (LCA) gegevens voor één kubieke meter van (a): biobeton met samenstelling B, (b): biobeton met alleen cementeringsinputs, en (c): conventioneel cement 'CEM III/B'.**

Impact category	Unit	(a) Total biobeton	(b) biobeton - only cementation	(c) Total conventional cement
Global warming	kg CO <sub>2</sub> eq	54.52	35.60	108.61
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.00	0.00	0.00
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	0.35	0.22	0.51
Ozone formation, Human health	kg NO <sub>x</sub> eq	0.22	0.09	0.22
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0.12	0.08	0.11
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO <sub>x</sub> eq	0.22	0.10	0.22
Terrestrial acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.34	0.24	0.26
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.29	0.28	0.01
Marine eutrophication	kg N eq	0.02	0.02	0.00
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	434.60	265.77	426.34
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.21	0.18	0.16
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.42	0.28	0.45
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	1.06	0.76	1.86
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	12.40	7.86	26.98
Land use	m <sup>2</sup> a crop eq	57.22	49.88	2.33
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0.30	0.24	1.39
Fossil resource scarcity	kg oil eq	20.70	14.79	14.60
Water consumption	m <sup>3</sup>	3.05	1.81	0.67

Er kan worden vastgesteld dat het conventionele cement in bijna elke categorie hoger scoort dan de LCA-resultaten van biobeton met alleen cementering. De belangrijkste uitschieters zijn zoetwatereutrofiëring, landgebruik en waterverbruik. De zoetwatereutrofiëring kan worden verklaard door de ammoniakemissies, terwijl het land- en waterverbruik hoger zijn door het gebruik van soja voor het kweken van de bacteriën. Het aardopwarmingsvermogen van conventioneel cement is meer dan drie keer zo hoog.

**Tabel 5 De waarden van het global warming potential (GWP) cradle-to-gate (kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>) voor drie verschillende betonsoorten: standaard beton, 'groen' beton en laagdrukbeton.**

Conventional concrete type	GWP (kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>3</sup> )
Standard cement-concrete	296.01
Green concrete	134.56
Low compressive strength concrete	100.68

Tabel 5 geeft de GWP-waarden voor drie verschillende soorten conventioneel beton. Dit geeft inzicht in de totale CO<sub>2</sub>-eq emissies (kg/m<sup>3</sup>) zoals berekend in de MKI's van Strukton. Het standaard cementbeton bleek de hoogste CO<sub>2</sub>-eq uitstoot te hebben met 296,01 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>, het beton met een lage sterkte is het laagst met 100,68 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>, en het groene beton is iets hoger met 134,56 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>. Op basis hiervan kan worden vastgesteld dat de samenstelling B van het biobeton lagere emissies heeft dan elk van de conventionele betonsoorten. Samenstelling A scoort, ondanks de inefficiënte productiemethode, nog steeds lager dan het 'standaard' beton.

### 3.5.3 Ammoniakproductie en opschaling

Tabel 6 toont de resultaten voor de ammoniakproductie en de effecten van opschaling. Strukton gaf een schatting voor de potentiële vervanging in Nederland van 2% van de totale betonproductie. In dit geval zou vooral beton met een lage sterkte worden vervangen.

**Tabel 6. De resultaten voor de vervanging van beton door biobeton. Weergegeven zijn de potentiële vervanging en de daaropvolgende CO<sub>2</sub>-eq reductie, evenals de ammoniakemissies.**

	Value	Unit
<b>Total concrete use in NL</b>	13 500 000	m <sup>3</sup>
<b>Potential concrete replacement (2%)</b>	270 000	m <sup>3</sup>
<b>Total CO<sub>2</sub>-eq reduction</b>	12 461 076	kg CO <sub>2</sub> -eq
<b>Ammonia at 40% efficiency</b>	2.42	kg/m <sup>3</sup>
<b>Total ammonia emissions</b>	653 391	kg

Bij een vervangingspercentage van 2% in Nederland bedraagt de potentiële hoeveelheid beton met een lage druksterkte die door biobeton kan worden vervangen 270 000 m<sup>3</sup>. De totale CO<sub>2</sub>-eq reductie voor de vervanging van lage druksterkte beton zou ongeveer 12,4 miljoen kg CO<sub>2</sub>-eq zijn.

Er is berekend dat één kubieke meter biobeton 2,42 kg ammoniak produceert. Met de vervanging van 2% biobeton zou ruwweg 653 ton ammoniak worden geproduceerd. In Nederland wordt jaarlijks ongeveer 132 miljoen kg ammoniak uitgestoten (TNO, 2019). Dit betekent dat de uitstoot van biobeton ruwweg 0,5% van de totale ammoniakuitstoot in Nederland zou zijn.

De totale CO<sub>2</sub>-eq uitstoot in Nederland is 168 miljard kg CO<sub>2</sub>-eq (CBS, 2021a). De totale CO<sub>2</sub>-eq reductie die wordt gevonden met de biobeton vervanging is 0,0074% van het totaal. Er is ook een vergelijking gemaakt met de transportsector.

In Nederland stoot het wegverkeer jaarlijks 6,1 miljard kg CO<sub>2</sub>-eq uit (CBS, 2021b). biobeton CO<sub>2</sub>-eq reductie zou 0,2% van deze hoeveelheid zijn.

Het is belangrijk op te merken dat het vervangingspercentage van 2% een aanname is. Het is misschien niet realistisch om 2% te vervangen, wat zou betekenen dat de CO<sub>2</sub>-eq reductie beperkter zou zijn.



Als de vervangingsratio echter hoger uitvalt dan 2%, zou de ammoniakuitstoot een groter probleem kunnen vormen. biobeton zou mogelijk een paar procent van de totale ammoniakuitstoot in Nederland voor zijn rekening kunnen nemen, wat dan een aanzienlijke bijdrage zou zijn aan de problemen met stikstofvervuiling die al in Nederland aanwezig zijn (Rijksoverheid, 2023).

### 3.5.4 Ammoniakrecycling

Voor de ammoniakemissies is een hypothetisch scenario gemaakt waarbij de ammoniak wordt opgevangen en getransporteerd naar een kunstmestfabriek. Een gaswasser met een rendement van 99% zou het ammoniakgas opvangen. Om het eenvoudig te houden, werd aangenomen dat 100% van de ammoniak zou worden opgevangen en gerecycled. Dit zou resulteren in een reductie van het eutrofiëringspotentieel in zoet water van 0,29 naar ongeveer 0,01 kg P-eq. Dit is een reductie van 97% in eutrofiëring. Wanneer de ammoniak terug wordt getransporteerd naar een kunstmestfabriek om opnieuw te worden gebruikt, kunnen de CO<sub>2</sub>-eq emissies van de productie van ureum ook worden toegewezen aan de kunstmestproductie in plaats van aan de biobeton productie. Dit is mogelijk omdat de energie die nodig was voor de productie van ureum nu wordt gebruikt voor de productie van ammoniak. Hierbij moet rekening worden gehouden met het rendement van 40% voor de omzetting van ureum naar ammoniak. Aangezien 60% van het ureum niet wordt omgezet, wordt dit geteld als een verlies. Daarom kan slechts 40% van de CO<sub>2</sub>-eq emissies van de productie van ureum worden verwijderd. Dit resulteert in een vermindering van ongeveer 5 kg CO<sub>2</sub>-eq, van 54,5 naar 49,5 kg CO<sub>2</sub>-eq. In totaal is dit een afname van 9%.

Bij de opschaling is het belangrijk om rekening te houden met de criteria en grenzen van de kunstmestindustrie. Er moet immers voldoende ureum worden geleverd en de vraag naar ammoniak moet groot genoeg zijn om de hoeveelheid die wordt geproduceerd op te vangen. In Nederland is de totale productie van stikstofkunstmest ruwweg 6 miljoen ton (Meststoffen Nederland, 2015). Dit betekent dat de ammoniak uit de productie van biobeton ruwweg 0,01% zou bedragen van de totale stikstofmeststoffen die in Nederland worden geproduceerd. Dit heeft tot gevolg dat het voor de industrie relatief eenvoudig zou zijn om deze ammoniak te verantwoorden.

## 3.6 Conclusie

In dit onderzoek is de milieu-impact van biobeton, geproduceerd met het MICP-proces, beoordeeld. Er is een LCA uitgevoerd, met de nadruk op CO<sub>2</sub>-eq en ammoniakemissies, waarna een vergelijking is gemaakt met conventioneel beton. Daarnaast is een beoordeling gemaakt van de mogelijkheden voor opschaling van de productie in Nederland en de problemen die zich daarbij voordoen.

Het bleek dat de keuze van de methodes om biobeton te produceren een grote impact heeft op de milieu-impact. Samenstelling A, waarbij de injectiemethode werd gebruikt, bleek een CO<sub>2</sub>-eq emissie van 238,8 kg/m<sup>3</sup> te hebben. Ondanks de inefficiënte productiemethode is dit nog steeds lager dan 'standaard' beton, met 296 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>.

Het werd vastgesteld dat samenstelling B, die de efficiëntere 'premix'-methode gebruikt, een CO<sub>2</sub>-eq van 54,5 kg/m<sup>3</sup> heeft. Hieruit blijkt dat de tweede samenstelling meer dan vier keer minder CO<sub>2</sub>-eq uitstoot dan de eerste. Dit is voornamelijk te verklaren door de lagere input van ureum en calciumchloride. Dit is lager dan alle conventionele betonsoorten, inclusief het type 'lage druksterkte' met ongeveer 100 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>. De druksterkte is echter ongeveer tien keer hoger dan die van het biobeton, respectievelijk 12-15 MPa en 1,39 MPa.

Biobeton, geproduceerd met de premixmethode, had volgens berekeningen 2,42 kg ammoniakemissie per m<sup>3</sup> bij een ureumomzettingsrendement van 40%. Als biobeton ongeveer 2% van het conventionele beton in Nederland zou vervangen, zou dit ongeveer 653 ton ammoniak produceren, wat ruwweg 0,5% is van de totale ammoniakuitstoot in dit land. Een vervanging van 2% zou echter ook de uitstoot van 12,4 miljoen kg CO<sub>2</sub>-eq vermijden, als beton met een lage sterkte zou worden vervangen. Dit is 0,0074% van de totale CO<sub>2</sub>-eq uitstoot in Nederland.

In deze studie werd ook ammoniakrecycling besproken, waarbij een biobetonfabriek zou kunnen samenwerken met een kunstmestfabriek om de ammoniakemissies te hergebruiken voor de productie van kunstmest. De ammoniakemissies komen dan niet in de lucht terecht, maar worden gebruikt als meststoffen. Dit vermindert het eutrofiëringspotentieel van biobeton met 97%. Bovendien zou dit ook de totale CO<sub>2</sub>-eq uitstoot met 9% verminderen. Er moet echter worden opgemerkt dat dit slechts een theoretisch scenario is. Er moet een volledige beoordeling van dit scenario worden gemaakt om te zien of het realistisch is.

Er kan worden geconcludeerd dat biobeton potentieel heeft om de koolstofuitstoot in de betonindustrie in Nederland te verminderen, aangezien het een lagere CO<sub>2</sub>-eq uitstoot heeft dan conventioneel beton. De ammoniakuitstoot vormt echter een obstakel, vooral in een land als Nederland dat een stikstofcrisis doormaakt. Het inzamelen en recyclen van de ammoniak zou nodig zijn om van biobeton een duurzaam alternatief voor conventioneel beton te maken.

## 4 WP 3: Technische ontwikkeling en haalbaarheid

### 4.1 Doelen werkpakket 3

Doel van dit werkpakket zoals geformuleerd in het projectplan is:

Een receptuur en productieproces voor prefab Biobeton serieproductie, resulterend in blauwdrukken voor opschaling naar pilot schaal. Voor de toepassing van Biobeton op/in de bodem worden randvoorwaarden gesteld voor toekomstige toepassing op pilotschaal.

Voor het optimaliseren van een receptuur voor prefab Biobeton worden o.a. de volgende variabelen gevarieerd: mengcultuur versus monocultuur bacteriën en concentratie calcium en ureum.

Voor het optimaliseren van het productieproces zijn de volgende aspecten van belang: 1) toedieningsmethode bacteriën, calcium en ureum, 2) behandelingsduur, 3) terugwinning NH<sub>3</sub>. Ter optimalisatie van de behandelingsduur worden tijdens het produceren van de prototypes vloeibare samples genomen vanuit het blok waarvoor de substraat concentraties bepaald worden om te monitoren wanneer het proces is uitgeregeerd en verversing van de all-in-one oplossing vereist is.

Samengevat betreft het de volgende doelen/onderzoeksvragen:

- a) Optimalisatie receptuur.
- b) Uit ontwikkelen productieproces voor prefab biobeton op labschaal.
- c) Ontwikkelen blauwdruk voor opschaling naar pilot prefab biobeton.
- d) Bepalen of en hoe de pilot uitgevoerd moet worden.
- e) Voor toepassing op/in de bodem de verwachte kansen en beperkingen bij productie op pilotschaal in kaart brengen.

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen waren de volgende methoden voorzien:

- i. Bepalen optimale zandcomposities.
- ii. Bepalen vochtgehalte in zandcompositie.
- iii. Bepalen effect van toegevoegde poedervormige toeslagmaterialen aan 'optimale' zandcompositie.
- iv. Bepalen methode van mengen/bereiden specie en wijze van storten specie in de mal.
- v. Bepalen optimale urease activiteit (in de tijd).
- vi. Bepalen optimale droogtemperatuur.
- vii. Bepalen effect mix van bacteriestammen versus afzonderlijke toepassing.

De beoordeling en het testen van de prototypes (of proefstukken) is gedurende dit onderzoek gebeurt met behulp van:

1. Visuele beoordeling.
2. Handmatige bepaling bepalen brosheid.
3. SEM analyse (elektronenmicroscop) voor identificatie kristalvorming.
4. EDTA Titratie ter bepaling gevormde calciumcarbonaat.
5. UCS test ter bepaling van de kubusdruksterkte.
6. Schmidt hamer voor niet-destructieve controle van de hardheid.

## 4.2 Achtergrondinformatie

### 4.2.1 Micro-organismen

Het maken van biobeton in dit haalbaarheidsonderzoek is gebaseerd op MICP, waarbij calciumcarbonaat gevormd wordt met behulp van micro-organismen. Tijdens dit onderzoek zijn hiervoor twee bacteriestammen gebruikt: *Bacillus sphaericus* en *Sporosarcina pasteurii*.

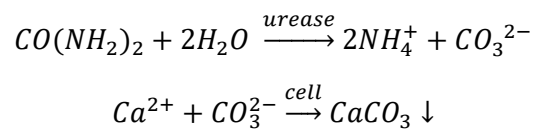
*B. sphaericus* en *S. pasteurii* zijn strikt aerobe, ureolytische bacteriën die urease produceren. Beide bacteriestammen kunnen een enzym produceren, genaamd urease, dat reageert met ureum om vervolgens carbonaat te vormen. Het carbonaat kan vervolgens met calcium reageren waarbij calciumcarbonaat wordt gevormd. De bacteriën functioneren als nucleatiepunten waarop calciumcarbonaatkristallen gevormd kunnen worden (Luhar et al.,2022). Calciumcarbonaatkristallen vormen de verbindingen tussen de mineralen (bijvoorbeeld zand en/of grind) waardoor de mineralen aan elkaar 'gekit' worden en er een vast en samenhangend product kan worden gevormd.



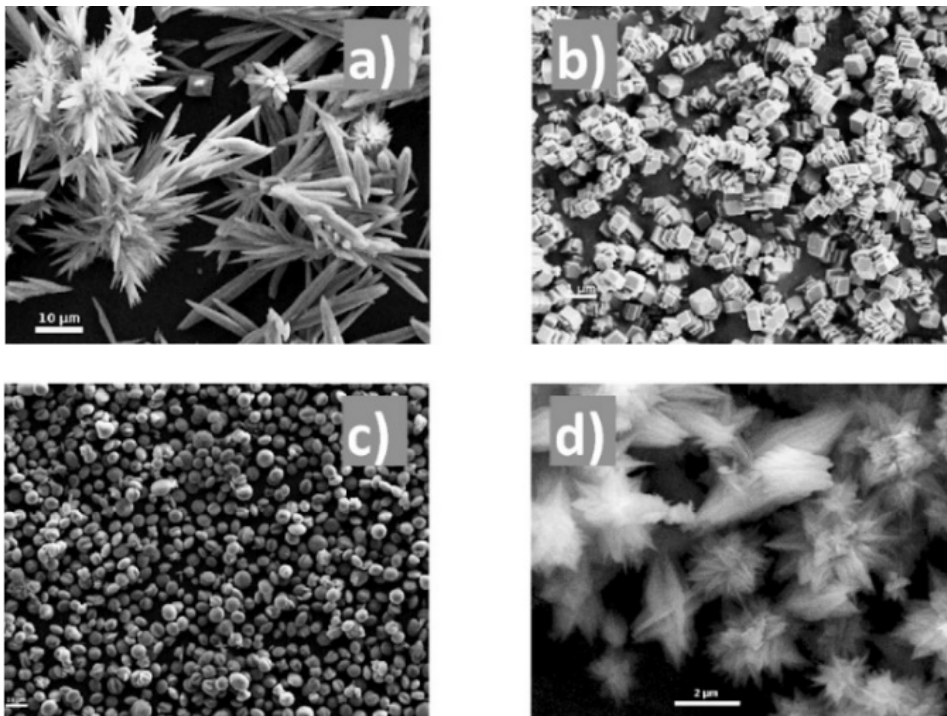
Figuur 2. Afbeelding van een geproduceerd proefstuk

## 4.2.2 MICP

MICP is een proces waarbij bacteriën calciumcarbonaat precipiteren. Dit proces is gebaseerd op de vermogens van specifieke bacteriën om calciumcarbonaat te vormen door middel van verschillende chemische reacties. Deze reacties zetten ureum om in carbonaat. Het vormen van carbonaat is mogelijk door middel van het enzym urease. Zodra carbonaat in aanraking komt met calcium kan er calciumcarbonaat gevormd worden. Hieronder staat de algemene reactievergelijking van het MICP-proces weergegeven.



Calciumcarbonaat kan worden neergeslagen in drie kristalvormen: calciet, aragoniet en vateriet. (zie ook Figuur 3). Ze verschillen van elkaar in chemische samenstelling en de manier waarop ze worden gevormd (Ewa et al., 2003).



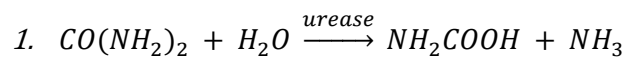
**Figuur 3. Calciumcarbonaat kristallen: a) aragoniet, b) calciet, c) vateriet, (sphere), d) vateriet (flower) (Natural Resources)**

Calciet is de meest voorkomende vorm van calciumcarbonaat en is het belangrijkste mineraal in kalksteen en marmer.

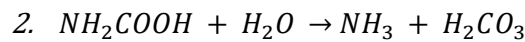
Aragoniet is een minder voorkomende vorm van calciumcarbonaat en is meestal minder stabiel dan calciet (Demény et al., 2016).

Vateriet is een zeldzame vorm van calciumcarbonaat die voorkomt in kleine kristallen. Vateriet is het minst stabiel van de drie mineralen en bevat twee vormen: bolvormige kristallen en bloemvormige kristallen (Christy, 2017).

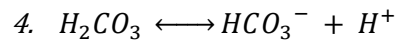
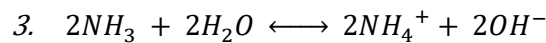
De formatie van deze kristallen kan volgens drie verschillende routes verlopen. De autotrofe route, de heterotrofe route en de ureolysis route. Gedurende dit MICP-experiment wordt de route gebruikt die gebaseerd is op de afbraak van ureum (ureolysis). Hieronder worden de reacties van deze route weergegeven.



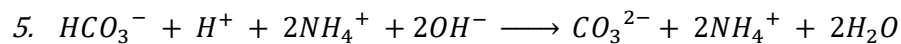
Ureum wordt opgelost in water waarbij er carbamidezuur en ammoniak ontstaat. Het carbamidezuur kan vervolgens weer reageren met water.



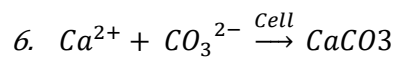
Hierbij ontstaat er ammoniak en diwaterstofcarbonaat gevormd wordt. Bij stap 3 en 4 vindt een evenwichtsreactie plaats.



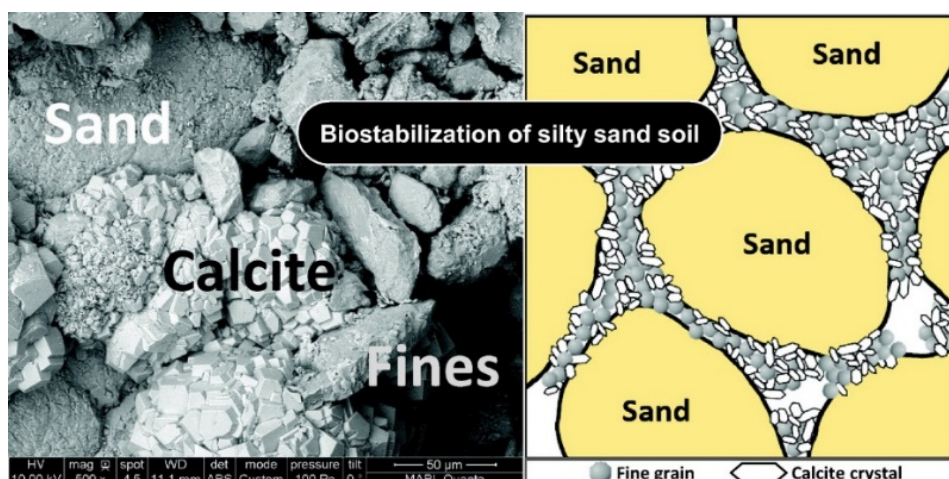
Ammoniak wordt omgezet in ammonium. Diwaterstofcarbonaat wordt omgezet in waterstofcarbonaat. De vorming van hydroxide-ionen leidt tot een verhoging van de pH. Een verhoogde pH veroorzaakt een verschuiving in de bicarbonaatbalans, wat leidt tot de vorming van carbonaationen. De lokale pH stijgt door ammoniumproductie (Anbu et al., 2016).



Waterstofcarbonaat wordt omgezet tot carbonaat en hydroxide reageert met een waterstofion waarbij water ontstaat. Voor deze reactie is een pH van meer dan 8 nodig.



In een basisch milieu (pH>6) kan het carbonaat vervolgens reageren met een calciumion om zo calciumcarbonaat te vormen.



**Figuur 4.** Schematische weergave van de vorming van calciumcarbonaat en de van dit mineraal met zand (Natural Resources)

In Figuur 4 is weergegeven hoe de calciumcarbonaatkristallen zandkorrels aan elkaar binden. Links een foto gemaakt met een Scanning Electron Microscope (SEM). Rechts een schematische weergave waarin de bacteriën (wit) als nucleatieplaats dienen voor de calciumcarbonaatkristallen (grijze korrels). Deze kristallen verbinden (cementer) de zandkorrels.

### 4.2.3 Cementatie oplossing

Tijdens het haalbaarheidsonderzoek is gebruik gemaakt van een cementatie-oplossing. Deze oplossing bestaat uit opgelost calciumchloride en ureum, welke nodig zijn voor de formatie van calciet.

## 4.3 Wijzigingen technisch onderzoek

Het uitvoeringsproces van het technisch onderzoek is tijdens de uitvoering op basis van voortschrijdend inzicht veranderd, met als hoofddoel de receptuur te optimaliseren om van daar uit te onderzoeken hoe opschaling plaats zou kunnen vinden richting een toekomstige pilot.

Belangrijke wijziging was dat we het onderzoek gefaseerd hebben uitgevoerd, waarbij de eerste fase diende om de productiemethode van de prototypes te verbeteren. Denk hierbij aan de methode van mengen, storten, verdichten en drogen van de biobetonspesie. Dit is gedaan in kubusvormen die bovendien ook op sterkte zijn getest.

In de tweede fase hebben we ons juist gericht op verbetering van de receptuur. De vervaardigde prototypes hadden een tegelvorm en geen kubusvorm. Reden om (kleinere) tegelvormen te maken was dat we zoveel mogelijk verschillende recepturen wilden kunnen testen. Kleinere prototypes waren logistiek minder complex te verwerken en waren bovendien geschikt om de kwaliteit te kunnen beoordelen.

We hebben veel prototypes kunnen maken. Binnen het onderzoek is nog niet te bepalen hoe een pilot uitgevoerd zou kunnen worden. Dat is in dit stadium nog niet mogelijk. Over toepassing van biobeton op en in de bodem hebben we een aantal kansen en beperkingen kunnen formuleren.

## 4.4 Technisch onderzoek

### 4.4.1 Fasering technisch onderzoek

Het technisch onderzoek waarbij prototypes (proefstukken van biobeton) zijn vervaardigd, is uitgevoerd in twee fasen (zie ook Bijlage 3 en Bijlage 4):

**Fase 1:** 20 vervaardigde proefstukken ('1-1' t/m '4-5'). In deze fase zijn kubusvormige proefstukken vervaardigd waarbij gebruik werd gemaakt van ongezeefd zand en grind. De experimenten in fase 1 waren gericht op bereiden van de specie, prepareren & gebruik van kubusmallen, variatie in toegevoegde (verhouding van) bacteriestammen, percentage toegevoegde all in one vloeistof en enkele variaties in drogingstemperatuur.

**Fase 2:** 45 vervaardigde proefstukken ('Proefstuk 1' t/m '11.2 a+b'). In deze fase zijn voornamelijk tegelvormige proefstukken gemaakt waarbij gebruik gemaakt werd van bepaalde zandcomposities (geen grind) bestaande uit verschillende gradaties (korrelgroottes). De experimenten in fase 2 waren gericht op het bepalen van een optimale mineralencompositie inclusief vochtgehalte, effect van poedervormige toeslagmaterialen en timing dosering all-in one vloeistof o.b.v. optimale urease activiteit.

### 4.4.2 Parameters

Het technisch onderzoek heeft zich gericht op de volgende parameters:

- Bereiden, storten en verdichten specie (m.n. in fase 1).
- Droogtemperatuur (beperkt; fase 1).
- Mengcultuur vs. monocultuur bacteriestammen (m.n. fase 1).
- Vochtgehalte (fase 1 en fase 2).
- Zandcompositie (fase 2).
- Poedervormige toeslagmaterialen (fase 2).
- Urease activiteit (fase 2).

### 4.4.3 Bereiden, storten en verdichten specie

Het bereiden, storten en verdichten van de specie is in het laboratorium steeds op identieke wijze uitgevoerd. Bereiding vond plaats in een open emmer en menging vond handmatig plaats gedurende enige minuten en zodanig dat een visueel homogene specie werd gevormd. De kubusvormige proefstukken zijn laagsgewijs (laagdikte van 5 cm) gestort en handmatig verdicht met een plunjer (vierkant plankje en hamer). De tegelvormige proefstukken met een dikte van 5 à 6 cm werden in 2 lagen gestort en verdicht.



### Resultaat

Resultaat van het op identieke wijze bereiden, storten en verdichten van de specie was dat de resultaten (van biobeton kubussen respectievelijk tegels) reproduceerbaar en onderling vergelijkbaar waren. Variantie in kwaliteit werden niet veroorzaakt door variatie in de 'voorbewerking'.

## 4.4.4 Droogtemperatuur

In fase 1 is beperkt geëxperimenteerd met de droogtemperatuur van de proefstukken. Na het maken van de proefstukken werden droogtemperaturen van 30 graden, 50 graden en 80 graden getest. Zie hiervoor ook de specificaties in Bijlage 3.

### Resultaat

Er zijn op basis van variaties in droogtemperatuur geen significante verschillen waargenomen in sterkte of kristalvorming. Op basis van deze resultaten werden alle verdere proefstukken gedroogd bij kamertemperatuur.

## 4.4.5 Mengcultuur vs. monocultuur bacteriestammen

In fase 1 en 2 werden naast het gebruik van gemengde suspensies (*S. pasteurii* en *B. sphaericus*) ook biobeton geproduceerd met de aparte bacteriestammen. Het doel was om te bepalen of gemengde of pure bacteriesuspensies beter geschikt zijn voor de productie van biobeton.

In fase 2 werd ook de urease activiteit van de gebruikte bacteriesuspensies gemeten en werd geprobeerd deze te correleren met de resultaten.

### Resultaat

Op basis van de resultaten van fase 1 werd geen verschil in sterkte waargenomen. Aangezien in het verleden binnen testen bij Bioclear earth het gebruik van een mengsel bestaande uit *S. Pasteurii* en *B. sphaericus* betere resultaten heeft opgeleverd, zijn in het verdere verloop gemengde suspensies gebruikt.

De resultaten van fase 2 ondersteunen grotendeels de resultaten van fase 1. In een directe vergelijking waren blokken met *B. sphaericus* minimaal sterker dan blokken met *S. pasteurii*.

## 4.4.6 Vochtgehalte

In fase 1 is samen met Strukton het optimale vochtgehalte bepaald om een goed verwerkbaar biobetonspacie te vervaardigen. Het vochtgehalte werd bepaald op basis van ervaring en de rekenmethode uit de cementbetonindustrie. Voor fase 1 was deze rekenmethode voldoende om de experimenten (die immers vooral gericht waren op het vervaardigingsproces en minder op de optimalisatie van de receptuur) uit te voeren.

Voor fase 2 werd op een andere wijze het optimale vochtgehalte bepaald. Voor de premix methode is het van belang om voldoende vocht (ofwel bacteriën en voedingsstoffen) toe te kunnen voegen. Te weinig vocht resulteert in onverwerkbare (te droge) specie die bovendien in absolute zin te weinig voedingsstoffen bevat.

Om de optimale hoeveelheid vocht te bepalen werd water toegevoegd aan een testzandmengsel in plaats van de all-in one oplossing en werd het vereiste volume voor optimale vulling genoteerd. Dit volume werd later vervangen door de all-in one oplossing voor de productie van de blokken.

### Resultaat

In fase 2 werden voornamelijk kleine blokken bereid, waardoor het vochtvolume dat experimenteel met water werd bepaald 200 mL bedroeg. Voor de volgende experimenten werd dus 100 ml bacteriesuspensie en 100 ml cementatie oplossing gebruikt.

## 4.4.7 Zandcompositie

Voor het bepalen van de optimale mineralencompositie voor biobeton, zijn er meerdere gradaties mineralen (tot 5,6 mm) onderzocht. Tijdens het onderzoek noemen we dit de zandcompositie vanwege het ontbreken van mineralen met korrels groter dan 5,6 mm.

Naast verschillende zandgradaties werd er steeds eenzelfde hoeveelheid kalksteenmeel (KSM) aan toegevoegd. Reden hiervoor was het beperken van het percentage holle ruimten tussen de zandkorrels met als voorwaarde dat er nog genoeg holle ruimtes over zouden blijven voor het toedienen van bacterievloeistof. Zie ook Tabel 7 en foto's in Bijlage 4.

Aan elk van de vijf composities werd vervolgens een hoeveelheid water gedoseerd zodanig dat er visueel nog net geen sprake was van uittredend water. Dit vochtgehalte werd later gebruikt als indicatie voor de hoeveelheid bacterie-oplossing en cementatie-oplossing (verhouding 1:1) die maximaal toegevoegd kan worden (zie vorige paragraaf).

De specie van de mengsels zijn op identieke wijze gestort en verdicht in een kubusmal. Vervolgens zijn de mengsels ontkist en visueel beoordeeld op structuur en samenhang.

Tabel 7. Samenstelling van de vijf zandcomposities

	KSM (Gr)	Ongemixt (Gr)	5,6 mm (Gr)	4 mm (Gr)	2 mm (Gr)	1 mm (Gr)	0,5 mm (Gr)	0,25 mm (Gr)	0,125 mm (Gr)	dH20 (ml)	Totaal vloeistof (ml)
Proefstuk 1	3375	0	0	0	0	1250	1250	1250	0	1250	1250
Proefstuk 2	3375	0	0	200	100	1250	1250	1250	0	1250	1250
Proefstuk 3	3375	0	50	100	200	1250	1250	1250	0	1250	1250
Proefstuk 4	3375	0	40	100	200	1250	1250	1250	600	1250	1250
Proefstuk 5	3375	4359	0	0	250	1250	1250	1250	400	1250	1250

### **Resultaat**

Op basis van visuele beoordeling (op het niet uittreden van vocht) en tast (op de mate van stevigheid) werd vastgesteld dat de compositie van 'Proefstuk 4' het beste mengsel opleverde om verdere experimenten mee te gaan doen.

## **4.4.8 Poedervormige toeslagmaterialen**

### **Kalksteenmeel**

Naast het gebruik van verschillende zandgroottes zijn ook de poedervormige toeslagmaterialen kalksteenmeel (KSM) en metakaolien getest.

Kalksteenpoeder is een minerale hulpstof die vaak in beton wordt gebruikt. Het vermindert de benodigde hoeveelheid Portlandcement die nodig is in een betonmengsel, verlaagt de productiekosten en verbetert de duurzaamheid van de betonproductie. Bovendien kan de toevoeging van kalksteenpoeder aan beton de mechanische eigenschappen zoals druksterkte en chemische weerstand verbeteren, waardoor het geschikt is voor gebruik in ruwe omgevingen (Liu et al., 2010). Kalksteenpoeder kan ook de verwerkbaarheid van beton verbeteren waardoor het gemakkelijker te storten en te verwerken is (Qian et al., 2015b). In het algemeen is de toevoeging van kalksteenpoeder aan beton een gangbare praktijk in de moderne betonproductie. Kalksteenpoeder is een sterk alkalisch bouw materiaal (pH ca. 12), wat kan worden teruggevoerd op de aanwezigheid van calciumcarbonaat.

Om het kalksteenpoeder bruikbaar te maken voor de productie van biobeton moet de pH-waarde worden verlaagd. In het onderzoek gebeurde dit met zoutzuur of zwavelzuur. In sommige experimenten werd kalksteenpoeder geneutraliseerd met het poedervormige toeslagmateriaal metakaolien.

### **Metakaolien**

Metakaolien is een verfijnde vorm van kaolienklei dat wordt gebruikt als aanvullend cementeringsmateriaal in beton (Srinivasu et al., 2014). Metakaolien kan de mechanische eigenschappen van beton, zoals sterkte en duurzaamheid, en de esthetische kwaliteiten van het eindproduct verbeteren. Het kan ook de chemische weerstand van beton en de stabiliteit van de betonstructuur op lange termijn verbeteren (Srinivasu et al., 2014).

De lage pH van metakaolien van ongeveer 5 is te verklaren door de aanwezigheid van silica, aluminium en andere mineralen die gewoonlijk in kaolien voorkomen (Qian et al., 2015b).

### **Resultaat**

Resultaat van het toevoegen van kalksteenpoeder was dat de proefstukken sterker werden dan de proefstukken zonder toegevoegd kalksteenpoeder. Het verlagen van de pH met zuur was weliswaar een effectieve methode echter door de grote hoeveelheid benodigd zuur werd dit om kostentechnische en duurzaamheidsredenen als ongewenst beschouwd.

Het verlagen van de pH van kalksteenpoeder door toevoeging van metakaolien was ook een effectieve methode. Hiervan werd echter geconstateerd dat de kosten van metakaolien een belemmering zouden vormen voor eventuele opschaling.

Uiteindelijk is besloten om bij de productie van de volgende proefstukken geen poedervormige toeslagstoffen kalksteenmeel en metakaolien meer toe te passen.

#### 4.4.9 Urease activiteit

Urease activiteit is een parameter die de calciëtoproductie kan beïnvloeden. Aangenomen wordt dat een hogere urease activiteit een positieve invloed heeft op MICP.

Aangezien de urease activiteit niet altijd proportioneel is met de biomassa, is het zinvol om de urease activiteit in de bacteriesuspensie te meten voorafgaand aan de productie van de biobeton blokken.

In een aantal experimenten werd de urease activiteit van de bacteriesuspensie dagelijks gemeten om het optimale tijdstip voor het gebruik van de bacteriesuspensie te bepalen. Daarnaast werden er in de loop van de experimenten gedeeltelijk ook blokken gemaakt om een mogelijke correlatie tussen de urease activiteit en de hardheid van de blokken vast te kunnen stellen.

##### Resultaat

De maximale urease activiteit wordt bereikt na een incubatieperiode van ongeveer 24 uur (zie Bijlage 5). Een correlatie tussen urease activiteit en de sterkte van de blokken kon niet worden aangetoond, omdat geen van de blokken stevig genoeg was voor een sterktebepaling.

Een directe vergelijking van de twee bacteriestammen laat echter zien dat *B. Sphaericus* een hogere urease activiteit bereikt dan *S. Pasteurii*. Tegels bereid met *B. Sphaericus* suspensie alleen heeft een iets hogere sterkte dan die bereid met *S. Pasteurii*. Een exacte lijst van deze experimenten met de bijbehorende meetwaarden is te vinden in Bijlage 6.

## 4.5 Conclusie en vervolgstappen

Binnen dit onderdeel is het recept en de productie van biobeton stap voor stap geoptimaliseerd om zo de sterkte van deze blokken te verbeteren.

In de eerste stap werd de productiemethode verbeterd en aangepast voor de productie van de volgende blokken en is de reproduceerbaarheid van het proces vergroot. Zo werd het zandmengsel in de mallen steeds gelaagd en verdicht tot dezelfde kleur en werden de geproduceerde blokken gedroogd bij kamertemperatuur.

Naast het bepalen van het optimale vochtgehalte werd ook de optimale zandsamenstelling van verschillende zandgroottes bepaald om het recept te verbeteren.

Bij een directe vergelijking van het gebruik van slechts één bacteriestam of een mengsel van *S. pasteurii* en *B. sphaericus* voor het MICP-proces werd geen verschil waargenomen in de sterkte van de resulterende blokken.

Door echter de ureaseactiviteit van de twee bacteriestammen te meten, werd duidelijk dat *B. sphaericus* een hogere ureaseactiviteit had en dat een blok gemaakt met *B. sphaericus* iets sterker was dan een blok gemaakt met *S. pasteurii*. Aangezien dit echter aan het einde van het project werd getest, werden er geen verdere tests mee uitgevoerd en wordt gewerkt met de mengcultuur.

De sterkste blokken werden gemaakt met de additieven kalksteenmeel en metakaolien. Vanwege de hoge kosten van deze fijne additieven werden ze echter niet verder gebruikt.

Samenvattend kan gezegd worden dat geen enkel geproduceerd biobetonblok al geschikt is als vervanger voor structureel beton. De grootste kansen als toepassing lijken te liggen op het gebied van cellenbeton (niet-dragend isolatiemateriaal), tijdelijke bouwmaterialen, werkvloeren of tijdelijke halfverharding (fietspaden).

Het pad van cellenbeton (schuimbeton) wordt verder verkend. In dit geval wordt er samengewerkt met Jacco Langebeek van Vloerverwarming Nederland en Jeroen Gravemaker van Kiwiz. Samen zullen proeven en tests worden uitgevoerd om deze toepassing te valideren.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

Het bleek dat de keuze van de methodes om biobeton te produceren een grote impact heeft op de milieu-impact. Samenstelling A, waarbij de injectiemethode werd gebruikt, bleek een CO<sub>2</sub>-eq emissie van 238,8 kg/m<sup>3</sup> te hebben. Ondanks de inefficiënte productiemethode is dit nog steeds lager dan 'standaard' beton, met 296 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>. Het is vastgesteld dat samenstelling B, die de efficiëntere 'premix'-methode gebruikt, een CO<sub>2</sub>-eq van 54,5 kg/m<sup>3</sup> heeft. Hieruit blijkt dat de tweede samenstelling meer dan vier keer minder CO<sub>2</sub>-eq uitstoot dan de eerste. Dit is voornamelijk te verklaren door de lagere input van ureum en calciumchloride. Dit is lager dan alle conventionele betonsoorten, inclusief het type 'lage druksterkte' met ongeveer 100 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>. De druksterkte is echter ongeveer tien keer hoger dan die van het biobeton, respectievelijk 12-15 MPa en 1,39 MPa.

Biobeton, geproduceerd met de premixmethode, had volgens berekeningen 2,42 kg ammoniakemissie per m<sup>3</sup> bij een ureumomzettingsrendement van 40%. Als biobeton ongeveer 2% van het conventionele beton in Nederland zou vervangen, zou dit ongeveer 653 ton ammoniak produceren, wat ruwweg 0,5% is van de totale ammoniakuitstoot in dit land. Een vervanging van 2% zou echter ook de uitstoot van 12,4 miljoen kg CO<sub>2</sub>-eq vermijden, als beton met een lage sterkte zou worden vervangen. Dit is 0,0074% van de totale CO<sub>2</sub>-eq uitstoot in Nederland.

In deze studie is ook ammoniakrecycling besproken, waarbij een biobetonfabriek zou kunnen samenwerken met een kunstmestfabriek om de ammoniakemissies te hergebruiken voor de productie van kunstmest. De ammoniakemissies komen dan niet in de lucht terecht, maar worden gebruikt als meststoffen. Dit vermindert het eutrofiëringspotentieel van biobeton met 97%. Bovendien zou dit ook de totale CO<sub>2</sub>-eq uitstoot met 9% verminderen. Er moet worden opgemerkt dat dit een theoretisch scenario is en dat een volledige beoordeling van dit scenario moet worden gemaakt om te zien of het realistisch is.

Er kan worden geconcludeerd dat biobeton potentieel heeft om de koolstofuitstoot in de betonindustrie in Nederland te verminderen, aangezien het een lagere CO<sub>2</sub>-eq uitstoot heeft dan conventioneel beton. De ammoniakuitstoot vormt echter een obstakel, vooral in een land als Nederland dat een stikstofcrisis doormaakt. Het inzamelen en recyclen van de ammoniak zou nodig zijn om van biobeton een duurzaam alternatief voor conventioneel beton te maken.

De stip aan de horizon is om een circulair en CO<sub>2</sub>-neutraal constructief beton te ontwikkelen, die in het werk gestort (in-situ) kan worden. In eerste instantie ligt de focus op laagwaardige toepassingen (niet constructief beton met lage druksterkte), die gekenmerkt worden door lagere tot geen normeringseisen. Een marktsegment dat wij kansrijk achten voor de introductie van Biobeton, is de betonwarenindustrie (bv tuinartikelen, tegels, trottoirbanden).

De Betonwaren markt heeft wel te maken met zeer kleine marges en is gericht op massa dus moet er eerst vervolgonderzoek plaatsvinden. Het richten op meer hoogwaardige toepassingen (bijvoorbeeld samen met architecten) achten wij daarom ook kansrijk.

De sterkste blokken werden gemaakt met de additieven kalksteenmeel en metakaolien. Vanwege de hoge kosten van deze fijne additieven zijn ze echter niet verder gebruikt.

Samenvattend kan gezegd worden dat geen enkel geproduceerd biobetonblok al geschikt is als vervanger voor structureel beton. De grootste kansen als toepassing lijken te liggen op het gebied van schuimbeton of cellenbeton (niet-dragend isolatiemateriaal), tijdelijke bouwmaterialen, werkvloeren of tijdelijke halfverharding (fietspaden).

De meest kansrijke toepassing tot nu toe is schuimbeton vanwege de lage benodigde druksterkte. Deze toepassing moet samen met de praktijk verder worden onderzocht en gevalideerd.

## 5.2 Aanbevelingen

Het recept van biobeton kan verder worden verbeterd, waarbij hogere sterktes mogelijk moeten zijn en een kortere uithardingstijd. Als eerste toepassing ligt schuimbeton voor de hand, aangezien hiervoor al voldoende sterkte mogelijk is. Hiermee kunnen eerste pilottesten in de praktijk worden gedaan. In dit geval kan worden samengewerkt met Vloerverwarming Nederland, die al heeft aangeboden om samen verdere proeven en tests uit te gaan voeren om deze toepassing verder te beproeven en te valideren.

# Bijlagen

Bijlage 1	Referenties
Bijlage 2	Evaluatie duurzaamheid (WP2)
Bijlage 3	Specificatie proefstukken (WP3)
Bijlage 4	Foto's proefstukken (WP3)
Bijlage 5	Urease activiteit ontwikkeling (WP3)
Bijlage 6	Vergelijking urease activiteit versus resultaat proefstuk (WP3)
Bijlage 7	Artikel Beton- & Staalbouw, 2022-04



## Bijlage 1 Referenties

### Referenties LCA (WP2)

- CBS. (2021a). Hoe groot is onze broeikasgasuitstoot? Retrieved March 21, 2023, from <https://www.cbs.nl/nl-nl/dossier/dossier-broeikasgassen/hoe-groot-is-onze-broeikasgasuitstoot-wat-is-het-doel>
- CBS. (2021b). Hoeveel uitstoot veroorzaakt de Nederlandse transportsector? Retrieved March 14, 2023, from <https://www.cbs.nl/nl-nl/visualisaties/verkeer-en-vervoer/uitstoot-en-brandstofverbruik/uitstoot-transportsector>
- Emis Vito. (2020). Zure wasser. Retrieved March 19, 2023, from <https://emis.vito.be/nl/bbt/bbt-tools/techniekfiches/zure-wasser>
- Ecochain. (2021). De Bepalingsmethode (MKI) is aangepast: Wat de EN15804 + A2 betekent voor jouw bedrijf. Retrieved March 20, 2023, from <https://ecochain.com/nl/knowledge-nl/wat-en15804-a2-voor-jou-betekent/>
- Environdec. (2022). Environmental performance indicators. Retrieved March 19, 2023, from <https://www.environdec.com/resources/indicators>
- European Commission. (2010). *ILCD h*. <https://doi.org/10.2788/38479>
- Meststoffen Nederland. (2015). Productie van minerale meststoffen in Nederland. Retrieved February 9, 2023, from <https://www.meststoffennederland.nl/getmedia/b677f87e-a46b-4193-8da6-d24d9be51d08/Productie-van-minerale-meststoffen-in-Nederland-sept-2015.aspx>
- NMD. (2023). Nationale Milieu Database. Retrieved from <https://milieudatabase.nl/nl/>
- Rijksoverheid. (2023). Aanpak stikstof. Retrieved March 10, 2023, from <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/aanpak-stikstof>
- Røyne, A., Phua, Y. J., Le, S. B., Eikjeland, I. G., Josefsen, K. D., Markussen, S., Myhr, A., Throne-Holst, H., Sikorski, P., & Wentzel, A. (2019). Towards a low CO<sub>2</sub> emission building material employing bacterial metabolism (1/2): the bacterial system and prototype production. *PLoS ONE*, *14*(4), 1–24. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212990>
- Røyne, F. (2017). Life Cycle Assessment of BioZement - Concrete production based on bacteria. SP Technical Research Institute of Sweden, 25.
- TNO. (2019). *Emissies en depositie van stikstof in Nederland*.

### Referenties bioconcrete (WP3)

Anbu, P., Kang, C.-H., Shin, Y.-J. and So, J.-S. (2016), "Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications", *SpringerPlus*, Vol. 5 No. 1, p. 250.

Christy, A. G. (2017). A Review of the Structures of Vaterite: The Impossible, the Possible, and the Likely. *Crystal Growth & Design*, 17(6), 3567–3578.

Demény, A., Németh, P., Czuppon, G., Leél-Őssy, S., Szabó, M., Judik, K., Németh, T. & Stieber, J. (2016). Formation of amorphous calcium carbonate in caves and its implications for speleothem research. *Scientific Reports*, 6(1).

Ewa T., S., J. L., P. R., M. J., S. & J. M., M. B. (2003). Calcite, vaterite and aragonite forming on cement hydration from liquid and gaseous phase. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 73(1), 247–269.

Luhar, S., Luhar, I. & Shaikh, F. U. A. (2022). A Review on the Performance Evaluation of Autonomous Self-Healing Bacterial Concrete: Mechanisms, Strength, Durability, and Microstructural Properties. *Journal of Composites Science*, 6(1), 23.

Natural Resources - Sustainable Targets, Technologies, Lifestyles and Governance - Scientific Figure on ResearchGate.

Liu, S., & Yan, P. (2010). Effect of limestone powder on microstructure of concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25(2), 328–331.

Srinivasu, Kota & Sai, M & N, Venkata. (2014). A Review on Use of Metakaolin in Cement Mortar and Concrete.

Qian, J., & Song, M. (2015b). Study on Influence of Limestone Powder on the Fresh and Hardened Properties of Early Age Metakaolin Based Geopolymer. *RILEM Bookseries*, 253–259.

## Bijlage 2 Evaluatie duurzaamheid (WP2)

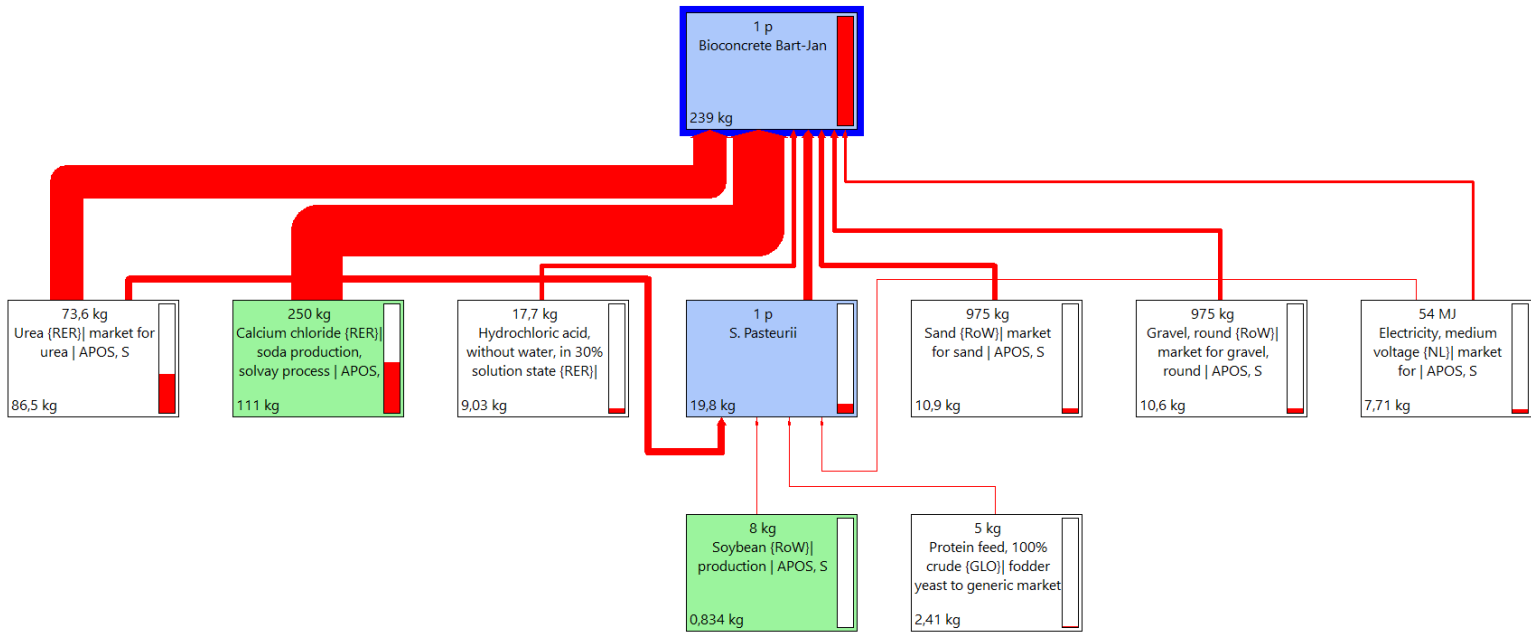


Figure 1: Schematisch overzicht van de CO2-eq emissies van één kubieke meter bioconcrete met samenstelling A.

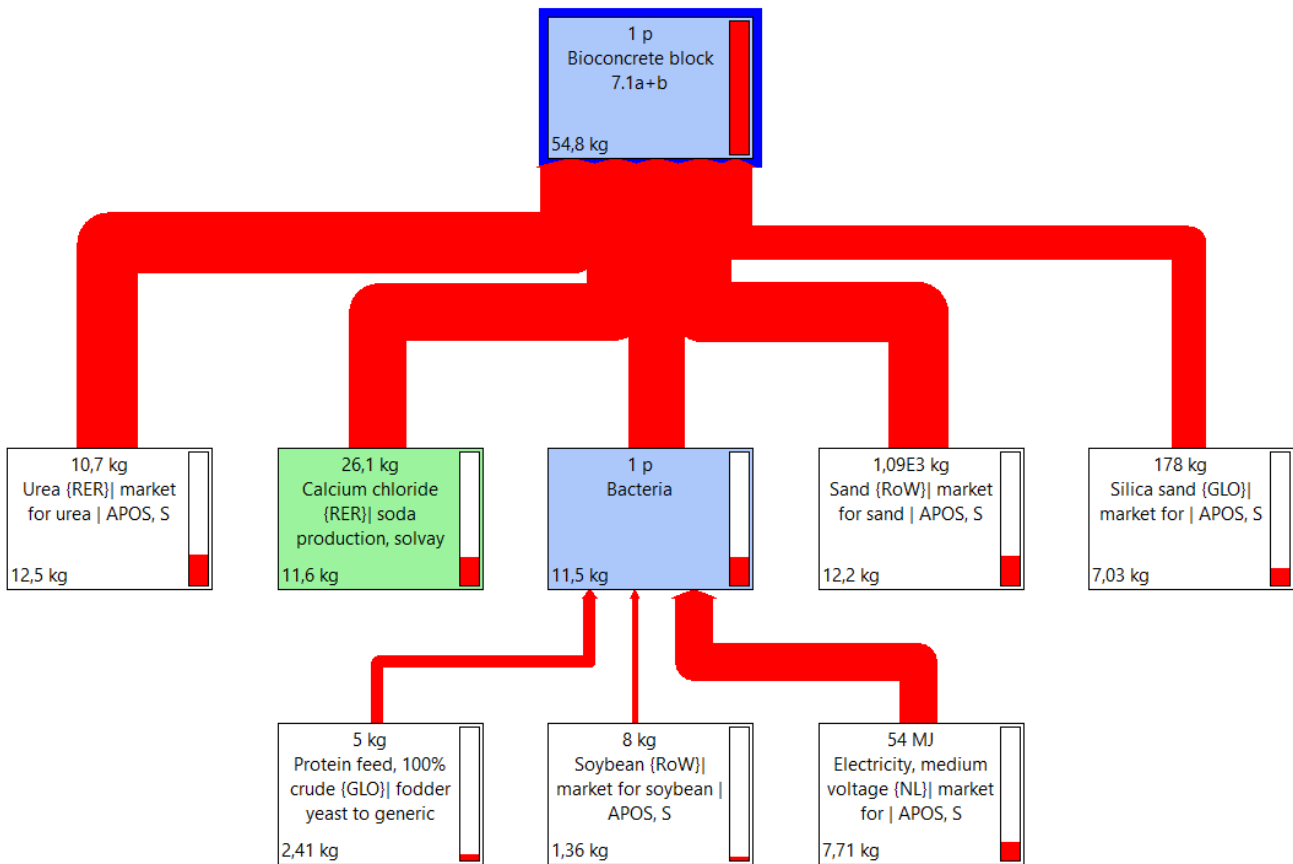


Figure 2: Schematisch overzicht van de CO2-eq emissies van één kubieke meter bioconcrete met samenstelling B.

Table 1: LCA-resultaten van een standaard betontegel met een dikte van 0,045 m. De getoonde resultaten zijn voor 1m<sup>2</sup> en 1 m<sup>3</sup> beton.

Standard concrete tile (per m <sup>2</sup> , thickness of 0,045 m)					
Environmental impact category	Unit	Phase A1-A3 (per m <sup>2</sup> )	Phase A1-A3 (per m <sup>3</sup> )	Weighing factor (euro/unit)	MKI MP (per m <sup>2</sup> , excluding MKI surcharge)
Abiotic depletion, non fuel (AD NF)	kg Sb eq	0.001	0.036	€0.16	€0.000
Abiotic depletion, fuel (AD F)	kg Sb eq	0.040	0.896	€ 0.16	€0.006
Global Warming (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	13.320	296.011	€0.05	€0.666
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	4.460E-07	9.911E-06	€30.00	€0.000
Photochemical oxidation (POCP)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.003	0.063	€2.00	€0.006
Acidification (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	0.026	0.581	€4.00	€0.105
Eutrophication (EP)	kg PO <sub>4</sub> <sup>(3-)</sup> eq	0.006	0.124	€9.00	€0.050
Human Toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	1.201	26.679	€0.09	€0.108
Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	0.030	0.672	€0.03	€0.001
Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	196.453	4365.617	€0.00	€0.020
Ecotoxicity, terrestrial (TETP)	kg 1,4-DB eq	0.017	0.371	€0.06	€0.001
				Total	€0.956
				Including MKI surcharge:	€2.566
				Converted to m <sup>3</sup> :	€22.858

Table 2: LCA-resultaten van 'groen' beton. Merk op dat de MKI-waarde van wieg tot graf is in plaats van wieg tot poort vanwege beperkingen in de gegevens.

Environmental impacts	Unit	Phase A1	Phase A2	Phase A3	Total of A1-A3 (cradle-to-gate)	MKI total (cradle to grave)
Global Warming (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1.134E+02	2.044E+01	7.234E-01	1.346E+02	
Abiotic depletion, non fuel (AD NF)	kg Sb eq	7.371E-04	3.979E-02	5.551E-05	4.058E-02	
Waste, hazardous (HWD)	kg	3.886E-03	2.868E+01	1.913E-04	2.868E+01	
Abiotic depletion, fuel (AD F)	kg Sb eq	4.514E-01	1.602E-01	5.956E-03	6.176E-01	
Waste, non-hazardous (NHWD)	kg	1.426E+01	2.377E+00	2.425E+01	4.089E+01	

Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	6.356E-06	4.084E-08	1.108E-07	6.508E-06	
Photochemical oxidation (POCP)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.287E-02	1.329E-02	5.647E-04	4.672E-02	
Energy, primary, renewable (PERT)	MJ	4.176E+01	4.841E+00	1.415E-02	4.662E+01	
Acidification (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	2.944E-01	5.621E-02	4.706E-03	3.553E-01	
Energy, primary, non-renewable (PENRT)	MJ	9.710E+02	3.586E+02	1.513E+01	1.345E+03	
Eutrophication (EP)	kg PO <sub>4</sub> <sup>(3-)</sup> eq	4.836E-02	8.858E-03	6.551E-04	5.787E-02	
Water consumption (FW)	m <sub>3</sub>	2.798E+00	1.131E+00	1.229E+01	1.622E+01	
Human Toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	1.647E+01	1.018E+01	5.216E-01	2.717E+01	
Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	1.260E+06	1.166E+03	5.060E+01	1.261E+06	
Ecotoxicity, terrestrial (TETP)	kg 1,4-DB eq	1.611E-01	7.492E-02	9.877E-03	2.459E-01	
Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	3.417E-01	2.826E-01	1.209E-02	6.364E-01	
MKI	€					12.71

Table 3: LCA-resultaten van een betonsoort met lage druksterkte. De druksterkte is 12-15 MPa.

C12/15 X0 S3 Nunspeet					
Environmental impacts	Unit	Phase A1	Phase A2	Phase A3	Total of A1-A3 (cradle-to-gate)
Global Warming (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	8.722E+0 1	1.044E+0 1	3.015E+0 0	1.007E+02
Abiotic depletion, non fuel (AD NF)	kg Sb eq	5.789E-05	1.875E-04	1.020E-05	2.556E-04
Waste, hazardous (HWD)	kg	1.054E-03	4.148E-04	4.491E-05	1.514E-03
Abiotic depletion, fuel (AD F)	kg Sb eq	1.861E-01	8.121E-02	2.268E-02	2.900E-01
Waste, non-hazardous (NHWD)	kg	2.202E+0 0	1.487E+0 1	9.939E-02	1.717E+01
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2.286E-06	2.055E-06	2.205E-07	4.562E-06
Photochemical oxidation (POCP)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	9.522E-03	6.684E-03	7.962E-04	1.700E-02

Energy, primary, renewable (PERT)	MJ	4.972E+01	1.947E-02	1.935E-02	4.976E+01
Acidification (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	7.471E-02	2.747E-02	7.564E-03	1.097E-01
Energy, primary, non-renewable (PENRT)	MJ	4.021E+02	2.152E+00	3.378E+00	4.076E+02
Eutrophication (EP)	kg PO <sub>4</sub> <sup>(3-)</sup> eq	2.225E-02	4.435E-03	1.607E-03	2.829E-02
Water consumption (FW)	m <sup>3</sup>	7.253E-01	1.816E+02	4.419E+01	2.265E+02
Human Toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	5.313E+00	5.153E+00	4.265E-01	1.089E+01
Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	4.314E+02	5.516E+02	3.831E+01	1.021E+03
Ecotoxicity, terrestrial (TETP)	kg 1,4-DB eq	1.269E-01	1.663E-02	1.216E-02	1.557E-01
Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	1.206E-01	1.403E-01	9.439E-03	2.703E-01
MKI	€	5.442E+00	1.223E+00	2.439E-01	6.909E+00

## Bijlage 3 Specificatie proefstukken (WP3)



Datum	ID		Vorm proefstuk kubus Groot (ribbe 15cm), Klein (ribbe 10cm)	w/w% Grind (3-12mm)	w/w% Zand (0-4mm)	w/w% Zilverzand (0-0,4mm)	Concentratie cementatie Ureum/CaCl (M)	<i>B. spaeiricus</i> of <i>S. pasteurii</i> (verhouding)	OD <sub>600</sub> bacterie suspensie	Methode	Andere toegevoegde stoffen	v/w% all-in one solution	Dagen gedroogd bij 30°C	Droogtemperatuur
22-10-2021	M-1	Eerder vervaardigd proefstuk als referentie	Groot	55	45	0	1	BS	1,2	Doorspoel		nvt	4	
3-12-2021	M-3	Eerder vervaardigd proefstuk als referentie	Groot	55	45	0	1	50/50	1,2	Doorspoel		nvt	4	
10-3-2022	1-1		Klein	54	42	4	1	SP	1,6	Premix		5	7	
10-3-2022	1-2		Klein	54	42	4	1	BS	1,4	Premix		5	7	
10-3-2022	1-3		Klein	54	42	4	1	BS	1,4	Premix		5	7	
10-3-2022	1-4		Klein	54	42	4	1	SP	1,6	Premix		8,5	7	
10-3-2022	1-5		Groot	55	45	0	1	50/50	1,5	Premix		8,5	7	
24-3-2022	2-1		Klein	54	42	4	1	50/50	1,0	Premix		5	7	
24-3-2022	2-2		Klein	54	42	4	1	50/50	1,0	Premix		5	7	
24-3-2022	2-3		Klein	54	42	4	1,5	50/50	1,0	Premix		5	7	
24-3-2022	2-4		Klein	54	42	4	1,5	50/50	1,0	Premix		5	7	
24-3-2022	2-5		Groot	55	45	0	1	50/50	1,0	Premix	Calciumcarbonaat 5,5g	5	7	
29-4-2022	3-1		Klein	0	92	8	1	50/50	1,0	Premix		17	0	
29-4-2022	3-2		Klein	0	92	8	1	50/50	1,0	Premix		17	0	
29-4-2022	3-3		Klein	0	92	8	1	50/50	1,0	Premix	Calcium peroxide	17	0	
29-4-2022	3-4		Klein	0	92	8	1	50/50	1,0	Premix	Calciumperoxide	17	0	
29-4-2022	3-5		Groot	55	45	0	1	50/50	1,0	Premix	0,2 w/w% lignine	5	0	
23-5-2022	4-1		Klein	0	92	8	1	SP	1,0	Premix		16		Kamer
23-5-2022	4-2		Klein	0	92	8	1	SP	1,0	Premix		16		30
23-5-2022	4-3		Klein	0	92	8	1	SP	1,0	Premix		16		50
23-5-2022	4-4		Klein	0	92	8	1	SP	1,0	Premix		16		80
23-5-2022	4-5		Groot	54	42	4	1	SP	1,0	Premix	0,5 w/w% lignine	5	7	

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20

Datum	Datumontkisting	Omschrijving	ID	Methode	Ongemixt (Gr)	5,6 mm (Gr)	4 mm (Gr)	2 mm (Gr)	1 mm (Gr)	0,5 mm (Gr)	0,25 mm (Gr)	0,125 mm (Gr)	Zilverzand (Gr)	37% HCl (ml)	96% H2SO4 (ml)	Concentratie cementatie Ureum/CaCl (M)	Total hovelheid cementatie oplossing (ml)	Bacterieoplossing (ml)	B. spærius of S. pasteurii (verhouding)	OD600 bacterie suspensie	urease activity [mM Urea/min]	Totaal vloeistof (ml)	KSM (Gr)	Metakaolin (Gr)	
sep-22		Bepaling optimale mineralencompositie in betonlab Strukton	Proefstuk 1	Groot	Premix	0	0	0	1250	1250	1250	0	0	0	0	0	1250	0	50/50	-	-	1250	3375	0	
sep-22		Bepaling optimale mineralencompositie in betonlab Strukton	Proefstuk 2	Groot	Premix	0	0	200	100	1250	1250	1250	0	0	0	0	1250	0	50/50	-	-	1250	3375	0	
sep-22		Bepaling optimale mineralencompositie in betonlab Strukton	Proefstuk 3	Groot	Premix	0	50	100	200	1250	1250	1250	0	0	0	0	1250	0	50/50	-	-	1250	3375	0	
sep-22		Bepaling optimale mineralencompositie in betonlab Strukton	Proefstuk 4	Groot	Premix	0	40	100	200	1250	1250	1250	600	0	0	0	1250	0	50/50	-	-	1250	3375	0	
sep-22		Bepaling optimale mineralencompositie in betonlab Strukton	Proefstuk 5	Groot	Premix	4359	0	0	250	1250	1250	1250	400	0	0	0	1250	0	50/50	-	-	1250	3375	0	
okt-22		Eerste poging blok met HCl	Blok 1	Tegel	Premix	2950	0	0	169	0	0	811	278	0	423	0	50	0	228	50/50	-	-	650	1755	0
okt-22		Eerste poging blok met H2SO4	Blok 2	Tegel	Premix	2949	0	0	169	0	0	811	271	0	0	1300	50	500	600	50/50	-	-	1100	1300	0
okt-22		1300 gram van blok 2 aangevuld met zand	Blok 3	Tegel	Premix	0	0	0	100	0	0	358	0	0	0	0	50	0	0	50/50	-	-	0	0	0
okt-22		Comp 4 zonder 5,6 met H2SO4	Blok 4	Tegel	Premix	9	0	18	35	219	219	219	88	0	0	592	50	150	70	50/50	-	-	220	592	0
okt-22		Comp 4 zonder 5,6 met H2SO4 met minder KSM vanw gips	Blok 5	Tegel	Premix	9	0	18	35	219	219	369	538	0	0	420	50	130	130	50/50	-	-	260	524	0
okt-22		Comp 4 met minimale hoeveelheid KSM	Blok 6	Tegel	Premix	0	33	37	48	323	323	323	167	0	0	147,5	50	106	106	50/50	-	-	0	147,5	0
okt-22		Comp 4 met mindere hoeveelheid KSM aangevuld met zand	Blok 7	Tegel	Premix	0	50	41	48	214	214	680	320	0	0	300	50	106	106	50/50	-	-	0	300	0
17-11-2022	21-nov	Comp 4 met 25%/75% KSM : Meta	2.1	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	0	0	0	2	150	75	50/50	0,6	-	225	50	150
17-11-2022	21-nov	Comp 4 met 25%/75% KSM : Meta	2.2	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	0	0	0	2	100	100	50/50	1,4	-	200	50	150
18-11-2022	23-nov	Eugene compositie met 25%/75% KSM : Meta	2.3	Tegel	Premix	0	88	176	176	0	0	585	176	0	0	0	2	100	100	50/50	1,2	-	200	50	150
18-11-2022	23-nov	Eugene compositie met 25%/75% KSM : Meta	2.4	Tegel	Premix	0	88	176	176	0	0	585	176	0	0	0	2	110	110	50/50	0,3	-	200	50	150
23-11-2022		Aangepaste Eugene composite voor doorstroming met 25/75	3.1	Tegel	Premix	0	90	176	280	0	104	500	150	0	0	0	2	100	100	50/50	2,1	-	220	25	75
23-11-2022		Aangepaste Eugene composite voor doorstroming met 25/75	3.2	Tegel (mislukt)	Premix	0	90	176	280	0	104	500	250	0	0	0	2	100	100	50/50	1,2	-	220	0	0
		2.2 Herhaling	4.1	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	0	0	0	2	100	100	50/50	1,6	-	200	50	150
1-12-2022		Comp 4 met alleen water	Test 0	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	0	0	0	2	220	0	50/50	1,7	-	220	50	150
2-12-2022		Dag 1 Urease activiteit testing	5.1	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	0	0	0	2	100	100	50/50	2,1	-	200	50	150
6-12-2022		Dag 2 Urease activiteit testing	5.2	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	0	0	0	2	100	100	50/50	1,5	-	200	50	150
7-12-2022		Dag 1 Urease activiteit	6.1a+b	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	0	0	0	2	100	100	50/50	1,1	0,88	200	50	150
8-12-2022		Dag 2 Urease activiteit	6.2a+b*	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	0	0	0	2	100	100	50/50	1,5	0,61	200	50	150
9-12-2022		Dag 3 Urease activiteit	6.3a+b	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	0	0	0	2	100	100	50/50	1,7	1,23	200	50	150
13-12-2023		Dag 4 Urease activiteit	6.4a+b	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	0	0	0	2	100	100	50/50	2,0	1,94	200	50	150
14-12-2023		Dag 1 Urease activiteit zonder fijn materiaal	7.1a+b	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	200	0	0	2	100	100	50/50	1,5	4,24	200	0	0
15-12-2023		Dag 2 Urease activiteit zonder fijn materiaal	7.2a+b	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	200	0	0	2	100	100	50/50	1,8	5,54	200	0	0
16-12-2023		Dag 3 Urease activiteit zonder fijn materiaal	7.3a+b	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	200	0	0	2	100	100	50/50	1,9	5,37	200	0	0
20-12-2023		Dag 4 Urease activiteit zonder fijn materiaal	7.4a+b	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	200	0	0	2	100	100	50/50	1,9	6,15	200	0	0
21-12-2023		Dag 1 Urease activiteit andere bacterie cultuur	8.1a+b	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	200	0	0	2	100	100	50/50	2,2	6,12	200	0	0
22-12-2023		Dag 2 Urease activiteit andere bacterie cultuur	8.2	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	200	0	0	2	100	100	50/50	4,2	6,90	200	0	0
23-12-2023		Dag 3 Urease activiteit andere bacterie cultuur	8.3a+b	Tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	218	200	0	0	2	100	100	50/50	4,8	7,13	200	0	0
17-1-2023		B. sphaericus tegels t=17	9.1 a+b	tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	418	0	0	0	12	100	100	B. sp	-	10,73	200	0	0
17-1-2023		S. pasteurii tegels t=17	9.2 a+b	tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	418	0	0	0	12	100	100	S. pa	-	6,78	200	0	0
24-1-2023		B. sphaericus tegels t=23	10.1 a+b	tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	418	0	0	0	12	100	100	B. sp	-	20,50	200	0	0
24-1-2023		S. pasteurii tegels t=23	10.1 C	tegel	Premix	0	16	31	58	293	293	293	418	0	0	0	12	100	100	S. pa	-	6,10	200	0	0
25-1-2023		Blok gemaakt met 2-2 compositie	Blok 8	tegel	Premix	0	48	93	174	879	879	879	654	0	0	0	6	300	300	?	-	?	600	150	450
27-1-2023		B. sphaericus tegels t=23, effect van temperatuur (A=koud, B= warm)	11.1 a+b	tegel	Premix	0	16	31	58	107	495	0	0	495	0	0	12	100	100	B. sp	-	11,35 / 22,85	200	0	0
27-1-2023		S. pasteurii tegels t=23, effect van temperatuur (A=koud, B= warm)	11.2 a+b	tegel	Premix	0	16	31	58	107	495	0	0	495	0	0	12	100	100	S. pa	-	5,18 / 9,53	200	0	0

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45

## Bijlage 4 Foto's proefstukken (WP3)

1-1



1-5



2-2



2-4



3-2



3-4



3-5



4-1



4-2



4-3





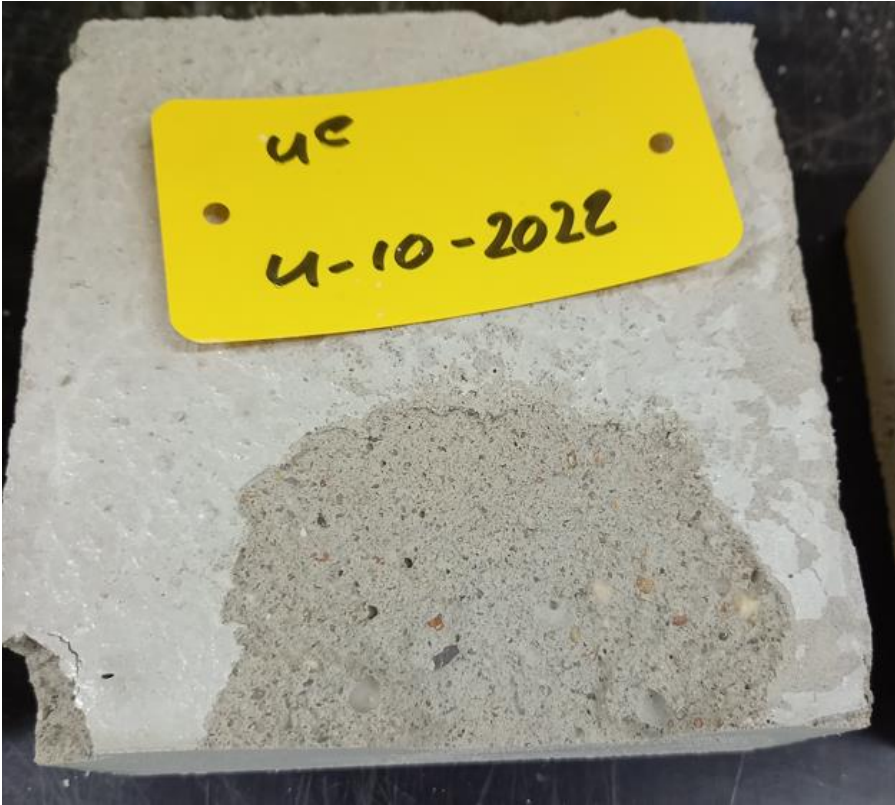
4-4



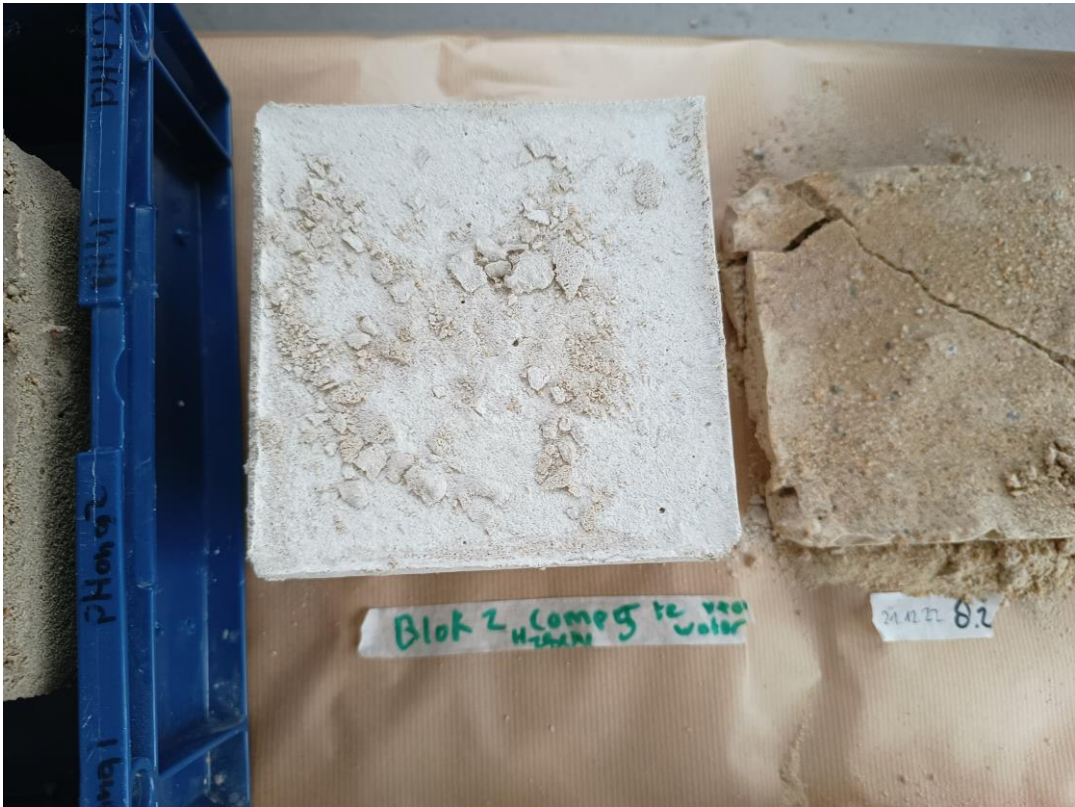
4-5



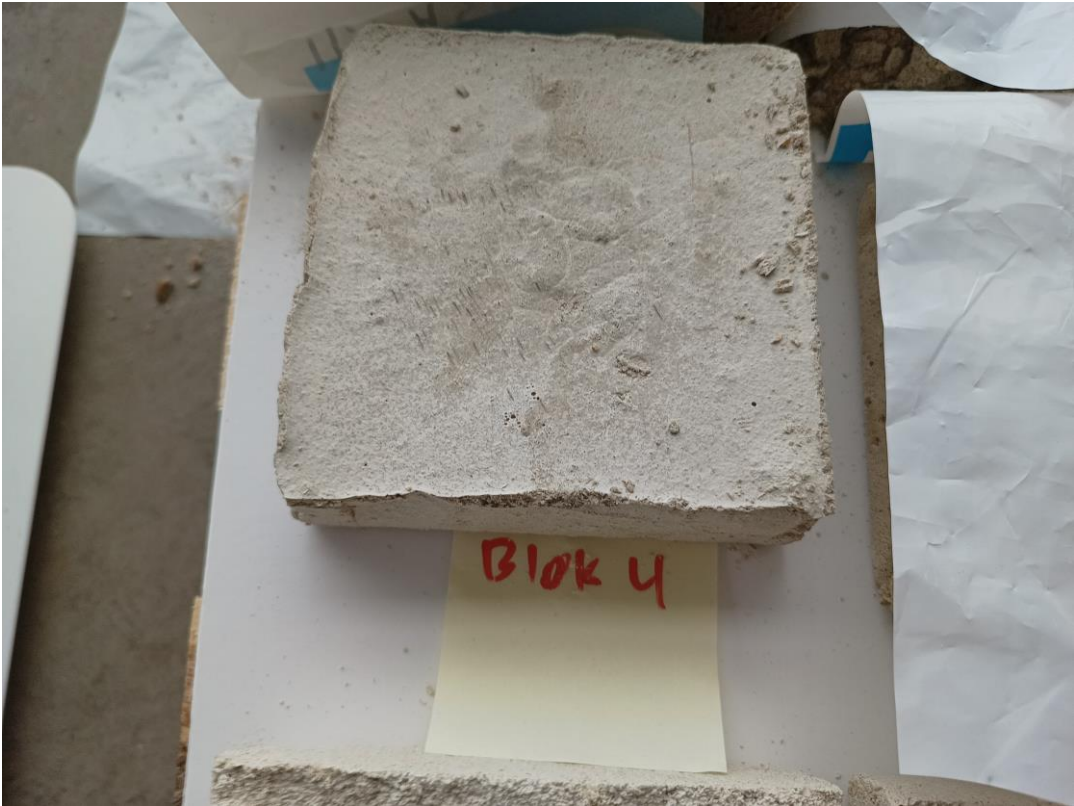
Proefstuk 4



Blok 2



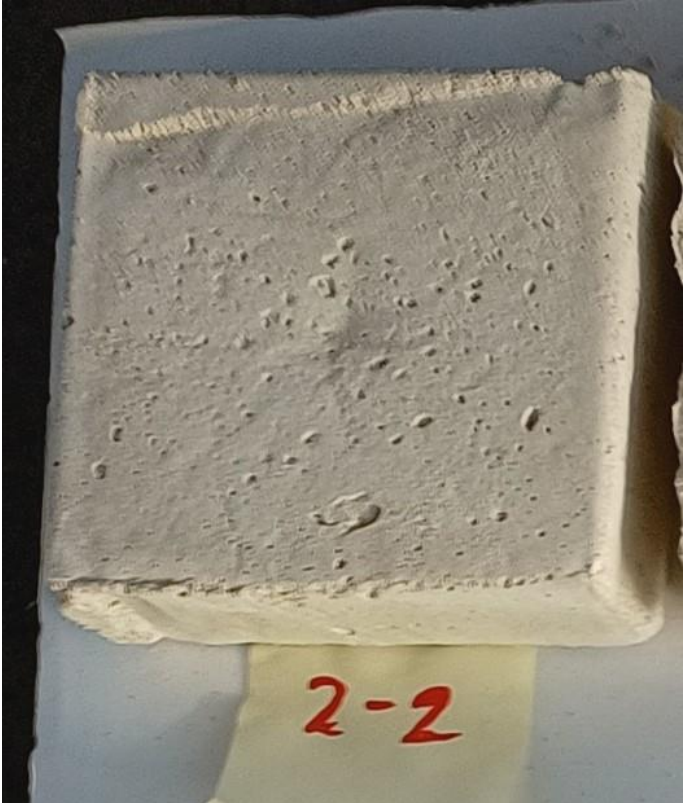
Blok 4



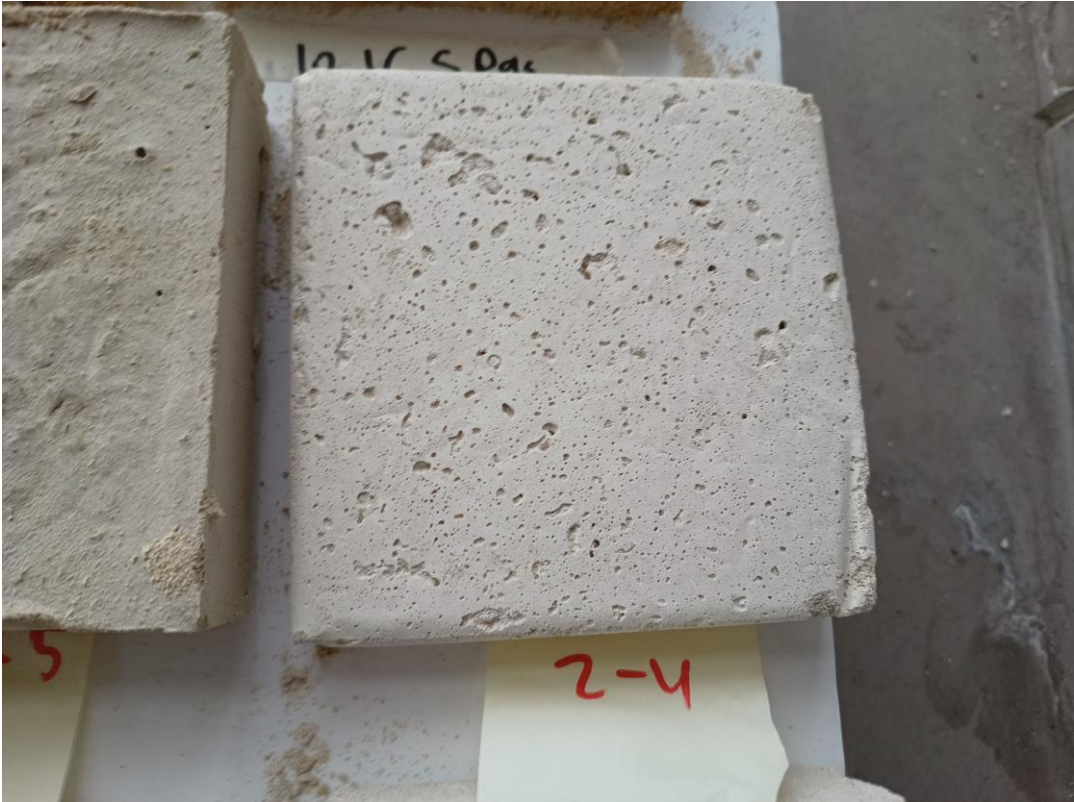
Blok 6



2.2



2.4



3.1



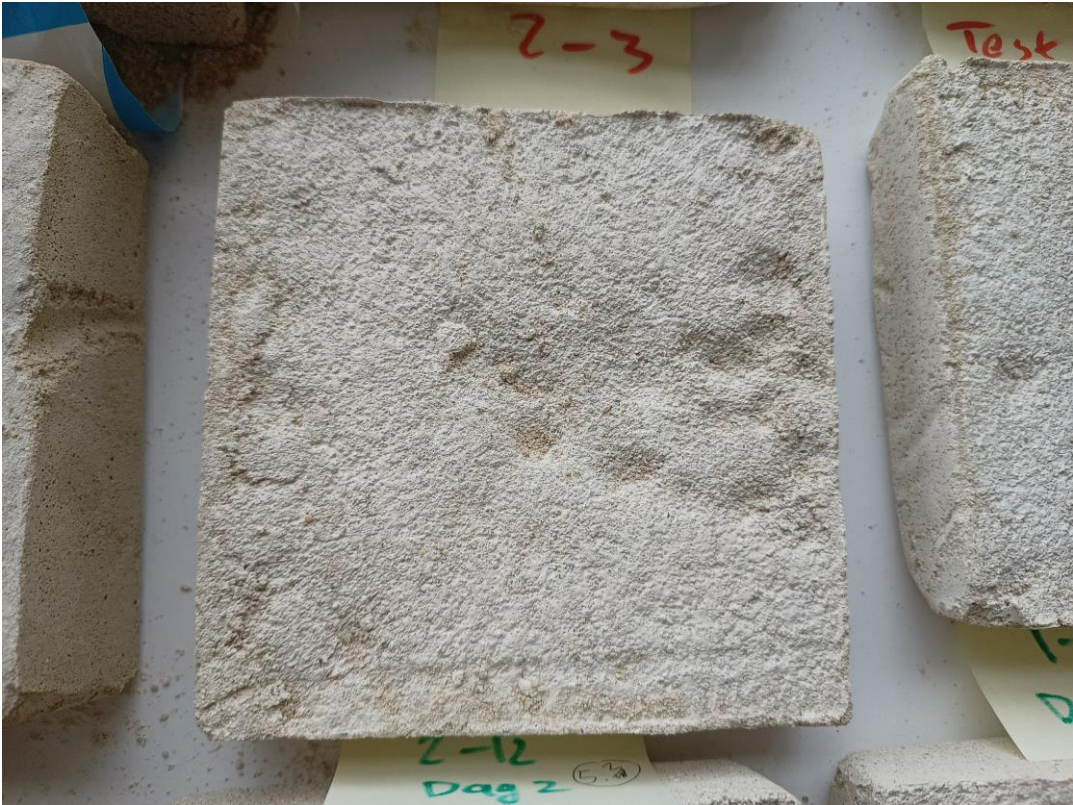
Test 0



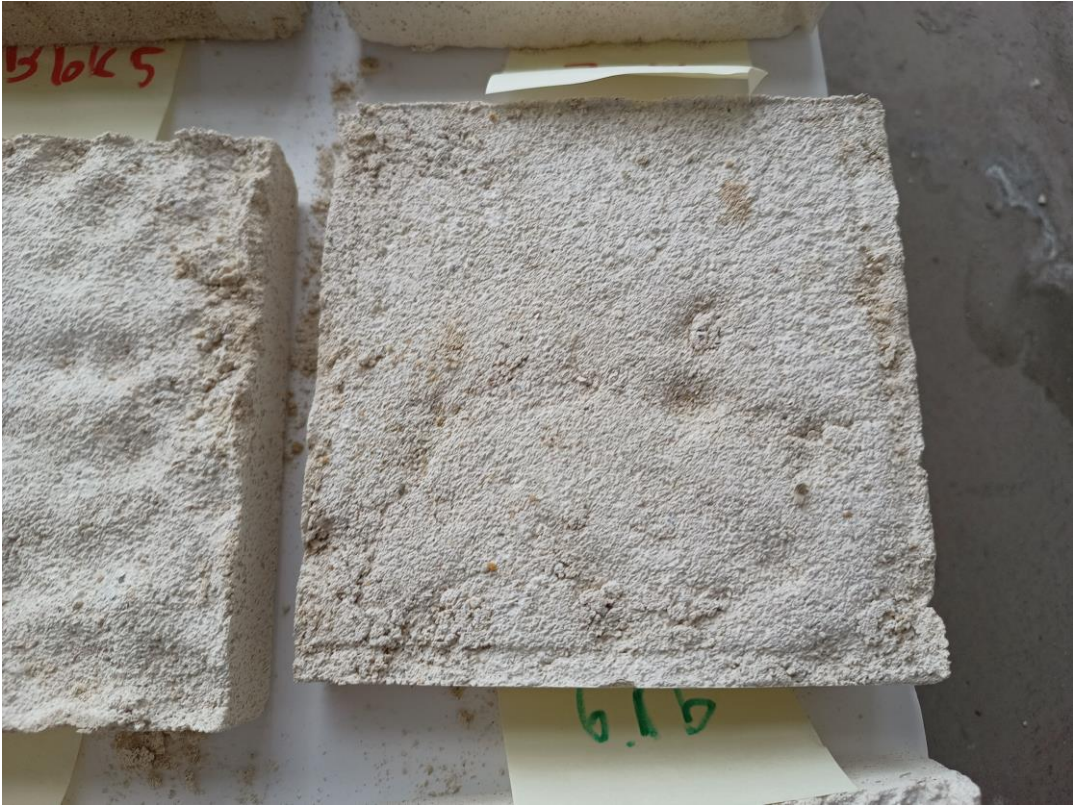
5.1



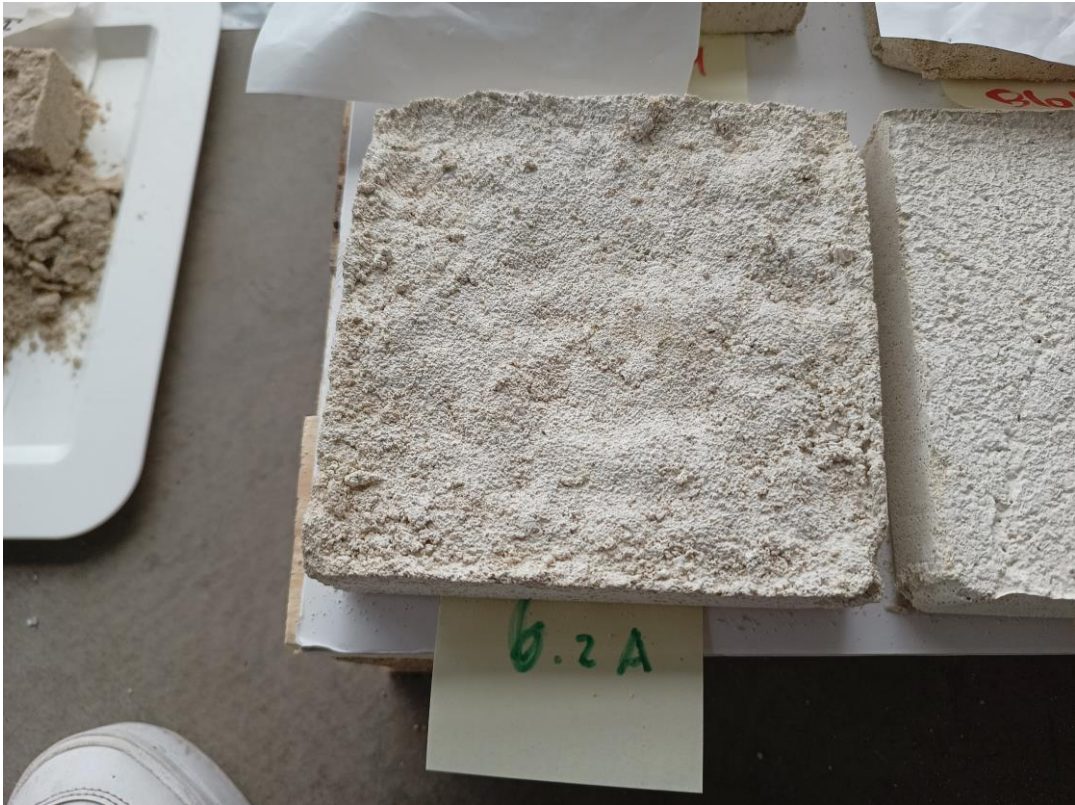
5.2



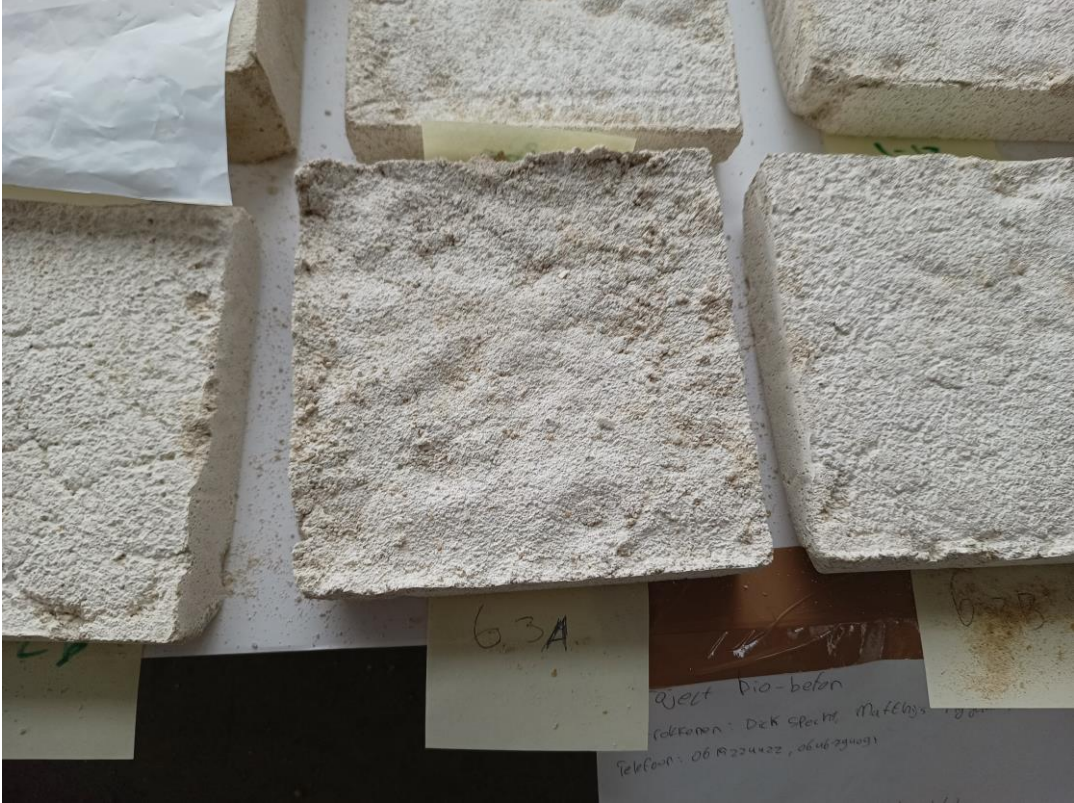
6.1b



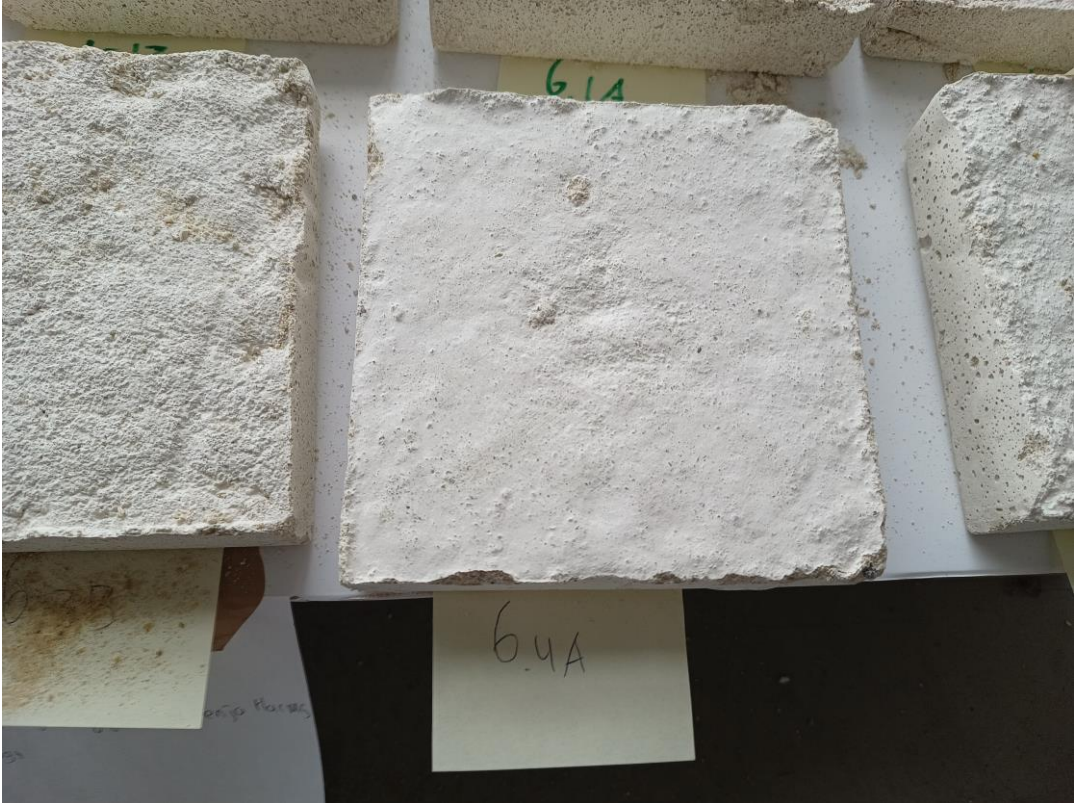
6.2a



6.3a



6.4a

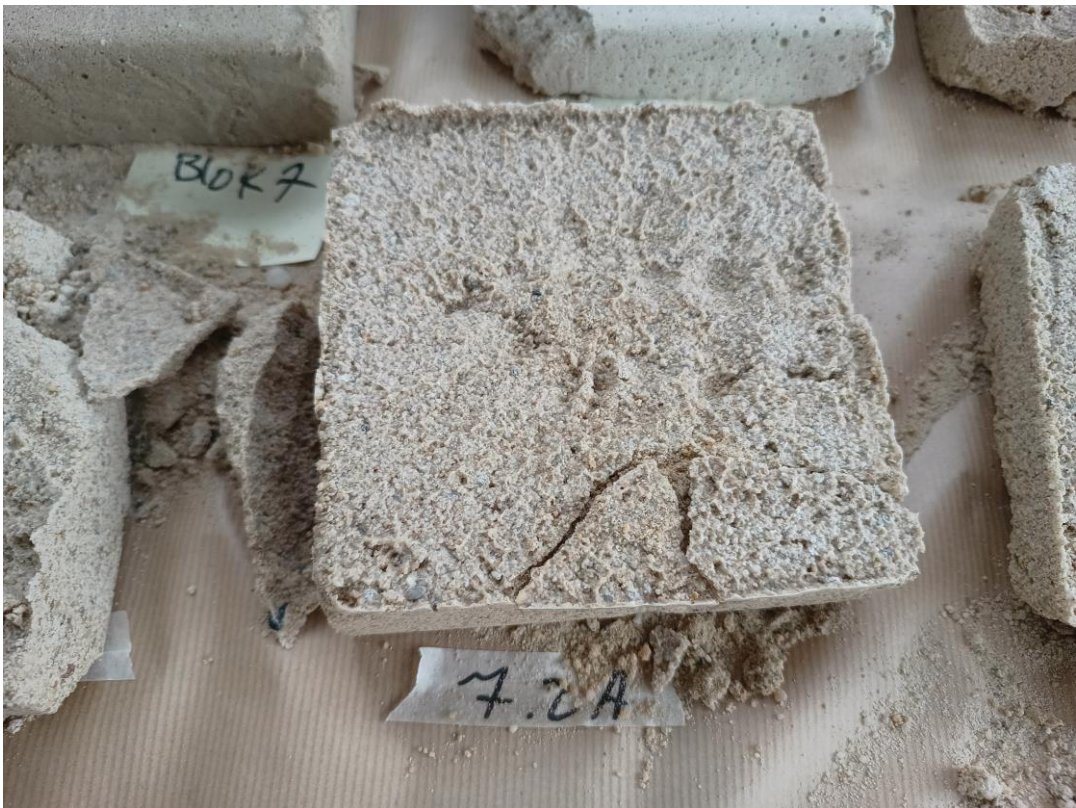




7.1b



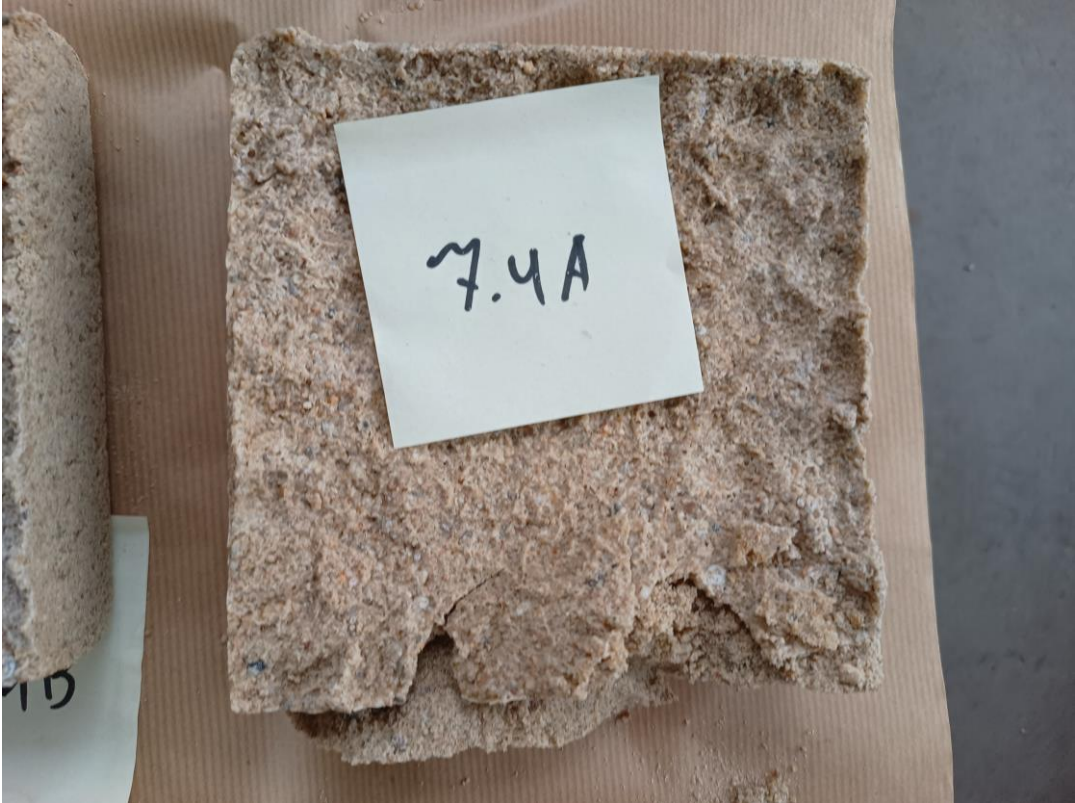
7.2a



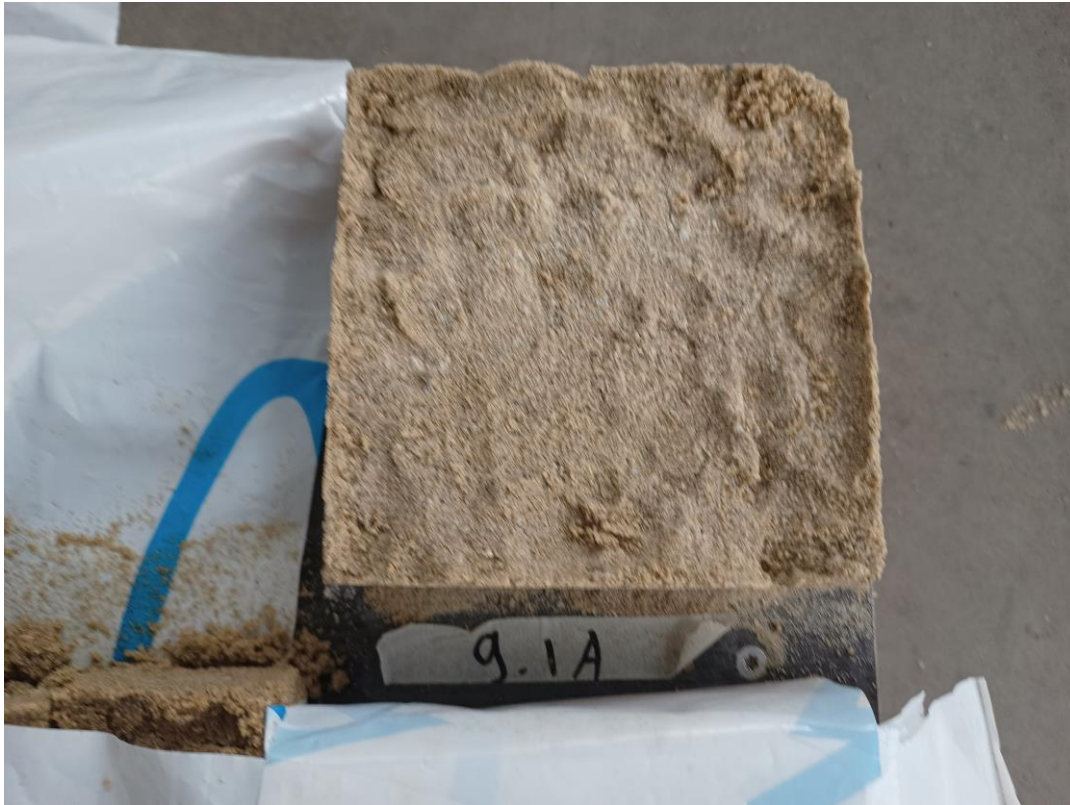
7.3a



7.4a



9.1a



9.2b



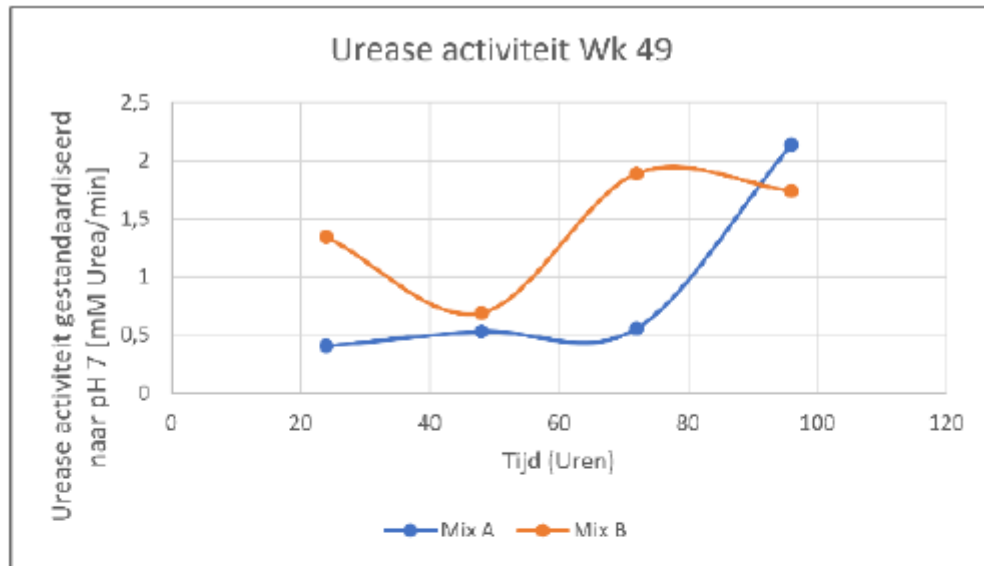
10.1a



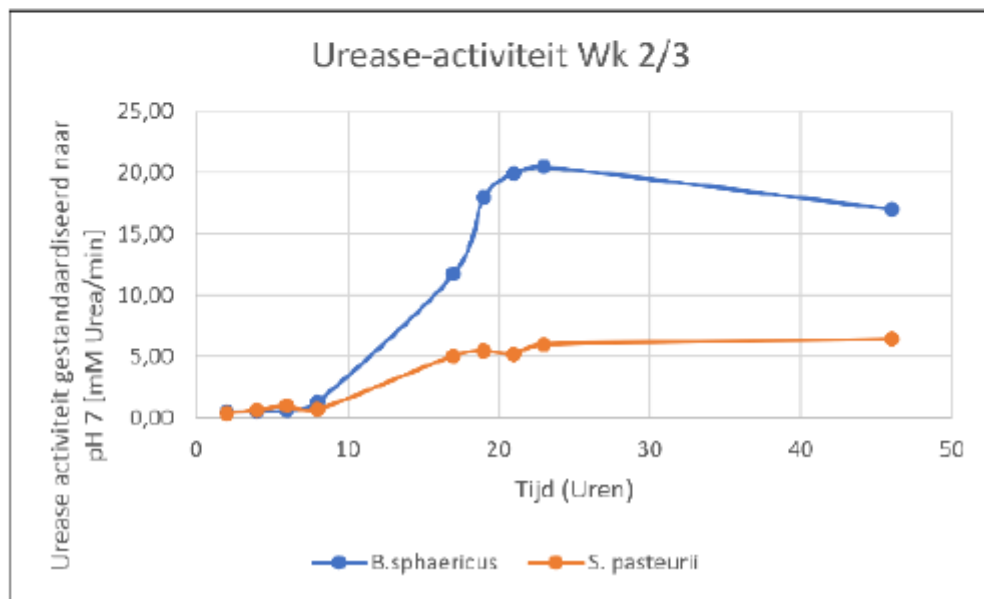
10.1c



## Bijlage 5 Urease activiteit ontwikkeling (WP3)



FIGUUR 10A: UREASE ACTIVITEIT VAN PROEFSTUKKEN 6.1 T/M 6.4. MIX A EN MIX B ZIJN EEN BACTERIEMENGGSEL VAN *B. SPHAERICUS* EN *S. PASTEURII* (1:1) UITGEVOERD IN DUPLO.



FIGUUR 10B: UREASE ACTIVITEIT VAN *B. SPHAERICUS* EN *S. PASTEURII* UITGEVOERD IN DUPLO

## Bijlage 6 Vergelijking urease activiteit versus resultaat proefstuk (WP3)

Bijlage 6: vergelijking urease activiteit

Comparisson between results						
Each experiment series is blocked bij a colour. <b>Better results are brighter.</b>						
Experiment nummer	Tijd in uur	Urease activiteit			Results/observations	
6.1 A	24	0,408	Met metakoline en KSM (mixture of S. pasteurii and B. Sphaericus)		Duplicates look and feel identical	
6.1 B		1,346				
6.2 A	48	0,530				
6.2 B		0,692				
6.3 A	72	0,556				
6.3 B		1,888				
6.4 A	96	2,139			Hardest duplo of series	Super white, could be due to gips forming
6.4 B		1,743				
7.1 A	24	3,611	Zonder fijn materiaal (metakoline/ kalksteenmeel) (mixture of S. pasteurii and B. Sphaericus)		All broken.	
7.1 B		4,866				
7.2 A	48	5,764				
7.2 B		5,324				
7.3 A	72	5,467				
7.3 B		5,268				
7.4 A	96	7,164				
7.4 B		7,737				
8.1 A	24	6,358	Zonder fijn materiaal (metakoline/ kalksteenmeel) (mixture of S. pasteurii and B. Sphaericus)		All broken	
8.1 B		5,870				
8.2 A	48	6,523				
8.2 B		7,247				
8.3 A	72	7,329				
8.3 B		6,923				
8.4 A	96	5,413				
8.4 B		5,794				
9.1 A	17	9,260	B. Sphaericus, t=17	Okay	Does not break when lifting in a corner. Only breaks when adding extra pressure	
9.1 B	17	12,201				
9.2 A	17	5,987	S. Pasteurii, t=17	still wet, not strong		
9.2 B	17	7,570				
10.1 A	23	-	B. Sphaericus, t=23		same as 9.1 AB, stronger than 10.1 C	
10.1 B	23	-				
10.1 C	23	-	S. Pasteurii, t=23			
10.1 D	23	-			Broken	
11.1 A	23	11,346	B. sphaericus Koud	Completely fallen apart	(contained zilverzand instead of previously used smaller particles)	
11.1 B	23	22,854	B. sphaericus Warm			
11.2 A	23	5,176	S. pasteurii Koud			
11.2 B	23	9,533	S. pasteurii Warm			



## Bijlage 7 Artikel Beton- & Staalbouw, 2022-04



Biobeton samples.

Tekst | Jerry Helmers Beeld Bioclear Earth

Het is tijd voor The Next Step

# Wordt **BIOBETON** hét alternatieve bouw materiaal van **DE TOEKOMST**?

Succesvolle innovaties ontstaan bijna altijd door de samenwerking tussen wetenschap en marktpartijen. Dat is niet anders bij biobeton. Volgens Dick Specht van innovatie- en adviesbureau Bioclear earth uit Groningen gaat het daarbij om het gezamenlijk creëren van waarde met de kracht van de natuur.



Biobeton kubussen; 1 met grind en 1 met miscanthus.



Biobeton proefstuk in de kubusmal.



Biobeton kubus.

“Sinds 2016 zijn we intensief op zoek naar alternatief bouw materiaal voor beton, omdat de bouw duurzamer moeten worden om de klimaatdoelstellingen te kunnen halen. Ons huidige onderzoek steunt op drie pijlers: we kijken naar commerciële haalbaarheid, duurzaamheid en technische kansen. Maar het is wel tijd om onszelf nu te koppelen aan de markt, daarom werken we nu samen met Strukton Civiel start-up & innovation centre. Het is tijd voor The Next Step.”

De overheid erkent de urgentie en steunt het onderzoek met de Topsector Energie-subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

## 1. ALS EERSTE: WAT IS BIOBETON EIGENLIJK?

“We vervangen traditioneel cement door bacteriën die calciëkristallen produceren waardoor zand en grind zich (toch) aan elkaar kunnen hechten. Deze biocementatie kan in de toekomst hét alternatief worden voor conventioneel cementbeton. Als dit zou lukken, dan maken we een grote stap vooruit want de conventionele cementproductie is nu nog verantwoordelijk voor ruim 8% van de wereldwijde CO<sub>2</sub>-productie. We zetten dus eigenlijk de kracht van de natuur aan het werk. En, we helpen het klimaat.”

## 2. HOE BELANGRIJK IS BIOBETON?

“Dat is nu – anno 2022 – nog een lastige vraag om te beantwoorden. Als ik aanklop bij marktpartijen om het procedé van ‘biobeton’ onder de aandacht te brengen, dan krijg ik altijd drie terechte vragen. Men wil weten: hoe sterk is het? Wat kost het? En... wat is de levensduur? Het ‘lastige’ is dat ik die vragen nu niet precies kan beantwoorden. Dat komt omdat we nog middenin het ontwikkelen innovatieproces zitten. We zijn nu vooral op zoek naar een match tussen het lab en de praktijk om te kunnen testen, te kunnen ontwikkelen en daarvan weer te leren.”

“Eigenlijk is de kern van mijn boodschap dat ik niet alleen een appèl doe op al die bouwbedrijven in Nederland maar ook op opdrachtgevers. Die zouden bijvoorbeeld best in hun aanbesteding voorwaarden kunnen opnemen dat de markt met alternatieven zoals biobeton moet gaan experimenteren. Al zou het in eerste instantie nog maar gaan om de aanleg van – bijvoorbeeld – een fietspad of wandelpad: daar zou je al met een paar meter biobeton kunnen werken. Dat zou ons al tevreden stellen. We kunnen dan in de praktijk testen hoe het biobeton standhoudt.”

“Overigens vind ik wel dat de overheid zich meer aan het procedé én de kansen van bio-

*‘We zijn nu vooral op zoek naar een match tussen het lab en de praktijk om te kunnen testen, te kunnen doorontwikkelen en daarvan weer te leren’*



Biobeton kubus proefstuk na het ontkisten.

beton zou kunnen conformeren. Immers, we ontvangen subsidie vanuit de overheid om te kunnen innoveren. Mooi. Zijn we blij mee. Maar diezelfde overheid is ook opdrachtgever in de GWW-sector. Geef het resultaat van al die innovatietrajecten rondom biobeton dan ook een kans zich in de praktijk te bewijzen.”

## 3. WORDT BIOBETON OOI DE STANDAARD?

“Niemand kan de toekomst voorspellen maar nu richten we ons vooral op niet-constructief bouw materiaal. Echter, in mijn optiek is het onvermijdelijk dat over een aantal jaren een alternatief bouw materiaal zoals biobeton een standaard kan worden. Dat is geen onlogische gedachte want linksom of rechtsom: er moet veel gebouwd worden en die klimaatdoelstellingen willen we met z'n allen toch halen!” ■



**Bioclear earth bv**

Rozenburglaan 13  
9727 DL Groningen  
The Netherlands

**T** +31 (0)50 571 84 55

[info@bioclearearth.nl](mailto:info@bioclearearth.nl)  
[www.bioclearearth.nl](http://www.bioclearearth.nl)