

DRAFTVERSIE: BETONSAMENSTELLING



LIVING LAB
CIRCULAIR BETON

Beton in de circulaire economie

STATE OF THE ART RAPPORT
BESCHIKBARE EN INNOVATIEVE
TECHNOLOGIEËN



Beton in de circulaire economie: State of the Art Rapport

Nicole Dilissen, Bram Doods, Niels Hulsbosch, Laura Kupers,
Jeroen Vrijders, Stefan Danschutter, Jef Bergmans, Arne Peys
Buildwise, Oktober 2025, v 3.1



Dit verslag maakt geen onderdeel uit van de officiële publicatiereeksen van Buildwise. Het kan dus niet als referentie gebruikt worden. De, zelf gedeeltelijke, verdeling of vertaling van deze documenten is enkel toegestaan met toestemming van Buildwise.

Voorliggend document is een projectresultaat dat oorspronkelijk werd gegenereerd binnen het project Circular.Concrete (2018-2020; SIM) en verder is uitgewerkt binnen het project Living Lab Circulair Beton (2023-2025). Het geldt bijgevolg niet als een officieel document van de partijen die het document gerealiseerd hebben. De gepresenteerde bevindingen, analyses en adviezen worden enkel ten titel van inlichting gegeven.

Inhoud

1	Inleiding.....	5
2	De betonsamenstelling	7
2.1	Het bindmiddel	7
2.1.1	Milieu-impact.....	7
2.1.2	Normalisatie	7
2.1.3	Een duurzame keuze in de huidige markt	8
2.1.4	Ontwikkelingen.....	9
2.2	De granulaten	12
2.2.1	Milieu-impact.....	12
2.2.2	Normalisatie	12
2.2.3	Ontwikkelingen.....	15
2.3	De hulp- en vulstoffen	17
2.3.1	Milieu-impact.....	17
2.3.2	Ontwikkelingen.....	18
3	Beton als product	19
3.1	Milieu-impact.....	19
3.2	Ontwikkelingen	19
4	End-of-life, het ontwerp- en bouwproces & andere	19
4.1	Het ontwerp- en bouwproces	19
4.2	De gebruiksfase en End-of-Life	19
5	Technologie-fiches.....	20
A.	Bindmiddelen.....	21
A.1.	Gestandaardiseerde binaire en ternaire cementen	22
A.2.	Geactiveerde fijne fractie van gerecycleerd beton	29
A.3.	Geactiveerde klei en kleihoudende reststromen	31
A.4.	Alternatieve metaalslakken	34
A.5.	Verbrandingsassen van biomassa, papierslib, huisvuil	35
A.6.	Alternatieve klinkergrondstoffen	37
A.7.	hCHS-cement	38
A.8.	Calciumsulfoaluminaat (CSA) klinker.....	40
A.9.	Carbonateerbare klinker	42
A.10.	Alkalisch geactiveerde materialen en geopolymeren	44

A.11.	Minerale carbonatatie als uithardingsproces	47
A.12.	Binders op basis van magnesium.....	49
A.13.	Elektrochemische cementproductie.....	52
A.14.	Supergesulfateerd cement.....	53
A.15.	Biocement	54
A.16.	Gedenatureerde asbest	56
B.	Granulaten.....	58
B.1.	Betonggranulaten en -zanden A+	59
B.2.	Menggranulaten B+.....	63
B.3.	Gecarbonateerde betonggranulaten	65
B.4.	Keramische granulaten.....	68
B.5.	Fysicochemisch gereinigde zanden	69
B.6.	Roestvaststaalslakken.....	71
B.7.	LD-slakken (BOF-slakken).....	73
B.8.	FeMo (ferro- of ijzer-molybdeen) slakken	75
B.9.	Koperslakken	76
B.10.	Loodslakken	78
B.11.	AVI-bodemas.....	79
B.12.	Schuimglasgranulaten.....	81
B.13.	Biochar granulaten.....	83
C.	Hulp- en vulstoffen	85
C.1.	Injectie van CO ₂ in vers beton	86
C.2.	Hulpstoffen op basis van lithiümsilicaat.....	88
C.3.	Courante vulstoffen	89
C.4.	Biochar	91
C.5.	Nanovulstof	93
C.6.	Reactieproducten van carbon Capture & Storage als vulstof	94
D.	Beton	95
D.1.	Zwavelbeton	96
D.2.	Cenocell	98
D.3.	Hennepbeton	100

1 Inleiding

Natuurlijke grondstoffen zijn slechts beperkt aanwezig op onze planeet en zijn niet in staat om op een duurzame manier een antwoord te bieden op de continu stijgende vraag. Daarenboven is Vlaanderen op een aantal vlakken zelf 'arm' aan grondstoffen.

Dit geldt zeker voor de bouwsector waarin jaarlijks een gigantische hoeveelheid materialen wordt gebruikt, alsook een grote hoeveelheid afval wordt geproduceerd. Volgens de EU is de bouwsector de grootste verbruiker van natuurlijke grondstoffen en tegelijkertijd de grootste producent van afvalstoffen. Dit gaat gepaard met uitstoot van CO₂ en fijn stof, landgebruik, ...

De circulaire economie is erop gericht de herbruikbaarheid van producten en grondstoffen te maximaliseren, met zoveel mogelijk behoud van (lokale) waarde. De transitie naar een circulaire economie vereist innovaties op vlak van technologie en productie alsook in de economische en sociale processen.

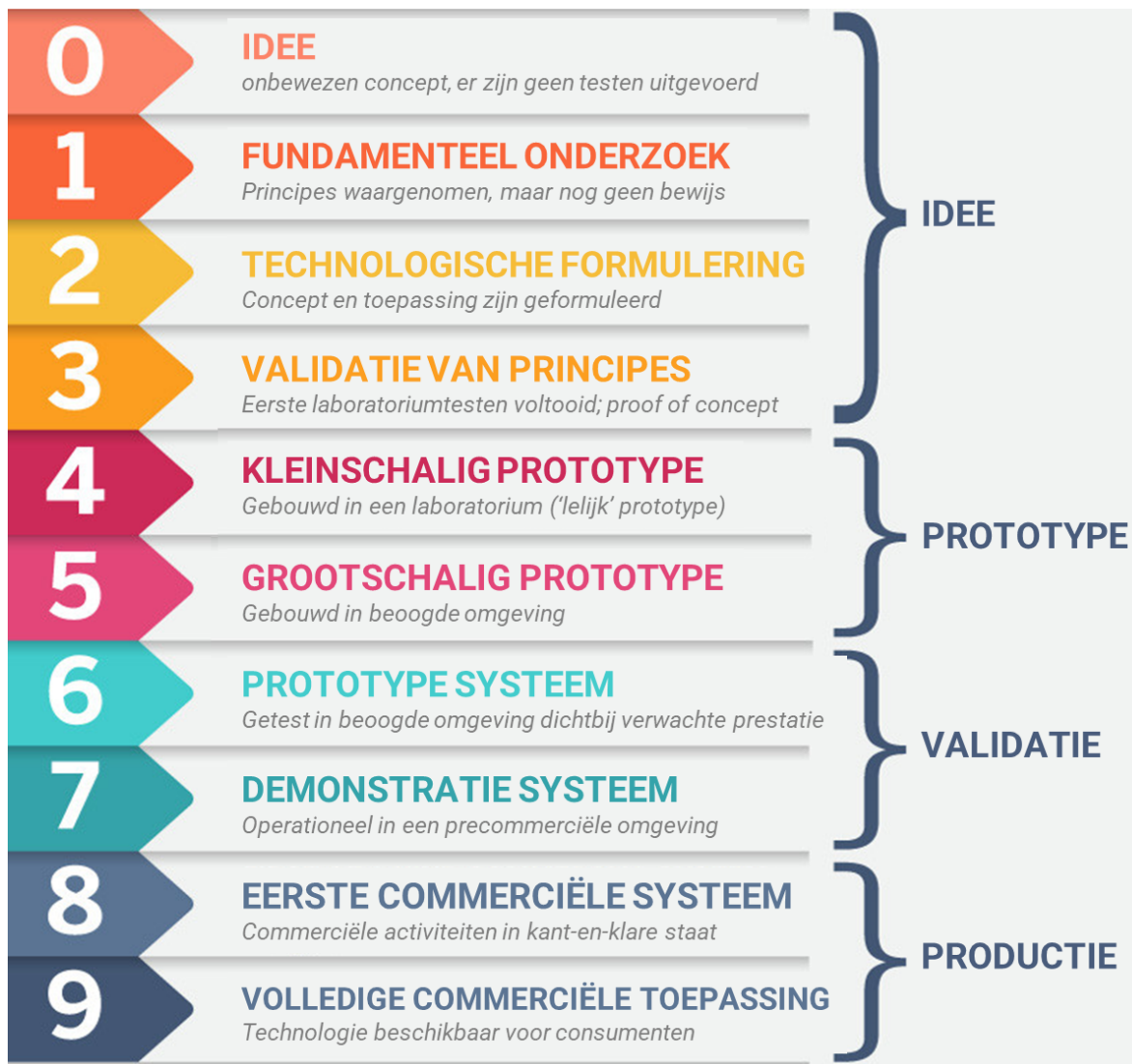
Als meest gebruikte materiaal in de bouwsector speelt beton een belangrijke rol in een duurzame bouwsector. In het licht van een meer circulaire economie heeft beton alvast een aantal voordelen: het heeft een lange levensduur, kan volledig gerecycleerd worden en ook reststromen uit andere industrieën (bv. hoogovenslak en vliegashoudstof) kunnen als grondstof gebruikt worden (symbiose). Dat neemt niet weg dat er bijkomende opportuniteiten voor innovatie liggen in het verder sluiten van kringlopen en het meer circulair maken van het bouw materiaal beton.

Het doel van deze *State of the art* is een overzicht te geven van bestaande en in ontwikkeling zijnde technologieën om beton meer circulair te maken. De technologieën worden onderverdeeld naargelang het aspect waarvan de circulariteit wordt aangesproken:

- De betonsamenstelling:
 - Het bindmiddel;
 - De granulaten;
 - De hulpstoffen;
- Beton als product;
- Ontwerp- en bouwproces
- Gebruiksfase en end-of-life

Naast een algemene bespreking van elk van deze aspecten in hoofdstuk 2, wordt er in de annexen dieper gedoken in enkele specifieke technologieën door middel van fiches. Per geïdentificeerde technologie behandelt deze fiche de volgende onderdelen:

- Korte beschrijving: het werkingsprincipe van de technologie, toepassingsmogelijkheden;
- Inschatting van de te behalen milieuwinsten: de manier waarop de ecologische afdruk van beton door de technologie wordt vermindert;
- De status van de technologie: de beschikbaarheid van betrouwbare onderzoeksresultaten, demoprojecten, pilootinstallaties, TRL-niveau (Technology Readiness Level) (zie Figuur 1);
- De technische aandachtspunten: invloed op de verse en verharde eigenschappen van het beton, op de duurzaamheid, 2^e en 3^e leven (de recycleerbaarheid, milieu- en gezondheidsrisico's), ...;
- Het potentieel voor de Belgische markt: het economische kader, de beschikbaarheid, het toepassingsgebied,



Figuur 1: Beschrijving van de TRL-niveaus en indeling in 'idee', 'prototype', 'validatie' en 'productie' (volgens Cloud-WATCH²¹)

¹ [What TRL and BRL is needed for the EIC Accelerator? What about Eurostars? - STRATA](#)

2 De betonsamenstelling

Beton bestaat uit een inert skelet van granulaten, dat d.m.v. een bindmiddel bijeen wordt gehouden. Het bindmiddel, bestaat klassiek uit cement, al dan niet in combinatie met een toevoegsel zoals hoogovenslakken, vliegashoudend of kalksteenvulstoffen. Aan beton worden meestal ook één of meerdere hulpstoffen toegevoegd met als doel de eigenschappen van het verse of verharde beton te optimaliseren in functie van de toepassing.

2.1 Het bindmiddel

2.1.1 Milieu-impact

Het productieproces van portlandcement vraagt een aanzienlijke hoeveelheid energie, enerzijds voor de ontginning van grondstoffen (vnl. Kalksteen) en anderzijds voor de vermaling en verhitting van de grondstoffen. Daarnaast veroorzaakt de de-carbonatatie van de kalksteen in de oven een rechtstreekse chemische CO₂-uitstoot. De gecombineerde uitstoot van energie en chemisch gerelateerde CO₂ bedraagt in België momenteel ongeveer 0.85-0.90 ton CO₂ per ton klinker. Om de milieu-impact op cement-niveau te beperken, kunnen volgende maatregelen beschouwd worden:

- Het gebruik van alternatieve grondstoffen bij de klinkerproductie om de uitputting van natuurlijke grondstoffen te verminderen. Alternatieve, bij voorkeur niet-carbonaat, Carbonen kunnen de chemische CO₂ emissies van klinker verlagen. Deze alternatieven kunnen aangewend worden om een Portland klinker te produceren, maar kunnen ook dienen om een alternatieve samenstelling van klinker te bewerkstelligen.
- De vervanging van klassieke brandstoffen door alternatieve brandstoffen om de energetische inhoud van bepaalde afvalstoffen te valoriseren en bij te dragen tot een sterke vermindering van het gebruik van fossiele brandstoffen;
- Het vervangen van de Portland klinker door andere bestanddelen. Dit wordt al courant uitgevoerd via gedeeltelijke vervanging met cementvervangers (zoals hoogovenslak), maar kan ook verder doorgedreven worden via nieuwe bindmiddelen;
- Een deel van de uitgestoten CO₂ capteren en opslaan in de ondergrond of te gebruiken voor andere toepassingen. Voor dat laatste moet niet altijd captatietechnologie gebruikt worden, maar kunnen de uitlaatgassen ook rechtstreeks ingezet worden. (CCUS, Carbon Capture & Storage en Carbon Capture & Utilisation).

2.1.2 Normalisatie

De Belgische norm NBN B 15-001 schrijft voor dat een cement, om aangewend te kunnen worden in beton, *algemeen gebruiksgeschikt* dient te zijn. Dit is in België het geval voor de cementsoorten die opgenomen zijn in de normen NBN EN 197-1 (gewone cementsoorten), NBN EN 197-5 (composietcement), NBN EN 14216 (bijzondere cementsoorten met erg lage hydratatiewarmte) en NBN EN 15743 (supersulfaatcement).

Daarnaast moet ook de *specifieke gebruiksgeschiktheid* aangetoond worden, rekening houdend met de Belgische omstandigheden en klimaat. De norm hanteert hiervoor vier hiërarchische niveaus (zie tabellen 2, 3, 4 en 5-ANB in de norm):

- Niveau I: de specifieke gebruiksgeschiktheid van het cement in een specifieke milieu- of omgevingsklasse is aangetoond (zonder bijkomende voorwaarden). Tot deze categorie behoren CEM I (portlandcement); CEM II/A-S en CEM II/A-L; CEM II/B-S; en CEM III/A. De samenstellingen van deze cementen kunnen teruggevonden worden in Tabel 2.
- Niveau II: de specifieke gebruiksgeschiktheid van het cement in een specifieke milieu- of omgevingsklasse is aangetoond (met bijkomende voorwaarden). Tot deze categorie behoren CEM II/A-V, CEM II/A-M, CEM II/B-V, CEM II/B-L, CEM II/B-M, CEM II/C-M (S-L), CEM III/B, CEM V/A, en CEM VI (S-L). De samenstellingen van deze cementen kunnen teruggevonden worden in Tabel 2.
- Niveau III: de specifieke gebruiksgeschiktheid van het cement in een specifieke milieu- of omgevingsklasse dient expliciet aangetoond te worden volgens NBN B 15-100;
- Niveau IV: de specifieke gebruiksgeschiktheid van het cement in een bepaalde samenstelling voor een bepaalde toepassing dient expliciet aangetoond te worden volgens NBN B 15-100.

Cementsoorten die niet als algemeen gebruiksgeschikt verklaard zijn, kunnen in beton toegepast worden als de algemene gebruiksgeschiktheid expliciet aangetoond wordt door middel van een Europees technische beoordeling (Engels: European Technical Approval, ETA), een Technische goedkeuring (ATG) of attestering met certificatie volgens de methodologie opgenomen in NBN B 15-100. Bijkomend moet ook de specifieke gebruiksgeschiktheid aangetoond worden voor de beoogde toepassing. Hiervoor kan men zich op de norm NBN B 15-100 baseren. Er zijn 2 cementen en een hoogovenslak op de markt die een ATG voor België hebben verkregen. De FutureCem van CCB is een ternair systeem van gecalcineerde klei-kalksteen-Portlandklinker (CEM II/B-M (Q-LL) 52.5 N), VVM produceert een CEM V/A (S-P) 42.5 N-LH en Ecocem produceert hoogovenslak ECO2cem dat kan dienen als cementvervanger.

Zo goed als alle in dit document beschreven circulaire technologieën voor bindmiddelen vallen onder niveau III – IV of zijn niet als algemeen gebruiksgeschikt verklaard. Om ze te kunnen toepassen is er dus steeds minstens een uitgebreid gebruiksgeschiktheidsonderzoek nodig.

2.1.3 Een duurzame keuze in de huidige markt

In de eerste plaats kan een weloverwogen keuze gemaakt worden tussen de gestandaardiseerde cementen (Fiche A.1), welke kunnen gebruikt worden binnen het BENOR kwaliteitslabel. De meest eenvoudige weg is om courante cementen te gebruiken die binnen de NBN EN 197-1 beschreven worden. De milieu-impact van cement (sectie 2.1.1) begrijpen kan zich vertalen tot een aantal richtlijnen voor de keuze van een duurzaam bindmiddel te selecteren:

- Een cement met lage klinkerinhoud heeft een lage milieu-impact. In volgorde van klinkerinhoud: CEM I > CEM II > CEM V ≈ CEM VI ≥ CEM III. Zie tabel 2 en diens bespreking voor de effectieve klinkergehaltes van de verschillende cementtypes.
- Een hogere sterkteklasse voor dezelfde klinkerinhoud (bv. CEM I 52.5 N i.p.v. CEM I 42.5 N) kan ook de milieu-impact verlagen. Dit faciliteert een verlaging van het aantal kg cement/m³ beton of m³ beton/structuur.

Vermijd overdimensionering om verder de voetafdruk te verlagen. Gebruik de juiste betonsterkteklasse, milieu-klasse en consistentieklasse (voor het behalen van een hoge consistentie

met een lage w/c wordt dikwijls meer cement gebruikt) voor de juiste toepassing. De cementhoeveelheid wordt mede bepaald door de milieuklasse, waarbij de zwaarste maatgevend is. Dit heeft als gevolg dat hele betonvolumes veel cement bevatten, terwijl dit in principe enkel aan het oppervlak nodig is. Hier kan anders naar worden gekeken.

2.1.4 Ontwikkelingen

Naast de bindmiddelen die vandaag al op de markt te verkrijgen zijn, staat een groot aantal technologieën klaar die in de toekomst aan belang kunnen winnen. Dit document probeert een overzicht te geven van technologieën die reeds volgens de norm kunnen worden toegepast, als ook technologieën die ver staan in TRL en/of sterk besproken worden in de literatuur. Deze ontwikkelingen omvatten beide technologieën die verder inspelen op het verlagen van de voetafdruk, als die de circulariteit verhogen. Details van elke technologie worden opgelijst in § 0 – Technologie-fiches – A. Bindmiddelen. Deze sectie geeft verdere structuur en basisinformatie naar de verschillende soorten technologieën.

Cementvervangers voor portlandklinker-gebaseerde cementen

De gedeeltelijke vervanging van portlandklinker in cement is al ongeveer een eeuw lang een strategie om de kost van cementproductie te verlagen en/of diens duurzaamheid te verhogen (in beide betekenissen van het woord). Het gebruik van hoogovenslak en poederkoolvliegias is diep geworteld in de globale en Belgische cementsector. Door de sluiting van steenkoolverbrandingsinstallaties en veranderingen aan de staalproductie aan de horizon, zullen de productiehoeveelheden aan hoogovenslak en poederkoolvliegias in West-Europa dalen, en groeit de nood aan alternatieve grondstoffen om het klinkergehalte in onze cementen niet te vergroten. De wens om deze verder te verlagen om de circulariteit en CO₂-impact van de sector te verlagen, versterkt deze nood nog verder.

In sectie 2.1.2 werden gecalcineerde klei en natuurlijke puzzolanen al aangehaald, welke vandaag al in cementen verkrijgbaar zijn via ATG. De cementsamenstellingen erkend door normen als ook de grondstoffen die nog in de ontwikkelingsfase zitten en verder uitgelegd worden in de fiches zijn:

- Gestandaardiseerde en binaire en ternaire cementen (Fiche A.1)
- Geactiveerde fijne fractie van gerecycleerd beton (Fiche A.2)
- Geactiveerde klei en kleihoudende reststromen (Fiche A.3)
- Alternatieve metaalslakken (Fiche A.4)
- Verbrandingsassen van biomassa, papierslib, huisvuil (Fiche A.5)

Portlandklinkerproductie met alternatieve grondstoffen

De circulariteit en/of CO₂-voetafdruk kan beïnvloed worden door het introduceren van alternatieve grondstoffen in de productie van Portland klinker. Deze grondstoffen kunnen kalksteen, zand, klei, of de ijzerbron vervangen. De meest interessante grondstoffen zijn reststromen die een significante hoeveelheid Ca bevatten. Die kunnen door het (gedeeltelijk) vervangen van kalksteen de chemische CO₂-uitstoot van de klinker verlagen, terwijl ze door hun secundair origine ook de circulariteit van het bindmiddel verhogen.

De voornaamste grondstoffen voorradig in België die in aanmerking komen voor deze technologie:

- Fijne fractie van gerecycleerd beton (Fiche A.2 en Fiche A.6)
- Staalslak (Fiche A.6)
- Verbrandingsassen van biomassa, papierslib, huisvuil (Fiche A.5 en Fiche A.6)

Vooraf voor het gebruik van de fijne fractie van gerecycleerd beton is er enthousiasme in de cementindustrie. Over het algemeen is een vaak vernoemde hinderpaal van het gebruik van reststromen bij portlandklinkerproductie de hoge nood aan consistentie van de chemische samenstelling.

Alternatieve klinkersamenstellingen

Een aanpassing aan de samenstelling van cementklinker kan ook een verlaagde CO₂-uitstoot veroorzaken door een lager gehalte aan Ca en dus lagere nood aan kalksteen calcinatie. Sommige samenstellingen kunnen ook gebruik maken van specifieke types reststromen ter verhoging van de circulariteit.

De alternatieve klinkersamenstellingen die verder besproken worden in de technologiefiches zijn:

- hCHS cement (Fiche A.7)
- Calciumsulfoaluminaat (CSA) klinker (Fiche A.8)
- Carbonateerbare klinker, zoals beliet, rankiniet, wollastoniet (Fiche A.9)
- BCT cement (Fiche A.8)

Terwijl de CSA klinker vooral de sterkte heeft om sulfaathoudende reststromen te kunnen valoriseren, is de nood aan sulfaatbronnen en de emissies van SO_x ook een limiterende factor die de technologie richting nichetoepassingen duwt. De specifieke sterkteopbouw en expansiegedrag zijn ook eerder compatibel met bepaalde nichemarkten. De beliet klinker wint sterk aan belang door de compatibiliteit met minerale carbonatatie (reactie met en immobilisatie van CO₂). De lage hydratatiesnelheid van beliet (C₂S) is daarin geen probleem en de reactiviteit met CO₂ is hoog. Deze technologie kan dan ook de emissies die tijdens het klinkeren veroorzaakt worden, terug opnemen tijdens de productie van de bouwproducten. Door de CO₂-negatieve ambitie van de cementsector zijn ook de cementproducenten al sterk aan ontwikkelingen van dit type klinker bezig.

De alternatieve klinkersamenstellingen zijn ook compatibel met de alternatieve grondstoffen die voor Portland klinker productie kunnen ingeschakeld worden, zeker in het geval van beliet klinker.

Alkalisch geactiveerde materialen (AAM) en geopolymeren

Het gebruik van portlandklinker wordt volledig vermeden bij alkalische activatie en geopolymeren. Hoewel er in de wetenschappelijke community heftige discussies kunnen ontstaan over het onderscheid tussen de twee, worden de termen bij toepassing vaak door elkaar gebruikt en zal ook dit rapport dat doen.

Alkalische activatie vertrekt vanuit een bron van reactieve silica (en alumina). Daardoor zijn precursors voor alkalische activatie meestal cementvervangers zoals hoogovenslak, gecalcineerde klei, of de alternatieven uit de sectie "**Cementvervangers voor Portland klinker-gebaseerde cementen**" hierboven. Deze materialen worden chemisch geactiveerd door alkalische

grondstoffen, welke de precursor gedeeltelijk laat oplossen en reageren ter precipitatie van aluminosilicaatnetwerken.

Door het volledig vermijden van portlandklinker kan de milieu-impact van dit bindmiddel zeer laag zijn, als er aandacht besteed wordt aan de samenstelling van de activator en diens impact. Non-hydraulische activatie valt buiten het huidige normenkader. In België werd daarom in 2022 de werkgroep AAM onder de normencommissie E104 (Beton) opgericht om een kader te scheppen. Het systeem krijgt redelijk veel aandacht van de minder traditionele cement- en betonbedrijven (bv. VVM-Cementbouw met SQAPE-technologie en ResourceFull met een assortiment aan tailor-made activatorblends). Meer informatie wordt gegeven in de technologiefiche:

- Alkalisch geactiveerde materialen en geopolymeren (Fiche A.10)

Minerale carbonatatie als uithardingsproces

Minerale carbonatatie omvat de vorming van stabiele carbonaten (bv. calciet) door de reactie van CO₂ met natuurlijk voorkomende oxiden of silicaten van bv. calcium of magnesium. Natuurlijke carbonatatie verloopt meestal zeer traag, maar de reactie kan sterk worden versneld door het gebruik van verhoogde CO₂-concentraties, fijne grondstoffen, optimale vochtgehalten en eventueel hogere druk. Enkele (alkalische) alternatieve grondstoffen, zoals staalslakken of reststromen van de cementproductie, zijn interessante grondstoffen voor minerale carbonatatie.

Calcium- en magnesiumrijke fijne grondstoffen kunnen in vormen worden geperst, die vervolgens uitharden d.m.v. carbonatatie bij verhoogde CO₂-concentraties (bv. voor 24 uur). Er wordt geen cement gebruikt en het productieproces capteert CO₂. Meer informatie kan worden gevonden in de technologiefiche:

- Minerale carbonatatie als uithardingsproces (Fiche A.11)

Overige

Naast de nieuwe bindmiddelen en productiemethoden die hierboven werden toegelicht, bestaat er een groot assortiment aan technologieën die door veel onderzoeksinstanties onderzocht worden en/of die veel publiciteit wekken. Enkele niet-limitatieve voorbeelden die uitgewerkt worden in de fiches zijn:

- Mg-binders (Fiche A.12)
- Elektrochemische cementproductie (Fiche A.13)
- Supergesulfateerd cement (Fiche A.14)
- Biocement (Fiche A.15)
- Gedenatureerde asbest (Fiche A.16)

2.2 De granulaten

2.2.1 Milieu-impact

De productie van beton vereist grote hoeveelheden granulaten (zand, grof granulaat). Ongeveer 75 % van het volume beton wordt door de granulaten ingenomen. Voor het ontginnen van deze granulaten alsook voor het transport van de groeves naar de betoncentrales is er energie nodig. Tevens zijn natuurlijke granulaten uiteraard niet onbeperkt voorradig.

Tegelijkertijd wordt er bij de afbraak van oude constructies veel bouwafval geproduceerd (ongeveer 33 % van alle afval op Europees vlak), ongeveer 23 miljoen ton per jaar in België². Door dit bouw- en sloopafval te recyclen als betongranulaat en menggranulaat voor nieuw beton, vermijdt men enerzijds het te moeten storten en anderzijds het ontginnen van primaire grondstoffen. Daarnaast worden er in bepaalde industriële processen afvalstoffen geproduceerd die, na verwerking, ook gebruikt kunnen worden als kunstmatige granulaten in beton.

2.2.2 Normalisatie

De Europese norm NBN EN 206 en zijn nationale bijlage prNBN EN 15-001:2025 schrijven voor dat gerecycleerde granulaten (betongranulaat en menggranulaat) en kunstmatige granulaten mogen gebruikt worden mits ze voldoen aan de norm NBN EN 12620 en aan bijkomende eisen, zoals hieronder weergegeven. Dit betreft sinds kort niet enkel grove granulaten ($d \geq 4$ mm), maar ook zanden ($D < 4$ mm). Betongranulaten A+ en zanden A+ kunnen gecombineerd worden mits vervangingspercentages volgens prNBN EN 15-001:2025 gerespecteerd worden, maar het is niet zomaar toegelaten om verschillende vervangingen van grove granulaten te combineren. Men dient in deze gevallen de algemene en specifieke gebruiksgeschiktheid aan te tonen volgens NBN B 15-105.

De toegelaten granulaten zijn:

- Betongranulaat type A+:
 - Grove betongranulaten type A+
 - $d \geq 4$ mm en $D \geq 10$ mm;
 - voldoet minimaal aan de samenstellingscategorieën $R_{C90}/R_{Cu95}/R_{a1-}/XR_{g0,5-}/FL_{2-}$ van NBN EN 12620;
 - voldoet minimaal aan de categorieën Fl_{20} , $f_{1,5}$, LA_{35} , $SS_{0,2}$, A_{40} van NBN EN 12620;
 - heeft een volumieke massa (ρ_{rd}) van tenminste 2.200 kg/m^3 ;
 - heeft een waterabsorptie van maximaal 10 %, met een variatie van maximaal ± 2 % ten opzichte van de gedeclareerde waarde.
 - voor specifieke toepassingen waarbij een hoogwaardige oppervlakteafwerking vereist is, wordt de categorie FL beperkt tot $FL_{0,2-}$.
 - Betonbrekerzand type A+
 - $D \leq 4$ mm;
 - voldoet minimaal aan de categorieën GF_{85} , f_{10} , $SS_{0,2}$, A_{40} van NBN EN 12620;

² Garcia et al. (2024) Techno-economic and environmental assessment of construction and demolition waste management in the European Union Status quo and prospective potential. JRC TECHNICAL REPORT, European Commission, pp. 106.

- heeft een volumieke massa (ρ_{rd}) van tenminste 2.100 kg/m³ volgens NBN EN 1097-6;
 - heeft een waterabsorptie van maximaal 10 %, met een variatie van maximaal ± 2 % ten opzichte van de gedeclareerde waarde.
 - de kwaliteit van de fijne deeltjes volgens NBN EN 12620 voldoet aan MB $\leq 1,5$.
- Menggranulaat type B+:
 - $d \geq 4$ mm en $D \geq 10$ mm;
 - voldoet minimaal aan de samenstellingscategorieën Rc₅₀/Rcu₇₀/Rb₃₀/Ra₅/XRg₂/FL₂ van NBN EN 12620;
 - voldoet minimaal aan de categorieën FI₅₀, LA₅₀, SS_{0,2}, A₄₀ van NBN EN 12620;
 - heeft een volumieke massa (ρ_{rd}) van tenminste 1.700 kg/m³;
 - heeft een waterabsorptie van maximaal 15 %, met een variatie van maximaal ± 2 % ten opzichte van de gedeclareerde waarde.
 - Luchtgekoelde hoogovenslakken;
 - Kunstmatig granulaat:
 - de aard: enkel ruwijzerhoogovenslakken (gegranuleerd, kristallijn), ferro staal-slakken (BOF, EAF en roestvaststaalslakken) en non-ferro metaalslakken (Pb) zijn toegestaan;
 - $d \geq 2$ mm en $D \geq 10$ mm;
 - de samenstelling van de slakken (scheikundige en mineralogische) en de toelaatbare grenzen dienen vastgelegd en opgevolgd te worden;
 - de fabrikant verstrekt het wetenschappelijk bewijs dat de aangewende kunstmatige granulaten inert zijn en geschikt voor gebruik in beton. Dit wetenschappelijke bewijs houdt de exacte identificatie van het toepassingsgebied, de attestering en bewaking van de kwaliteit met betrekking tot de volgende elementen in:
 - de kunstmatige granulaten mogen geen ongunstige invloed hebben op de hydraulische reactie en op de duurzaamheid van beton;
 - de kunstmatige granulaten mogen geen instabiliteit of autodegradatie vertonen op lange termijn.
 - De zwelling gemeten volgens NBN EN 1744-1 moet beperkt zijn tot 1,0 %.

Gerecycleerde granulaten met een hoger gehalte aan wateroplosbare sulfaten dan 0,2% mogen met maximaal 0,7% ook gebruikt worden mits het totaal gehalte aan wateroplosbare sulfaten afkomstig van het volledige inert skelet (toevoegsels type I niet inbegrepen) niet hoger is dan 0,2% waarbij voor natuurlijke granulaten wordt aangenomen dat ze geen wateroplosbare sulfaten bevatten.

Grof betongranulaat type A+ en betonbrekerzand type A+ mag respectievelijk gebruikt worden voor druksterkteklassen $\leq C35/45$ en $\leq C30/37$. Menggranulaat type B+ mag gebruikt worden voor druksterkteklassen $\leq C20/25$. Afhankelijk van de beoogde omgevingsklasse en het type granulaten is het toegestane vervangingspercentage van de grove granulaten door gerecycleerde granulaten beperkt. Bij het combineren van verschillende gerecycleerde granulaten is enkel de combinatie van grove betongranulaten type A+ en betonbrekerzanden type A+ toegestaan. Voor ongewapend en gewapend beton worden de maximale vervangingspercentages t.o.v. de grove granulaten (% volume) gegeven in Tabel 1.

Granulaattype	Omgevingsklassen volgens prNBN B 15-001:2025						
	Ongewapend beton						
	E0	EI	EE1	EE2	EE3, EA1	ES1, ES2, ES3	EE4, ES4, EA2, EA3
Grof betonggranulaat A+ (a)	50 %	50 %	50 %	20 %	20 %	20 %	0 %
Betonbrekerzand A+ (b)	30 %	30 %	30 %	20 %	20 %	20 %	0 %
Menggranulaat B+ (a)	20 %	20 %	20 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	Gewapend beton (c)						
	E0	EI	EE1	EE2	EE3, EA1	ES1, ES2, ES3	EE4, ES4, EA2, EA3
Grof betonggranulaat A+ (a)	-	30 %	30 %	20 %	20 %	0 %	0 %
Betonbrekerzand A+ (b)		30 %	30 %	20 %	20 %	0 %	0 %
Menggranulaat B+ (a)	-	20 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
(a) Maximaal vervangingspercentage t.o.v. grove granulaten (volume %)							
(b) Maximaal vervangingspercentage t.o.v. zanden (volume %)							
(c) Er moet rekening gehouden worden met de impact op de hechting tussen wapening en beton							

Tabel 1: Maximale vervangingspercentages van gerecycleerde granulaten t.o.v. grove granulaten (% volume) in functie van de omgevingsklasse voor gewapend beton

Kunstmatig granulaat mag enkel worden gebruikt in milieuklasse X0, XC1 en omgevingsklassen E0 en EI. De druksterkteklasse van het beton in deze omgeving is beperkt tot en met C25/30. Kunstmatig granulaat mag ten hoogste 20 % van het totale volume aan grove granulaten vertegenwoordigen.

Voor hogere vervangingspercentages of gebruik in andere omgevingsklassen of druksterkteklassen dient, net zoals voor combinaties van verschillende gerecycleerde en/of kunstmatige granulaten, de algemene en de specifieke gebruiksgeschiktheid aangetoond te worden voor de beoogde betonsamenstelling en het beoogde gebruik volgens de NBN B 15-105. Voor granulaten waarvan de algemene gebruiksgeschiktheid niet expliciet vermeld wordt in de NBN B 15-001 onder § 5.1.3 (zie oplijsting hierboven onder 'toegelaten granulaten') kan dit d.m.v. een Europese technische beoordeling (European Technical Assessment, ETA), een Technische goedkeuring (ATG) of een attestering met certificatie volgens de methodologie opgenomen in NBN B 15-105.

In de berekening van de betonsamenstelling, dient de waterabsorptie van de gerecycleerde en kunstmatige granulaten overeen te komen met de waarde op 24 u. Wanneer gebruik wordt gemaakt van gerecycleerde en kunstmatige granulaten met een waterabsorptie > 3,0 % absoluut en in andere omgevingsklassen dan E0 en EI of milieuklassen andere dan X0 en XC1, moet de water-cementfactor, voorzien in Bijlage F van de norm NBN B 15-001 (de duurzaamheidseisen), verminderd worden met volgende waarden:

- Indien de volumeverhouding van de gerecycleerde of kunstmatige granulaten ten opzichte van de grove granulaten kleiner is dan 20 % moet de water-cementfactor verminderd worden met 0,01.

- Indien de volumeverhouding van de gerecycleerde of kunstmatige granulaten ten opzichte van de grove granulaten groter of gelijk is aan 20 % moet de water-cementfactor verminderd worden met 0,02.

In het standaardbestek 250 voor de wegenbouw zijn momenteel in versie 5.0 in mengsels voor cementbetonverhardingen hoogwaardig betongranulaat tot 20 % toegelaten in de verharding van fietspaden en onderlagen en in de verharding van wegen B8-B10 en tot 40 % toegelaten in lijnvormige elementen. Betonbrekerzand is tot 20 % vervanging toegelaten in de verharding van wegen B8-B10, fietspaden en onderlagen en lineaire elementen.

2.2.3 Ontwikkelingen

Dit document probeert een overzicht te geven van technologieën die reeds volgens de norm kunnen worden toegepast, als ook technologieën die ver staan in TRL en/of sterk besproken worden in de literatuur. Deze ontwikkelingen omvatten beide technologieën die verder inspelen op het verlagen van de voetafdruk, als die de circulariteit verhogen. Volgende ontwikkelingen die inspelen op de circulariteit van de granulaten in beton worden behandeld in § 0 – Technologie-fiches – B. Granulaten. Deze sectie geeft verdere structuur en basisinformatie naar de verschillende soorten technologieën. Alternatieve granulaten die niet vallen onder het Eenheidsreglement voor Gerecycleerde Granulaten vereisen een grondstofverklaring voor gebruik in beton.

Gerecycleerde granulaten

Door bouw- en sloofafval gericht te recyclen, kunnen secundaire granulaten gewonnen worden. Bij het breken van hoogwaardig beton komt materiaal vrij dat voldoende kwalitatief is om verder te verwerken tot betongranulaten als gedeeltelijke toeslagvervanging in nieuwe beton. Bij het produceren van deze betongranulaten komen ook fijnere fractie vrij. De fractie ter grootte van zand kan ook gedeeltelijk het zand in nieuwe beton vervangen. Indien dit zuiver uit gebroken beton gewonnen wordt, worden grove granulaten en zand als A+ gelabeld. Indien dit gemengd bouw- en sloofafval is, kunnen grove menggranulaten gewonnen worden die B+ gelabeld worden. Daarnaast kunnen uit zuiver keramische tegelafval ook granulaten gewonnen worden. Deze gerecycleerde grondstoffen worden verder besproken in volgende technologiefiches:

- Betongranulaten en zanden A+ (Fiche B.1)
- Menggranulaten B+ (Fiche B.2)
- Gecarbonateerde betongranulaten (Fiche B.3)
- Keramische granulaten (Fiche B.4)

Fysicochemisch gereinigde granulaten

Zanden en grove granulaten kunnen afkomstig zijn uit verontreinigde bronnen (bv bodems, industriële processen, veegvuil). Door een fysische en chemische processen kunnen deze granulaten gezuiverd worden tot toeslagmateriaal die aan de milieuhygiënische en bouwtechnische eisen voldoen voor beton.

- Fysicochemisch gereinigde zanden (Fiche B.5)

Kunstmatige (industriële) granulaten - Slakken

In de metallurgische sector worden onvermijdelijk slakken geproduceerd als reststroom. Hoogovenslakken zouden bijvoorbeeld ook als granulaat kunnen gebruikt worden, maar zullen niet verder besproken worden in deze functie in een technologische fiche daar ze hun valorisatie nagenoeg volledig vinden in de vorm van cementvervangers (zie Fiche A.1). Luchtgekoelde hoogovenslak (langzamer afkoelen tot niet-reactief kristallijn granulaat) worden nog maar beperkt gebruikt als toeslagmateriaal in beton of funderingsmateriaal in wegenbouw. De gegraneerde hoogovenslak (snel afkoelen met water tot reactief amorf materiaal) wordt integraal gebruikt als cementvervanger. Door de schaarste van hoogovenslak wordt deze tegenwoordig vrijwel volledig ingezet als bindmiddel in plaats van granulaat.

Ferro-slakken

Naast hoogovenslakken zijn er nog andere ferro-slakken, dit wil zeggen dat er in het metallurgische proces ijzer gewonnen wordt of staal geproduceerd wordt en dat de slakken als reststroom een zeer laag gehalte aan ijzer bevatten. De ferro-slakken die verder besproken worden in technologische fiches zijn:

- Roestvaststaalslakken (Fiche B.6)
- LD-slakken (Fiche B.7)

Non-ferro-slakken

In België wordt naast ijzer en staal ook FeMo, koper en lood geproduceerd. De slakkenstroom hieruit wordt als non-ferro beschouwd, daar geen ijzer wordt geproduceerd. Non-ferro slakken zijn bijgevolg net wel rijker in ijzer. Technologische fiches voor FeMo, lood- en koperslakken worden besproken:

- FeMo (ferro- of ijzer-molybdeen) slakken (Fiche B.8)
- Koperslakken (Fiche B.9)
- Loodslakken (Fiche B.10)

Kunstmatige (industriële) granulaten – Bodemassen

De verbrandingsassen van huisvuil kennen potentieel als cementvervanger door hun puzzolane karakter. De grovere huisvuilverbrandingsrest in de vorm van bodemassen kunnen minder reactief zijn door een minder snelle afkoeling (zorgt voor kristallisatie), gehalte aan minerale deeltjes, metaalresten, keramiekresten en andere onzuiverheden. Mits een aangepaste behandeling en goede kwaliteitscontrole, kunnen bodemassen uit een afvalverbrandingsinstallatie (AVI) als granulaat in beton worden gebruikt. De technologische fiche:

- AVI-bodemas (Fiche B.11)

Lichtgewicht granulaten

Reststromen kunnen ook verwerkt worden tot lichtgewicht granulaten door poedervorm te pelletiseren of te expanderen. Twee van deze technologieën worden hieronder besproken:

- Schuimglas granulaten (Fiche B.12)
- Biochar granulaten (Fiche B.13)

Hiernaast bestaan er nog andere reststromen die mogelijk, na verwerking, gebruikt zouden kunnen worden als granulaat in beton. Een overzicht hiervan wordt gegeven in de Catalogus Secundaire en Gerecycleerde granulaten voor de bouw³.

2.3 De hulp- en vulstoffen

2.3.1 Milieu-impact

Door **hulpstoffen** te gebruiken kan men de duurzaamheid (en de levensduur) van beton verbeteren. Zo laat bv. het gebruik van een superplastificeerder toe om met een lagere W/C-factor te werken voor eenzelfde verwerkbaarheid, waardoor de weerstand van het beton tegen fysische, chemische en mechanische aantasting vergroot en dus een langere levensduur wordt verkregen (en dus minder snel naar afbraak gegaan moet worden). Door het gebruik van luchtbelvormer kan een langere levensduur van betonnen buitenverhardingen, blootgesteld aan vorst en dooizouten, verkregen worden.

Bij het gebruik van alternatieve grondstoffen in beton (bindmiddelen, granulaten) kunnen hulpstoffen ook een belangrijke rol spelen. Deze alternatieve grondstoffen kunnen bv. een invloed hebben op de bindingsnelheid of de verwerkbaarheid van het beton. Bindingsvertragers en –versnellers en specifieke superplastificeerders kunnen in deze gevallen helpen om deze ongewenste effecten tegen te gaan. Wel moet steeds de verenigbaarheid nagegaan worden van de alternatieve grondstoffen met de hulpstoffen.

Ook **vulstoffen** kunnen milieuvoordelen meegeven, zeker als deze veel minder energie vereisen om te produceren dan cement of andere traditionele bindmiddelen. Vulstoffen worden gezien als inerte toevoegsels. Toevoegsels worden aan het beton toegevoegd om de eigenschappen van betonspecie (verwerkbaarheid, bindingsnelheid, ...) als ook verhard beton (sterkte, duurzaamheid, ...) te verbeteren. Inerte toevoegsels zijn van het **type I** (bv. kalksteenmeel) en zijn dus vulstoffen, hebben ze echter puzzolane of laten-hydraulische reactiviteit zijn ze van type II (bv. vliegashoogovenslak, silica fume) en kunnen de dienen als bindmiddel. Het type II wordt hier dus niet verder besproken. Nog een belangrijke nota is dat de stof als vulstof **niet gezien mag worden als gedeeltelijke vervanging van cement** (cf technische fiche A.1 Gestandaardiseerde binaire en ternaire cementen), **enkel toevoeging**.

Vulstoffen zijn poeders kleiner dan 80 µm en kunnen de duurzaamheid van beton verhogen doordat ze de poriënstructuur verkleinen en zo indringing van CO₂, chloriden of andere chemische stoffen langer kunnen tegenhouden. Dit komt door de gunstige aanvulling van de fijne fractie aan de granulometrie van het inert skelet die de poriën verdicht. Het fysische ‘vullings-effect’ draagt bij aan de verbetering van mechanische sterkte en vermindering van de permeabiliteit.

Voor het gebruik van vulstoffen in België gelden twee belangrijke normen. EN 206 met Belgische bijlage NBN B 15-001 bevat richtlijnen in samenstelling, productie en conformiteit van beton. Hieronder vallen kalksteenmeel, kwartsmeel, marmermeel, granietmeel en pigmenten, waarbij de gebruiksgeschiktheid in beton reeds werd aangetoond.

Alternatieve inerte materialen kunnen op hun gebruiksgeschiktheid beoordeeld worden a.d.h.v. een proefprogramma met kwaliteitscriteria volgens NBN B 15-105. Zo kunnen ook

³ <http://bouw.grondstoffencatalogus.be>

reststromen gebruikt worden als vulstof die anders gestort zouden worden. Betonpuin als vulstof zal zijn weg vinden naar NBN B 15-001, maar dient anno 2024 nog beproeft te worden volgens NBN B 15-105.

2.3.2 Ontwikkelingen

Dit document probeert een overzicht te geven van technologieën die reeds volgens de norm kunnen worden toegepast, als ook technologieën die ver staan in TRL en/of sterk besproken worden in de literatuur. Deze ontwikkelingen omvatten beide technologieën die verder inspelen op het verlagen van de voetafdruk, als die de circulariteit verhogen. Volgende ontwikkelingen die inspelen op de circulariteit van hulp- en vulstoffen in beton worden behandeld in § 0 – Technologie-fiches – C. Hulp- en vulstoffen. Deze sectie geeft verdere structuur en basisinformatie naar de verschillende soorten technologieën.

Hulpstoffen

De klassieke hulpstoffen worden continu verder ontwikkeld en worden steeds efficiënter.

Er worden hulpstoffen ontwikkeld specifiek om de circulariteit van beton rechtstreeks of onrechtstreeks te verbeteren. In dit document worden 2 technologieën verder behandeld:

- Injectie van CO₂ in vers beton (Fiche C.1)
- Hulpstoffen op basis van lithium-silicaat (Fiche C.2)

Vulstoffen

Vulstoffen bevinden zich op een stabiel, maar evoluerend niveau en alternatieve vulstoffen kennen ook hun opmars. Doordat veel reststromen niet reactief zijn, maar ook geen negatief effect op betonmengsels hebben, tonen ze potentieel om als vulstof gebruikt te worden in beton. Zowel de courante vulstoffen als enkele opkomende vulstoffen worden in een technische fiche toegelicht:

- Courante vulstoffen (Fiche C.3)
- Biochar (Fiche C.4)
- Nanovulstof (Fiche C.5)
- Reactieproducten van carbon Capture & Storage als vulstof (Fiche C.6)

3 Beton als product

3.1 Milieu-impact

Door alternatieve grondstoffen te gebruiken, kan men de milieu-impact van beton beperken. Daarnaast kan men ook op betonniveau slim omgaan met deze grondstoffen om de milieu-impact te verlagen. Daarom is het ook nuttig om beton in zijn geheel als product te bekijken in plaats van enkel naar alle grondstoffen apart.

3.2 Ontwikkelingen

Vergevorderde duurzamere toepassingen van beton kunnen volgens de norm, als ook buiten het normenkader vallen. Volgende ontwikkelingen die inspelen op de circulariteit van beton als product worden in dit document verder behandeld (zie § 0 – Technologie-fiches – D. Beton):

- Zwavelbeton (Fiche D.1)
- Cenocell (Fiche D.2)
- Hennepbeton (Fiche D.3)

4 End-of-life, het ontwerp- en bouwproces & andere

4.1 Het ontwerp- en bouwproces

Aan dit hoofdstuk wordt gewerkt



4.2 De gebruiksfase en End-of-Life

Aan dit hoofdstuk wordt gewerkt



5 Technologie-fiches

Deze fiches zijn bedoeld om de Vlaamse bouwsector te informeren over beschikbare en opkomende technologieën en te inspireren om deze technologie in beschouwing te nemen, richting praktijktoepassingen of richting verder onderzoek & ontwikkeling.

Deze fiches zijn per definitie een momentopname (**versie 3.1 – oktober 2025**). De technologieën kunnen immers verder evolueren en onderzoek en ervaringen kunnen ervoor zorgen dat de 'status' van bepaalde ontwikkelingen doorheen de jaren zal moeten worden aangepast.

Deze fiches zijn eveneens per definitie onvolledig: enerzijds kunnen er altijd nieuwe technieken ontstaan, anderzijds is de bedoeling vooral om een overzicht te geven en zijn niet alle technologieën in dezelfde mate van detail geanalyseerd. Vanuit die context is het dan ook belangrijk de fiches in hun context te zien en te gebruiken, en alert te zijn vooraleer deze technologieën rechtstreeks in concrete projecten toe te passen.

De technologische fiches zijn opgedeeld volgens:

Opgenomen in versie 3.1:

- A. Bindmiddelen
- B. Granulaten
- C. Hulpstoffen & vulstoffen
- D. Beton

Niet opgenomen in versie 3.1:

- E. Ontwerp- en bouwproces
- F. Gebruiksfase en end-of-life

A. Bindmiddelen

A.1. Gestandaardiseerde binaire en ternaire cementen

➤ Korte beschrijving

Bij binair en ternair cement wordt een deel van de klassieke portlandklinker vervangen door één (binair) of meerdere (ternair) alternatieven zoals **hoogovenslakken**, (poederkool)**vlieg**as, **kalksteen**, **puzzolane materialen** (bv. gecalcineerde klei), de fijne fractie van gerecycleerd betongranulaat (recycled concrete fines, **RCF**) of **silica fume**. De Europese normen voor cement NBN EN 197-1, NBN EN 197-5 en NBN EN 197-6 definiëren naast het klassieke portlandcement (CEM I) volgende binaire en ternaire cementsoorten:

- CEM II: Samengesteld Portlandcement;
- CEM III: Hoogovencement;
- CEM IV: Puzzolaan cement;
- CEM V: Composietcement (klinker met slak + puzzolanen en/of vlieg
- CEM VI: Composietcement (lager gehalte klinker en andere combinaties dan CEM V).

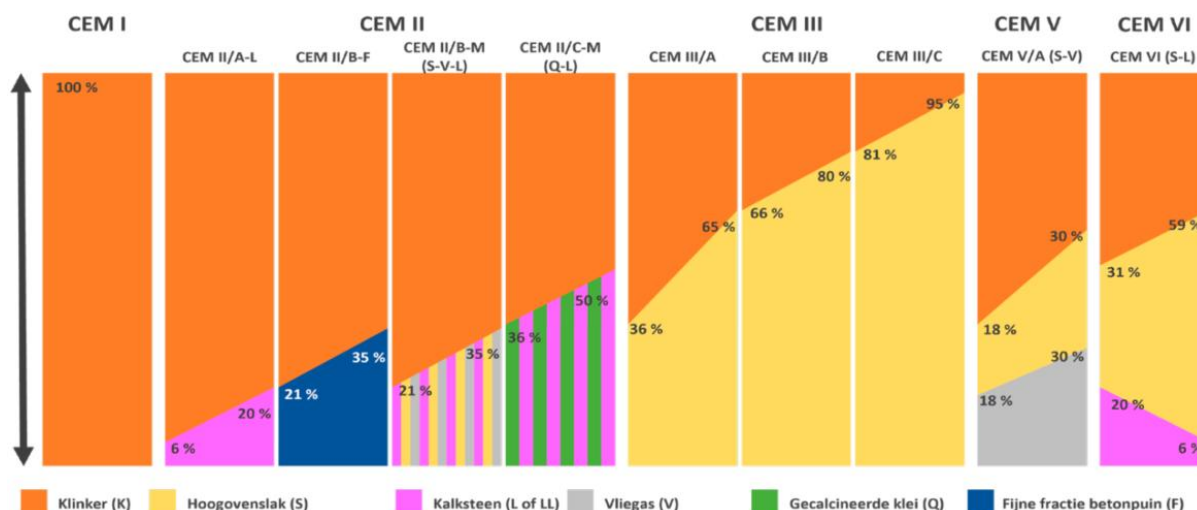
In Tabel 2 worden alle mogelijke cement-combinaties weergegeven volgens de normen NBN EN 197-1, NBN EN 197-5 en NBN EN 197-6 als ook een kleurencode gegeven voor cementsamenstellingen per norm. NBN EN 197-5 werd in 2021 gepubliceerd waarin 5 nieuwe cementen t.o.v. NBN EN 197-1 worden beschreven, weliswaar met dezelfde hoofdbestanddelen, maar met andere combinaties. Mede werd een nieuw hoofdtype gedefinieerd, zijnde CEM VI composietcement. De reden voor het definiëren van een nieuwe norm die zich onderscheidt van NBN EN 197-1 is het innovatieve karakter gericht op duurzaamheid. NBN EN 197-6 werd in 2023 gepubliceerd om RCF als bestanddeel toe te laten in cement. De reden om deze aparte norm te definiëren is om de specifieke eigenschappen van Portland-RCF-cement beter te kunnen reguleren en bevorderen.

Deze verschillende normen geven de industrie duidelijkheid om zich beter te kunnen richten op de unieke technische en milieuprestaties van elke cementsoort. Figuur 2 geeft voorbeelden van gebruikelijke cementen met hun verhoudingen visueel weer.

Niet minder belangrijk is een overzicht van geproduceerde cementsamenstellingen in België, deze is weergegeven in Tabel 3.

Cementsoort	Aanduiding	Samenstelling (% m/m)											
		Klinker	RCF	Slak	Microsilica	Puzzolanen		Vliegias		Gebrande leisteen	Kalksteen		Overig
		K	F	S	D	P	Q	V	W		L	LL	
Portlandcement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Portland-recycled-fines-cement	CEM II/A-F	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-F	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Portlandslak-cement	CEM II/A-S	80-94	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-S	65-79	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Portlandmicrosilica-cement	CEM II/A-D	90-94	-	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Portlandpuzzolaan-cement	CEM II/A-P	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-P	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
Portlandvliegias-cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
Portlandleisteen-cement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
Portlandkalksteen-cement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
Portlandcomposiet-cement	CEM II/A-M	80-88	-	12-20									0-5
	CEM II/B-M	65-79	-	21-35									0-5
	CEM II/C-M	50-64	-	36-50									0-5
met RCF volgens EN 197-6	CEM II/A-M	80-88	6-14	6-14									0-5
	CEM II/B-M	65-79	6-29	6-29									0-5
	CEM II/C-M	50-64	6-20	16-44									0-5
Hoogovencement	CEM III/A	35-64	-	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B	20-34	-	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/C	5-19	-	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Puzzolaancement	CEM IV/A	65-89	-	-	11-35					-	-	-	0-5
	CEM IV/B	45-64	-	-	36-55					-	-	-	0-5
Composietcement (CEM V)	CEM V/A	40-64	-	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5
	CEM V/B	20-38	-	31-49	-	31-49			-	-	-	-	0-5
Composietcement (CEM VI)	CEM VI (S-P)	35-49	-	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM VI (S-V)	35-49	-	31-59	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	CEM VI (S-L)	35-49	-	31-59	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	CEM VI (S-LL)	35-49	-	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	CEM VI (S-F)	35-49	-	6-20	31-59	-	-	-	-	-	-	-	0-5

Tabel 2: Cementen conform NBN EN 197-1, NBN EN 197-5 en NBN EN 197-6 (Cement&BetonCentrum). Cementen uit NBN EN 197-1: zwart, uit NBN EN 197-5: **blauw**, uit NBN EN 197-6: **groen**.



Figuur 2: Voorbeelden van gebruikelijke cementen (Factsheet Hoogovenslak Febelcem, mei 2024)

Cementsoort	Aanduiding	Samenstelling (% m/m)											
		Klinker	RCF	Slak	Microsilica	Puzzolanen		Vliegas		Gebrande leisteen	Kalksteen		Overig
		K	F	S	D	P	Q	V	W		L	LL	
Portlandcement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Portlandslak-cement	CEM II/B-S	65-79	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Portlandpuzzolaan-cement	CEM II/B-P	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
Portlandkalksteen-cement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
Portlandcomposiet-cement	CEM II/B-M	65-79	-	21-35									0-5
	CEM II/C-M	50-64	-	36-50									0-5
Hoogovencement	CEM III/A	35-64	-	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B	20-34	-	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/C	5-19	-	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Composietcement (CEM V)	CEM V/A	40-64	-	18-30	-	18-30		-		-	-	-	0-5

Tabel 3: De in België geproduceerde cementsoorten in 2024, aangeboden door de producenten CCB, Cemminerals, Heidelberg Materials, Holcim, VVM en Liandur. Nota: RCF is sinds 2023 toegelaten, mogelijks worden de cementen met RCF uit Tabel 2 in een later jaar in productie toegevoegd.

➤ Te behalen milieuwinsten

Het lijkt een win/win situatie op het vlak van milieuwinst: het vervangen in cement van het 'vervuilende' en 'primaire grondstoffen verbruikende' portlandklinker door alternatieve grondstoffen of secundaire reststromen. De vervanging van portlandklinker door elk ander bestanddeel vernoemd in Tabel 2 biedt een lagere CO₂-uitstoot per ton geproduceerd cement. De exacte verlaging hangt af van de CO₂-uitstoot die geassocieerd wordt met de cementvervanger. Die waarde kan in sommige gevallen berekend worden als ze uit een proces komen dat uitsluitend bedoeld is ter productie van de cementvervanger, bv. ongeveer 200 kg CO₂/ton gecalcineerde klei, of kan een politiek bepaalde waarde zijn als de cementvervanger een bijproduct uit een ander proces is, bv. 100 kg CO₂/ton hoogovenslak.

Materialen die als reststroom of afval gezien worden (bv. vliegassen, non-ferro slakken) worden vaak als 0 kg CO₂/ton geteld. De effectieve verlaging in CO₂-uitstoot van een cement kan

dan eenvoudig met de mengregel bepaald worden. Voor de productie van een CEM III/A type cement is er bv. een CO₂-equivalente besparing van 45% ten opzichte van een klassiek portlandcement (CEM I).

Met de uitbreiding van de cementsoorten in NBN EN 197-5 en NBN EN 197-6 werden meer combinaties en meer vervanging van portlandklinker mogelijk om nog meer mogelijkheden te hebben om het CO₂-profiel van cement te verlagen. Hiervoor dienen deze 'alternatieve grondstoffen' of reststromen wel lokaal beschikbaar te zijn en inzetbaar zonder te grote noodzakelijke bewerkingsstappen.

Daarnaast kunnen binaire cementen of ternaire cementen zoals hoogovencement, de duurzaamheid van beton verbeteren door de weerstand tegen chemische aantasting zoals sulfaat-aantasting en alkali-silica-reacties te vergroten. Dit leidt tot langere levensduur van betonstructuren en minder behoefte aan reparaties, wat ook beter is voor het milieu. Er moet wel over gewaakt worden dat de verlaging van de carbonatatieweerstand, waarmee de vervanging van klinker gepaard gaat, de duurzaamheid niet aantast.

➤ Status van de technologie

In Vlaanderen is het gebruik van binaire en ternaire cementen reeds helemaal ingeburgerd. CEM III/A, waarbij tot 65% van de portlandklinker vervangen wordt door **hoogovenslakken** (binair cement), is het meest gebruikte cementtype voor stortklaar beton (de specifieke gebruiksgeschiktheid van dit cement is aangetoond in alle milieu- en omgevingsklassen).

Tabel 3 geeft een overzicht van alle cementsoorten die geproduceerd en dus gebruikt kunnen worden op de Belgische markt. De publicatie van NBN EN 197-5 heeft er o.a. voor gezorgd dat CEM II/C-M geproduceerd en gebruikt kan worden in België.

Anno 2024 wordt cement met RCF nog niet grootschalig toegepast. Door de publicatie van NBN EN 197-6 in 2023 wordt verwacht dat deze productie nog zal toenemen in de volgende jaren. Dit zal mede gebeuren doordat het recyclen van beton in Vlaanderen een hoge opmars heeft.

→ TRL 9

➤ Technische aandachtspunten

Compatibiliteit:

Bij nieuwe ternaire cementen moet de compatibiliteit van de drie hoofdbestanddelen gewaarborgd worden om problemen zoals segregatie en onvoldoende binding te vermijden.

Verharding en sterkteontwikkeling:

De vervanging van portlandklinker door alternatieven houdt over het algemeen een tragere sterkte-ontwikkeling en een lagere warmteontwikkeling in (dit effect is belangrijker naarmate het vervangingspercentage hoger is):

- De hydraulische eigenschappen van **hoogovenslak** zijn latent aanwezig en moeten opgewekt worden in een basisch milieu en in aanwezigheid van water door activerende stoffen zoals klinker en/of calciumhydroxide.

- Siliciumhoudend (poederkool)**vlieg**as heeft puzzolane eigenschappen, waardoor het in aanwezigheid van water, calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kan binden die bij de hydratatie van de klinker vrijgekomen is. Hetzelfde werkingsprincipe geldt voor andere **puzzolane materialen** zoals natuurlijke puzzolanen of gecalcineerde klei. Calcinatië verandert de kleimineralen in een amorf materiaal en verbetert de reactiviteit en fysische structuur. Deze activatie kan ook worden bekomen door mechanische activering (zeer fijne vermalings). De fijnheid wordt aanzienlijk verhoogd en de impact zorgt voor verlies van kristalliniteit en winst in reactiviteit.
- **Kalksteen** bezit noch hydraulische noch puzzolane eigenschappen en kan eerder als een inerte vulstof worden beschouwd. Kalksteenmeel kan wel de hydratatiereacties van cement positief beïnvloeden.
- **RCF** hebben ooit al eens gereageerd en kunnen zowel als inerte als (deels) reactieve vulstof beschouwd worden. Ze kunnen een vergelijkbaar effect op sterkteontwikkeling als kalksteen hebben.

In veel gevallen zijn, zowel bij stortklaar beton als bij prefab-beton, snelle ontkistingstijden gewenst en kan de tragere sterkte-ontwikkeling een nadelige eigenschap zijn van binair/ternair cement. Bij zeer warme temperaturen ($>25^\circ\text{C}$) kan dit echter als een voordeel aangewend worden (mits de nodige maatregelen getroffen worden voor de nabehandeling). Ondanks een tragere sterkte-ontwikkeling kunnen deze cementen wel een hogere sterkte op langere termijn ontwikkelen. Het is essentieel om de mengverhoudingen zorgvuldig te kiezen en mogelijk de curing-periode te verlengen om voldoende sterkte te bereiken.

Waterbehoefte en verwerkbaarheid:

Binaire en ternaire cementen kunnen de waterbehoefte en verwerkbaarheid van het betonmengsel beïnvloeden. **Vlieg**as kan bijvoorbeeld de waterbehoefte verminderen en de verwerkbaarheid verbeteren, terwijl **silica fume** de waterbehoefte kan verhogen. **RCF** hebben een hoge waterbehoefte en kunnen de verwerkbaarheid al dan niet sterk verlagen waardoor aangepaste w/c en/of hulpstoffen gewenst zijn. **Kalksteen** zal daarentegen weer een lagere waterbehoefte vertonen.

Thermische ontwikkeling:

Afhankelijk van de samenstelling kan een hogere of lagere warmte-ontwikkeling optreden. Hiermee dient rekening gehouden te worden bij het plaatsen van massieve betonconstructies om thermische scheuren te vermijden.

Duurzaamheid:

Door de vervanging van portlandklinker is er uiteindelijk minder calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) in het beton (zie hierboven), waardoor de carbonatatie van het beton sneller kan plaatsvinden en wapeningscorrosie kan veroorzaken⁴. Op langere termijn wordt er wel, in het geval van hoogovenslak en vlieg,as, een dichtere microstructuur gevormd in het beton, wat een positieve impact heeft op andere duurzaamheidseigenschappen (weerstand tegen sulfaten, zuren, indringing van chloriden, ...).

⁴ Zie ook WTCB-Dossiers 2007/03.02

➤ Potentieel voor de Belgische markt

De lokale beschikbaarheid en kostprijs van deze cementsoorten hangt sterk af van de lokale beschikbaarheid van de alternatieven voor portlandklinker:

- De voor Vlaanderen (en België en West-Europa) beschikbare hoeveelheid siliciumhoudend **vliegashoudend** (bijproduct van de verbranding van steenkool) is de laatste jaren erg gedaald, vooral door de energietransitie en sluiten van kolencentrales. Hierdoor zijn de prijzen hiervan sterk gestegen (op 2 jaar tijd +50%). Ook na 2024 verwacht men een verdere afname van aanbod en stijging van prijs.
- De beschikbaarheid van **hoogovenslakken** (bijproduct van de staalindustrie) is op dit moment goed. Toch dient men de evoluties op de staalindustrie op te volgen. In West-Europa zijn er de laatste jaren immers geen nieuwe staalfabrieken meer bijgekomen. Verder leiden hogere recyclagevolumes in de staalindustrie tot de productie van minder hoogovenslak. Onder impuls van de prijsstijging van vliegashoudend, stijgt ook de prijs van hoogovenslak. CEMBUREAU schat dat tegen 2050 de beschikbaarheid met 80% zal dalen⁵. Op heden wordt 2,2 miljoen ton hoogovenslak verwerkt in België, waarvan 55% wordt geproduceerd in België door ArcelorMittal Gent⁵. De courante cementen in België zijn:
 - CEM III/A is op dit moment het meest gebruikte cementtype voor stortklaar beton;
 - CEM III/B is duurder dan CEM III/A en de nabehandeling is heel belangrijk en wordt vaak niet goed uitgevoerd op de werf. CEM III/B wordt vooral gebruikt voor:
 - de Low-Heat eigenschap -> massieve constructies (bv. wanden >60 cm dik);
 - de goede weerstand tegen sulfaten (landbouw, waterzuivering);
 - CEM III/C:
 - productie <50.000 ton/jaar;
 - voornamelijk voor grondwerken;
 - lage eindsterkte (aan de lage kant van 32,5 N/mm²);
 - er is niet voldoende hoogovenslak beschikbaar om veel CEM III/C op de markt te brengen.
- De beschikbaarheid van **RCF** zal afhangen van toename (of afname) van (selectieve) sloopwerken en verbeterde recyclingtechnologieën en het gebruik ervan zal gestimuleerd blijven door regelgeving.
- **Tras** is een natuurlijk gevormde puzzolaan dat gebruikt kan worden in cementsoorten als CEM II/B-P of CEM II/B-M. Tras wordt gewonnen in de Eifel (Duitsland). Er is geen natuurlijke puzzolaan aanwezig in België.

Omwille van de CO₂-quota zullen de bedrijven (cementfabrieken) belast worden op hun CO₂-uitstoot, waardoor ook CEM I cement zal stijgen in prijs.

Alle cementsoorten conform de drie bovengenoemde normen zijn geschikt voor algemeen gebruik, daarentegen vallen veel CEM II als ook de CEM VI cementsoorten onder niveau II, III of IV volgens de norm NBN B 15-001 met betrekking tot de specifieke gebruiksgeschiktheid

⁵ Factsheet cement, Hoogovenslak, Febelcem, mei 2024

(duurzaamheid). CEM III/C cement valt onder niveau III of IV. Dit houdt in dat er ofwel aan extra voorwaarden voldoen dient te worden (voor niveau II, bv. een verhoogd cementgehalte) ofwel dat er een onderzoek dient uitgevoerd te worden dat aantoont dat het cement gebruiksgeschikt is in een bepaalde omgeving en/of samenstelling. Zo zijn 2 cementen via een ATG geattesteerd op de markt. De FutureCem van CCB is een ternair systeem van gecalcineerde klei-kalksteen-Portlandklinker (CEM II/B-M (Q-LL) 52.5 N) en VVM produceert een CEM V/A (S-P) 42.5 N-LH. Aan de andere kant worden cementen zoals CEM II/B-F en CEM II/C-M(Q-L)-cement voor beton nog niet geproduceerd in België daar deze geen ATG hebben en ook niet erkend zijn in NBN B 15-001 als geschikt voor toepassing in de verschillende omgevingen die men in België aantreft⁵.

De specifieke gebruiksgeschiktheid van RCF wordt anno 2024 beproefd gedurende een prenormatieve studie (NEOCEM II) met als doel de duurzaamheid aan te tonen en te erkennen in NBN B 15-001 als geschikt in de verschillende omgevingen in België.

Hiernaast beschikt Ecocem over een ATG voor zijn hoogovenslak ECO2CEM en een ETA voor zijn ACT cement (Advanced Cement Technology), dewelke een binair cement is bestaande uit een hoog gehalte hoogovenslak en laag gehalte klinker.

A.2. Geactiveerde fijne fractie van gerecycleerd beton

➤ Korte beschrijving

RCF hebben reeds gereageerd met water tot hydraten en kunnen in die toestand als inert beschouwd worden, maar ook door behandeling opnieuw reactief worden. Als RCF verder kunnen geactiveerd worden en hun gehalte aan reactieve stoffen verhoogd kan worden, zijn hogere vervangingspercentages en/of andere toepassingsgebieden mogelijk dan degene besproken in EN 197-6. Onder activatie van RCF kunnen twee hoofdmethodes worden onderscheiden. Deze zijn nog in ontwikkelingsfase en derhalve niet opgenomen onder fiche A.1.

In een **eerste methode** wordt gerecycleerde cementpoeder (RCF), nadat deze selectief gescheiden is uit betonpuin, **gecarbonateerd met CO₂**. Deze carbonatatie verhoogt de reactiviteit als cementvervanger, door de productie van amorf silica uit de carbonatatiereactie van C-S-H. Daarnaast bevat het materiaal dan ook fijne kalksteendeeltjes, wat verder de hydratatie van Portland cement ten goede kan komen. Het gecarbonateerd RCF gebruiken kan het vervangingspercentage dus verhogen ten opzichte van niet-gecarbonateerde RCF. Het zou dus een verbetering teweeg kunnen brengen ten opzicht van de huidige cementen in de EN 197-6. Daarnaast zou het amorf silica ook gebruikt kunnen worden in alkali-activatie (zie Fiche A.10).

In een **tweede methode** kan getracht worden om enkele gehydrateerde cementfases (bv. CSH) in het RCF tijdens een warmtebehandeling (650-750 °C) te **dehydrateren** en zo te activeren. De vrije kalk die gevormd wordt door ontbinding van portlandiet kan een nuttige bijdrage leveren door de reactie van andere cementvervangers te stimuleren (bv. bij toevoeging aan CEM III). Ten opzichte van de gecarbonateerde RCF is de winst in reactiviteit echter klein.

➤ Te behalen milieuwinsten

Door CO₂ te capteren en deze te gebruiken voor carbonatatie van RCF en te mineraliseren, kan een CO₂-negatieve cementvervanger (met meer stockage van CO₂ dan de CO₂-uitstoot tijdens de productie van de cementvervanger) worden geproduceerd en zo een sterke milieuwinst behaald worden.

Doordat het dehydratatieproces van RCF bij lagere temperaturen verloopt dan bij klinkerproductie, wordt veel minder energie verbruikt. Studies hebben aangegeven dat de CO₂-uitstoot van deze methode slechts 6%-13% bedraagt van de productie van portlandcement^{6,7}, maar de methode produceert uiteraard meer energie dan het gebruik van niet-geactiveerd RCF als cementvervanger.

Door gedehydrateerd RCF te gebruiken als vervanging van traditioneel cement, zou het percentage van vervanging hoger kunnen liggen dan bij niet-geactiveerd RCF. Elk percentage vervangen traditioneel cement geeft milieuwinst. Heidelberg schat een potentieel in van 20% CO₂ verlaging bij deze manier van cementproductie⁸.

⁶ Sousa V., Bogas J.A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. Journal of Cleaner Production, 306.

⁷ He Z.J., Zhu X.D., Wang J.J., Mu M.L., Wang Y.L. (2019). Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production. Construction and Building Materials, 211, 965-973.

⁸ [Low-carbon cement from used concrete | Heidelberg Materials](#)

➤ Status van de technologie

In het Horizon Europe project Carbon4Minerals⁹ wordt onder andere ingezet op de **carbonatatie van RCF** en de inzet van het gecarbonateerde product voor de ontwikkeling van een koolstofarmer cement. De CO₂ voor carbonatatie wordt opgevangen uit de cementklinkerproductie. Heidelberg Materials kondigde onlangs de bouw aan van een reactor voor de carbonatatie van gerecycleerde cementsteen in de Gorazdze cementfabriek in Polen. Dit pilootproject zal een capaciteit van 1.5 ton/uur hebben¹⁰.

→ **TRL 7-8**

Het onderzoek naar de **dehydratatie van RCF** voor activatie als cementvervanger bevindt zich momenteel nog in de labofase.

→ **TRL 3-4**

➤ Technische aandachtspunten

Het proces voor de **carbonatatie van RCF** vereist efficiënte technieken voor het scheiden van de cementpasta van de granulaten en het malen van deze fractie tot een consistent fijne poeder. Carbonatatie moet geoptimaliseerd worden om effectieve binding en duurzaamheid te garanderen. Opschaling van laboratorium- naar industrieel niveau vereist robuuste en kosteneffectieve oplossingen.

Ook het **RCF dehydratieproces** vereist efficiënte technieken voor het scheiden en malen van betonpuin tot een consistent fijne poeder. Gedehydrateerde RCF hebben een hoge waterbehoefte en kunnen de verwerkbaarheid sterk verlagen waardoor aangepaste w/c en/of hulpstoffen gewenst zijn. Opschaling van laboratorium- naar industrieel niveau vereist robuuste en kosteneffectieve oplossingen.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

. De ontwikkelde bouw- en recyclingsector in België kan de implementatie van gecarbonateerd RCF vergemakkelijken.

De dehydratatietechnologie werd grotendeels verdrongen door de carbonatatietechnologie. Zowel bij onderzoeksinstellingen en cementbedrijven is deze piste niet meer prioritair (met enkele uitzonderingen).

⁹ <https://www.carbon4minerals.eu/>

¹⁰ <https://www.carbon4minerals.eu/news-events/enforced-carbon-reactor>

A.3. Geactiveerde klei en kleihoudende reststromen

➤ Korte beschrijving

Een van de veelbelovende alternatieve supplementaire cementerende materialen zijn thermisch geactiveerde kleimineralen, ook wel **gecalcineerde klei** genoemd. De calcinatie verandert de kleimineralen in een amorf materiaal en verbetert de reactiviteit en fysische structuur. Deze technologie kan ook worden toegepast op kleihoudende reststromen zoals **baggerspecie**. Gecalcineerde kleien beschikken over puzzolane eigenschappen, dit wil zeggen dat ze niet als hydraulisch bindmiddel op zich beschouwd worden, maar in aanwezigheid van water reageren ze met calciumhydroxide (gebluste kalk, $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Samengesteld met portlandklinker geeft dit dus een gewenste reactie en kunnen ze conventionele slakken en vliegassen vervangen of samengesteld als ternair systeem zelfs cementgehalte nog verder verlagen¹¹. Gecalcineerde klei kan ook als grondstof voor AAM's gebruikt worden (zie Fiche A.10 Alkalisch geactiveerde materialen en geopolymeren).

Kleihoudende (rest)stromen kunnen ook **mechanisch geactiveerd** worden door zeer fijne vermaling van de grondstoffen bij lage temperaturen (energetisch gemodificeerd cement)¹¹. Het proces omvat zeer energetische maaltechnologieën die de microstructuur en chemische eigenschappen van het materiaal veranderen. Fijnheid wordt aanzienlijk verhoogd en impact zorgt voor verlies van kristalliniteit en winst in reactiviteit¹¹.

➤ Te behalen milieuwinsten

Tijdens het **calcineren** wordt de klei blootgesteld aan temperaturen van 600 tot 1000 °C, afhankelijk van de mineralogische samenstelling. De CO₂-uitstoot van dit proces wordt ingeschat op 150-200 kg/ton en kan dus een sterke verlaging van de uitstoot van het cementmengsel bewerkstelligen. De klei-houdende reststromen worden doorgaans gestort en deze technologie geeft dus ook sterke voordelen op vlak van circulariteit. Daarenboven kan de calcinatie gebruikt worden om organische contaminatie (bv. PFAS) uit de reststroom te verwijderen.

Mechanische activering kan aanzienlijk het energieverbruik als ook CO₂ uitstoot verlagen t.o.v. energetische verhitting bij traditionele OPC productie.

➤ Status van de technologie

In de VS, India, China en Brazilië wordt de **calcinatie** technologie al geruime tijd toegepast. Gecalcineerde klei wordt veelal gebruikt als gedeeltelijke vervanging van OPC. Brazilië heeft hoge kleivoorraden en er wordt per jaar zo'n 2 miljoen ton gecalcineerde klei geproduceerd.

In opdracht van de Vlaamse overheid (departement Mobiliteit en Openbare Werken, Maritieme Toegang) ontwikkelde VITO in samenwerking met onder andere KU Leuven het flash calcinatieproces om filterkoeken van de baggerspecieverwerking in AMORAS om te vormen tot cementvervangers. In 2023 werden semi-industriële testen uitgevoerd met participatie van de grootste cementbedrijven ter evaluatie van het resultaat¹². Demonstratie in beton, verdere stappen richting het normenkader en replicatie naar andere klei-rijke reststromen worden uitgevoerd in ICON CLEI¹³.

¹¹ Snellings, Ruben, Prannoy Suraneni, and Jørgen Skibsted. "Future and emerging supplementary cementitious materials." *Cement and concrete research* 171 (2023): 107199

¹² [BIND-AMOR: Reuse of Dredged Sediments as Supplementary Cementitious Materials | SpringerLink](#)

¹³ [CLEI | VITO](#)

→ **TRL 7-8**

De universiteit LTU in Zweden heeft 'high energy milling' ontwikkeld om cement te activeren. Ze werken samen met EMC Cement Company om de technologie commercieel toe te passen. In de haven van Amsterdam wordt er momenteel een elektrische fabriek gebouwd om 1,2 miljoen ton EMC cement per jaar te kunnen produceren tegen 2025-2026. De technologie kan ook worden toegepast op andere alternatieve grondstoffen zoals slakken, en verbrandingsassen¹¹.

→ **TRL 4-6** (naar TRL 7 met centrale Amsterdam 2025-2026)

➤ Technische aandachtspunten

De optimale calcineertemperatuur is meestal 700 – 900 °C, een te lage temperatuur zou kunnen resulteren in een onvoldoende reactieve klei terwijl een te hoge temperatuur zou kunnen resulteren in kristallisatie en verlies aan amorfe fase en dus reactiviteit. Daarnaast is het ook niet altijd even gemakkelijk de homogeniteit van de klei te bewaren doorheen een ontginning, wat de samenstelling en prestatie van het eindproduct kan beïnvloeden. Het is dus belangrijk per kleisoort en per afzetting de juiste calcineertemperatuur toe te passen¹⁴. Zowel een roterende oven als een flash calciner kan ter calcinatie gebruikt worden.

De puzzolane reactiviteit van de gecalcineerde klei wordt grotendeels bepaald door de mineralogische samenstelling van de onbehandelde klei. Het is dus aangewezen om voorafgaandelijk een mineralogische en chemische karakterisering uit te voeren. De interactie tussen gecalcineerde klei en andere cementcomponenten zoals vliegash, slakken en portlandcement moet goed worden begrepen en gecontroleerd.

Bij de toepassing van de gecalcineerde reststromen moet rekening gehouden worden met een invloed op de sterkte gelijkaardig aan vliegassen (niet gelijkaardig aan kaolinitische klei). De invloed op de verwerkbaarheid is iets minder desastreus dan bij kaolinitische kleien.

Doorgaans bevatten de klei-rijke reststromen weinig kaolinit en moet de reactiviteit gedragen worden door de andere fasen. Zo werd aangetoond dat een interactie tussen de klei-fasen (vooral illiet) en Ca nodig was om een reactieve calcium-aluminosilicaatfase te vormen tijdens flash calcinatie¹⁵. Het mogelijke belang van flash calcinatie en de interacties tussen verschillende fasen van het complexe materiaal maken de definitie van de optimale procesparameters moeilijker en nog niet duidelijk gedetailleerd in de literatuur tijdens het schrijven van deze SOTA.

Gecalcineerde klei kan een grote specifieke oppervlakte hebben en zorgen voor een verhoogde waterbehoefte van het cement. Daarnaast kunnen bepaalde kleien voor een moeilijk te beheersen verkleuring van het cement zorgen.

In tegenstelling tot calcinatieprocessen, zorgt mechanische activatie niet voor de afbraak van organische materialen. De technologie is dus veel minder geschikt voor stromen die organisch materialen bevatten (bv. baggerslib).

¹⁴ [Market trends for green cements - Cement Lime Gypsum](#)

¹⁵ Snellings, Ruben, et al. "Properties and pozzolanic reactivity of flash calcined dredging sediments." *Applied Clay Science* 129 (2016): 35-39.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

De eerder vermelde baggerspecie van AMORAS kan jaarlijks 250-300 kton gecalcineerd materiaal leveren en is dus een relevante puntbron voor cementvervangers. De technologie is klaar en de interesse van de cementbedrijven is aanwezig; cementen met gecalcineerde AMORAS-specie kunnen tegen 2030 verwacht worden in bulk toepassingen.

In een bredere uitrol van de toepassing van calcinatie op reststromen moeten nog stappen gezet worden met betrekking tot technologie-ontwikkeling. VITO investeerde in een flash-calciner pilootinfrastructuur (met cofinanciering van EFRO) om de transitie van deze ontwikkelingen naar de markt te versnellen¹⁶.

¹⁶ [Veel sneller naar een cement met lage impact dankzij de flash-calciner | VITO](#)

A.4. Alternatieve metaalslakken

➤ Korte beschrijving

Om de decarbonisatie van de cementindustrie verder te zetten, is het van uitermate belang om de zoektocht naar nieuwe cementvervangers verder te zetten. Naast hoogovenslakken worden ook andere metaalslakken geproduceerd die in aanmerking zouden kunnen komen voor gebruik als cementvervanger.

➤ Te behalen milieuwinsten

Door het gedeeltelijk vervangen in cement van portlandklinker door 'afvalstoffen' verkrijgt men een verminderde CO₂-uitstoot (minder verbrandingsenergie, minder de-carbonatatie van kalksteen) en een verminderd verbruik van primaire grondstoffen.

➤ Status van de technologie

Bij de productie van staal kunnen verschillende soorten staalslakken worden geproduceerd: LD-/BOF-slakken, EAF-slakken, RVS-slakken. Staalslakken vertonen dikwijls een te lage reactiviteit en een te hoge volume-instabiliteit. Verschillende onderzoeksprojecten trachten de kwaliteit van deze slakken te verhogen, bv. door mechanische activatie of carbonatatie (cfr. carbonatatie van RCF, fiche A.2), of door de slakken sneller te laten afkoelen tijdens productie.

→ **TRL 3-4**

Vlaanderen heeft ook een grote non-ferro sector, waarbij onder meer koper- en loodslakken worden geproduceerd. Aurubis Bulgarije verkreeg onlangs een Europese Technische Goedgekeuring (ETA) voor het gebruik van koperslakken als cementvervanger. De toegelaten vervangingspercentages zijn echter laag (tot 20% vervanging)¹⁷.

→ **TRL 6-7**

➤ Technische aandachtspunten

Traag gekoelde slakken vertonen een lage reactiviteit door ze meer 'tijd' hebben gehad om uit te kristalliseren t.o.v. snel afgekoelde slakken die meer reactieve amorfe fase bevat. Non-ferro slakken kunnen een vertraagde sterkte-ontwikkeling vertonen bij gebruik als cementvervanger¹⁸. Er zijn meer lange termijn studies nodig om de duurzaamheid van beton aangemaakt met deze slakken te onderzoeken. Verder dient ook te worden nagegaan of de mogelijke aanwezigheid van zware metalen een milieurisico inhouden.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Vlaanderen produceert jaarlijks ongeveer 400 kton LD-slakken, 200 kton RVS-slakken en 190 kton koperslakken. Er is een hoger potentieel tot valorisatie van de LD-slakken en koperslakken tot cementvervanger dan de RVS-slakken daar de RVS-slakken reeds worden ingezet als alternatief granulaat (Stinox®), vulstof (Fillinox®) en voor de productie van gecarbonateerde bouwblokken (Carbinox®) (zie fiche B.6).

¹⁷ [Aurubis Bulgaria receives "European Technical Approval" for the incorporation of iron silicate in green cements](#)

¹⁸ Wang, Ruijun, et al. "A critical review on the use of copper slag (CS) as a substitute constituent in concrete." Construction and Building Materials 292 (2021): 123371.

A.5. Verbrandingsassen van biomassa, papierslib, huisvuil

➤ Korte beschrijving

Om de decarbonisatie van de cementindustrie verder te zetten, is het van uitermate belang om de zoektocht naar nieuwe cementvervangers verder te zetten. Naast poederkoolvliegassen uit de verbranding van steenkool, vinden nog andere verbrandingsprocessen plaats die mogelijk kunnen leiden tot assen die geschikt zijn voor gebruik als cementvervanger: de verbranding van biomassa en/of papierslib, huisvuilverbranding. Ook deze assen bevatten silica, alumina en andere mineralen met puzzolane eigenschappen en tonen potentieel gelijkaardig zoals vliegass. Reeds tot 30 wt% van de vliegass, bedoeld voor cement, kan volgens EN 450-1 door bepaalde biomassa-assen vervangen worden¹⁹. Naast gedeeltelijke vervanger van portlandklinker in cement, zouden deze verbrandingsassen ook kunnen dienen als grondstof voor AAM's (zie Fiche A.10).

➤ Te behalen milieuwinsten

Door het gedeeltelijk vervangen in cement van portlandklinker door 'afvalstoffen' verkrijgt men een verminderde CO₂-uitstoot (minder verbrandingsenergie, minder de-carbonatisatie van kalksteen) en een verminderd verbruik van primaire grondstoffen.

Vliegass kan over grote afstanden getransporteerd worden, terwijl verbrandingsassen lokaal geproduceerd kunnen worden met beperkte transportafstand. Het gebruik van biomassa als cementvervanging zou zelfs tot 75 % CO₂ kunnen besparen¹⁹. De ecologische impact moet echter beter onderzocht worden per soort biomassa as en per verbrandingstechniek. Tegelijkertijd dient de biomassavliegass niet gestort te worden.

➤ Status van de technologie

Internationaal is er al veel onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van biomassa assen (rijstvlies, suikerriet-bagasse en cassave-schil) als grondstof voor cement of AAM. De assen van rijstvlies bv. kunnen, indien goed verwerkt, leiden tot een silica-rijk puzzolaan met hoge reactiviteit omwille van hun hoge specifieke oppervlakte.

In Vlaanderen heeft de KUL onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden van vliegass van biomassacentrales als cementvervanger²⁰.

→ TRL 4

➤ Technische aandachtspunten

Verbrandingsassen hebben zoals poederkoolvliegass puzzolane eigenschappen reageren ze trager dan cement. Indien niet goed behandeld, kunnen deze assen leiden tot zwellingen of ASR in het beton.

Verbrandingsassen van biomassa hebben over het algemeen een hoge specifieke oppervlakte, wat gevolgen heeft voor de waterbehoefte van het cement en de verwerkbaarheid van

¹⁹ Olatoyan, Oladele J., et al. "Potential use of biomass ash as a sustainable alternative for fly ash in concrete production: A review." *Hybrid Advances* 4 (2023): 100076.

²⁰ [Duurzame ontwikkeling van hydraulische bindmiddelen uit industrieel afval van biomassavliegass | Scriptiebank](#)

het beton. Grovere korrelgrootte zou verwerkbaarheid ten goede komen, terwijl fijnere korrelgrootte sterkteontwikkeling ten goede komt¹⁹. Verder hebben papiervliegassen een hoog gehalte aan vrije kalk.

Huisvuilverbrandingsassen dienen verder behandeld (bv. wassen) te worden om gebruikt te kunnen worden als cementvervangers. Onbehandeld vertonen ze te weinig reactiviteit en bevatten ze te veel onzuiverheden. Zo bevatten huisvuilverbrandingsassen en biomassa-assen verhoogde concentraties aan alkalis, chlorides en andere stoffen die een negatieve invloed hebben zoals zwellen, maar ook aan zware metalen die een negatieve milieu-impact kunnen veroorzaken. Ook hun heterogeniteit is een mogelijk bijkomend probleem. Afhankelijk van de verbrandingswijze en de brandstof zullen de samenstelling en de eigenschappen van de verbrandingsassen variëren¹⁹. Verschillende mogelijke voorbehandelingsstappen worden momenteel onderzocht.

De seizoens- en geografisch afhankelijke beschikbaarheid van de assen bemoeilijken het courante gebruik ervan in specifieke toepassingen. Ook is het moeilijk om reactieve assen te verkrijgen op hetzelfde afval dat gebruikt werd als brandstof. Hoge temperaturen en lange brandtijden kunnen bv. leiden tot niet-reactieve assen, terwijl onvolledige verbranding kan leiden tot organische verontreinigingen.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Jaarlijks worden ongeveer 83 kton vliegassen van huisvuilverbranding gestort in Vlaanderen. Verder wordt ongeveer 100 kton/jaar geproduceerd aan biomassa-assen (vooral papier-vliegass). Het grootste deel van deze papiervliegassen wordt momenteel ingezet als cement-/kalkvervanger in grondstabilisatie.

A.6. Alternatieve klinkergrondstoffen

➤ Korte beschrijving

Industriële reststromen, zoals bijproducten uit de staal- en mijnbouwsector, RCF (zie Fiche A.2) en verbrandingsassen (zie Fiche A.5) kunnen worden gebruikt als grondstof in plaats van traditionele kalksteen, om klinker te produceren. Deze technologie is gebaseerd op de traditionele cementchemie.

➤ Te behalen milieuwinsten

Het proces voorkomt de CO₂-uitstoot gelinkt aan de calcinatie van kalksteen. De CO₂ uitstoot zou met 70 tot 95% verminderd kunnen worden in vergelijking met traditioneel portlandcement²¹.

➤ Status van de technologie

Het Zweedse bedrijf CemVision werd opgericht in 2020 en produceert **Re-ment** uit industriële reststromen. Re-ment is ontworpen als een 'drop-in' product, wat betekent dat het compatibel is met bestaande infrastructuur en toepassingen in de bouwsector, zonder dat er significante aanpassingen nodig zijn. In 2023 voltooidde CemVision een grootschalige pilootproductie van fossielvrij cement in hun faciliteit met een capaciteit van enkele honderden tonnen per jaar. Nu heeft het bedrijf een demonstratiefabriek in Polen met een jaarlijkse productie van 4.000 ton groen cement en heeft de ambitie dit te verhogen tot 5 miljoen ton tegen 2030²¹.

CemVision heeft zijn eerste commerciële overeenkomst gesloten met LKAB, een internationaal mijnbouw- en mineralenbedrijf, met pilotleveringen die in maart 2024 zijn begonnen.

→ **TRL 7**

➤ Technische aandachtspunten

De variabele samenstelling van de reststromen uit staal- en mijnbouwsector vraagt om goede controle van de karakterisering van chemische en fysische eigenschappen om een consistent eindproduct te garanderen.

Voor de opschaling is voldoende hoeveelheid én voldoende stabiele aanvoer van deze industriële reststromen noodzakelijk.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Dit soort cement wordt nog niet in België geproduceerd, maar soortgelijke grondstoffen zijn aanwezig om ook deze technologie in België te kunnen toepassen.

²¹ [Europe's green cement startups fight to lead the \\$380bn market | Sifted](#) ; [Our tech - Cemvision Re-ment](#)

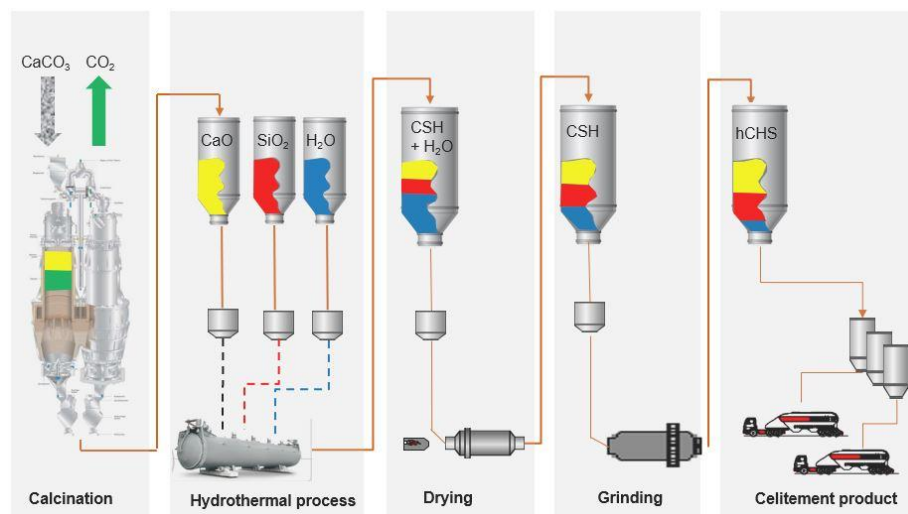
A.7. hCHS-cement

➤ Korte beschrijving

Hydraulische calciumhydrosilicaatcement (hCHS-cement) is gebaseerd op het hydraulische karakter van calciumsilicaathydraten. hCHS-cement gebruikt lagere kalkgehaltenes (of lagere Ca/Si verhoudingen van 0,5 à 2,0) waardoor minder CO₂ wordt geproduceerd tijdens de klinkerproductie in vergelijking met Portlandcement. Tijdens de hydratatie van hCHS-cement zal exclusief CSH geproduceerd worden in tegenstelling tot de complexe set van hydratatieproducten bij Portlandcement. hCHS-cement wordt geproduceerd in meerdere stappen (Figuur 3):

1. De grondstoffen moeten reactief CaO en SiO₂ bevatten en worden voornamelijk bereid door kalksteen te calcineren (temperaturen tot 900 °C).
2. Een hydrothermische behandeling in een autoclaaf bij temperaturen van 150 à 300 °C en gesatureerde luchtvochtigheid vormen een tussenproduct dat nog geen hydraulische eigenschappen bevat, de waterstofverbindingen houden het stabiel en verhinderen verdere reactie.
3. Activatie gebeurt door het vermalingsproces, waarbij de waterstofverbindingen verbroken worden. Dit is de mechano-chemische behandeling en nieuwe calciumhydrosilicaten worden gevormd.

Er zijn geen temperaturen nodig tot 1450 °C zoals voor klassiek portlandcement.



Figuur 3: productieproces Celitement.

➤ Te behalen milieuwinsten

De hoogste te behalen temperatuur is tijdens de calcinatiestap, dewelke meer dan 1/3 lager ligt dan voor het sinteren van portlandcement. Dit verlaagt energieconsumptie en CO₂-uitstoot. Voor de synthese dienen de grondstoffen slechts verhit te worden tot op 20% van de temperatuur waarop kalksteen verhit dient te worden bij de productie van klassiek cement (= energie-winst). Doordat er voor de productie in verhouding met klassieke klinker veel minder kalksteen gebruikt wordt, is er ook minder CO₂-uitstoot door de thermische decompositie van kalksteen.

De totale CO₂-reductie zou kunnen oplopen tot 50%. Om veilig gebruikt te kunnen worden dienen er wel verscheidene chemicaliën toegevoegd te worden.

➤ Status van de technologie

De Duitse firma Celitement GmbH heeft in 2011 een pilootplant voor hCHS-cement (*celitement*) geplaatst²². Tussen 2014 en 2017 liep een onderzoeksproject aan de Karlsruhe Institute of Technology (KIT) om het productieproces te optimaliseren. Anno 2021 heeft Schwenk Zement een proeffabriek geïnstalleerd voor de productie van 1 ton/dag¹⁴. Deze proeffabriek staat in voor proces- en productontwikkeling om verschillende hCHS-cementtypes te testen in verschillende toepassingen. Gebaseerd op deze ontwikkelingen en consumentenvraag zal een industriële fabriek gebouwd worden met een capaciteit van 50.000 ton/jaar, gepland in 2025.

In 2018 werd een Europese REACH-registratie voltooid en momenteel wordt gewerkt aan een algemene bouwvergunning in Duitsland (abZ). De bedoeling is om te voldoen aan de eisen voor een classificatie van Celitement gebaseerd beton in de sterkteklasse “42,5 R en hoger” en in alle blootstellingsklassen volgens EN 206-1 in combinatie met de nationale norm DIN 1045-2.

→ **TRL 8**

➤ Technische aandachtspunten

Het hCHS-cement is zeer variabel in samenstelling en eigenschappen. Bepaalde interacties in het beton, aangemaakt met dit bindmiddel, zijn sterk verschillend van deze met klassiek cement. Celitement bevat bijvoorbeeld geen aluminaatfases, geen gips en verwerkbaarheid wordt best behaald met superplast.

Het resulterende beton zou minder goed presteren qua weerstand tegen zuren en zou minder geschikt zijn voor gewapend beton.

Vergeleken met portlandcement zou het een lagere kalkuitbloeiing, zeer geringe hydratatie-warmte, hoge beginsterkte en hoge sulfaat- en ASR-resistentie hebben.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Het product wordt voorlopig in samenwerking met enkele industriële partners op de markt gebracht voor specifieke toepassingen: isolerende granulaten, vezelbeton, lijm, mortel, pleistermortel, gepigmenteerd beton, wit cement.

²² [Home - Celitement](#)

A.8. Calciumsulfoaluminaat (CSA) klinker

➤ Korte beschrijving

Calciumsulfoaluminaat (CSA) klinker is een familie van klinkers met een hoog gehalte aan ye'elemiet ($\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}\cdot\text{SO}_4$) en is aluminiumrijker door grondstoffen zoals bauxiet en minder kalksteen²³. De klinker wordt op gelijkaardige manier vervaardigd als Portland klinker, met het verschil dat dit bij 1200-1400 °C i.p.v. 1450 °C. Het afgeleide cement is een hydraulisch bindmiddel met een snelle sterkteontwikkeling, voornamelijk door de vorming van ettringiet. Als secundaire fase bevat CSA naast ye'elemiet, ook beliet of aliet en mogelijks ook ternesiet of ferriet (waardoor dus naast ettringiet ook C-S-H of andere bindende fasen kunnen gevormd worden). Afhankelijk van de aanwezige secundaire fase spreekt men van "normaal" CSA (beliet-ye'elemiet), BYF (beliet-ye'elemiet-ferriet), BYT (beliet-ye'elemiet-ternesiet), of AYF (aliel-ye'elemiet-ferriet) klinker. In sommige gevallen wordt de Y van ye'elemiet vervangen door de C van calciumsulfoaluminaat. Zo kan men bv. ook de benaming BCT-cement terugvinden (beliet-CSA-ternesiet).

➤ Te behalen milieuwinsten

T.o.v. Portlandklinker zou men met CSA-cement 25-35% CO₂-uitstoot kunnen verminderen, maar een goede afgasinstallatie is nodig om SO_x emissies te verhinderen^{24,25}. De opvang van SO_x emissies is een van de redenen van de hogere prijs en een bron van CO₂-emissies door het gebruik van CaO. Door het veel lagere gehalte aan kalksteenmeel in de klinkergrondstoffen, kan echter een lagere CO₂ uitstoot door de chemische reacties bekomen worden. Ook de keuze van de fasesamenstelling kan verder de CO₂-uitstoot optimaliseren (CO₂ emissies aliet > beliet > ye'elemiet).

CSA-cement kan uit industriële reststromen vervaardigd worden zoals grondstoffen beschreven in Fiche A.6, maar kan ook een belangrijke uitweg zijn voor sulfaatrijke reststromen zoals sulfidische tailings²⁶.

➤ Status van de technologie

Traditioneel CSA-cement op basis van beliet en ye'elemiet is commercieel beschikbaar en wordt al gebruikt in verschillende nichetoepassingen zoals snelreparatiemortels en tegellijmen²⁷. Vooral applicaties met hoge beginsterkte en waar weinig krimp gewenst is. Een commerciële uitrol naar bulktoepassingen zit niet in het vooruitzicht door de hogere kost in vergelijking met Portland klinker²⁸. Deze kost is gerelateerd aan de prijs voor alumina-bronnen zoals bauxiet (ye'elemiet is alumina-rijk) en het vangen van de SO_x emissies^{24,29}.

²³ Linssen J, van der Wegen G, Muehleisen N. Ontwikkelingen grondstoffen in beton. Kansen voor alternatieve cementen, alkali-geactiveerde bindmiddelen en alternatieve benaderingen. Betoniek. 2022, vakblad 1.

²⁴ Hanein, Theodore, Jose-Luis Galvez-Martos, and Marcus N. Bannerman. "Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production." *Journal of Cleaner Production* 172 (2018): 2278-2287.

²⁵ Nie, Song, et al. "Analysis of theoretical carbon dioxide emissions from cement production: Methodology and application." *Journal of Cleaner Production* 334 (2022): 130270.

²⁶ Martins, Natalia Pires, et al. "Exploring the potential for utilization of medium and highly sulfidic mine tailings in construction materials: A review." *Sustainability* 13.21 (2021): 12150.

²⁷ [CSA Cement Supplier China, Calcium Sulfoaluminate Cement Specialty Cement - Oreworld](#)

²⁸ [Belite calcium sulfoaluminate \(BCSA\) : GCCA](#)

²⁹ Gálvez-Martos, José-Luis, et al. "Techno-economic assessment of calcium sulfoaluminate clinker production using elemental sulfur as raw material." *Journal of Cleaner Production* 301 (2021): 126888.

China is de grootste producent van CSA-cement met een geschatte productie van 2-3 Mt/jaar³⁰. CSA-cement wordt in de westerse wereld geproduceerd door Buzzi Unicem, Ciments Vicat en Holcim²³.

→ **TRL 9**

De Ternocem van Heidelberg Materials is geëvolueerd van een BYT naar een BYF klinker en gebruikt reststromen uit de industrie als grondstof. Deze technologie werd reeds gedemonstreerd voor spoordwarsliggers, legoblokken en betonplaten, en wegdekterrein.

→ **TRL 8**

➤ Technische aandachtspunten

Doordat de binding van CSA voornamelijk via ettringiet gebeurt, is de thermische stabiliteit lager dan voor Portland cement. Problemen kunnen optreden bij verhitting > 60 °C²⁸. De weerstand tegen carbonatatie is laag, maar dit is meestal geen probleem voor de nichetoepassingen van CSA. De resistentie tegen externe sulfaataanval is hoger dan bij Portland cement²⁸.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Door zijn specifieke eigenschappen zal het gebruik in de nichetoepassingen belangrijk blijven. De doorbraak voor gewone prefab en stortklaar toepassingen is niet te verwachten, door de kostprijs en minieme winst in CO₂ uitstoot (ten opzichte van andere alternatieven in deze SOTA).

³⁰ [Market trends for green cements - Cement Lime Gypsum](#)

A.9. Carbonateerbare klinker

➤ Korte beschrijving

Een historisch belangrijke klinker is belietklinker. Deze klinker heeft ten opzichte van portlandklinker een verlaagd CaO-gehalte (ongeveer 25%), wat resulteert in een beliet-gebaseerd ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_2S) cement in plaats van de huidige cementen op basis van aliet ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$). Portlandcementklinker bestaat uit 65% aliet en 15% beliet, terwijl bij traditioneel belietcement het aandeel beliet >50% is. De technologie en productiewijze is vergelijkbaar met die van reguliere portlandcementklinker maar er wordt minder kalk gebruikt en de brandtemperatuur is lager (ongeveer 1350 °C i.p.v. 1450 °C). In de huidige cementsector wordt het nauwelijks verkocht door de trage hydratatiesnelheid, maar recent krijgt dit klinkersysteem een boost in interesse vanuit onderzoek en ontwikkeling door de hoge reactiviteit voor minerale carbonatatatie. Meer algemeen worden klinkers met traag/niet-hydrateerbare calciumsilicaten onderzocht op basis van beliet (C_2S), rankiniet (C_3S_2), of wollastoniet/pseudowollastoniet (CS).

➤ Te behalen milieuwinsten

De verlaging van het CaO-gehalte in het cement leidt rechtstreeks tot een vermindering in CO_2 -emissie door minder decarbonatatatie van kalksteen. De winst op CO_2 -uitstoot is evenredig met de verlaging van het CaO-gehalte, dit kan 10-25 % zijn. Door de lagere temperatuur van de productie wordt ook de energieconsumptie verminderd. De grootste winst in CO_2 -verlaging wordt echter gedaan door de uitharding via minerale carbonatatatie uit te voeren. Daardoor wordt een groot deel van de uitgestoten CO_2 terug in het materiaal gestockeerd. In combinatie met alternatieve grondstoffen voor de productie van de klinkers (zie fiche A.6) kan zo naar een CO_2 -neutraal cement gestreefd worden.

➤ Status van de technologie

Traditioneel (hydraterend) beliet klinker gebaseerd cement wordt commercieel toegepast sinds 1930³¹. Door zijn trage uitharding is de toepassing vooral in nichemarkten waar de lage warmteontwikkeling die daarmee gepaard gaat nuttig is³². Het bekendste voorbeeld is het gebruik om dammen te maken (bv. Hooverdam in VS, Driekloven in China).

→ TRL 9

Klinkers specifiek geoptimaliseerd voor inzet in minerale carbonatatatie zijn nieuw en nog onderhevig aan ontwikkelingen. Er is veel labo- en pilootactiviteit in China (bv. Wuhan University of Technology). In HEU Carbon4Minerals³³ zijn succesvolle piloottesten op ton-schaal uitgevoerd in een samenwerking van VITO en Heidelberg Materials. Solidia heeft zijn productieproces om een soort carbonateerbare klinker "Solidia Cement" te maken gepatenteerd. Sinds 2013 heeft Holcim een commerciële deal met Solidia Technologies die doorloopt tot minstens 2025. Momenteel wordt Solidia Cement commercieel toegepast in de VS en Europa als pavers en prefabelementen, en zijn er industriële piloot-installaties in het Verenigd Koninkrijk (prefab productie), Duitsland (cementproductie) en Frankrijk.

→ TRL 8

³¹ [Reactive belite-rich Portland cement \(RBPC\) : GCCA](#)

³² Cuesta, Ana, Andres Ayuela, and Miguel AG Aranda. "Belite cements and their activation." *Cement and Concrete Research* 140 (2021): 106319.

³³ <https://www.carbon4minerals.eu/>

➤ Technische aandachtspunten

Voor de toepassingen van de klinker in minerale carbonatatie worden de technische aandachtspunten besproken in Fiche A.11. Een bemerking is dat deze klinkers, geoptimaliseerd voor carbonatatie, altijd in zeer milde condities zullen kunnen reageren. Daardoor is het rechte reeks gebruik van procesemissies en de carbonatatie in klimaatkamers in plaats van autoclaven altijd mogelijk met een carbonateerbare klinker als grondstof. Het klinkerproces zelf heeft dezelfde noden en aandachtspunten als portlandklinker productie, dus deze worden goed beheerst door de cementbedrijven. Er is echter meer variabiliteit mogelijk in samenstelling in vergelijking met portlandklinker en het gedrag van het cement kan dus nog sterker afhankelijk zijn van de leverancier dan voor portlandcement.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

De huidige Belgische markt heeft voldoende carbonateerbare grondstoffen beschikbaar (bv. staalslakken) om de vraag te bedienen. De verwachte stijging van het gebruik van minerale carbonatatie (zie Fiche A.11), vooral voor prefab toepassingen, kan dit veranderen op lange termijn.

A.10. Alkalisch geactiveerde materialen en geopolymeren

➤ Korte beschrijving

Alkalisch geactiveerde materialen (Alkali-activated materials, AAM) zijn bindmiddelen, die bestaan uit precursor, activator, additieven, die onder waterige omstandigheden reageert tot een gehard materiaal. De precursor is hierin een anorganisch poeder, aanwezig als bindende vaste stoffen, wat niet de activator of additieven is. De activator is de bron van alkalimetalen en/of Mg, en/of Ca, die een reactie, binding en uitharding induceert en de additieven zijn chemische (organische) stoffen, mogelijks noodzakelijk, om binding te reguleren.

Vaak is AAM gebaseerd op de alkali-aluminosilicaatchemie waarbij de precursor de aluminiumoxide-silicaatcomponent gecombineerd met de activator als alkali-bron²³. De meest gebruikte alkali-bronnen zijn de hydroxiden of silicaten van natrium of kalium, meestal in waterige vorm. Alkalisilicaten worden vaak in vloeistof gebracht terwijl alkali-hydroxiden ook in poeder kunnen worden toegevoegd. Voorbeelden van aluminosilicaatgrondstoffen als precursor die in aanmerking komen als AAM zijn hoogovenslakken, vliegash, natuurlijke puzzolanen, diverse slakken (staalslak, fosforslak, FeNi-slak, koperslak, ...), bodemassen, vliegashen van de verbranding van biomassa, gecalcineerde kleien, ... De verkregen chemische structuren van de verschillende soorten AAM's kunnen dus zeer uiteenlopend zijn.

Bij AAM's op basis van aluminiumsilicaten (en dus een laag calciumgehalte; bv. metakaolinit) spreekt men ook van *geopolymeren*. Deze term wordt echter vaak foutief gebruikt om alle AAM's aan te duiden.

➤ Te behalen milieuwinsten

Door 'beton zonder cement' te maken kan de CO₂-afdruk van het beton drastisch (40%-80 %) verlaagd worden omdat geen decarbonatisering van kalksteen plaatsvindt en geen verhittingsenergie verbruikt wordt^{23,34}. Bovendien worden in AAM's veelal industriële reststromen gebruikt. De resterende CO₂-uitstoot is nog afkomstig van de productie van de activator (in het geval van geopolymeren is dit meestal natriumsilicaat). Er dient over gewaakt te worden dat de impact van de activator de behaalde winsten door de vervanging van cement niet overstijgt.

De lokale beschikbaarheid van deze producten zal een groot deel uitmaken van de potentiële te behalen milieuwinsten.

➤ Status van de technologie

AAM is geen nieuwe technologie, maar de interesse hierin is de laatste jaren sterk gestegen gezien het potentieel om de CO₂-afdruk van beton drastisch te verlagen. Voorheen was het meeste onderzoek op AAM's gericht op hoogovenslakken en vliegash, maar gezien deze secundaire grondstoffen al zo goed als volledig in de klassieke cementindustrie verwerkt worden, ligt de nadruk tegenwoordig meer op de alternatieven. Een referentiewerk met betrekking tot AAM is Rilem publicatie TC 224-AAM³⁵.

³⁴ Habert G, Ouellet-Plamondon C. Recent update on the environmental impact of geopolymers. RILEM Tech Lett 2016;1:17 – 23.

³⁵ [Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM | SpringerLink](#)

In Vlaanderen zijn verschillende bedrijven AAM's aan het ontwikkelen, zoals Devagro (Eco2Polycon), Ebema³⁶ en Resourcefull³⁷. SBO-projecten zoals CeComStruct, STIFF en GHRANTE onderzochten AAM als alternatief van traditionele cement in toepassingen zoals textielversterkte composieten, geluidsisolatie en vuurresistentie in wegen en tunnels. Het ETN H2020 DuRSAAM deed onderzoek naar AAM, als ook vezelversterkt en textielversterkt AAM.

In Groot-Brittannië bestaat een nationaal normatief document voor AAM's: BSI Flex 350 V1.0 "Alternative binder systems for lower carbon concrete. Code of Practice". Ook in Nederland bestaat er de CUR-aanbeveling 123:2018: "Betonwaren vervaardigd met geopolymeer als bindmiddel" voor AAM-beton en zijn er enkele bedrijven al vergevorderd met het ontwikkelen van diverse AAM's, zoals SQAPE³⁸ met hun RAMAC³⁹ geopolymeerbeton en VBI met het bindmiddel INVIE van de BTE groep⁴⁰. SQAPE heeft pilootprojecten zoals een voorgespannen fietsbrug⁴¹, een rijweg⁴², gevel- en wandelementen⁴³ en brugpijlers⁴⁴ en VBI heeft kanaalplaten gemaakt. Hofmann Green Cement in Frankrijk produceert H-P2A cement, dewelke gebaseerd is op geactiveerd klei en silicaat.

→ TRL 7/8

Deze technologie werd opgenomen in het validatie- en uitdiepingsluik van Circular.Concrete als ook in het project Circular Concrete Center CCC. De oriënterende proeven toonden aan dat deze materialen zich in verse toestand zeer gelijkaardig gedragen als traditioneel beton, al dienen er in bepaalde gevallen bijkomende maatregelen genomen te worden ter bescherming van materiaal en personeel. Verhard vertoont het gelijkaardige mechanische eigenschappen als traditioneel beton en verbeterde duurzaamheidseigenschappen (behalve voor de carbonatatieweerstand, maar hier zou de proefmethode niet aangepast zijn aan het type materiaal). Net zoals bij traditioneel beton hangen de eigenschappen sterk af van het gebruikte type bindmiddel. Momenteel worden pilootprojecten uitgevoerd met AAM in het project Living Lab Circulair Beton, als ook in Eco2Chape, met name om een chape te ontwikkelen en te plaatsen.

De nood is dus hoog voor een regelgevend kader, daarom werd in 2022 een werkgroep AAM onder de normalisatiecommissie E104 opgericht om een normenkader te creëren voor AAM. De bedoeling is om via dit kader de bindmiddelen een mogelijkheid tot certificatie te geven en breder gebruik mogelijk te maken op de markt. Anno 2024 is de werkgroep een norm aan het opstellen op bindmiddelniveau en een norm voor in betontoepassingen.

➤ Technische aandachtspunten

De technische aandachtspunten omvatten de verwerkingstijd van het AAM-beton, de veiligheid op de werf (het betreft een sterk alkalisch product), de continuïteit van de grondstoffen en duurzaamheid²³. De klassieke versnelde duurzaamheidstesten, beschreven in de betonnormen (bv. de weerstand tegen carbonatatie), zijn mogelijk niet van toepassing voor AAM-beton.

³⁶ [Geopolymeerbeton | CO2-arm beton | Ebema_LivingCity](#)

³⁷ [Low Carbon Concrete | ResourceFull | Eke \(Gent\) ; Devagro | afbraak- en grondwerken - sanering - betoncentrale](#)

³⁸ [SQAPE – Duurzaam alternatief voor cement](#)

³⁹ [Duurzaam en bestendig bouwen RAMAC is het alternatief](#)

⁴⁰ [2024/3/20 - Kanaalplaat met 90% CO2-reductie op het bindmiddel - lees verder... - BouwCirculair](#)

⁴¹ [Fietsbrug van geopolymeerbeton N69 is 75% schoner dan traditioneel beton](#)

⁴² [Rumst Recycling | betoncentrale – breekwerf – grondreiniging – top](#)

⁴³ [2024/3/20 - De eerste woningen met wanden en gevels in geopolymeerbeton - lees verder... - BouwCirculair](#)

⁴⁴ Leenders F, Pijlers Galgenveldbrug in geopolymeerbeton: Aantonen gelijkwaardigheid van geopolymeerbeton en de toepasbaarheid van Eurocode 2. 2023, CEMENT, 5.

Toch zouden bepaalde AAM's kunnen leiden tot een 'beton' met betere eigenschappen dan klassiek beton op het vlak van bv. weerstand tegen zuren, vuurbestandheid, krimp. Bovendien zorgt de hoge pH van AAM's, net zoals bij klassiek beton, voor passivering van de stalen wapening.

Eén van de uitdagingen van AAM's is dat er niet één AAM is. Elk AAM is anders, heeft een andere activator nodig en heeft een andere invloed op het vers en verhard beton. Hierdoor is het moeilijk om algemene aanbevelingen te maken. Door hun flexibiliteit in samenstelling kunnen AAM's en geopolymeren dan weer wel op maat gemaakt worden voor selectieve immobilisatie of inkapseling van problematische afval zoals metaalrijke slakken.

Er bestaan tevens nog vragen aangaande de recycleerbaarheid (het zogenaamde tweede of derde leven) van het 'beton', vervaardigd met AAM's: in welke mate zullen de gebruikte slakken nadien nog bv. zware metalen uitlogen. Ook dit hangt sterk af van de gebruikte grondstoffen.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

AAM's kunnen enkel bijdragen tot een afname van de CO₂-emissies als de grondstof niet reeds volledig aangewend kan worden in binaire en ternaire cementen, wat bijvoorbeeld het geval is voor AAM's op basis van vliegas en hoogovenslakken.

Praktische problemen die ondervonden worden bij het toepassen van AAM's in de praktijk zijn de nationale normen, die alternatieve bindmiddelen in beton moeilijk toelaten op de markt. De werkgroep AAM onder de normalisatiecommissie E104 is sinds 2022 in leven geroepen om dit aan te pakken. Een bijkomende uitdaging is dat er in de Eurocode 2 voor dit materiaal geen rekenregels voorhanden zijn. Onderzoeksprojecten en ontwikkelingen in pilootprojecten blijven succesvol wat de mogelijkheden van toepassing op grote schaal tegen 2030 zal vergroten en ook meer inzichten zal geven hoe men in de Eurocode 2 met rekenregels zou kunnen omgaan.

Gezien hun mogelijke betere eigenschappen t.o.v. klassiek beton zouden de AAM's toegepast kunnen worden in rioleringen, funderingen in vervuilde grond, structuren in zee-omgeving of structuren waar een hoge brandweerstand vereist is (bv. tunnels).

A.11. Minerale carbonatatie als uithardingsproces

➤ Korte beschrijving

Calcium- en magnesiumrijke secundaire fijne grondstoffen, voornamelijk Ca-silicaten, worden bij deze technologie in vormen geperst, die vervolgens uitharden d.m.v. carbonatatie. Deze reactie bewerkstelligt de precipitatie van carbonaten. Met een goed gecontroleerde microstructuur en controle over de procesparameters kunnen de carbonaten als binder fungeren en sterktes gelijkaardig aan traditionele betonproducten bekomen. Afhankelijk van de reactiviteit van de gebruikte grondstof, kan de reactie plaatsvinden in een klimaatkamer met lichtjes verhoogde druk en een concentratie van CO₂ gelijkaardig aan industriële schoorstenen. In andere gevallen kunnen autoklaven nodig zijn om de reacties voldoende te versnellen (bv. Voor de magnesiumsilicaten in Fiche A.12). Grondstoffen met hoge reactiviteit zijn slakken uit de staal (BOF/LD) en roestvast staal (EAF/AOD) industrie. De carbonatatiereactie geeft doorgaans na 16h genoeg sterkte om verkocht te worden.

➤ Te behalen milieuwinsten

CO₂ wordt gemineraliseerd door de vorming van calcium- of magnesiumcarbonaten en er wordt geen cement verbruikt (geen verbrandingsenergie, geen thermische decompositie van kalksteen, geen verbruik van primaire grondstoffen). Per productie van 1 ton carbonatatieblokken wordt 92 kg CO₂ gecapteerd⁴⁵. Per ton carbonateerbare grondstof wordt ook ongeveer 1 ton cement bespaard. De CO₂ uitstoot van het betonproduct zakt dus effectief onder 0.

➤ Status van de technologie

Anno 2024 wordt minerale carbonatatie gebruikt door Masterbloc in Maasmechelen waar er holle bouwblokken mee worden geproduceerd⁴⁶. De firma Vandersanden (Dilsen-Stokkem) gebruikt het Carbstone proces voor de productie van Pirrouet gevelstenen⁴⁷. In dit proces wordt rechtstreeks gebruik gemaakt van de uitlaatgassen van de traditionele gevelsteenovens. Een samenwerking van Prefer, Lhoist, Fluxys en Orbix in het Innovation Fund project CO₂ncrEAT zet een symbiose op waarin een leiding wordt aangelegd vanuit de kalkoven van Lhoist naar de blokkenproductie van Prefer⁴⁸.

→ **TRL 8-9**

➤ Technische aandachtspunten

Er wordt in deze technologie geen cement gebruikt en de verharding gebeurt onder invloed van carbonatatie. Dit maakt dat de alkaliniteit van het verkregen product, in tegenstelling tot klassiek beton, onvoldoende hoog is om ingebedde stalen elementen (wapening) te beschermen tegen corrosie⁴⁹. Daardoor is onderzoek nodig naar alternatieve wapeningsmethoden voor het gebruik in structurele toepassingen. De nood aan CO₂ transport door het materiaal hindert momenteel ook nog de toepassing in gegoten producten.

⁴⁵ Di Maria A. et al. (2020). Environmental assessment of CO₂ mineralisation for sustainable construction materials. *International Journal of Greenhouse Gas Control*.

⁴⁶ Carbstone | Een eindeloze cyclus van duurzaamheid en hergebruik.

⁴⁷ <https://www.vandersanden.com/nl-be/pirrouet>

⁴⁸ <https://www.prefer.be/nl/CO2ncrEAT>

⁴⁹ Buildwise artikel 2007/03.02

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Met de nood aan CO₂-neutraliteit en de interessante carbon credits die gepaard gaan met CO₂ mineralisatie zal al de geperste prefab het voorbeeld van Vandersanden, Masterblock en Lhoist-Prefer moeten volgen. Momenteel zijn staalslakken (van Aperam-Orbix of Arcelor-Mittal) de beste bron, maar de klinkers in Fiche A.9 kunnen de beschikbare grondstoffen verder doen stijgen. Het belang voor de toepassing in gegoten producten moet verder onderzoek uitwijzen.

A.12. Binders op basis van magnesium

➤ Korte beschrijving

De wetenschappelijke literatuur^{50,51} vermeldt een variëteit aan binders die gebaseerd zijn op magnesiumverbindingen. Deze kunnen vertrekken vanuit silicaten, carbonaten, combinaties van silicaten en carbonaten of magnesiumchloride. De meesten van deze systemen hebben eigenschappen die niet geschikt zijn voor bulk betontoepassingen, maar interessant kunnen zijn in niches.

Gehydrateerde magnesiumcarbonaatcement

Mengsels van MgO en Mg-carbonaten kunnen hydratatiereacties ondergaan. Door de lage verwerkbaarheid en lage sterkte (enkele MPa) worden toepassingen als pleister gesuggereerd. De toevoeging van silica zou de sterkte kunnen verhogen door vorming van een magnesium-silicaathydraat (M-S-H) fase.

Magnesium silicaatcement

Door het mengen van MgO met reactief silica en water kan een M-S-H fase bekomen worden. Deze fase werd al vaker opgemerkt bij interactie van cement met Mg-rijke kleien of zeewater. Bij het mengen wordt een verhouding van Mg/Si van 0.8-1.5 aangeraden. De waterbehoefte en verwerkbaarheid zijn gelijkaardig aan die van gehydrateerd magnesiumcarbonaatcement en door die hoge watervraag worden vaak lage druksterktes bekomen in gewoon beton. Er zijn echter additieven in ontwikkeling die dat kunnen overkomen en mogelijks het toepassingsgebied kunnen vergroten. Recente resultaten tonen ook een gunstig gedrag in grondstabilisatie, door de natuurlijke compatibiliteit met kleimineralen.

Magnesiumsilicaten voor uitharding via carbonatatie

Magnesiumsilicaten worden door vele instanties bekeken voor minerale carbonatatie, meestal met nadruk op carbon capture and storage in de ondergrond. Er zijn echter processen die de magnesiumsilicaten te proberen gebruiken in minerale carbonatatie om bouwproducten te maken (zie ook Fiche A.11). De magnesiumsilicaten hebben hogere drukken en temperaturen nodig dan calciumsilicaten om te transformeren naar een Mg-carbonaatbinder (65-135 bar en 150-185 °C met gebruik van NaHCO₃). Een voordeel ten opzichte van calciumsilicaten is dat magnesiumsilicaten in de natuur voorkomen en er dus geen carbonaat in het productieproces moet gebruikt worden, wat de weg naar een echt CO₂-negatief proces opent.

Magnesium oxychloride cement

Magnesium Oxychloride Cement (MOC), of Sorel cement, bestaat uit MgO en MgCl₂ dat uithardt tot Mg(OH)₂MgCl₂H₂O wanneer gemengd met water. MgO wordt verkregen door calcinatie van magnesiumrijke mineralen (dolomiet of magnesiet) terwijl MgCl₂ als kristallen uit zoutwater gewonnen kan worden. MOC heeft een zeer snelle uithardingstijd en zeer hoge vuurresistentie. Nadelen zijn de gevoeligheid voor water, er is sterktevermindering na langdurige blootstelling aan vocht door de expansie van ongereageerd MgO, waardoor het voor constructietoepassingen momenteel niet geschikt is.

⁵⁰ [MgO-based binders - Lothenbach - 2023 - ce/papers - Wiley Online Library](#)

⁵¹ Walling, Sam A., and John L. Provis. "Magnesia-based cements: a journey of 150 years, and cements for the future?." *Chemical reviews* 116.7 (2016): 4170-4204.

➤ Te behalen milieuwinsten

De meeste voorbeelden hebben een relatief hoge CO₂ uitstoot door de productie van MgO vanuit MgCO₃. Bij het gebruik van gehydrateerde Mg-carbonaten kan dat nadeel gedeeltelijk weggewerkt worden door de recarbonatatie in het productieproces. Een uitzondering is echter wanneer ook Mg-silicaten gecarbonateerd worden, waardoor meer CO₂ kan opgeslagen worden dan werd uitgestoten.

➤ Status van de technologie

Gehydrateerd magnesium carbonaatcement en magnesiumsilicaat cement zijn onderwerp van onderzoek op laboschaal, met veel activiteit van EMPA en (in iets mindere mate) de Universiteit van Oulu. Een spin-off van Imperial College London, Novacem, heeft geprobeerd dit type bindmiddel te commercialiseren, maar dit is tot op heden niet gelukt.

→ TRL 3

Magnesiumsilicaten voor uitharding door minerale carbonatatie zijn vooral met betrekking tot carbon capture and storage sterk onderzocht. Commerciële exploitatie gebeurt door bedrijven die carbon credits verkopen of compensatie van emissies aanbieden. Het proces gebruiken als uithardingsproces ter productie van bouwmaterialen is echter lastiger. Door de condities die nodig zijn om de carbonatiereactie te bewerkstelligen is dit technisch uitdagend. Enkele uitvindingen proberen dit door voorbehandelingen te overkomen. Deze zijn momenteel enkel in het labo terug te vinden, hoewel een klinkerbehandeling momenteel wordt opgeschaald in HEU ENICON⁵² naar TRL5.

→ TRL 3

MOC, of Sorel cement, wordt reeds wijdverspreid toegepast in nichetoepassingen zoals vloeren, vuurvaste toepassingen en isolatie. Dit heeft betrekking tot industriële vloeren in chemische fabrieken, magazijnen en werkplaatsen met zware belasting. MOC wordt ook als decoratieve vloer gebruikt door zijn glad en esthetisch uiterlijk. MOC kent ook door de hoge thermische isolatiecapaciteit toepassing in brandwerende constructies zoals isolatiepanelen in staalfabrieken of aluminiumsmelterijen, in vuurvaste tegels voor open haarden en ovens in bakkerijen en industriële keukens.

→ TRL 9

➤ Technische aandachtspunten

De hydratatieproducten van **magnesium carbonaatcement en magnesiumsilicaat cement**, verschillen van deze van klassiek cement. Dit kan zowel invloed hebben op de mechanische eigenschappen als op de duurzaamheidseigenschappen van het beton, aangemaakt met dit cement. Er kunnen sterktes bereikt worden tot 90 MPa, maar daartegenover staat een lage treksterkte en elasticiteitsmodulus. Het gebruik van zeer hoge drukken (~150 bar) maakt dit productieproces enorm uitdagend voor opschaling en veiligheid. De beschikbaarheid van magnesiumsilicaten is een uitdaging. Magnesiumrijke afzettingen zijn schaars en kostelijk om te ontginnen en vooral gebruikt in andere industrieën.

⁵² <https://enicon-horizon.eu/>

Bij **MOC** is de verhoudingen van MgO , MgCl_2 , en water cruciaal voor de kwaliteit van het eind-product. Verschillende verhoudingen kunnen leiden tot variaties in sterkte, duurzaamheid en andere eigenschappen. Meestal wordt een molverhouding van 2:1 of 3:1 van MgO tot MgCl_2 gebruikt. Uitgehard MOC is niet alleen gevoelig aan water, het is ook niet vorst-dooi resistent en door oplosbaarheid in water kan het corrosieve oplossingen afgeven⁵³.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Het potentieel voor grootschalige productie in België markt is eerder laag aangezien er geen primaire magnesiumsilicaat-afzettingen (forsteriet, talk...) aanwezig zijn in België. In Noord-Europa zijn magnesiumsilicaten zeer veel voorkomend. Afhankelijk van de waarde van de toepassing kan naar import van bv. olivijn gekeken worden, hoewel dit verdere druk zet op de techno-economische parameters van de beschreven processen.

⁵³ Bensted, John. "Special cements." *LEA's Chemistry of Cement and Concrete*. Butterworth-Heinemann, 1998. 783-840.

A.13. Elektrochemische cementproductie

➤ Korte beschrijving en te behalen milieuwinsten

De productie van traditionele (Ordinary) Portlandcement (OPC) vergt veel energie en gerelateerde CO₂-productie. Elektrochemische cementproductie is een methode in ontwikkeling om deze CO₂-productie te verminderen. **Elektrochemische Portlandvervanger** wordt geproduceerd via een elektrochemisch proces waarbij kalksteen oplost aan de ene elektrode en pure CaO neerslaat aan de andere elektrode. Dit proces kan gestuurd worden door hernieuwbare elektriciteit⁵⁴. De CO₂ die vrijkomt van de kalksteen kan worden opgevangen. In plaats van kalksteen kunnen ook andere minerale grondstoffen gebruikt worden. Elektrochemische Portlandvervanger zou één op één OPC kunnen vervangen, d.w.z. gebruikt kunnen worden in dezelfde toepassingen zonder aanpassingen⁵⁵.

➤ Status van de technologie

Deze technologie werd onder andere door MIT ontwikkeld en verder opgeschaald in een spin-off genaamd Sublime Systems. Het bedrijf produceerde in 2024 3 ton 'Sublime cement' voor een commercieel gebouw. Ze voorzien een cementproductie eenheid anno 2026 om 30.000 ton cement per jaar te kunnen produceren. Dit zou hun eerste commerciële stap zijn. De University of Colorado heeft 'chement' ontwikkeld o.b.v. deze technologie.

→ **TRL 6-7** (naar 8-9 met centrale 2026)

➤ Technische aandachtspunten

Elektrochemische Portlandvervanger heeft niet exact dezelfde mineralogie als OPC zoals aliet en beliet mineralen die bij hoge temperaturen gevormd worden. Er worden calciumsilicaten gevormd die gemengd vergelijkbare prestatie eigenschappen vertonen. Het elektrochemische proces is gevoelig voor verandering in grondstofstroom, wat cruciaal is bij opschaling. Elektrificatie op industriële schaal vereist optimalisatie van de elektrolysecellen en energiebeheer om rendabel te zijn. CO₂ kan vrijkomen van de chemische reactie, het ontwikkelen van infrastructuur voor CCS kan extra kosten en logistieke uitdagingen met zich meebrengen.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Elektrochemische Portlandvervanger wordt momenteel in de VS ontwikkeld.

⁵⁴ [New approach suggests path to emissions-free cement | MIT News | Massachusetts Institute of Technology](#)

⁵⁵ [With sustainable cement, startup aims to eliminate gigatons of CO₂ | MIT Climate Portal](#)

A.14. Supergesulfateerd cement

➤ Korte beschrijving

Supergesulfateerd cement wordt geproduceerd op basis van hoogovenslakken (80%-85%), gips (10%-15%) en soms ook met een zeer kleine hoeveelheid klinker (maximaal 5%). Het voornaamste hydratatieproduct van dit cement is het calciumaluminaat ettringiet. Het wordt voornamelijk gebruikt in toepassingen waar een hoge weerstand tegen agressieve chemicaliën en sulfaten vereist is.

➤ Te behalen milieuwinsten

Voor de productie van dit cement is er minder energie nodig (lagere brandingstemperaturen) dan bij een klassiek portlandcement en er treedt geen de-carbonatie op. De CO₂-emissies zijn hierdoor 90% tot 95 % lager. De productie van supergesulfateerd cement maakt gebruik van industriële reststromen zoals hoogovenslak.

➤ Status van de technologie

De norm NBN EN 15743 (2015) beschrijft de criteria waaraan een supergesulfateerd cement moet voldoen. Dit cementtype wordt als algemeen gebruiksgeschikt beschouwd volgens de norm NBN B 15-001. Een specifiek gebruiksgeschiktheidsonderzoek is echter nog wel vereist.

→ **TRL 9**

➤ Technische aandachtspunten

Supergesulfateerd cement leidt tot een lagere beginsterkte en een lage hydratatiwarmte. Hierdoor is het interessant voor massieve betonconstructies met lager risico tot thermische scheuren. Het cement presteert zeer goed qua duurzaamheid in chemisch agressieve milieus (bv. sulfaten) en kan dus toepassingen vinden in rioleringen, afvalwaterbehandelingsinstallaties en maritieme structuren.

Een nadeel van supergesulfateerd cement is de gevoeligheid voor onzuiverheden bij zowel de productie als nadien op de betoncentrale. De kwaliteit van de gebruikte hoogovenslak moet zeer consistent zijn. Bij contaminatie kan de sterkte van het cement sterk afnemen. Ook heeft beton aangemaakt met supergesulfateerd cement een lagere weerstand tegen carbonatie⁵⁶.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Dit cementtype was al beschikbaar op de Belgische markt, maar werd wegens te weinig vraag van de markt gehaald. Dit komt omdat voor hogere zuur- of sulfaatbestendigheid geen supergesulfateerd maar eerder SR en HSR (high sulfate resisting) cement wordt gebruikt, zoals CEM III/B, /C. Een uitdaging is ook de beschikbaarheid van grondstoffen zoals hoogovenslakken, deze worden veeleer gebruikt ter vervaardiging van binaire en ternaire cementen (Fiche A.1).

⁵⁶ Buildwise artikel 2007/03.02

A.15. Biocement

➤ Korte beschrijving

Het mechanisme achter biocement is microbiële calciëtprecipitatie (MICP), waarbij micro-organismen, zoals bacteriën, calciumcarbonaat (CaCO_3) afzetten, wat leidt tot verharding van het product⁵⁷. Biocement wordt geproduceerd door biologische processen in plaats van anorganische chemische reacties, zoals bij traditioneel cement.

➤ Te behalen milieuwinsten

Het biologisch cementwerk groeit bij kamertemperatuur tot tegel of baksteen, zonder de nood aan de hoge temperaturen en gerelateerde CO_2 uitstoot. Het proces is zo ontworpen dat geen fossiele brandstoffen nodig zijn en non-toxische en lokaal beschikbare materialen gebruikt worden, waardoor ook materiaaltransport kan verlagen of verdwijnen. Ook secundaire grondstoffen kunnen met biocement samengaan. Er zijn claims dat er tot 80-90% minder CO_2 wordt uitgestoten met biocement t.o.v. traditioneel cement.

De MICP technologie kan ook toegepast worden in zelfhelend beton, waardoor in scheuren en barsten micro-organismen de calciumcarbonaten gaan vormen en het mogelijk zou zijn tot 40% krimpwapening te besparen^{58,59}. Dit kan de duurzaamheid en levensduur van de constructie verhogen, waardoor ook de CO_2 -uitstoot met 30-50% verlaagd zou kunnen worden.

➤ Status van de technologie

Voorals tegels en bakstenen worden geproduceerd en toegepast op de markt. Biomason, opgericht in North Carolina, produceert in Denemarken voor de Europese markt, o.a. tegel- en baksteenproducten, pavers en muren⁶⁰. Biomason heeft reeds tegels gelegd in gebouwen en op bruggen.

In betonreparatie wordt MICP gebruikt om scheuren te dichten⁵⁸. Basilisk is een Nederlands bedrijf dat zich specialiseert in zelfherstellend beton waarbij MICP wordt gebruikt. In hun Basilisk Healing Agent zitten micro-organismen die calciumcarbonaat neerslaan en het is al in diverse bouwprojecten toegepast.

→ TRL 7-8

Biocement is een recent product. Onderzoekers blijven bacteriestammen ontwikkelen die efficiënter calciumcarbonaat kunnen afzetten, waardoor biocement sterker en sneller kan worden geproduceerd.

MICP kan ook gebruikt worden om de sterkte, waterabsorptie en dichtheid van gerecycleerde granulaten te verbeteren^{57,61}. Enkele uitdagingen naar opschaling toe zijn de condities waarin de bacteriën gehouden dienen te worden: wat op laboschaal lukt, kan uitdagend worden op grotere schaal. MICP op betongranulaten is redelijk recent en heeft potentieel verder uit te groeien mits verder onderzoek. Kosten dienen geëvalueerd te worden op grote schaal.

⁵⁷ [Microbial Induced Calcite Precipitation for Developing Sustainable Construction Materials | Frontiers Research Topic](#)

⁵⁸ Zhang, Y. S., et al. "Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique in concrete crack repair: A review." *Construction and Building Materials* 411 (2024): 134313.

⁵⁹ [Basilisk - Zelfhelend beton](#)

⁶⁰ <https://biomason.com/>

⁶¹ Zhang, J.; Wang, C.; Wang, Z. Factors Affecting the Physical Properties of Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) Enhanced Recycled Aggregates. *Buildings* **2024**, *14*, 2851. <https://doi.org/10.3390/buildings14092851>

Veldproeven met biocement in kustverdediging en bodemsanering zijn uitgevoerd, om erosie te verminderen en de stabiliteit van bouwprojecten te vergroten⁶². Dit is succesvol aangetoond in pilootprojecten en kleinschalig in de praktijk. Verdere opschaling is nog noodzakelijk.

→ **TRL 6**

➤ Technische aandachtspunten

Het proces van MICP dient regelmatig gecontroleerd te worden opdat het continue blijft verlopen: het behouden van de microben in beton gedurende een lange periode is een uitdaging⁵⁸. De prestatie van MICP is sterk omgevingsafhankelijk met name de temperatuur, vochtigheid, pH, chemische samenstelling. Een beheer van deze parameters is essentieel.

Bij de ureumhydrolyse-gebaseerde MICP, een veelgebruikte techniek, komt ammoniak vrij als bijproduct. Dit kan schadelijk zijn voor het milieu en gezondheid⁵⁸.

Opschaling van laboschaal naar toepassingen in de praktijk blijft complex om een consistente en efficiënte productie van calciumcarbonaat in grote volumes te waarborgen.

Het selecteren van de juiste voedingsstoffen en calciumbronnen voor microben zonder de mechanische eigenschappen van het beton negatief te beïnvloeden, blijft een uitdaging. Sommige voedingsstoffen kunnen bijvoorbeeld corrosie van staal in gewapend beton veroorzaken⁵⁸. De prestaties en duurzaamheid op lange termijn dient men te begrijpen: de ontwikkelingen zijn nog redelijk recent.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Biocement kan zeker op de Belgische markt worden toegepast daar lokale materialen gebruikt kunnen worden. Basilisk is een Nederlands bedrijf.

⁶² Tang, CS., Yin, Ly., Jiang, Nj. et al. Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review. *Environ Earth Sci* **79**, 94 (2020).

A.16. Gedenatureerde asbest

➤ Korte beschrijving

Asbest kan onschadelijk gemaakt door denaturatie, waardoor de vezels volledig afbreken. Denaturatie kan door thermische, mechanische of chemische (alkalische) processen⁶³. Thermische behandeling is via verhitting tot zeer hoge temperaturen (>1.000 °C) om asbestvezels om te zetten in inert glasachtig materiaal. Dit kan via vitrificatie (plasma- of elektrische oven) of smelten in glasovens. Een mechanische behandeling kan door intensieve maal- of wrijftechnieken om vezelstructuur te breken en de kristalstructuur te verstoren. Dit kan door hoog-energetische kogelmolens of mechanochemische activering. Chemische (alkalische) behandeling is met sterke basen (NaOH, KOH) bij verhoogde temperatuur en druk om asbestvezels op te lossen. Dit kan autoclaaf met NaOH-oplossing of door hydrothermale processen.

Uiteindelijk blijft een fijn calciumsilicaatpoeder over dat asbestvrij is. Het is reactief en kan als opvulling en zelfs gedeeltelijke cementvervanging gebruikt worden in beton. Het gedrag is als een SCM met puzzolane/hydraulische eigenschappen.

➤ Te behalen milieuwinsten

100% van het asbestcement kan worden hergebruikt waardoor stortplaatsen met ondergrondse opslag en blijvende milieurisico's van asbestafval worden vermeden. Er zijn geen emissies tijdens de verwerking, er komen geen rookgassen, afvalwater of stikstofoxiden vrij. In volle toepassing zou jaarlijks ~57.000 ton CO₂-neutrale grondstof klinker kunnen vervangen, wat ~50.000 ton CO₂-uitstoot zou besparen⁶⁴.

➤ Status van de technologie

Thermische en mechanische behandeling is in lab- tot pilootfase.

→ TRL 4-6

Asbeter is een Nederlands cleantech-bedrijf (opgericht 2018) dat een gepatenteerd AC Minerals-proces heeft ontwikkeld om asbestcement volledig af te breken en om te vormen tot nieuwe grondstof⁶⁴. In een alkalisch-mechanisch proces worden asbestvezels uit golfplaten en buizen vernietigd. Het DNV(Det Norske Veritas)-certificaat bevestigt dat geen vezels meer intact zijn waardoor men het product veilig kan gebruiken.

Momenteel bevindt zich de Asbeter technologie in demonstratiefase, er draait momenteel een pilootinstallatie in Spijkenisse (Nederland)⁶⁴. In 2023 werd het DNV-certificaat uitgereikt dat bevestigt dat het proces werkt en dat het effectief alle asbest vernietigt tot een eindproduct dat volledig asbestvrij is. Er wordt gewerkt naar een opschaling om tegen 2027 75 kton asbestcement per jaar te kunnen verwerken (te Moerdijk, Nederland). Er is nog geen verdere certificering als bouw materiaal.

→ TRL 6-7

➤ Technische aandachtspunten

Veilige aanvoer en verwerking en logistiek zijn van groot belang om geen contaminatie met asbest te veroorzaken, vezels mogen geen enkel moment vrij komen. Ook het eindproduct

⁶³ [State-of-the-art-asbestos-waste-treatment](#)

⁶⁴ <https://www.asbeter.com/>

moet volledig vezelvrij zijn. Het eindproduct wordt op continue wijze getest op continue reactiviteit en samenstelling. Variatie in de input mag geen invloed hebben.

Opschaling vereist energie, de warmtehuishouding tijdens verhitting en afbraak van asbest dient gemonitord te worden om ook economisch rendabel te blijven. Optimalisatiemogelijkheden zoals groene stroom en restwarmtebenutting kunnen bekeken worden.

Bij thermische en mechanische behandeling is er een zeer hoge energiebehoefte en kosten. Verder is er bij mechanische behandeling een hoge slijtage van de apparatuur en veel stofemissies waardoor hoge nood is aan sterk gesloten systemen om vezelcontaminaties te voorkomen. Bij chemische behandeling moet men rekening houden met het corrosief gedrag van alkali's en dient men alkalische resstromen goed te beheren (risico op lozing vermijden).

➤ Potentieel voor de Belgische markt

België heeft historisch gezien een omvangrijk asbestcement-verleden (denk aan Eternit in Kapelle-op-den-Bos) en staat voor een enorme saneringsopgave. De Vlaamse overheid streeft ernaar om uiterlijk 2040 "asbestveilig" te zijn, wat betekent dat de komende jaren honderdduizenden tonnen asbesthoudend materiaal verwijderd moeten worden. Dat maakt het potentieel voor Asbeter's technologie hier groot. Een certificatie als bouw materiaal, bovenop het DNV-certificaat, zou in de toekomst nog meer vertrouwen kunnen geven aan de markt.

B. Granulaten

B.1. Betongranulaten en -zanden A+

➤ Korte beschrijving

Bij afbraak van oude betonconstructies en verhardingen komt er veel betonpuin vrij. Beton is hierbij 100% recycleerbaar⁶⁵. Dit biedt de mogelijkheid om het betonpuin te breken, zeven en te recyclen tot toeslagmateriaal zoals hoogwaardig betongranulaat ($d \geq 4$ mm) en beton-zanden ($D \leq 4$ mm), type A+, voor nieuw beton. Dit kan met Benor-keurmerk. Betongranulaat en -zand bestaan voornamelijk uit gebroken cementsteen (uitgeharde cementpasta) en natuurlijke toeslagmaterialen zoals zand en grove primaire granulaten. Door betongranulaten en -zand te gebruiken kan de kringloop (deels) gesloten worden en vermijdt men het ontginnen van primaire grondstoffen.

➤ Te behalen milieuwinsten

Het recyclen van beton als granulaat in nieuw beton helpt met het sluiten van de betonkringloop, maar er moet wel opgemerkt worden dat het amper de CO₂-uitstoot van het beton zal verminderen. Afhankelijk van de transportafstanden en het recyclageproces vertonen gerecycleerde granulaten een zeer gelijkaardige CO₂-voetafdruk als primaire granulaten. Wel wordt milieuwinst geboekt op vlak van de verminderde ontginning van primaire granulaten met een verminderde impact op de omgeving, kan transport vermeden worden wanneer ter plekke beton gebroken en aangemaakt kan worden, worden stortplaatsen beperkt en wordt de intrinsieke waarde van het materiaal behouden.

Voor wat betreft natuurlijk bouwzand daalt de lokale beschikbaarheid zeer snel. Het gebruik van gerecycleerd betonzand kan hiervoor een duurzaam alternatief vormen. Het gebruik van 'fijne' granulaten, zoals zanden, kan tot 10% minder energie vergen dan natuurlijke granulaten voor grove betongranulaten kan dit tot 18% energie besparen in vergelijking van het gebruik van primaire granulaten⁶⁶.

Hoewel de druksterkte van het beton licht kan dalen bij gebruik van gerecycleerde granulaten, is er geen cementverhoging nodig wanneer er gewerkt wordt met de in de normen voorgescreven vervangingspercentages van 20 à 30 %⁶⁶. Indien men het cementgehalte toch zou moeten verhogen (wat bv. bij hogere vervangingspercentages nodig zou kunnen zijn), kan de milieu-impact van het beton ten gevolge van de impact van het cement dermate stijgen dat het milieuvoordeel tenietgedaan wordt.

➤ Status van de technologie

Het toegestane gebruik van grove ($d \geq 4$ mm en $D \geq 10$ mm) gerecycleerde betongranulaten werd in het afgelopen decennium uitgebreid in de normen NBN EN 206 en NBN B 15-001 en betonbrekerzanden werden recent (2025) toegevoegd (zie ook § 2.2.2). Dit kon gebeuren op basis van uitgebreide studies en praktijkervaringen.

De aandachtspunten van het gebruik van deze betongranulaten zijn gekend en kunnen voldoende beheerst worden onder de toegestane omstandigheden.

→ TRL 9

⁶⁵ Factsheet RECYCLING NL

⁶⁶ Naar een lagere milieu-impact van beton. WTCB Contact 2020/1.

Het gebruik van betonzanden als zandvervanging in beton is aangetoond als succesvol in verschillende projecten zoals PRN GRANISEC, Sand2Sand, Circular.Concrete of Concrete Circularity Center. Ongeveer 10-15 wt% van betongranulaat bevat de fijnere granulaatfractie met $D \leq 4\text{mm}$, dewelke anno 2025 pas in een normenkader is opgenomen, als ook in SB 250 5.0. Het aantonen van hoogwaardige toepassing in beton gebeurde in de prenormatieve studie RE-CYSAND en betonzanden hoeven niet meer het beproevingsprogramma volgens NBN B 15-105 te volgen om de gebruiksgeschiktheid aan te tonen.

→ TRL 8-9

Indien men afwijkt van het toepassingskader van deze normen (hogere vervangingspercentage, hogere druksterkteklasse, andere omgevingsklasse, het gebruik van gerecycleerd zand ($D \leq 4\text{mm}$)), dan dient de algemene en specifieke gebruiksgeschiktheid aangetoond te worden voor de beoogde betonsamenstelling en het beoogde gebruik.

Versillende projecten (pre-normatieve studies, demonstratieprojecten, TETRA-onderzoek, NIB-werk) hebben de mogelijkheden en beperkingen van het meer uitgebreide gebruik van gerecycleerde granulaten onderzocht. Rond het gebruik van gerecycleerde betongranulaten in beton werd door Buildwise een innovation paper gepubliceerd⁶⁷.

De oriënterende proeven, uitgevoerd in het kader van het validatie- en uitdiepingsluik van Circular.Concrete, hebben aangetoond dat het mogelijk is om werkbare betonmengsels te maken met een voorspelbaar gedrag met hogere vervangingspercentages (90% tot 100%) van de natuurlijke granulaten door betongranulaten, inclusief de zandfractie.

Bij beton conform omgevingsklasse EE2 bleek de invloed van dergelijke vervangingspercentages op de druksterkte na 28 dagen minimaal te zijn. Ook de negatieve invloed op de carbonatie-weerstand van het beton bleek niet al te groot te zijn.

Voor al bij hogere betonkwaliteiten (bv. conform omgevingsklasse EE4) is de invloed van dergelijke vervangingspercentages op de mechanische eigenschappen en de duurzaamheidseigenschappen van het beton wel significant.

→ TRL 7

➤ Technische aandachtspunten

De **waterabsorptie** van gerecycleerde granulaten en zanden is door het gehalte aan poreuze cementsteen over het algemeen hoger en meer variabel dan die van natuurlijke granulaten. Indien deze waterabsorptie tijdens de berekening van de betonsamenstelling wordt over- of onderschat, heeft dit een directe impact op de water-cementfactor en dus op de verwerkbaarheid van de betonspecie en de sterkte en duurzaamheid van het verharde beton. Het kan ook leiden tot een snellere uitdroging van het betonmengsel. Het is dus zeer belangrijk om de waterhuishouding in het beton goed in de hand te hebben.

⁶⁷ [Het gebruik van gerecycleerde betongranulaten in beton.](#)

Betonggranulaten en -zanden zijn hoekige korrels, dewelke ook de verwerkbaarheid kan beïnvloeden en een hogere gehalte aan cement kan nodig zijn om de verwerkbaarheid te waarborgen. Dit kan ongewenst tot een hogere milieu-impact leiden, maar kan vermeden worden door aangepaste mixdesigns te ontwerpen met aangepaste hulpstoffen en cementen.

Het gebruik van gerecycleerde granulaten leidt, omwille van hun intrinsieke **lagere mechanische sterkte** dan natuurlijke granulaten door het gehalte aan poreuze cementsteen, algemeen tot een verlaging van de druksterkte na 28 dagen, in functie van het vervangingspercentage. Meestal is deze verlaging in sterkte niet opgemerkt bij vervangingspercentages <20 wt%, maar komt eerder tot uiting >20 wt% vervanging en bij hoogwaardige betonggranulaten zelfs pas >30 wt%. De druksterkte verlaagt typisch met 5 – 15 % en de buigtreksterkte met 15% bij 100% vervanging van grove granulaten, en dit afhankelijk van de kwaliteit van granulaten⁶⁷. De uiteindelijke druksterkte kan echter gelijkwaardig zijn aan traditioneel beton, mits de mengverhouding en nabehandeling correct zijn. Het gebruik van betonggranulaten gebeurt idealiter in lagere tot middelmatige sterkteklassen om het plafondeffect te vermijden⁶⁷ (door de zwakkere sterkte van betonggranulaten t.o.v. natuurlijke granulaten kunnen vroegtijdige breuken ontstaan in hogere sterktes, of moet cementgehalte verhoogd worden om dit te compenseren). In België ligt de limiet bij C35/40 volgens NBN B 15-001 voor gewapend beton.

De **elasticiteitsmodulus** kent een significante verlaging tot 25% bij 100% vervanging grove granulaten⁶⁷. **Krimp** en **krui**p kan ook hoger liggen door het gehalte aan cementsteen, als ook de **duurzaamheid** kan verlagen doordat de poreuze cementsteen hogere indringing van externe stoffen toelaat.

Er dient rekening gehouden te worden met de mogelijke aanwezigheid van vlottende deeltjes in de granulaten. Deze kunnen aan het betonoppervlak terecht komen en zichtbaar zijn in het verharde beton. Bij bepaalde toepassingen waar een hoge oppervlaktekwaliteit wordt vereist (bv. zichtbeton, betonvloeren met hoge esthetische eisen), kan dit ongewenst zijn. **Zuiver hoogwaardig betonggranulaat** dient afkomstig te zijn van zuivere bronnen zonder verontreinigingen (geen baksteen, gipsresten, hout,...).

Het verkrijgen van hoogwaardig betonggranulaat begint al bij de start van sloopwerken, men dient een zo zuiver mogelijk betonpuin te verkrijgen. Een sloopwerk dient hier dus aandacht aan te besteden en inmenging van bakstenen, keramiek, glas, metalen en dergelijke te vermijden. Dit kan meer tijdsinvestering vragen van de sloper en mogelijks niet altijd uitgevoerd worden.

Idealiter wordt het betonggranulaat gewassen om de onzuiverheden te verwijderen. Dit vraagt om investeringen en stelt technische uitdagingen in het behandelen van waswater door de variëteit in onzuiverheden⁶⁷.

Betonzanden hebben algemeen een hoger gehalte aan cementsteen dan betonggranulaten doordat de fijnen die bij het breken vrijkomen uit de zwakste matrix komen, zijnde de cementsteen, en dus in de zandfractie terechtkomen. Betonzanden hebben dus een 'zwakkere' samenstelling dan betonggranulaten⁶⁷ door hun hoger gehalte aan cementsteen en onzuiverheden. Door rekening te houden met deze eigenschappen, kunnen aangepaste criteria toegepast worden om alsnog de kwaliteit van betonzand te waarborgen, zoals het prenormatief onderzoek RECYSAND aantoont.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

In België wordt jaarlijks 7 Mton betongranulaat gerecycleerd⁶⁸. België is met ca. 38% gerecycleerde granulaten van de totale granulaatproductie de uitgesproken koploper in Europa inzake betongranulaatproductie^{67,68}. Doordat betongranulaten opgenomen zijn in NBN B 15-001 is het gebruik ervan in beton officieel erkend, mits aan kwaliteitscriteria wordt voldaan. Dit biedt vertrouwen aan producenten en afnemers over de prestaties van het materiaal. Hierdoor is in België de lokale beschikbaarheid van gerecycleerde granulaten (betongranulaten en gemengde granulaten) groot. Er zijn er zelfs enkele BENOR-gecertificeerd als betongranulaat A+. Op extranet.copro.eu van COPRO als ook bij Certipro zijn een duizendtal betongranulaten terug te vinden en dit over 254 productie-eenheden heen⁶⁹. Deze gecertificeerde betongranulaten kunnen gebruikt worden in hoogwaardige toepassingen, worden regelmatig gecontroleerd en geven zodoende vertrouwen in bouwtechnische en milieu-hygiënische productkwaliteit.

Het Belgisch normenkader, NBN EN 206 en NBN B 15-001, laat anno 2025 het gebruik van betonzand nog niet toe. De prenormatieve studie RECYSAND werkt ernaar toe om ook betonzanden in deze normen te krijgen om zo de toepassing ervan op de Belgische markt te vergemakkelijken.

⁶⁸ Monitoringssysteem Duurzaam Oppervlaktedelfstoffenbeleid 2018.

⁶⁹ [Gerecycleerde granulaten | Copro](#)

B.2. Menggranulaten B+

➤ Korte beschrijving

Bij afbraak van oude constructies komt er bouwpuin vrij, waarbij het niet altijd even eenvoudig is om zuiver betonpuin te houden. Maar ook uit gemengd bouwpuin kunnen menggranulaten ($d \geq 4 \text{ mm}$) van het type B+ gewonnen worden om als granulaat voor beton te gebruiken. Dit menggranulaat bevat naast beton ook andere minerale reststromen zoals metselwerkpuin, waarbij metalen (grove machinale en magnetische scheiding), ongewenste stoffen (asbest, gips, glas...) en vlottende deeltjes (hout, plastic...) eruit gezuiverd worden. Hierbij moet minimaal 70% beton als granulaat aanwezig zijn en worden strikte limieten op verontreinigingen toegepast.

➤ Te behalen milieuwinsten

Door menggranulaten te gebruiken kan de kringloop (deels) gesloten worden en vermijdt men het ontginnen van primaire grondstoffen.

➤ Status van de technologie

Menggranulaat B+ kan tot 20% vervanging toegepast worden voor druksterkteklassen $\leq \text{C20/25}$ volgens De Europese norm NBN EN 206 en zijn nationale bijlage NBN EN 15-001 (zie ook § 2.2.2). Dit kon gebeuren op basis van uitgebreide studies en praktijkervaringen. De aandachtspunten van het gebruik van deze granulaten zijn gekend en kunnen voldoende beheerst worden onder de toegestane omstandigheden. De kwaliteit van B+ granulaten voor gebruik in beton is lager dan deze van A+ granulaten.

→ TRL 9

➤ Technische aandachtspunten

De **waterabsorptie** van menggranulaten licht gemiddeld hoger dan hoogwaardige betongranulaten doordat naast het gehalte aan poreuze cementsteen ook een gehalte aan poreuze bakstenen, dakpannen en dergelijke aanwezig kan zijn, naast de natuurlijke granulaten. Dit heeft eveneens impact op de water-cementfactor en dus op de verwerkbaarheid van de betonspecie en de sterkte en duurzaamheid van het verharde beton. Algemeen leidt dit tot een lagere mechanische sterkte, lagere elasticiteitsmodulus, hogere krimp en kruip, en kan de duurzaamheid verlaagd worden bij een hogere vervanging.

Door dit hoger gedrag aan waterabsorptie en door hun hoekige korrels, kan dit de verwerkbaarheid ongewenst beïnvloeden en ongewenst een hogere milieu impact teweegbrengen als men een hoger gehalte aan cement zou nodig hebben. Men dient dus aandachtig naar een aangepast mixdesign te zoeken met aangepaste hulpstoffen en cementen.

Om invloed van variabiliteit in de stroom zo laag mogelijk te houden wordt minstens 70% betonpuin verlangd.

Bij sloopwerken dient inmenging van hout, plastic, metalen en andere ongewenste stoffen zo veel mogelijk vermeden te worden. Bijvoorbeeld glas dient zo veel mogelijk vermeden te worden wegens mogelijke ASR-reacties. Onzuiverheden dienen verwijderd te worden door te wasen of aangepaste scheidingstechnieken.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Doordat menggranulaten opgenomen zijn in NBN B 15-001 is het gebruik ervan in beton officieel erkend, mits aan kwaliteitscriteria wordt voldaan. Dit biedt vertrouwen aan producenten en afnemers over de prestaties van het materiaal. Hierdoor is in België de lokale beschikbaarheid van gemengde granulen groot. Op extranet.copro.eu van COPRO zijn een 600-tal gecertificeerde menggranulaten, terug te vinden en dit over meer dan 200 productie-eenheden heen⁶⁹.

B.3. Gecarbonateerde betongranulaten

➤ Korte beschrijving

Hoogwaardige betongranulaten hebben door hun gehalte aan cementsteen een hogere waterabsorptie en een lagere volumieke massa dan natuurlijke granulaten. Dit kan de verwerkbaarheid van betonspecie verlagen, een verkeerde inschatting geven van de waterhuishouding en de sterkte van verhard beton al dan niet beïnvloeden. Door betongranulaten te carbonateren kan de poreuze cementsteen reageren met CO₂ en calciumcarbonaat (CaCO₃) vormen die de poriën kan verdichten. CO₂ wordt als het ware geabsorbeerd door het verhard beton⁶⁵. Hierdoor kan de waterabsorptie afnemen, de verwerkbaarheid verbeteren en de sterkte van verhard beton minder beïnvloed worden. Dit proces kan zowel in de lucht (natuurlijke, langzame wijze) als in een carbonatatiekamer met verhoogd CO₂ gehalte (versnelde carbonatatie).

Naast betongranulaten kunnen ook andere granulaten gecarbonateerd worden, zoals bodemassen uit afvalverbranding, non-ferro slakken, menggranulaten. Hierbij is de carbonatietechnologie minder effectief of nog niet ver genoeg ontwikkelt om specifiek granulaat te produceren.

➤ Te behalen milieuwinsten

Betongranulaten kunnen tot 20% van de oorspronkelijke, tijdens cementproductie uitgestoten CO₂, weer opnemen via carbonatatie⁶⁵. In de praktijk ligt CO₂-opname tussen 0,6 en 1,2 % van de massa van het granulaat, bij opslag in buitenlucht, en in optimale omstandigheden tot 2-3%, bij verhoogde CO₂ concentraties⁷⁰.

De milieuwinsten liggen niet zozeer bij de CO₂ opslag in de granulaten, maar vooral in het gebruik van deze granulaten. Door de mineralisatie en verdichting van de poriën van betongranulaten verlaagt hun waterabsorptie en verhoogt de verwerkbaarheid en duurzaamheid van het beton.

Door deze opwaardering van eigenschappen van betongranulaten kan de circulariteit van granulaten verhoogd worden en vermindert de nood aan primaire grondstoffen.

➤ Status van de technologie

Tijdens het FastCarb⁷¹ project in Frankrijk werd het carbonatatieproces van betongranulaten versneld door hogere temperaturen en druk en zou tot 4% CO₂ kunnen opgenomen worden in de granulaten. Het doel is naast CO₂ op te slaan in de betongranulaten ook de technische prestatie van de granulaten te verbeteren voor hergebruik in nieuw beton. Hierbij wordt CO₂ gebruikt die uitgestoten wordt tijdens de cementproductie. Twee pilootinstallaties in Frankrijk kunnen ongeveer 3 ton betongranulaat per uur behandelen met 3% CO₂ opname, waarbij CO₂ rechtstreeks wordt afgevangen uit rookgassen van cementovens⁷². Er zou een absolute daling van 2% in waterabsorptie zijn in de betongranulaten na de behandeling. Er werd 30-50% van de grove granulaten vervangen in straatstenen en trottoirbanden en 20-30 % in betonblokken en constructiebeton in C25/30 tot C45/55 klasse⁷³. Ten opzichte van gevallen met onbehandelde betongranulaatvervanging was er een sterkteverhoging van 5-10% waargenomen.

⁷⁰ [Permanente-CO2-opslag-in-betongranulaat-1-1.pdf](#)

⁷¹ [Home - FastCarb](#)

⁷² [Résultats du projet national FastCarb: stockage de CO2 par carbonatation accélérée du béton recyclé](#)

⁷³ Torrenti, Jean Michel, et al. "The FastCarb project: Taking advantage of the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates." *Case Studies in Construction Materials* 17 (2022): e01349.



Figuur 4: Pilotproject carbonatatie van betongranulaten bij FastCarb schematisch weergegeven.

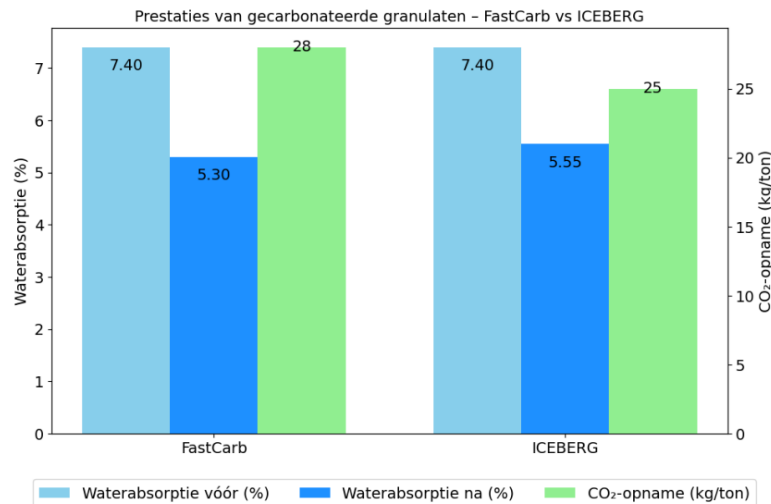
Ook in België werd in het ICEBERG project carbonatatie van betongranulaten onderzocht met gelijkwaardige opname aan CO_2 (tot 3%), reductie in waterabsorptie (-25%) en vervangingspercentages granulaten (zie Figuur 5). Ook de vorst-dooi weerstand van de granulaten verbeterde door carbonatatie. Deze granulaten werden toegepast op experimentele schaal waarbij 50% vervangingspercentage mogelijk zou zijn zonder verlies in druksterkte van het beton⁷⁴. Dit zou 20% hoger liggen dan het aangeraden vervangingspercentage met onbehandelde betongranulaten⁶⁷ (= 30%, zie Fiche B.1).

Devrago heeft in 2025 een carbonatatie-installatie gebouwd om met de CO_2 -opname van hun gerecycleerde granulaten (een deel van) de klimaatimpact van hun betonproductie te verlagen. Er zijn nog geen data beschikbaar over de vermindering van de waterabsorptie en de CO_2 -opname van de door hen gecarbonateerde granulaten⁷⁵.

→ TRL 7-8

⁷⁴ Bergmans, J.; Kazemi Kamyab, H.; Ghosh, D.; Van Mierloo, P.; Carens, H.; Nielsen, P. Carbonation of Recycled Concrete Aggregates for New Concrete and Concrete Fines to Make Cement-Free Hollow Blocks. *Sustainability* **2024**, *16*, 3494. <https://doi.org/10.3390/su16083494>

⁷⁵ <https://devagro.be/nieuws/devagro-pioniert-met-co2-neutraal-stortbeton-in-belgi%C3%AB>



Figuur 5: waterabsorptie en CO₂ opname bij betongranulaten in het FastCarb en Iceberg project, respectievelijk.

➤ Technische aandachtspunten

Ondanks het cementerende effect van de technologie blijft de **porositeit** en **waterabsorptie** relatief hoog ten opzichte van natuurlijke granulaten (zie ook Figuur 5). Ze kunnen weliswaar hogere vervangingspercentages beogen dan onbehandelde betongranulaten zonder in te boeten aan verwerkbaarheid of mechanische prestaties, maar de invloed van waterabsorptie zal niet verdwijnen, eerder verminderen.

Aandachtspunten zoals opgesomd onder betongranulaten in fiche B.1 blijven, zij het in mindere maten dan voor onbehandelde betongranulaten. Invloeden blijven op mechanische sterkte, elasticiteitsmodulus, krimp, kruip en duurzaamheid wegens hogere porositeit van gecarbonateerd betongranulaat t.o.v. natuurlijk granulaat.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Door de aanwezigheid van cementfabrieken in België kan deze technologie zeker veelbelovend zijn. Cementfabrieken hebben namelijk de mogelijkheid om hun rookgassen op te vangen en CO₂ rechtstreeks te gebruiken ter carbonatatie van betongranulaten. Het ICEBERG project heeft in België de technologie reeds op experimenteel niveau toegepast. Devagro zet momenteel stappen naar de productie en het gebruik van gecarbonateerde betongranulaten.

B.4. Keramische granulaten

➤ Korte beschrijving

Keramisch tegelafval ontstaat vaak tijdens productiefouten in fabrieken (kleurafwijking, kleine fouten), snijverliezen, overschotten of beschadigde tegels tijdens transport of opslag en sloop- en renovatiewerken in de bouw⁷⁶. Afvaltegels worden ingezameld van fabrieken, bouwplaatsen of slooplecaties. Ze worden gesorteerd op kleur (wit of rood keramiek) en type (wand-, vloertegels, sanitair, enz.). De tegels worden mechanisch gebroken tot kleinere stukken. Afhankelijk van de toepassing worden ze verder gemalen tot poeder of granulaten. Tegelafval bestaat hoofdzakelijk uit silicium- en aluminiumoxide, met weinig kalk, waardoor het ideaal te gebruiken is in het inert betonskelet.

➤ Te behalen milieuwinsten

Ongeveer 15–30% van de geproduceerde keramiek eindigt als afval en kan in de plaats als circulair materiaal worden gebruikt. Dit vermindert stortafval, spaart natuurlijke bronnen en verhoogt circulaire kringloop.

➤ Status van de technologie

De toepassing in gewapende betonbalken en zelfverdichtend beton werd succesvol getest, maar er zijn nog geen grootschalige toepassingen⁷⁶.

→ TRL 6-7

➤ Technische aandachtspunten

Keramisch afval is niet uniform. Het kan komen van verschillende tegelfabrikanten (wit of rood gebakken tegels) met uiteenlopende samenstellingen en baktemperaturen. Een kwaliteitscontrole kan bijvoorbeeld granulaten sorteren op type (wandtegels vs. vloertegels) en chemische samenstelling.

Zowel grove keramische granulaten als keramisch zand kan de mechanische eigenschappen verbeteren tot een bepaald vervangingspercentage (20-40% mogelijk)⁷⁶. Gewapende betonbalken vertoonden minder doorbuiging en vergelijkbare draagcapaciteit.

Door een hogere porositeit (tot 0,5-2% hoger) en waterabsorptie t.o.v. natuurlijke granulaten is de vervanging bij hogere percentages dan 20-40% nadelig⁷⁶.

Een vervanging 10-30% zou mechanisch niet nadelig zijn, de druksterkte zou zelfs kunnen toenemen door de hoekige korrels. Bij vervangingspercentage > 50% zou dit wel nadelig kunnen zijn en zou er een sterkteafname kunnen zijn.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

In België zijn geen praktijktoepassingen van keramisch tegelafval verwerkt tot granulaat voor beton, maar er zijn wel productieoverschotten uit de tegelindustrie voorhanden. Indien er jaarlijks 12 miljoen m² tegels geproduceerd worden, zou met 5% reststroom er 12 kton mogelijk beschikbaar zijn tot recyclage. Er zijn echter dikwijls recyclagemogelijkheden voor dit keramisch afval in de eigen keramische industrie (bv. gebruik als mageringsmiddel).

⁷⁶ Huseien, G.F.; Joudah, Z.H.; Baghban, M.H.; A. Khalid, N.H.; Faridmehr, I.; Dong, K.; Li, Y.; Gu, X. Sustainability of Recycling Waste Ceramic Tiles in the Green Concrete Industry: A Comprehensive Review. Buildings 2025, 15, 2406.

B.5. Fysicochemisch gereinigde zanden

➤ Korte beschrijving

Uit vervuilde grond, reststromen van sorteereenheden en veegvuil kunnen fysico-chemisch behandeld worden. Hierbij komt 260 kT fysico-chemisch gereinigd zand vrij⁷⁷. Het reinigingsproces is dus zowel fysisch (bv zeven, wassen) als chemisch (neutraliseren of ontbinden van gevaarlijke of schadelijke stoffen, verontreinigingen). Deze behandelde granulaatfractie, onderworpen aan milieu-hygiënische en bouwtechnische eisen, kan opnieuw gebruikt worden als bouw materiaal.

➤ Te behalen milieuwinsten

Zanden worden schaarser daar verschillende groeves einde vergunning lopen en zandwinning uit de Noordzee beperkt wordt wegens kustverdediging⁷⁷. Door verontreinigde zanden en veegvuil op te waarden wordt meer materiaal in de circulariteit gebracht en wordt afval verminderd met zijn bijhorende milieukosten.

➤ Status van de technologie

Fysicochemisch gereinigde zanden kunnen zowel milieuhygiënische als bouwtechnische certificatie verkrijgen⁷⁷. Ze kennen hun toepassing in zowel in de wegenbouw als onderfundering als in de bouwsector als toeslagmateriaal in schraal beton en zijn dus volledig operationeel en erkend binnen circulair bouwen. Gebruik van fysicochemisch gereinigde zanden in beton wordt echter nog niet dikwijls toegepast. Bioterra produceert sinds 2023 met hun AggReMix-gamma een gereinigde zandfractie die zich specifiek richt op hoogwaardig gebruik. Op hun eigen productieterrein wordt beton gebruikt als wegenisbeton en industriële buitenvloeren met 100% vervanging van de zandfractie door hun product Substraton 0/4.

→ TRL 8

➤ Technische aandachtspunten

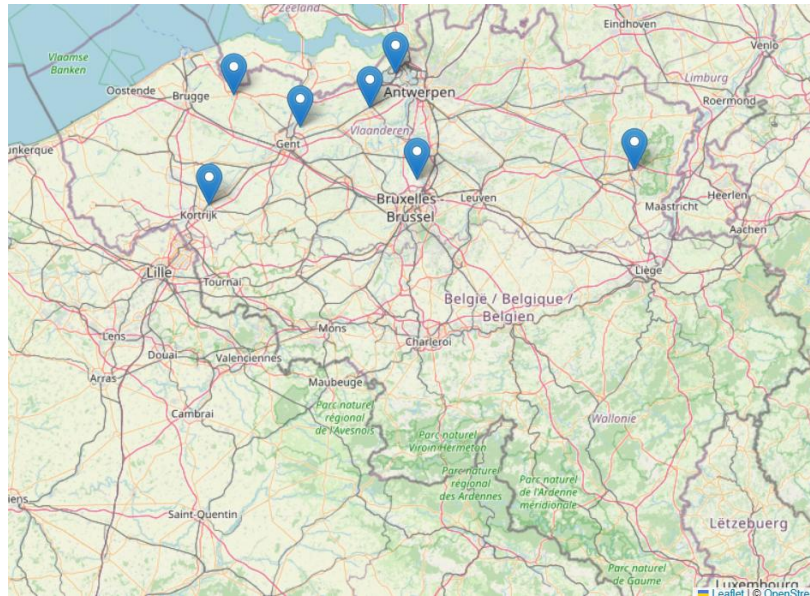
Doordat dit verontreinigde zanden en veegvuil is, kan de samenstelling ervan sterk variëren. Dit maakt het reinigingsproces uitdagend om kwaliteitsvol zand te produceren. Een grondige vooranalyse en sortering wordt dus toegepast. Een grondige en regelmatige controle is nodig om te voldoen aan de milieuhygiënische eisen als ook aan de bouwtechnische eisen.

Controle is nodig op korrelverdeling, dichtheid, waterabsorptie, druksterkte, om kwaliteit te garanderen.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

In België gebeurt reiniging door gespecialiseerde bedrijven erkend in bodemsanering en afvalverwerking, zij beschikken tevens over installaties voor fysicochemische reiniging. Op extra-net.copro.eu van COPRO zijn een 20-tal certificaten van gewassen zanden terug te vinden over 7 productie-eenheden heen, verdeeld over Vlaanderen (Figuur 6).

⁷⁷ [Circulaire granulaten: duurzame oplossingen voor de toekomst | COPRO](#)



Figuur 6: Productie-eenheden van gewassen zanden met COPRO certificaat in 2025.

B.6. Roestvaststaalslakken

➤ Korte beschrijving

Roestvaststaalslakken (RVS-slakken) behoren tot de ferro-slakken en zijn een bijproduct van de vervaardiging van roestvast staal. Schroot en half-grondstoffen worden gesmolten met legeringselementen en hulpstoffen in een elektrische vlamboogoven (EAF). De slakken worden gescheiden van het metaalbad en afgekoeld en worden verder verwerkt tot granulaten (breken, zeven, wassen, demetalliseren). Afhankelijk van de wijze van afkoelen, breken, en zeven zijn de slakken beschikbaar als een grof of zeer fijn granulaat of als vulstof.

➤ Te behalen milieuwinsten

Er wordt milieuwinst geboekt op vlak van de verminderde ontginning van primaire granulaten, wat leidt tot minder landschade en energieverbruik, en een hoogwaardigere toepassing van de roestvaststaalslakken. Doorgaans is in gebonden toestand (zoals beton) uitloging van zware metalen zoals chroom en nikkel niet problematisch, dewelke dient opgenomen te worden in een grondstoffenverklaring.

➤ Status van de technologie

De RVS-slakken kunnen o.a. toegepast worden in de wegenbouw in asfalt en bitumineuze mengsels (breekzand en steenslag van gebroken RVS-slakken), (steenslag) funderingen, schraal asfalt voor wegfunderingen (zandfractie), zandcement (zandfractie), schraal beton voor wegfunderingen, funderingen van gebouwen en kunstwerken (zandfractie), wegelementen, gebouwen en kunstwerken, schraal asfalt voor funderingen, begrindingen en bestrijkingen, en slemmingsels.

RVS-slakken komen ook in aanmerking als granulaat voor beton voor geprefabriceerde producten en stortklaar beton (gebouwen en structuren) en beschikken over het BENOR-keurmerk⁷⁸. De roestvaststaalslak-granulaten worden beschouwd als inert materiaal dat geen hydraulische of puzzolane eigenschappen bezit. Het toegestane gebruik van kunstmatige granulaten volgens de normen NBN EN 206 en NBN B 15-001 is van toepassing op roestvaststaalslakken. Naar schatting zou jaarlijks ongeveer 200 kton RVS-slak geproduceerd worden in België, waarvan 120 kton ingezet als granulaat⁷⁹.

→ TRL 9

Indien men afwijkt van het toepassingskader van deze normen (hogere vervangingspercentage, hogere druksterkteklasse, andere omgevingsklasse, het gebruik van kunstmatig zand ($d < 4$)), dan dient de algemene en specifieke gebruiksgeschiktheid aangetoond te worden voor de beoogde betonsamenstelling en het beoogde gebruik.

→ TRL 5

De oriënterende proeven, uitgevoerd in het kader van het validatie- en uitdiepingsluik van Circular.Concrete, hebben aangetoond dat het zeker mogelijk is om werkbare betonmengsels te maken met een voorspelbaar gedrag met RVS-slakken, inclusief de zandfractie.

⁷⁸ [RVS-slakken - Grondstoffencatalogus](#)

⁷⁹ [Metaalslakken | EMIS](#)

In een vervangingspercentage van 50 % van de natuurlijke granulaten in beton (20 % 0/2 en 30 % 2/10) werden, zowel voor wat betreft de mechanische eigenschappen al wat betreft de duurzaamheid, zeer gelijkaardige resultaten verkregen als van het toegepaste referentiebeton, zowel in het geval van beton conform omgevingsklasse EE2 als van EE4.

➤ Technische aandachtspunten

Over het algemeen leidt de vervanging van natuurlijke granulaten door roestvaststaalslakgranulaten tot een hogere mechanische sterkte van het beton.

De roestvaststaalslakgranulaten hebben een onregelmatige vorm en een grotere specifieke oppervlakte en leiden dus een grotere waterbehoefte van het beton in verse toestand.

De stabiliteit op lange termijn (zwellen van vrije kalk, ontbinding) en de invloed op de binding van de roestvaststaalslakgranulaten dient nagegaan te worden.

RVS-slakken kunnen carbonateren. Hoe fijner de fractie, hoe meer rekening hiermee dient gehouden te worden daar het beschikbare oppervlak kan reageren met CO₂ en kan samenkiten. Bij het gebruik van RVS-slakken als grovere granulaten is dit een minder aandachtspunt dan bij gebruik als fijne zanden en vulstoffen.

RVS-slakken hebben een hogere dichtheid, wat interessant kan zijn om zwaar beton te produceren, maar waarmee rekening dient gehouden te worden.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

De belangrijkste RVS-slak producent van Vlaanderen is Orbix⁸⁰. De RVS-slakken zijn verkrijgbaar onder de commerciële naam Stinox®.

⁸⁰ <https://www.orbix.be/nl>

B.7. LD-slakken (BOF-slakken)

➤ Korte beschrijving

Bij staalproductie wordt in het Linz-Donawitz (LD-) proces met zuurstofinjectie het vloeibaar ruwijzer ontzwaveld en ongefosfateerd en ontstaan naast gesmolten staal ook slakken. De benaming LD-slak wordt voornamelijk gebruikt in Duitsland en Oostenrijk, genoemd naar de plek waar het proces werd ontwikkeld, terwijl internationaal de benaming BOF (Basic Oxygen Furnace) eerder gebruikt wordt. LD- of BOF-slakken behoren net als andere staalslakken tot de groep van ferro-slakken en bevatten voornamelijk CaO, SiO₂, FeO en fosfaten. LD-slakken kunnen in principe gebruikt worden als granulaat in beton. Door de chemische samenstelling van de slak in de nog vloeibare fase te wijzigen kan men komen tot een kunstgranulaat ("LD-granulaat") dat bouwtechnisch en milieu-hygiënisch geschikt is als vervanger van de natuurlijke granulaten in beton.

➤ Te behalen milieuwinsten

Er wordt milieuwinst geboekt op vlak van de verminderde ontginning van primaire granulaten en een hoogwaardigere toepassing van de LD-slakken.

➤ Status van de technologie

De potentiële aanwezigheid van te veel vrije kalk (CaO) in LD-slakken en de negatieve ervaringen door slechte prestaties dieneengevolge, zorgden ervoor dat de LD-slakken sinds 2000 niet langer in het Standaardbestek 250 voor de wegenbouw zijn opgenomen als kunstmatig granulaat, waardoor de afzet aanzienlijk afnam⁸¹.

Het zou de producent ArcelorMittal intussen gelukt zijn om de bouwtechnische kwaliteit te verbeteren door de chemische samenstelling van de slak in de nog vloeibare fase te wijzigen, wat moet leiden tot een kunstgranulaat ("LD-granulaat"), dat bouwtechnisch en milieu-hygiënisch geschikt is als vervanger van natuurlijk granulaat. In 2016 had ArcelorMittal een piloot-opstelling met productie van 3000 ton per maand, dewelke in real-life getest werden. ArcelorMittal produceert 400 kton/jaar⁸¹.

In Nederland zijn er LD-slakken onder de naam Ekoliet® gecertificeerd voor gebruik in niet-structureel beton⁸².

→ TRL 7-8

➤ Technische aandachtspunten

LD-slakken kunnen problemen geven met de uitloging van bepaalde zware metalen, waarbij vanadium, koper en chroom kritische parameters zijn⁸¹. Er is dus een grondstofverklaring vereist voor het gebruik van LD-slakken als grondstof. Een uitzondering op deze regel is echter van toepassing op LD-slakken die rechtstreeks gebruikt kunnen worden zonder verdere behandeling, in dit geval is het ministerieel besluit van toepassing. Indien niet aan de gebruikstoepassingen vermeld in het MB van 9 februari 2024 voldaan is, blijft het materiaal echter een afvalstof. In toepassing in beton immobiliseren deze metalen doordat ze met de cement ingekapseld worden. Ook hier dient dit echter nog aangetoond te worden door uitlogingstesten.

⁸¹ [LD-slakken - Grondstoffencatalogus](#)

⁸² [Ekoliet® - De Hoop Bouwgrondstoffen - Specialist in grondstoffen](#)

De aanwezigheid van vrije kalk (CaO) in de granulaten en het daarmee gepaard gaande zwelingsgedrag vormt een belemmering voor het gebruik van LD-slakken als bouwstof⁸¹. Met geschikte behandeling kan CaO gebonden worden tot Ca-silicaat door toevoeging van zand en zuurstof aan het gesmolten slak. Door de chemische samenstelling van de slak in de nog vloeibare fase te wijzigen verkrijgt men “LD-granulaat” dat bouwtechnisch en milieu-hygiënisch geschikt is als vervanger van natuurlijk granulaat.

De waterabsorptie is rond 1.5% wat wijst op een matige poreuze structuur vergelijkbaar met gangbaar granulaat. Hun hoekige en harde eigenschap zijn eventueel wat uitdagender voor verwerkbaarheid maar dragen wel bij aan hechting van de matrix in beton.

LD-slakken als vervanging in beton kan door zijn hoge dichtheid het beton zwaarder maken, dewelke in ontwerpplannen mee in rekening dient genomen te worden.

De bouwtechnische kwaliteit van LD-slakken kan gecertificeerd worden, door bv. de certificatie-instellingen COPRO (TRA 40) en Certipro.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

ArcelorMittal te Gent is de enige Vlaamse producent van LD-slakken (in 2016 ongeveer 400 kton). Deze slakken werden verwerkt tot een fijne fractie die dienst doet als meststof of bodemverbeterend middel (dankzij het relatief hoge gehalte aan kalk). Deze toepassing wordt echter niet meer toegelaten. De grove fractie wordt gebruikt als bouwstof. De LD-staalslakken worden ook hergebruikt als hulpgesteente tijdens het ruwijzerproces in hoogovens. Verder kennen de slakken ook een toepassing in de waterbouw, in dijken, als fundering en open verharding. Gebruik in deze toepassingen wordt beperkt tot grootschalige werken (>1000 m³) en moet door ArcelorMittal Belgium geregistreerd worden in het webloket geïnventariseerde werken.

De installatie voor aanmaak van LD-granulaat is midden 2006 in dienst genomen en kan tot 100.000 ton LD-slakken behandelen. Anno 2016 is de LD-granulaat-productie (voor het gebruik als granulaat in beton) slechts zeer gering (gemiddeld 3 kton per maand). Deze grove granulaatfractie wordt daarenboven niet afgezet en blijft op stock tot geschikte toepassingen (voor granulaten met hoge densiteit) worden gevonden. Ondertussen wordt de grove granulaatfractie op de bedrijfsterreinen van ArcelorMittal gebruikt in eigen testprojecten, waaronder wegenbouw, vervanging van porfier in sporen van loopkranen, ...

B.8. FeMo (ferro- of ijzer-molybdeen) slakken

➤ Korte beschrijving

FeMo (ferromolybdeen) is een ijzer-molybdeenlegering die typisch wordt geproduceerd in een smeltproces waarbij molybdeentrioxide (MoO_3) wordt gereduceerd met ijzerhoudende reductoren⁸³. De slakken die hierbij ontstaan bevatten restfracties van metalen, oxiden en silica, en worden dus geclassificeerd als non-ferro-slakken.

➤ Te behalen milieuwinsten

Er wordt milieuwinst geboekt op vlak van de verminderde ontginning van primaire granulaten en een hoogwaardigere toepassing van de FeMo-slakken in plaats van storten. FeMo-slakken worden omwille van de uitloging van molybdeen veelal gebruikt in gebonden toepassingen, zoals in beton.

➤ Status van de technologie

FeMo slakken worden niet massaal toegepast, maar zijn wel commercieel toepasbaar in wegverhardingen (beton voor wegen) en prefab betonstenen⁸³.

→ TRL 9

➤ Technische aandachtspunten

Mits correcte toepassing is de prestatie van FeMo-slak vergelijkbaar met natuurlijke granulaten. Er dient rekening gehouden te worden met het uitlooggedrag van molybdeen, daarom mag FeMo slak enkel in gebonden toepassingen gebruikt worden.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

FeMo-slakken worden in Vlaanderen geproduceerd door Sadaci in Gent. Ze produceren jaarlijks ongeveer 7 kton FeMo-zand (0–4 mm) en 15 kton FeMo-granulaat (0–12,5 mm)⁸³ en beschikken over een CE2+ markering en COPRO-certificaat.

⁸³ [FeMo-slakken - Grondstoffencatalogus](#)

B.9. Koperslakken

➤ Korte beschrijving

Koperslakken zijn een (bij)product van de pyrometallurgische productie van koper (Cu) en bestaan voornamelijk uit ijzersilicaat (~45% FeO, ~30% SiO₂) met een lagere concentratie aan calcium- en aluminiumoxiden en sporen van metalen zoals Cr, Cu, Pb, Ni en Zn⁸⁴. Deze metalen zitten vast in de slakmatrix. Doordat geen ijzer gewonnen wordt, worden koperslakken ingedeeld bij de non-ferro slakken. Dankzij nieuwe technologieën kunnen er zuiverdere koperslakken geproduceerd worden met minder zware metalen, die kunnen aangewend worden als granaat in beton.

➤ Te behalen milieuwinsten

Er wordt milieuwinst geboekt op vlak van de verminderde ontginning van primaire granulaten en een hoogwaardigere toepassing van de koperslakgranulaten. Koperslakken zijn beperkt in uitloging van zware metalen in gebonden vorm in beton. .

➤ Status van de technologie

Koperslak wordt vandaag voornamelijk ingezet als granaat voor de productie van mager beton en zand-cementmengsels⁸⁵.

In beperkte mate wordt koperslak toegepast in stortklaar beton. Het toegestane gebruik van kunstmatige granulaten volgens de normen NBN EN 206 en NBN B 15-001 is niet van toepassing op granulaten van koperslakken. De algemene en specifieke gebruiksgeschiktheid dient dus in alle gevallen aangetoond te worden. Dit kan nagegaan worden via NBN B 15-105.

Korrels liggen tussen ~0,1 mm en 1–2 mm met een beperkt aantal fijne deeltjes⁸⁴. De korrelgrootte kan worden aangepast door tragere koeling. Zo kan een kunstmatig zand (bv 0/4) worden bekomen.

→ TRL 4-5 (toepassing in beton)

De oriënterende proeven, uitgevoerd in het kader van het validatie- en uitdiepingsluik van Circular.Concrete, hebben aangetoond dat het zeker mogelijk is om werkbare betonmengsels te maken met een voorspelbaar gedrag met koperslakgranulaten 0/4. In een vervangingspercentage van 20 % werden, zowel voor wat betreft de mechanische eigenschappen al wat betreft de duurzaamheid, zeer gelijkaardige resultaten verkregen als van het toegepaste referentiebeton, zowel in het geval van beton conform omgevingsklasse EE2 als van EE4.

Koperslak wordt momenteel ook onderzocht als binder waardoor mogelijks de toepassing als SCM of AAM eerder zal gebeuren dan als granaat. Zie technologische fiche A.4 Alternatieve metaalslakken.

➤ Technische aandachtspunten

Over het algemeen leidt de vervanging van natuurlijke granulaten door granulaten afkomstig van non-ferro metaalslakken tot een hogere mechanische sterkte van het beton. Voordelen

⁸⁴ Verlé, Pieter. "Het gebruik van secundaire slakken in volledig recycleerbaar beton." Masterproef UGent, 2010-2011

⁸⁵ [Koperslakken - Grondstoffencatalogus](#)

zijn een vergelijkbare korrelverdeling, hoge hardheid (slijtvastheid), lage waterabsorptie en een hoge cohesie door hoekige deeltjes⁸⁶.

De stabiliteit op lange termijn (zwellen) en de inertie van de koperslakgranulaten dient nagegaan te worden. Koperslak kan door zijn aanwezigheid in beton in het cement de hydratatiereactie beïnvloeden indien het amorf gehalte hoog en het contactoppervlakte hoog is⁸⁶. De chemische samenstelling, zoals de verhouding FeO/SiO_2 , van koperslakken kan variëren naargelang smeltproces, type oven en inputmateriaal⁸⁴. Dit kan eventueel de reactiviteit beïnvloeden. Door hun hoog soortelijk gewicht wordt het beton zwaarder, structuren kunnen 5-10% zwaarder uitvallen bij hogere vervangingspercentage door slakken welk meegenomen dient te worden in ontwerp (lastenverhoging). Een te hoog aandeel aan koperslakgranulaat kan eventueel zorgen voor verhoogde bleeding en segregatie (advies is <50%)⁸⁴. Door de lage waterabsorptie kan ook de vorst-dooi weerstand lager zijn.

Tevens moet het derde leven afgedekt worden. Eventueel kan een voorbehandeling nodig zijn om restmetalen of sulfaten te beperken.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

In België wordt ongeveer 90 % van de koperslakken geproduceerd door Aurubis Belgium⁸⁷. Aurubis zoekt als producent actief naar toepassingen voor deze slakken in samenwerking met diverse partners, zowel onderzoeksinstellingen als industriële partners uit de betonindustrie. Deze producent brengt gegranuleerde koperslak op de markt onder de naam *Metamix* (0/4)⁸⁸.

⁸⁶ [De voor- en nadelen van koperslak begrijpen | Artizono](#)

⁸⁷ <https://www.metallo.com/>

⁸⁸ [20240205_FORM51.00-03 Statement of Performance Metamix - ENG.pdf](#)

B.10. Loodslakken

➤ Korte beschrijving

Loodslakken ontstaan bij de productie van lood (Pb) uit loodhoudende grondstoffen, zoals loodertsen of loodzuurbatterijen. Deze slakken worden achteraf gebroken en zijn op die manier beschikbaar als grof granulaat (4-32 mm) of zandfractie (0-4 mm). Loodslakken behoren tot de categorie van de non-ferro slakken. Omwille van hun hoge volumieke massa (4,7 g/cm³) kunnen deze granulaten aangewend worden in de productie van zwaar beton voor bijvoorbeeld stralingsafscherming⁸⁹.

➤ Te behalen milieuwinsten

Er wordt milieuwinst geboekt op vlak van de verminderde ontginning van primaire granulaten en het vermijden van landfills. Echter moet men toezien dat geen toxische metalen uitlogten die het milieu zouden contamineren en dat de slakken goed ingekapseld worden in een vaste matrix⁹⁰. Loodslak gebonden in een betonmengsel met Portland cement met hoge pH en calcium-mineralen, kan ervoor zorgen dat de mobiliteit van toxische metalen drastisch verlaagd. Dit moet echter aangetoond worden.

➤ Status van de technologie

Loodslakken zijn onderzocht als granulaat in beton voor stralingsafscherming^{89,91}. Echter beliet het toxische karakter en kans tot uitloging tot nu een grootschaligere toepassing van loodslakken in beton⁹⁰. Zo bleken toepassingen in asfaltlagen en wegenisbeton toch uitloging te geven.

→ TRL 5

➤ Technische aandachtspunten

Loodslakken zijn over het algemeen sterk aangerijkt in (zware) metalen. Hierbij is de uitloging van lood een kritische parameter, al blijkt dat ook alle andere VLAREMA-metalen (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni en Zn) sterk aanwezig zijn in vergelijking met de VLAREMA richtwaarden voor totaalconcentraties⁹². Een grondstofverklaring is vereist bij het gebruik van loodslakken als bouwstof. Gebruik van loodslakken wordt momenteel beperkt tot grootschalige werken (>1000 m³) en moet door de producent geregistreerd worden in het webloket geïnventariseerde werken.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

In Vlaanderen produceert Umicore in Hoboken lood, waarbij jaarlijks 150-250 kton verarmde loodslakken vrijkomen die ingezet kunnen worden als bouwstof. Campine in Beerse recycleert lood uit batterijen en produceert 2,5-4 kton loodslak per jaar.

⁸⁹ Ismail, I. M., Sweelam, M. H., Zaghloul, Y. R., & Aly, H. F. (2008). Attenuation of Gamma Rays by Concrete. Lead Slag Composites.

⁹⁰ Pan, De'an, et al. "A review on lead slag generation, characteristics, and utilization." *Resources, Conservation and Recycling* 146 (2019): 140-155.

⁹¹ Alwaeli, Mohamed. "Use of granulated lead-zinc slag as replacement of fine aggregate in structural concrete: compressive strength and radiation shielding study." *Archives of Civil Engineering* 67.2 (2021).

⁹² [Loodslakken - Grondstoffencatalogus](#)

B.11. AVI-bodemas

➤ Korte beschrijving

Bij de verbranding van afvalstoffen in afvalverbrandingsinstallaties (AVI) ontstaan assen. De as die meegevoerd wordt door de rook heet vliegash, terwijl de grove fractie die onderaan in de oven blijft liggen, AVI-bodemassas wordt genoemd. De term AVI-bodemassa omvat zowel de bodemassen afkomstig van **huisvuilverbrandingsinstallaties** (HVI) als de bodemassen afkomstig van vergelijkbaar afval zoals **biomassa, hout- en papierverbranding**. HVI-bodemassen dienen, voordat ze als een kunstmatig granulaat kunnen toegepast worden in beton, behandeld te worden. Typisch houdt dit een ferro en non-ferro scheiding in.

➤ Te behalen milieuwinsten

Er wordt milieuwinst geboekt op vlak van de verminderde ontginning van primaire granulaten. Dit spaart landschappelijke bronnen en reduceert de ecologische impact van zand- en granulaat. Daarnaast wordt het storten van bodemassas voorkomen.

➤ Status van de technologie

Momenteel wordt AVI-bodemassa nog niet in hoogwaardig beton toegepast. Het merendeel van de behandelde bodemassen wordt aangewend bij de inrichting en eindafwerking van stortplaatsen. Andere toepassingen zijn de productie van straalmiddelen en schraal beton voor funderingen en onderfunderingen (boven de watertafel).

Volgens studies zouden AVI-bodemassen in aanmerking kunnen komen als granulaat voor beton⁹³. In Nederland kunnen AVI-bodemassen volgens CUR-aanbeveling 116 en BRL 2507 beoordeeld worden hoe ze veilig als gedeeltelijke granulaatvervanger kunnen worden gebruikt in beton. Zo dragen reeds enkele bedrijven in Nederland een KOMO-productcertificaat voor hun AEC-granulaat⁹⁴ (Afval Energie Centrale, afgekort als AEC, is een andere benaming voor afvalverbrandingsinstallatie, afgekort AVI), wat dus voldoet aan alle technische en milieu-eisen om in beton toegepast te worden.

→ **TRL 6-7**

In België bevindt het gebruik van AVI-bodemassen in beton zich nog in onderzoeks- en pilootfase.

→ **TRL 5**

➤ Technische aandachtspunten

AVI-bodemassen kunnen problemen vertonen met de uitloging van zware metalen, voornamelijk van koper en zink, chloride- en sulfaatgehalten en onvolledig verbrand organisch materiaal⁹⁵. Vooral de fijnere (zand)fractie (<6 mm) van AVI-bodemassen heeft met deze problematiek te maken. Een grondstofverklaring is verplicht bij gebruik van AVI-bodemassen in bouwtechnische toepassingen.

⁹³ [AVI-bodemas - Grondstoffencatalogus](#)

⁹⁴ [AEC granulaat als toeslagmateriaal in beton - KOMO](#)

⁹⁵ [Rijkswaterstaat Technisch Document \(RTD\)](#)

Om de milieu-hygiënische kwaliteit van de behandelde bodemassen die niet aan de VLAREMA-normen voldoen te verhogen is een verdere behandeling vereist. De meest gebruikte behandelingsmethode daarvoor is de natuurlijke veroudering van minstens 6 weken (opslag na verbranding) waarin een complexe reeks van natuurlijke processen (zoals carbonatatie, hydrataatie, e.d.) het uitlooggedrag verbetert^{95,96}. Deze natuurlijke veroudering zorgt er echter niet steeds voor dat aan de VLAREMA-normen wordt voldaan.

AVI-bodemassas wordt omwille van de uitloging van zware metalen veelal gebruikt in gebonden toepassingen (vormgegeven bouwstof) en niet als niet-vormgegeven bouwstof. In de grondstoffenverklaring wordt bijkomend nagegaan of het materiaal waarin AVI-bodemassen worden gebruikt, voldoet aan de uitloogcriteria.

De aanwezigheid van aluminium in de AVI-bodemassa kan aanleiding geven tot luchtbelvorming en zwellingen in het beton met hogere betonporositeit tot gevolg, die vanuit bouwtechnisch standpunt ongewenst zijn⁹⁶. Door de AVI-bodemassa vooraf te behandelen kan dit neveneffect voorkomen worden.

Gezien bodemassen een restproduct zijn van afvalverbranding, varieert de samenstelling in de tijd, waardoor grondige karakterisering nodig zal zijn. Per batch dient men best korrelverdeling, volumieke massa, TOC, sulfaat-, alkali- en chloride-gehalte te bekijken⁹⁵.

Het bodemassa-granulaat is vaak lichter en poreuzer, wat leidt tot lagere dichtheid en hogere waterabsorptie dan natuurlijke granulaten en beïnvloedt de verwerkbaarheid. Bodemassen kunnen ook een lagere hardheid vertonen, hoewel na bewerking de standardeisen voor slijtvastheid bereikt kunnen worden⁹⁵. In niet-voorgespannen beton kan doorgaans 20-30% vervanging door AVI-bodemassen gebeuren zonder verval in betontechnische prestaties⁹⁶, mits de bodemassen goed behandeld zijn geweest en geen ongewenst gedrag vertonen zoals zwellingen.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

In België werd in 2015 239 kton AVI-bodemassa behandeld, waarvan 110 kton afkomstig is van Vlaanderen en 129 kton van Wallonië. Hiervan kan 125 kton bodemassa aangewend als bouwstof, terwijl het overige gedeelte wegens milieu-hygiënische redenen nog op stortplaatsen terecht komt. De twee belangrijkste Vlaamse behandelingsinstallaties voor AVI-bodemassen zijn Indaver en Valomac. Zij verwerken ongeschikte bodemassen, zowel afkomstig van binnen als buiten Vlaanderen (o.a. Wallonië), op tot secundaire grondstoffen. Deze worden momenteel in wegenbouw en ophoging gebruikt (o.a. met COPRO certificatie), maar worden ook verder onderzocht naar toepassingen in hoogwaardig beton.

⁹⁶ [Gebruik van afvalstoffen in/als bouwstof | Informatiepunt Leefomgeving](#)

B.12. Schuimglasgranulaten

➤ Korte beschrijving

Schuimglasgranulaat, of geblazen of geëxpandeerd glasgranulaat, is een lichtgewicht en poreus materiaal dat verkregen wordt door gerecycleerd glas te verhitten tot 900 °C tot het opschuimt, om het vervolgens te laten afkoelen tot een lichtgewicht granulaat (0,1-0,4 g/cm³)^{97,98}. Het kan gebruikt worden in lichtgewicht beton (1,5-2,0 g/cm³), drainage, isolatie en fundering.

➤ Te behalen milieuwinsten

Het gebruik van gerecycleerd glas draagt bij aan de circulariteit en vermindert afval. Door het lichtgewicht is er minder transportenergie wat kan bijdragen aan milieuwinsten. Er worden algemeen ook geen uitlogingen vastgesteld⁹⁷.

➤ Status van de technologie

Schuimglasgranulaat is commercieel in gebruik (bv ⁹⁹) in lichtgewicht betonblokken, prefab-panelen, mortels en worden erkend door de EN 13055 voor lichtgewicht granulaten¹⁰⁰.

Schuimglasgranulaat werd in funderingen van wegen en fietspaden in Nederland en België toegepast als ook in lichtgewicht prefab betonelementen. Het kan onder BRL 9331 worden gecertificeerd⁹⁷.

→ TRL 8-9

In structureel beton wordt er aan validatie en opschaling gewerkt, zoals in 3D printen van een bank in NTU Singapore. In Europa zijn er pilootprojecten zoals prefab wandpanelen. De NBN B 15-001 laat artificiële granulaten zoals geëxpandeerd glasgranulaat toe, zij het met onder voorwaarden.

Het bedrijf Minolite⁹⁸ in Noorwegen zou geen thermische expansie gebruiken voor hun productie van lichtgewicht glasgranulaten, maar een andere groene, hernieuwbare technologie met een fysisch-chemisch proces dat gepatenteerd is. Deze glasgranulaten zouden nog lager in densiteit zijn en een lage waterabsorptie hebben en daardoor een hogere sterkte dan andere glasgranulaten en worden vooral gebruikt in drijvende constructies zoals pontons, viskwekerijen en offshore windfunderingen.

→ TRL 7

➤ Technische aandachtspunten

Door het lichtgewicht gedrag is er sterktebeperking en is het niet geschikt voor zwaarbelaste structuren maar eerder voor isolerende of drainerende functies.

De waterabsorptie is hoog in gewicht (10-20%) daar het lichtgewichtgranulaten zijn en water zwaarder is. Dit dient in rekening genomen te worden bij het mengen.

⁹⁷ [BRL 9331: Certificering geblazen glasgranulaat](#)

⁹⁸ [Home | Minolite Materials AS](#)

⁹⁹ [Poraver.pdf](#)

¹⁰⁰ [The Impact of Expanded Glass Granulate on the Alkali-Silica Reaction - MRO Magazine](#)

De verwerkbaarheid zou ten goede komen door de geëxpandeerde ronde vorm en ruw oppervlak van de granulaten⁹⁹.

Een aandachtspunt is alkali-silica-reactie wanneer dit glasaggregaat in beton wordt toegepast. Ruw gebroken glas zal namelijk met cementalkalis gaan reageren met swelling en scheurvorming tot gevolg. Geëxpandeerde glasgranulaten (door te schuimen) hebben daarentegen een behandeling tot 900 °C ondergaan en zullen derhalve in kristallijne toestand geen ASR reactie teweegbrengen in beton¹⁰⁰. Ze hebben hierdoor ook nuttige inertie tegen chemicaliën en vuur.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

In België wordt glas sterk gerecycleerd, het meeste glas wordt gerecycleerd in flessen of isolatiemateriaal zoals glaswol. Hierdoor is er minder glas beschikbaar voor toepassing als aggregaat in beton

B.13. Biochar granulaten

➤ Korte beschrijving

Biochar is een poreus koolstofrijk materiaal uit de pyrolyse (300-800 °C) van biomassa (bijvoorbeeld houtafval of organisch houdend slib) bij hoge temperaturen in zuurstofarme omgeving¹⁰¹. Er gebeurt dus geen verbranding waardoor een stabiele vaste koolstofmatrix achterblijft (50-90% koolstof) en er geen vluchtige bestanddelen ontstaan zoals CO₂. Daar het zeer rijk kan zijn aan koolstof, kan het als een bodemverbeteraar worden gebruikt. Echter kan afhankelijk van de gebruikte grondstof voor de pyrolyse de biochar niet altijd de gewenste kwaliteiten voor bodemtoepassingen hebben (bv. hoger gehalte aan mineralen). Een veelbelovend alternatief is biochar toegepast in beton, daar dit als een koolstofput (carbon sink) kan dienen¹⁰².

Biochar wordt onderzocht als SCM of vulstof (zie Technologische Fiche C.4), maar ook als lichtgewichtgranulaat als deze gepelletiseerd wordt.

➤ Te behalen milieuwinsten

Door de pyrolyse tot biochar en de omzetting naar pellets, kan koolstof opgeslagen worden in beton. Voor elke ton biochar kan tot 3,3 ton CO₂ worden opgeslagen¹⁰³ en kan bij mengseloptimalisatie dus zelfs een koolstofnegatieve beton verkregen worden.

Indien de toepassing slim gebeurt, kan ook indirect CO₂ bespaart worden. Door toepassing in vloeren, kunnen deze lichter zijn en kunnen slankere dragende kolommen en wanden mogelijk zijn en dus indirect materiaal uitsparen.

➤ Status van de technologie

Structureel beton met 20-30 MPa sterkte werd bij Empa (Zwitserland) bekomen met 20 vol% vervanging van granulaten met biochar als lichtgewicht granulaten¹⁰². Er zijn momenteel geen normen of richtlijnen beschikbaar voor de toepassing van biochar lichtgewichtgranulaten in beton.

→ TRL 5-6

In Noorwegen richt het bedrijf Biocrete zich op de pyrolyse van houtafval uit de bouwsector (1 Mton/jaar), om het vervolgens in beton te gebruiken¹⁰⁴. Een landbouwschuur van 1200 m² dient als pilootproject, dat werd gestart in 2023, waarin biocrete werd toegepast in de fundering, kelderconstructies en wanden, met gebruik van prefab sandwichpanelen en ter plaatse gestort beton. Naar schatting zou hier 5-15% volumevervanging van de granulaten kunnen zijn. De landbouwschuur zou door het toegepaste beton 11,7 ton CO₂ kunnen hebben reduceren en zo zelfs een koolstofnegatief beton hebben gebruikt. De oprichting van het consultancy bedrijf, Biochar Zero¹⁰¹, en strategisch platform, Biochar Europe¹⁰⁵, gespecialiseerd in biochar toont de mogelijke opmars van deze technologie in Europa.

→ TRL 7

¹⁰¹ [Biochar and Concrete: The Next Revolution in Urban Construction? - Tomorrow.City - The biggest platform about urban innovation](#)

¹⁰² [Empa - Concrete & Asphalt - Biochar-rich lightweight aggregates for concrete](#)

¹⁰³ [Biochar in Concrete: A Sustainable Solution for the Construction Industry | Website \(puro.earth\)](#)

¹⁰⁴ [Biocrete](#)

¹⁰⁵ [Biochar Europe](#)

➤ Technische aandachtspunten

Koolstofgehalte, porositeit en chemische stabiliteit beïnvloeden de prestaties, een bron met stabiele samenstelling voor de pyrolyse kan uitdagend zijn.

Door hoge porositeit en kleine luchtholtes in de biochar granulaten kan de volumieke massa van beton aanzienlijk verlaagd worden door een gedeeltelijke vervanging van granulaten door lichtgewicht biochar granulaten. Tevens hebben biochar granulate een hogere waterabsorptie en beïnvloeden ze de verwerkbaarheid van beton.

Biochar granulaten zijn niet zo sterk als gangbare granulaten, dus bij het vervangingspercentage dient hier rekening mee gehouden te worden, dus een grote volumevervanging zal de sterkte van het dragende inert skelet verminderen.

Biochar bestaat grotendeels uit stabiele koolstof die opgeslagen blijft in beton. Mogelijks zou het gebruik van biochar granulaten invloed kunnen hebben op de carbonatatie van beton. Als biochar de carbonatatie versnelt of de porositeit verhoogt, kan dit leiden tot een snellere pH-daling in de betondekking, waardoor de wapening vatbaarder wordt voor corrosie. Echter is dit niet aangetoond en zou het eerder gaan op CO₂ opname uit de omgeving dan over de interne koolstof die tot CO₂ zou omvormen.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

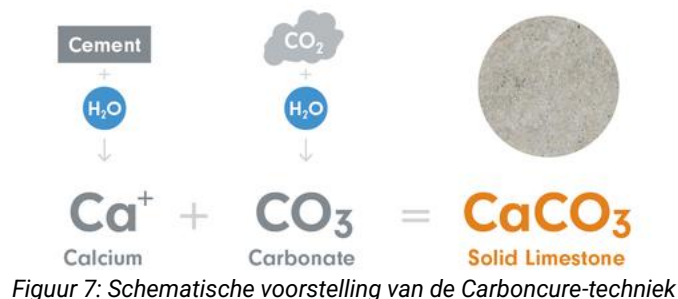
Afvalwaterbedrijven produceren grote hoeveelheden zuiveringsslib, dewelke in aanmerking zouden kunnen komen voor pyrolyse tot biochar. Gezien de opmars van biochar in Europa, kan dit een technologie zijn om in de gaten te houden voor toepassingen in beton in België.

C. Hulp- en vulstoffen

C.1. Injectie van CO₂ in vers beton

➤ Korte beschrijving

Carboncure is een technologie die CO₂ in beton injecteert en hiermee ook de druksterkte van het beton verbetert¹⁰⁶ en heeft hiermee de functie zoals een hulpstof (en niet als aggregaat of SCM)¹⁰⁷. CO₂-doseringen kunnen variëren van 0.1% tot 0.3%. De herkomst van CO₂ is o.a. van lokale gas leveranciers die CO₂ capture faciliteiten hebben. Een voorbeeld van een CO₂-keten: een staalfabriek produceert CO₂ die word opgeslagen door Carbon Capturing, de CarbonCure technologie gebruikt deze CO₂ dan bij een betoncentrale ter aanmaak van beton. De CO₂ wordt permanent ingebed door mineralisatie, waardoor deze ook nooit meer zal vrijkomen onder normale omgevingsomstandigheden of bij afbraakwerken. De mineralisatie verhoogt de sterkte van het beton en bestaat uit de chemische reacties tussen CaO in de cementproducten en de CO₂ die geïnjecteerd wordt die samen CaCO₃ vormen (Figuur 7).



De vorming van CaCO₃ tijdens CarbonCure gebeurt met vers hydraterende cement. Door de vorming van CaCO₃ in het verse beton wordt de totale porositeit van het beton verminderd¹⁰⁶.

➤ Te behalen milieuwinsten

De CO₂-uitstoot, afkomstig van andere industriële processen, kan gebruikt worden in deze technologie. Een toename in sterkteontwikkeling door het hulpstofeffect van de geïnjecteerde CO₂ laat toe om het mengsel te optimaliseren en gehalte aan cement te verlagen tot 3–7%¹⁰⁸. De ware verkleining van de CO₂-voetafdruk van beton is dus meer gelinkt aan de verlaging in cementgehalte dan aan de injectie van de CO₂.

➤ Status van de technologie

Het bedrijf CarbonCure heeft de techniek gepatenteerd (Figuur 7). Deze kan gewoon aan de bestaande opstelling in een betoncentrale wordt gekoppeld¹⁰⁹. CarbonCure geeft een licentie van hun technologie aan betonproducenten zodat deze beton met een lagere CO₂ voetafdruk kunnen aanbieden. Via de website zijn er verslagen beschikbaar van case studies waar de techniek gedurende een lange periode werd toegepast in praktijkcondities, alsook resultaten van een onderzoeksproject.

→ TRL 8

¹⁰⁶ S. Monkman, R. Cialdella, and J. Pacheco, "Performance, Durability, and Life Cycle Impacts of Concrete Produced with CO₂ as Admixture," *ACI Materials Journal*, vol. 120, 01/01 2023

¹⁰⁷ S. Monkman, M. MacDonald, R. D. Hooton, and P. Sandberg, "Properties and durability of concrete produced using CO₂ as an accelerating admixture," *Cement and Concrete Composites*, vol. 74, 2016/11/01/ 2016, pp. 218-224

¹⁰⁸ S. Monkman, "Calculating Sustainability Impacts of CarbonCure Ready Mix," *Journal of Cleaner Production*, vol. 167, 2017, pp. 365-375

¹⁰⁹ <https://www.carboncure.com>

➤ Technische aandachtspunten

Deze techniek heeft schijnbaar geen invloed op de overige eigenschappen van de betonspecie (bv. zetmaat, verpompbaarheid, luchtgehalte, temperatuur). Het toevoegen van CO_2 kan als versneller werken, de bindingstijd van het beton wordt versneld, de druksterkte van het beton op jonge leeftijd verhoogt¹⁰⁷.

Er dient echter wel een Ca-bron aanwezig te zijn om met de CO_2 tot CaCO_3 te reageren. Hoe hoger het gehalte aan klinker, hoe hoger het gehalte aan CO_2 dat zal binden. Duurzame cementen met lager klinkergehalte zullen dus lagere hoeveelheden CO_2 opnemen.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Er is momenteel nog geen ervaring in Europa met deze technologie. Aangezien het systeem wordt gekoppeld aan een bestaande opstelling in een betoncentrale, is de technologie overal toepasbaar. Een nota bij de milieu impact is dat het gehalte portlandcement in het cementtype in rekening moet genomen worden. Een CEM I met een hoger gehalte aan portlandcement zal meer CO_2 kunnen besparen dan een CEM III, omdat deze laatste een lager gehalte aan portlandcement bevat, en dus minder Ca-silicaten als CaO bron heeft om met CO_2 te mineraliseren tot CaCO_3 .

C.2. Hulpstoffen op basis van lithiumsilicaat

➤ Korte beschrijving

Lithiumsilicaat wordt gebruikt in verschillende toepassingen, waaronder tandheelkunde, en als bindmiddel in materialen zoals glasvezel. Daarnaast wordt het ook gebruikt als betonverharder en betonafdichtmiddel¹¹⁰.

Lithiumsilicaat kan als een vloeistof op een gepolijste vloer worden aangebracht, het silicaat zal door het lithium tot minstens 5 mm diepte impregneren. Het silicaat zal gaan reageren met $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tot Ca-silicaat en de poriën van het beton opvullen. Het kan ook aan de betonspecie toegevoegd worden om de eigenschappen te verbeteren¹¹¹.

➤ Te behalen milieuwinsten

Het toepassen van lithiumsilicaat zal beton afdichten wat ten goede komt aan de duurzaamheid. Beton zal langer bestendig zijn tegen indringing van carbonatatie, chloride en andere ongewenste indringende stoffen. Het verlengt dus de levensduur, reduceert onderhoud en vervanging van constructies.

➤ Status van de technologie

Vloeibare lithiumsilicaat-vloerhardeners en verdichters zijn commercieel verkrijgbaar en worden routinematig ingezet om nieuwe én bestaande betonnen vloeren duurzamer te maken¹¹².

→ TRL 9

De interne toepassing van lithiumsilicaat als betontoevoegsel (in de betonspecie zelf) bevindt zich nog in de gevorderde demonstratie- en optimalisatiefase¹¹¹.

→ TRL 6-7

➤ Technische aandachtspunten

Het bepalen van de juiste dosering lithiumsilicaat is essentieel. Te weinig geeft onvoldoende effect, terwijl overmaat kan leiden tot wituitslag op het beton¹¹². Compatibiliteit met andere hulpstoffen dient nagegaan te worden.

Lithiumsilicaat zou ASR tegen kunnen gaan.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

in België wordt watergedragen lithiumsilicaatmiddel tot nog toe vooral toegepast voor stofvrije, slijtvaste bedrijfsvloeren en parkeerdekken. In België bestaat een groeiende focus op duurzame bouwmaterialen en het verlengen van de levensduur van infrastructuur, waardoor de hulpstof ook in een bredere context zou kunnen worden toegepast. Lithiumsilicaat heeft namelijk het vermogen om beton duurzamer en onderhoudsarm te maken.

¹¹⁰ [What Does Lithium Silicate Do to Concrete? | Bisley International LLC](#)

¹¹¹ <https://highways.dot.gov/media/5961>

¹¹² [Sikafloor® CureHard LI | Oppervlakte behandelingsmiddelen](#)

C.3. Courante vulstoffen

➤ Korte beschrijving

Vulstoffen zijn poeders die meestal bekomen worden door het vermalen van kalksteen of zandsteen. Kalksteenmeel wordt in de praktijk het meest gebruikt. Kalksteenmeel kan zowel als cementvervanger (zie technische fiche A.1 Gestandaardiseerde binaire en ternaire cementen) als toevoeging (i.e. vulstof) gebruikt worden.

Kalksteenvulstoffen uit de kalkproducerende sector zijn meestal zeer droog en uitsluitend CaCO_3 (>95%) wat ten goede komt aan continue stroom met continue stabiele eigenschappen. Zijn dit echter resten uit de productie van kalkhoudende granulaten, dan kunnen er meer verontreinigingen inzitten en dient de vulstof de norm NBN EN 12620 te doorlopen.

Naast kalksteenmeel zijn er nog courante vulstoffen zoals, gemalen zandsteen, marmermeel, granietmeel, fijn gemalen betonpuin.

➤ Te behalen milieuwinsten

Het gebruik van restproducten van bewerking, zoals marmer of graniet, granulaatproductie, zoals kalksteen, als ook gerecycleerd betonpuin kan het storten van deze materialen vermijden. Daarnaast verhoogt de vulstof in het algemeen de betonstructuur zodanig dat de duurzaamheid van het beton verhoogt, waardoor de structuur langer zou kunnen blijven staan en minder snel afbraakwerken nodig zijn.

➤ Status van de technologie

Het gebruik van inerte vulstoffen in beton bevindt zich op een stabiel niveau en er bestaan vulstoffen conform NBN B 15-001, de Belgische bijlage bij EN 206. Dit zijn de commercieel beschikbare vulstoffen kalksteenmeel in zelfverdichtend beton en conventioneel beton, kwartsmeel in slijtvaste toepassingen en marmer- en granietmeel in esthetische toepassingen.

→ **TRL 9**

Fijn gemalen betonpuin is een circulaire vulstof die de functie van kalksteenmeel kan hebben. Betonfijn is weliswaar nog niet volledig genormaliseerd en ingeburgerd. Het gebruik is voor verschillende producenten wel al als gebruiksgeschikt aangetoond volgens NBN B 15-105.

→ **TRL 6-8**

➤ Technische aandachtspunten

Vulstoffen worden enkel als toevoeging in beton gebruikt en niet als vervanging van cement. Variabiliteit in reststromen dient onder controle gehouden te worden.

Een vulstof verhoogt het aandeel aan fijn materiaal en dit kan invloed hebben op de verwerkbaarheid van het betonmengsel. Het kan segregatie tegengaan maar ook de waterbehoefte vergroten. Hierdoor kan meer cement nodig zijn en komt dit niet ten goede voor milieuwinsten. Een aangepast mix design kan hier rekening mee houden. Kalksteenmeel kan de vloeï verbeteren terwijl betonpuin extra water of superplast nodig kan hebben.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

Kalksteenmeel en zandsteenmeel worden gebruikt op de Belgische markt, en er zijn producenten met een BENOR-certificatie door PROCERTUS, mits deze conform is aan NBN B 15-001. Ook betonfijnen worden meer couranter gebruikt en kunnen certificatie krijgen via NBN B 15-105. In België zijn er ook enkele producenten die deze weg willen volgen en hun betonpuin als vulstof ter beschikking stellen.

C.4. Biochar

➤ Korte beschrijving

Biochar is een poreus koolstofrijk materiaal uit de pyrolyse (300-800 °C) van biomassa (bijvoorbeeld houtafval of organisch houdend slib) bij hoge temperaturen in zuurstofarme omgeving^{113,114}. Er gebeurt dus geen verbranding waardoor een stabiele vaste koolstofmatrix achterblijft (50-90% koolstof) en dus geen vluchtige bestanddelen ontstaan zoals CO₂. Daar het zeer rijk kan zijn aan koolstof, kan het als een bodemverbeteraar worden gebruikt. Echter kan afhankelijk van de gebruikte grondstof voor de pyrolyse de biochar niet altijd de gewenste kwaliteiten voor bodemtoepassingen hebben (bv. hoger gehalte aan mineralen). Een veelbelovend alternatief is biochar toegepast in beton, daar dit als een koolstofput (carbon sink) kan dienen¹¹⁵. Biochar is lichter dan gangbare grondstoffen in beton door hogere porositeit.

Biochar wordt door beperkt reactief gedrag veeleer als inert gezien. Het is een fijn poeder en is vaak <50 µm¹¹³. In Technologische Fiche B.13 wordt biochar ook als lichtgewicht granulaat (als deze gepelletiseerd wordt) toegelicht.

➤ Te behalen milieuwinsten

Gebruik van biochar in beton kan dienen als koolstofopslag en kan zelfs koolstofnegatief zijn, dit wil zeggen, de aanmaak van beton bespaart of slaat meer CO₂ op dan dat deze uitstoot.

De toepassing van Biochar zou een verbetering kunnen geven in mechanische sterkte, thermische isolatie, waterretentie¹¹³. Het kan dus toegepast in bouwprojecten op lange termijn meehelpen aan een lagere CO₂-voetafdruk.

➤ Status van de technologie

Voor thermisch isolerend beton zijn demo-proeven gebeurd in relevante omgevingen om praktische toepasbaarheid aan te tonen. In 2025 presenteerde Holcim een demowoning met biochar-betonpanelen¹¹⁶.

Er zijn nog enkele praktische uitdagingen zoals waterabsorptie en stofoverlast¹¹⁷. Een mogelijke oplossing voor stof is om de biochar niet als los poeder toe te voegen maar te **granuleren** of pelletiseren, maar dit verschuift de toepassing van vulstof naar lichtgewicht granulaat (Technologische Fiche B.13). Verdere ontwikkeling voor grootschalige toepasbaarheid is nog nodig.

→ TRL 6-7

➤ Technische aandachtspunten

Biochar is geen homogeen standaardproduct, de eigenschappen hangen sterk af van de input-biomassa (hout, stro, mest, etc.) en de pyrolysecondities (temperatuur, verblijftijd). Men dient de continue kwaliteit te bewaken. Een te hoog asgehalte kan cementshydratatie verstoren,

¹¹³ Senadheera, Sachini Supunsala, et al. "Application of biochar in concrete—a review." *Cement and Concrete Composites* 143 (2023): 105204.

¹¹⁴ [Biochar and Concrete: The Next Revolution in Urban Construction? - Tomorrow.City - The biggest platform about urban innovation](#)

¹¹⁵ [Empa - Concrete & Asphalt - Biochar-rich lightweight aggregates for concrete](#)

¹¹⁶ [The power of biochar: Our breakthrough carbon sink tech explained](#)

¹¹⁷ [news.admin.ch/en/nsb?id=99611](#)

hoog fosfaatgehalte kan klinkerreactie vertragen door Ca-fosfaatlaagjes rond de cementkorrels te vormen¹¹³. Het duidelijk opstellen van eisen en grenswaarden kan hierbij helpen.

Biochar is door de hogere porositeit^{113,117} algemeen lichter dan gangbare grondstoffen voor beton en kan daardoor interessant zijn voor lichtgewicht beton en thermische isolatie. Het kan door zijn eigenschappen ook vocht reguleren en dienen als dampbuffer¹¹³.

Een optimale dosering zou 5% biochar zijn, meer dan 5% biochar kan de verwerkbaarheid verminderen. Vers beton kan een verminderde betondensiteit hebben, verhoogd luchtgehalte en andere cementshydratatie en bindingstijd¹¹³. Hogere doseringen zijn mogelijk tot 10-15%, maar een aangepast mix design zal nodig zijn om de voordelen (thermische en vochtregelende eigenschappen, vuleffecten, koolstofopslag...) van biochar optimaal te gebruiken ten opzichte van de nadelen (waterabsorptie, moeilijkere verwerkbaarheid,...).

Toevoeging van biochar zou verminderde krimp geven en lagere verdampingssnelheden door een lagere permeabiliteit. Dit zou ook hogere duurzaamheid mogen geven, maar de algemene duurzaamheidseffecten zijn nog ongekend¹¹³. Biochar, ondanks hoge porositeit, kan dus de porositeit in beton verlagen door ideale vulling. Echter, wanneer té grote hoeveelheid Biochar gebruikt wordt, kan dit weer een hogere porositeit teweegbrengen in het beton. Het optimale mix design moet dus gevonden worden.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

België beschikt over biomassa-reststromen (hout, landbouwafval) die als grondstof voor biochar kunnen dienen. Grote internationale bouwmaterialenbedrijven (zoals Holcim) ontwikkelen biochar-concepten, die bij succes ook in België uitgerold kunnen worden, als ook KMO bedrijven kunnen hiermee aan de slag. Kosten en schaalbaarheid als ook het huidige gebrek aan normen en certificatie kunnen een uitdaging bieden. De lokale kennis dient nog opgebouwd te worden, en een continue en voldoende aanvoer van continue kwaliteit dient aanwezig te zijn. Dit vergt afstemming tussen de afval/biomassa-sector en de bouwsector.

C.5. Nanovulstof

➤ Korte beschrijving

Nanovulstoffen¹¹⁸ in beton zijn ultrafijne additieven (nanodeeltjes) die worden gebruikt om de prestaties van beton te verbeteren. In de praktijk gaat het vaak om puzzolanen op nanoschaal, zoals silicastof of synthetisch nanosilica. Deze deeltjes zijn uiterst fijn en reactief, vullen microscopisch kleine poriën in de cementmatrix op en verbeteren de hechting tussen cementpasta en aggregaten. De toevoeging van een nanovulstof verfijnt de poriënstructuur van het beton, verhoogt de druksterkte en vermindert de doorlatendheid, waardoor de algehele kwaliteit van het beton wordt verbeterd tot boven het niveau dat met traditionele vulmiddelen kan worden bereikt.

➤ Te behalen milieuwinsten

Het gebruik van nanovulstof maakt hoogwaardig beton mogelijk met een lager cementgehalte en volledig gebruik van gerecycleerde materialen. Een voorbeeld hiervan is een toepassing in de industrie waarbij een nanovulstof op basis van silica wordt gecombineerd met 100% gerecyclede bouw- en sloopaggregaten, waardoor er geen nieuwe natuursteen/grind meer nodig is.

➤ Status van de technologie

Nanovulstof betontechnologie is tot commercieel niveau gegroeid, ERC-TECH in Tsjechië heeft zelfs een gepatenteerd proces voor het mixen van gerecycleerde granulaten met een hun gepatenteerde nanovulstof¹¹⁹. Hierbij coat nanosilica als het ware gerecycleerde granulaten door hun poriën te vullen vooraleer cementhydratatie begint.

→ **TRL 9**

➤ Technische aandachtspunten

Zorgvuldige technische controle is nodig daar nanovulstof ultrafijn is. Een goed dispersie in het mengsel is van kritisch belang om de gewenste werking te krijgen. Een aangepaste hoogwaardige menger kan nodig zijn.

Veiligheid bij het hanteren van droge nanovulstof is van essentieel belang, fijn silicastof moet op de juiste wijze worden opgevangen, opgeslagen en verwerkt.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

In België worden gerecycleerde granulaten toegepast en zou de nanovulstof technologie toepasbaar zijn.

¹¹⁸ [Enhanced Impact Properties of Concrete Modified with Nanofiller Inclusions | Journal of Materials in Civil Engineering | Vol 31, No 5](#)

¹¹⁹ [Erc-Tech – cutting edge use case of recycling concrete](#)

C.6. Reactieproducten van carbon Capture & Storage als vulstof

➤ Korte beschrijving

Carbon Capture & Storage (CCS) verwijst traditioneel naar het afvangen van CO₂-uitstoot en het opslag ervan op een wijze dat het niet meer in de atmosfeer komt. In de context van beton gaat het echter vaak om Carbon Capture, Utilization & Storage (CCUS): de afgevangen CO₂ wordt chemisch gebonden in een mineraal dat als vulstof of bindmiddel in beton gebruikt kan worden. Met andere woorden: van het broeikasgas CO₂ wordt een vast “steenpoeder”, met deeltjesgrootte zoals cement, gemaakt door het te laten reageren met minerale reststromen¹²⁰. Deze carbonaten sluiten permanent CO₂ op en doen tegelijk dienst als onderdeel van beton. Dit verschilt dus van het concept Carboncure (zie Technologische Fiche C.1 Injectie van CO₂ in vers beton) waarbij vloeibaar CO₂ wordt beneveld in verse betonspecie.

➤ Te behalen milieuwinsten

CO₂-gebaseerde vulstoffen leggen permanent koolstof vast in beton. Cementproductie uitstoot kan hiermee vermeden worden.

➤ Status van de technologie

Een Nederlands-Scandinavische start-up Paebbl laat CO₂ reageren met olivijn tot een magnesiumcarbonaat¹²¹. Ze hebben een pilotsite die 3 ton CO₂ mineraal per dag kan produceren¹²².

→ TRL 7-8

➤ Technische aandachtspunten

Een cruciale vereiste is dat de betonkwaliteit behouden blijft met de vulstof. CO₂-gebaseerde vulstoffen zijn technisch haalbaar. Mechanische prestaties kunnen aangetoond behouden blijven^{121,122}. De verwerkbaarheid kan beïnvloed worden. Zoals bij kalksteenmeel, kan deze CO₂-vulstof zelfs een gunstig effect hebben en zelfs minder water nodig zijn.

Sommige CO₂ ‘vulstoffen’ kunnen ook kunnen zich puzzolaan of cementachtig gedragen, deze reactiviteit kan positief zijn, maar dient in rekening genomen te worden.

Extra carbonaten verlagen lichtjes de pH van het poriënwater (carbonatatie-effect), maar zonder veel invloed de algemene pH waarde die ruim hoog genoeg blijft voor staalbescherming.

Magnesiumrijke vulstoffen dienen volledig gecarbonateerd te zijn om Mg(OH)₂ expansie in beton te vermijden.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

De beton- en cementsector zijn grote industriële bronnen van CO₂ reststromen die potentieel hebben om CCS mineralisatie toe te passen.

¹²⁰ [Opslag miljoenen tonnen CO2 door hergebruik in bouwmaterialen - Duurzaam Ondernemen](#)

¹²¹ [Paebbl just crossed an important milestone with their first ton of CO2 mineralised!](#)

¹²² [Paebbl Transforming CO2 into Carbon-Storing Building Materials](#)

D. Beton

D.1. Zwavelbeton

➤ Korte beschrijving

Zwavelbeton is een type beton waarbij zwavel het bindmiddel is in plaats van cement. Het mengsel bestaat typisch uit ~12–25% gesmolten zwavel en 75–88% toeslagstoffen (zand, grof granulaat). Bij ongeveer 140°C wordt de zwavel vloeibaar en mengt zich met de granulaten. De verharding is een fysisch proces, namelijk de faseovergang van vloeibare naar vaste vorm bij het stolpunt van zwavel, nl. 119,2 °C. Na menging met granulaten en mogelijke hulpstoffen, afkoeling en stolling wordt een materiaal verkregen dat getypeerd wordt door een snelle uitharding (enkele uren in plaats van weken) en snelle sterkteontwikkeling¹²³.

➤ Te behalen milieuwinsten

De productie van zwavelbeton zorgt voor ~40% minder CO₂-uitstoot en hergebruikt zwavel uit de petrochemie¹²⁴. Naast het beperken van het gebruik van het CO₂-intensieve, traditionele portlandcement is een van de mogelijke troeven van zwavelbeton dat het, door een combinatie van het hersmelten en bijkomende verwerkingsstappen, eenvoudig hergebruikt kan worden¹²⁵.

➤ Status van de technologie

De technologische mogelijkheden van zwavelbeton worden als sinds de jaren 1920 onderzocht wegens de hoge sterkte, corrosieweerstand en snelle sterkte-ontwikkeling¹²⁶. Bijkomende voordelen van zwavelbeton zijn de waterdichtheid en een verhoogde weerstand tegen zuuraantasting. Dat maakt het gebruik van zwavelbeton interessant in bv. rioleringen. In Europa is het eerste commerciële product in 2021 op de markt gebracht (zie “Potentieel voor de Belgische markt”).

In België heeft spoorbeheerder Infrabel in 2021 als eerste in Europa officieel “groene” dwarsliggers van zwavelbeton in gebruik genomen¹²⁷. Inmiddels worden zwavelbetonbielzen niet alleen in België maar ook in proefprojecten in Frankrijk, Nederland en Australië ingezet¹²⁸.

→ TRL 9

➤ Technische aandachtspunten

Omwille van het lage smeltpunt van zwavel kunnen gelijkaardige prestaties als van traditioneel beton verkregen worden tot een temperatuur van ongeveer 85 °C. Zwavelbeton bezit dus niet dezelfde hoge vuurbestendigheid als traditioneel beton. Het kan verzachten of zelfs ontbranden waarbij toxische zwaveldampen zouden kunnen vrijkomen. Voor toepassingen waar brandwerendheid cruciaal is, moet dit risico zeker gemitigeerd worden. Brandvertragers kunnen toegevoegd worden aan zwavelbeton om ontvlambaarheid te verminderen¹²³.

Zwavelbeton heeft een neutrale pH door gebrek aan kalkhoudende hydraten. Er is dus geen passiverende alkalische omgeving voor stalen wapening.

¹²³ [Characteristics and application of sulfur concrete](#)

¹²⁴ [Industrial production of 'green sleepers' for Infrabel starts | RailTech.com](#)

¹²⁵ <https://www.bouwkronek.be/article/zwavel-maakt-beton-circulair.35974>

¹²⁶ <https://www.jrosspub.com/engineering/geotechnical/sulfur-concrete-for-the-construction-industry.html>

¹²⁷ [Infrabel installs Europe's first 'green' sleepers on Belgian railways | The Bulletin](#)

¹²⁸ [THIOTRACK - Thio Materials](#)

Andere belangrijke aandachtspunten van zwavelbeton zijn de complexe set van krimpreacties (volume inkrimping en faseovergangen in vaste toestand) en het belang van een correcte selectie van specifieke granulaten en hulpstoffen¹²⁶.

Een voordeel is zwavelbeton uitzonderlijk bestand is tegen zuren en agressieve omgevingen wat nicheapplicaties toelaat.

Verder kan zwavelbeton niet samen gerecycleerd worden met 'traditioneel' betonpuin. Een aparte inzameling bij afbraakwerken is dus noodzakelijk.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

De technologie van zwavelbeton bereikte in 2021 een belangrijke Europese doorbraak met de toepassing van zwavelbeton in dwarsliggers voor treinen in België^{127,129}. De dwarsliggers zijn ontwikkeld door De Bonte Beton in Waasmunster. In de toekomst kan dit uitgebreid worden naar andere spoorgebonden elementen, zoals prefab perronranden of kabelgootjes, die eveneens baat hebben bij duurzaamheid en snelle productie¹²⁴.



Figuur 8: Dwarsligger in zwavelbeton (vooraan) en in de klassieke betonsamenstelling (achteraan)

In de riool- en waterzuiveringssector kunnen zwavelbetonnen buizen worden toegepast wegens hun bestendigheid tegen zuren, sulfaten, zouten en andere agressieve stoffen. Ze kunnen de levensduur van riolen verlengen. Documenten PTV 823 deel 1 en 2 bevatten de technische voorschriften voor deze producten. Een certificaat voor geprefabriceerde buizen van ongewapend zwavelbeton is uitgereikt door COPRO¹³⁰.

¹²⁹ <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2021/03/06/duurzame-treinsporen/>

¹³⁰ [Zoeken - Copro Extranet](#)

D.2. Cenocell

➤ Korte beschrijving

Cenocell kan beschouwd worden als een lichtgewicht cellenbeton op basis van afvalassen. Het lijkt op beton maar is volledig zonder Portlandcement¹³¹. Cenocell ontstaat via een chemische reactie tussen vliegash of bodemassen en organische chemicaliën. Deze reactie genereert een schuimend mengsel dat in vormen wordt gegoten en kan uitharden in ovens bij ca. 100°C. dit geeft een cellenrijk materiaal met hoge sterkte (tot 50 MPa) en laag gewicht (0,3-1,6 g/cm³).

Anders dan beton is er dus geen zand of grof granulaat aanwezig in cenocell, maar is het een schuimmateriaal dat (deels) beton kan vervangen, met namen cellenbeton of lichtgewicht beton. Het gaat dus om toepassingen vanwege isolerende eigenschappen en lage gewicht.

➤ Te behalen milieuwinsten

Door reststromen zoals vliegassen en bodemassen te gebruiken die anders gestort zouden worden kan stortafval vermeden worden als ook ontginning van natuurlijke grondstoffen. Er wordt geen cementklinker gebruikt bij Cenocell. Door thermische isolatie-eigenschappen kan een gebouw met Cenocell energetisch efficiënt zijn en besparen in verwarming/koeling. Het lichte gewicht is ook voordelig in transport.

➤ Status van de technologie

Cenocell werd rond 2008 ontwikkeld aan het Georgia Institute of Technology door Mulalo Doyoyo¹³¹. Het is goed isolerend en brandwerend. In 2012 werden pilootproefstukken vervaardigd in de VS en in 2015 werden in een fabriek in Zuid-Afrika Cenocell-blokken vervaardigd¹³². Ondertussen zou Cenocell wereldwijd in nicheprojecten toegepast kunnen worden.

→ TRL 7

➤ Technische aandachtspunten

De voornaamste bron van Cenocell is steenkoolas, hiervan daalt in West-Europa de beschikbaarheid door de uitfasering van steenkool. Er dient dus gezocht te worden naar alternatieve vlieg- en bodemassen. Procescontrole is cruciaal om constante kwaliteit van product te garanderen. Een variatie in samenstelling kan snel de reactiviteit van het schuimproces beïnvloeden.

Eventuele uitloging van zware metalen uit assen dient gecontroleerd te worden als hier risico's op kunnen zijn.

De uithardingstijd is 3-24uur tot volle sterkte. Dit is sneller dan de 28 dagen van beton.

De materiaaleigenschappen kunnen worden geregeld door korrelgrootte van de as, chemische additieven en oventijd te variëren¹³¹.

¹³¹ [Leftover gets a makeover: Professor develops new use for coal ash](#)

¹³² [Invention is Doyoyo's domain](#)

➤ Potentieel voor de Belgische markt

In België zijn voornamelijk AVI (afvalverbrandingsinstallaties) vlieg- en bodemassen aanwezig. Deze assen hebben minder potentieel om verwerkt te worden tot Cenocell. Verder onderzoek naar de kwaliteit, zoals uitlogingsgedrag, schuimgedrag, heterogeniteit zijn nodig om tot een constant en kwalitatief product te komen, daar Cenocell zich nu enkel toespits op specifiek steenkoolas.

D.3. Hennepbeton

➤ Korte beschrijving

Hennepbeton is een lichtgewicht biocomposiet van de binnenste houtachtige kern van de hennepplant gemengd met water en een bindmiddel op basis van kalk¹³³. Het heeft thermische en akoestische eigenschappen en met de juiste behandeling is het ook vochtregulerend en schimmelbestendig.

➤ Te behalen milieuwinsten

Hennepbeton is CO₂-negatief, dit komt doordat tijdens de teelt en uitharding er meer CO₂ wordt vastgelegd dan uitgestoten wordt¹³³. Dankzij de hoge isolatiewaarde verlaagt het bovendien de energiebehoefte van gebouwen voor verwarming en koeling wanneer toegepast in gebouwen.

➤ Status van de technologie

Hennepbeton wordt wereldwijd toegepast door verschillende spelers¹³³. Commerciële producten zoals prefab hennepblokken¹³⁴ zijn beschikbaar en genormeerd¹³⁵.

→ TRL 9



Figuur 9: Hennepbeton ter plaatse gestort door a10studio¹³⁶. Links: emmers met verse hennepbetonspecie klaar om te storten. Rechts: een wand met hennepbeton die wordt gestort.

¹³³ [De markt voor hennepbeton zal naar verwachting groeien met een CAGR van 14,8% van 2025 tot 2034, gedreven door een stijgende vraag naar duurzame bouwmaterialen – iCrowdNewswire Dutch](#)

¹³⁴ [Isohemp Hennep Isolatieblokken | 90 mm | 30x60cm | Pallet - Groene Bouwmaterialen](#)

¹³⁵ [Hennepbeton: voor een natuurlijk performante metselwerk. | IsoHemp](#)



Figuur 10: prefab isohempblokken die geplaatst worden¹³⁴.

➤ Technische aandachtspunten

Hennepbeton heeft een beperkte druksterkte en wordt dus als **niet-dragend** toegepast. Het dient als isolerende invulling rond een draagstructuur.

Indien niet voor blokken gekozen wordt, maar ter plaatse storten/aanmaak, is het een traag bouwproces¹³³.

Ondanks dat hennepbeton vochtregulerend is, dient men buitenmuren te beschermen tegen de regen, met bijvoorbeeld een dampopen pleister¹³⁶.

➤ Potentieel voor de Belgische markt

De markt voor hennepbeton zal naar verwachting groeien van 2025 tot 2034, gedreven door een stijgende vraag naar duurzame bouwmaterialen¹³³. In België is ook reeds lokale expertise door producenten zoals IsoHemp.

¹³⁶ [Building with Hempcrete – a10studio](#)