

DRAFTVERSIE: BINDMIDDELEN



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

Bram Doods, Niels Hulsbosch, Laura Kupers, Jeroen Vrijders,
Nicole Dilissen, Jef Bergmans, Arne Peys
Buildwise, VITO, **Maart 2025, v 3.0**



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.....	4
2	De betonsamenstelling	6
2.1	Het bindmiddel	6
2.1.1	Milieu-impact.....	6
2.1.2	Normalisatie	6
2.1.3	Een duurzame keuze in de huidige markt	7
2.1.4	Ontwikkelingen.....	8
2.2	De granulaten	11
2.3	De hulpstoffen, fillers en vezels	11
3	Beton als product	11
4	End-of-life, het ontwerp- en bouwproces & andere.....	11
4.1	Het ontwerp- en bouwproces	11
4.2	De gebruiksfase en End-of-Life	11
5	Technologie-fiches.....	12
A.	Bindmiddelen.....	13
A.1.	Gestandaardiseerde binaire en ternaire cementen	14
A.2.	Geactiveerde fijne fractie van gerecycleerd beton	21
A.3.	Geactiveerde klei en kleihoudende reststromen	23
A.4.	Alternatieve metaalslakken.....	26
A.5.	Verbrandingsassen van biomassa, papierslib, huisvuil	27
A.6.	Alternatieve klinkergrondstoffen	29
A.7.	hCHS-cement	30
A.8.	Calciumsulfoaluminaat (CSA) klinker.....	32
A.9.	Carbonateerbare klinker	34
A.10.	Alkalisch geactiveerde materialen en geopolymeren	36
A.11.	Minerale carbonatatie als uithardingsproces	39
A.12.	Binders op basis van magnesium.....	41
A.13.	Elektrochemische cementproductie.....	44
A.14.	Supergesulfateerd cement.....	45
A.15.	Biocement	46

1 Inleiding

Natuurlijke bronnen 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 samenleving en 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 vliegas) 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.

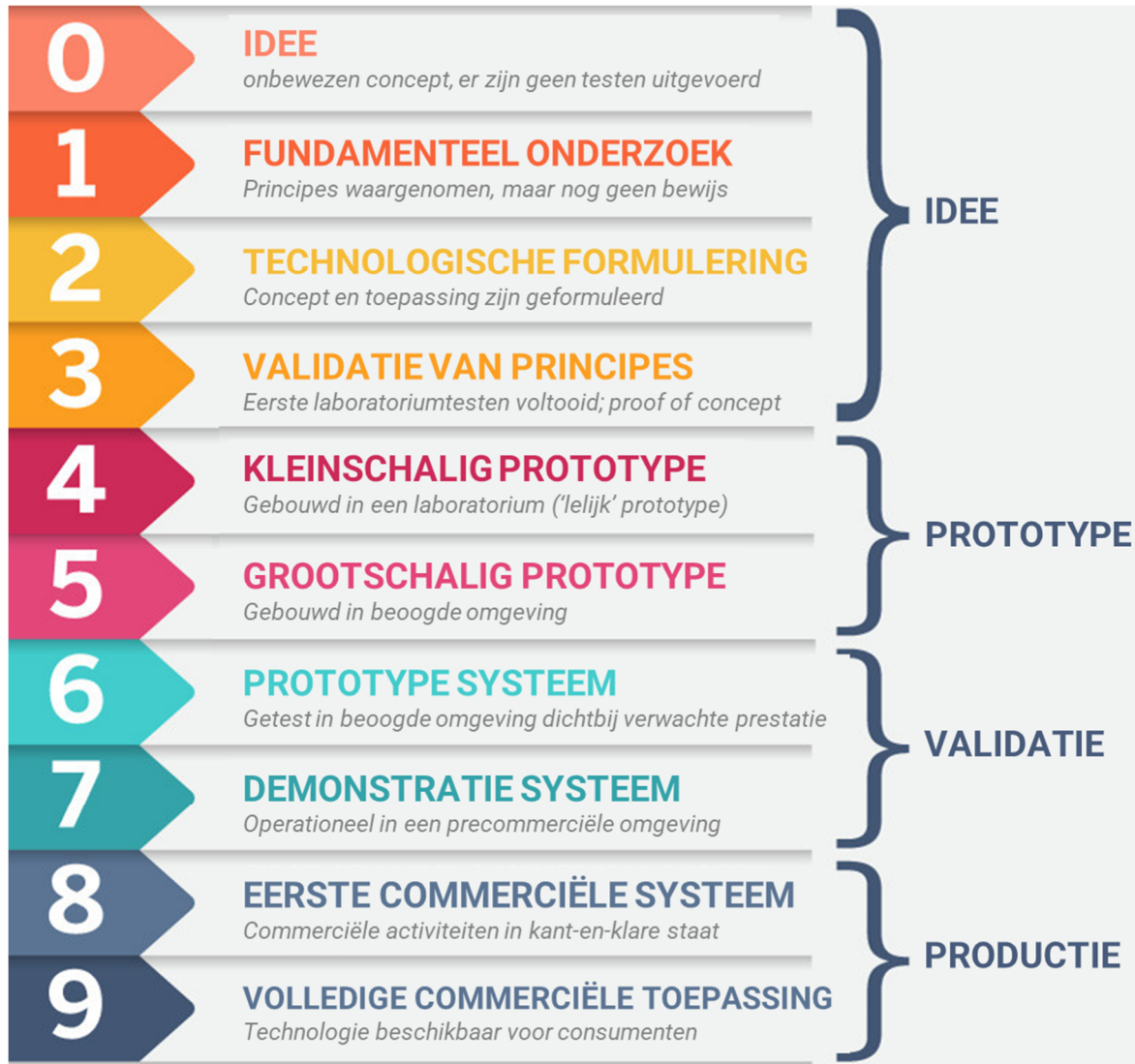
Het doel van deze *State of the art* is een overzicht te geven van bestaande en in ontwikkeling zijnde technologieën om beton meer circulair te maken. De technologieën worden onderverdeeld naargelang het aspect waarvan de circulariteit wordt aangesproken:

- 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 verminderd;
- De status van de technologie: de beschikbaarheid van betrouwbare onderzoeksresultaten, demoprojecten, pilootplanten, 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, het risico op uitloging, de 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 vermalen 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 1.
- 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 1.
- 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, milieuklasse en consistentieklasse (voor het behalen van een hoge consistentie met een lage w/c wordt dikwijls meer cement gebruikt) voor de

juiste toepassing. De cementshoeveelheid 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 § 5 – 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. calcië) 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)

2.2 De granulaten

Aan dit hoofdstuk wordt gewerkt



2.3 De hulpstoffen, fillers en vezels

Aan dit hoofdstuk wordt gewerkt



3 Beton als product

Aan dit hoofdstuk wordt gewerkt



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 3.0 – maart 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 3.0:

- A. Bindmiddelen

Niet opgenomen in versie 3.0:

- B. Granulaten
- C. Hulpstoffen & fillers
- D. Beton
- 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).

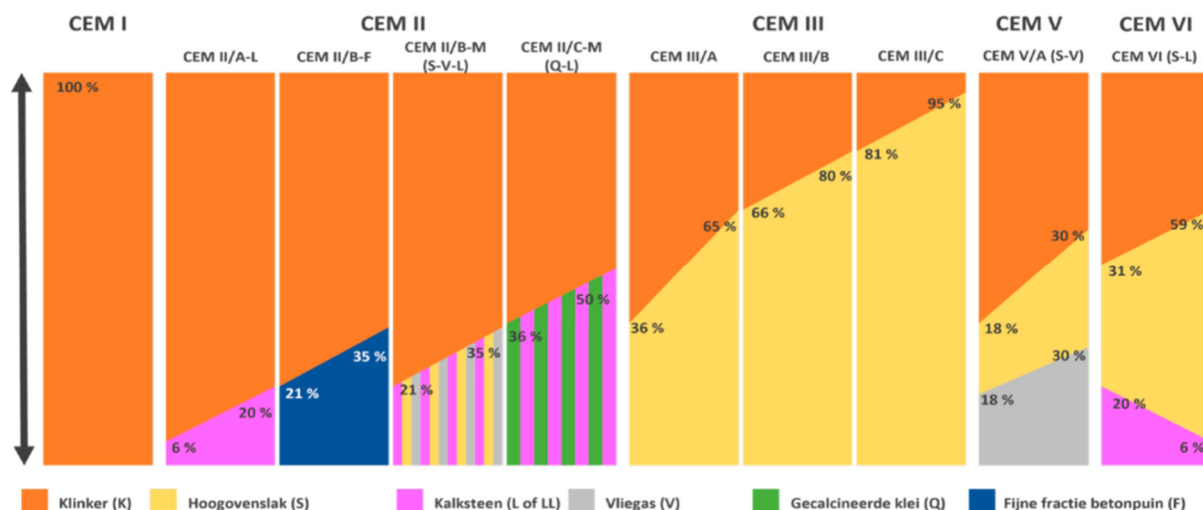
In Tabel 1 worden alle mogelijke cement-combinaties weergegeven volgens de normen NBN EN 197-1, NBN EN 197-5 en NBN EN 197-6 als ook een kleurencode gegeven voor cementsamenstellingen per norm. NBN EN 197-5 werd in 2021 gepubliceerd waarin 5 nieuwe cementen t.o.v. NBN EN 197-1 worden beschreven, weliswaar 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 2.

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 1: 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 2: 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 1 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 1 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 zoals hoogovencement, de duurzaamheid van beton verbeteren door de weerstand tegen chemische aantasting zoals sulfaataantasting 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 carbonatatie weerstand, 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 2 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 recycleren 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. Calcinatie 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.
- **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 veroorzaken². 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, ...).

² 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 steekool) 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 dalen^{Error! Bookmark not defined.}. Op heden wordt 2,2 miljoen ton hoogovenslak verwerkt in België, waarvan 55% wordt geproduceerd in België door ArcelorMittal Gent^{Error! Bookmark not defined.}. 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.

Omwillen 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 (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 aantreft³.

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.

³ Factsheet cement, Hoogovenslak, Febelcem, mei 2024

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^{4,5}, 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 cementproductie⁶.

⁴ Sousa V., Bogas J.A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. Journal of Cleaner Production, 306.

⁵ 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.

⁶ [Low-carbon cement from used concrete | Heidelberg Materials](#)

➤ Status van de technologie

In het Horizon Europe project Carbon4Minerals⁷ 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 hebben⁸.

→ 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).

⁷ <https://www.carbon4minerals.eu/>

⁸ <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, Ca(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 verlagen⁹. Gecalcineerde klei kan ook als grondstof voor AAM's gebruikt worden (zie Fiche A.10).

Kleihoudende (rest)stromen kunnen ook **mechanisch geactiveerd** worden door zeer fijne vermalen van de grondstoffen bij lage temperaturen (energetisch gemodificeerd cement)⁹. 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 reactiviteit⁹.

➤ Te behalen milieuwinsten

Tijdens het **calcineren** wordt de klei blootgesteld aan temperaturen van 600 tot 1000 °C, afhankelijk van de mineralogische samenstelling. De CO_2 -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 CO_2 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 resultaat¹⁰. Demonstratie in beton, verdere stappen richting het normenkader en replicatie naar andere klei-rijke reststromen worden uitgevoerd in ICON CLEI¹¹.

⁹ Snellings, Ruben, Prannoy Suraneni, and Jørgen Skibsted. "Future and emerging supplementary cementitious materials." *Cement and concrete research* 171 (2023): 107199

¹⁰ [BIND-AMOR: Reuse of Dredged Sediments as Supplementary Cementitious Materials | SpringerLink](#)

¹¹ [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 verbrandingsassen⁹.

→ **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 passen¹². 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 calcinatie¹³. 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).

¹² [Market trends for green cements - Cement Lime Gypsum](#)

¹³ 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 versnellen¹⁴.

¹⁴ [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)¹⁵.

→ **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 cementvervanger¹⁶. 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 toekomstige granulaat-fiche).

¹⁵ [Aurubis Bulgaria receives "European Technical Approval" for the incorporation of iron silicate in green cements](#)

¹⁶ 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 worden⁹. 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 besparen¹⁷. 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 cementvervanger¹⁸.

→ 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

¹⁷ 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.

¹⁸ [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 komt¹⁷. 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. Ook hun heterogeniteit is een mogelijk bijkomend probleem. Afhankelijk van de verbrandingswijze en de brandstof zullen de samenstelling en de eigenschappen van de verbrandingsassen variëren¹⁷. 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-vliegas). 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 portlandcement¹⁹.

➤ 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 voltooide 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 2030¹⁹.

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.

¹⁹ [Europe's green cement startups fight to lead the \\$380bn market | Sifted](#) ; [Our tech - Cemvision Re-ment](#)

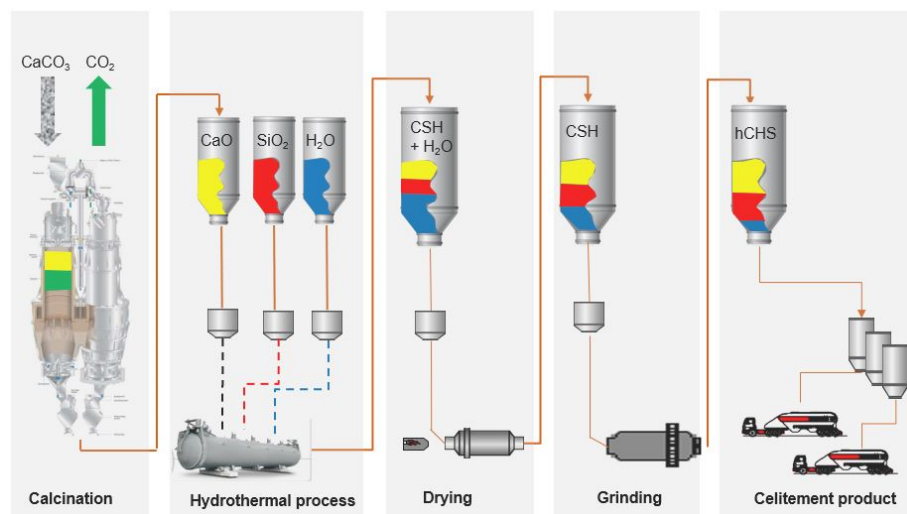
A.7. hCHS-cement

➤ 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*) geplaatst²⁰. 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/dag¹². 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.

²⁰ [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 kalksteen²¹. 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 (aliët-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^{22,23}. 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 tailings²⁴.

➤ 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 tegellijmen²⁵. 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 klinker²⁶. 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^{22,27}.

²¹ 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.

²² 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.

²³ Nie, Song, et al. "Analysis of theoretical carbon dioxide emissions from cement production: Methodology and application." *Journal of Cleaner Production* 334 (2022): 130270.

²⁴ 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.

²⁵ [CSA Cement Supplier China, Calcium Sulfoaluminate Cement Specialty Cement - Oreworld](#)

²⁶ [Belite calcium sulfoaluminate \(BCSA\) : GCCA](#)

²⁷ 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/jaar²⁸. CSA-cement wordt in de westerse wereld geproduceerd door Buzzi Unicem, Ciments Vicat en Holcim²¹.

→ **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 spoorwarsliggers, 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 $> 60\text{ °C}$ ²⁶. 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 cement²⁶.

➤ 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).

²⁸ [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 decarbonatie 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 1930²⁹. Door zijn trage uitharding is de toepassing vooral in nichemarkten waar de lage warmteontwikkeling die daarmee gepaard gaat nuttig is³⁰. 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 Carbon4Minerals³¹ 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

²⁹ [Reactive belite-rich Portland cement \(RBPC\) : GCCA](#)

³⁰ Cuesta, Ana, Andres Ayuela, and Miguel AG Aranda. "Belite cements and their activation." *Cement and Concrete Research* 140 (2021): 106319.

³¹ <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, gebaseerd op de alkali-aluminosilicaatchemie. Een aluminiumoxide-silicaatcomponent, de precursor, wordt hierbij gecombineerd met een alkali-bron, de activator²¹. De meest gebruikte alkali-bronnen zijn de hydroxiden of silicaten van natrium of kalium, meestal in waterige vorm. Alkalisch silicaten 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^{21,32}. 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-AAM³³.

In Vlaanderen zijn verschillende bedrijven AAM's aan het ontwikkelen, zoals Devagro (Eco2Polycon), Ebema³⁴ en Resourcefull³⁵. 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

³² Habert G, Ouellet-Plamondon C. Recent update on the environmental impact of geopolymers. RILEM Tech Lett 2016;1:17 – 23.

³³ [Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM | SpringerLink](#)

³⁴ [Geopolymeerbeton | CO2-arm beton | Ebema | LivingCity](#)

³⁵ [Low Carbon Concrete | ResourceFull | Eke \(Gent\) ; Devagro | afbraak- en grondwerken - sanering - betoncentrale](#)

bestaat er de CUR-aanbeveling 123:2018: “Betonwaren vervaardigd met geopolymer als bindmiddel” voor AAM-beton en zijn er enkele bedrijven al vergoed met het ontwikkelen van diverse AAM's, zoals SQAPE³⁶ met hun RAMAC³⁷ geopolymerbeton en VBI met het bindmiddel INVIE van de BTE groep⁴². SQAPE heeft pilootprojecten zoals een voorgespannen fietsbrug³⁸, een rijweg³⁹, gevel- en wandelementen⁴⁰ en brugpijlers⁴¹ en VBI heeft kanaalplaten gemaakt⁴². 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 uitdiepingsluit 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 carbonatieweerstand, 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 duurzaamheid²¹. De klassieke versnelde duurzaamheidstesten, beschreven in de betonnormen (bv. de weerstand tegen carbonatatie), zijn mogelijk niet van toepassing voor AAM-beton.

Toch zouden bepaalde AAM's kunnen leiden tot een 'beton' met betere eigenschappen dan klassiek beton op het vlak van bv. weerstand tegen zuren, vuurbestendigheid, 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 geopolymere dan weer wel op maat gemaakt worden voor selectieve immobilisatie of inkapseling van problematische afval zoals metaalrijke slakken.

³⁶ [SQAPE – Duurzaam alternatief voor cement](#)

³⁷ [Duurzaam en bestendig bouwen RAMAC is het alternatief](#)

³⁸ [Fietsbrug van geopolymerbeton N69 is 75% schoner dan traditioneel beton](#)

³⁹ [Rumst Recycling | betoncentrale – breekwerf – grondreiniging – top](#)

⁴⁰ [2024/3/20 - De eerste woningen met wanden en gevels in geopolymerbeton - lees verder... - BouwCirculair](#)

⁴¹ Leenders F, Pijlers Galgenveldbrug in geopolymerbeton: Aantonen gelijkwaardigheid van geopolymerbeton en de toepasbaarheid van Eurocode 2. 2023, CEMENT, 5.

⁴² [2024/3/20 - Kanaalplaat met 90% CO2-reductie op het bindmiddel - lees verder... - BouwCirculair](#)

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 vliegashouders 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 gecapteerd⁴³. 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 geproduceerd⁴⁴. De firma Vandersanden (Dilsen-Stokkem) gebruikt het Carbstone proces voor de productie van Pirrouet gevelstenen⁴⁵. 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 Prefer⁴⁶.

→ **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 corrosie⁴⁷. 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.

⁴³ Di Maria A. et al. (2020). Environmental assessment of CO₂ mineralisation for sustainable construction materials. *International Journal of Greenhouse Gas Control*.

⁴⁴ Carbstone | Een eindeloze cyclus van duurzaamheid en hergebruik.

⁴⁵ <https://www.vandersanden.com/nl-be/pirrouet>

⁴⁶ <https://www.prefer.be/nl/CO2ncrEAT>

⁴⁷ 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^{48,49} 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.

⁴⁸ [MgO-based binders - Lothenbach - 2023 - ce/papers - Wiley Online Library](#)

⁴⁹ 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 ENICON⁵⁰ 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.

⁵⁰ <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 afgeven⁵¹.

➤ 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.

⁵¹ 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 elektriciteit⁵². 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 aanpassingen⁵³.

➤ 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.

⁵² [New approach suggests path to emissions-free cement | MIT News | Massachusetts Institute of Technology](#)

⁵³ [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 carbonatie⁵⁴.

➤ 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 II-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).

⁵⁴ 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 product⁵⁵. 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^{56,57}. 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 muren⁵⁸. Biomason heeft reeds tegels gelegd in gebouwen en op bruggen.

In betonreparatie wordt MICP gebruikt om scheuren te dichten⁵⁶. 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^{55,59}. 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.

⁵⁵ [Microbial Induced Calcite Precipitation for Developing Sustainable Construction Materials | Frontiers Research Topic](#)

⁵⁶ 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.

⁵⁷ [Basilisk - Zelfhelend beton](#)

⁵⁸ <https://biomason.com/>

⁵⁹ 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 vergroten⁶⁰. 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 uitdaging⁵⁶. 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 gezondheid⁵⁶.

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 veroorzaken⁵⁶. 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.

⁶⁰ 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).