

TOEPASSING GERECYCLED CEMENT BELANGRIJK  
ONDERDEEL IN STRATEGIE CO<sub>2</sub>-REDUCTIE

# Binding CO<sub>2</sub> bij HERGEBRUIK cementsteen

In de discussie over het terugdringen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot in de bouw gaat veel aandacht uit naar cement. Niet zo vreemd, want wereldwijd draagt cement naar schatting circa 7% bij aan de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot. In Nederland is het beeld een stuk positiever; de CO<sub>2</sub>-uitstoot door cement bedraagt hier slechts 1,2%. Toch doet de cementindustrie er veel aan om de uitstoot verder omlaag te krijgen. Een van de recentste ontwikkelingen is het hergebruik van fijngemalen cementsteen uit bouw- en sloopafval, eventueel met een proces waarbij ook nog eens CO<sub>2</sub> kan worden opgenomen.

1 Cementfabriek LEILAC (Low Emissions Lime And Cement Industry) in Lixhe (België), waar een succesvol pilotproject is uitgevoerd met het afvangen van CO<sub>2</sub>

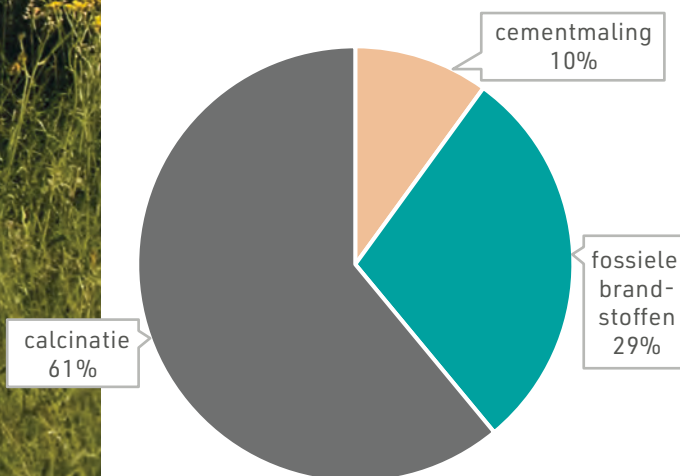


Er wordt gezocht naar andere materialen dan gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias, waarmee portlandcementklinker kan worden vervangen

Wereldwijd de meest toegepaste cementsoort is portlandcement, met als belangrijkste bestanddeel portlandcementklinker. Bij de productie hiervan komt relatief veel CO<sub>2</sub> vrij, met verschillende oorzaken (fig. 2). In de eerste plaats is energie nodig voor het verwarmen van de ovens waarin de klinker wordt gemaakt. De tweede, meest belangrijke oorzaak is dat er CO<sub>2</sub> vrijkomt bij de calcinatie van kalksteen.

### GEGRANULEERDE HOOGOVENSLEK EN POEDERKOOVLIEGAS

Een eerste, voor de hand liggende strategie is om de CO<sub>2</sub>-uitstoot door het energieverbruik bij de productie van cement te beperken. Op dat gebied vinden diverse ontwikkelingen plaats, waarbij wordt ingezet op het gebruik van alternatieve brandstoffen in plaats van fossiele en niet-hernieuwbare brandstoffen. Het terugdringen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot als gevolg van calcinatie is een complexer vraagstuk. In het chemische proces bij de productie van portlandcementklinker komt CO<sub>2</sub> vrij, dat is niet te vermijden. Een mogelijkheid om dat deel van de CO<sub>2</sub>-uitstoot bij de cementproductie te verminderen, is het verlagen van het aandeel portlandcementklinker in cement. Dit kan door andere grondstoffen te gebruiken, die door portlandcementklinker worden geactiveerd, ook wel *Supplementary Cementitious Materials* (SCM's) genoemd. De activatie van alternatieve grondstoffen vindt plaats dankzij de hoge alkaliteit die ontstaat dankzij de calciumhydroxide (CH), samen met calciumhydraatsilicaat (CSH) het belangrijkste reactieproduct van de calciumsilicaten uit de portlandcementklinker met water.



2 Oorzaak CO<sub>2</sub>-emissies cement, bron: Heidelberg Materials België/Nederland

De bekendste alternatieve grondstof voor cement is gegranuleerde hoogovenslak, een latent-hydraulisch product dat vrijkomt bij de productie van ruwijzer. De CO<sub>2</sub>-footprint van het op slak gebaseerde hoogovencement (CEM III/A of CEM III/B) is veel lager dan portlandcement (fig. 3).

Een andere vervanger voor klinker is poederkoolvliegias, dat vrijkomt uit kolengestookte elektriciteitscentrales. Daarmee wordt portlandvliegiascement (CEM II/A-V of CEM II/B-V) gemaakt. In Nederland zijn er momenteel echter nauwelijks nog kolengestookte elektriciteitscentrales actief. In centrales die wel nog produceren, wordt een deel van de kolen vervangen door alternatieven zoals houtpellets en biomassa. Dat levert biokoolvliegias op, die niet is toegelaten en veel minder geschikt is als grondstof in cement of als reactieve vulstof in beton. Toepassing van alternatieve grondstoffen voor cement is verre van nieuw. Hoogovencement (en tot voor kort portlandvliegiascement) wordt in Nederland al decennialang op grote schaal toegepast. Hoogovencement is zelfs veruit het meest toegepaste bindmiddel (fig. 4). Dat is ook de reden dat de CO<sub>2</sub>-uitstoot bij de cementproductie in ons land aanzienlijk lager is dan wereldwijd.

#### ALTERNATIEVE BINDMIDDELEN

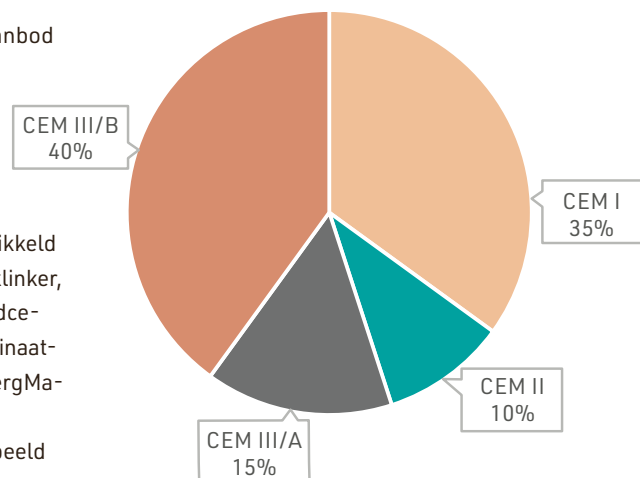
Naast gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias wordt gezocht naar andere materialen (SCM's) waarmee portlandcementklinker kan worden vervangen. Dit is

nodig omdat de verwachting is dat het aanbod gegranuleerde hoogovenslak de komende jaren sterk afneemt. Bekende alternatieven zijn kalksteen, natuurlijke puzzolanen en gecalcineerde klei.

Ook worden nieuwe cementsoorten ontwikkeld met een alternatief voor portlandcementklinker, met een lagere CO<sub>2</sub>-footprint dan portlandcement. Voorbeelden zijn calciumsulfoalumiinaatcement (CSA), belietcement (bij HeidelbergMaterials heet een combinatie van beide Ternocem), wollastonietcement (bijvoorbeeld Solidia van Holcim) en Celitement.

Een andere ontwikkeling zijn de alkalisch geactiveerde bindmiddelsystemen, ook wel geopolymeren genoemd. Geopolymeerbeton, bestaat in de basis uit dezelfde grondstoffen als traditioneel beton, namelijk een bindmiddel, toeslagmateriaal (zand en grind), water en eventuele hulp- en vulstoffen. Het bindmiddel wordt echter niet geactiveerd door portlandcementklinker, maar door sterk alkalische stoffen (zogenoemde activatoren, zoals natriumsulfaat, natriumhydroxide en waterglas (natriumsilicaat)). De activator wordt toegepast op bestaande SCM's, met name gegranuleerde hoogovenslak. Maar andere SCM's (zoals poederkoolvliegias, natuurlijke puzzolanen en gecalcineerde klei) kunnen ook alkalisch worden geactiveerd, al dan niet in combinatie met hoogovenslak. De alkalisch te activeren materialen worden *precursors* genoemd.

Voor het verder beperken van de CO<sub>2</sub>-footprint



4 Gebruik cement in Nederland

van beton is het belangrijk dat de schaarse hoogovenslak wordt vervangen door andere precursors. Hoogovenslak wordt in Nederland immers al grotendeels toegepast in hoogovencement, waardoor er geen milieuwinst is bij het gebruik in geopolymeerbeton. Er zijn ontwikkelingen om geopolymeerbeton ook op basis van andere precursors te produceren, zoals gecalcineerde klei en natuurlijke puzzolanen (en eventuele combinaties met elkaar), die al zijn toegelaten volgens de Europese cementnorm EN 197-1. Daarnaast wordt er ook gewerkt aan de ontwikkeling van nieuwe SCM's, zoals staatslak, koperslak, bauxietresiduen, AEC-vulstoffen, historische vliegassen en biokoolvliegassen. Een andere ontwikkeling is de toepassing van een combinatie van alkalische activatie van precursors met een klein aandeel portlandcementklinker, zogenoemde hybride systemen (zie hiervoor het artikel 'Balans tussen snelheid en CO<sub>2</sub>', elders in dit nummer).

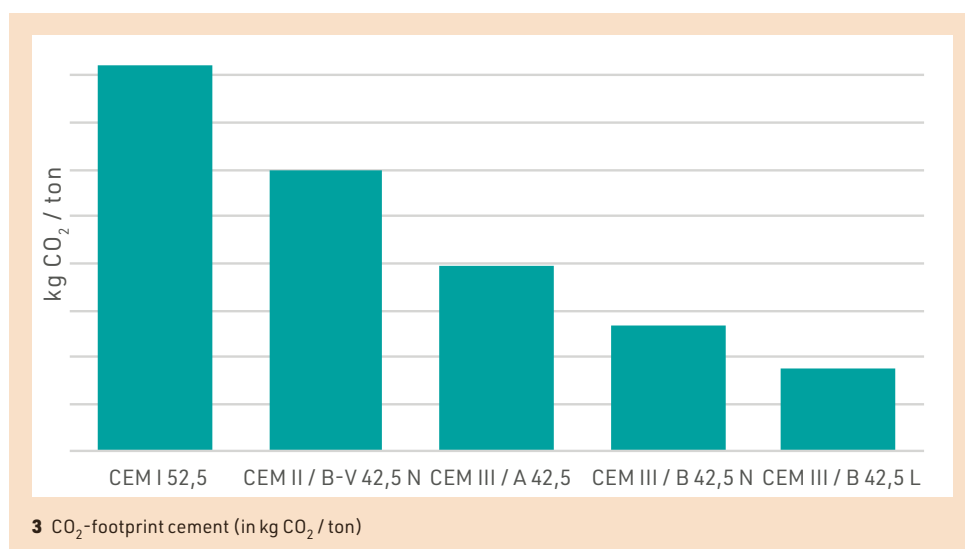
Al deze cementsoorten en alternatieven zijn nog in ontwikkeling en vragen meer onderzoek. Vooral nog is er niet één alternatief dat qua beschikbaarheid en kwaliteit portlandcement (klinker) en gegranuleerde hoogovenslak volledig kan vervangen. De alternatieve bindmiddelen worden in dit artikel verder niet in detail beschreven. Meer hierover is te vinden in eerder verschenen *Betoniek*-artikelen (zie kader 'Meer lezen').

#### MEER LEZEN

Meet over alternatieve cementsoorten staan in de artikelen:

- CO<sub>2</sub>-reductie: opties voor cement
- Ontwikkelingen grondstoffen in beton

## Door carbonatatie worden RCF's gemineraliseerd en krijgen ze puzzolane eigenschappen



3 CO<sub>2</sub>-footprint cement (in kg CO<sub>2</sub> / ton)



5 Van links naar rechts: portlandcement, gemalen gegraneerde hoogovenslak, kalksteenmeel, poederkoolvliegias (op de achtergrond een betonprisma)

### HERGEBRUIK 'FINES'

Bij het slopen en breken van zuiver beton uit bestaande constructies komt materiaal vrij dat goed te hergebruiken is. Er is al veel ervaring met het hergebruik van het grove en fijne toeslagmateriaal bij de productie van nieuw beton. Dankzij de ontwikkeling van innovatieve, extra selectieve breektechnieken, wordt de kwaliteit van die gerecyclede producten, zoals betongranulaat, alleen maar beter. Zo is het bij die technieken mogelijk het aan het toeslagmateriaal aangehechte cementsteen grotendeels te verwijderen, wat de kwaliteit van het toeslagmateriaal bevordert. Hierbij is het de uitdaging net voldoende kracht op het al gebroken beton los te laten, zodat de cementsteen bezwijkt en de toeslagmateriaaldeeltjes in tact worden gelaten.

Bij dat proces komt het verwijderde cementsteen als fijn materiaal vrij. Afhankelijk van de scheidingstechniek zal deze fijne fractie voor een groot deel uit cementsteen (gehydrateerd cement) bestaan, met daarnaast mogelijk ongehydrateerd cement en fijne delen toeslagmateriaal (silica).

In het verleden wist men niet zo goed wat men met dit fijne materiaal aan moest, maar dankzij recente ontwikkelingen is het mogelijk het gerecyclede cementsteen (*Recycled Concrete Paste*, RCP) te gebruiken als zogenoemde *Recycled Concrete Fines* (RCF) bij de productie van portlandcementklinker als CO<sub>2</sub>-vrije grondstof. Hierbij hoeft er vanwege het in de cementsteen aanwezige calcium minder kalksteen te worden gebrand en vindt er dus een reductie van de CO<sub>2</sub>-emissie plaats. Ook kunnen deze *finest* direct worden gebruikt als SCM in cement, al dan niet na volledige carbonatatie (zie verderop).

### Regelgeving

Voor de toepassing van RCF in cement is sinds kort nieuwe regelgeving beschikbaar. Zo is sinds 1 juni 2023 de EN 197-6 – *Cement with recycled building materials* van kracht. Deze norm is opgezet door CEN/TC 51, de commissie verantwoordelijk voor Europese regelgeving op het gebied van cement en bouwkalk. Deze commissie heeft de norm opgesteld op basis van een technisch dossier, gemaakt door de Europese brancheorganisatie voor cement: CEMBU-REAU. CEMBU-REAU heeft een werkgroep geformeerd, omdat vanuit de leden (industrie) de wens is geuit ook circulaire materialen te hergebruiken in cement en beton. Het dossier bevat ervaringen van de toepassing van RCF uit Zwitserland, Frankrijk, Duitsland en Nederland. Nu EN 197-6 beschikbaar is, zal deze ook worden opgenomen in de nationale annex van EN 206 (de Europese betonnorm), NEN 8005. Cement met RCF als bestanddeel kan echter pas worden toegepast in met name constructief beton, wanneer minimaal gelijkwaardigheid is aangetoond volgens CROW-CUR Aanbeveling 48. In de Europese norm heeft RCF de afkorting F (RCF (F)) gekregen.

RCF kan mogelijk ook inzetbaar zijn als inerte (type I) of reactieve vulstof (type II) rechtstreeks in beton. EN 197-6 beschrijft een tweetal cementtypen CEM II en CEM VI die in combinatie met de andere SCM's uit de cementnorm kunnen worden samengesteld. EN 197-6 zou een basis kunnen zijn voor uitbreiding van de vulstofrichtlijnen voor toepassing in beton.

### CARBONATATIE

Als cementsteen is verhard, start een fase waarbij met name calciumhydroxide kan car-

bonateren. Dit is een natuurlijk proces waarbij CO<sub>2</sub> wordt gebonden: CO<sub>2</sub> reageert met calciumhydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>) tot calciumcarbonaat (CaCO<sub>3</sub>). Het is in feite een omgekeerde reactie van de eerdergenoemde calcinatie. Dit is het mechanisme dat leidt tot een verlaging van de pH in het poriesysteem van beton, waarbij in geval van gewapend beton de corrosiebescherming van de wapening vermindert. Het RCF dat vrijkomt bij het breken kan met CO<sub>2</sub> reageren, waarbij naast calciumcarbonaat door carbonatatie van de CSH, bij hoge druk en temperatuur een silica-aluminiumgel ontstaat die puzzolane eigenschappen heeft. Dus door carbonatatie van de RCF's worden deze gemineraliseerd en krijgen puzzolane eigenschappen. Hier wordt ook wel gesproken van [c]RCF. Dit materiaal kan als bestanddeel worden toegepast in cement.

### GEFORCEERDE CARBONATATIE

Er zijn verschillende aspecten die invloed hebben op de carbonatatie van RCF. Zo is vochtigheid van belang; het kan droog, semi-nat of nat plaatsvinden (foto 6). Daarnaast zijn ook temperatuur en druk van invloed op de mate en de snelheid van carbonatatie. Uit recent onderzoek is gebleken dat ook fijne silicadeeltjes uit het toeslagmateriaal bij hoge temperatuur en druk puzzolaan kunnen worden. Behandeling bij hoge druk en met stoom wordt ook wel *autoclaveren* genoemd en is ook bekend als techniek om hydratatiereacties en sterkteontwikkeling in beton te versnellen. Omdat de carbonatatie van RCF interessant is bij het hergebruik, wordt gekeken hoe dit proces kan worden geoptimaliseerd. Hoewel de carbonatatiereactie spontaan verloopt en exotherm is (geen energie nodig), is er wel energie nodig om dit proces op industriële schaal effectief uit te voeren, bijvoorbeeld in een werfbed. Er wordt aangenomen dat er 10 kWh elektriciteit nodig is om 1 ton RCF te fluidiseren gedurende 30 minuten, ongeacht de chemische samenstelling. Omdat de RCF al fijn is, is er geen verdere maalenergie nodig. Carbonatatie op industriële schaal wordt ook wel geforceerde carbonatatie genoemd. In het ideale plaatje kan bij de carbonatatie van RCF gebruik worden gemaakt van CO<sub>2</sub> die vrijkomt bij de productie van portlandcementklinker. Bij Heidelberg Materials is deze techniek al tweemaal op industriële schaal getest. In Brevik (Noorwegen) is dit semi-droog gebeurd en in

6 Labopstelling carbonatatie cementsteen



materiaal zal in deze fabriek als bestanddeel in cement worden toegepast. De hoeveelheid CO<sub>2</sub> die kan worden gebonden is sterk afhankelijk van de scheidingstechniek, ofwel het aandeel cementsteen in de RCF. Deze factor is dominant ten opzichte van de andere genoemde factoren vocht, druk en temperatuur. Verwacht wordt dat een RCF met een hoog aandeel cementsteen tot 200 kg aan CO<sub>2</sub> per ton aan materiaal kan opnemen.

**EIGENSCHAPPEN GECARBONATEERD RCF**

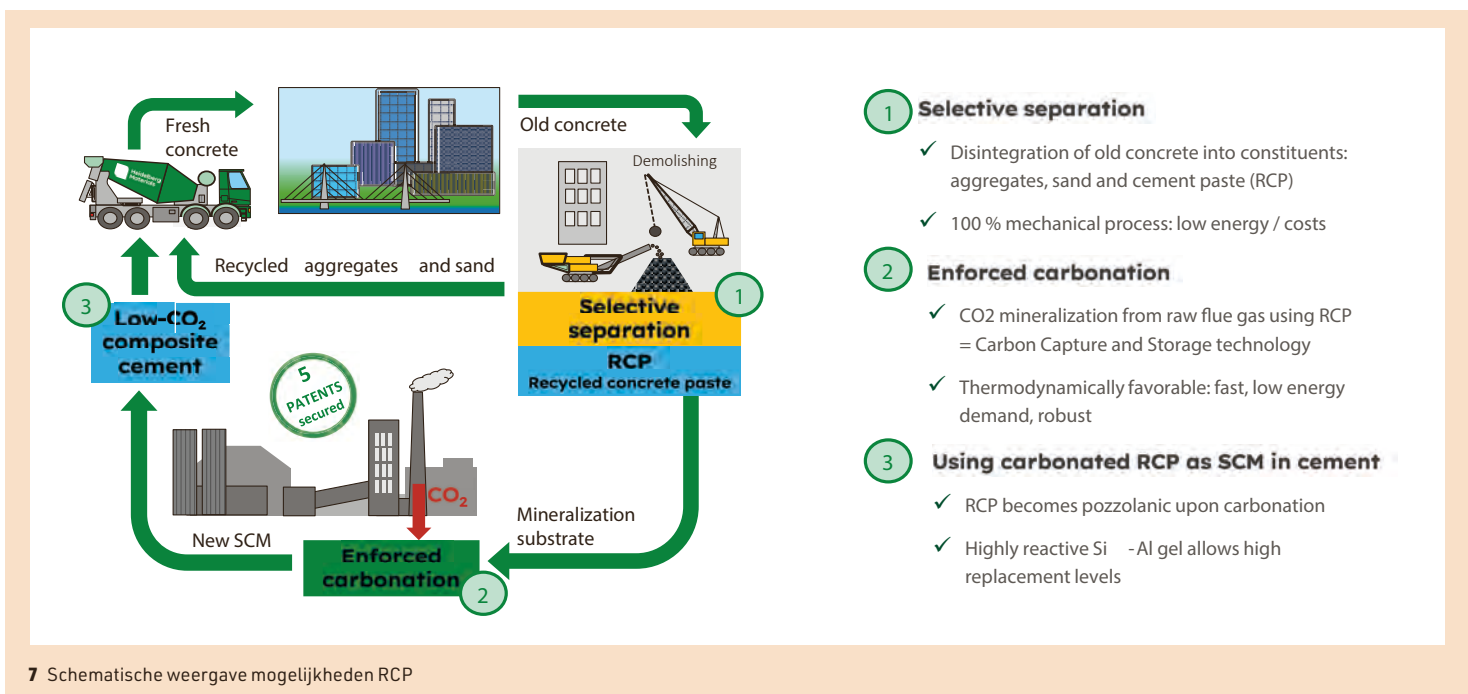
Gecarbonateerde betonfines ([c]RCF) zijn een zeer reactieve puzzolaan met een hoog specifiek oppervlak. Uit onderzoek is gebleken dat, in vergelijking met andere puzzolanen, [c]RCF extreem snel kan reageren, sneller dan bijvoorbeeld poederkoolvliegas (fig. 8). In vergelijking met kalksteen zijn positieve resultaten bekend bij 40% vervanging van portlandcement door [c]RCF (fig. 9). Op laboratoriumschaal is al onderzoek gedaan met 60% [c]RCF resulterend in een goed presterend cement in de 32,5-klasse.

**AFVANGEN, GEBRUIKEN EN OPSLAAN CO<sub>2</sub>**

Bij het geforceerd carbonateren van RCF snijdt het 'CO<sub>2</sub>-mes' aan twee kanten. Enerzijds wordt gerecycled cement geschikt gemaakt voor toepassing in nieuw cement, wat het gebruik van de relatief CO<sub>2</sub>-onvriendelijke portlandcementklinker beperkt. Anderzijds wordt CO<sub>2</sub> dat vrijkomt bij de productie van cement afgevangen en gebonden.

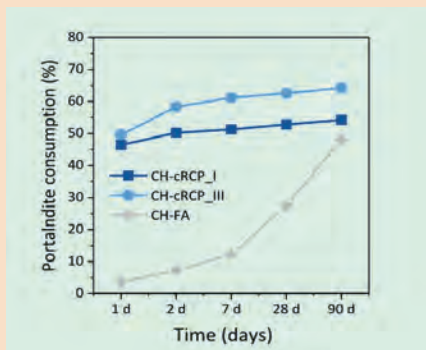
Ribblesdale (Groot-Brittannië) onder natte omstandigheden. In deze testen is het CO<sub>2</sub>-houdend gas van de oven direct gebruikt. Hierbij is vastgesteld dat het proces robuust is en efficiënt qua opname van CO<sub>2</sub>. Momenteel wordt in een fabriek in Polen een selectieve recycle-installatie voor beton geïnstalleerd, waarbij een

koppeling wordt gemaakt met de gassen die vrijkomen uit de klinkeroven. De materialen uit de recycle-installatie, met name de RCF, zullen in een soort reactor in contact worden gebracht met de afgassen die CO<sub>2</sub> bevatten en waarbij de RCF zal carbonateren. Deze installatie zal in 2024 operationeel zijn en het gecarbonateerde



- 1 **Selective separation**
  - ✓ Disintegration of old concrete into constituents: aggregates, sand and cement paste (RCP)
  - ✓ 100 % mechanical process: low energy / costs
- 2 **Enforced carbonation**
  - ✓ CO<sub>2</sub> mineralization from raw flue gas using RCP = Carbon Capture and Storage technology
  - ✓ Thermodynamically favorable: fast, low energy demand, robust
- 3 **Using carbonated RCP as SCM in cement**
  - ✓ RCP becomes pozzolanic upon carbonation
  - ✓ Highly reactive Si -Al allows high replacement levels

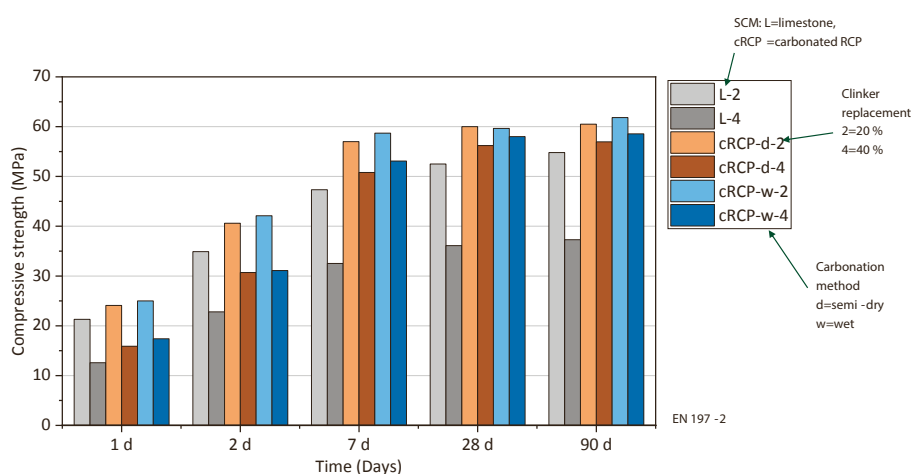
7 Schematische weergave mogelijkheden RCP



8 Gecarbonateerde RCF reageert sneller dan andere puzzolanen

Dat laatste past in een van de belangrijke strategieën van Heidelberg Materials: het afvangen, gebruiken en opslaan van CO<sub>2</sub>. Dit is beter bekend onder de Engelse term *Carbon Capture, Utilisation and Storage*, ofwel *CCUS*. De overtuiging is dat de doelstelling – het reduceren van de CO<sub>2</sub>-footprint tot 0 in 2050 – alleen mogelijk is door ook op deze strategie in te zetten. Het gebruik van CO<sub>2</sub> bij de mineralisatie van cementsteen is een van de voorbeelden van *utilisation*. Daar zijn diverse andere manieren voor. Zo kan de afgevangen CO<sub>2</sub> worden gebruikt bij de productie van brandstoffen en het kweken van algen. Recent heeft Heidelberg Materials een contract afgesloten met Linde voor de verkoop van afgevangen CO<sub>2</sub> uit de cementfabriek in Lengfurt voor toepassing in de chemische en voedingsindustrie. Ook kan CO<sub>2</sub> worden gebruikt voor zogenoemde CO<sub>2</sub>-verharding. Hiervan is sprake bij het al eerdergenoemde wollastoniet. Maar ook andere materialen kunnen met CO<sub>2</sub> verharden. Staal- en roestvaststaalslakken kunnen als fijngemalen product worden gebruikt bij de productie van bouwblokken, waarbij CO<sub>2</sub>-verharding plaatsvindt onder de juiste omstandigheden (druk, vocht en temperatuur). Een voorbeeld hiervan is Carbstone.

Als CO<sub>2</sub> niet wordt gebruikt kan het worden opgeslagen. Deze *storage* kan bijvoorbeeld in oude gasvelden, maar wellicht ook in mineralen (zoals in olivijn). 's Werelds eerste groot-schalige *carbon capture and storage*-project bij een cementfabriek komt te staan in Brevik in Noorwegen, waar jaarlijks 400.000 ton CO<sub>2</sub> zal worden afgevangen (foto 10). Die techniek wordt inmiddels op meerdere plekken toegepast, zoals bij een cementfabriek in Mitchell in de Verenigde Staten, waar jaarlijks 2 miljoen CO<sub>2</sub> wordt afgevangen en opgeslagen.



M. Zajac, Effect of semi-dry carbonated paste on cement hydration and performance. Submitted to Cement and Concrete Research

9 Gecarbonateerde betonfines presteren goed als SCM bij 40% vervanging van portlandcementklinker in vergelijking met kalksteen

## DOELSTELLINGEN

Samenvattend zijn er drie pijlers in de strategie van Heidelberg Materials om de CO<sub>2</sub>-uitstoot te verminderen:

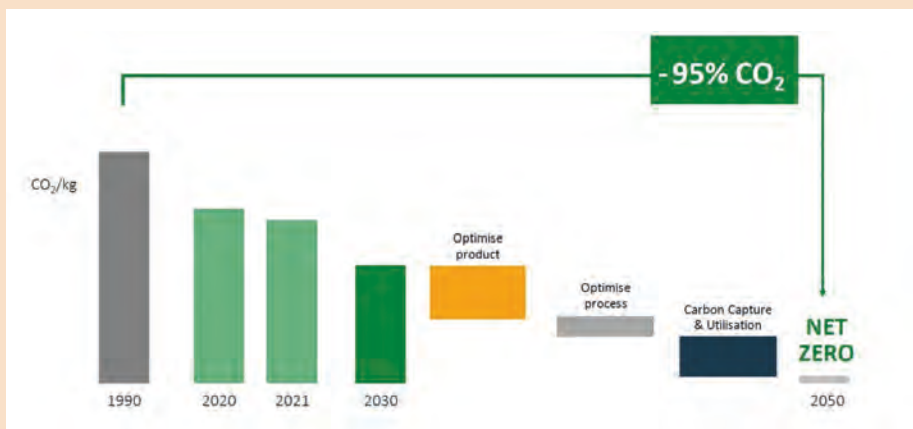
- 1 het ontwikkelen van alternatieve innovatieve bindmiddelen met andere SCM's, waarbij circulariteit (van met name beton) een van de speerpunten is;

- 2 het gebruik van alternatieve brandstoffen bij de productie van portlandcementklinker;
- 3 *Carbon Capture, Utilisation and Storage*.

Met deze drie pijlers is Heidelberg op weg naar een reductie van CO<sub>2</sub>-emissies (wereldwijd) met 47% in 2030 en naar 'net zero' in 2050 (fig. 11).



10 Cementfabriek in Brevik, de eerste grootschalige cementfabriek waar CO<sub>2</sub>-afvangen-opslag plaatsvindt



11 Verlaging van CO<sub>2</sub>-footprint van cement tot 2050 door alternatieve bindmiddelen (optimise products), alternatieve brandstoffen (optimise process) en Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS)