

Samenvattende rapportage

P2 - Van gietbouw naar prefab

Emissieloos bouwen

EMISSIELOOS BOUWEN

P2 Samenvattend rapport

0110
1010
0011

Tim Dijkmans

versie 1.0

13 maart 2024

Inhoud

1.	Openbare project tekst (uit laatste kwartaalrapportage)	3
1.1	Uitkomst	3
1.2	Partners	3
1.3	Samenvatting van het deelproject	3
1.4	Emissiereductie	5
2.	Deliverables	8
2.1	Gerealiseerde voortgang (uit laatste kwartaalrapportage)	8
2.2	Specificaties van de bereikte resultaten	9
2.3	Tot slot: het projectteam op de foto voor één van de resultaten	19

1. Openbare project tekst (uit laatste kwartaalrapportage)

1.1 Uitkomst

In 2023 zijn een losmaakbare wand en vloer voor een industrieel geproduceerd prefab beton casco gerealiseerd, waarmee de kracht van integrale optimalisatie van betonsamenstelling, proces en bouw is gedemonstreerd. Hiermee is minimaal 40% emissiereductie van zowel CO₂ als NO_x en herbruikbaarheid gerealiseerd op de bouwplaats ten opzichte van ter plaatse gestort beton. Bovendien worden duurzame en toekomstbestendige grondstoffen gebruikt, waar de sector ook in 2050 nog op kan rekenen.

1.2 Partners

BTE Groep bestaat uit acht betonbedrijven en één betontechnologisch centrum, elk met zijn eigen specialisme(n). Dankzij die diversiteit is BTE in 95% van alle bouwsectoren in West-Europa actief.

TNO is een onafhankelijk kennisinstituut, dat mensen en kennis verbindt om innovaties te creëren die de concurrentiekracht van bedrijven en het welzijn van de samenleving duurzaam versterken. Dat is onze missie en daar werken wij dagelijks aan.

Twee 'R' Recycling Groep is één van de oudste bedrijven in Nederland dat zich heeft gespecialiseerd in de recycling van steenachtige materialen. Al sinds 1980 spant de onderneming zich in om beton en metselwerk dat vrijkomt uit sloop te recyclen tot hoogwaardige materialen die opnieuw kunnen worden gebruikt in infraprojecten, utiliteitsbouw en zelfs woningbouw.

VBI. Als producent van innovatieve prefab vloersystemen biedt VBI industrieel maatwerk om samen met alle partijen in de keten te bouwen aan de toekomst.

Voorbij Prefab is een toonaangevende en innovatieve producent van duurzame prefab betonproducten. Met een duidelijke focus op twee markten, woningbouw en industrie.

PQ Silicas BV, onderdeel van PQ Corporation, is de leidende producent van silica producten, waaronder waterglas.

Delgromij is specialist in klei. Of het nu gaat om het winnen van klei of het toepassen ervan.

ENCI is een Nederlandse leverancier van cement en is onderdeel van de internationale grondstoffenleverancier Heidelberg Cement.

Cugla is een Nederlandse leverancier van hulpstoffen voor de productie van beton.

1.3 Samenvatting van het deelproject

In de bouwsector wordt 40% van de fijnstof emissies veroorzaakt door transport- en bouw materieel en 60% door bouwactiviteiten zelf¹. Industrieel prefab beton leidt tot reductie op de bouwplaats van fijnstof, CO₂ en NO_x door een afname van de transportbewegingen, mengen van grondstoffen en bewerking van materialen. Bij industriële modulaire bouw is enkel nog montage nodig op de bouwplaats zelf. Echter, bij de omschakeling van ter plaatse gestort beton naar prefab betonproducten, komt een andere uitdaging om de hoek kijken, de emissies van het beton zelf.

¹ CE Delft, Stofemissies in de bouw(keten), 2006

Bij veel prefab producenten, waaronder consortium partners Voorbij, VBI en BTE, is hun huidige productie proces al grotendeels geautomatiseerd. Bijvoorbeeld bij Voorbij is door het gebruik van BIM in combinatie met robotisering het materiaalverlies nihil. De combinatie van robotisering met aanpassingen in de mengsels heeft al geleid tot minstens 40% CO₂ reductie ten opzichte van de gangbare prefab beton productie. De huidige emissies van industriële prefab betonproducten worden voor meer dan 50% door het beton bepaald en de betrokken consortiumpartijen maken dan al gebruik van nieuwe snel uithardende mengsels met o.a. hoogovenslak in plaats van de standaard hoge-emissie Portlandcement (CEM I).

Alle in Nederland beschikbare hoogovenslak wordt al verwerkt door de betonindustrie, waardoor bij toename in gebruik, hoogovenslak van buiten Nederland moet worden geïmporteerd met juist extra emissies tot gevolg. De beschikbaarheid van hoogovenslak zal ook nog eens afnemen door wijziging in de staalproductie van TATA. Om de benodigde emissiereducties in de bouw te laten slagen is dus niet alleen een omslag nodig van ter plaatse gestorte betonmortel naar prefab beton, maar zal ook ingezet moeten worden op andere grondstoffen voor dit beton.

De beoogde doel van dit project was de demonstratie van een industrieel geproduceerd prefab beton casco (wand en vloer) in 2023, waarmee minimaal 40% emissiereductie en herbruikbaarheid worden gerealiseerd op de bouwplaats ten opzichte van ter plaatse gestort beton. Hierbij worden duurzame en toekomstbestendige grondstoffen gebruikt, waar de sector ook in 2050 nog op kan rekenen.

Alternatieve grondstoffen die in Nederland in grote hoeveelheid beschikbaar zijn en de potentie hebben om al dan niet in combinatie met elkaar de huidige Portlandcement en hoogovenslakken te vervangen in het industriële prefab proces zijn:

- Afgevangen fijnstof bij de verwerking van steenachtig bouw- en sloopafval, de zogenaamde fijne fractie. Deze fractie kan nuttig ingezet worden om het aandeel cement te reduceren.
- Klei, een hernieuwbare grondstof die door verhitting (calcineren) en chemische reacties met calciumcarbonaat (een restproduct bij het industrieel afvangen van CO₂) een alternatief is voor cement of hoogovenslakken.

Om dit te bereiken zijn vanaf het najaar 2021 tot en met december 2023 de volgende activiteiten uitgevoerd:

- Monitoren technische prestatie en impact:
 - o Opstellen Programma van Eisen voor de technische prestatie van het betonmengsel in industrialisatie toepassing
 - o Evaluatie van de geschiktheid van een nieuw betonmengsel voor toepassing in prefab vloeren en wanden
 - o Quickscan milieu-impact met eerste indicatie emissiereductie en milieu-impact
 - o Marktverkenning inclusief beschikbaarheid grondstoffen
- Verwerking grondstoffen en kwaliteitscontrole:
 - o Selectie en onderzoek kwaliteitsindicatoren (sleutel-eigenschappen) van de grondstoffen, die meetbaar zijn tijdens het verwerkingsproces van de (secundaire) grondstoffen
- Ontwikkeling bindmiddel- en betonsamenstelling:
 - o Selecteren kansrijke combinatie alternatieve grondstoffen voor optimale prestatie van bindmiddelen onder fabrieksomstandigheden

- Pilot (fabriekstrial) om een duurzaam casco te produceren. Na productie zijn de elementen van het casco ook beproefd en gemonitord om de werkelijke prestaties te bepalen.

De volgende resultaten zijn geboekt op het einde van het project:

- Er is met geschikte mengsels opgeschaald van mortelniveau naar betonniveau en deze mengsels zijn wat de vroege sterkte-ontwikkeling en verwerkbaarheid betreft passend voor de prefab betonindustrie. De beproefde mengsels zijn zowel van het LC3 type (met o.a. gecalcineerde klei, gecarbonateerde gerecyclede beton fines en cement) als van het geopolymeer type (met o.a. gecalcineerde klei en een activator). De geselecteerde mengsels resulteren in een lagere milieu-impact dan de *reguliere* (niet-groene) prefab mengsels voor vloeren en wanden waarin voornamelijk CEMI gebruikt wordt. Verder heeft het LC3 type mengsel een 40% lagere emissie dan de groene referentie van VBI vloeren en het geopolymeer type mengsel een 30% lagere emissie. Het LC3 type mengsel presteert vergelijkbaar als de nieuwe groene referenties van Voorbij wanden, maar dan zonder gebruik van schaarser wordende hoogovenslakken.
- Het LC3 type mengsel is met gecalcineerde klei en in sommige gevallen ook met gecarbonateerde gerecyclede beton fines gedemonstreerd in een aantal fabriekstrials. Bij Voorbij zijn 2 wanden gemaakt en bij VBI is een 130 meter aan kanaalplaatvloeren gestort. Bij BTE is een decoratief tafel element gemaakt. Deze elementen zijn beproefd en gemonitord in representatieve omgeving (binnen en op het tasveld).
- Deze mengsels zijn uitgebreid getest op eigenschappen die zowel op korte als lange termijn relevant zijn voor de wanden en vloeren toepassing (o.a. gebruik makend van de Eurocode).
- Eerste screening van Nederlandse kleien geeft mogelijkheden aan om deze in de toekomst in te zetten als vervanging van buitenlandse kleien. De ingeschatte beschikbare hoeveelheden zijn bescheiden ten opzichte van de huidige cement productie maar voldoende om het in de toekomst economisch aantrekkelijk te kunnen maken en bij te dragen aan emissie reductie²
- Carbonateren van de fijne fractie van gerecycled beton heeft de potentie CO₂ uitstoot te reduceren en in sommige bindmiddel combinaties ook extra reactiviteit te genereren. Door de grote hoeveelheden betonpuin die jaarlijks vrij komen is deze route economisch aantrekkelijk³
- Ondertussen zijn meer duurzame varianten van de activator haalbaar gebleken op labschaal en zijn additieven op labschaal onderzocht om de open tijd van de mengsels nog te verbeteren.

1.4 Emissiereductie

In de bouwsector wordt 40% van de fijnstof emissies veroorzaakt door transport- en bouwmaterieel en 60% door bouwactiviteiten zelf¹. Hiervan is 60% toe te rekenen aan de bouwplaats (bewerking materialen, verwaaid stof), 20% aan metaalbewerking en 20% aan productie van bouwmaterialen.

² zie ook conclusies achterliggende rapporten die ten grondslag liggen aan de handelingsperspectieven van het Betonakkoord en [www.delgromij.nl/nieuws/ Hoe lokale klei kan bijdragen aan emissieloos bouwen | Delgromij](http://www.delgromij.nl/nieuws/Hoe_lokale_klei_kan_bijdragen_aan_emissieloos_bouwen)

³ Marcel Bruin. *Binding CO2 bij hergebruik cementsteen*. Betoniek, 20 oktober 2023. [Binding CO2 bij hergebruik cementsteen \(betoniek.nl\)](http://betoniek.nl)

Bij de bouw van betonnen woningen wordt nog jaarlijks circa 75% in het werk gestort⁴, terwijl industrieel prefab beton leidt tot reductie op de bouwplaats van fijnstof, CO₂ en NO_x door een afname van de transportbewegingen, productie en bewerking van materialen. Als voorbeeld, de omschakeling van ter plaatse gestort beton naar kanaalplaatvloeren kan leiden tot 75% NO_x reductie op de bouwplaats⁵. Bij industriële modulaire bouw is enkel nog montage nodig op de bouwplaats zelf. Echter, bij de omschakeling van ter plaatse gestort beton naar prefab betonproducten, komt een andere uitdaging om de hoek kijken, de emissies van het beton zelf.

Bij veel prefab producenten, waaronder consortium partners Voorbij, VBI en BTE, is hun huidige productie proces al grotendeels geautomatiseerd. Bijvoorbeeld bij Voorbij is door het gebruik van BIM in combinatie met robotisering het materiaalverlies nihil. De combinatie van robotisering met aanpassingen in de mengsels heeft al geleid tot minstens 40% CO₂ reductie ten opzichte van de gangbare prefab beton productie. De huidige emissies van industriële prefab betonproducten worden nu veroorzaakt door: beton (circa 55%), staal (circa 25%), transport & montage bouwplaats (circa 8%) en productie op eigen terrein (circa 2%). De meeste winst is nu te behalen bij de productie van beton zelf.

De meest gebruikte cementsoort bij prefab beton bestaat hoofdzakelijk uit hoge-emissie Portlandcement (CEMI) omwille van de benodigde snelle uithardingstijd. Anderzijds, bij ter plaatse gestorte betonmortel wordt in Nederland voor het grootste deel lage-emissie hoogovencement (CEM III/B) gebruikt omdat snelle uithardingstijden daar niet cruciaal zijn. Voor CEM I zijn de NO_x uitstoot 1,44 g/kg en CO₂ uitstoot 0,87 kg/kg, dat is dubbel zo hoog dan voor CEM III/B waarbij de NO_x uitstoot 0,78 g/kg en CO₂ uitstoot 0,41 kg/kg bedragen⁶. Dus hoewel de omschakeling van de bouwplaats naar de prefab fabriek erg relevant is voor het reduceren van niet-afvangbare emissies op de bouwplaats gerelateerd aan het ter plaatse storten van beton, moet hierbij voorkomen worden dat de gemiddelde emissies in NL gepaard gaande met betonproductie omhooggaan bij het omschakelen naar volledige prefab betonproductie met CEM I.

Om dit te voorkomen wordt door consortiumpartijen ingezet op een nieuw snel uithardend mengsel met hoogovenslak. Alle in Nederland beschikbare hoogovenslak wordt echter al verwerkt door de betonindustrie, waardoor bij verhoging van gebruik in prefab industrie, hoogovenslak van buiten Nederland moet worden geïmporteerd met juist extra emissies tot gevolg. De beschikbaarheid van hoogovenslak zal ook nog eens afnemen door wijziging in de staalproductie van TATA. Om de benodigde emissiereducties in de bouw te laten slagen is dus niet alleen een omslag nodig van ter plaatse gestorte betonmortel naar prefab beton, maar zal ook ingezet moeten worden op andere grondstoffen voor dit beton.

De behaalde reductie van emissies in dit project is bekeken ten opzichte van de huidige groene referenties in de prefab producten van de partners Voorbij en VBI, waarin CO₂ emissies al significant gereduceerd zijn; deels door ontwerp optimalisatie en industrialisatie, deels door reduceren van CEMI cement gehalte. Ten opzichte van de huidige groene referenties van VBI vloeren, resulteert het aardvochtige LC3 type mengsel in 40% CO₂ reductie⁷ en het aardvochtige geopolymeer-type mengsel in 30%

⁴ CE Delft, Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw, 2013

⁵ Bolech, Jansen, Dröge, 2020. Stikstof door Bouwactiviteiten. Intern TNO Rapport

⁶ Eco-Invent database, geraadpleegd mei 2021

⁷ voor cementgebonden producten in fabrieksomgeving geproduceerd is de stikstofreductie evenredig

CO₂ reductie. Ten opzichte van de huidige groene referenties van Voorbij wanden, scoort het zelfverdichtende LC3 type mengsel met gecalcineerde klei vergelijkbaar, alleen dan zonder gebruik van hoogovenslak of vliegashoudend. Bij toevoeging van gecarbonateerde gerecyclede beton fines hierin dalen de emissies verder omdat ze niet alleen een deel van het cement kunnen vervangen maar intrinsiek ook een deel geïnjecteerde CO₂ hebben opgenomen tijdens de voorafgaande carbonatatie van de poeders. Het zelfverdichtende geopolymeer type betonmengsel (zonder hoogovenslak of vliegashoudend, maar met gecalcineerde klei) resulteerde in een verhoging van de emissies ten opzichte van de groene referentie, maar name door de hoge pastagehaltes die nodig waren om de gewenste verwerkbaarheid te bereiken. De onderzochte additieven om dit te verhelpen, blijken niet te werken.



Verplaatsen van kanaalplaatvloer uit nieuw emissie-arm betonmengsel met gecalcineerde klei tijdens fabriekstrial bij VBI

2. Deliverables

2.1 Gerealiseerde voortgang (uit laatste kwartaalrapportage)

VOORTGANG

Nr	Deliverable	Gereed (%)	Plandatum	Nieuwe datum (alleen bij wijziging)
1	Programma van Eisen voor de technische prestatie van het betonmengsel in industrialisatie toepassing	100%	Dec. 2021	
2	Validatieplan door Failure-mode en effect analysis (FMEA) en uitgewerkt plan voor geschiktheidsonderzoek	100%	Feb. 2023	
3	Evaluatierapport van de geschiktheid van een nieuw betonmengsel voor toepassing in prefab vloeren en wanden	100%	Dec. 2023	
4	Quickscan milieu-impact met eerste indicatie emissiereductie en milieu-impact	100%	Jun. 2022	
5	LCA-quick scan (met aparte waarden voor CO2 en MKI)	100%	Dec. 2023	
6	Marktverkenning inclusief beschikbaarheid grondstoffen en selectie potentiële nieuwe partners (producenten gecalcineerde klei en/of carbonaat(restromen))	100%	Dec 2022	
7	Concept economische haalbaarheid geïndustrialiseerde lage-emissie casco met het nieuw ontwikkelde betonmengsel	100%	Dec. 2023	
8	Levering labschaal hoeveelheden	100%	Nov. 2021	
9	Levering fabriekstrial hoeveelheden	100%	Okt. 2022	
10	Levering pilot hoeveelheden	100%	Apr. 2023	Sept 2023
11	Selectie kwaliteitsindicatoren grondstoffen (rapport)	100%	Dec. 2023	
12	Selectie kansrijke combinaties alternatieve grondstoffen	100%	Dec. 2021	
13	Mengselontwerp betonproducten: voor opschaling na pilot	100%	Dec. 2023	
14	Demonstratie-event	100%	Dec. 2023	

2.2 Specificaties van de bereikte resultaten

In deze paragraaf zijn de deliverables benoemd en is samenvattend beschreven wat er is gerealiseerd. De onderliggende rapportages, documenten en beschrijvingen zijn beschikbaar op de projectsite van TNO waarop de deelnemers hebben samengewerkt.

D1 - Programma van Eisen voor de technische prestatie van het betonmengsel in industrialisatie toepassing

De ontwikkelde mortels voor de prefab industrie hebben een hoge vroege sterkte nodig voor snelle productie en vervoer van de prefab elementen. De eisen die aan de betonmengsels worden gesteld voor Voorbij Prefab en VBI worden weergegeven in Tabel 1 en Tabel 2. In deze eerste experimentele fase van het onderzoek ligt de focus op de vroege sterkte opbouw van de mortels. Op basis van de gestelde eisen is gekozen voor een minimale druksterkte van 15 MPa en een minimale buigsterkte van 4 MPa, beiden na 1 dag uitharden, als richtwaardes bij het ontwerpen van mortels. In de volgende fasen van het plan voor geschiktheidsonderzoek (D2 & D13) wordt gekeken naar de opschaling naar en optimalisatie van betonmengsels. Hierbij zullen we samen met de engineers de gestelde eisen verder uitwerken in relatie tot mechanische eigenschappen na langere uithardingsperioden.

Tabel 1 – Eisen aan betonmengsel van Voorbij prefab.

Voorbij Prefab BV	Druksterkte voor beton (MPa)	
	Casco's	Alfen Kasten
8 uur	15	25
16 uur	15	25
28 dagen	45	67
Milieuklasse	XC1	XC4, XF3, XD1, XS1
Uiterlijk	Bij voorkeur grijze kleur	
Verwerkbaarheid	Zelf verdichtend beton	
Storten	Aanmaakwater op 25 °C	
Uitharding	Afgedekt bij 30 °C	
Huidige referentie	OPC met 60-80% GGBS	

Tabel 2 – Eisen aan betonmengsel van VBI.

VBI	Sterkte van mortel			
	Buigsterkte (MPa)		Druksterkte (MPa)	
Leeftijd	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
0.25 (uitgehard op 50 °C)	2.8	4.49	11.93	25.54
1 d	4.24	6.27	18.36	36.74
2 d	5	7.89	25.66	50.07
7 d	5.4	7.53	36.13	61.8
28 d	7	8.07	50	69.54
Milieuklasse	XC1 (90%)			
Verwerkbaarheid	Consistentieklasse C1 (aard vochtig)			
Storten	Slip-paver (vibration/compaction) methode			
Uitharding	Afgedekt (tot 50 °C)			
Huidige referentie	OPC			

D2 - Validatie plan door Failure-mode en effect analysis (FMEA) en uitgewerkt plan voor geschiktheidsonderzoek

Het validatieplan voor de beschouwde mengsels, gericht op (het prioriteren van) mechanische eigenschappen en duurzaamheid (*durability*) is gezamenlijk opgesteld door

betontechnologen en constructeurs en vormt onderdeel van de eindrapportage (D13). Er is met de partners besproken welke van de onderdelen van het geschiktheidsonderzoek binnen het tijdsbestek van het project passen en deze zijn uitgevoerd in een verbonden proevenprogramma waarbij Voorbij, VBI, BTE, ENCI en TNO betrokken zijn.

Tabel 3: Benodigde materiaal eigenschappen en proeven voor prefab betonnen wanden voor grondgebonden woningen

Nr.	Eigenschap	Proef
1	Druksterkte	NEN-EN 12390-3
2	Treksterkte	NEN-EN 12390-6
3	Buigtreksterkte	NEN-EN 12390-5
4	Dwarskracht ⁸	Geen generieke norm – product afhankelijk
5	Langeduursterkte	Geen norm
6	Aanhechting wapening	NEN-EN 10080 ⁹

Tabel 4: Benodigde materiaal eigenschappen en proeven voor prefab betonnen vloerplaten voor grondgebonden woningen

Nr.	Eigenschap	Proef
1	Druksterkte	NEN-EN 12390-3
2	Treksterkte	NEN-EN 12390-6
3	Buigtreksterkte	NEN-EN 12390-5
4	Dwarskracht	Geen generieke norm – product afhankelijk ¹⁰
5	Langeduursterkte	-
6	Aanhechting wapening	NEN-EN 10080 ¹¹
7	E-modulus	NEN-EN 12390-13
8	Rek	Geen norm – a.d.h.v. rekstrookjes bij de buigtrekproef
9	Krimp	NEN-EN 12390-16
10	Kruip	NEN-EN 12390-17
11	Vervorming	Geen norm - impliciet a.d.h.v. bij beproeving op stijfheid (E-modulus)

De duurzaamheidsbeschouwing in hoofdstuk 3 heeft nadrukkelijk alleen betrekking op toepassing in milieuklasse XC1. De betonmengsels kunnen dus niet zonder nadere validatie toegepast worden in andere milieuklassen.

Uit de duurzaamheidsbeschouwing zijn een aantal aspecten naar voren gekomen die aandacht behoeven:

1. Weerstand tegen carbonatatie (cf. CUR Aanbeveling 48:2010).
2. Mogelijk effect van carbonatatie op de stabiliteit van reactieproducten van bindmiddelcombinatie 1 en daarmee op de mechanische eigenschappen van beton dat daarmee vervaardigd is.
3. Mogelijk effect van vrij sulfaat na verharding van beton met bindmiddelcombinatie 1, hetzij omdat niet alle sulfaat uit de activator gebonden wordt, dan wel sulfaat

⁸ In geval van uitsparingen (deuren/ramen)

⁹ NEN-EN 10800 is in Nederland niet officieel aangewezen; bij de toepasbaarheid van deze proeven worden vraagtekens gezet bij interpretatie en schaalbaarheid

¹⁰ Voor kanaalplaatvloeren gebruikt VBI NEN-EN 1168+A3 – Vooraf vervaardigde betonproducten– Kanaalplaatvloeren– Annex J

¹¹ NEN-EN 10800 is in Nederland niet officieel aangewezen; bij de toepasbaarheid van deze proeven worden vraagtekens gezet bij interpretatie en schaalbaarheid

nageleverd wordt door het UFB of omdat sulfaat weer vrij komt omdat de gevormde verbindingen niet stabiel zijn.

4. Optreden van uitbloei en/of cryptoflorescentie door Na-carbonaten en mogelijk Na-sulfaten bij gebruik van bindmiddelcombinatie 1.

D3 - Evaluatie van de geschiktheid van een nieuw betonmengsel voor toepassing in prefab vloeren en wanden

Tijdens het project is een groot geschiktheidsonderzoek gestart voor binnen toepassing in Voorbij wanden en VBI vloeren op basis van het validatieplan (D2) bij BTE, VBI, Voorbij, ENCI en TNO. Hiervoor zijn bijna 400 proefstukken geproduceerd en zowel mechanische als duurzaamheidseigenschappen getest.

Voor wat betreft mechanische eigenschappen wijken de geopolymeer mengsels duidelijk af ten aanzien van relaties uit de Eurocode, de LC3 mengsels in mindere mate ook. Dit betekent dat in een vervolgfase 'design by testing' van belang zal zijn. Eerste dwarskracht resultaten op een geschaald element (1 meter) voor het LC3 type mengsel van de wand worden verder nog geïnterpreteerd, maar wijzen naar vergelijkbaar gedrag met de referentie voor de beproefde geometrie en condities. Eerste dwarskrachtresultaten rechtstreeks op een VBI kanaalplaatvloer met een LC3 type mengsel wijzen op verhoogd dwarskrachtvermogen en hogere hechting tussen wapening en beton. In een vervolgfase moet dit verder worden onderzocht om de betekenis ervan voor ontwerpregels te achterhalen.

Voor de lange duur testen blijken de LC3 mengsels afwijkend voor weerstand tegen carbonatatie (lager) en sterkte-ontwikkeling in relatie tot carbonatatie (neemt ongeveer 5% af). De stabiliteit en voorspelbaarheid hiervan en belang voor het ontwerp moeten nog verder worden onderzocht. Er is ook aanvullend preliminair onderzoek gedaan voor buitentoepassing, maar aangezien dit buiten de scope van dit project is, was dit enkel als indicatie voor eventueel verder onderzoek.



Figuur 1: Proefstukken geschiktheidsonderzoek Voorbij & VBI

D4 & D5 - Quickscan milieu-impact met eerste indicatie emissiereductie en milieu-impact

TNO heeft een rekensheet opgesteld waarmee indicatieve berekeningen kunnen worden gemaakt van de milieu-impact en kosten van de mengsels (per kuub beton, inclusief invoer mogelijkheden voor transport en productie). Hierin zijn ook de referenties van VBI en Voorbij gemodelleerd. Deze referenties zijn in eerste instantie de meest duurzame fabriekseigen betonmengsels (per kuub) van de prefab producten (ambitie partners). Met de rekensheet zijn twee type nieuwe mengsels geëvalueerd, een waterglas-gebaseerd metakaolien mengsel en een LC3 type mengsel. Het eerste beeld dat ontstaat is als volgt:

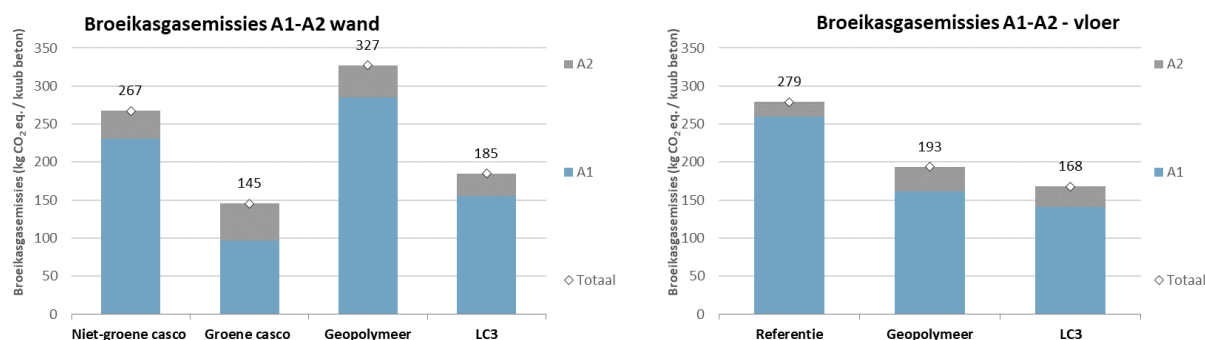
- het LC3-type mengsel heeft aanzienlijke CO₂-emissie reductie (ongeveer 40% ten opzichte van de prefab referenties) en ook een redelijke MKI reductie (minder dan 40%) op het moment dat de huidige secundaire grondstoffen als hoogovenslak en vliegas van ver uit het buitenland moeten komen omwille van schaarste.
- het waterglas heeft een dusdanige impact dat bij de huidige metakaolien-waterglas mengsels noch voor de vloeren, noch voor de wanden voldoende reductie wordt bereikt in milieu-impact (ook in perspectief van de kosten). Bij de wanden is de impact van het waterglas het hoogst (grote hoeveelheid nodig voor zelfverdichtend beton bij afwezigheid van een geschikte superplast)

Op basis van bovenstaande indicaties worden zijn de volgende extra activiteiten ingezet:

- ontwikkeling activator met lagere impact, o.a. door gedeeltelijke vervanging K door Na (PQ)
- onderzoek additieven voor de LC3 type en geopolymeer type mengsels die de huidige pasta behoefte van de zelfverdichtende beton varianten kunnen verlagen

De uitkomsten van de LCA quickscan voor de uiteindelijke mengsels waar de fabriekstrials mee zijn uitgevoerd worden weergegeven in de grafieken hieronder. Bij het

schrijven van dit samenvattende rapport ontbreken hier nog de laatst geproduceerde mengsels met gecarbonateerde gerecyclede beton fines.



Figuur 2: Broeikasgas emissies voor de wand en vloer met de LC3 en geopolymeer type mengsels. Aannames: prefab productieproces blijft gelijk. Houdt rekening met transport (toekomstscenario import hoogovenslak)

D6 - Marktverkenning inclusief beschikbaarheid grondstoffen en D7 - Concept economische haalbaarheid geïndustrialiseerde lage-emissie casco met het nieuw ontwikkelde betonmengsel

Voor een eerste inschatting van de economische haalbaarheid is met name gekeken naar de technische haalbaarheid en beschikbaarheid van lokale grondstoffen om het economisch rendabel te maken. Verder behoeven de nieuwe grondstoffen weinig aanpassingen in een prefab productie proces, behalve extra silo's.

Gecalcineerde klei – technische haalbaarheid

TCKI heeft, in opdracht van TNO, een viertal kleisoorten gekarakteriseerd. Rivierklei uit de Willemspolder, Westerwaldklei en Ieperiaanse klei zijn op basis van deze karakterisatie geselecteerd en bij TNO gecalcineerd op laboratorium schaal. De calcinatie heeft potentiële reactiviteit verhoogd (meer 'amorfe aandelen'). De hoeveelheid die in oplossing gaat is nog niet zo hoog als bij de huidige Franse metakaolien, maar er gaat in ieder geval wat in oplossing en bij de Willemspolder klei zijn dat vooral Al en Ca, daar waar het bij de andere kleien vooral Al en Si zijn. In dit onderzoek zijn de calcineringscondities nog niet geoptimaliseerd en is dit slechts op laboratorium schaal uitgevoerd. De gecalcineerde kleien zijn middels twee quickscans getest door TCKI, TNO en Voorbij in kleine mortelreeksen van het LC3-type. Daaruit is te zien dat bij de 1-daagse sterkte, enkel de commerciële gecalcineerde klei uit Frankrijk voldoende presteert. Na 7 dagen trekken de lokale op labschaal gecalcineerde kleien richting de prestatie van de commerciële gecalcineerde klei en op 28 dagen is zijn de prestaties nagenoeg gelijk. De waterbehoefte van de op labschaal gecalcineerde kleien ligt iets hoger en de maling is nog niet optimaal, maar er is dus potentie. ENCI heeft inmiddels deze kleien zelf ook gekarakteriseerd (voor én na calcinering) en geeft aan dat ze van medium kwaliteit (iets lagere reactiviteit) zijn in een cementgebonden systeem in vergelijking met hun referentie gecalcineerde kleien uit naburige landen. Daarbij wordt opgemerkt dat de calcium-rijke Westerwald klei mogelijk een andere bindmiddelsysteem behoeft dan de calcium-arme kleien.

Gecalcineerde klei – beschikbaarheid

In een toekomst scenario is tenminste een paar honderdduizend ton klei per jaar nodig om een betekenisvol alternatief te kunnen worden. Delgromij geeft aan dat beschikbaarheid erg afhankelijk is van vergunningen en verbruik van bijvoorbeeld ook de

keramische industrie. De onderzochte klei uit de uiterwaarden is hernieuwbaar en sommige delen worden niet volledig gebruikt door de keramische industrie, maar perspectief op een paar honderden duizenden tonnen per jaar kan niet vanzelfsprekend gegarandeerd worden.

De combinatie van de onzekere hoeveelheden die beschikbaar zouden zijn en medium technische kwaliteit in vergelijking met bronnen in het nabije buitenland, betekent dat er op dit moment nog niet ingezet wordt op investering voor commerciële opschaling van deze specifieke klei, maar dat die wel op het netvlies blijft op het moment dat beschikbaarheid van buitenlandse kleien in het gedrang komt voor partijen zoals ENCI die wel inzetten op gecalcineerde klei an sich.

Gecarbonateerde gerecyclede beton fines – technische haalbaarheid

De fijnste poeders gerecycled beton zijn verkregen door de in dit project verder ontwikkelde Mangeler installatie van TweeR. Deze poeders gedragen zich in verschillende bindmiddel combinaties als weinig tot niet reactief, eerder als vulstof die kalksteenmeel kan vervangen. Na carbonatatie is de reactiviteit van deze poeders meetbaar verhoogd. Daardoor kunnen gehalten van duurdere primaire componenten zoals cement of gecalcineerde klei in bindmiddelcombinaties met gecarbonateerde gerecyclede beton fines verlaagd worden. De recycling technologie speelt een grote rol om het materiaal geschikt te maken voor efficiënte carbonatatie met voldoende opbrengst. De cementpasta moet zo goed mogelijk gescheiden worden van de toeslag voor het verkrijgen van een goede chemische samenstelling. De gerecyclede betonfines verkregen met de Mangeler van TweeR zijn door ENCI onderzocht en van goede technische kwaliteit bevonden. Op labschaal vertoont deze gecarbonateerde batch reactiviteit en draagt vooral bij in de vroege sterkte ontwikkeling. In de fabrieksschaal trial bij Voorbij en BTE is dit nog niet eenduidig aangetoond omdat hiervoor een eerder geproduceerde batch van gerecyclede beton fines gebruikt is (van voor toetreding tot het project) waar nog enkele ton van beschikbaar waren.

Gecarbonateerde gerecyclede beton fines – beschikbaarheid

Jaarlijks komt in Nederland 12 Mton betonpuin vrij. In theorie kan daar ongeveer 5-10% fines van gerecycled en gescheiden worden om te carbonateren. Dit zijn voldoende hoeveelheden om het economisch rendabel te kunnen maken.

Additieven om het pasta gehalte te kunnen verlagen

In het kader van beschikbaarheid van grondstoffen, wordt naast de beschikbaarheid van klei en gerecycled beton, ook het gebruik van additieven verkend om het gebruik van impactvolle primaire grondstoffen zoveel mogelijk te beperken. Additieven zoals superplasten kunnen bijvoorbeeld de behoefte aan pasta gehalte verlagen.

Cugla is in januari 2023 bij het consortium gekomen om onderzoek uit te voeren naar mogelijke additieven voor het LC3-type en geopolymeren mengsel in het kader van zelfverdichtend beton. Zij hebben de grondstoffen volgens hun systematiek gekarakteriseerd en hebben de baseline vastgelegd van de bindmiddelen om verwerkbaarheid en verhardingsgedrag op aan te passen door het optimaliseren van de combinatie van pasta-gehalte, korrelgrootteverdeling en sulfaat-correctie. Voor de geteste additieven is verbetering zichtbaar, maar onvoldoende om het pastagehalte dusdanig te verlagen dat milieu-impact significant reduceert. Optimalisatie van korrelpakking in combinatie met de additieven zou hier nog kunnen helpen.

Alternatieven voor dure activatoren (geopolymeer type mengsels)

PQ is in 2022 bij het consortium gekomen om een activator te ontwikkelen uitgaande van minder impactvolle uitgangsmaterialen dan tot nu toe gebruikt. Inmiddels heeft PQ resultaten waaruit blijkt dat het haalbaar is om een goedkopere en milieuvriendelijkere activator te produceren met minder zuiver zand, met een andere alkali samenstelling waarbij op pastaniveau vergelijkbare verwerkbaarheid en uithardingstijden werden behaald als met de huidige activator. Op basis hiervan is mortelonderzoek ingezet met deze nieuwe activatoren waarbij de gewenste mechanische eigenschappen ook werden behaald. Op basis hiervan is een reeks opgesteld om het effect van de activatoren op uitloging en uitbloei indicatief te testen. Uit deze testen volgt voorsnog dat geen verschillen worden waargenomen in sterkte en uitbloei voor de verschillende activatoren zolang wordt toegewerkt naar een voldoende dichte microstructuur. Er zijn wel verschillen in benodigde hoeveelheden tav verwerkbaarheid. Er zijn nog geen exacte kosten en milieudata beschikbaar, daar is PQ mee bezig, tot dan worden verouderde data gebruikt, maar ook met deze data, wordt al een flinke stap gezet in het duurzamer en betaalbaarder maken van de activator, tot wel 50%. Voor zelf verdichtende mengsels bij de wanden blijft het pasta gehalte te hoog om significante reductie te verwezenlijken met het geopolymeer mengsel ten opzichte van de groene referentie ondanks het vervangen van de activator. De emissie en kosten reductie van het geopolymeer type mengsel van de vloer komt met de aangepaste activator wel in de buurt van het LC3 type mengsel van de vloer en wordt hiermee een haalbaar alternatief.

Samengevat kijkt het consortium positief naar bovenstaande resultaten en is dit voldoende argumentatie voor de partijen om door te gaan met onderzoek en opschaling met grondstoffen als gecalcineerde klei en gerecyclede gecarbonateerde beton fines. Voorsnog wordt wel ingezet op gecalcineerde klei uit buurlanden maar in de toekomst komt ook Nederlandse klei in aanmerking. Dit is weergegeven in onder andere onderstaande publicaties over klei en gecarbonateerde gerecyclede beton fines:

- [Hoe lokale klei kan bijdragen aan emissieloos bouwen | Delgromij](#)¹²
- [Binding CO2 bij hergebruik cementsteen \(betoniek.nl\)](#)¹³

D8, D9 & D10 - Levering fabriekstrial & pilot hoeveelheden

Van zowel de commercieel beschikbare gecalcineerde klei, als de andere benodigde grondstoffen voor het beton zijn voldoende hoeveelheden beschikbaar/te verkrijgen voor fabriekstrials en het validatie onderzoek. Voor de fijne fractie van gerecycled beton waren voorlopig nog geen fabriekstrial hoeveelheden gewenst omdat we focus hebben gelegd op laboratoriumschaal onderzoek naar de bijdrage van de fijne fractie als vulstof dan wel als onderdeel van het bindmiddel. Tot nu toe lijken de meeste testresultaten te wijzen in de richting van een functie als vulstof van de fijne fracties. Laboratorium hoeveelheden zijn geleverd afkomstig van een jonge vloerplaat en een oude vloerplaat waar op dit moment oplosproeven en mortelonderzoek loopt met BTE Ascem en TweeR. TweeR heeft testen uitgevoerd voor opschaling van hun recycling techniek met minder slijtage en meer opbrengst. ENCI is vanaf januari 2023 gestart met grootschaliger onderzoek naar het reactiever maken van de fijne fractie uit gerecycled beton door deze te carbonateren. Zij hebben hiervoor van TweeR labschaal hoeveelheden ontvangen. Daarnaast heeft TweeR hun machines aangepast om nu ook hoeveelheden te kunnen aanleveren voor fabriekstrials. ENCI heeft in juni 2023 fabriekstrial hoeveelheden van een eigen gecarbonateerde fijne fractie batch aangeleverd aan de prefab producenten die

¹² www.delgromij.nl/nieuws/ *Hoe lokale klei kan bijdragen aan emissieloos bouwen | Delgromij*

¹³ Marcel Bruin. *Binding CO2 bij hergebruik cementsteen*. Betoniek, 20 oktober 2023. [Binding CO2 bij hergebruik cementsteen \(betoniek.nl\)](#)

dit op grotere schaal wensen te testen (in eerste instantie Voorbij en BTE zijn hiermee bezig).

Voor de gecalcineerde klei zijn fabriekstrial hoeveelheden geleverd van een commercieel beschikbaar type uit Frankrijk. Ondertussen zijn laboratorium schaal hoeveelheden van lokale klei geleverd voor verkenning van potentie in Nederland. Deze kleien zijn verder door ENCI onderzocht.

D11 – Selectie kwaliteitsindicatoren grondstoffen

Voor de gecalcineerde klei is vooral het totaal gehalte aan kaolinitische klei versus illitische/smectitische klei een goede indicator die rechtstreeks in verband staat met benodigde calcinerings temperatuur en reactiviteit na calcineren.

Voor de gerecyclede beton fines is vooral het gehalte calcium versus silica en het gehalte amorf cementsteen een goede indicator voor efficiëntie van de carbonatatie.

D12 – Selectie kansrijke combinaties alternatieve grondstoffen

De meest kansrijke combinaties die in dit project zijn geselecteerd voor gecalcineerde klei en gerecyclede beton fines zonder hoogovenslak of vliegash, zijn bindmiddelcombinaties van het type LC3 (cement, gecalcineerde klei, kalksteenmeel) en van het geopolymeer type (gecalcineerde klei, alkali activator). Belangrijkste selectiecriteria hiervoor waren 1-daagse sterkte voor prefab producten, emissiereductie en economische haalbaarheid.

D13 – Mengselontwerp betonproducten

Op schaal van de betonmenger in de fabriekslaboratoria, halen de LC3-type mengsels de gewenste prestatie, zowel op verwerkbaarheid als sterkte, en deze zijn in 2023 opgeschaald naar fabriekstrials zowel bij Voorbij als VBI. Ook is dit mengsel uitvoerig getest op mechanische eigenschappen en een aantal duurzaamheidseigenschappen (zie D3).

Voor wat betreft de geopolymeer type mengsels op basis van metakaolien, is bij het zoeken naar een zelfverdichtend of verdichtingsarm mengsel zoveel activator nodig, dat we op mortelschaal verder gegaan zijn met optimaliseren van de activator en het zoeken naar een additief. Voor de vloeren met aardvochtige mengsels zijn minder problemen met verwerkbaarheid en is het mengsel aantrekkelijk omwille van de hoge en snel bereikte beginsterkte zonder extra temperatuur curing.

D14 – Demonstratie-event

Voorbij heeft bij wijze van demonstratie in april succesvol twee wanden geproduceerd van het LC3 mengsel (een met en een zonder gecarbonateerde gerecyclede beton fines) voor in hun nieuwe fabriekshal. Naast het succesvol verloop is het belangrijkste aandachtspunt hieruit gebleken dat de open tijd zeer kort is. Het onderzoek van Cugla helpt om hier desgewenst de gepaste additieven voor te gebruiken.

VBI heeft een 130 meter lange baan kanaalplaatvloer gestort met het LC3 mengsel op 10 november. Hieruit zijn succesvol kanaalplaten gezaagd en verder beproefd.

BTE heeft een kruk/tafel gemaakt met een mengsel met gecarbonateerde gerecyclede beton fines.

Deze fabriekstrials zijn, samen met resultaten uit het geschiktheidsonderzoek, gepresenteerd op het Beton-Event op 16 november 2023 met als doel het bereiken van het bredere publiek uit de betonsector (ongeveer 100-150 aanwezigen). Een vergelijkbare presentatie is ook gegeven op het Emissieloos Bouwen Event op 22 november 2023.



Presentatie op het Beton Event 16 november 2023



Stand op het Emissieloos Bouwen Event 22 november 2023



Fabriekstrial bij Voorbij



Fabriekstrial bij VBI

2.3 Tot slot: het projectteam op de foto voor één van de resultaten



Foto genomen op het consortium overleg van 5 oktober 2023 – voor een wand gestort met het LC3 mengsel uit dit project