

BETON

NAAR

HOOGWAARDIG BETON

Interreg

Vlaanderen-Nederland

Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling



RWA

RECYCLING
WEGENBOUWMATERIALEN
AMSTERDAM B.V.



vito



KU LEUVEN



SmartCrusher bv

We close the circle



MEAM bvba
Industriepark Centrum-Zuid 3060
3530 Houthalen-Helchteren, Belgium

info@meam.be

BE 0839 346 344
www.meam.be

1 (11)

Rapport over 'Optimalisatie van de (demo-)microgolfinstallatie voor microgolfondersteund breken en dehydratatie van betonpuin Beton naar hoogwaardig beton', in kader van WP6

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 hitte behandeling 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.

WP6: Optimalisatie van de (demo-)microgolfinstallatie voor microgolfondersteund breken en dehydratatie van betonpuin

Ir. Jules Vermeiren, Dr. Nicole Dilissen, Dr. Vincent Goovaerts, Ir. Lena Kaipia, Prof. Dr. Ir. Jef Vleugels, Ir. Carlo Groffils

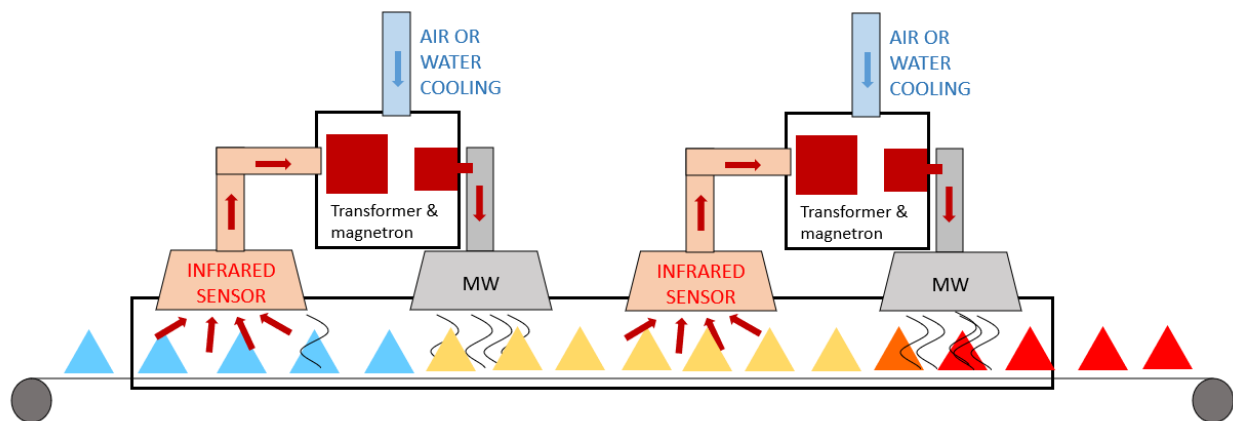
In het project “Beton naar hoogwaardig beton” werd de toepasbaarheid en opschaling van microgolftechnologie bestudeerd voor microgolfondersteund breken en dehydrateren van betonpuin. Microgolfondersteund breken houdt in dat het betonpuin eerst door een microgolfoven gaat, voor het in de breker terecht komt. De bedoeling is dat de microgolfbehandeling het betonpuin reeds verzwakt zodat een betere en energetisch efficiëntere scheiding van aggregaten, zand en cement mogelijk wordt tijdens het breken. Microgolfondersteund dehydrateren betekent dat microgolffenergie gebruikt wordt om de gehydrateerde cementstructuur op te warmen (tot bv. 600°C) en zo (deels) om te zetten in reactieve minerale fasen die hydraulische eigenschappen bezitten

Voor microgolfondersteund breken werden twee verschillende methodes werden bestudeerd: een niet-destructieve en een destructieve methode. De niet-destructieve methode werd ook opgeschaald, het opschalen van de destructieve methode viel buiten de mogelijkheden van dit project. Microgolfdehydratatie van betonpuin werd eerst op kleine schaal getest. Opschalingstests voor dehydratatie werden uitgevoerd met dezelfde machine die geoptimaliseerd werd voor de niet-destructieve breekmethode (MEAM Dry 32M).

§0 Werkingsprincipe van de continue microgolfinstallatie

Figuur 1 geeft schematisch de werking van de continue microgolfinstallatie weer: het (koude) product wordt op een transportband binnengeleid in een tunnel van magnetrons. Infraroodsensoren meten de temperatuur van het inkomende product, deze gegevens worden gebruikt om de magnetrons aan te sturen. Wanneer de temperatuur nog niet hoog genoeg is, zal de volgende magnetron aangezet worden, zodat het product verder opgewarmd wordt. Wanneer het product de benodigde temperatuur reeds bereikt heeft, zal de volgende magnetron niet in werking treden. De MEAM Dry 32M, die gebruikt werd voor de experimenten binnen het BnB-project, heeft 16 magnetrons die elk 2 kW vermogen kunnen leveren, de microgolftunnel is een 4-tal meter lang.

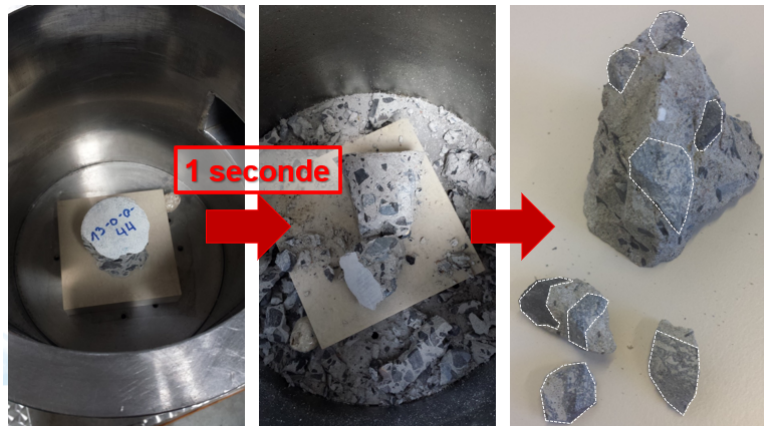
Bij het omzetten van elektrische energie naar microgolf-energie, komt warmte vrij. Magnetrons (en transformatoren) moeten daarom gekoeld worden: hetzij via lucht, hetzij via waterkoeling. Wanneer luchtkoeling gebruikt wordt, kan de opgewarmde koellucht over het op te warmen product gestuurd worden, als dusdanig kunnen de warmteverliezen van de transformatoren en magnetrons gerecupereerd worden. Aangezien de dehydratatietemperaturen voor cement vrij hoog liggen (>200°C), werd voor een watergekoeld systeem gekozen. Dit zorgt voor een betere koeling van de magnetrons, maar de warmteverliezen kunnen hiermee niet rechtstreeks gerecupereerd worden.



Figuur 1

§1 Destructief microgolffondersteund breken

De destructieve methode voor microgolffondersteund breken beoogt de partiële of volledige vrijzetting van de aggregaten uit de betonmatrix. Door het gebruik van microgolven bij hoog vermogen worden intern in de betonmassa spanningen gecreëerd waardoor scheuren en breuken ontstaan langsheen de fasegrenzen, hierdoor worden de verschillende producten zoals zand en aggregaten sterk verzwakt. Daarnaast wordt door de opwarming van (gebonden en ongebonden) water ook een interne druk gecreëerd die de fragmentatie bevordert. Het beton kan hierbij letterlijk exploderen. Om dit te bewerkstelligen zijn een hoog vermogen en een korte blootstelling vereist. Bij experimenten in een monomode systeem (MEAM Mono-Explorer) werd aangetoond dat met een ingaand vermogen van 6 kW bij 2.45 GHz (gedeeltelijke) vrijstelling van de aggregaten bekomen werd na 1 seconde (figuur 2). Deze enorm efficiënte manier zal zeker succes kennen in een upscale, waarbij idealiter een bron van 915 MHz in plaats van 2.45 GHz gebruikt wordt voor een hogere indringdiepte en grotere energie-impact, in combinatie met een caviteit die de explosies kan opvangen. Hierdoor kan beton binnen de 10 seconden onder een hoog vermogen herhaaldelijk uit elkaar springen (analoog aan popcorn). Echter vallen de kosten voor het ontwerp en bouwen van een continue multimode microgolfoven op grotere schaal die dergelijke explosies opvangt buiten het bereik van het huidige project en zou dit een vervolgproject inhouden. Het succes ervan is wel aangetoond binnen het huidige project. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de kalksteenaggregaten in (Belgisch) beton zwakker zijn dan de cementstructuur eromheen, de partieel vrijgekomen aggregaten ondergaan dus best nog een tweede (niet-destructieve) behandeling alvorens verder te worden gebroken.



Figuur 2

§2 Niet-destructief microgolfondersteund breken

De 'niet-destructieve' breekmethode beoogt de vorming van microscheuren in het beton in combinatie met het (partieel) afbreken van gehydrateerde minerale fasen bij temperaturen tussen 100°C en 250°C. Door de scheuren en de verzwakte cementstructuur zal de energiekost voor de hieropvolgende breekprocessen dalen. Hierbij moet opgemerkt worden dat niet alle elementen van het beton even snel opwarmen. Zo zal vooral de binder, namelijk het gehydrateerde cement, en het vrije water dat aanwezig is opgewarmd worden. Als het water begint te koken oefent het druk uit, waardoor het beton begint te barsten. Het gebonden water komt vrij in het cement en zal daardoor het cement verzwakken waardoor het vermalen achteraf minder energie vraagt en de fracties (grove aggregaten, zand, cement) beter gescheiden worden.

Analoog aan de tests voor de destructieve methode, werden eerst experimenten uitgevoerd in een monomode systeem (MEAM Mono-Explorer), waarin de energieverdeling exact gekend is. De beste resultaten - i.e. grootste vermindering in druksterkte - werden behaald bij laag vermogen (250 W bij 2.45 GHz) gedurende een lange tijd (10 minuten). Een kortere tijd (1 minuut) bij hogere vermogens (500 W en 1000 W bij 2.45 GHz) leidde eveneens tot een vermindering in druksterkte, echter het effect was minder uitgesproken. Doordat het beton langer in de oven blijft dan bij de destructieve breekmethode, heeft het de tijd om zowel te drogen als te verzwakken. Het drogen heeft als voordeel dat het gemalen materiaal na het breken ('smart crushen' of conventioneel breken) minder aan elkaar plakt en dat het makkelijker kan gescheiden worden. Ook zal cement dat nog niet helemaal gehydrateerd was zo kunnen afgescheiden worden, want als het beton nat gemalen wordt zal het vrijgekomen cement onmiddellijk met water reageren en bovendien het gemalen materiaal terug aan elkaar kleven.

Opschalingstests werden uitgevoerd in de MEAM Dry 32M continue multimode microgolfoven (zie tabel 1 en figuur 3). Grof (0/40mm) betonpuingranulaat van CBS-beton werd behandeld in specifieke microgolfranzarante en warmte isolerende bakken uit aluminosilikaat (figuur 4). Het materiaal werd door de microgolfoven gestuurd in batches van 2-3kg per bak en met 3 bakken per keer. Het ingaand microgolfvermogen en de bandsnelheid werden ingesteld op 28kW en 0.4 m/min. De verwarmingscyclus werd herhaald tot temperaturen tussen 200-300°C bereikt werden. Het gewicht van het behandelde materiaal voor en na de behandeling werd bijgehouden en de temperatuur tijdens de verwarmingscyclus werd gemonitord met zeven infraroodsensoren. Wanneer de producttemperatuur een vooropgestelde limietwaarde overschrijdt, wordt de volgende magnetron automatisch uitgeschakeld door de PLC-

unit van de machine. Bij de tests werden limietwaarden van 300°C en 400°C ingesteld. Na elke verwarmingscyclus werd de temperatuur ook gemeten met een infraroodcamera en/of thermokoppel.

Tabel 1

TEST OVEN	VERMOGEN	DIMENSIES	TYPE	KOELING
MEAM DRY 32 M	(max.) 32 kW	400 ^{*)} x 53 ^{**)} cm	Multi-mode	Water

^{*)} lengte van caviteit

^{**)} breedte van de band



Figuur 3



Figuur 4

Met de aangegeven bandsnelheid en vermogen had het betonpuin twee verwarmingscycli door het microgolfsysteem nodig om ~200°C te bereiken en drie tot vier cycli voor 300-350°C. Wanneer de bakken afgedekt werden met een keramisch deksel was de eindtemperatuur hoger. Bovendien beschermt het deksel de binnenkant van het microgolfsysteem tegen mogelijke exploderende stukken betonpuin en houdt het de warmte beter vast tussen opeenvolgende verwarmingscycli. De meting van de producttemperatuur tijdens het verwarmen wordt wel bemoeilijkt. Tabel 2 geeft de waargenomen producttemperaturen en massaverminderingen per batch weer. Figuur 5 toont een batch grote betonpuinagglomeraten voor en na de microgolfbehandeling. De verhitting leidde tot expansie en gedeeltelijk opbreken van het granulaat, ook werd een significant gewichtsverlies (vocht en gebonden water) geobserveerd. De microgolfbehandeling leidt tot een significante grotere fractie fijn granulaat (onder 4 mm), deze is groter bij behandeling op 300 °C (~13 gew%) dan op 200 °C (~6 gew%).



Figuur 5

Tabel 2

Batch	m_{sample} [kg]	Δm [%]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]
B1.1	2.140	6.3	170	250	260	300
B1.2	2.059	6.3	160	240	250	300
B1.3	2.011	6.0	170	220	320	320
B2.1	3.057	3.4	240	250	300	-
B2.2	3.068	6.3	230	na	320	-
B2.3	3.041	7.3	210	na	270	-
B3.1	3.090	5.6	240	250	320	-
B3.2	3.018	6.6	220	230	300	-
B3.3	3.033	3.4	210	220	260	-
B1.1	2.005	na	180	250	-	-
B1.2	2.000	na	180	200	-	-
B2.1	2.001	na	197	220	-	-
B2.2	2.015	na	190	200	-	-
B2.3	2.008	na	160	210	-	-
B3.1	2.045	5.4	210	250	-	-
B3.2	2.067	4.7	170	220	-	-
B3.3	2.502	4.6	150	220	-	-
B4.1	3.002	4.7	190	250	-	-
B4.2	3.029	6.6	180	250	-	-
B4.3	3.016	4.7	130	220	-	-

§3 Microgolfondersteund dehydrateren van fijn betonpuin

Wanneer het (fijn) betonpuin op hogere temperaturen ($> \sim 450^{\circ}\text{C}$) behandeld wordt, wordt niet enkel vrij en fysisch gebonden water verwijderd, maar wordt ook chemisch gebonden water vrijgezet, wat resulteert in faseveranderingen. De belangrijkste zijn de omzetting van portlandiet en CSH naar respectievelijk ongebluste kalk en beliet-achtige fasen. Vooral deze laatste kunnen interessant zijn met het oog op reactivatie van gehydrateerd cementafval. Intussen is bij MEAM een Baekelandproject gestart dat volledig zal gaan over het dehydrateren van fijn betonpuin met microgolfttechnologie. In het kader van dit project werden een hele reeks tests uitgevoerd met verschillende laboschaal opstellingen (roterend sample, verschillende samplehouders, batch en continue oven, etc.), gaande van ~ 50 gram tot vrij grote hoeveelheden cementpasta (~ 2 kg). Het doel van deze tests was na te gaan hoe de dehydratie boven 450°C maar onder klinkertemperaturen gerealiseerd kon worden met microgolven op een gecontroleerde manier, nl. zonder thermische excursies ("thermal runaways") en sinteren te laten optreden. De conclusies van deze experimenten waren dat 1) voldoende isolatie moet voorzien worden direct rond het materiaal (dus het volume binnen de isolatie zo klein mogelijk houden) voor homogene opwarming, 2) waterdamp best afgezogen wordt om ogenblikkelijke rehydratie te vermijden, 3) best een hybride-microgolfverwarming gebruikt wordt, waarbij een susceptormateriaal met goede diëlectrische eigenschappen het grootste deel van de microgolff energie absorbeert en het betonpuin op haar beurt opwarmt via infraroodstraling. Op deze manier kan een homogene en gecontroleerde microgolffdehydratie uitgevoerd worden. De testen werden vooral in een batch microgolfoven uitgevoerd (MEAM Explorer),

Om homogene dehydratie met maximale doorvoer en energie-efficiëntie mogelijk te maken op grotere schaal, was het noodzakelijk om de hardware van de bestaande continue microgolffinstallatie (MEAM Dry 32M) aan te passen en te verfijnen. Allereerst is er een nieuwe motor geïnstalleerd, waardoor de bandsnelheid aanzienlijk lager is dan voorheen (tot ~ 0.07 m/min). Hiermee kan het materiaal meer vermogen opnemen per cyclus door de machine. Ook is een nieuw type transportband geïnstalleerd met hogere temperatuurweerstand. Ten slotte werd de microgolffunnel binnenin voorzien van isolatiemateriaal (poreus gesinterd aluminiumoxide) om warmteverliezen (die steeds groter worden bij hogere temperaturen) te minimaliseren en zo de energie-efficiëntie te verbeteren (figuur 6).

Nadat de beschreven hardware was geüpdatet ontving MEAM een lading fijne materialen geproduceerd in een eerdere breekcampagne van Slimbreker voor upscaling tests van het dehydratieproces op hoge temperatuur. Het doel was om met één cyclus door de aangepaste MEAM 32M zowel droging als dehydratie te bekomen. Tussen verschillende cycli zou het materiaal immers aanzienlijk kunnen afkoelen, wat de energie-efficiëntie van het proces niet ten goede zou komen. Bovendien is één enkele cyclus meer aangewezen voor de demonstraties die gepland zijn op het einde van het project.

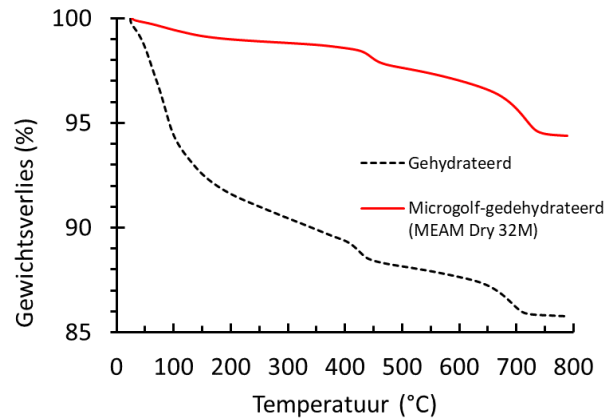
Na een eerste reeks experimenten (figuur 6) werd besloten om een aanpassing te maken aan de isolatie van de machine: over het eerste derde van de tunnel werd het isolatiemateriaal verwijderd. In dit eerste deel wordt het fijne betonpuin immers gedroogd en moet er veel waterdamp verwijderd worden. Zonder isolatie is het transport van deze damp uit de machine effectiever. In de laatste twee derde van de machine wordt de temperatuur verder verhoogd en is het gebruik van isolatie wel zinvol en zelfs nodig om warmteverliezen (die bij hogere temperaturen steeds belangrijker worden) te minimaliseren.

Tijdens de experimenten werd geen susceptormateriaal gebruikt (dus directe microgolfverwarming). Er werden geen ongecontroleerde thermische excursies waargenomen en na één passage door het systeem werden temperaturen tussen 500°C en 600°C opgemeten. TGA-analyse (figuur 7) van het gedehydrateerde materiaal bracht aan het licht dat de afbraak van portlandiet tot kalk en waterdamp (vanaf ~450°C) nog niet volledig was, of dat het portlandiet deels gerehydrateerd werd tijdens of na de warmtebehandeling. XRD-analyse toonde aan dat nog geen aanzienlijke omzetting van CSH tot C₂S-polymorfen was opgetreden. Het proces kan dus nog verder geoptimaliseerd worden door tot hogere temperaturen te gaan of door langer op de maximale temperatuur te blijven. Echter, met de beschreven aanpassingen aan de machine kan reeds (volledige) droging én een aanzienlijke graad van dehydratatie (tot ~600°C) gerealiseerd worden met een doorvoercapaciteit van ~30 kg/uur.

Het doorvoervolume van ~30kg/uur is lager dan vooropgesteld in de originele projectaanvraag, maar een verhoging hiervan zou verregaande(re) aanpassingen van het microgolfsysteem vergen. Bij de projectaanvraag was het niet duidelijk of de voorbehandeling van beton op industriële schaal mogelijk en zinvol zou zijn of niet. Tijdens het project werd de meerwaarde aangetoond. De belangrijkste meerwaarde is dat het beton gedroogd wordt zodat het scheiden van de verschillende fracties in en na de slimbreker beter kan verlopen. Het beschikbare budget werd dus deels gebruikt voor de optimalisatie van de microgolfoven voor het voorbehandelen en de microgolfoven voor het dehydrateren.



Figuur 6



Figuur 7

Met het behaalde doorvoervolume van 30 kg/h en het beschikbare microgolf-vermogen van 30 kW (het maximale vermogen van de machine is 32 kW, maar o.w.v. opstarttijd, onderhoud, etc. wordt dit nooit 100% van de tijd gehaald), kan berekend worden dat het proces een energievraag van +- 1kWh/kg had. Met de waarden in Tabel 3 kan een ruwe schatting gemaakt worden van de theoretisch benodigde energie om 30 kg fijn betonpuin op te warmen tot 600°C. In deze berekening worden warmteverliezen naar de lucht en isolatie niet meegenomen, net als de vereiste reactie-energie voor de (complexe) dehydratatie- en omzettingsreacties van CSH, ettringiet, etc. en de temperatuursafhankelijkheid van de specifieke warmtecapaciteit c_p . Toch geeft dergelijke berekening een schatting van de grootteorde van de energievraag en van de efficiëntie (en de ruimte voor verbetering) van het microgolf-dehydratatie proces. De berekende energievraag is +- 0.4 kWh/kg, dus +- 40% van de experimenteel geobserveerde waarde. Een aanpassing die tot een hogere energie-efficiëntie zou kunnen leiden zou het gebruik van een susceptormateriaal met goede dielectrische eigenschappen kunnen zijn, zodat de beschikbare microgolf-energie met een hogere efficiëntie kan omgezet worden in warmte. Echter, dit materiaal zou dan eerst ingemengd moeten worden met het betonpuin, en nadien weer gescheiden moeten worden. Ook een alternatief voor de bakken in aluminosilicaat zou kunnen helpen: in de berekening werd ervan uitgegaan dat de bakken tot +- 400°C opwarmen tijdens het proces, wat een aanzienlijk deel van de beschikbare energie vraagt (3 a 4 kWh voor 10 bakken van 4 kg). De bakken zouden uit een susceptormateriaal vervaardigd kunnen worden, maar ook dit zou technische implicaties met zich meebrengen (extra isolatie, adequatere temperatuurcontrole ...). Een technisch uitdagende oplossing zou kunnen zijn om over te schakelen op een nieuw oven-ontwerp: in plaats van een transportband die door een tunnel van magnetrons loopt, zou een microgolf-buisoven ontworpen kunnen worden, gelijkaardig aan conventionele roterende cementovens. De uitwerking van de voorgestelde verbeteringen vergt echter meer tijd en middelen. Daarom zijn inmiddels twee projecten gepland die via VLAIO-ondersteuning verder zullen werken op dit onderwerp (een Baekelandmandaat en Innovatiemandaat).

Tabel 3

Gehydrateerd cement / zand- & aggregaatreten	1 / 1 (kg/kg)
Watergehalte (vrij en fysiek gebonden)	~ 15 wt%
Portlandietgehalte	~ 7 wt%
c_p water	~ 4.2 J/gK

c_p (droog) betonpuin	$\sim 1 \text{ J/gK}$
c_p aluminosilikaat	$\sim 0.8 \text{ J/gK}$
Verdampingswarmte water	$\sim 2.2 \text{ kJ/g}$
Reactie-energie $\text{CH} \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	107 kJ/mol
Massa aluminosilikaat	$10 \times \sim 4 \text{ kg}$ per batch van 30 kg betonpuin

Besluit

Microgolfttechnologie kan zowel tijdens het (voor-)breken als het dehydrateren van betonpuin een rol spelen bij de recyclage van beton. Bij hoog vermogen en korte blootstellingstijd springen stukken betonpuin uit elkaar en vindt reeds (gedeeltelijke) scheiding van aggregaten en mortel plaats, het opschalen van deze techniek viel echter buiten dit project. Bij lager vermogen en langere blootstellingstijd zorgen microscheuren, interne drukopbouw en droging van het betonpuin voor een effectieve verzwakking die de nodige breekenergie vermindert en scheiding van aggregaten, zand en cementstructuur kan bevorderen. Deze (voor)breekmethode werd ook op (semi-)industriële schaal aangetoond. Microgolfdehydratatie op hogere temperaturen ($\sim 600^\circ\text{C}$) is mogelijk gebleken, hoewel opschaling naar (semi-)industriële schaal verdere verregaande aanpassingen aan de installatie – of zelfs een volledig nieuw ontwerp – zou vergen, dit ten gevolge van de hogere energievraag en warmteverliezen.