

BETON

NAAR

HOOGWAARDIG BETON

Eindverslag

Interreg
Vlaanderen-Nederland
Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling



RWA

RECYCLING
WEGENBOUWMATERIALEN
AMSTERDAM B.V.



SGS



vito

INNOVA
TIECEN
TRUMDU
URZAAM
BOUWEN

KU LEUVEN



SmartCrusher bv
We close the circle



Eindrapport Beton naar hoogwaardig beton

Projectwebsite: <https://upconcrete.vito.be/nl>

samenvatting zoals op Interreg e-loket:

Wereldwijd wordt naar schatting jaarlijks meer dan 25 miljard ton beton gebruikt. De milieu-impact van betonproductie is groot, aangezien voor de aanmaak van beton naast granulaat (zand en stenen) ook cement nodig is. Dat is niet alleen energie-intensief, maar het zorgt ook voor een hoge uitstoot van CO₂. Daarbij komt jaarlijks een grote hoeveelheid bouw- en sloopafval vrij.

De betoncirkel is niet gesloten omdat het gehydrateerde cement niet gescheiden wordt van het granulaat, wat resulteert in een poreus materiaal van lagere kwaliteit. Een betere scheiding van beton in zijn samenstellende bestanddelen is daarom nodig. In dit project werden verschillende innovatieve technologieën onderzocht en ontwikkeld waardoor zuiverdere scheiding van de verschillende fracties mogelijk werd: microgolfbehandeling van beton, om het te drogen en daarna de fracties beter te scheiden, slimme breektechnologie namelijk 'smartcrusher' gevolgd door aangepaste scheiding 'SmartRefiner' in de verschillende bestanddelen. Dit zorgt ervoor dat zand en granulaat daarna opnieuw kunnen worden ingezet en het cement, na hittebehandeling, terug aangewend kan worden als bindmiddel. Deze innovatie biedt een oplossing voor het groeiende aantal klanten dat op zoek is naar hoogwaardige (beton)producten met een zo laag mogelijke milieu-impact.

Daarnaast wordt onderzoek gevoerd naar alternatieve en hoogwaardige betontoepassingen. Zo werden weefsels gebruikt in de plaats van staal om beton te wapenen (textielgewapend cement). Het gebruik van textielwapening laat toe dunnere elementen te produceren. Hierdoor is er een lager materiaalverbruik, en wordt het probleem van betonrot verholpen. Deze technologie zal in de komende jaren in verschillende gebouwen gedemonstreerd worden. De hittebehandeling van het gerecycleerde cement kan uitgevoerd worden in een microgolfoven. Het is zelfs mogelijk het cement daarin te sinteren en zo een cement te maken dat evenwaardig is met nieuw cement. Momenteel is die optie echter te duur en technologisch te moeilijk, zodat gekozen wordt om op te warmen tot maximaal 700°C, hetgeen ook de oorspronkelijke doelstelling was. De gedehydrateerde cementfractie kan gebruikt worden als component van een nieuwe binder. Het onderzoek toont aan dat twee pistes zeker interessant zijn, namelijk de combinatie van een hoeveelheid nieuw cement met gerecycleerd cement (dus vervanging van hoogovenslak door gerecycleerd cement is mogelijk), combinatie van gerecycleerd cement met hoogovenslak (zonder nieuw cement). Hierdoor bereikt men ook een CO₂ reductie van ongeveer 500 kg per ton cement (of juist, binder) die gebruikt wordt. Alkaliactivatie van het gerecycleerde cement bleek minder interessant dan oorspronkelijk gedacht. Ten slotte werd aangetoond dat het gebruik van gerecycleerde zand en grove fracties, de mechanische eigenschappen van het beton zeker niet negatief beïnvloeden. Een beton, gemaakt op basis van bijna uitsluitend gerecycleerde fracties, kan dus een druksterkte bereiken vergelijkbaar met beton gemaakt van nieuwe fracties.

Technische samenvatting op einde project

Doelstelling

Tijdens dit project werd een methode op punt gesteld om beton 100% te recyclen. De doelstelling was om 1) het breekproces ontwikkeld door 'Smart Crusher' van labo- naar piloot of zelfs industriële schaal te brengen, en om de beton cirkel te sluiten, 2) een opwerking te doen van de fijnste fractie, die vooral cement bevat, naar een nieuwe binder, zodat 3) een nieuw beton kan gemaakt worden met vergelijkbare eigenschappen als het oorspronkelijke beton, mits hergebruik van alle componenten van het oorspronkelijke beton. Daarnaast beseffen we dat we meer met minder zullen moeten doen en om voor structurele toepassingen minder beton te moeten gebruiken kan staal wapening door textiel wapening vervangen worden.

In dit verslag wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste resultaten geboekt tijdens het project. We verwijzen ook graag naar de documentaire die over het project gemaakt werd en de opname van de online demodag. (te vinden via de website

Het 'SmartCrusher' proces

Het beton dat zal gerecycleerd worden is vaak te nat om een goede scheiding toe te laten. Na het voorbreken kan het beton in een eerste microgolfoven gedroogd worden om een betere scheiding van de verschillende fracties mogelijk te maken (de fijne fracties kleven dan minder aan de grovere). Tijdens de testen werd opgemerkt dat het beton ook deels kon gebroken worden door het ontstaan van interne druk door water dat verdampt en door verschillen in thermische uitzetting (Figuur 1). Het verschil in thermische uitzetting van de granulaat en cementfasen is immers vrij groot (50-300%). Door het gebruik van microgolven worden spanningen gecreëerd intern in de betonmassa waardoor scheuren en breuken ontstaan langsheen de fasegrenzen. Daarnaast wordt door de opwarming van (gebonden en ongebonden) water ook een interne druk gecreëerd die fragmentatie bevordert. Ook het dehydrateren van het cement, waardoor het zijn bindende eigenschappen verliest, draagt bij tot een doorgedreven scheiding van beton in zijn samenstellende bestanddelen. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat 'jong' beton (vb 7 dagen oud) eerst verder zal uitharden in de microgolfoven en dus sterker zal worden ipv zwakker.



Figuur 1 Links Effect van microgolven op het breken van beton. Zhao et al. © 2017 American Society of Civil Engineers Rechts microgolfoven met transportband waarop de betonbrokstukken gedeponeerd worden.

Het 'Smart Crusher' proces bestaat uit het vermalen van beton in een aangepaste kaakbreker, zodat alle componenten van het beton gescheiden kunnen worden, namelijk de grove granulaten, het zand en het cement. Voor het beton in de Smart Crusher kan, wordt het gebroken met voorbreker tot stukken van

maximaal 40 mm. Daarna worden metalen via een magneet eruit gehaald. Nu kan het naar de Smart Crusher waar door een speciale maalmethode de fracties eerder van elkaar gewreven worden dan gebroken. Hierna wordt de grove fractie (> 4 mm, FreeGravel) eruit gezeefd. De rest gaat naar de SmartRefiner. Daarin wordt eerst het zand (>250 micron) afgescheiden. De fijnere fractie kan dan nogmaals in twee fracties gescheiden worden. De typische limieten zijn 125 en 63 micron.

Tabel 1 invloed van microgolfoven drogen op het afscheiden van fijne fracties (fines content) na deSmartCrusher.

Sample	Water absorption (%) (EN 1097-6)	Particle density (OD) (g/cm ³) (EN 1097-6)	Los Angeles factor (%) (EN 1097-2)	Fines content (< 4 mm) (%)	HCP content in fines (< 4 mm) (%)
CBS limestone aggregates (6/14)	1.0	2.64	17.0	-	-
CBS reference RCA – untreated	4.7 (> 4 mm) 9.7 (< 4 mm)	2.34 (> 4 mm) 2.08 (< 4 mm)	21.9	21	31
CBS RCA MW 200°C	4.6 (> 4 mm) 10.2 (< 4 mm)	2.35 (> 4 mm) 1.93 (< 4 mm)	24.0	28	37
CBS RCA MW 300°C	4.8 (> 4 mm) 10.4 (< 4 mm)	2.33 (> 4 mm) 2.04 (< 4 mm)	23.9	35	35



Figuur 2 Zij aanzicht van de aandrijving van de SmartCrusher.

De grootte van de fracties die afgescheiden worden kan aangepast worden, en dat laat toe om afhankelijk van het soort beton dat gerecycleerd wordt en de latere toepassing van de afgescheiden fracties, een optimalisatie te doen. De fijnste fractie (<63 micron) bevat het meeste cement (ca. 50 %). Het cement bestaat enerzijds uit gereageerd, dus gehydrateerd cement en anderzijds uit nog niet gereageerd cement. Het gehydrateerd cement is niet meer reactief en moet dus bewerkt worden om het terug als binder te kunnen inzetten (zie verder ‘opwerken fijne fractie’). De verschillende fracties gaan daarna naar een silo voor stockage (Figuur 4) en vanwaaruit ze terug kunnen afgewogen worden voor het maken van nieuw beton. Bij de twee deelnemende betonproducenten werden verschillende technologieën uitgetest om de gerecycleerde fracties terug te kunnen doseren.

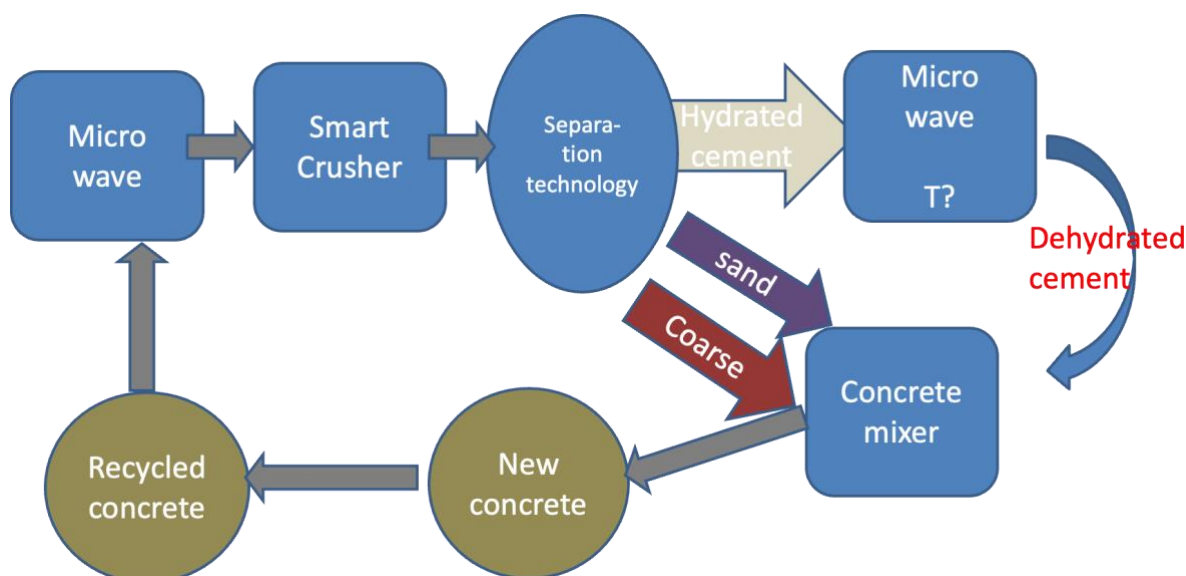


Figuur 3 Smart Refiner. Links, aanvoer van de fractie < 4 mm via een transportband en 1^{ste} scheidingsstap. Rechts: afscheiding van fijnste fractie



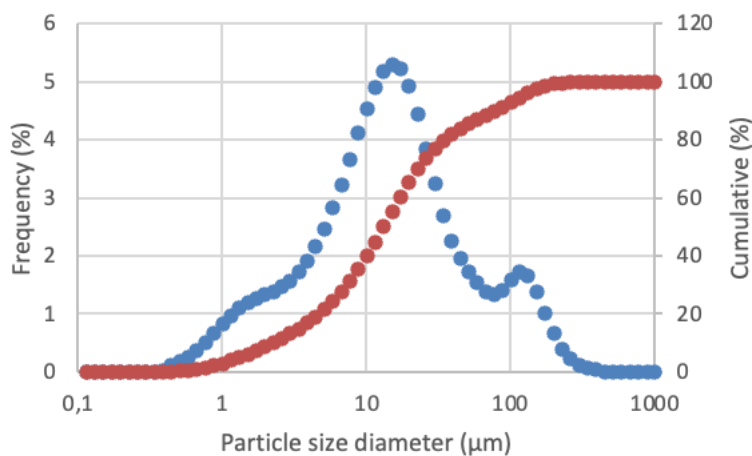
Figuur 4 Silo's om de verschillende gerecycleerde fracties in op te vangen

Aangezien het uiteindelijke proces meer inhoudt dan enkel het breken of vermalen van beton, werd het proces 'Smart Liberator' genoemd. Alternatieven voor het 'Smart Crusher' proces (dus enkel het vermalen) werden onderzocht, zoals elektrodynamisch breken, maar deze bleken allemaal nog in een te vroeg stadium van ontwikkeling te zijn om de stap naar een pilootinstallatie te kunnen zetten. Het Smart Crusher proces werd uiteindelijk van laboschaal tot op industriële schaal verwezenlijkt dankzij de samenwerking met partner RWA, die extra financiering hiervoor had. Dit liet ook toe om tijdens het project verder in te zetten op de scheiding van de fijne fractie, waardoor de SmartRefiner kon ontwikkeld worden.



Figuur 5 Het circulaire proces waarbij beton vermalen en gescheiden wordt, om na een opweringsstap van het gehydrateerde cement terug beton te kunnen produceren.

Naast de SmartRefiner werden de mogelijkheden van 'Dust Cloud separation' (ontwikkeld in het FLAME project) onderzocht bij partner VITO. Het bleek hiermee mogelijk te zijn een zeer fijne fractie af te scheiden (kleiner dan ca. 10 micron) om te gebruiken als vulstof in beton om hoge sterkte beton te maken.

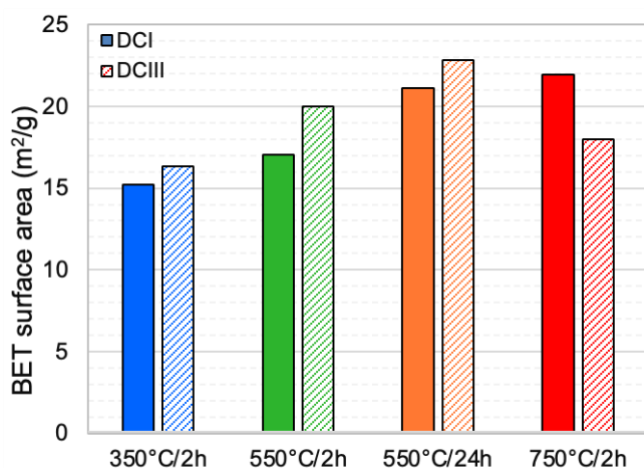


Figuur 6 trimodale deeltjesgrootte verdeling van de fijnste fractie (<63 micron).

Nadelen van het huidige proces :

Slechts ongeveer 50% van het cement wordt teruggevonden in de fijnste fracties. Een deel blijft nog aan de andere fracties kleven. Deze scheiding kan eventueel nog verbeterd worden maar dat kost meer energie tijdens het scheiden. Er moet dus afgewogen worden wat het voordeligste is. Aangezien deze afweging sterk afhangt van het soort beton dat gerecycled wordt, van de energiekost en de kost van nieuw cement, kon er geen algemeen geldend model voor gemaakt worden. Anderzijds werd aangetoond dat nieuw beton gemaakt uit gerecycleerde fracties minstens even goed is als wanneer het zou gemaakt zijn uit nieuwe grondstoffen. Dat betekent dat de beperkte 'vervuiling' van grove granulaten en zand door o.a. cement dat er blijft aan kleven, niet nadelig is voor de eigenschappen van het beton dat ermee geproduceerd werd.

Een ander nadeel is dat het gedehydrateerde cement een zeer groot specifiek oppervlak heeft, en daardoor ook meer water nodig is om een goede verwerkbaarheid van het cement te verkrijgen (Figuur 7).

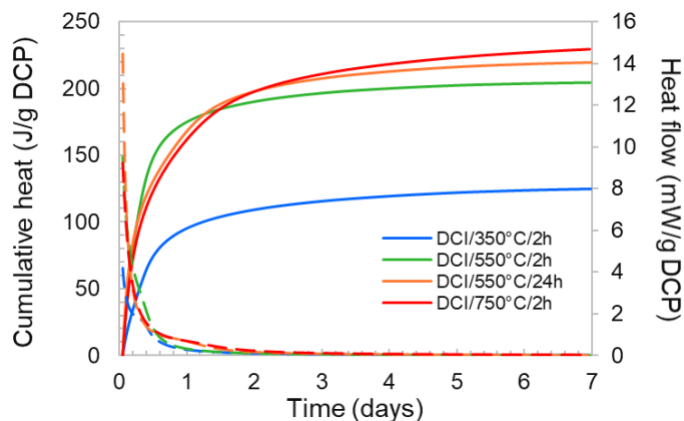


Figuur 7 Specifiek oppervlak van gedehydrateerd cement (als BET oppervlak), als functie van de thermische behandeling. De beste temperatuur om het gehydrateerde cement terug reactief te krijgen, met zo weinig mogelijk CO₂ uitstoot is 550°C, maar dan is het specifiek oppervlak ook maximaal.

Opwerking fijne fractie (en selectie welke best).

Dehydratatie

De fijnste fractie (<63 micron) bevat ca 50 % gehydrateerd cement. Om hiervan terug een binder te maken moet deze fractie gedehydrateerd worden bij hoge temperatuur. Beneden 400 °C gaat al een groot deel van het gebonden water uit de structuur, maar de reactiviteit van het materiaal blijft laag (Figuur 8, blauwe curve, reactiviteit vergelijkbaar met niet thermisch behandeld materiaal). Boven 450°C is Portlandiet gedehydrateerd en stijgt ook de reactiviteit aanzienlijk (rode, oranje en groene curven).



Figuur 8 reactiviteit (isotherme calorimetry bij 20°C) van gedehydrateerd cement, bij verschillende temperaturen. Het niet thermisch behandelde gehydrateerd cement heeft een beperkte reactiviteit tussen 50 en 100 J/g.

Microgolfoven proces.

Een doelstelling van het project was om de opwerking van het gerecycleerde cement in een microgolfoven te doen omdat dan groene (elektrische) energie kon gebruikt worden. Aangezien voor dit proces een temperatuur nodig is van boven 500°C, moesten speciale voorzieningen getroffen worden. (Figuur 9)



Figuur 9 Microgolfoven met alumina containers om gehydrateerd cement te verhitten tot boven 500°C.

De microgolfoven werd aan de binnenzijde thermisch geïsoleerd. Er werd gebruik gemaakt van containers om het poeder in te verhitten zodat het niet in contact komt met de transportband. De snelheid van de microgolfoven werd verlaagd (nieuwe motor) zodat de behandeling in 1 passage door de microgolfoven kon gebeuren. Figuur 10 toont het verhitte poeder na doorgang door de microgolfoven. Intern loopt de temperatuur op tot boven 700°C.



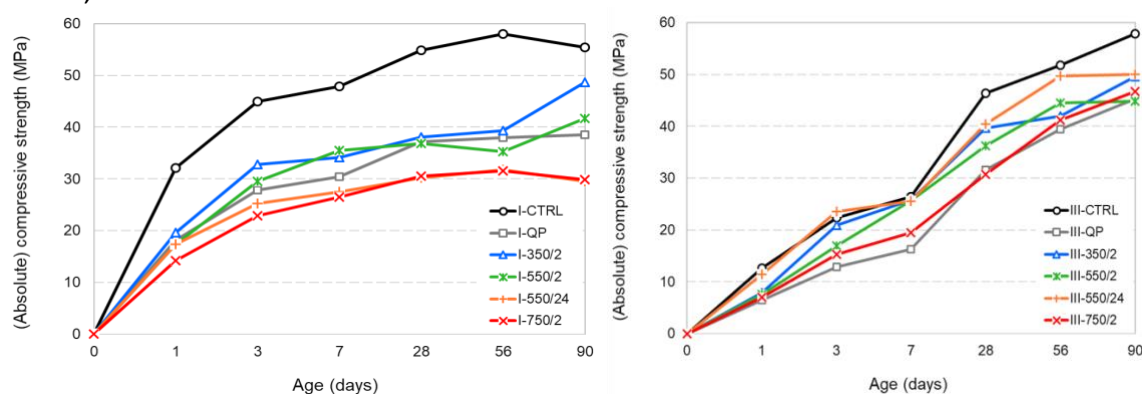
Figuur 10 gedehydrateerd cement in een bakje dat net door de microgolfoven gegaan is. Binnenin is de temperatuur opgelopen tot boven 700°C (gloeiende massa).

De stappen die nog noodzakelijk zijn om het microgolfoven proces verder te optimaliseren zijn opgenomen in een verslag dat teruggevonden kan worden op de website 'Optimalisatie van de (demo-)microgolfinstallatie voor microgolfondersteund breken en dehydratatie van betonpuin'.

Productie beton met gerecycleerde fracties

Er werden verschillende opties onderzocht om het gedehydrateerde cement te gebruiken als een nieuwe binder. De eerste optie was om tot lage temperatuur op te warmen (beneden 400°C, in dit geval 350°C) en via alkali activatie het deels gedehydrateerd cement te activeren. Dit levert echter beton met lage sterkte en deze optie werd dus niet verder weerhouden.

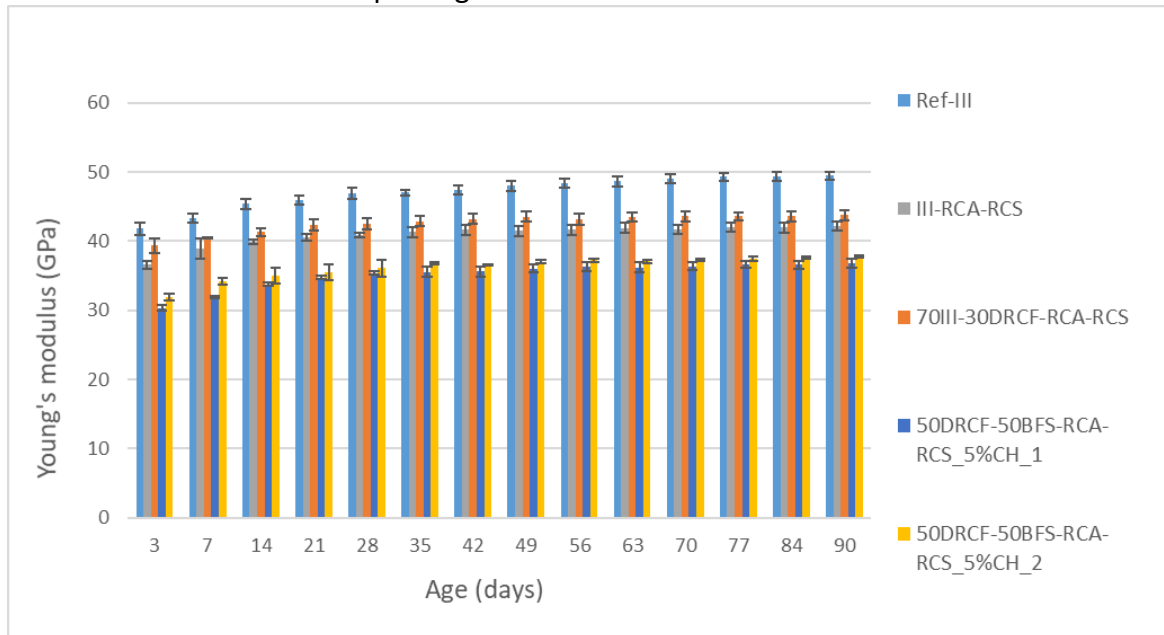
De tweede mogelijkheid is het gerecycleerde cement te gebruiken als gedeeltelijk vervangmiddel van het oorspronkelijke cement (CEMI of CEMIII). Hierbij is nog de keuze om het te dehydrateren beneden (350°C) of boven 450°C (dehydratatie van portlandiet). De laatste optie levert volgens de hydratatiwarmte (zie Figuur 8) een reactiever materiaal op. De sterkte wordt echter niet erg beïnvloed door de dehydratati temperatuur (zie Figuur 11). Op deze figuur is REF III de referentie (zwarte lijn), dus zonder gerecycleerde fractie in de binder. Deze wordt vergeleken met binders waarin een deel van de oorspronkelijke binder, 30% vervangen werd door gerecycleerd, gedehydrateerd cement. Indien men puur portland cement (CEMI, linker figuur) gebruikt als binder en men vervangt 30% door gerecycleerd materiaal dan krijg men een duidelijk verminderde sterkte, soms zelfs meer dan 30%. Indien men vertrekt van CEMIII (rechter figuur) dan benadert men wel de referentie, zeker bij het geval van dehydratatie bij 550°C, 24h.



Figuur 11 Links : effect van vervanging van 30 % CEMI door gedehydrateerd cement. Rechts: effect van vervanging van 30 % CEMIII door gedehydrateerd cement. De zwarte curve is de referentie, QP is kwarts poeder, als inert materiaal ter controle.

De andere optie die bestudeerd werd is een volledige vervanging van portland cement. Het gedehydrateerde cement werd in een 50/50 verhouding gemengd met hoogovenslak (dat ook gebruikt wordt in CEMIII). Om de reactiviteit op te drijven werd nog 5% portlandiet toegevoegd. Deze combinatie geeft een bevredigende sterkte zoals uit Figuur 12 te zien is. In deze figuur werden ook resultaten van Figuur 11 hernomen ter vergelijking. Hierbij is dus 70III-30DRCF-RCA-RCS de binder waarbij 30% van het cement vervangen is door gerecycleerd, gedehydrateerd cement. 50DRCF-50BFS-RCA-RCS_5%CH is de binder waarbij 50% gerecycleerd, gedehydrateerd cement gebruikt werd in combinatie met hoogovenslak en 5% portlandiet. Van deze laatste werden twee reeksen gemaakt met lichtjes verschillende verwerkbaarheid om na te gaan of de resultaten reproduceerbaar waren. Uit de resultaten kan men

besluiten dat de vervanging van 30% van CEMIII door gerecycleerd, gedehydrateerd cement bevredigende sterktes geeft. De binder zonder nieuw cement geeft een lagere sterkte maar dit materiaal is nog steeds bruikbaar voor zeer veel toepassingen.



Figuur 12 Young's modulus van beton met verschillende binders. REF III is de referentie, 70III-30DRCF-RCA-RCS is een binder waarbij 30% van het cement vervangen is door gerecycleerd, gedehydrateerd cement. 50DRCF-50BFS-RCA-RCS_5%CH is een binder waarbij 50% gerecycleerd, gedehydrateerd cement gebruikt werd in combinatie met hoogovenslak en 5% portlandiet.

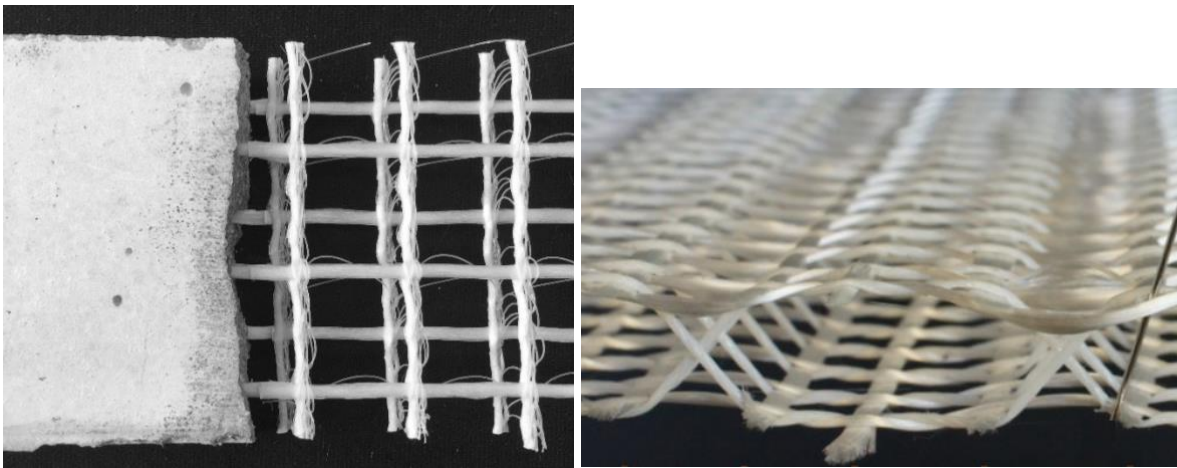
CO₂ reductie

Een belangrijke reden voor het weren van nieuw cement in beton is de reductie van de CO₂ emissies. Bij de productie van cement komt ongeveer 600 kg/ton CO₂ vrij (gemiddelde voor Europa). Bij de recyclage en dehydratatie van de fijne fractie komt ongeveer 22 kg/t CO₂ vrij, rekening houdend met gebruik van groene stroom. Bij het gebruik van 5% portlandiet komt er 30 kg/ton binder CO₂ vrij. Door het weren van nieuw cement in beton kan men dus een reductie van 600 kg/t naar 52 kg/t binder bekomen. Hierbij moet men wel rekening houden met de verminderde sterkte, dus komt men op ca 70 kg/t voor de binder zonder nieuw cement en vergelijkbare sterkte.

Deze uitstoot reductie werd ook berekend in de online applicatie.

Textiel gewapend beton.

Het gebruik van textielgewapend beton heeft twee voordelen. Ten eerste kan textiel niet roesten zoals staal, zodat betonrot vermeden wordt. Vandaag wordt voor gewapend beton steeds een extra dikke buitenlaag beton voorzien. Deze extra laag is echter niet nodig voor structurele doeleinden, maar enkel om het staal te beschermen tegen de corrosie. Door textielwapening te gebruiken wordt deze laag dus overbodig en kunnen structurele betonelementen veel slanker uitgevoerd worden. In Figuur 13 links wordt een voorbeeld gegeven van textiel gewapend beton (TRC textile reinforced concrete). Rechts een voorbeeld van 3D textiel. Het voordeel van 3D textiel is dat beide lagen met elkaar verbonden zijn door stevige textielvezels ipv met enkel de cementmatrix, die zwak is in trek. Typisch worden namelijk 2 lagen textiel gebruikt om voldoende wapening te verkrijgen.



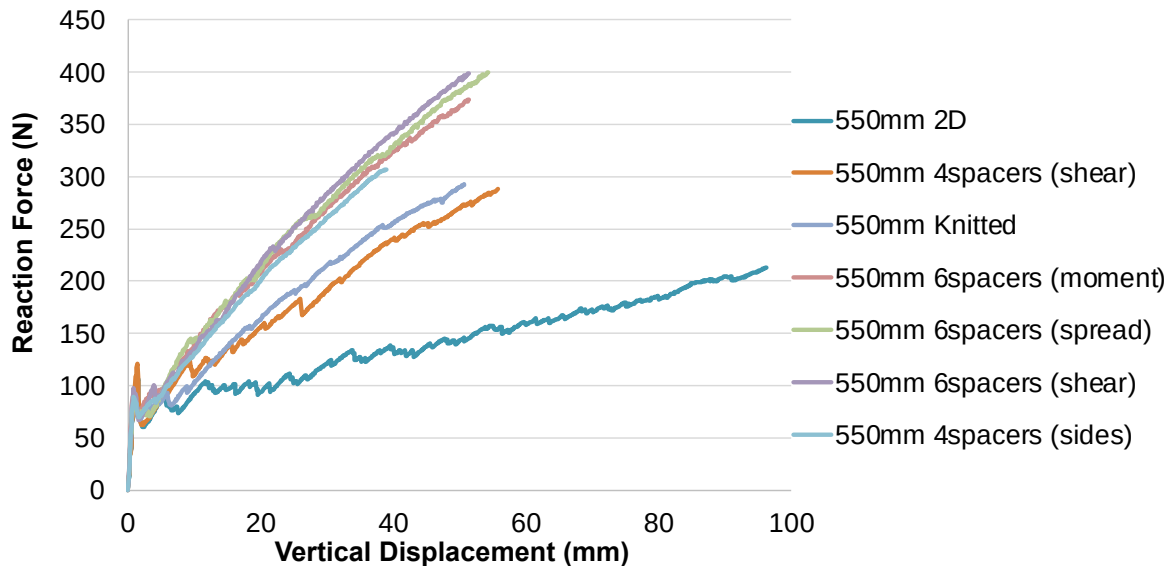
Figuur 13 Links voorbeeld van textielwapening. Aan de rechterkant steekt het textiel uit om een idee te geven over het soort textiel dat gebruikt wordt. De maaswijdte is ongeveer 1 cm. Rechts: 3D textiel

Bij aanvang van het project werd aangenomen dat het type textiel een grote invloed zou hebben op de eigenschappen van de composiet. Gaandeweg werd echter duidelijk dat de verankering tussen beide lagen belangrijker was dus werd daaraan meer aandacht besteed. Angezien 3D textiel moeilijk te bekomen is (en duur is) werd een alternatieve manier van verankering uitgewerkt zoals te zien is in Figuur 14 links. De positie van de verankering is echter van groot belang dus werd een studie hieraan besteed.



Figuur 14 Links verankering van 2 textiellagen Rechts proefstukken met textielwapening voor mechanische testen.

Door de verankering goed te kiezen kan de kracht die nodig is om een proefstuk te breken bijna verdubbelen. Dat wil dus ook zeggen dat het proefstuk 2 keer zo grote krachten kan opnemen.



Figuur 15 invloed van verankering van de textiellagen. De onderste curve is het geval zonder verankering. Door de verankering goed te plaatsen kan maximale kracht die het element kan opnemen met een factor 2 toenemen.

Barrières voor de invoering van de nieuwe technologie

Er werd tenslotte ook onderzoek gedaan naar de barrières voor het vermarkten van nieuwe koolstof-arme technologieën en mogelijke aanbevelingen voor bedrijven en de overheid. 14 sleutelmaatregelen werden geïdentificeerd om de lage koolstofcement en beton innovatie door te voeren. 3 zijn voornamelijk afhankelijk van bedrijven (Business development; Product design; Talent management). 5 zijn politiek gedreven: wettelijke ondersteuning; aankoop proces; Recyclage doelstellingen; Standaarden en normen; en Training en educatie. 6 zijn gemengd: bewustwording, openheid over CO₂ uitstoot; samenwerking en coördinatie; investeringen; technische ontwikkelingen; gebruik van middelen. Aanvullend zijn 66 specifieke submaatregelen en acties geïdentificeerd om deze transitie te sturen, inclusief aanbevelingen voor bedrijven en de overheid.

Besluit

Op het einde van het project is een installatie beschikbaar die op industriële schaal beton terug kan scheiden in de samenstellende delen (grind, zand, en fijne fracties die cement bevatten). Naast het slim breken van beton werd ook het slim scheiden van de fracties ontwikkeld. Alle fracties kunnen terug ingezet worden om hoogwaardig beton te maken. Het gehydrateerde cement kan gedehydrateerd worden. De ideale temperatuur hiervoor is 500-600°C. Dit gedehydrateerd cement kan dan in combinatie met nieuw cement of met hoogovenslak een nieuwe binder vormen. Deze laatste combinatie levert dan een binder op met een minimale CO₂ uitstoot. De dehydratatie van cement is mogelijk in een microgolfoven. Dit proces bleek moeilijker opschaalbaar te zijn naar industriële schaal dan verwacht en moet nog verder opgeschaald worden.