

Alternatieve en eventueel duurzamere bouwmaterialen en/of componenten voor cement



Alternatieve en eventueel duurzamere bouwmaterialen en/of componenten voor cement

Auteur(s)

Arjan Wijdeveld

Kim Gommans

Alternatieve en eventueel duurzamere bouwmaterialen en/of componenten voor cement

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Penny Pipilikaki (GPO)
Referenties	RWS-2023/32280
Trefwoorden	alternatieve binders, cement, staalslakken

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	02-05-2024
Projectnummer	11209008-002
Document ID	11209008-002-BGS-0006
Pagina's	76
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Arjan Wijdeveld	
	Kim Gommans	

Samenvatting

De transitie naar een netto zero CO₂ emissie-industrie in 2050 in Europa brengt een aantal verschuivingen met zich mee in productieprocessen. Eén van de processen die zal veranderen is het produceren van cement en beton. Dit heeft niet alleen te maken met veranderingen binnen de sector zelf, maar ook door de sterke samenhang die de sector kent met de staalindustrie. Het aanbod van vanuit de staalindustrie vrijkomende hoogovenslakken zal door de netto zero CO₂ emissie transitie in 2050 in de staalindustrie verminderen. In dit rapport wordt ingegaan op de mogelijke alternatieve binders als vervanging van hoogovenstaalslakken voor de productie van binders voor cement en beton. Hierbij wordt gebruik gemaakt van bestaande literatuur, en wordt als basis het format gebruikt van de door SGS-intron uitgevoerde verkennende studie 'Ontwikkelingen betreffende hoofdbestanddelen voor klinkergebaseerde cementen en geopolymeren' (2020). Aangevuld met literatuuronderzoek en interviews met diverse partijen die ervaring hebben met cement en beton innovaties, schetst Deltares in dit rapport een beeld van wat op nationale schaal in 2050 mogelijk is qua gebruik van (alternatieve) binders voor het produceren van cement en beton.

Door het gebruik van alternatieve binders in cement en beton ten opzichte van ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) kan de hoeveelheid GGBFS ruwweg halveren. De alternatieve binders worden ingedeeld in de groepen 'alternatieve cementen', 'alternatieve supplementaire cementeuze materialen' en 'geopolymeren/alkali geactiveerde bindmiddelen'. De schattingen zijn dat de som van de alternatieven circa 1.763.0000 ton bedraagt. Niet elk alternatief voor binders is even geschikt, zowel qua materiaaleigenschappen als qua eigenschappen zoals uithardingstijd, heterogeniteit of emissies bij recycling. Bovendien is de ontwikkelingsfase niet bij alle alternatieven voldoende om op grote schaal toegepast te worden. Nieuw in dit rapport is de inventarisatie van de mogelijkheid om illiet kleien in Nederland in te zetten als alternatieve binder. Met een potentieel winbaar volume van 300.000 ton per jaar zou dit een bijdrage van een kleine 10% kunnen opleveren aan de jaarlijkse behoefte aan binders.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doelstellingen	7
1.3	Gebruikte informatie	7
1.4	Afkadering	8
1.5	Opzet rapport	8
2	Huidige situatie	10
2.1	CEM I-V in Nederland	10
2.2	Europa en de wereld	11
2.2.1	Momentopname 2023 met betrekking tot CO ₂ reductie doelstelling cementindustrie	11
2.2.2	Trends in de wereldwijde handel in cement-gerelateerde basisproducten (binders)	13
2.2.3	Wereldwijde markt voor alternatieve binders	17
2.2.4	Samenvattend	19
3	Alternatieve cementen	21
3.1	Belietrijk portlandcement	21
3.2	Calciumsulfoaluminaatcement (CSA) en Beliet-calciumsulfoaluminaat-ternesiet (BCT)	21
3.3	Kalksteen-gecalcineerde klei-cement (LC ³)	22
3.4	Overige alternatieven	23
4	Alternatieve supplementaire cementeuze materialen (SCMs)	24
4.1	Biomassa vliegas	24
4.2	Bodemas	24
4.3	Kalksteen	25
4.4	Glasafval	26
4.5	Gecalcineerde klei	27
4.6	Andere alternatieven	27
5	Geopolymeren/alkali-geactiveerde bindmiddelen	28
5.1	Huidige markt	28
5.1.1	Kaoliniet klei	29
6	Toekomstige ontwikkelingen	31
6.1	Productie staalslakken	31
6.2	Beschikbaarheid materialen	33
6.2.1	Poedervliegas	33

6.2.2	Gegranuleerde hoogovenslak (GGBFS)	33
6.2.2.1	De impact van de CO ₂ emissie prijs op de net zero CO ₂ by 2050 ambitie voor staal en cement.	33
6.2.2.2	Impact transitie staalindustrie op de cementproductie in Nederland	35
6.2.3	Kalksteen	35
6.2.4	Glasafval	36
6.2.5	AEC bodemas	36
6.2.6	Gecalcineerde klei	36
6.2.7	Business test case winning illiet uit sediment	39
6.3	Normen/toetskaders	40
6.3.1	Categorie 1: Efficiëntie in ontwerp en constructie (22% CO ₂ reductie)	40
6.3.2	Categorie 2: Efficiëntie in betonproductie (11% CO ₂ reductie)	41
6.3.3	Categorie 3: Besparingen in cement en binders (9% CO ₂ reductie)	42
6.3.4	Categorie 4: besparingen in klinker productie (11% reductie)	44
6.3.5	Categorie 5: Het afvangen, gebruiken en opslaan van CO ₂ (36% reductie)	45
6.3.6	Categorie 6: De-carbonisatie van elektriciteit (5% reductie)	45
6.3.7	Categorie 7: CO ₂ opname (6% reductie)	45
7	Conclusies en aanbevelingen	47
7.1	Conclusie	47
7.2	Aanbevelingen	48
8	Literatuurlijst	49
9	Bijlagen	52
	TNO Geological Survey of the Netherlands	57
	TU Delft, Vakgroep ontwikkeling van duurzaam beton	60
	TCKI, Stichting Technisch Centrum voor de Keramische Industrie	64
	Rio Tinto, global mining group	67
	Producent cement bouwmaterialen	71

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De opdracht betreft het uitvoeren van een bureaustudie naar beschikbaarheid van alternatieve grondstoffen voor cementbinders op basis van het eerder uitgevoerde verkennende onderzoek van SGS-intron (Muehleisen, 2020) en de Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD, 2019). Er wordt in kaart gebracht welke hoeveelheden van potentiële binders nu beschikbaar zijn en wat de verwachting is naar 2030, 2050 en verder. De jaartallen 2030 en 2050 houden mede verband met de doelstelling van het rijk, en dus ook Rijkswaterstaat, om in 2030 circulair te werken als een belangrijke tussenstap naar het circulair zijn in 2050.

Het hydraulische bindmiddel gegranuleerde staalslak, dat wordt geproduceerd in cokesgestookte hoogovens (GGBFS), is ook een belangrijke grondstof voor de productie van klinkercement. Door de transitie van de staalindustrie naar een lagere CO₂-uitstoot (Net Zero Emissions in 2050 (NZE)), zal de samenstelling ervan veranderen. Om deze CO₂ neutrale ambitie voor zowel de cementindustrie als ook de staalproductie te realiseren is een sectorkoppeling nodig. Hierbij dient gekeken te worden naar de impact van de afname van GGBFS slakken en naar alternatieve hydraulische binders voor beton.

1.2 Doelstellingen

Het doel van deze opdracht is te verkennen welk perspectief Nederland heeft om in 2050 met eigen middelen op een duurzame manier bindmiddel voor cement, of alternatieven voor cement, te produceren.

Hierbij staan de volgende vragen centraal:

- Welke hoofdstromen voor cement klinker en eventuele alternatieven zijn er?
- In welke hoeveelheden zijn deze alternatieven beschikbaar?
- Welke alternatieven hebben vanuit duurzaamheid potentie (een combinatie van beschikbaarheid, milieu-impact en de impact op de CO₂ emissie van cement)?

1.3 Gebruikte informatie

Het rapport is gebaseerd op de volgende informatiebronnen:

- Het rapport “Ontwikkelingen betreffende hoofdbestanddelen voor klinkergebaseerde cementen en geopolymeren” (Muehleisen, 2020).
- Het OECD rapport “Global material resources outlook to 2060, Economic drivers and environmental consequences” (OECD, 2019).
- Wetenschappelijke literatuurscan (zie literatuurlijst) naar trends in alternatieve binders voor cement en beton in relatie tot trends in voor de productie van de binders relevante industrieën (staalproductie, kalksteenwinning, verbrandingsinstallaties, minerale delfstofwinning, recycling van grondstoffen).
- Interviews met diverse partijen met een verschillende achtergrond met betrekking tot potentiële alternatieve binders voor cement.
- De Geologische kaart van Nederland en de daaraan gelinkte bronnen over het voorkomen van minerale afzettingen (TNO Geologische Dienst Nederland (GDN)).

1.4 Afkadering

De focus in dit rapport ligt op materialen die dienen als binders voor constructief cement met druksterktes (UCS; in beton) hoger dan 5 MPa. Versterkt sediment (b.v. met vlokkuant als bindmiddel) wordt niet beschouwd, omdat het niet leidt tot voldoende hoge druksterktes.

De toepassing van toeslagstoffen zonder puzzolane eigenschappen¹ (niet reactieve fillers) wordt niet beschouwd. Dat wil zeggen dat studies naar het deels vervangen van zand of grind in beton door sediment niet beschouwd worden. De kleifracie in sediment, met vaak zwakke puzzolane eigenschappen, wordt wel beschouwd.

De ontwikkeling van alternatieve hydraulische binders voor constructief cement is mede afhankelijk van ontwikkelingen in andere sectoren (die de grondstof voor de binders produceren) met als doel om in 2050 CO₂ neutraal te zijn. Er wordt gekeken naar de anno 2023 bekende trends en de impact die dit heeft op de productie van cement.

Het rapport gaat uit van bestaande kennis. Veel alternatieven zijn nog in ontwikkeling en soms gaan studies slechts in op onderdelen van een integrale afweging (beschikbaarheid, milieu impact en de impact op de CO₂ emissie van cement).

Er wordt in een SMART analyse (Tabelvorm) kwalitatief gekeken naar voor- en nadelen van alternatieve binders, deze analyse is geen vervanging van b.v. een volwaardige levenscyclusanalyse (LCA) of milieukostenindicator (MKI).

De vraag of alternatieve binders voor constructief cement milieuhygiënisch geschikt zijn wordt momenteel beoordeeld in de 1^e levensfase van het product (uitloging uit een vormgegeven bouwstof). Om cement en beton duurzaam circulair te kunnen benutten is ook de impact van alternatieve hydraulische binders in de 2^e en volgende levensfasen (na breken en toepassen) van belang. Voor alternatieven waarvan bekend is dat deze een relatief hoge mate van onzuiverheid kennen (in de vorm van metalen, zouten of zwavel) wordt dit als risico aangegeven.

1.5 Opzet rapport

Het rapport verkent in Hoofdstuk 2 de huidige situatie in Nederland, Europa en de wereld en gaat daarbij kort in op de huidige productie van hydraulische binders voor cement en de factoren die tot 2050 waarschijnlijk een rol spelen in de beschikbaarheid van de hydraulische binders.

Op basis van de door SGS gehanteerde indeling voor alternatieve binders voor constructief cement in 1) Alternatieve cementen, 2) Alternatieve supplementaire cementeuze materialen en 3) Geopolymeren worden de alternatieven in drie hoofdstukken toegelicht. Deze hoofdstukken worden samengevat met een tabel.

In het Hoofdstuk 6 wordt gekeken naar toekomstige ontwikkelingen die de productie van (alternatieve) hydraulische binders voor cement beïnvloeden.

¹ Puzzolanen zijn silica of silica- en alumina rijke materialen die, in fijnverdeelde vorm en in aanwezigheid van water, chemisch reageren met calciumhydroxide (gebluste kalk) tot verbindingen met bindende eigenschappen. De reactie van puzzolanen met enkel water is beperkt, puzzolanen worden daarom niet beschouwd als hydraulisch bindmiddel op zich.

Tot slot wordt in Hoofdstuk 7 geconcludeerd welke alternatieve hydraulische binders voor constructief cement perspectief bieden voor Nederland in 2050, rekening houdend met de verwachte beschikbaarheid, de milieu impact (voor zover bekend) en de impact op de CO₂ emissie.

In de **Bijlagen** zijn de verslagen van de uitgevoerde interviews opgenomen.

2 Huidige situatie

2.1 CEM I-V in Nederland

Cement wordt op basis van de samenstelling ingedeeld in typen, aangeduid met CEM I tot en met CEM V. De indeling is primair gebaseerd op de omvang van de bestanddelen portlandcement, hoogovenslak en vliegas. Ook het gebruik van sommige alternatieve toeslagstoffen met hydraulisch bindende eigenschappen (puzzolanen) is hierbij meegenomen (CEM IV). De 5 typen zijn hieronder beschreven:

- CEM I: portlandcement met maximaal 5% andere stoffen.
- CEM II: allerlei mengvormen van portlandcement met bijvoorbeeld leisteen, vliegas, hoogovenslak... minimaal 65% portlandcement.
- CEM III: hoogoven/portlandcement-mengsel in 3 klassen: A,B en C; waarbij CEM III/A de minste (40%) en CEM III/C de meeste (90%) hoogovenslak bevat.
- CEM IV: puzzolaan cementsoorten
- CEM V: composietcementen, met mengsels van portlandcement, hoogovenslak en puzzolanen.

Het SGS rapport (Muehleisen, 2020) geeft een overzicht van de recente (2018) import en export van cementklinker, portlandcement en andere hydraulische cementen (Tabel 2-1).

Tabel 2-1 Import en export van cementklinker, portlandcement en andere hydraulische cementen in Nederland in 2018 (Muehleisen, 2020) – uit Eurostat PRODCOM list 2018

	Import (ton)	Export (ton)	Netto saldo (ton)
Cementklinker	193.000	1.700	191.000
Portlandcement	1.708.000	321.000	1.387.000
Ander hydraulisch cement	778.000	158.000	620.000

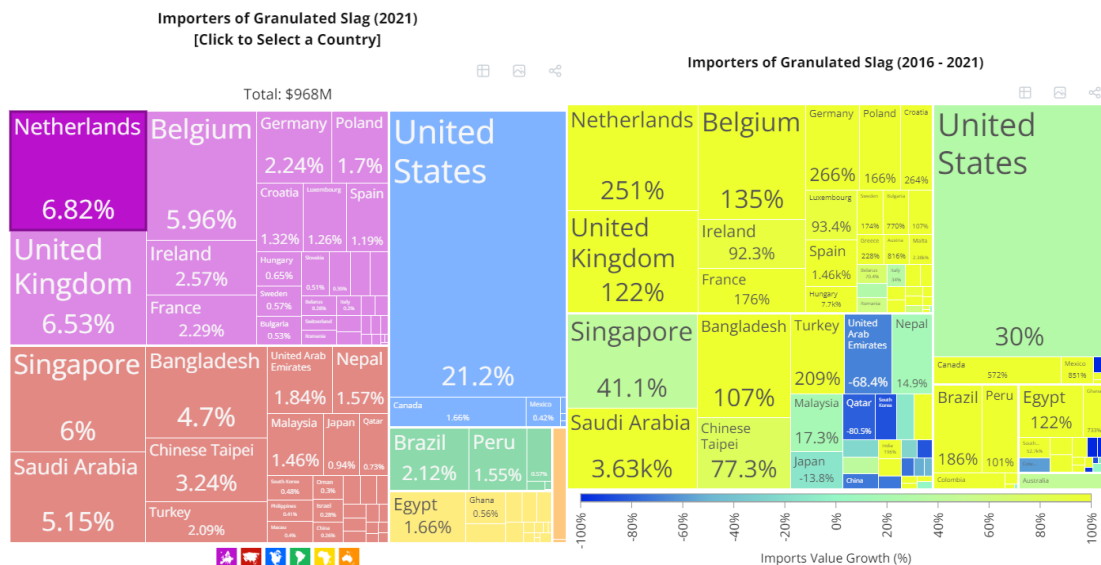
Op het type cement en de vraag naar cement wordt in het SGS rapport (Muehleisen, 2020) het volgende antwoord gegeven:

“Aan de huidige vraag naar cement in Nederland wordt voornamelijk voldaan door ingevoerde klinker die in eigen land wordt gebruikt om portlandcement (CEM I), portlandvliegasement (CEM II/B-V) en hoogovencement (CEM III/A en CEM III/B) te produceren. Het verbruik van cement in Nederland bedraagt gemiddeld ongeveer 5 miljoen ton per jaar (zie figuur 1). Dat is als volgt samengesteld: 55-60% CEM III, 30-35% CEM I, en de resterende 5-10% CEM II en CEM V samen. Het gemiddelde klinkergehalte van cement die in Nederland wordt gebruikt, is laag: naar schatting 50%. In dit opzicht is CEM III een belangrijk cement in Nederland en voor Rijkswaterstaat. De verwachting is dat de vraag naar cement in Nederland op een gemiddeld niveau van ongeveer 5 miljoen ton per jaar zal blijven tot 2050.”

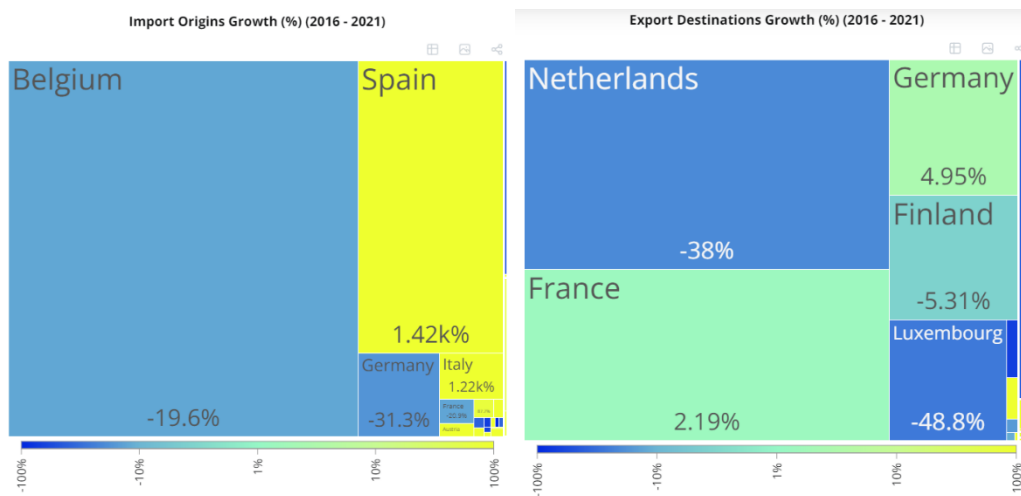
Hoogovencement (CEM III/A en CEM III/B) is het meest gebruikte type cement in Nederland. Dit maakt de vraag naar cement afhankelijk van het aanbod van gegraneerde hoogovenslak en klinker. De bron voor CEM III (gegraneerde hoogovenslak) staat in Nederland onder druk, door zowel de manier van staalproductie in Nederland als mede door de afhankelijkheid van de import van gegraneerde hoogovenslak. Ook alternatieven cementen zoals CEM II staan door de dalende import van kalksteen/mergel en de daling van beschikbare vliegasen met het sluiten van kolencentrales in Nederland (2025) en Duitsland (2038) onder druk.

De OEC (Observatory of Economic Complexity) rapportage 2021 illustreert de afhankelijkheid van de import van gegranuleerde hoogovenslakken (Nederland is wereldwijd de 2^e importeur van gegranuleerde hoogovenslakken, zie Tabel 2-2), en kalkzandsteen (limestone) (zie de handelsbalans voor kalkzandsteen met België in Tabel 2-3).

Tabel 2-2 OEC 2021, Wereldwijde importeurs van gegranuleerde hoogovenslakken (links) versus groei en afname gegranuleerde hoogovenslakken in de jaren 2016-2021 (rechts)



Tabel 2-3 OEC 2021, Afname import kalkzandsteen vanuit België naar Nederland (links) versus afname export uit België naar Nederland (rechts)



2.2 Europa en de wereld

2.2.1 Momentopname 2023 met betrekking tot CO₂ reductie doelstelling cementindustrie

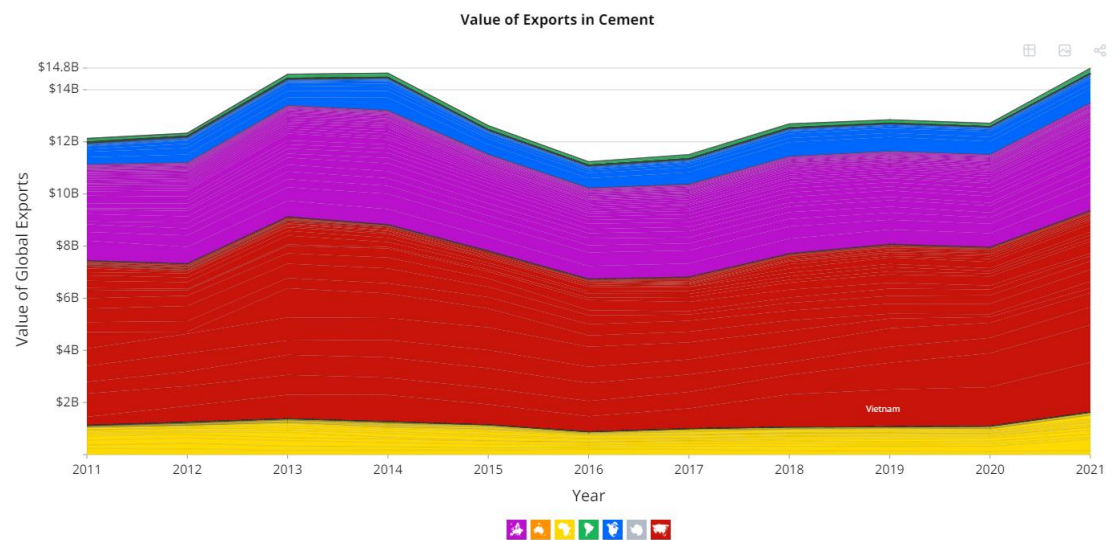
De wereldwijde handel in cement is conjunctuur-gevoelig en afhankelijk van de aandelenmarkt en vastgoedmarkt. Sinds 2016 loopt de vastgoedmarkt achter op de aandelenmarkt (zie wat gereflecteerd wordt op de wereldwijde handel in cement (Tabel 2-5)).

Tabel 2-4), wat gereflecteerd wordt op de wereldwijde handel in cement (Tabel 2-5).

Tabel 2-4 Overzicht van stock market versus real estate market, Investopedia 2021



Tabel 2-5 OEC 2021, overzicht van exportwaarde van cement



Wereldwijd is er veel aandacht voor CO₂ emissievrij-cement (Net-Zero Transition²). Het doel is om 2050 netto geen broeikasgassen uit te stoten met het produceren van cement. Om te kijken hoe het anno 2023 met deze ambitie staat is door de IEA (waaraan 31 landen deelnemen) een tussenstand gerapporteerd:

International Energy Agency (IEA) - Cement – 2023:

The direct CO₂ emissions intensity of cement production has been broadly flat over the last five years, and is estimated to have increased slightly (by 1%) in 2022. In contrast, annual CO₂ intensity declines of 4% through to 2030 are required for the sector to get on track with the Net Zero Emissions by 2050 (NZE) Scenario.

² Net zero means cutting greenhouse gas emissions to as close to zero as possible, with any remaining emissions re-absorbed from the atmosphere, by oceans and forests for instance.

De CO₂ reductiedoelstelling wordt in 2023 nog niet gehaald: er is zelfs sprake van een toename t.o.v. de voorafgaande jaren.

2.2.2 Trends in de wereldwijde handel in cement-gerelateerde basisproducten (binders)

Op 24 en 25 oktober 2023 heeft de WCA Annual Conference 2023 plaatsgevonden. Hier zijn een aantal trends in de wereldwijde handel in cement (in het Engels) gesignaleerd:

Ian Riley, CEO World Cement Association (24-10-2023): The cement industry is facing multiple global crises:

- increasing energy prices;
- supply chain disruption;
- oversupply and low prices in many markets; and
- ever-increasing pressure to reduce carbon emissions.

Of course, each crisis also offers opportunity to those who are willing to seize them. Customers have new priorities which moves away from commoditized demand driven only by price. Supply chain disruptions also offer the potential for differentiation.

This year WCA's annual conference will focus on how cement companies can improve profitability in the face of these crises. We will look at developments in digital technology, new products and materials and changes in market requirements. Under the theme of "Improving Profitability in a Time of Multiple Global Crises" we will cover the following topics:

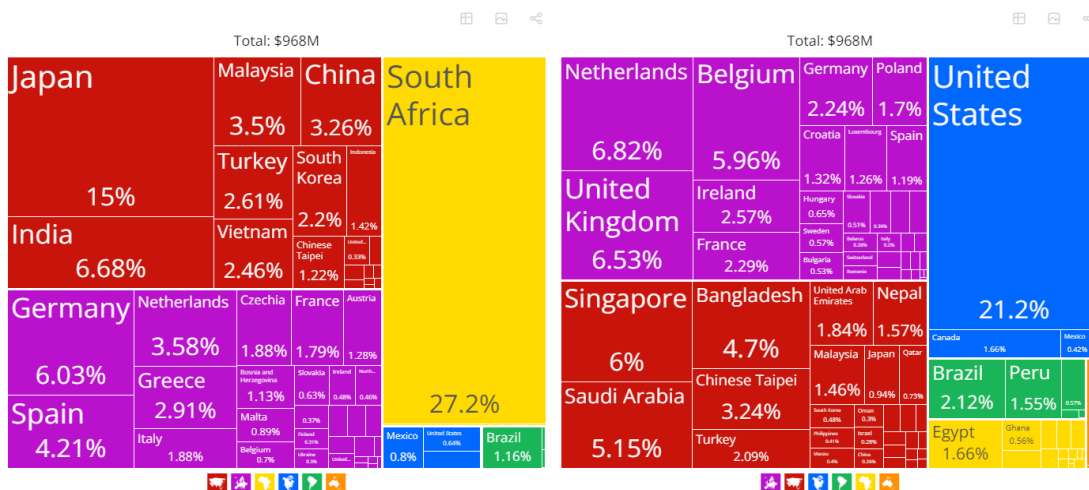
- Worldwide industry and market situation.
- New technologies to reduce energy intensity and CO₂ emissions.
- Changing customer demands.
- Opportunities to reduce clinker factor in cement and concrete.

De vraag naar traditionele binders voor cement neemt nog steeds in bruto waarde toe (zie Tabel 2-6 en Tabel 2-7). De vraagtoename (import) wordt sinds 2018 sterk gestuurd door de Golfstaten. Dit komt naar voren uit de OEC 2021 cijfers. Hierin zijn de belangrijkste exporterende en importerende landen in 2021 met een trendanalyse terug tot 2011 voor gegranuleerde hoogovenslakken en kalkzandsteen weergegeven.

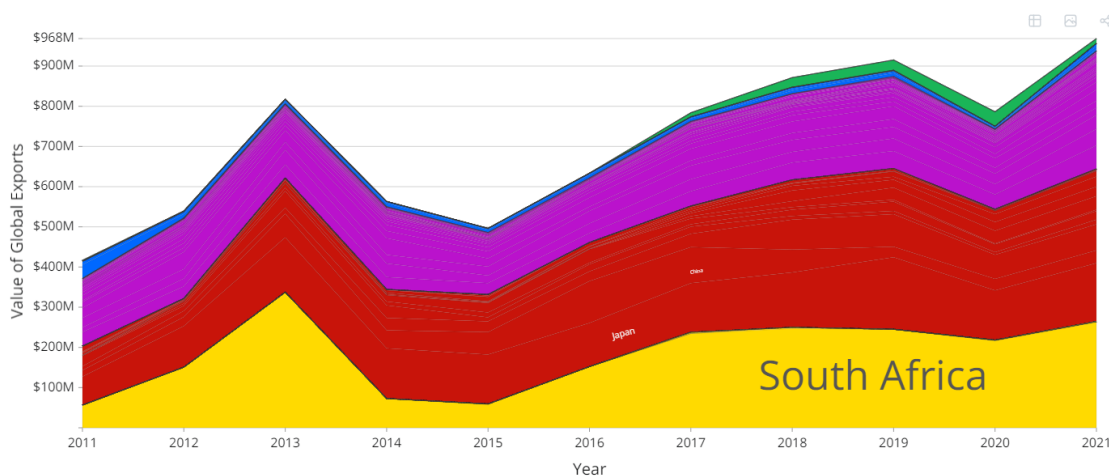
Tabel 2-6 OEC 2021, overzicht van export en import gegranuleerde hoogovenslakken

Exporters of Granulated Slag (2021)
[Click to Select a Country]

Importers of Granulated Slag (2021)
[Click to Select a Country]

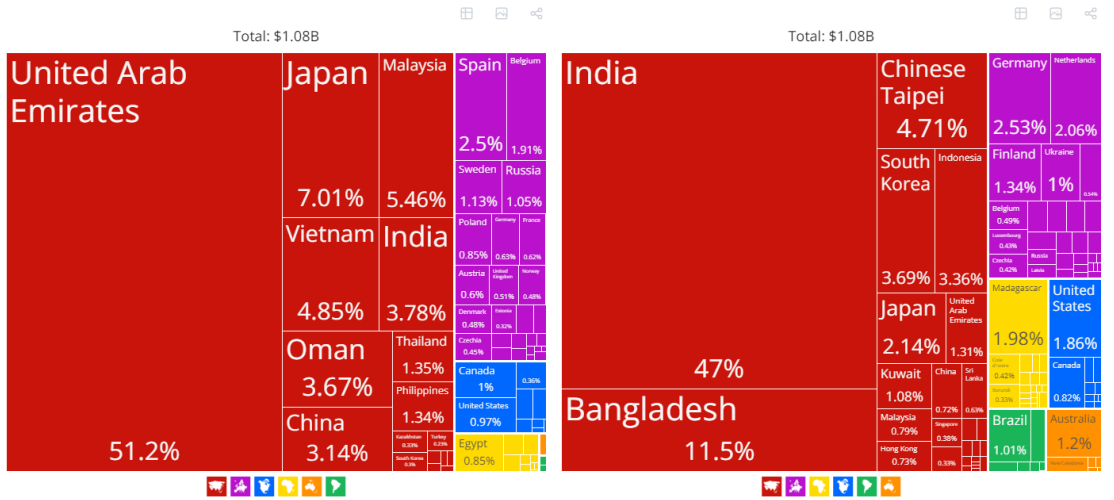


Value of Exports in Granulated Slag

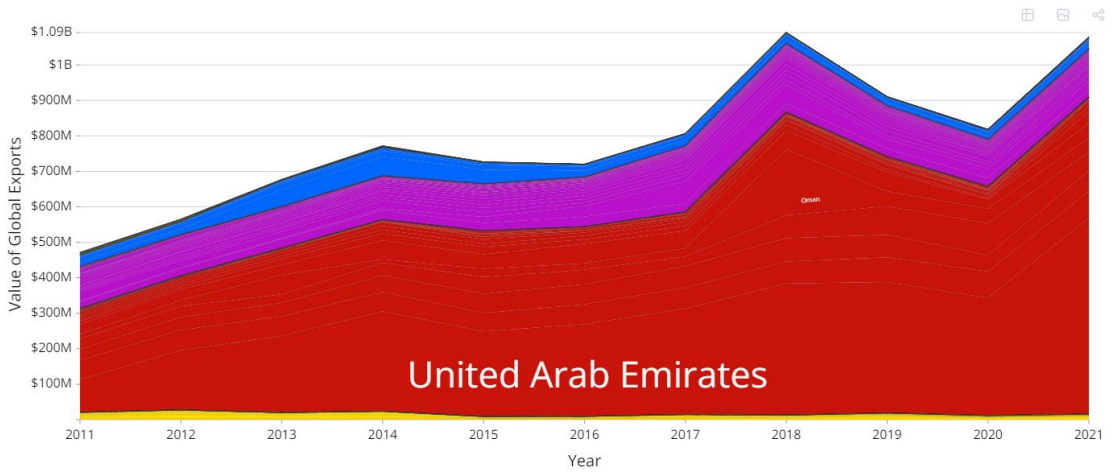


Tabel 2-7 OEC 2021 overzicht met export en import van kalkzandsteen voor cement-productie.

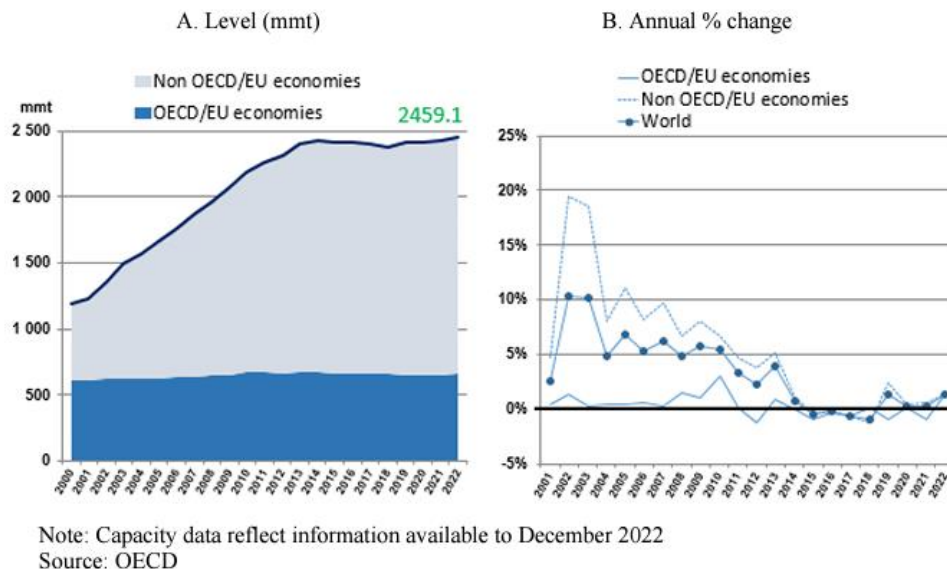
Exporters of Limestone materials for manufacture of lime or cement (2021) [Click to Select a Country] Importers of Limestone materials for manufacture of lime or cement (2021) [Click to Select a Country]



Value of Exports in Limestone materials for manufacture of lime or cement

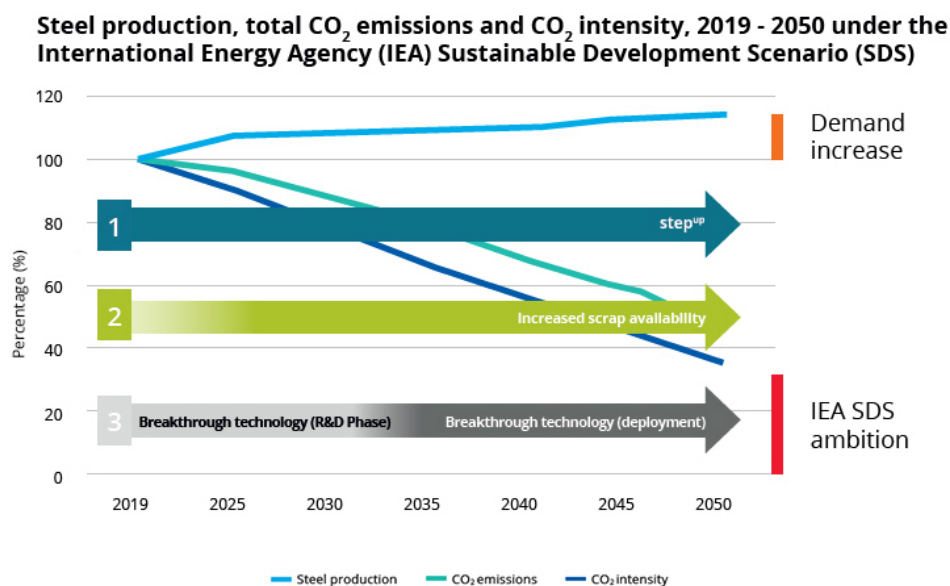


De handelswaarde van gegranuleerde hoogovenslakken neemt toe bij een stabiel aanbod van staal (als bron voor gegranuleerde hoogovenslakken). De wereldwijde staal productiecapaciteit is sinds 2014 gestabiliseerd, zie Figuur 2-1 (OECD, 2021).



Figuur 2-1 OEC 2021, overzicht van wereldwijde capaciteit voor staalproductie in miljoen metrische ton (mmt).

In de gepresenteerde data in Figuur 2-1 wordt geen rekening gehouden met de impact van veranderingen in de wijze van staalproductie (en daarmee de beschikbaarheid van gegraneerde hoogovenslakken). Ook voor de staalindustrie geldt een doelstelling om in 2050 30% minder energie uit te stoten (zie Figuur 2-2, IEA sustainable development scenario).



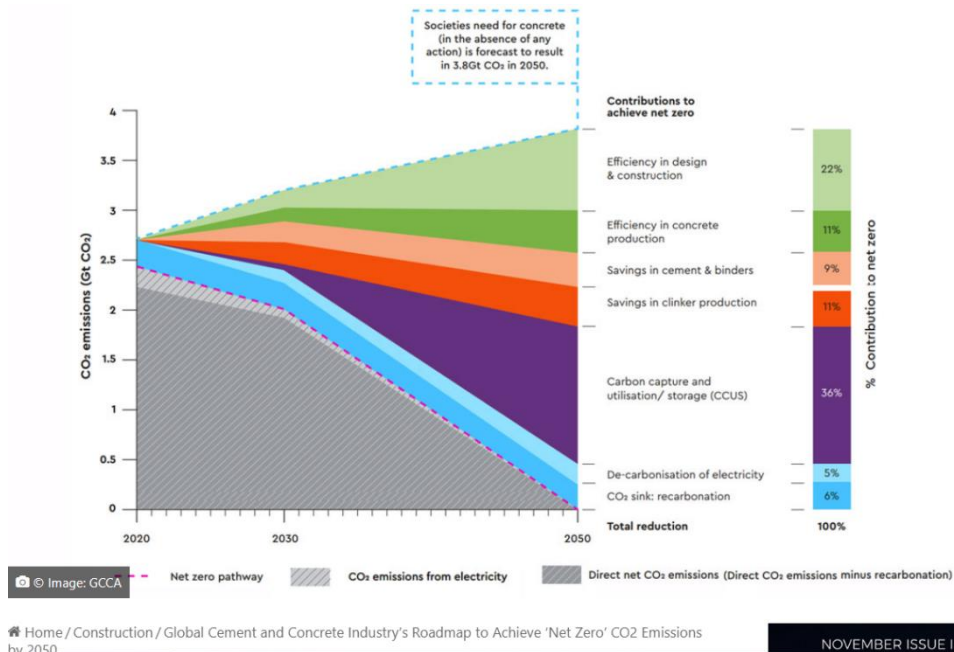
Based on data provided in the IEA's Iron and Steel Technology Roadmap, October 2020

Figuur 2-2 IEA Iron and Steel Technology Roadmap towards 2050 to come to 30% CO₂ reduction

De toename van de waarde en een gelijkblijvende of dalend aanbod van gegraneerd hoogovenslak impliceert dat de cement industrie uitwijkt naar alternatieve binders.

2.2.3 Wereldwijde markt voor alternatieve binders

In Figuur 2-3 wordt de Global Cement and Concrete Industry's roadmap om tot net zero CO₂ emissie voor cement te komen nader toegelicht.



Figuur 2-3 Global Cement and Concrete Industry's Roadmap to Achieve 'Net Zero' CO₂ Emissions by 2050

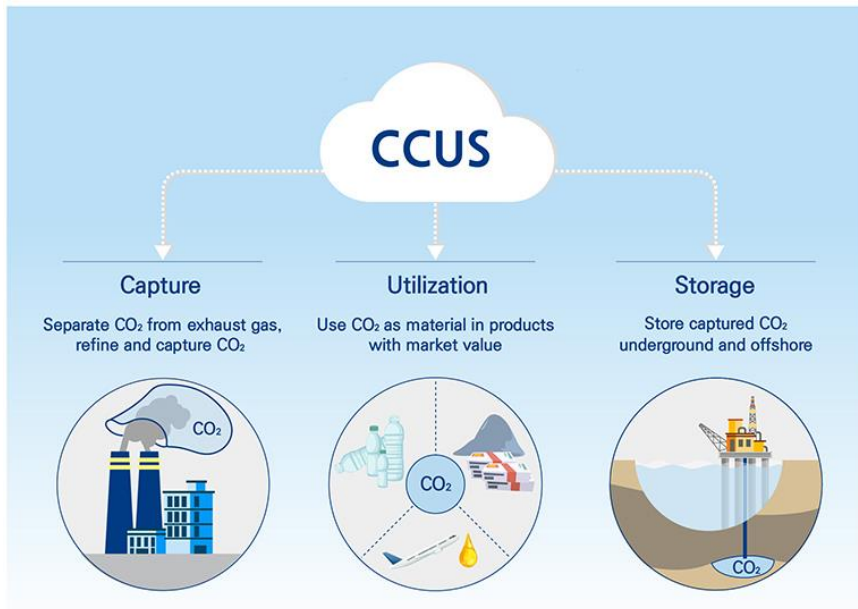
Europa stimuleert de overgang naar net zero CO₂ emissie voor cement en beton met het EU-Innovatiefonds. Een voorbeeld is het GeZero project, met een subsidie van 191 mln. euro. Op 1-1-2024 is binnen dit project begonnen met de bouw van de eerste Duitse productiesite voor net-zero cement en klinker in Geseke door de opslag van Carbon capture and storage (CCS)³ (opening 2029, capaciteit 700.000 ton CO₂ opslag per jaar), gevolgd door een vergelijkbare fabriek in Bulgarije met tevens gebruik van CO₂ (CCUS) (capaciteit 800.000 ton CO₂ opslag per jaar).

De inzet van CC(U)S illustreert een belangrijke kanttekening bij net zero CO₂ emissie voor cement en beton (Figuur 2-4). De transitie naar duurzame energie of alternatieve binders alleen is niet genoeg om een net zero CO₂ emissie voor cement en beton te realiseren, voor CO₂ reductie naar de atmosfeer speelt afvang en opslag een belangrijke rol. Dit werd ook toegelicht tijdens het BDI (Bundesverband der Deutschen Industrie) Climate Congress 2023:

Thomas Perterer, Chairman of the German Lime Industry Association/BVK and CEO of Lhoist Germany, at the BDI Climate Congress 2023:

“Even a complete switch to renewable energy would only reduce the lime industry's CO₂ emissions by about 30%. Technical solutions for further use or storage must therefore be found for the majority of the CO₂. Without carbon capture, there will be no climate-neutral lime or cement production”

³ <https://www.zkg.de/en/news/first-fully-decarbonised-cement-plant-in-germany-4044057.html>



Figuur 2-4 Uitleg van Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS).

Diverse brancheverenigingen in de cementindustrie hebben opgeroepen om samen te werken. Zo heeft de International Renewable Energy Agency (Irena) in 2022 een whitepaper hierover geschreven. Verder lopen hier in Europa pilot projecten over, zoals het ZEUS project (Verein vorzeigeregion / Austria Power & Gas (WIVA P&G), 2023). In Noord Amerika (Canada) zijn cement alternatieven (supplementary cementitious materials) met een relatief lage CO₂ emissie, ontwikkeld in samenwerking met de afvalverwerkende industrie, al op de markt verkrijgbaar.

De omvang van de supplementary cementitious materials (SCM's) markt is met een schatting van US\$ 8.6 miljard wereldwijd in 2019 en een groei tot US\$ 9.1 billion in 2028 (360ResearchReports, 2022) licht stijgend, met een zwaartepunt in Azië, Europa en Noord Amerika (Figuur 2-5).



Figuur 2-5 De markt voor SCM's in 2022 met trends tot 2028 (360ResearchReports, 2022)

Afgezet tegen de globale cementmarkt (Fortune Business Insights, 2023) is de bijdrage van SCM's zo'n 2,4% en neemt het aandeel SCM's wereldwijd relatief af tot 1,7% in 2030 door de verwachte groei in de cementmarkt, .

Fortune Business Insights (Fortune Business Insights, 2024):

The global cement market size was valued at \$363.67 billion in 2022 & is projected to grow from \$405.99 billion in 2023 to \$544.55 billion by 2030.

2.2.4 Samenvattend

Wereldwijd is er veel aandacht voor een CO₂ neutrale cement productie, maar verschilt de aanpak sterk. In Noord Amerika zijn er al producten met SCM's op de markt, al is het aandeel op de totale cement markt relatief gering. Wat mede een rol speelt in Noord Amerika is het momenteel nog hoge percentage klinker cement (CEM I), waarbij de transitie naar CEM III achtig a/b Portland cement (met een mix van vliegas, bodemas⁴, kalkzandsteen, klinker GGBS slak en gips) die Europa al sinds de jaren zestig heeft ingezet momenteel plaatsvindt. In deze transitie in Noord Amerika is ruimte om ook andere SCM's te ontwikkelen. De groeiprognose van SCM's in de periode van 2023 tot 2030 is met +4,9% groei echter beperkt.

Het doel van een CO₂ neutrale cement productie in 2050 wordt vooralsnog niet gestaafd door de financiële analyses. Kijkend naar de cijfers loopt de transitie naar een CO₂ neutrale cement productie wereldwijd achter op schema. In 2022 heeft een toename van 1 procentpunt plaatsgevonden van de CO₂ emissie gerelateerd aan cementproductie. En, zoals vermeld, is de groeiprognose van SCM's tot 2030 beperkt.

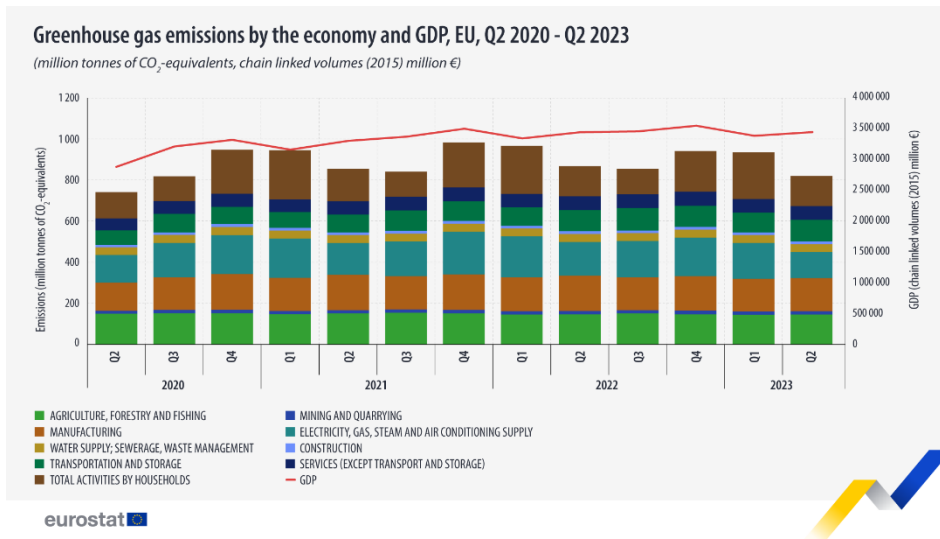
De GCCA roadmap voorziet in een versnelling vanaf 2030. Hiervoor is het noodzakelijk dat verschillende industrieën samenwerken. Zo speelt de staalindustrie (voor de gegranuleerde staalslakken) en de verbranders van reststromen (voor bodem en vliegas) een belangrijke rol. Ook in deze sectoren zijn CO₂ doelstellingen afgesproken, en sommige veranderingen pakken nadelig uit voor de cement productie.

Opvallend in de GCCA roadmap is dat slechts 20% van de beoogde CO₂ besparing gerealiseerd wordt door alternatieven voor klinker en alternatieve binders. Er worden grotere winsten voorzien in een efficiënter ontwerp (22% reductie), en vooral in de afvang van CO₂ (36% reductie). Hiervoor is in Europa het EU Innovatie fonds, wat mede mogelijk heeft gemaakt dat er tot 2030 twee fabrieken gepland zijn met CCS of CCUS met een gezamenlijke CO₂ afvangcapaciteit van 1,5 mln. ton CO₂ per jaar.

Om dit in perspectief te zetten, de totale broeikasgas emissie voor Europe in 2023 uitgedrukt in CO₂ equivalenten was 821 miljoen ton CO₂ eq. per kwartaal (3.284 miljoen ton CO₂ eq. per jaar). Hiervan kwam 13,3 miljoen ton CO₂ eq. per kwartaal (53,4 miljoen ton CO₂ eq. per jaar) van aan de bouw-gerelateerde activiteiten (groepsniveau; economic activity), zie Tabel 2-8 (Eurostat, 2024). De twee CC(U)S faciliteiten die tot 2030 gebouwd worden in Europa vangen circa 3% van de CO₂ emissie van de aan de bouwsector gerelateerde activiteiten op.

⁴ In Europa is onder EN 197-1 het gebruik van bodemas niet toegestaan (EN 197, 2011). CEM III laat het gebruik van bodemas niet toe.

Tabel 2-8 Trend in GHG emissies in Europa, bijdrage van de bouwsector (construction) in lichtblauw.



3 Alternatieve cementen

In de volgende drie hoofdstukken zullen de verschillende groepen van de alternatieve hydraulische binders besproken worden, te beginnen met alternatieve cementen. Per groep zal besproken worden welke alternatieven veelbelovend lijken.

3.1 Belietrijk portlandcement

Belietrijk portlandcement lijkt, zoals de naam doet vermoeden, veel op portlandcement (CEM I). Het bevat echter meer dan 40% beliet ($C_2S = 2CaO.SiO_2$), wat veel hoger is dan de 15-30% in traditioneel portlandcement (Muehleisen, 2020). Het proces om belietrijk portlandcementklinker te produceren is hetzelfde als voor traditionele portlandcementklinker. De brandtemperatuur is bij belietrijk portlandcement echter 100°C later (ongeveer 1350 °C in plaats van 1450 °C). Verder zit er in de grondstoffen minder kalksteen en meer silica, waardoor de CO₂ uitstoot zo'n 10% lager is ten opzichte van CEM I.

De druk- en buigsterkten van belietrijk portlandcement zijn vrijwel gelijk aan die van CEM I, en zou volgens verkennende studies zelfs verhoogd kunnen worden door carbonatatie toe te passen (Jang et al., 2016). Dit zou de CO₂ echter uitstoot negatief kunnen beïnvloeden. De belangrijkste reden waarom dit cement nog niet op grote schaal wordt toegepast, is de tragere sterkteontwikkeling (Muehleisen, 2020). Daar staat wel weer tegenover dat de bijbehorende lage hydratatiwarmte dit cement geschikt maakt voor de bouw van massieve betonconstructies zoals sluizen en dammen, omdat temperatuurspanningen juist kunnen leiden tot scheurvorming in de dikke dwarsdoorsneden van deze toepassingen. Ondanks deze veelbelovende eigenschappen is het de vraag of dit alternatief op grote schaal gebruikt kan worden, zoals blijkt uit de interviews uit het SGS Intron rapport:

Interview Karen Scrivener – SGS Intron rapport:

“Wat belietcement betreft, kun je de eenvoudige stoichiometrische berekening maken op basis van de formule en je kunt concluderen dat beliet ongeveer 10% minder chemisch calcium heeft dan C₃S. Wanneer het nu 10% minder CO₂ heeft, betekent dit dat de prestaties voor minstens 90% even goed moeten zijn, anders heb je een nettoverlies. Er is heel veel werk op beliet verricht, en niemand komt in de buurt van 90%, zelfs niet eens in de buurt van 50%.”

3.2 Calciumsulfoaluminaatcement (CSA) en Beliet-calciumsulfoaluminaat-ternesiet (BCT)

Een ander alternatief dat lijkt op belietrijk portlandcement zijn de cementsoorten die de fase ye'elimite ($C_4A_3\dot{S} = 4CaO.3Al_2O_3.SO_3$) bevatten (Muehleisen, 2020). Deze cementen staan ook wel bekend als calciumsulfoaluminaatcement (CSA) en worden ook op soortgelijke wijze als traditioneel portlandcement geproduceerd, maar met een lagere brandtemperatuur. Het belangrijkste verschil zit in de grondstoffen, kalksteen wordt namelijk gedeeltelijk vervangen door een aluminiumrijke bron (bijv. bauxiet). Dit resulteert dan ook in een CO₂-uitstoot die ongeveer 25 tot 30% lager is in vergelijking met CEM I. Andere mogelijke voordelen zijn het krimpcompenserend karakter en de snelle sterkte-ontwikkeling. Desondanks wordt CSA nog niet op grote schaal gebruikt, wat voornamelijk te maken heeft met de hoge grondstofkosten. Namelijk, hoe hoger het gehalte aan ye'elimite, des te lager de CO₂-uitstoot. Echter zijn er meer aluminiumrijke grondstoffen nodig voor een hogere ye'elimite fase, die aanzienlijk meer kosten dan kalksteen.

Om de productiekosten van CSA cement te verlagen, kan een beliet-calciumsulfoaluminaat-ternesiet (BCT) cement worden geproduceerd, waarbij de ferriet fase (C₄AF) toegevoegd

wordt. In dit cement is beliet nog steeds een belangrijke component, maar is het ye'elimate gehalte lager, waardoor ook minder van de dure aluminiumrijke grondstoffen nodig zijn. Op dit moment zijn er al BTC-klinkers op de markt gebracht door Heidelberg Cement als "Ternocem" en door Lafarge als "Aether". Voor beide producten is de CO₂-uitstoot zo'n 25-30% lager dan CEM I.

Ook hier lijken CSA en BCT geschikte alternatieven, echter worden er door experts nog wat vraagtekens gezet bij het grootschalig gebruik van deze cementen:

Interview Karen Scrivener – SGS Intron rapport:

"Bauxiet wordt gebruikt voor de productie van aluminium. Op basis van berekeningen kunnen we het volgende concluderen: wanneer je de volledige wereldproductie van bauxiet zou nemen, en het zou gebruiken voor de productie van calcium sulfoaluminaatcement, zou je maar aan 10% van de vraag op de markt kunnen voldoen. Dat is duidelijk een bovengrens. De hoeveelheid materiaal, zoals vliegias met een hoog aluminiumoxidegehalte, is ook erg klein."

Interview Peter de Vries – SGS Intron rapport:

"Naast het verbeteren van de energie-efficiëntie van de cementovens ontwikkelt Heidelberg Cement een CalciumSulfoAluminaat-Beliet cement (Ternocem) dat ten opzichte van CEM I een ca. 30% lagere CO₂- emissie heeft. Hoewel dit in andere landen tot een substantieel lagere CO₂-emissie kan leiden, zal dit in Nederland geen grote invloed hebben omdat de gemiddelde CO₂-emissie van ons cement al zo laag is. Met de CEM III/A 52.5N hebben we al een uitstekend presterend cement zowel op materiaal- als milieugebied.

Om de cementklinker voor Ternocem grootschalig te produceren zijn er [verder] ingrijpende maatregelen nodig op het gebied van het grondstoffenpakket en het stookregime. Je kunt die nieuwe cementklinker dus niet zomaar deeltijds naast de traditionele cementklinker produceren. Een hogere CO₂-beprijzing is nodig om zulke alternatieve cementen in productie te krijgen."

Andere experts zien juist op vrij korte termijn al grootschalig productie van BTC:

Interview René Albers – SGS Intron rapport:

"Het is best mogelijk dat Belite-Calciumsulfoaluminate-Ternesite van Heidelberg binnen 10 jaar substantieel op de markt komt. Ze hebben de grondstoffen, de installaties en de kennis ervoor."

3.3 Kalksteen-gecalcineerde klei-cement (LC³)

Het derde alternatief is kalksteen-gecalcineerde klei-cement, bekend als LC³. De meest voorkomende vorm van deze klinker is LC³-50 en bestaat uit gecalcineerde klei (30%), kalksteen (15%), gips (5%) en gemalen klinker (50%). De mechanische eigenschappen van LC³-50 zijn vrijwel gelijk aan CEM I, zolang het kaolinetgehalte in de klein ongeveer 40% bedraagt (Muehleisen, 2020). De klei in Nederland bevat over het algemeen veel minder kaolinet (*interview TNO*), al zou het eventueel verrijkt kunnen worden. De hoeveelheid beschikbare klei in Nederland wordt in hoofdstuk 5.2 verder besproken.

Een groot voordeel van LC³-50, is dat het zo'n 30% minder CO₂ uitstoot in vergelijking met CEM I. Andere voordelen zijn de vergelijkbare eigenschappen met portlandcement, de lagere behoefte aan superplastificeerder en de betere levensduur. Ook beschermt het de wapening in het beton goed. Het probleem van dit alternatief is dat het pas sinds 2021 in de nieuwe Europese norm EN 197-5 is toegestaan. Voorheen was de Europese norm EN 197-1 van kracht die een klinkergehalte van ten minste 65% vereiste, wat meer is dan 50%.

3.4 Overige alternatieven

Naast de hierboven genoemde alternatieven, worden er nog een aantal andere opties genoemd in het SGS Intron rapport. Zo is er hydraulische calciumsilicaatklinker gemaakt met hydrothermisch proces en door carbonatatie verhard cement. Die eerstgenoemde optie is een belietachtig hydraulisch bindmiddel dat wordt geproduceerd met een hydrothermisch proces op relatief lage temperatuur. De voornaamste reden dat dit alternatief minder veelbelovend is, is dat het fabricageproces sterk verschilt met dat van traditioneel portlandcementklinker, waardoor veel aanpassingen nodig zullen zijn. Ook is het op dit moment nog niet geschikt voor bewapend beton. Echter bevindt de ontwikkeling van dit alternatief zich nog in de laboratoriumfase, met een TRL van 3.

Het andere alternatief is door carbonatatie verhard cement. Deze technologie maakt gebruik van calciumsilicaatklinkers met een laag kalkgehalte zoals wollastoniet ($CS = CaO.SiO_2$) (Muehleisen, 2020). Het voordeel is dat deze klinkers kunnen worden geproduceerd in reeds bestaande cementovens. Echter zijn er wel aanpassingen nodig aan de verhardingskamers (verwijderen waterdamp en bevorderen CO_2 -circulatie) om het verhardingsproces sneller te laten verlopen. Door de lagere brandtemperatuur, het lagere kalkgehalte en verharding door het binden van CO_2 , de CO_2 uitstoot tot 60% lager zijn ten opzichte van CEM I. Dit bindmiddel is echter nog niet geschikt voor toepassing in gewapend beton door de lage pH.

Op dit moment wordt er al cement op deze manier geproduceerd in de Verenigde Staten door Solidia, welke gebruikt wordt voor de vervaardiging van niet-gewapende prefab cementhoudende producten (Muehleisen, 2020). Een ander bedrijf dat gebruik maakt van verharding door CO_2 is het Canadese CarbonCure. Dit bedrijf heeft een systeem ontwikkeld om het cement in beton deels te vervangen door vloeibare CO_2 , waardoor de hoeveelheid gebonden CO_2 toeneemt. Dit proces wordt momenteel gebruikt voor de productie van metselwerkblokken, stortklaar beton en prefabbeton.

Ondanks deze veelbelovende aspecten, zijn er ook wat kritische punten te noemen voor deze technologie:

Interview Karen Scrivener – SGS Intron rapport:

“Ik denk dat de wollastoniet-technologie interessant is. Maar het kan niet gebruikt worden met wapenings-staal. Je hebt vrij kleine producten nodig, omdat je CO_2 van de buitenkant naar het centrum moet krijgen, en je hebt een speciale uithardingskamer nodig. Dit soort uithardingskamers is aanwezig in de meeste prefab fabrieken in Noord-Europa, omdat ze worden gebruikt voor verwarming, maar niet in landen als India, waar het grootste deel van het cementgebruik is geconcentreerd. Ze hebben echter wel enig potentieel, en wij hebben het geëvalueerd op een maximum van 10% van de markt. Ik denk dat het realistisch gezien over ongeveer 2 of 3% van de markt zal gaan.”

Interview Peter de Vries – SGS Intron rapport:

“Beperking bij CO_2 -gebaseerde bindmiddelen is dat de CO_2 ook in de kern van het product moet komen om goed te verharden. Daarom zal de toepassing vooralsnog beperkt blijven tot dunwandige producten zoals bijvoorbeeld rioolbuizen, e.d. Zulke producten vormen een substantieel deel van de totale betonmarkt.”

Deze technologie kan dus waarschijnlijk alleen gebruikt worden voor kleine producten, en niet de grote constructies, zoals stuwen en dammen. Daarom lijkt dit alternatief vooralsnog niet geschikt voor als vervanging voor constructief beton.

4 Alternatieve supplementaire cementeuze materialen (SCMs)

Een andere manier om de hoeveelheid portlandcement gebruikt in de betonindustrie te verminderen, is om een deel van het portlandcement te vervangen door stoffen die vergelijkbare cement-achtig eigenschappen hebben. Deze stoffen worden supplementaire cementeuze materialen (SCMs) genoemd. De meest gebruikte SCMs op dit moment zijn gegranuleerde hoogovenslak, poederkoolvliegias en kalksteen (Muehleisen, 2020). Echter, omdat de hoeveelheid beschikbaar vliegias en hoogovenslak begint af te nemen, is het van belang om naar alternatieven, zoals bodemas, glasafval en gecalcineerde klei te gaan kijken.

4.1 Biomassa vliegias

Het eerste alternatief voor SCMs is biomassa vliegias. Op dit moment wordt in de betonsector voornamelijk poederkoolvliegias gebruikt. Dit poeder ontstaat bij de verbranding van steenkool in elektriciteitscentrales en bestaat onder andere uit verschillende oxiden en zware metalen (Kwaliteitsdienst Beton, 2019). Biomassa vliegias is specifiek de lichte fractie as afkomstig van biomassa uit afvalverbrandingsovens, die wordt afgevangen uit rookgassen. De meest bestudeerde biomassa is afkomstig van rijstvliesen, die verwerkt kan worden tot een silicarijke puzzolaan met groot oppervlak met hoge chemische reactiviteit. Echter, in Nederland is de biomassa grotendeels afkomstig uit de agrarische sector, onderhoud van natuurgebieden, parken en bossen, organisch huishoudelijk afval, slib en industriële biomassa. Specifiek bestaat de biomassa uit uitdunningshout, stro, bermgras, gewasresten en broeikasafval (Muehleisen, 2020).

De berekende totale hoeveelheid vliegias uit biomassa is in principe 2,7 miljoen ton/jaar. Dit bestaat uit ruim 2 miljoen ton agrarische biomassa-as (inclusief organisch huishoudelijk afval en boomgaardafval), 350 kiloton onderhoudsbiomassa-as en 300 kiloton industriële biomassa-as. Een deel hiervan zou mogelijk ook als SCM gebruikt kunnen worden, al dient rekening gehouden te worden met verschillen in kwaliteit. De samenstelling van de biomassa vliegias kan namelijk variëren afhankelijk van de specifieke biomassa die gebruikt is. Ondanks de verschillen in samenstelling, heeft Tosti et al. (2020) geconstateerd dat de kans op uitloging (bij 20-40 wt% biomassa vliegias) binnen de kaders valt, zelfs tijdens de tweede levensfase.

Er zijn wel een aantal punten waarop gelet dient te worden. Zo kan een goede verbranding moeilijk te bereiken zijn, omdat een te hoge temperatuur kan leiden tot niet-reactief kristallijn kwarts terwijl onvolledige verbranding kan leiden tot koolstofverontreiniging (Muehleisen, 2020). Ook wordt agrarisch biomassa-as vaak al gebruikt als minerale meststof, en zou er dus concurrentie kunnen ontstaan. Het is van belang dat duidelijke afspraken gemaakt worden over het gebruik van deze biomassa as. Als laatste is een grote belemmering voor het gebruik van biomassa-as dat het momenteel in de cement- en betonregelgeving niet toegestaan wordt.

4.2 Bodemas

Een stof die nog niet in grote hoeveelheden gebruikt wordt in de betonsector, maar mogelijk wel als alternatief ingezet kan worden, is bodemas. Bodemas zijn de onbrandbare resten die

op de bodem blijven liggen na verbranding in een centrale. De precieze samenstelling is ook hier moeilijk te bepalen door verschillen in verbrandingsprocedures en vervolgstappen:

Interview producent bouwmaterialen:

“Het is lastig om alle bodemassen op één berg te gooien, omdat er verschillende soorten verbranders bestaan. (1) Commerciële verbranders verbranden voornamelijk veel en zo snel mogelijk. (2) Niet-commerciële verbranders verbranden op een wat zuiverdere manier, omdat ze anders zelf met de vervuiling wat moeten gaan doen. (3) Verbranders die industrie afval en huisafval verbranden. (4) Als laatste zijn er verbranders met bijmenging van zuiveringsslib (b.v. Amsterdam). Dit resulteert in verschillende kwaliteiten bodemas, waar vervolgens nog stappen (scheiden, zuiveren, immobiliseren) op genomen moeten worden voordat deze als bouwstof kan worden toegepast.”

Over het algemeen is bekend dat ijzer, non/ferrometalen en deeltjes > 40 mm verwijderd worden. Doordat het bodemas minstens zes weken wordt opgeslagen, worden tevens organische verbindingen afgebroken, terwijl calcium-, silicaat- en aluminiumverbindingen uit kunnen reageren (Rijksoverheid, z.d.). Wanneer de bodemas niet goed opgewerkt wordt, komt granulaat vrij die nooit toepasbaar kan zijn in de bouw door aanwezigheid van o.a. chloor en antimoon. Echter kon het tot mei 2021 wel toegepast worden onder IBC (isolatie-, beheers- en controlemaatregelen) kwaliteit. Als alternatief kan de bodemas nat-chemisch gereinigd worden, waarbij alle deeltjes > 2 mm (zware metalen) afgescheiden worden. De bodemas heeft dan hydraulische eigenschappen en kan worden ingezet als granulaat in bestratingmateriaal. Op dit moment omvat die toepassing een hoeveelheid van ongeveer 50-100 kiloton gewassen bodemas per jaar.

De totale hoeveelheid beschikbaar bodemas als Niet-Toepasbare stof (NT-stof) per jaar ligt tussen de 1,5 en 2,0 miljoen ton (Rijkswaterstaat, 2022). Hiervan gaat ongeveer 5 a 10% naar beton, de rest heeft geen toepassing in (laagwaardig) beton. Als het bodemas voldoet aan de uitlogingsnormen, dan zou een groter deel gebruikt kunnen worden in beton. Het beter nabewerken van de assen zou hiervoor een oplossing kunnen zijn, ook als meegenomen wordt dat de kosten hiervoor vrij gering zijn (2-3 euro per ton). Het gebruik van assen voor laagwaardig beton zou daarmee op kunnen lopen tot circa 25% (*interview producent bouwmaterialen*). Het grote struikelpunt zicht echter in de onwil om te investeren, mede doordat er geen sturing is vanuit de overheid.

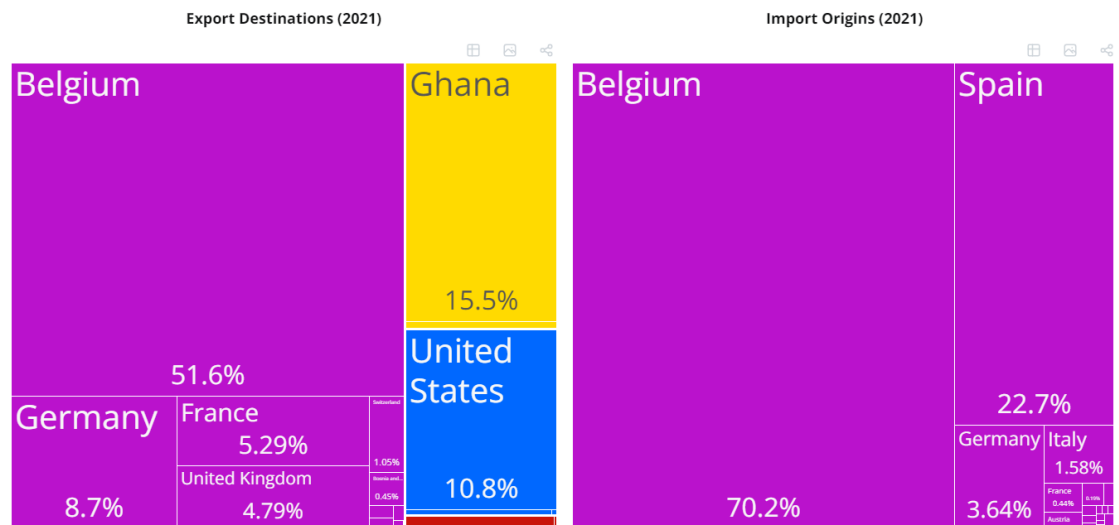
4.3 Kalksteen

Ondanks het feit dat kalksteen bijna inert is, wordt het wereldwijd veel gebruikt als SCM. Kalksteen heeft een fijne structuur, wat de pakkingdichtheid, en dus de druksterkte, ten goede komt. Bovendien wordt de hydratatiereactie versneld door kalksteen. De hoeveelheid portlandcementklinker die vervangen kan worden door kalksteen hangt af van het type cement. Namelijk, hoe hoger de vervanging van portlandcementklinker door kalksteen, hoe lager de kwaliteit van het cement (Muehleisen, 2020). Daar staat tegenover dat de afname in CO₂-uistoot evenredig is met het vervangingspercentage van de portlandcementklinker door kalksteen.

De beschikbaarheid van kalksteen is groot en de regelgeving staat de vervanging toe. In Nederland wordt op dit moment voornamelijk in de Steengroeve in Winterswijk nog kalksteen gewonnen. Er is berekend dat met een opbrengst van zo'n 60.000 ton per jaar nog ongeveer 25 jaar kalksteen gewonnen kan worden (Aalders & Duyverman, 2019). Er worden zelfs al vulstoffen voor zelfdichtend beton geproduceerd van de producten uit de groeve, waarmee o.a. bruggen gemaakt worden. Echter is het nu van belang om uit te zoeken of deze kalksteen van voldoende kwaliteit is voor de toepassing als klinker (*interview TNO*).

Daarnaast wordt er in Nederland ook nog kalksteen geïmporteerd, voornamelijk vanuit west-Europa. De meeste kalksteen wordt vanuit België aangevoerd, met meer dan 2/3 aandeel van onze totale kalksteen import, zie ook Tabel 4-1. Ook wordt er kalksteen geëxporteerd vanuit Nederland, echter is dit maar zo'n 5% van de waarde van de import.

Tabel 4-1 OEC 2021, Nederlandse export (links) en import (rechts) van kalksteen in 2021.



4.4 Glasafval

Wanneer glas fijn gemalen wordt, kan het puzzolane eigenschappen vertonen. Volgens (Muehleisen, 2020) is de reactiviteit van gemalen glas zelfs beter dan dat van poederkoolvliegias en de activiteitsindex gelijk aan die van poederkoolvliegias. De CO₂-uitstoot van glasafval is in theorie kleiner dan 1 kg/CO₂/ton, doordat er geen uitstoot vanuit de productie komt. Ook zijn de kosten laag, omdat het om een afvalproduct gaat.

Een ander groot voordeel van glasafval is de grote hoeveelheid beschikbaar materiaal. In totaal wordt in Nederland per jaar zo'n 1.150.000 ton glasafval geproduceerd (Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), 2022). Hiervan wordt ongeveer 820.000 ton gerecycled, wat betekent dat 330.000 ton glasafval overblijft. Van dit overgebleven afval wordt 2.000 ton gestort of verbrand en het overige deel wordt geëxporteerd. Voorbeelden van glassoorten die niet gerecycled kunnen worden (en dus 'over' zijn) zijn kristalglas (bevat lood), ovenschalen en thee mokken (verhard glas met hoger smeltpunt) en spiegelglas (bevat metaal) (Milieu Centraal, z.d.). Dit overige deel zou potentieel als SCM gebruikt kunnen worden, echter zijn er wel verontreinigingen zoals metalen en papier aanwezig, wat weer zorgt voor hogere verwerkingskosten en mogelijk lagere kwaliteit van het glaspoeder (Bueno et al., 2020). Een ander probleem met betrekking tot het gebruik van glasafval als SCM is de regelgeving. Op dit moment is gemalen glas namelijk niet toegestaan in de betonregelgeving.

Bueno et al. (2020) ziet een hoog potentieel in het gebruik van glasafval als vervanger van poederkoolvliegias. Onderzoek is nodig om gaten in de kennis op te vullen, bijvoorbeeld met betrekking tot de ideale deeltjesgrootte van het glaspoeder en de invloed van de kleur van het glas op de chemische structuur en smeltemperatuur.

4.5 Gecalcineerde klei

Naast het gebruik van gecalcineerde klei in het alternatieve cement LC³ (hoofdstuk 3.3), kan het ook op andere manieren als SCM gebruikt worden. Gecalcineerde klei als SCM wordt voornamelijk toegepast op plekken waar de aanvoer van andere SCM's beperkt is (Muehleisen, 2020). Over het algemeen wordt klei van lagere kwaliteit gebruikt, echter laten kleisoorten met een hoog kaoliniteitgehalte de beste functionaliteit zien. Naast kaolien kan ook bentoniet als gecalcineerde klei gebruikt worden, beide soorten zijn wereldwijd in grote hoeveelheden beschikbaar. Minder bestudeert maar ook mogelijk is het gebruik van de klei illiet (Nsesheye, 2019), een in Nederland veel voorkomende klei afgezet door de Rijn.

Vóór gebruik moet de klei gecalcineerd worden. De optimale temperatuur hiervoor ligt rond de 700-850 °C, wat lager is dan de productie van cementklinker (1450 °C). De geproduceerde gecalcineerde klei kan dan tot 30% portlandcementklinker vervangen met behoud van sterkteontwikkeling en duurzaamheid. Bij een hoger vervangingspercentage worden de reactiviteit en de uithardingstijd een probleem. Echter, de belangrijkste reden dat gecalcineerde klei nog niet op grote schaal gebruikt wordt, zijn de hogere kosten ten opzichte van poederkoolvliegias en gegranuleerde hoogovenslakken.

4.6 Andere alternatieven

Naast bovengenoemde SCMs, zijn er nog andere alternatieven waar sinds kort onderzoek naar gedaan wordt. Dit zijn onder andere koperslakken en bauxiet residuen (Juenger et al., 2019). Echter zijn de lage reactiviteit en de mogelijkheid tot leaching problemen die spelen bij deze alternatieven. Deze alternatieven zijn verder niet uitgewerkt, maar het kan helpen om de ontwikkelingen van deze SCMs in de gaten te houden.

5 Geopolymeren/alkali-geactiveerde bindmiddelen

Naast de alternatieve binders en SCMs, is er nog een laatste groep middelen die als mogelijk alternatief voor portlandcement kunnen dienen, namelijk de zogenoemde geopolymeren. Geopolymeren worden gemaakt met zowel natuurlijke als secundaire precursors. Het is wenselijk om secundaire grondstoffen te gebruiken. Daarom staan deze middelen ook bekend als alkali-geactiveerde bindmiddelen (afgekort tot AAMs van alkali-activated materials) (Provis, 2018). Het verschil tussen SCMs en alkali-geactiveerde bindmiddelen zit voornamelijk in de reacties die gevormd worden. Zo zijn SCMs silica-rijke (eventueel met aluminium) puzzolanen die chemisch reageren met calcium hydroxide tijdens cement hydratatie tot calcium silica hydroxide. AAMs zijn gaan eenzelfde soort reactie aan, echter wordt de Ca vervangen door Na of K (Sayed, 2021),(Song, 2022). Deze bindmiddelen worden steeds vaker als alternatief genoemd in de betonwereld, om hun lage CO₂-uitstoot en bijzondere eigenschappen.

5.1 Huidige markt

Het exacte reactiemechanisme van alkali-geactiveerde bindmiddelen wordt niet volledig begrepen, maar bekend is dat de reactieproducten afhankelijk zijn van de specifieke activator en precursor die gebruikt worden voor de reactie (Muehleisen, 2020). De precursor (aluminosilicaatbron) bestaat meestal uit gegranuleerde hoogovenslak, poederkoolvliegias of gecalcineerde klei. De activerende stoffen die momenteel voornamelijk worden gebruikt, zijn natriumhydroxide in combinatie met natriumsilicaat of soms silica fume. Over het algemeen is natriumsilicaat minder aantrekkelijk als activerende oplossing door de hoge kosten.

Het huidige marktaandeel van alkali-geactiveerde bindmiddelen ligt rond de 2-3%, al neemt de vraag wel toe (maar op de korte termijn niet het relatieve aandeel, zie paragraaf 2.2.3). Het aanbod van deze bindmiddelen blijft echter vrijwel gelijk (*interview met producent bouwmaterialen*). Er zijn een aantal redenen voor het geringe gebruik van alkali-geactiveerde bindmiddelen.

1. Normen

Ten eerste zijn de meeste normen voor betonproducten gebaseerd op cement als bindmiddel. De alkali-geactiveerde bindmiddelen die geen portlandcement bevatten, voldoen dus niet aan de normen en daarom worden ze niet als mogelijke vervanging van portlandcement gezien.

2. Kosten

Verder zijn de kosten voor het produceren van de bindmiddelen hoger dan portlandcement, al hangen de kosten sterk af van de gebruikte precursor.

3. Concurrentie met portlandcementklinker

Ten derde worden alkali-geactiveerde bindmiddelen momenteel vaak geproduceerd met gegranuleerde hoogovenslak als precursor. Echter wordt deze grondstof ook al gebruikt in portlandcementklinker, waardoor het aanbod in bindmiddelen beperkt blijft.

4. Complexiteit

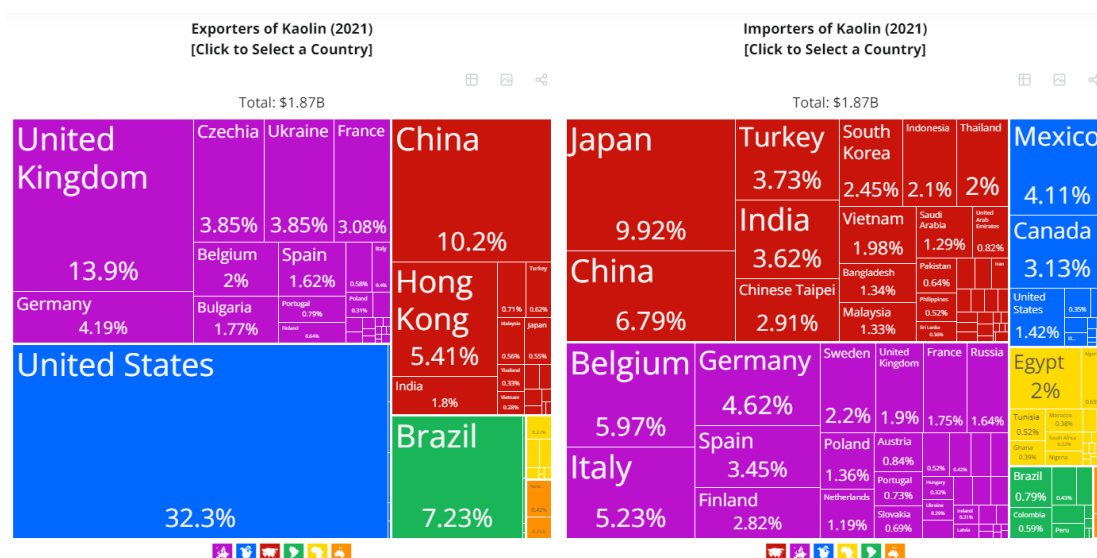
Als laatste is de productie van alkali-geactiveerde bindmiddelen complex door de moeilijkere verwerkbaarheid en de agressieve chemische stoffen, waardoor gespecialiseerde kennis en extra veiligheidsmaatregelen nodig zijn.

Ondanks deze barrières heeft het gebruik van de bindmiddelen ook voordelen. Zo vertonen de bindmiddelen hoge-temperatuur gedrag, wat ze geschikter maakt voor het gebruik in brandwerende producten. Verder is de CO₂-uitstoot over het algemeen een stuk lager, tot 80%, ten opzichte van de uitstoot van CEM I. Het gebruik van deze bindmiddelen zou de totale CO₂-uitstoot voor cement en beton productie fors kunnen verminderen. Overigens is deze potentiële CO₂ reductie in Europe een stuk geringer omdat de in Europa gangbare CEM III A/B gebruik maakt van een secundaire grondstof, staalslak (gemiddeld in de range van 35% tot 65% voor CEM III A en 66% tot 80% voor CEM III B), waardoor al een reductie van 35% tot 80% CO₂ op de productie van cement gerealiseerd wordt.

5.1.1 Kaoliniet klei

Uit het rapport van Muehleisen (2020) blijkt dat een deel van de AAMs geproduceerd wordt met gecalcieneerde klei. Echter bleek uit de interviews dat dit nauwelijks het geval is. Dit heeft ten eerste te maken met de relatief hoge kosten van het gebruik van gecalcieneerde klei. Circa 300-500 euro/ton voor gecalcieneerde klei in vergelijking met 100-120 euro/ton voor hoogovenslak (*interview producent bouwmaterialen*). Ook is de reactie van gecalcieneerde klei veel trager door de lage hoeveelheid calcium. Kaoliniet wordt namelijk eerst gecalcieneerd (omzetting hydroxide naar oxide) door verhitting tot 800 °C , waarbij kalk en veldspaten worden toegevoegd voor goede hydraterende eigenschappen. Het duurt langer voordat de gewenste sterkte bereikt is, waardoor deze AAM niet voor alle toepassingen geschikt is.

Daar staat tegenover dat er wereldwijd genoeg klei van hoge kwaliteit (kaoliene klei) beschikbaar is. Grote exporteurs van kaoliene klei zijn bijvoorbeeld Brazilië, de Verenigde Staten en China (OEC, z.d.). Echter, kijkend naar de import van kaoliene klei in Nederland dan blijkt dat ten minste 75% van het totaal vanuit Europa, met name Duitsland, geïmporteerd wordt (zie Figuur 5-1, Duitsland is de 6^e exporteur van kaoliene klei). Dit betekent dat de transportroutes vrij kort zijn. Er worden in Europa zelfs verschillende nieuwe fabrieken gebouwd (klaar rond 2025) voor het produceren van gecalcieneerde klei, waardoor de import vanuit Europa in de toekomst mogelijk nog groter kan zijn (*interview producent bouwmaterialen*).



Figuur 5-1 OEC 2021, Grootste exporteurs en importeurs van kaoliene klei

Wanneer we nog verder inzoomen op de beschikbaarheid van kaoliene klei binnen Nederland, dan kan geconcludeerd worden dat deze in erg geringe mate aanwezig is. Uit vorige hoofdstukken bleek dat een kaolinietgehalte van ten minste 40% het beste resultaat

geeft voor klei-toepassingen binnen de betonsector. Echter bevat Nederlandse klei over het algemeen maar tussen de 0%-10% kaoliniet, met af en toe een uitschieter naar 20% (*interview TNO; Griffioen, 2016*). Bovendien is de Nederlandse cementindustrie (op dit moment) niet ingericht op het gebruik van kaoliene klei:

Interview producent bouwmaterialen:

“De Nederlandse industrie is eigenlijk te duur om cement te maken, al zouden we, kijkend naar de beschikbaarheid van klei en kalksteen, gecalcineerde klei kunnen maken. Gecalcineerde klei wordt nu voornamelijk gemaakt in oude, niet in gebruik zijnde, cementovens.”

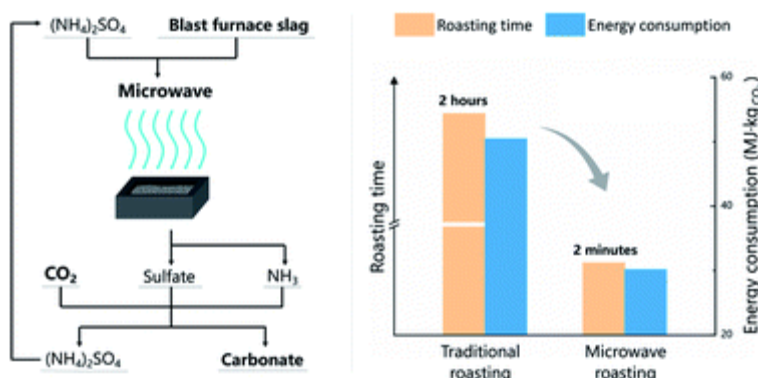
6 Toekomstige ontwikkelingen

6.1 Productie staalslakken

De transitie naar een groene staalproductie loopt langs twee lijnen:

1. Het vervangen van fossiele brandstoffen voor het verhitten door alternatieve verwarmingsbronnen
2. Een grotere focus op het recyclen van staal

De 1^e lijn, het vervangen fossiele brandstoffen voor verhitten, kan met 'biomass en microwave heating' (zie Figuur 6-1). De kwaliteit van de staalslakken voor CEM III A/B (Ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) wordt niet beïnvloed door deze transitie (*interview Rio Tinto*).



Figuur 6-1 Het proces

Langs de 2^e lijn, het recyclen van staal op basis van pig iron en scrap (ruwijzer/gietijzer en schroot), wordt in Europa in hoofdzaak gebruik gemaakt van twee technieken:

- DRI: direct reduced iron unit met waterstof als reductor, in combinatie met
- Electric Arc Furnace (EAF) of Submerged Arc Furnace (SAF), in combinatie met toevoegingen om onzuiverheden in het staal te verwijderen en/of de kwaliteit van de slakken te verbeteren (kalkzandsteen, bauxiet, kolen)

In Europa wordt DRI en EAF gecombineerd met waterstof (en stroom) als energiebron om de CO₂ footprint voor de staalproductie te verminderen.

Global Energy Monitoring (GEM) wiki⁵:

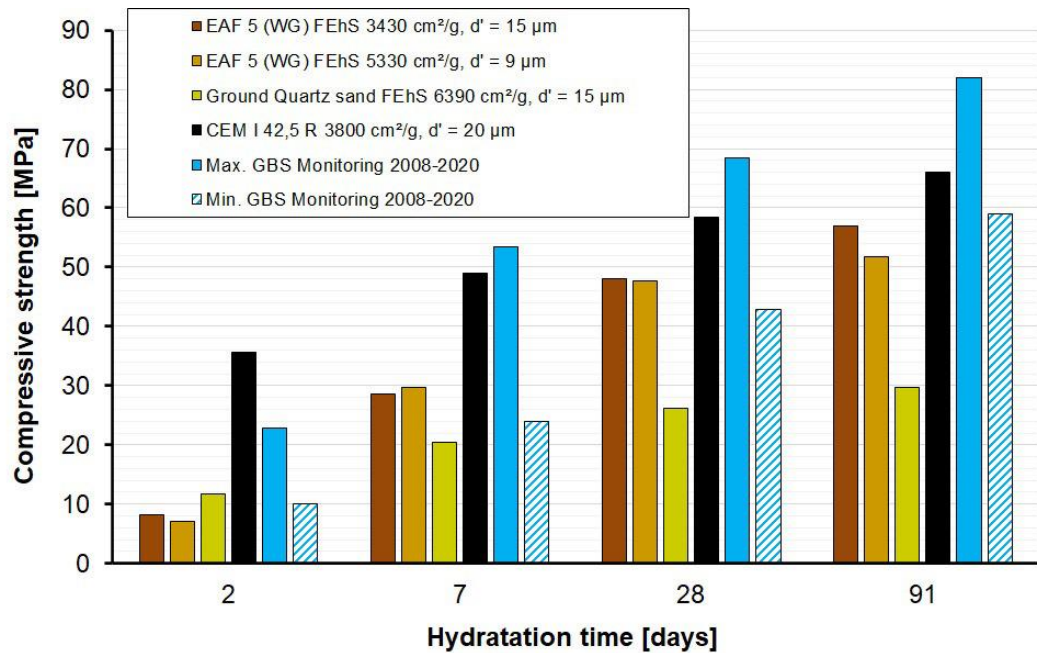
The EAF route has the potential of emitting only a fifteenth of the average Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace (BF-BOF) plant emissions per tonne of steel produced, making it one of the most promising green steel production processes. The level of emissions reduction depends on the energy and iron inputs. To melt the iron and produce steel, electricity generated from either fossil fuels or low-carbon energy sources can be used. To reduce emissions within the primary (ironmaking) process, EAF plants can use DRI or scrap. When utilizing low-emissions electricity to power the process, and low-emissions iron as the resource input, emissions in the steel production process can be almost eliminated.

Scrap-based EAF production results in approximately 0.3 tonne CO₂/ tonne crude steel on average, while natural gas-based DRI-EAF production results in approximately 1.4 tonne CO₂/ tonne crude

⁵ https://www.gem.wiki/Electric_arc_furnace

steel. Coal can also be used in DRI-EAF production, with average emissions ranging from 1.3-1.8 t CO₂/t crude steel for the COREX/FINEX process and 3.2 t CO₂/t crude steel for the rotary oven process. Hydrogen-based DRI-EAF production results in an average 0.71 t CO₂/t crude steel, though actual emissions vary widely depending on the production route of the hydrogen.

Bedrijven in Europa die productiefaciliteiten ombouwen, of van plan zijn om te bouwen, zijn onder andere ArcelorMittal, Tata en Thyssenkrupp (zoals de H2 Green Steel alliantie, met een in 2025 operationele DRI fabriek in Boden, Zweden). Het verschuiven van een proces op basis van Blast Oxygen Furnace (BOF) staalproductie naar DRI, EAF of SAF zorgt voor het verdwijnen van GGBFS. DRI produceert geen slakken, en EAF en SAF produceren metallurgische slakken. Deze EAF en SAF slakken kunnen mogelijk als vervanger voor GGBFS dienen, maar ze reageren minder snel met als gevolg een lagere sterkte (zie Figuur 6-2).



Figuur 6-2 Strength development of mortars acc. to EN 196-1 (EAF slag/CEM I 42,5 R = 50/50, w/c = 0,50), uit FEHS BUILDING MATERIALS INSTITUTE, *The steel production transformation process in Europe: New slag types will substitute granulated blast furnace slag (2023)*, ZKG 6/2023

Een bijkomende uitdaging is dat concentraties metalen en het uitloggedrag van metallurgische slakken in cement afwijkend is van GGBFS. Vooral het aanwezige chroom kan tot gebruiksbeperkingen leiden (waarbij het van wezenlijk verschil is in welke vorm chroom aanwezig is (Cr-VI v.s. Cr-III)).

Het in voldoende mate beschikbaar zijn van GGBFS voor CEM III is een belangrijke randvoorwaarden voor een net zero CO₂ neutrale cement productie. De International Renewable Energy Agency (IRENA) roept in een white paper op tot een sector koppeling tussen de staalindustrie en de cement industrie, om te voorkomen dat de optimalisatie in één sector ten koste gaat van een daarvan afhankelijke sector. De transitie in de staalindustrie langs de 1^e lijn (het vervangen van fossiele brandstoffen) zonder een volledige omschakeling naar de transitie over de 2^e lijn (staal recycling) is voor de productie van hydraulische binders voor cement uit GGBFS dan ook wenselijk.

6.2 Beschikbaarheid materialen

6.2.1 Poedervliegias

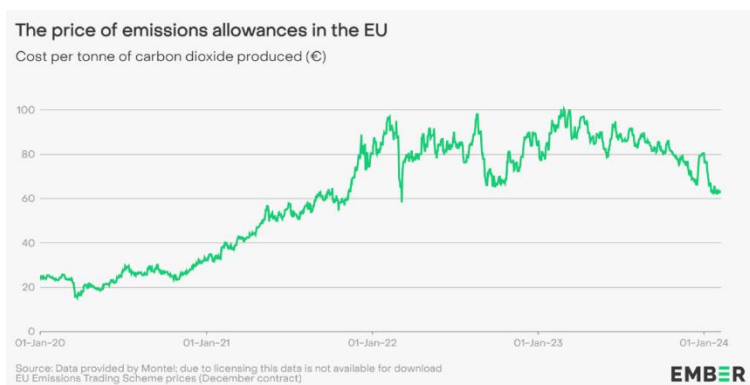
Zoals al een aantal keer in dit rapport benoemd is, zal de beschikbaarheid van poederkoolvliegias en gegranuleerde hoogovenslak in de huidige vorm afnemen. De productie van poederkoolvliegias staat in Europa onder druk door Europees klimaatbeleid en de afbouw van het gebruik van kolencentrales (*interview TNO*).

6.2.2 Gegranuleerde hoogovenslak (GGBFS)

Door verandering van de productie van staalslakken, is er minder gegranuleerde hoogovenslak (GGBFS) uit BOF en zijn de EAF en SAF metallurgische slakken mogelijk niet langer geschikt voor gebruik als klinker. In het rapport van de Global Energy Monitor (GEM) (Swalec & Grigsby-Schulte, 2023), wordt een trendbreuk in de geplande investeringen in nieuwe staalproductie faciliteiten tot 2050 geconstateerd (van 67% BF-BOF en 33% EAF in 2022 naar 57% BF-BOF en 43% EAF in 2023). Om de doelstelling van International Energy Agency's (IEA) Net Zero by 2050 te halen is een verhouding van minimaal 53% EAF en 42% BF-BOF nodig (GEM rapport 2023). Ruwweg houdt dit in dat de productie van GGBFS in Europa in 2050 zal halveren. Een voorlopig hardnekkig probleem is de overcapaciteit voor staalproductie op de wereldmarkt (zie ook paragraaf 2.2.2., WCA Annual Conference 2023). In Europa zal de transitie naar minder BF-BOF en meer EAF geholpen moeten worden met subsidies en importtarieven voor niet Europees staal. De tariefmuur kan mede ingevuld worden door het beprijsen van de CO₂ emissie (*interview TNO*). Of dit ook inhoudt dat GGBFS slakken geproduceerd buiten Europa meer belast moeten worden is niet onderzocht, maar op de wereldmarkt lijkt de beschikbaarheid van GGBFS tot 2050 niet beperkt te zijn.

6.2.2.1 De impact van de CO₂ emissie prijs op de net zero CO₂ by 2050 ambitie voor staal en cement.

Het beprijsen van CO₂ emissies is een instrument waarmee Europa de prijs voor 'groen' staal en cement concurrerend kan maken. Als voorbeeld wordt de impact van de CO₂ emissieprijs op de transitie van BOF naar EAF geschetst. De CO₂ emissie prijs in Europa heeft tussen 2000 en 2023 gevarieerd tussen 15,5 euro per ton tot 100,2 euro per ton (zie Figuur 6-3).

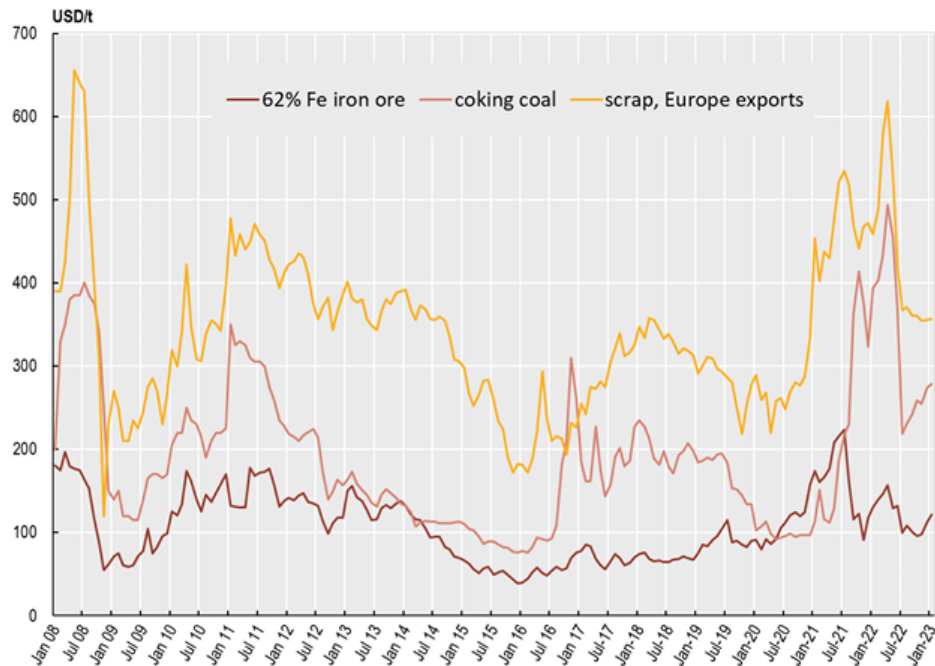


Figuur 6-3 De EU emissierechtenhandel prijzen van januari 2000 tot januari 2024

Staal geproduceerd met BOF stoot gemiddeld 2,0 ton CO₂ per ton staal uit, gerecycled staal omgesmolten in een EAF heeft een uitstoot van 0,4 ton CO₂ per ton staal⁶. De CO₂ winst is gemiddeld 1,6 ton CO₂ per ton staal, wat een CO₂ emissiewaarde van 24,8 - 160,2 euro/ton staal oplevert.

⁶ Sustainable Ships: <https://www.sustainable-ships.org/stories/2022/carbon-footprint-steel#:~:text=The%20Blast%20Furnace%2DBasic%20Oxygen,tonne%20of%20steel%20produced%20respectively>.

De prijs voor de grondstoffen voor staal is eveneens sterk variabel. Ter referentie is in Figuur 6-4 de ontwikkeling van de grondstof prijs in de periode 2008 - 2023 weergegeven. Voor de productie van 1 ton staal is 770 kg kool (coking coal) nodig (CRM Alliance⁷).



Note: The iron ore price series is Platt's "Forwards / SGX 62% Fe Iron Ore cash-settled swaps (dry metric tonne) / China import CFR Tianjin port USD /t"; the coking coal price series is Refinitiv's "Premium Coking Coal Australia"; the scrap price series is Platts "Scrap / Shredded / N.Europe domestic delivered UDS /t"
Source: Platts Steel Business Briefing (SBB), Refinitiv.

Figuur 6-4 OECD 2023 rapport, Steel market developments Q2 2023, price for steel making raw materials.

Op basis van de ruwe grondstof prijzen en de CO₂ emissie kosten zoals beschreven in Figuur 6-4, kan een globale indruk verkregen worden van de bandbreedte voor de totale ruwe kosten met emissierechten voor BOF versus EAF, zie Tabel 6-1.

Tabel 6-1 Prijsvariatie voor grondstoffen ijzerproductie met de kosten voor de CO₂ emissie

Prijs BOF	USD	EURO	prijs per ton staal (EURO)	Kosten per ton staal met CO ₂ emissie		
Erts (62% ijzer), min	50	45	73	minimale CO2 kosten	maximale CO2 kosten	
Erts (62% ijzer), max	220	200	323			
Coal (770 kg/ton), min	80	73	56	minimale CO2 kosten	maximale CO2 kosten	
Coal (770 kg/ton), max	500	455	350			
Totale grondstofprijs per ton staal MIN			129	160	330	
Totale grondstofprijs per ton MAX			452	483	652	
			Gemiddeld	322	491	406
Prijs EAF	USD	EURO	prijs per ton staal (EURO)	minimale CO2 kosten	maximale CO2 kosten	
Scrap (100% ijzer), min	180	164	164	170	204	
Scrap (100% ijzer), max	650	591	591	631	631	
			Gemiddeld	400	417	409

Tabel 6-1 is indicatief: kosten zoals investeringen en de waarde van het staal dat gemaakt wordt zijn niet meegenomen. Wat opvalt is dat het beprijzen van de CO₂ emissie in een markt met hoge grondstofprijzen het verschil kan maken in kostprijs tussen BOF en EAF staal.

⁷ CRM Alliance: <https://www.crmalliance.eu/coking-coal#:~:text=The%20most%20commonly%20applied%20process,steel%20through%20this%20production%20route.>

De CO₂ emissie-beprijzing werkt omgekeerd door voor de productie van cement. De bij BOF vrijkomende GGBFS slakken kunnen tot massa 80% (CEM III B) van de hoogovenklinker vormen. Deze CO₂ besparing, uitgezet tegen de emissie kosten per ton klinker, kan verrekend worden in de grondstof kosten (met CO₂ emissiekosten) voor staal (Tabel 6-2).

- CEM I (Portlandcementklinker): 800 kg/ton
 - CEM III B (Hoogovenklinker, 80%): 40 kg/ton
- Verskil 760 kg/ton

Tabel 6-2 Prijsvariatie voor grondstoffen ijzerproductie met de kosten voor de CO₂ emissie verrekening CO₂ impact GGBFS slakken op klinkerproductie

CO2 emissie prijs per ton	EURO		besparing per ton Hoogoven		
MIN	16		-11.8		
MAX	100		-87.2		
Prijz BOF			Kosten per ton staal met CO2 emissie		
USD	EURO	prijs per ton staal (EURO)	minimale CO2 kosten	maximale CO2 kosten	
Totale grondstofprijs per ton staal MIN			129	149	243
Totale grondstofprijs per ton staal MAX			42	471	565
Gemiddeld			310	404	357
Prijz EAF			Kosten per ton staal met CO2 emissie		
USD	EURO	prijs per ton staal (EURO)	minimale CO2 kosten	maximale CO2 kosten	
Scrap (100% ijzer), min			164	170	204
Scrap (100% ijzer), max			591	631	631
Gemiddeld			400	417	409

Door de CO₂ besparing in de cementindustrie door het gebruik van GGBFS mee te nemen in de kostenbalans voor de staalindustrie vervalt een groot deel van het kostenvoordeel van EAF bij hoge CO₂ emissierechten.

6.2.2.2 Impact transitie staalindustrie op de cementproductie in Nederland

Voor cementproductie geldt dat sector koppeling tussen de staal- en cementindustrie van groot belang is, en dat een transitie naar EAF voor staal afgewogen moet worden tegen de verminderde beschikbaarheid van GGBFS slakken voor hoogovenklinker. De schatting is dat in 2050 de hoeveelheid GGBFS halveert door de transitie naar EAF.

Uitgaande van een totaal volume hoogovencement van 60% van de 5 mln. ton cement per jaar in Nederland (zie paragraaf 2.1) wordt momenteel 60% markt x 5 mln. ton totaal cement x 60% GGBFS gehalte CEM A/B) = 1,8 mln. ton GGBFS gebruikt. Indien hiervan 50% wegvalt dient de markt voor alternatieve binders circa 900.000 ton per jaar te zijn.

6.2.3 Kalksteen

Zoals besproken in respectievelijk hoofdstuk 3.3 en 4.3, kan kalksteen mogelijk in LC³ cement of als SCM verwerkt worden. In de groeve in Winterswijk zou nog zo'n 2 miljoen ton aan kalksteen aanwezig moeten zijn. Met een jaarlijkse productie van 60.000 ton, betekent dit dat men nog circa 25 jaar vooruit kan met deze voorraad (Aalders & Duyverman, 2019). Bovendien is het bedrijf dat opereert in deze groeve, Sibelco, bezig om de vergunning uit te breiden. In het westelijke deel van de groeve zou namelijk voor nog zo'n 70 jaar kalksteen beschikbaar zijn (Aalders & Duyverman, 2019). Hoe ver de onderhandelingen over deze uitbreiding inmiddels gevorderd zijn, is niet bekend. Als het lukt om ook deze uitbreiding rond te krijgen is er dus veel kalksteen beschikbaar dat mogelijk als alternatief voor portlandcement gebruikt kan worden. Echter zou de beton- en cementindustrie dan wel concurreren met andere sectoren, omdat de kalksteen op dit moment voornamelijk gebruikt wordt als vulstof in asfalt en als meststof. De kalkzandsteen dient vaak nog bewerkt of gezuiverd te worden, een proces wat momenteel niet economisch rendabel is. Ook kan gebruik in cement ertoe leiden dat andere sectoren minder kalksteen kunnen aankopen, en dat is ongewenst.

6.2.4 Glasafval

Een ander alternatief SCM is glasafval. In totaal wordt jaarlijks zo'n 330.000 ton glas niet gerecycled in Nederland, waarvan het grootste deel wordt geëxporteerd (hoofdstuk 4.4). Deze hoeveelheid zou mogelijk naar de beton- en cementindustrie kunnen gaan, echter zitten er veel verontreinigingen in dit glasafval. In plaats daarvan zou ook gekeken kunnen worden naar de mogelijkheid om 'goed' glas, wat gerecycled wordt, te gebruiken als SCM. Er zouden beleidsdoelen geformuleerd kunnen worden dat bijvoorbeeld ¼ deel, zo'n 200.000 ton, van het recyclebare materiaal als SCM ingezet wordt. De verwerkingskosten zouden door deze opschaling omlaag gaan en ook wordt de kwaliteit van het glaspoeder beter, wat voordelig kan zijn voor volgende levensfasen van het beton. Echter betekent dit wel dat er meer nieuw glas geproduceerd zou moeten worden, omdat er minder glas gerecycled wordt. Het is dus belangrijk om eerst te onderzoeken in hoeverre de onzuiverheden een probleem zijn, en vervolgens welke optie de kleinste impact op het klimaat heeft.

6.2.5 AEC bodemas

Het gebruik van AEC bodemassen is controversieel. Onderzoeksgroepen zoals aan de TU Delft verwachten dat bijna 100% van de AEC bodemassen geschikt zijn voor gebruik in cementeuze materialen (vaak als binder, soms als filler) (*interview TUD*). Andere partijen zijn voorzichtiger, maar zien kansen om met aanpassingen in de naverwerking van enkele euro's per ton de bodemassen toe te passen in relatief laagwaardige toepassingen (als in tegels) (*interview producten bouwmaterialen*). Daar staat het risico tegenover dat AEC bodemassen in 2e of 3^e levensfase de concentratie verontreinigingen in beton doen oplopen (*interview TNO, CROW-CUR Richtlijn 2:2021*). Daarmee is het gebruik van AEC bodemas een voorbeeld waarom sector koppeling (zie ook paragraaf 6.1) noodzakelijk is. In de totale waardeketen kan het rendabel zijn om meer te investeren in de afvalverwerking (AEC bodemas) om hoogwaardig circulair beton te kunnen produceren met minder klinker of GGBFS. Met een jaarlijkse productie van circa 2 miljoen ton AEC bodemas (Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT), 2019) is er voldoende volume om GGBFS als hydraulische binder (deels) te vervangen (zie Tabel 2-1). De import en export van 'ander hydraulisch cement' bedraagt (slechts) 938 kiloton, zie Tabel 2-1. Stel dat het percentage AEC bodemas 25% is (Sarabèr, 2021) dan is er circa 250 kiloton per jaar nodig. Dit is iets meer dan 10% van de AEC bodemas productie. Echter dient er over de sectorgrenzen heen gekeken te worden om de investering in een betere naverwerking van AEC bodemas van de grond te krijgen.

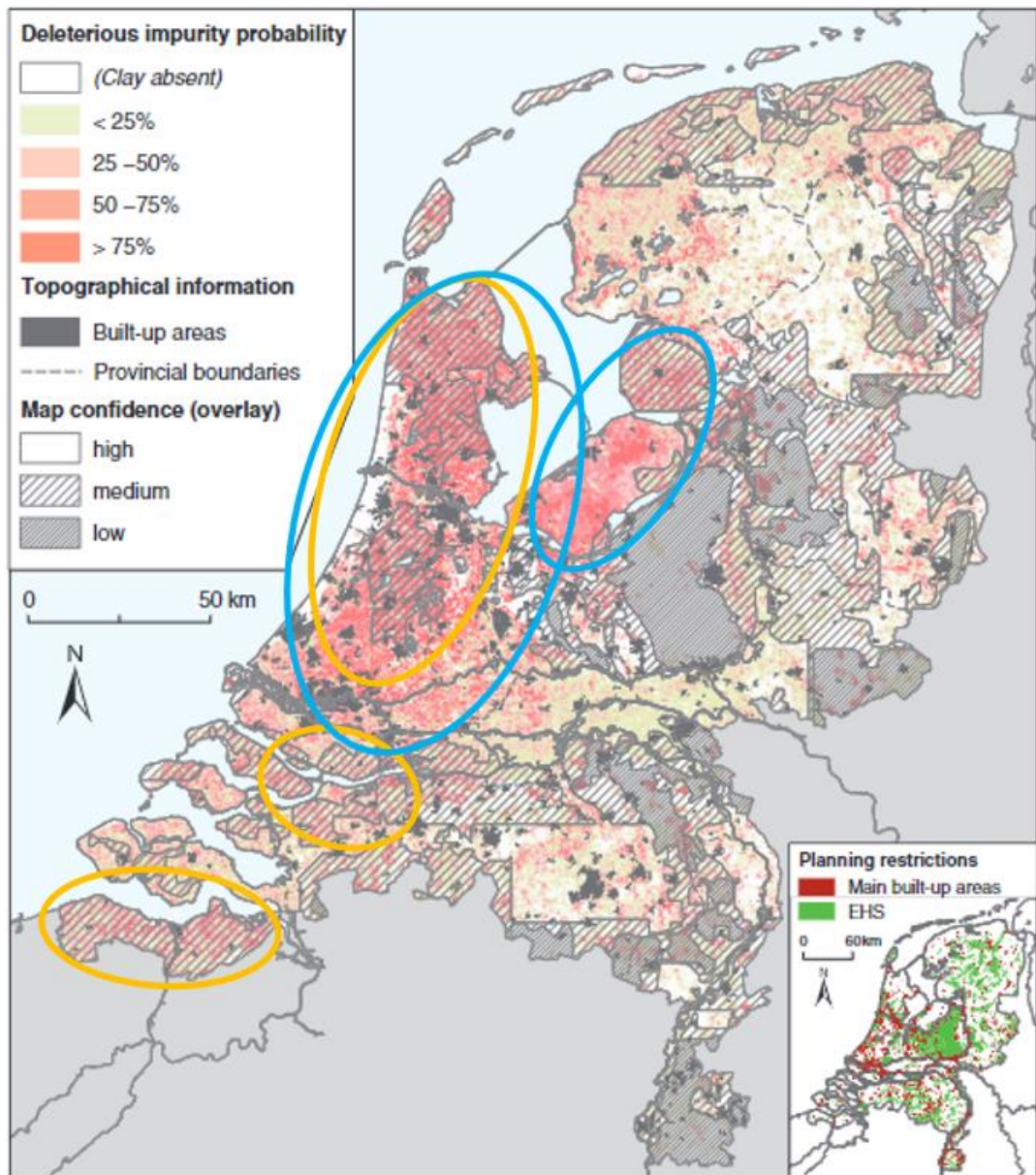
6.2.6 Gecalcineerde klei

Als laatste is het aannemelijk dat gecalcineerde klei in de toekomst vaker als alternatief in LC³ cement of als SCM gebruikt zal gaan worden. Zoals besproken in hoofdstuk 4.5 is er in Nederland nauwelijks klei beschikbaar met een voldoende hoog kaoliniet-gehalte. Wel lijkt er voldoende klei met een andere samenstelling aanwezig te zijn, voornamelijk illiet (Griffioen, 2016). Illiet kan als eventueel als geopolymeer toegepast worden (Buchwald, 2009).

Buchwald, 2009:

Common clays like illite/smectite clays are suitable as raw material for the preparation of geopolymer binders. Besides kaolinite, 2:1 clay minerals such as illite and smectite yield reactive silicate and aluminate species after calcination. The firing temperature and conditions should be chosen in accordance to the clay mineral as well as its dehydroxylation and recrystallisation behaviour.

In Figuur 6-5 zijn de onzuiverheden in de Nederlandse klei te zien. Voornamelijk in Noord-Holland en Flevoland is veel organisch materiaal aanwezig, waardoor de klei niet geschikt is voor gebruik als cementbinder. In Noord-Holland en delen van Zuid-Holland en Zeeland is de aanwezigheid van schelpmateriaal juist een probleem.

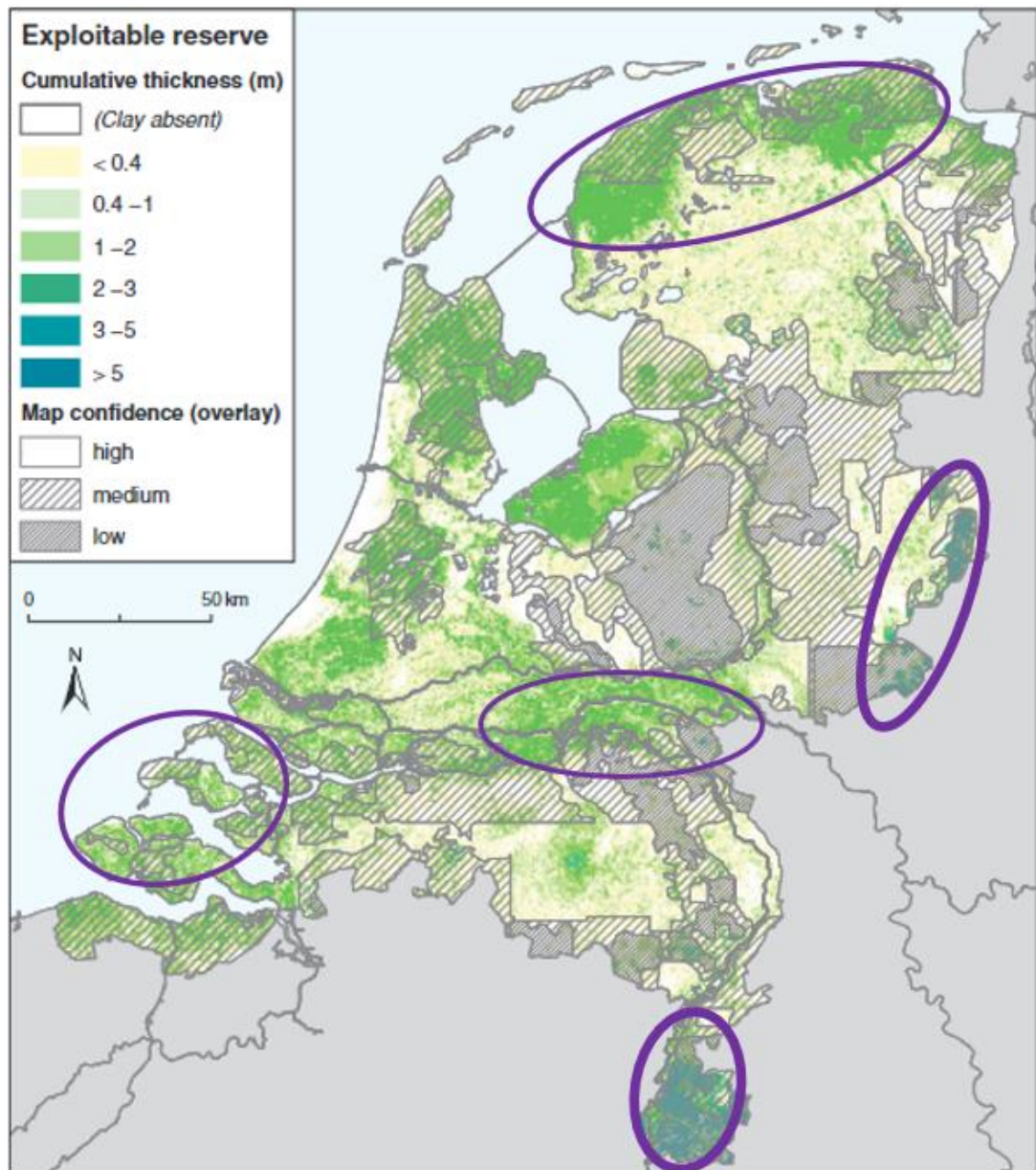


Figuur 6-5 Overzicht van de locaties in Nederland waar de kans op onzuiverheden in de klei erg groot is. In de oranje gedeelten zit veel schelp materiaal en in de blauwe gebieden zit veel organisch materiaal.
Bron: Van der Meulen et al. (2007).

In het noordelijk kustgebied, het oostelijke deel van Gelderland en Overijssel, het oostelijke deel van het rivierengebied, het westelijke deel van Zeeland en het zuiden van Limburg zijn ook kleilagen van voldoende dikte aanwezig, zie ook Figuur 6-6. Van deze locaties vallen de meest zuidelijke en oostelijke locaties af, doordat er teveel zwavel en sulfaat aanwezig is in de klei (Mol et al., 2012). Verder is de kans groot dat het chloride gehalte in de kustgebieden te hoog is.

Dan rest alleen de klei in het rivierengebied, met name het oostelijk deel van de Rijn en de Rijnakken. Deze klei bestaat voor meer dan 80% uit illiet en de rest is kaoliniet (Griffioen et al., 2016). Het voldoet dus niet meteen aan de vereiste van ten minste 40% kaoliniet, maar het is mogelijk om deze klei te verrijken met kaoliniet (Muehleisen, 2020), of illiet als geopolymer te gebruiken (Buchwald, 2009). Als er vanuit gegaan wordt dat de klei in dit

gebied ongeveer $55 \times 15 = 825 \text{ km}^2$ in beslag neemt, met een dikte van 1 m, en 1% hiervan winbaar is, dan zou dat leiden tot een hoeveelheid van tussen de 1×10^7 en 2×10^7 ton aan klei. Verder wordt er vanuit de rivieren ook slib aangeleverd. De hoeveelheid beschikbare klei lijkt dus geen probleem te vormen, echter is het wel belangrijk dat er gekeken wordt naar de kwaliteit en samenstelling van de klei en in hoeverre deze geschikt is voor het gebruik in LC³ cement of als SCM.



Figuur 6-6 Overzicht van de locaties in Nederland waar kleilagen van voldoende dikte aanwezig zijn (paarse cirkels). Hoe groener de achtergrondkaart, hoe dikker de kleilagen. Bron: Van der Meulen et al. (2007).

6.2.7 Business test case winning illiet uit sediment

De door de Rijn aangevoerde klei in sediment bestaat voor circa 80% uit illiet, zie Tabel 6-3.

Tabel 6-3 Illiet gehalte in Rijn sediment (Griffioen, 2016)

Table 21. Mineralogical composition (in wt%) of the fractions <0.5, 0.5-2 and 2-10 µm of mud deposited along the Dutch and German coast (derived from Favejee (1951)).

Sample	Fraction <0.5 µm				Fraction 0.5-2 µm				Fraction 2-10 µm				
	Illite	Kaolinite	Montmorillonite	Quartz	Illite + muscovite	Kaolinite	Montmorillonite	Quartz	Illite + muscovite	Kaolinite	Montmorillonite	Quartz	Feldspar
<i>Mud and sediments from the Wadden Sea</i>													
I	c. 80	5-10	c. 10	c. 4	50-60	5-10	5-10	c. 30					
IIa	80-90	5-10	c. 5	c. 4									
IIb	80-90	c. 5	5-10	2-4	50-60	c. 10	5-10	25-30	c. 30	c. 5	c. 5	50-60	c. 5
IIc	80-90	c. 5	3-5	c. 6	c. 60	c. 5	c. 5	c. 30					
III	c. 80	5-10	5-10	c. 4	c. 60	5-10	c. 5	c. 25	c. 60	5-10	c. 5	c. 50	5-10
<i>Suspended matter from the Wadden Sea</i>													
IV	c. 80	5-10	5-10	c. 6	c. 60	5-10	c. 5	c. 30					
V	80-90	5-10	c. 5	4-6	c. 60	5-10	c. 5	c. 30	20-30	c. 5	c. 5	c. 60	5-10
<i>Mud from bottom sediments in the North Sea and marshes in Zeeland</i>													
VI	80-90	5-10	3-5	c. 2	c. 50	c. 15	5-10	c. 30	c. 20	c. 10	c. 5	c. 50	c. 10
VII	80-90	c. 5	5-10	2-4	c. 60	c. 10	5-10	c. 25					
<i>Fluvial clays</i>													
VIIIa	>95	-	<3	<1	>90	<1	<3	>50	>50	<1	<3	>90	<1
VIIIb	c. 90	3-5	<3	c. 5	c. 60	c. 5	c. 5	30-40	c. 30	3-5	<3	c. 60	c. 5
VIIIc	70-80	5-10	<3	c. 15	c. 15								
VIIId	80-90	c. 10	<3	c. 5	40-50	c. 10	c. 5	c. 40					

I Recent wadden mud or sand reclamations along the coast of Groningen province.
 II Mud from bottom sediments in the Wadden Sea: a, mussel banks; b, mud with shell fragments; c, mussel pellets.
 III Old clay banks in the Wadden Sea.
 IV Mud from suspended matter taken during ebb tide, south of Schiermonnikoog.
 V Mud from suspended matter sampled in the tidal inlets of the Wadden Sea.
 VI Mud from bottom sediments of the North Sea, south and southeast of the Dogger Bank and the German Bight.
 VII Mud from marshes in Zeeland province.
 VIII Mud in suspended matter from the rivers: a, Ems; b, Weser; c, Elbe; d, Rhine.

In Nederland wordt baggerspecie gebaggerd in het rivierengebied (uit het Beleidsstandpunt verwijdering baggerspecie (1993): "In de periode 1991-2010 komt in totaal ruim 490 miljoen in situ m³ onderhoudsspecie vrij"). Dit komt neer op circa 25 mln. m³ baggerspecie per jaar, op basis van in situ m³ is dit tevens circa 25 mln. ton d.s. sediment per jaar.

Het meeste sediment wordt afgezet in het benedenstroomse gebied (de hier afgezette sedimenten zijn niet geschikt vanwege onzuiverheden). Indien aangenomen wordt dat 5% afgezet wordt in de oostelijke Rijn Uiterwaarden (zie het kansrijke gebied in Figuur 6-6) is de "opslibbing" 1.25 mln. ton sediment per jaar. Sediment heeft een gemiddeld kleigehalte van 25% (standaard bodem). Jaarlijks sediment er circa **300.000 ton bruikbare klei** (in de vorm van 80-90% illiet) in het oostelijke Rijn Uiterwaarden gebied.

Deze klei moet gesegregeerd worden, dat wil zeggen gescheiden worden van de silt- en zandfractie. De zandfractie kan verkocht worden. Gebruik makend van de investerings- en onderhoudskosten van een operationele zandscheidings- en slibindik faciliteit (AMORAS, in de haven van Antwerpen) kan een schatting gemaakt worden van de kosten per ton illiet.

Jaarlijkse capaciteit AMORAS: 600.000 droge stof -> NL: 1,25 mln ton sediment: **x2**

Kosten:

AMORAS 22 mln. € per jaar (exploitatie) -> NL: 44 mln. € per jaar

Opbrengsten:

Ook 40% zand terugwinning -> NL: 500.000 ton zand
 prijs gezeefd IJsselmeerzand, € 6,90 ton
 opbrengst +/- 3,5 mln. € per jaar

Kosten voor kleifracctie (25%) -> NL netto 40,5 mln. € per jaar
300.000 ton klei
 illiet, kosten per ton 135 euro/ton d.s.

Deze kosten zijn in de grootte orde van de kaolinetprijs in Noord Amerika (Statistica Research Department, 2024).

Als basis voor kalksteen-gecalcineerde klei-cement (LC³) is grootschalige winning van illiet, samen met uitbreiding van de kalksteen winning in Winterswijk (zie paragraaf 4.3), mogelijk. Niet onderzocht is in hoeverre illiet gebaseerde gecalcineerde klei cementen een afwijkende uithardingstijd en sterkte heeft. Voor relatief laagwaardige betonproducten (tegels) is illiet als basis voor LC³ waarschijnlijk geschikt.

6.3 Normen/toetskaders

In de voorafgaande paragrafen, 2.2.1 (International Energy Agency (IEA)), 2.2.3 (Global Cement and Concrete Association (GCCA)), 6.1 (IRENA) en 6.2 (Global Energy Monitoring) is ingegaan op de internationale ambitie om zowel voor de productie van staal als voor de productie van cement in 2050 tot een net zero CO₂ emissie te komen.

Vertaald naar norm- en toetskaders vraagt dit op diverse niveaus aanpassingen in norm- en mogelijk toetskaders. Als leidraad wordt Figuur 2-3 genomen (zie paragraaf 2.2.3), waarin het pad naar een net zero CO₂ emissie is onderverdeeld in zeven categorieën.

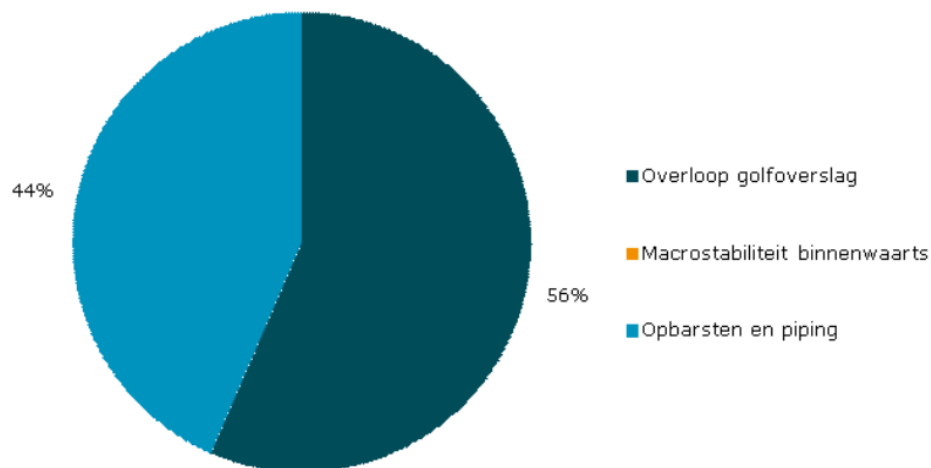
6.3.1 Categorie 1: Efficiëntie in ontwerp en constructie (22% CO₂ reductie)

Veel kunstwerken worden met een marge voor diverse faalmechanismen ontworpen (*interview producent bouwmaterialen*). Nieuwe inzichten in faalmechanismen worden vertaald naar richtlijnen, zoals opgenomen in de ontwerphandboeken van CROW en in de Nederlandse bijlage van NEN-EN1990. Dit proces kan meerdere jaren duren. Een voorbeeld van een opiniestuk hoe deze inzichten sneller te vertalen naar ontwerprichtlijnen is voor kademuren geschreven door promovendus Alfred Roubos (TU Delft, 2019).

De uitdaging ligt in het minimaliseren van faalkansen. In het geval van een cement met een minder bekende hydraulische binder kan nader onderzoek gewenst zijn om de faalkans te verkleinen. Een voorbeeld waarin een faalkans analyse gebruikt wordt is bij het berekenen van het overstromingsrisico voor dijken. Tabel 6-4 en Figuur 6-7 geven een concreet voorbeeld van een faalkans analyse van een dijk in een dijkkring.

Tabel 6-4 Berekende faalkansen (kans per jaar) per faalmechanisme en op ringniveau de overstromingskans.

Type waterkering	Faalmechanisme	Faalkans (per jaar)
Dijk	Overloop en golfoverslag	1/13.000
	Macrostabiliteit binnenwaarts	< 1/1.000.000
	Opbarsten en piping	1/18.000
	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	
Overstromingskans		1/7.400



Figuur 6-7 Procentuele bijdragen van verschillende faalmechanismen aan de som van de faalkansen

Indien de golfoverslag en daarmee het risico op falen (Tabel 6-4) een gegeven is (de dijk wordt niet verhoogd of verzwakt) heeft het nut om het risico op opbarsten en piping nader te onderzoeken. In het meest gunstige geval (geen risico) daalt de overstromingskans van 1/7.400 jaar naar 1/18.000 jaar. Dit houdt in dat in dit geval de dijk niet verzwakt hoeft te worden om aan de norm van 1/10.000 jaar te voldoen. Om tot 22% CO₂ reductie te komen in het ontwerp en de bouw is onderzoek naar de reductie van faalmechanismen en de adaptatie van nieuwe inzichten in ontwerprichtlijnen een belangrijke pijler. Een voorbeeld waar een niet primair faalmechanisme (het kunnen betreden van het werk) tot overdimensionering kan leiden werd tijdens een interview gegeven:

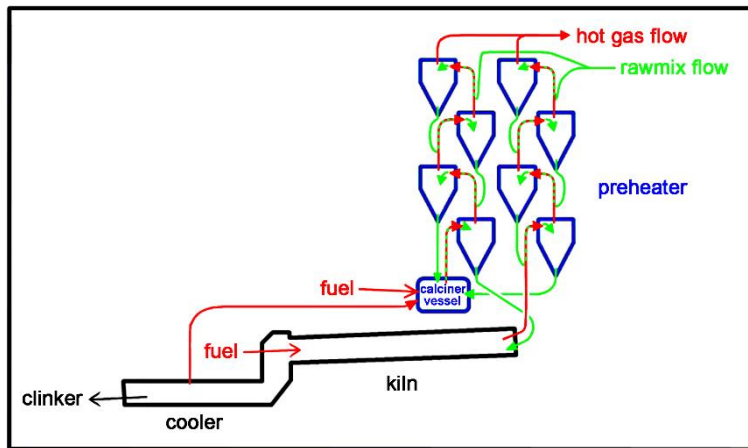
Interview producent bouwmaterialen:

“Verder is het goed om te noemen dat overdimensionering in de betonwereld een groot probleem is. Eigenlijk is er vaak maar 30 MPa nodig, maar wordt er meer gevraagd zodat er na één dag al op gewerkt kan worden (faalmechanisme is hier het niet na 1 dag kunnen betreden van het werk). Als we er vanuit gaan dat we pas na 2 à 3 dagen op het beton kunnen, dan hebben we minder bindmiddel nodig. Daar kan veel meer rekening mee gehouden worden. De filler kan dan meer dan gehalveerd worden en er is geen oversterkte.”

In Nederland is de CROW (Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechiek) de partij die tussen opdrachtgevers en opdrachtnemers samen met kennisdragers voorstellen doet voor aanpassingen in regelgeving. Publicaties zoals de CROW-CUR Richtlijn 2:2021 (Beoordelingsystematiek grondstoffen op geschiktheid voor circulair beton) getuigen van een bereidheid vanuit overheden en bedrijfsleven om innovaties te testen en te beoordelen op kansen en risico's. Zo is de CROW-CUR Richtlijn 2:2021 gebaseerd op de Green Deal 030 - Verduurzaming Betonketen, en vastgelegd in het betonakkoord met een breed gedragen en onafhankelijke definitie van duurzaam beton.

6.3.2 Categorie 2: Efficiëntie in betonproductie (11% CO₂ reductie)

Efficiëntie winst is op meerdere vlakken te realiseren. Veel landen produceren cement op lokale schaal in inefficiënte en energie consumerende ovens. Door schaalvergroting en investeringen in ovens met pre-heaters en precalcineren kan circa 50% bespaard worden op de CO₂ emissie (3.06 GJ per ton klinker (inclusief precalcineren), versus 5.3 tot 7.1 GJ per ton klinker (Taylor, 2006).



Figuur 6-8 Oven met preheaters en precalcinatie

In dit licht is de opmerking uit het interview van de producent van bouwmaterialen relevant. De productie van klinker met supplementaire materialen voor productie van cement wordt meestal batchgewijs in oude, niet meer voor productie gebruikte, ovens gedaan. Deze zijn in Nederland vaak verwijderd. Er is daarom in Nederland minder speelruimte om te experimenteren met supplementaire cementeuzen materialen en andere geopolymeren.

6.3.3 Categorie 3: Besparingen in cement en binders (9% CO₂ reductie)

Categorie 3 betreft het vervangen van klinker door alternatieven zoals vliegas, GGBFS, gemalen kalkzandsteen of alternatieve supplementaire cementeuzen materialen. Deze roadmap heeft betrekking op de klinker binder ratio.

In de hoofdstuk 3 (alternatieve cementen), 4 (alternatieve supplementaire cementeuzen materialen), 5 (geopolymeren) en 6 (EAF en SAF metallurgische slakken) zijn de alternatieven voor klinker aan bod gekomen. In Europa is de mogelijke CO₂ besparing door het toepassen van alternatieven beperkt, het gebruik van CEM III A/B (GGBFS) heeft CEM I grotendeels vervangen. De grote uitdaging is de afname van GGBFS door de transitie in de staalindustrie en het vinden van vervangers voor GGBFS.

De kaders over wat er in beton toegepast mag worden, zijn vastgelegd in de betonnormen en daaraan gerelateerde documenten: onder andere NEN 8005 (met de Nederlandse normatieve bepalingen van de samenstelling van beton volgens NEN-EN 206), CUR-Aanbeveling 112 (uitvoeringstechnische bepalingen ter aanvulling van NEN-EN 206-1 + NEN 8005 en NEN 6722) en BRL 2506 (kwaliteitsborging Recyclinggranulaten). Dit rapport heeft niet tot doel een volledig overzicht te geven van de regelgeving rond en typering van beton (voor een indruk van typering, zie de milieuklassen en onderverdeling voor beton op basis van risico's in

Tabel 6-5), maar heeft tot doel om de mogelijkheden en beperkingen om alternatieven voor klinkers toe te passen te schetsen aan de hand van de vanuit regelgeving **drie hoofdeisen aan beton**.

Tabel 6-5 Milieuklassen beton

Exposure classes	Risico wapeningscorrosie	Onderverdeling
X0...	Geen risico	X0
XC...	Carbonatatie	XC1, XC2, XC3, XC4
XD...	Chloride, niet afkomstig uit zeewater	XD1, XD2, XD3
XS...	Chloride uit zeewater	XS1, XS2, XS3
XF...	Vorst-/dooiaantasting met of zonder dooizouten	XF1, XF2, XF3, XF4,
XA...	Chemisch agressief milieu	XA1, XA2, XA3

Een eis kent vaak meerdere aspecten: per eis wordt er, als voorbeeld, op één deelaspect ingegaan.

Eis 1: Samenstellingseisen, zoals een minimaal klinkergehalte

Voor de milieuklassen XC3, XC4, XF2, XF3 en XF4 geldt een minimum klinkergehalte van 25%. De reden hiervoor is dat beton met cement of een combinatie van cement en vulstoffen met een klinkergehalte van minder dan 25% erg gevoelig is voor carbonatatie, en daarmee het risico op corrosie als ook de gevoeligheid voor aantasting door vorstdooi-wisselingen. Voor wat betreft de vulstoffen gaat het hierbij om kalk consumerende vulstoffen zoals poederkoolvliegias en hoogovenslak (Voor CEM III/B mag worden aangenomen dat deze 25% klinker bevat).

Perspectief: De minimale 25% klinkereis voor deze klassen is gebaseerd op een analyse van faalmechanismen. Onderzoek naar het optreden van deze faalmechanismen bij alternatieven voor klinkers kan tot bijstelling van de norm leiden (of zoals in de NEN 8005 herziening van 2021, tot de introductie van nieuwe betonsoorten).

Eis 2: Functionele eisen, zoals een karakteristieke druksterkte na 28 dagen

Er zijn diverse klassen met betrekking tot druksterkte, van C12/15⁸ tot C90/105. De druksterkte wordt beoordeeld na 28 dagen uitharden. Voor sommige alternatieven is bekend dat de sterkteontwikkeling langer duurt (zie Figuur 6-2 met de hydratatie tijd voor alternatieve slakken).

Perspectief: Als een langere uithardingstijd geen kritische factor is kan aanpassing van de norm naar langere tijdsschalen het gebruik van CO₂ vriendelijke alternatieven voor klinker stimuleren.

Eis 3: Omgevingseisen, zoals de uitloging naar de omgeving

Van beton bestemd voor betonconstructies die in contact kunnen komen met hemelwater, grondwater en/of oppervlaktewater, moet door de producent worden aangetoond dat dit beton het grondwater niet meer vervuult dan het Besluit bodemkwaliteit toestaat. Beton valt onder de vormgegeven bouwstoffen. De emissie is veelal diffusie gecontroleerd, waarmee de emissie vastgesteld wordt door een diffusieproef (NEN 7375 – 64 dagen).

Onder de omgevingswet (ingegaan op 1-1-2024 zijn onder het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) de meeste uitgangspunten van het Besluit en de Regeling bodemkwaliteit overgenomen. Deze wordt ter referentie gehanteerd. Veelal wordt beton niet op individuele toepassingen getoetst maar wordt met productcertificaten gewerkt. Deze certificaten volgen een beoordelingsrichtlijn (BRL), bv. BRL 9338 voor cementgebonden mortels.

Perspectief: De systematiek van toetsen laat ruimte voor alternatieven voor klinker, indien de emissies voldoet en de productiewijze voldoende homogeen is voor een productcertificaat.

⁸ C = Concrete: Karakteristieke cilinderdruksterkte in N/mm² // Karakteristieke kubusdruksterkte in N/mm²

Dit laatste is voor een aantal alternatieven zoals glasafval, biomassa as en AEC as vaak lastig te realiseren. Oplossingen in de vorm van een betere voor- en nabewerking van deze alternatieven zou de heterogeniteit deels kunnen ondervangen, en vraagt samenwerking tussen sectoren.

Kritische noot: De CROW-CUR Richtlijn 2:2021 (Beoordelingssystematiek grondstoffen op geschiktheid voor circulair beton) geeft aan dat de scope voor circulair gebruik van beton moet zijn dat deze geen belemmering vormt voor de volgende levensfase, dus 'beton blijft herbruikbaar in (alle) beton'. De methodiek om te toetsen op vormgegeven bouwstoffen is geen garantie dat er in de keten geen oplading plaatsvindt. Dit wordt ook verwoord in het interview met TNO:

Interview TNO:

"Het risico van het opladen van de betoncyclus is namelijk als volgt: door toevoegen van relatief kleine hoeveelheden alternatief materiaal, ga je het elke cyclus een klein beetje meer vervuilen. Dan krijg je uiteindelijk een stroom materiaal die niet meer voldoet aan het besluit bodemkwaliteit, waardoor je een veel grotere afvalstroom krijgt."

De CROW-CUR Richtlijn 2:2021 stelt een tussenbeoordeling op het betongranulaat of de poederfractie van de grondstof voor. Dit zal mogelijk het aantal alternatieven voor klinker beperken (te denken valt aan beperkingen voor het toepassen van AEC bodemas, biomassa as en de EAF/SAF slakken).

Algemeen, perspectief normkaders aan de hand van de eisen:

Regelmatige herzieningen van NEN 8005, zoals in 2021 voor nieuwe cementen (NEN-EN 197-5: portlandcomposietcement CEM II/C-M en composietcement CEM VI) laat zien dat ontwikkelingen in de samenstelling van cement en beton in Nederland mogelijk zijn.

De aanbeveling uit de CROW-CUR Richtlijn 2:2021 met een mogelijk beperkende invloed op beschikbare alternatieven voor klinker betreft het voorstel voor een tussen twee levensfase in beoordeling van betongranulaat of de poederfractie van de grondstof. Het voordeel is dat deze beoordeling meer garanties geeft dat beton circulair toepasbaar blijft.

6.3.4 Categorie 4: besparingen in klinker productie (11% reductie)

Categorie 4 betreft twee sporen, alternatieve manieren voor het verhitten van de oven (met biomassa, elektriciteit of waterstof) en CO₂ vrije grondstoffen zoals gerecycled beton.

Een transitie naar alternatieve manieren van verhitten heeft een beperkte impact op de productie van cement en beton. In categorie 2 (efficiency) is het voorbeeld gegeven van een aanpassing van de oven voor een meer energie efficiënte werkwijze. Het proces is echter niet wezenlijk veranderd. Transitie naar andere warmtebronnen zoals waterstof of elektrisch verwarmen hebben dan ook geen directe invloed. Wel zullen eisen aan de inrichting (zoals de oven en de opslag van brandstoffen zoals waterstof) mogelijk veranderen.

Betonrecycling is behandeld in paragraaf 6.3.1.3, waarbij de aanbeveling uit de CROW-CUR Richtlijn 2:2021 om tussen twee levensfase van beton in een tussenbeoordeling op het betongranulaat of de poederfractie van de grondstof uit te voeren een wijziging in de toetskaders inhoudt.

6.3.5 **Categorie 5: Het afvangen, gebruiken en opslaan van CO₂ (36% reductie)**

Carbon capture and storage (CCS) en CCS met 'utilisation' van CO₂ (CCUS) hebben de grootste impact op het bereiken van een net zero CO₂ emissie. Dit geldt niet alleen voor beton maar ook voor de productie van staal.

De normen en toetskaders om dit mogelijk te maken hebben echter geen directe relatie met het produceren van klinker of alternatieven voor klinker. Uiteraard zijn er verschillen in CO₂ emissie tussen klinker en de alternatieven (zie ook categorie 3 en 4) en zijn er aanpassingen nodig aan de oven (zie ook categorie 1) om afvang mogelijk te maken, maar het beoordelen of opslag in de ondergrond verantwoord en duurzaam mogelijk is valt buiten scope.

6.3.6 **Categorie 6: De-carbonisatie van elektriciteit (5% reductie)**

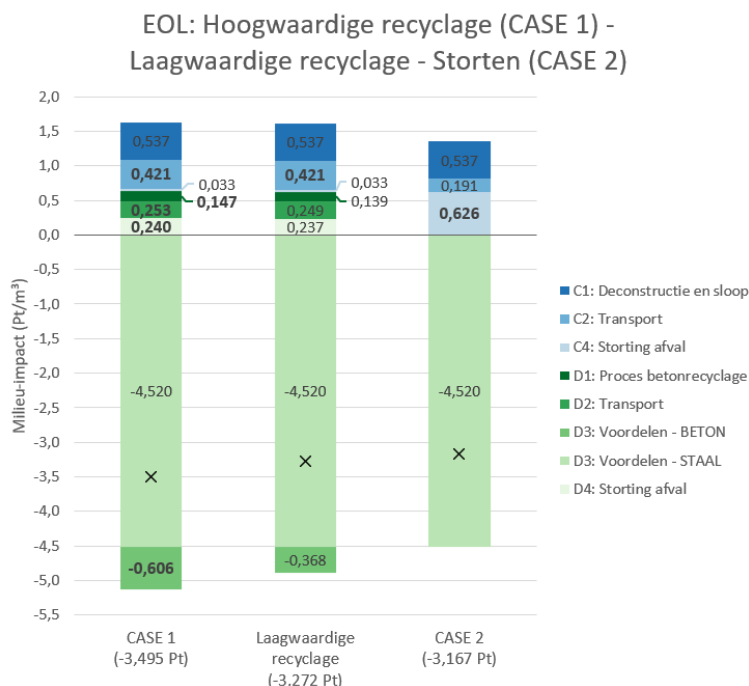
Het inpassen van meer duurzaam opgewekte energie is qua impact op regelgeving vergelijkbaar met categorie 4 (besparingen in klinker productie). Elektrificatie vraagt aanpassingen aan de oven en pre-heaters, maar verandert het product niet. Qua normen en toetskaders worden geen aanpassingen voorzien.

6.3.7 **Categorie 7: CO₂ opname (6% reductie)**

Bij het verwerken van beton neemt beton CO₂ op. In het IPCC 6th Assessment Report, August 2021, worden hier carbon credits voor toegekend. De methodiek is gepubliceerd door IVL Zweden⁹. Er wordt uitgegaan van 20% van het theoretisch maximum (maximum is 525 kg CO₂/ton, i.e. 20% is 105 kg CO₂/ton klinker).

In Life Cycle Assessments (LCA) wordt deze vorm van CO₂ opname meegewogen, b.v. in de vorm van storten na breken als alternatief voor hoogwaardige beton recycling. In Figuur 6-9 is een voorbeeld hiervan weergegeven.

⁹ Tier 1 CO₂ uptake models for concrete: <https://www.ivl.se/projektwebbar/co2-concrete-uptake/calculation-models/tier-1-calculation-model.html>



Figuur 6-9 Suzanne Kelem, Thesis 'Invloed van de eindelevensduurbehandeling op de milieu-impact van betonnen constructies' (2022), Universiteit Gent, Vergelijking van de milieu-impact van drie mogelijke eindelevensduurbehandelingen van beton. De netto-impact is aangegeven met een kruis

In Nederland vormt de LCA een onderdeel van de milieukostenindicator (MKI). Met behulp van de MKI kan duurzaamheid en circulariteit op een heldere en meetbare manier worden samengevat in één cijfer. De MKI geeft niet enkel CO₂-uitstoot weer, maar kijkt naar de algehele milieubelasting in de levenscyclus van de (beton)producten. De MKI-waarde wordt afgeleid van een life cycle analysis (LCA) en vormt samen met het toegepaste percentage secundaire materialen het milieuprofiel van een product.

Voor betonproducten en betonmortel is de BRL K11002 opgesteld. Deze beoordelingsrichtlijn houdt concreet in dat er wordt gekeken naar de transportafstanden van grondstoffen naar de productielocatie en hoeveel energie er gemoeid is bij de productie. Een quick scan van de BRL leert dat CO₂ opname door verwerking van beton conform de IVL methodiek niet is meegewogen in de MKI score. Het is ter overweging om deze weging mee te nemen in een herziening van de BRL K11002 en te laten toetsen voor de MKI score.

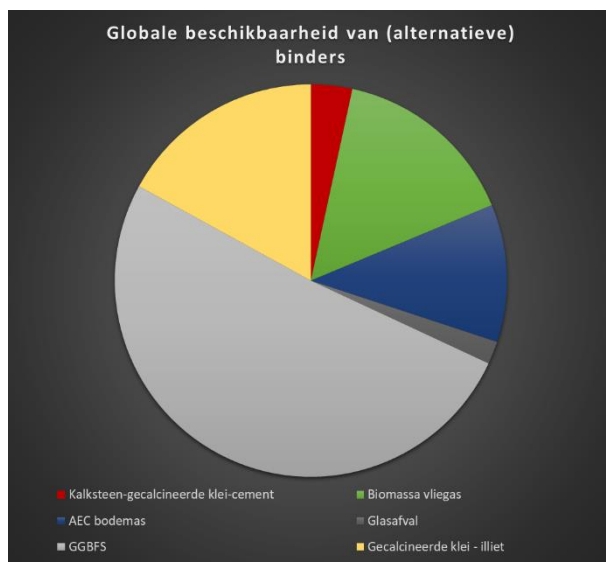
7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusie

Het doel van dit rapport was om te verkennen welk perspectief Nederland heeft om in 2050 met eigen middelen op een duurzame manier bindmiddel voor cement, of alternatieven voor cement, te produceren. Op basis van de in de Hoofdstukken 3 tot en met 6 beschreven alternatieve binders en de in Nederland winbare/recyclebare fracties kan een globaal overzicht gemaakt worden van (alternatieve) binders, ervan uitgaande dat de hoeveelheid GGBFS in 2050 gehalveerd (Tabel 7-1 en Figuur 7-1).

Tabel 7-1 Globaal overzicht van (alternatieve) binders op basis van Hoofdstuk 3 – 6.

Hoofdstuk binder	volume (ton)	bijzonderheden
<i>Alternatieve cementen</i>		
3.1 Beliet	0	in NL nihil (wordt niet in NL gewonnen)
3.2 CSA	0	in NL nihil, nodig zijn aluminiumrijke grondstoffen
3.3 Kalksteen-gecalcineerde klei-cement	60000	winning Winterswijk
3.4 overige alternatieve cementen	0	in NL nihil (mineralen zoals wollastoniet worden niet gewonnen)
<i>Alternatieve supplementaire cementeuzen materialen (SCMs)</i>		
4.1 Biomassa vliegas	270000	uitgaande van 10% van de totale biomassa vliegas in NL
4.2 AEC bodemas	200000	uitgaande van 10% van de totale AEC bodemas in NL
4.3 Kalksteen	0	al meegenomen, zie 3.3
4.4 Glasafval	33000	uitgaande van 10% van het niet gerecycled glas
4.5 Gecalcineerde klei - kaoliniet	0	in NL komt nauwelijks kaoliniet klei voor
4.6 Andere slakken dan GGBFS	0	EAF en SAM slakken mogelijk geschikt, nog onvoldoende onderzoek
<i>Geopolymeren/alkali-geactiveerde bindmiddelen</i>		
5.1 Gecalcineerde klei - kaoliniet	0	zie 4.5
<i>Toekomstige ontwikkelingen</i>		
6.1 GGBFS	900000	50% van huidige GGBFS productie
6.2.1 Poederkoolvliegas	0	kolencentrales worden in NL uitgefaseerd
6.2.2 GGBFS	0	al meegenomen, zie 6.1
6.2.3 Kalksteen	0	al meegenomen, zie 3.3
6.2.4 Glasafval	0	al meegenomen, zie 4.4
6.2.5 AEC bodemas	0	al meegenomen, zie 4.2
6.2.6 Gecalcineerde klei - illiet	300000	grootschalige winning van sediment
	1763000	ton totaal (alternatieve) binders
	1800000	ton huidig (GGBFS)



Figuur 7-1 Verhouding (alternatieve) binders in 2050 op basis van globaal overzicht (Tabel 7-1).

De schattingen zijn globaal, niet elk alternatief voor binders is even geschikt (zowel qua materiaaleigenschappen als ook qua eigenschappen zoals uithardingstijd, heterogeniteit of emissies bij recycling), of al voldoende ontwikkeld om toegepast te worden. De conclusie is dat een groot deel van de alternatieven nodig zijn wil Nederland in 2050, bij een halvering

van de GGBFS capaciteit, voldoende binders binnen de eigen landsgrenzen produceren om de huidige cementproductie van 5 mln. ton per jaar in stand te houden.

7.2 Aanbevelingen

Een sector koppeling tussen de staal- en cement industrie is nodig om enerzijds de CO₂ emissie in beide sectoren terug te dringen (beide hebben een net zero CO₂ emissiedoelstelling voor 2050) en anderzijds het circulair gebruik van grondstoffen te bevorderen (de huidige hoogoven staalslakken zijn de basis als binder voor het meeste cement in Nederland, voor het alternatief voor staalproductie is de geschiktheid van de slak onzeker). De International Renewable Energy Agency (IRENA) roept hier ook toe op.

Een vergelijkbare sector koppeling met de afvalverbranders en biomassa verwerkers (de verbrandingsassen) dient aanbeveling om te onderzoeken, dit zijn de belangrijkste bronnen voor alternatieve binders in Nederland. Uit de interviews blijkt dat de assen technisch en milieuhygiënisch geschikt gemaakt kunnen worden, maar dat de kosten door de verbranders te hoog gevonden worden. Afgezet tegen de kosten voor cementproductie (en gegeven de verwachte afname van hoogoven staalslak) zijn de meerkosten relatief gering.

Veel alternatieve binders, waaronder de assen (biomassa, poederkool of AEC) en alternatieve slakken hebben verontreinigingen die verstorend zijn voor gebruik in cement. Deels kunnen deze door voorbewerking verwijderd worden (zoals zouten of sulfaat), maar ook kan de cement/betonketen in de 2^e en 3^e levenscyclus beïnvloed kunnen worden door deze verontreinigingen. De CROW-CUR Richtlijn 2:2021 (Beoordelingssystematiek grondstoffen op geschiktheid voor circulair beton) geeft een handvat om hier (in de vorm van een toets op het gebroken product) rekening mee te houden. Aanbevolen wordt om deze systematiek breder te toetsen en op te nemen in de eisen aan gerecycled cement en beton.

In Nederland is kalksteen aanwezig (Winterswijk). Het verdient aanbeveling om te onderzoeken of deze kalksteen gebruikt kan worden als SCM of in LC³ cement.

Hoewel het gebruik van illiet klei als geopolymeer niet de voorkeur verdient, is dit kleimineraal in grote hoeveelheid en relatief betaalbaar winbaar in Nederland. In België (Antwerpen) en Duitsland (Hamburg) zijn operationele installaties om op grote schaal de kleifractie uit sediment te winnen. Een verkennend receptuuronderzoek op basis van de in deze faciliteiten toegepaste technieken kan inzicht geven of illiet als mogelijke alternatieve binder kan worden ingezet.

8 Literatuurlijst

360 Research Reports, Global supplementary cementitious materials industry research report, growth trends and competitive analyses 2022-2028, SKU ID: QYR-21959212 | Publishing Date: 03-Nov-2022

Aalders, S., & Duyverman, H. (2019). Weerkomm' De kalksteengroeve in Winterswijk: Interview met Gerard ten Dolle, site manager van Sibelco op woensdag 27 maart 2019. *Grondboor & Hamer, Staringia*, 16(1), 143–146. <https://natuurtijdschriften.nl/pub/1021529>

Buchwald A., M. Hohmann, K. Posern, E. Brendler, The suitability of thermally activated illite/smectite clay as raw material for geopolymer binders, *Applied Clay Science*, Volume 46, Issue 3, 2009, Pages 300-304, ISSN 0169-1317, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.08.026>.

Bueno, E. T., Paris, J. M., Clavier, K. A., Spreadbury, C. J., Ferraro, C. C., & Townsend, T. G. (2020). A review of ground waste glass as a supplementary cementitious material: A focus on alkali-silica reaction. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120180>

Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS). (2022). Afvalbalans, afvalsoort naar sector; nationale rekeningen [Dataset; Webpagina]. In CBS Statline. <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/83554NED/table>

CROW-CUR Richtlijn 2:2021. Beoordelingssystematiek grondstoffen op geschiktheid voor circulair beton

EN 197-1:2011. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements

Eurostat, "Total production by PRODCOM list (NACE Rev. 2) – annual data", 2019, <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>

Eurostat. (2024). Air Emissions Accounts for Greenhouse Gases by NACE Rev. 2 Activity - Quarterly data (env_ac_aigg_q) [Dataset; Internet]. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/ENV_AC_AIGG_Q

Fortune Business Insights, Cement Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Type (Portland, Blended, and Others), By Application (Residential and Non-Residential), and Regional Forecast, 2023-2030, Report ID: FBI101825, Publishing Date: October-2023

Fortune Business Insights, Cement Market Size, Share & Industry Analysis, By Type (Portland, Blended and Others), by application (Residential and Non-Residential), and Regional Forecast, 2024-2032, Report ID, FBI101825, Publishing Date: April-2024

Griffioen, J., G. Klaver and W.E. Westerhoff, The mineralogy of suspended matter, fresh and Cenozoic sediments in the fluvio-deltaic Rhine–Meuse–Scheldt–Ems area, the Netherlands: An overview and review, *Netherlands Journal of Geosciences*, Volume 95, Issue 01, March 2016, pp 23 – 107, DOI: 10.1017/njg.2015.32

Hanemaaijer, A., Kishna, M., Koch, J., Lucas, P., Rood, T., Schotten, K., & van Sluisveld, M. (2023, 28 november). *Integrale circulaire economie Rapportage 2023*. PBL Planbureau voor

de Leefomgeving. <https://www.pbl.nl/publicaties/integrale-circulaire-economie-rapportage-2023>

IRENA (international Renewable Energy Agency). (2022). Sector Coupling: A Key Concept for Accelerating the Energy Transition. In *IRENA.org*.
<https://www.irena.org/Events/2022/Dec/Sector-coupling-a-key-concept-for-accelerating-the-energy-transition>

Jang, J. G., & Lee, H. (2016). Microstructural densification and CO₂ uptake promoted by the carbonation curing of belite-rich Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 82, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.01.001>

Juenger, M., Snellings, R., & Bernal, S. A. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 122, 257–273. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>

Kwaliteitsdienst Beton. (2019). *Vliegas, poederkoolvliegas*. kwaliteitsdienstbeton.
<https://www.kwaliteitsdienstbeton.nl/opleiding/betontechnologie/vliegas-poederkoolvliegas/>

Milieu Centraal. (z.d.). *Glas: wat mag in de glasbak en wat niet?*
<https://www.milieucentraal.nl/minder-afval/afval-scheiden/glas-potten-flessen-en-ander-glas/>

Mol, G. C., Spijker, J., Van Gaans, P., & Römken, P. (2012). Geochemische bodematlas van Nederland. *Wageningen Academic*,
<https://www.wageningenacademic.com/doi/book/10.3920/978-90-8686-743-1>.
<https://doi.org/10.3920/978-90-8686-743-1>

N. Muehleisen, Ontwikkelingen betreffende hoofdbestanddelen voor klinkergebaseerde cementen en geopolymeren, SGS INTRON, referentie A117240/BO20200251/GWe/IIa, 2020

OECD (The Observatory of Economic Complexity). (z.d.). *Kaolin (HS: Kaolin) Product Trade, Exporters and Importers | The Observatory of Economic Complexity*. OECD World.
<https://oec.world/en/profile/hs/kaolin>

OECD, Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, Paris, 2019, <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.

OECD, Data Explorer, data for 2021, <https://data-explorer.oecd.org/>

Provis, J.L., (2018), Alkali-activated materials, *Cement and Concrete Research*, Volume 114, Pages 40-48, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>.

Rijksoverheid. (z.d.). Bodemassen en slakken. Bodemrichtlijn.
<https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/bodemassen-en-slakken>

Rijkswaterstaat. (2022). Afvalverwerking in Nederland, gegevens 2020. In *afvalcirculair*.
<https://www.afvalcirculair.nl/publicaties/publicatiearchief/>

Roubos A.A. (2019), Enhancing reliability-based assessments of quay walls, ISBN 978-94-6375-534-4, <https://doi.org/10.4233/uuid:40632b7a-970e-433d-9b4e-ff2d2249b156>

Sarabè A., 2021, AEC-vulstof voor beton: nieuwe regelgeving voor een nieuwe vulstof, CROW werkgroep 031

Sayed, M. M. (2021). *What is the difference between the supplementary cementitious materials and alkali-activated concrete?* ResearchGate.
https://www.researchgate.net/post/What_is_the_difference_between_the_supplementary_cementitious_materials_and_alkali-activated_concrete

SBR CURnet (2015). *Beoordelingsmethodiek geschiktheid alternatieve grondstoffen voor beton*, Delft augustus 2015

Song Qifeng, Ming-Zhi Guo, Tung-Chai Ling, (2022), A review of elevated-temperature properties of alternative binders: Supplementary cementitious materials and alkali-activated materials, *Construction and Building Materials*, Volume 341, 127894, ISSN 0950-0618,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127894>.

Statistica Research Department. (2024). *Average price of kaolin in the U.S. from 2010 to 2023*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/248194/average-price-of-kaolin/#:~:text=Kaolin%20%E2%80%93%20additional%20information&text=The%20price%20of%20kaolin%20worldwide,dollars%20per%20ton%20in%202022>.

Swalec, C., & Grigsby-Schulte, A. (2023). *Pedal to the Metal 2023*. In *Global Energy Monitor*. <https://globalenergymonitor.org/report/pedal-to-the-metal-2023-time-to-shift-steel-decarbonization-into-high-gear/>

Taylor, M. Cecilia Tam and Dolf Gielen, (2006), *Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry*, IEA-WBCSD workshop, Paris, 4-5 September 2006

Tosti, L., Van Zomeren, A., Pels, J., Damgaard, A., & Comans, R. (2020). Life cycle assessment of the reuse of fly ash from biomass combustion as secondary cementitious material in cement products. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118937.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118937>

Van Der Meulen, M. J., Maljers, D., Van Gessel, S., & Gruijters, S. (2007). Clay resources in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 86(2), 117–130.
<https://doi.org/10.1017/s001677460002312x>

WIVA P&G. (2023). *ZEUS: Zero emissions through sector coupling*. WIVA.
<https://www.wiva.at/project/zeus/?lang=en>

9 Bijlagen

- Matrix – alternatieven
- Interview TNO
- Interview TU Delft
- Interview TCKI
- Interview Rio Tinto
- Interview producent bouwmaterialen

	Alternatief	Uit SGS rapport of andere literatuur?	Onzuiverheden en heterogeniteit	Druksterkte in MPa	Buigsterkte in MPa	Potentieel volume (NL)	TRL niveau	CO2-uitstoot t.o.v. portlandcementklinker	Opmerkingen
Alternatieve cementen	Belietrijke portlandcement	SGS rapport	Over het algemeen erg homogeen [6]	Voor 23 wt% beliet: 61 zonder carbonatatie en 75 met; voor 48 wt% beliet: 57 zonder en 97 met [6]	Voor 23 wt% beliet: 7 zonder carbonatatie en 11,5 met; voor 48 wt% beliet: 7,5 zonder en 14,5 met [6]	Aangezien er geen nieuwe stoffen toegevoegd worden, blijft het beschikbare volume gelijk aan die van portlandcement. Er wordt alleen minder kalksteen gebruikt	7	< 10%	Toegelaten onder ASTM C150 type IV, lage-temperatuur-portlandcement. Er kunnen scheuren ontstaan bij dikkere constructies
	Calciumsulfoalmetaat cement (CSA) en Beliet-calciumsulfoalmetaat-ternesiet (BCT)	SGS rapport	de specifieke retarder die gebruikt is, kan een aantal eigenschappen beïnvloeden [5]	53,9 MPa na 3 dagen [5], maar de mechanische sterkte wordt beïnvloed door het type en de hoeveelheid retarders, en de sulfaat fase [9]	7,5 MPa na 3 dagen [5], maar de mechanische sterkte wordt beïnvloed door het type en de hoeveelheid retarders, en de sulfaat fase [9]	Kalksteen wordt gedeeltelijk vervangen door een aluminiumrijke bron zoals bauxiet. De geschatte bauxiet reserves wereldwijd liggen tussen de 55 en 75 miljard ton in in Afrika (32%), Oceanië (23%), Zuid Amerika en het Caribisch gebied (21%), Azië (18%), en overig (6%) [11]	5 tot 7	< 25%-30%	Voor een hoger ye'elimate-gehalte zijn meer dure aluminiumrijke grondstoffen nodig; BTC goedkoper door minder aluminiumrijke grondstoffen
	Kalksteen-gecalcineerde klei-cement (LC3)	SGS rapport	De hoeveelheid kalksteen die reageert is afhankelijk van de hoeveelheid en aard van de aluminium. De hoeveelheid kaoliniet beïnvloed de mechanische eigenschappen [4]	Rond de 50 MPa, iets hoger dan gewoon portlandcement [4]	ongeveer gelijk aan gewoon portland cement [4]	Klei (kaoliniet) is wereldwijd en ook in Europa in grote hoeveelheden aanwezig, echter bevat de Nederlandse klei niet genoeg kaoliniet (<i>interview Joris Dijkstra</i>). Kalksteen wordt vanuit buurlanden geïmporteerd, maar ook in Nederland zelf wordt kalksteen gewonnen (60.000 ton per jaar) [1]	7	< 30%	LC3 is pas sinds 2021 onder de Europese norm EN 197-5 toegestaan

	Biomassa vliegas	SGS rapport	De kwaliteit van het vliegas hangt af van de grondstoffen en het type afvalverwerker	Komt overeen met sterkte vereisten van 42.5 en 32.5 Portlandcement (20% en 40% vervanging) [10]	Komt overeen met sterkte vereisten van 42.5 en 32.5 Portlandcement (20% en 40% vervanging) [10]	2,7 miljoen ton/jaar, als alle biomassa meegenomen wordt (2 miljoen ton agrarische biomassa-as inclusief organisch huishoudelijk afval en boomgaardafval, 0,35 miljoen ton onderhouds-biomass en 0,3 miljoen ton industriële biomassa)	1 tot 3	In theorie zou de uitstoot 0 kg CO2/ton bedragen	Zuivere biomassa-as wordt momenteel in de cement- en betonregelgeving niet toegestaan. EN 450-1 laat de gezamenlijke verbranding van poederkool met max. 50% biomassa wel toe.
Alternatieve supplementaire cementeuzen materialen (SCM)	Bodemassen	Andere literatuur	De karakteristieken en reactiviteit van de bodemas hangen erg af van de samenstelling. Het organisch gehalte kan als onzuiverheid grote gevolgen hebben [8]	Beduidend lagere beginsterkte, na 90 dagen vrij gelijke sterkte aan hoogovenslak als SCM. Wel afhankelijk van de hoeveelheid portlandcement die is vervangen door bodemas [8]		totale beschikbare hoeveelheid bodemas in Nederland ligt tussen de 1,5 en 2 miljoen ton per jaar [7], echter is het aandeel dat daadwerkelijk gebruikt kan worden afhankelijk van de kwaliteit van de bodemas	1 tot 3	In theorie zou de uitstoot 0 kg CO2/ton bedragen	Het is belangrijk dat goed wordt gekeken welke bodemassen gebruikt kunnen worden. Namelijk, de verschillende typen verbanders laten verschillende samenstellingen van bodemas achter
	Kalksteen	SGS rapport	Weinig bekend over onzuiverheden. Als alle kalksteen op dezelfde locatie gewonnen kan worden, zal het vrij homogeen zijn	Vrij goed in vergelijking met Portlandcement door verbeterde pakkingsdichtheid	Kan iets lager zijn	Nog 2 miljoen ton beschikbaar in Winterswijk (voorraad van ongeveer 25 jaar) met mogelijke uitbreiding waarbij nog 70 jaar kalksteen gewonnen kan worden [1]. Verder is er in Europa veel kalksteen beschikbaar	9	3 kg CO2/ton in vergelijking met 788 kg/CO2/ton voor CEM I	Gezien de beschikbaarheid van kalksteen en het feit dat het materiaal in de regelgeving wordt toegestaan, kan een hoger vervangingspercentage cementklinker door kalksteen voor 2030 eenvoudig worden toegepast

	Glasafval	SGS rapport	Glasrecycling genereert diverse stromen glasafval; afhankelijk van het type glas kunnen er wat onzuiverheden aanwezig zijn	Vergelijkbaar met standaard cementsoorten [3]	Vergelijkbaar met standaard cementsoorten [3]	1.148.000 ton glasafval in Nederland per jaar. 820.000 ton wordt hergebruikt. Dan blijft 328.000 ton over.	1 tot 3	in theorie zou de uitstoot 0 kg CO2/ton bedragen	Hoewel gemalen glas momenteel niet is toegestaan in de betonregelgeving, blijkt de geschiktheid uit een binnenkort te verschijnen CROW-CUR Aanbeveling voor gemalen AEC-bodemas als vulstof in aardvochtig beton
	Gecalcineerde klei	SGS rapport	Afhankelijk van de locatie waar de klei gewonnen worden	tot 30% vervanging heeft geen nadellige effecten voor sterkteontwikkeling		Kaolien is nauwelijks vindbaar in Nederland, maar illiet is in grote hoeveelheden beschikbaar	9	< 40%-50%	In de verwachte EN 197-5 laat de nieuwe klasse CEM II/C-M het gebruik van gecalcineerde klei toe, wat zou kunnen bijdragen tot een wijdverspreid gebruik
Geopolymeren	Kaolien (klei)	SGS rapport + andere literatuur	Afhankelijk van de locatie waar de klei gewonnen worden	Vergelijkbaar met standaard cementsoorten [2]	Vergelijkbaar met standaard cementsoorten [2]	Kaolien is nauwelijks vindbaar in Nederland, maar illiet is in grote hoeveelheden beschikbaar	5 tot 7	Dit is afhankelijk van de gebruikte precursor en activator	Er wordt jaarlijks 40 miljoen ton metakaolien gevormd, t.o.v. een vraag van 10 miljoen ton. Dit is veelbelovend, maar kosten zijn hoger dan andere alternatieven en aanzienlijke hoeveelheden natriumsilicaat zijn nodig als activator

Referenties in tabel

- [1] Aalders, S., & Duyverman, H. (2019). Weerkomm' De kalksteengroeve in Winterswijk: Interview met Gerard ten Dolle, site manager van Sibelco op woensdag 27 maart 2019. *Grondboor & Hamer, Staringia*, 16(1), 143–146. <https://natuurtijdschriften.nl/pub/1021529>
- [2] Abbas, R., Khereby, M. A., Ghorab, H. Y., & Elkhoshkhany, N. (2020). Preparation of geopolymer concrete using Egyptian kaolin clay and the study of its environmental effects and economic cost. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(3), 669–687. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01811-4>
- [3] Bueno, E. T., Paris, J. M., Clavier, K. A., Spreadbury, C. J., Ferraro, C. C., & Townsend, T. G. (2020). A review of ground waste glass as a supplementary cementitious material: A focus on alkali-silica reaction. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120180>
- [4] Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., & Pillai, R. G. (2018). Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107, 136–151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>
- [5] Glasser, F. P., & Zhang, L. (2001). High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate–belite compositions. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1881–1886. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00649-4](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00649-4)
- [6] Jang, J. G., & Lee, H. (2016). Microstructural densification and CO₂ uptake promoted by the carbonation curing of belite-rich Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 82, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.01.001>
- [7] Rijkswaterstaat. (2022). Afvalverwerking in Nederland, gegevens 2020. In *afvalcirculair*. <https://www.afvalcirculair.nl/publicaties/publicatiearchief/>
- [8] Tang, P., Chen, W., Xuan, D., Zuo, Y. F., & Poon, C. S. (2020). Investigation of cementitious properties of different constituents in municipal solid waste incineration bottom ash as supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120675>
- [9] Tao, Y., Rahul, A., Mohan, M., De Schutter, G., & Van Tittelboom, K. (2023). Recent progress and technical challenges in using calcium sulfoaluminate (CSA) cement. *Cement and Concrete Composites*, 137, 104908. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104908>
- [10] Tosti, L., Van Zomeren, A., Pels, J., Dijkstra, J., & Comans, R. (2019). Assessment of biomass ash applications in soil and cement mortars. *Chemosphere*, 223, 425–437. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.045>
- [11] United States Geological Survey. (2020). *Bauxite and Alumina*. USGS. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/bauxite-and-alumina-statistics-and-information>

TNO Geological Survey of the Netherlands

Datum: 7-12-2023

Geïnterviewde: Joris Dijkstra, senior scientist geochemie Geologische Dienst Nederland (TNO)

Deltares interviewer: Kim Gommans en Arjan Wijdeveld

(De interviews zijn (deels) in het Engels)

Questionnaire:

Background

The goal of this study is to assess the perspective to be self-sufficient in the production of clinker-based concrete in 2050, considering trends and scenarios in the production of binders for Portland cement clinker or alternative alkali activated materials or geopolymers. The report is a follow up of the SGS Intron report 'Ontwikkelingen betreffende hoofdbestanddelen voor klinkergebaseerde cementen en geopolymeren', A117240/R20201150a-NL, 2021 (in Dutch). The focus is on:

- Less well-known clinker alternatives. SGS Intron focused on the more commonly used clinker cement components and some supplementaire cementeuze materialen (SCM)), and their potential volume in NL. Input is asked on:
 - Cement clinker resources (relevant in the context of foreseen changes in production methods)
 - Alkali-activated binders / Geopolymers (mineral by-products, alkaline additives, and an activator)
- The potential to mine minerals in NL,
 - Clay's (preferable kaolinite),
 - Circular economy reclamation of resources (including the potential improvement of waste incineration)
 - Secondary mining (waste dump sites)
- Foreseen changes in production methods, like:
 - the impact of a hydrogen-based economy on (steel) slags
 - Biomass (with or without co-fired fly ash)
 - Potential changes in the waste incineration procedure (industrial waste and/or municipal waste).
- Alternative ways to reduce the CO2 emissions.
 - The clinker emission factor
 - The CO2 impact of alternatives

Questions

- What trends do you see up to 2050 in the availability of the current binders?
 - Cementklinker (now 191.000 ton)
 - Portland cement (now 1.387.000 ton)
 - Different hydraulic cement (now 620.000 ton)
 - Like Granulated slag, or
 - pulverized coal fly ash

... looking at trends in the production of these materials?

- What current sources for alternative binders in concrete do you see in the Netherlands?
 - Beliet-calciumsulfoaluminat (Beliet-(CSA) portlandcementklinker
 - Beliet-calciumsulfoaluminaat-ternesiet (BCT) (Ferriet addition)
 - Hydraulic calcium silicate klinker
 - Calcium silicate klinker with a low calcium content, like wollastonite

- Limestone - calcinated clay cement
- What is your view on the development of supplementaire cementeuze materialen (SCM)?
 - Especially when calcinated clay is abundantly present,
 - Biomass fly ash
 - Glass waste
- What are the developments in alkali-activated binders and geopolymers?
 - Aluminosilicaten (and its precursors)
 - gegranuleerde hoogovenslak, poederkoolvliegias or metakaolin (calcinated kaolinite rich clay)
 - Activatoren
 - natriumhydroxide with natriumsilicaat
- To what extent can recycling of concrete reduce the need for new binders in concrete?

Answers (in Dutch)

De productie van **poederkoolvliegias** staat rechtstreeks onder druk, met name door het Europees klimaatbeleid. Dat beleid geldt niet of indirect voor de productie van **hoogovenslak**, dus hierover kunnen we alleen maar speculeren. Het huidige proces waarbij staalslakken gevormd worden staat wel onder druk, en zal vervangen worden door waterstofproductie. Hierbij vormt voornamelijk de eerste stap in het proces het belangrijkste verschil voor de productie van ruwijzer. Dit zal invloed hebben op het soort en de kwaliteit van de slakken, echter is hier nog weinig over gepubliceerd. Verder is er in Nederland veel discussie over het voortbestaan van de hoogovens.

Portlandcement uit Limburg is er uiteraard niet meer (geen mergelwinning meer). Met betrekking tot de hoeveelheid **mergel** die nog aanwezig is, kunnen er met onze ondergrondgegevens en modellen wel schattingen gemaakt worden. Wat er in theorie nog technisch en economisch winbaar zou zijn, wat een vraag is die jullie mij gesteld hebben, is een ander verhaal en vereist nadere studie. De hoeveelheid mergel die jarenlang gewonnen is, is gedrukt door vervanging van cement door hoogovenslak en vliegias in hoge percentages. Als die vervanging in de toekomst niet meer mogelijk zou zijn, heb je voor dezelfde hoeveelheid cement dus veel meer primaire grondstof nodig. Zelfs in 2007 werd al gespeculeerd over hoelang het nog (economisch) haalbaar zou zijn om mergel te winnen.

In Winterswijk wordt nog **kalksteen** gewonnen. Echter het is mij niet bekend of de toepassing/kwaliteit toereikend is voor gebruik binnen de betonsector. De kalksteen die nu gewonnen wordt, wordt gebruikt voor filler in asfalt en in meststof.

Mijn collega's hebben in 2007 een paper geschreven in het Netherlands Journal of Geosciences over de **klei bronnen** binnen Nederland. Deze studie geeft goede schattingen van de hoeveelheid technisch winbaar klei bestemd voor de keramische industrie en toepassingen zoals dijken is gedaan met een aantal randvoorwaarden, o.a. gehalte OS, inschakeling met veen en winningsdiepte. In deze paper is de fysische betekenis van klei gebruikt, niet mineralogisch. Hiervan zijn de gegevens beperkt, terwijl dit voor de toepassing in beton vermoedelijk relevant is. Over het algemeen is het kaoliniet gehalte in Nederlandse klei nog minder dan 25%, meestal tussen 0 en 10%, met af en toe een uitschieter naar 20%. Als je kaoliniet moet toevoegen, zou er dus minstens 30% toegevoegd moeten worden, wanneer we het kaoliniet gehalte van 40% uit het SGS rapport aanhouden. In België zijn wel kleien aanwezig die een iets hoger kaoliniet gehalte bevatten. Echter is dit waarschijnlijk nog niet voldoende. Kaoliniet hebben we niet in Nederland, wel elders in Europa.

De klei in Nederland wordt alleen boven het grondwater niveau gewonnen, omdat het onwenselijk is om klei te moeten drogen. Kleiwinning in oppervlaktewateren wordt ook niet gedaan, omdat er dan langdurige rijping nodig is. Deze vorm van droge winning betekent dat je ook geen probleem hebt met zout grondwater, en dus **sulfaat en chloride**. Er is ook kaartmateriaal via de website geologischdienst.nl beschikbaar o.a. van winbare kleivoorraden (delfstoffenonline) en kwaliteit van grondwater. De klei in rivierengebieden bevat vermoedelijk weinig zwavel. Klei in gebieden zoals rond de Dollard is vermoedelijk ongeschikt. Hier is veel kattenklei te vinden met hogere zwavelgehalten, waar ook gelet op moet worden.

Binnen TNO is er onderzoek gedaan naar het gebruik van **biomassa- assen** als cementvervanger. Hierbij gaat het over biomassa- assen van verbranding en vergassing met verschillende technieken en brandstoffen. Dit werk is in een aantal papers gepubliceerd door Lorenzo Tosti. Het blijkt dat dit een technisch goed cement oplevert, zonder dat de uitloognormen worden overschreden. Hierbij is alleen naar de eerste levenscyclus gekeken van cement dat op die manier is geproduceerd.

Het is ook mogelijk om **alkali-geactiveerde slak- vliegashouders (AAMs)** te gebruiken als alternatief. De uitloogbaarheid van anionen is niet beperkend voor het vormgegeven product. Voor het granulaire product, aan het eind van de eerste levenscyclus, voldoet het cement aan de uitloogeisen tot ongeveer 30% vervanging. Dit blijkt uit onderzoek van Arno Keulen, waarbij TNO betrokken is geweest en dat in diverse papers is gepubliceerd.

Belangrijk om te noemen is dat er een limiet aan de circulariteit hangt, doordat de uitloogbaarheid van stoffen beperkend kan worden wanneer secundaire materialen in een schone materiaalcyclus worden gebruikt. Het is belangrijk om de hele levenscyclus van een product te beschouwen, en ook de cycli daarna, echter voorziet het huidige besluit bodemkwaliteit daar niet in. Materialen worden alleen voorafgaand aan de eerste cyclus getest. Je moet vooruit kijken naar de volgende levenscyclus. Een voorbeeld hierbij is het gebruik van vliegashouders in beton, wat in eerste instantie monolithisch is. Dat wordt getest en voldoet. Aan het eind van de cyclus wordt het gebroken. Onder die condities is het niet meer monolithisch, maar korrelig. Door deze verandering (o.a. reactieoppervlakte) neemt de uitloging al toe. Bij gebruik als korrelvormig materiaal in ophogingen is de pH verlaagd van 12 à 13 naar 8. Voor anionen, waar het meestal om gaat binnen de betonsector, wordt de uitloging dan nog veel hoger. Voor veel alternatieve materialen wordt dit nog niet gecheckt, maar mogelijke opties om uitloging levenscyclus- bestendig te beoordelen staan in de artikelen van Tosti en Keulen. Voor standaard poederkoolvliegashouders- en hoogovencement is zo'n beoordeling in het verre verleden al wel gedaan, door TNO maar ook internationaal, en het blijkt dat dit tot hoge percentages vervanging gelukkig weinig problemen oplevert verderop in de levenscycli. Maar voor veel nieuwe secundaire materialen is dit nog onbekend en moet dit worden onderzocht. Het risico van het opladen van de betoncyclus is namelijk als volgt: door toevoegen van relatief kleine hoeveelheden alternatief materiaal, ga je het elke cyclus een klein beetje meer vervuilen. Dan krijg je uiteindelijk een stroom materiaal die niet meer voldoet aan het besluit bodemkwaliteit, waardoor je een veel grotere afvalstroom krijgt. Hier is nog veel meer onderzoek naar nodig en moet in beeld komen bij het beleid.

TU Delft, Vakgroep ontwikkeling van duurzaam beton

Datum: 01-11-2023
Geïnterviewde: Dr. G. (Guang) Ye
Deltares interviewer: Arjan Wijdeveld
(De interviews zijn (deels) in het Engels)

Questionnaire:

Background

The goal of this study is to assess the perspective to be self-sufficient in the production of clinker-based concrete in 2050, considering trends and scenarios in the production of binders for Portland cement clinker or alternative alkali activated materials or geopolymers. The report is a follow up of the SGS Intron report 'Ontwikkelingen betreffende hoofdbestanddelen voor klinkergebaseerde cementen en geopolymeren', A117240/R20201150a-NL, 2021 (in Dutch). The focus is on:

- Less well-known clinker alternatives. SGS Intron focused on the more commonly used clinker cement components and some supplementaire cementeuze materialen (SCM)), and their potential volume in NL. Input is asked on:
 - Cement clinker resources (relevant in the context of foreseen changes in production methods)
 - Alkali-activated binders / Geopolymers (mineral by-products, alkaline additives, and an activator)
- The potential to mine minerals in NL,
 - Clay's (preferable kaolinite),
 - Circular economy reclamation of resources (including the potential improvement of waste incineration)
 - Secondary mining (waste dump sites)
- Foreseen changes in production methods, like:
 - the impact of a hydrogen-based economy on (steel) slags
 - Biomass (with or without co-fired fly ash)
 - Potential changes in the waste incineration procedure (industrial waste and/or municipal waste).
- Alternative ways to reduce the CO₂ emissions.
 - The clinker emission factor
 - The CO₂ impact of alternatives

Questions

- What trends do you see up to 2050 in the availability of the current binders?
 - Cementklinker (now 191.000 ton)
 - Portland cement (now 1.387.000 ton)
 - Different hydraulic cement (now 620.000 ton)
 - Like Granulated slag, or
 - pulverized coal fly ash

... looking at trends in the production of these materials?

- What current sources for alternative binders in concrete do you see in the Netherlands?
 - Beliet-calciumsulfoaluminat (Beliet-(CSA) portlandcementklinker
 - Beliet-calciumsulfoaluminat-ternesiet (BCT) (Ferriet addition)
 - Hydraulic calcium silicate klinker
 - Calcium silicate klinker with a low calcium content, like wollastonite
 - Limestone - calcinated clay cement

- What is your view on the development of supplementaire cementeuze materialen (SCM)?
 - Especially when calcinated clay is abundantly present,
 - Biomass fly ash
 - Glass waste

- What are the developments in alkali-activated binders and geopolymers?
 - Aluminosilicaten (and its precursors)
 - gegranuleerde hoogovenslak, poederkoolvliegash or metakaolin (calcinated kaolinite rich clay)
 - Activatoren
 - natriumhydroxide with natriumsilicaat

- To what extent can recycling of concrete reduce the need for new binders in concrete?

Answers (in Dutch)

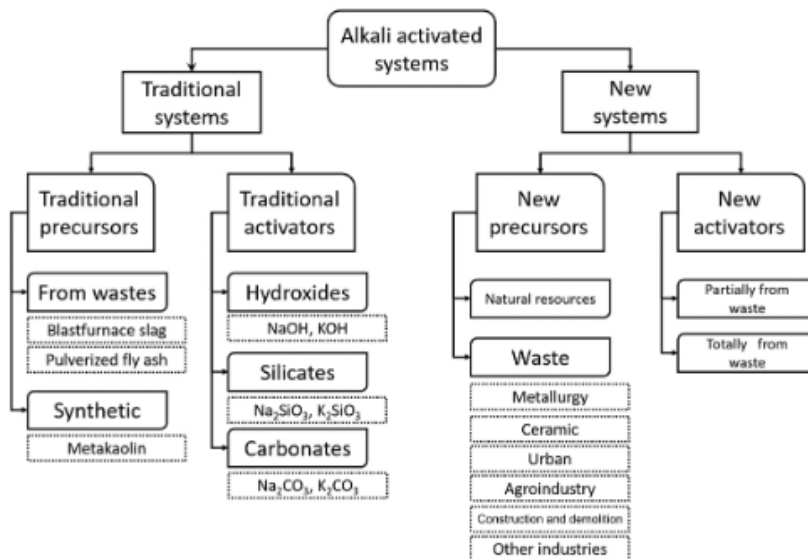
Het interview ging primair over de onderzoeken van master studenten en PhD. Studenten naar alternatieve cement binders. Het onderwerp circulariteit van beton en de CO2 emissie van beton zijn bewust niet besproken. Veel van de onderzoeksresultaten zijn gepubliceerd (zie de literatuurlijst), echter niet alle publicaties zijn beschikbaar.

De focus van de groep van Guang Ye is op afval als alternatieve binder (precursors en activators), waaronder bouwafval zoals mineral wool waste, fly ash, biomass ash, bottom ash (after washing) en paper recycled minerals. Er wordt minder aandacht besteed aan gecalcineerde kleien (voor Nederland wordt dit als maximaal 15% van de beschikbare kleien gezien, en te heterogeen in samenstelling). Ook wordt er gekeken naar micronized sand als cement vervanger.

De projecten zijn vaak proof of technology validated in the lab (TRL 3-4), maar bv de brug in Friesland met geopolymere is prototype scale (TRL 6-7). Opvallend is positieve ervaring met gewassen bodemassen (B. Chen). Dit onderzoek is echter onder embargo tot medio 2024.

Wat vaak mist in de proefschriften is een kwantificatie van de hoeveelheden alternatieve binders en eventuele complicaties. Een voorbeeld, jaarlijks komt meer dan 1,5 miljoen ton AEC bodemas vrij. Boskalis kan circa 600.000 ton bodemas reinigen door wassen (factsheet Beaumix). Welk deel van deze 600.000 ton is geschikt als binder, en zijn er mogelijk ongewilde effecten (zoals uitloging)? Met name de B.Chen (onder embargo tot 2024) promotie is echter interessant, ook als het om de hoeveelheden en de uitloging van probleemstoffen gaat.

Figuur 1 geeft een overzicht van de nieuwe precursors en activators vanuit afvalstoffen.



Figuur 1 Traditional and New Alkali Activated Systems, Jordi Payá et al. “Application of alkali-activated industrial waste”. In: Jan. 2019, pp. 357–424. ISBN: 9780081024805. DOI: 10.1016/B978-0-08-102480-5.00013-0.

TU Delft Projects related to alternatives for concrete binders:

- Het EU Interreg project URBCON. Onderdeel van dit project was de geopolymerbetonnen voetgangersbrug in Slaghaam, een project voor de Gemeente Rotterdam.
- Ye leidt de ontwikkeling van een grotere autobrug van geopolymerbeton in de provincie Friesland.
- Het Horizon2020 project Wool2Loop. Een project om met nieuwe methoden een bindmiddel voor beton te ontwikkelen van glaswol.
- Het EU project AshCycle. Ye werkt aan industrie-stedelijke symbiose rond het onderbenutte as, om te naar een circulaire en klimaatneutrale Europese economie toe te werken.
- Het Horizon2020 project Cementegrity. Een project voor het ontwikkelen en testen van een nieuwe cementontwerpen voor CO2-opslag.

TU Delft papers:

B. Chen, Utilization of mswi bottom ash as a mineral resource for low-carbon construction materials: Quality-upgrade treatments, mix design method, and microstructure analysis, <https://doi.org/10.4233/uuid:0793986f-b875-4693-a0f9-568978f2d632>, ISBN 978-94-6366-667-1, Embargo date: 2024-03-09

W de Vries, G Ye, K van Breugel, The use of micronized sand as a cement replacement. Concrete durability and service life planning , e-ISBN: 978-2-35158-085-1 / Publisher: RILEM Publications SARL / Publication year: 2009, Pages: 562 – 570

Ying Wang, Guang Ye, Klaas van Breugel, Michiel Haas, April 2011, Durability of Concrete Blended with Micronized Sands, IRBNet.de, <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22498.pdf>

Shizhe Zhang, March 2014 - 2015, Recycled Waste Glass as Binder Precursor and Partial Aggregate Replacement in Geopolymer

Madiha Ahammout, May 2011 – Jan 2012, The Feasibility of Using Activated Paper Recycled Minerals (Top-Crete) as Partial Cement Replacement

Zhijun Tan, 2015, Experimental study and numerical modelling of ternary cementitious system

Zhuqing Yu, May 2015, Microstructure, transport and service prediction of concrete blended with fly ash, as co-promotor

Nedeljković, Marija, 2019-02-27, Carbonation mechanism of alkali-activated fly ash and slag materials: In view of long-term performance predictions,

<https://doi.org/10.4233/uuid:97b9eabe-159e-43e1-8b35-edc61b1aa682>

Datum: 17-11-2023

Geïnterviewde: Ronny Lugtenberg en Stan Aben

Deltares interviewer: Arjan Wijdeveld, Kim Gommans en Marc Verheul

(De interviews zijn (deels) in het Engels)

Questionnaire:

Background

The goal of this study is to assess the perspective to be self-sufficient in the production of clinker-based concrete in 2050, considering trends and scenarios in the production of binders for Portland cement clinker or alternative alkali activated materials or geopolymers. The report is a follow up of the SGS Intron report 'Ontwikkelingen betreffende hoofdbestanddelen voor klinkergebaseerde cementen en geopolymeren', A117240/R20201150a-NL, 2021 (in Dutch). The focus is on:

- Less well-known clinker alternatives. SGS Intron focused on the more commonly used clinker cement components and some supplementaire cementeuze materialen (SCM)), and their potential volume in NL. Input is asked on:
 - Cement clinker resources (relevant in the context of foreseen changes in production methods)
 - Alkali-activated binders / Geopolymers (mineral by-products, alkaline additives, and an activator)
- The potential to mine minerals in NL,
 - Clay's (preferable kaolinite),
 - Circular economy reclamation of resources (including the potential improvement of waste incineration)
 - Secondary mining (waste dump sites)
- Foreseen changes in production methods, like:
 - the impact of a hydrogen-based economy on (steel) slags
 - Biomass (with or without co-fired fly ash)
 - Potential changes in the waste incineration procedure (industrial waste and/or municipal waste).
- Alternative ways to reduce the CO2 emissions.
 - The clinker emission factor
 - The CO2 impact of alternatives

Questions

- What trends do you see up to 2050 in the availability of the current binders?
 - Cementklinker (now 191.000 ton)
 - Portland cement (now 1.387.000 ton)
 - Different hydraulic cement (now 620.000 ton)
 - Like Granulated slag, or
 - pulverized coal fly ash
- ... looking at trends in the production of these materials?
- What current sources for alternative binders in concrete do you see in the Netherlands?
 - Beliet-calciumsulfoaluminate (Beliet-(CSA) portlandcementklinker
 - Beliet-calciumsulfoaluminaat-ternesiet (BCT) (Ferriet addition)
 - Hydraulic calcium silicate klinker
 - Calcium silicate klinker with a low calcium content, like wollastonite

- Limestone - calcinated clay cement
- What is your view on the development of supplementaire cementeuze materialen (SCM)?
 - Especially when calcinated clay is abundantly present,
 - Biomass fly ash
 - Glass waste
- What are the developments in alkali-activated binders and geopolymers?
 - Aluminosilicaten (and its precursors)
 - gegranuleerde hoogovenslak, poederkoolvliegas or metakaolin (calcinated kaolinite rich clay)
 - Activatoren
 - natriumhydroxide with natriumsilicaat
- To what extent can recycling of concrete reduce the need for new binders in concrete?

Answers (in Dutch)

TCKI is de Stichting Technisch Centrum voor de Keramische Industrie en doet client gericht onderzoek naar o.a. grondstoffen voor de keramische industrie. De onderzoeken zijn vertrouwelijk. De versterkte informatie is daarom generiek.

Focus van TCKI ligt op keramiek, maar beton is ook een onderwerp waar onderzoek naar gedaan wordt. Onder andere op het punt van binders is er overlap. Ook is er voor het afval van de keramische industrie een toenemende belangstelling om deze als precursor (ook wel geopolymer genaamd) te gebruiken. Meer informatie over geopolymeren uit keramisch afval:

M. Fugazzotto et al, Suitability of ceramic industrial waste recycling by alkaline activation for use as construction and restoration materials, *Ceramics International*, Volume 49, Issue 6, 2023, Pages 9465-9478, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.111>

The Alkaline Activated Materials (AAMs) are promising alternative to the classic cement and ceramic materials whose production is responsible of a huge CO₂ emission in the atmosphere [7]. Among the AAMs an interesting subgroup is represented by the so called geopolymers, which contains the highest content of Al and the lowest content of Ca [8]. AAMs are obtained by mixing an aluminosilicate precursor with high amount of amorphous phase with a liquid alkaline component usually at room temperature or below 200 °C [9]. The chemical process (geopolymerization) and the structure of the final material depend on many parameters among which the most important is the chemical composition of the precursors. The structure could be described as polycondensed due to chains and rings of alumina and silica tetrahedra linked together by oxygen atoms and with alkaline ions entrapped to balance the negative charge due to the substitution of Al in the Si chains [[9], [10], [11]].

Ook gecalcineerde klei kan als precursor dienen. Probleem is dat de meest geschikte klei, kaolinite, in Nederland nauwelijks voorhanden (indicatief, enkele duizenden tonnen, maar vaak niet eenvoudig winbaar). Hiervoor zou naar de Oekraïne uitgeweken moeten worden. In uitzonderlijke situatie (Saudi Arabië) wordt gebruik gemaakt van zoute kleien. Chloride en in minder mate sulfaat is echter een no go. Dit vanwege de vorming van HCL en CL₂ (gas). Alleen met het verwijderen van het zout (energie kostbaar) kunnen deze kleien gebruikt worden.

Alternatieve kleien voor kaolinite, zoals illiet of eventueel montmorilloniet kunnen ook als precursor dienen, hoe hoger het aluminiumsilicaatgehalte hoe beter. Wel dient dan de

activator en smelt temperatuur aangepast te worden (activator meestal NaOH, KOH kan ook maar is duurder). Hoe lager de gewerkte sterkte hoe meer opties.

Ook kunnen toeslagstoffen gebruikt worden. Een toeslagstof die in de belangstelling staat is glas (of zoals bij de TUD glaswol). Glas verlaagt de smelt temperatuur.

Nadeel voor fabrikanten is dat voor elke mix van verschillende kleien, dosering activatoren en toeslagstoffen zoals glas de oven anders ingesteld moet worden. Dit is commercieel niet interessant.

Qua beschikbaarheid van staalslakken werd rond Nederland verwezen naar buurlanden zoals Wales (Tata), Vlaanderen (ArcelorMittel) en Duinkerken (ArcelorMittel) (het Roer gebied is niet besproken). De transitie zal niet overal even snel gaan.

Als alternatief voor staalslakken werden koperslakken genoemd. Deze worden in de keramische industrie al veel toegepast (en zijn als zodanig ook opgenomen in het bouwstoffenbesluit (<https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/bodemassen-en-slakken/eigenschappen-bodemassen-e105504/materiaaleigenschappen-kop105512>)). Voor toepassing zie BRL 9343 Koperslak voor GWW-werken, versie van 18 november 2013) In Nederland zijn enkele non-ferro gieterijen. Koperhoogovens staan vooral in Centraal-Europa.

Een punt wat voor de keramische industrie in Nederland speelt is dat er geen groeven zijn die klei winnen en verkopen, maar dat winningen jaren van tevoren (10 – 15 jaar) samen met de eindgebruikers gepland worden. Het is geen markt van vraag en aanbod maar van gezamenlijk (met de opdrachtgever) ontwikkelen van de klei winning.

Vanuit de keramische industrie wordt ook naar biomassa as gekeken. Dit kan mogelijk concurreren met de toepassing in beton, al lijkt de toekomst van grootschalige toepassing van biomassa onzeker en daarmee ook de aantrekkelijkheid als binder.

Rio Tinto, global mining group

Datum: 01-02-2023
Geïnterviewde: Dr. Tim Evans
Deltares interviewer: Arjan Wijdeveld
(De interviews zijn (deels) in het Engels)

Questionnaire (short version)

Question

What is the impact of a transition to H₂ to produce steel?

Answer

The interview focuses on the impact of a transition to H₂ Green Steel on the steel slag used as binder in Portland cement. Tim Evans is principal engineer for Rio Tinto, focusing on the behavior of large-scale granular handling and processing in ironmaking related industries.

Rio Tinto is involved in the production of low-carbon steel, using sustainable biomass in place of coking coal in the steelmaking process. The process combines the use of raw, sustainable biomass with microwave technology to convert iron ore to metallic iron during the steelmaking process. The CO₂ emissions could be further reduced by carbon sequestration in other alkaline wastes (basic oxygen slag, coal ash, etc.).

A short recap on the production of steel with a traditional coke fueled iron blast furnace. In the first stage cokes and a fluxing agent (limestone) is added, creating blast granulated furnace slag (GBF) (see Figure 1).

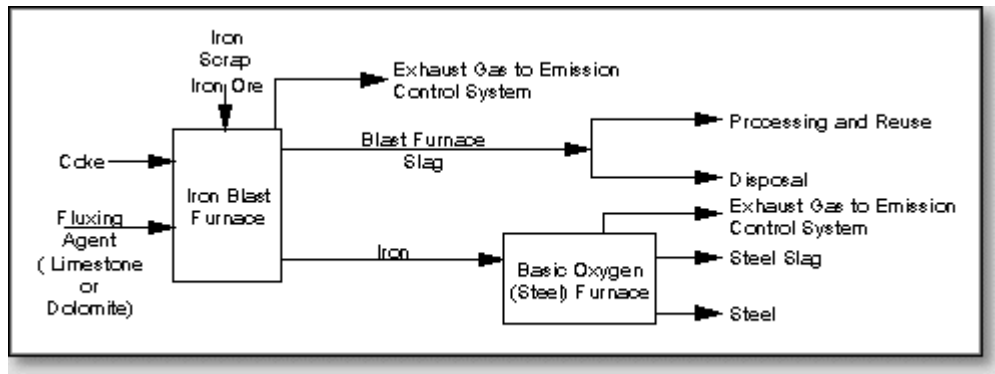


Figure 1 General schematic of blast furnace operation and blast furnace slag production

In this first step of the process limestone (CaCO₃) is used to remove impurities from the blast furnace when making iron. The impurities are mostly silicon dioxide (also known as sand). The calcium carbonate in the limestone reacts with the silicon dioxide to form calcium silicate (also known as BF slag), the base for hydrated calcium silicate. The blast-furnace slag consists of silicate and aluminosilicate of melted calcium and is grinded (ground granulated). Granulated blast-furnace (GBF) slag is a latent hydraulic binder forming calcium silicate hydrates (C-S-H) after contact with water.

The second stage, the removal of oxygen from iron, can be done in different ways, resulting in basic oxygen furnace (BOF) slag, electric arc furnace (EAF) slag, and ladle furnace (LF)

slag. The heat needed for this process can come from different sources, often being electric. The slags resulting from this second stage are less suitable as hydraulic binder for concrete.

Rio Tinto- Focus on biomass

The transition Rio Tinto is making is focusing on the use of biomass, which is also a source of carbon. The CO₂ advantage is the replacement of coke for renewable biomass and in the shorter roasting time with less energy, see Figure 2.

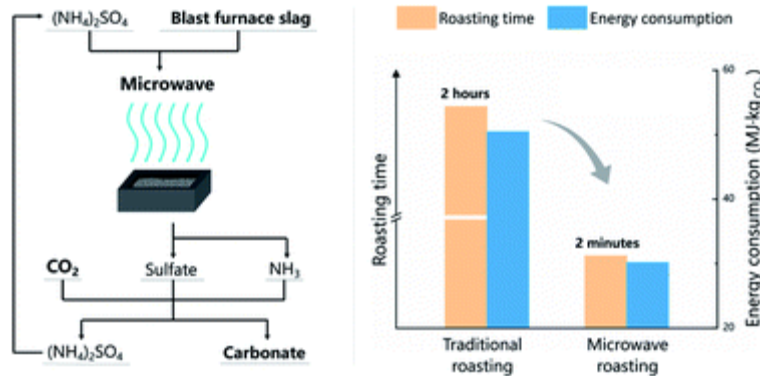


Figure 2 From Han et al, Microwave roasting of blast furnace slag for carbon dioxide mineralization and energy analysis, 2020, RSC Advances, DOI <https://doi.org/10.1039/D0RA02846K>

The transition of cokes to biomass and microwave heating does not have to impact the GBF slag production and composition, therefore the production of Portland blast furnace cement is not threatened.

Hydrogen

However, using H₂ for the first stage impacts the BF production and composition. The use of more hydrogen and less or no cokes is pioneered by Thyssenkrupp Steel. Since RioTinto is still in the trial phase and does not share all information, the following paper is cited: “Lan, C.; Hao, Y.; Shao, J.; Zhang, S.; Liu, R.; Lyu, Q. Effect of H₂ on Blast Furnace Ironmaking: A Review. *Metals* 2022, 12, 1864. <https://doi.org/10.3390/met12111864>”. From this article:

Hydrogen-rich smelting of BF impacts the reduction behavior of the sinter and pellets in the lump zone. The property of reduction disintegration changed. The fundamental reason for reduction disintegration is that hematite (Fe₂O₃) in the iron ore reduces to magnetite (Fe₃O₄) under low-temperature conditions, resulting in lattice transformation and volume expansion, causing lattice distortion to generate internal stress and fracture and disintegration.

The gasification reaction of coke is one of the important reasons for the deterioration of coke property. After hydrogen-rich smelting in the BF, H₂ reduces iron ore to generate H₂O, which gasifies with coke, thus changing the gasification reaction behavior and structure evolution process of coke in the BF.

An increase in the hydrogen flux impacts the softening and melting of the iron-bearing burden in the BF, mainly due to the gradual increase of wüstite mass fraction with the increase of temperature. This forms a large number of low melting point compounds with the minerals in the slag. Research has pointed out that the increase of H₂ volume fraction in gas can accelerate the reduction of iron oxide, and a large amount of wüstite forms in the burden at a lower

temperature. The softening start temperature of burden decreases and the softening end temperature increases, which widens the softening temperature range, and the melting temperature range of slag iron decreases greatly, which improves the permeability of the cohesive zone.

The formation process of slag-iron in the cohesive zone and the metallurgical behavior of the slag-coke-iron interface need to be further studied.

Reflection on paper – the impact of a higher hydrogen flow on GBF slag production

This paper (and the cited articles in this paper) focus on the iron production in the granular blast furnace (GBF) itself, and not directly on the changes in the GBF slag. The change in reduction regime, the shift in softening and melting temperature and the shift in permeability of the cohesive zone¹⁰ are strong indicators that the resulting GBF slag will have a different mineral composition as compared to the traditional cokes BF slag. But on its own the transfer from cokes to hydrogen is still compatible with the production of GBF slag.

The next step in steel production – towards a net CO2 emission of zero by 2050

Source: <https://www.zkg.de/en/artikel/the-steel-production-transformation-process-in-europe-new-slag-types-will-substitute-granulated-blast-furnace-slag-4001145.html>

One of the biggest CO2 emissions in steel production comes from the addition of limestone. Banning limestone will have a severe impact on the GBF slag production. The CO2 intensive blast furnace/basic oxygen furnace (BOF) route will be substituted by a combination of Direct Reduced Iron (DRI), based on natural gas, later on “green” hydrogen, with an Electric Arc Furnace (EAF) or a Submerged Arc Furnace (SAF), heated with renewable energy. *Thus, the latent-hydraulic granulated blast furnace (GBF) slag will vanish step by step.*

Whereas the solid state DRI process itself does not generate any slag, EAF and SAF will produce as well liquid steel or “electric” pig iron, respectively, as very different types of slags. Whereas SAF slag is expected to be comparable to blast furnace slag, the new EAF slag will be more similar compared to today’s scrap-based EAF slag. Due to the lack of hydraulic properties these crystalline steel slags are mainly used as road-making aggregates substituting natural materials, and not as binder.

According to Worldsteel the worldwide crude steel production was 1884 million t in 2022. On average 72% were produced by the blast furnace/BOF route and 28% by the EAF route using mainly scrap. Other processes are negligible. The pig iron production was 1301 million t whereas the direct reduced iron production was only 125 million t. The shares of the blast furnace/BOF and EAF routes differ from country to country (Germany: 70% and 30%, EU-27: 56% and 44%, Türkiye: 29% and 71%, USA: 31% and 69%, China: 91% and 9%).

In total it can be estimated that in 2022 worldwide about 312 million t of GBF slag, 104 million t of air-cooled blast furnace slag, 143 million t of BOF slag and 68 million t of EAF slag have been produced. For the today’s DRI production combined with EAF or Induction Furnaces (IF) it can be assumed that about 14 Mt slags were generated.

Provided that 1 t of GBF slag substitutes 1 t Portland cement clinker and considering average specific CO2 emissions (122 kg/t for GBF slag incl. allocation of the metallurgical process, 900 kg/t clinker) it can be calculated that for 2022 cement production about 243 million t CO2 emissions were avoided and that about 480 million t of natural raw materials for clinker burning have been saved.

In order to avoid negative consequences for the cement, concrete and construction industries resulting from the stepwise disappearance of GBF slag it is of high importance to qualify as well the new slags as the remaining scrap-based EAF slag and maybe also the BOF slag to

¹⁰ The cohesive zone is an area closed between the isotherms of the softening and melting of the charge oxide materials (sinter, pellets, flux, lump ore), which, being in a soft state, stick to each other and thus are impermeable to gases

fulfil the same ecological and technical tasks as GBF slag does today. *Therefore, the further reduction of the clinker content in cement by adding supplementary cementitious materials (SCM) is an integral part of the different CO2 roadmaps of the cement and concrete industry.*

Producent cement bouwmaterialen

Datum: 15-12-2023
Geïnterviewde: Afgevaardigde NL cementen beton sector
Deltares interviewer: Kim Gommans en Arjan Wijdeveld

Questionnaire:

Background

The goal of this study is to assess the perspective to be self-sufficient in the production of clinker-based concrete in 2050, considering trends and scenarios in the production of binders for Portland cement clinker or alternative alkali activated materials or geopolymers. The report is a follow up of the SGS Intron report 'Ontwikkelingen betreffende hoofdbestanddelen voor klinkergebaseerde cementen en geopolymeren', A117240/R20201150a-NL, 2021 (in Dutch). The focus is on:

- Less well-known clinker alternatives. SGS Intron focused on the more commonly used clinker cement components and some supplementaire cementeuze materialen (SCM)), and their potential volume in NL. Input is asked on:
 - Cement clinker resources (relevant in the context of foreseen changes in production methods)
 - Alkali-activated binders / Geopolymers (mineral by-products, alkaline additives, and an activator)
- The potential to mine minerals in NL,
 - Clay's (preferable kaolinite),
 - Circular economy reclamation of resources (including the potential improvement of waste incineration)
 - Secondary mining (waste dump sites)
- Foreseen changes in production methods, like:
 - the impact of a hydrogen-based economy on (steel) slags
 - Biomass (with or without co-fired fly ash)
 - Potential changes in the waste incineration procedure (industrial waste and/or municipal waste).
- Alternative ways to reduce the CO2 emissions.
 - The clinker emission factor
 - The CO2 impact of alternatives

Questions

- What trends do you see up to 2050 in the availability of the current binders?
 - Cementklinker (now 191.000 ton)
 - Portland cement (now 1.387.000 ton)
 - Different hydraulic cement (now 620.000 ton)
 - Like Granulated slag, or
 - pulverized coal fly ash

... looking at trends in the production of these materials?

- What current sources for alternative binders in concrete do you see in the Netherlands?
 - Beliet-calciumsulfoaluminat (Beliet-(CSA) portlandcementklinker
 - Beliet-calciumsulfoaluminat-ternesiet (BCT) (Ferriet addition)
 - Hydraulic calcium silicate klinker
 - Calcium silicate klinker with a low calcium content, like wollastonite
 - Limestone - calcinated clay cement

- What is your view on the development of supplementaire cementeuze materialen (SCM)?
 - Especially when calcinated clay is abundantly present,
 - Biomass fly ash
 - Glass waste

- What are the developments in alkali-activated binders and geopolymers?
 - Aluminosilicaten (and its precursors)
 - gegranuleerde hoogovenslak, poederkoolvliegash or metakaolin (calcinated kaolinite rich clay)
 - Activatoren
 - natriumhydroxide with natriumsilicaat

- To what extent can recycling of concrete reduce the need for new binders in concrete?

Answers (in Dutch) - De volgorde van de vragen is niet aangehouden.

Bodemassen

Het is lastig om alle bodemassen op één berg te gooien, omdat er verschillende soorten verbranders bestaan. (1) Commerciële verbranders verbranden voornamelijk veel en zo snel mogelijk. (2) Niet-commerciële verbranders verbranden op een wat zuiverdere manier, omdat ze anders zelf met de vervuiling wat moeten gaan doen. (3) Verbranders die industrie afval en huisafval verbranden. (4) Als laatste zijn er verbranders met bijmenging van zuiveringsslib (b.v. Amsterdam). Dit resulteert in verschillende kwaliteiten bodemas, waar vervolgens nog stappen (scheiden, zuiveren, immobiliseren) op genomen moeten worden voordat deze als bouwstof kan worden toegepast.

Als het bodemas niet goed opgewerkt wordt, dan komt daar een granulaat uit die nooit vrij toepasbaar kan zijn in de bouw (door Cl, Antimoon, etc), maar het kan worden toegepast onder IBC kwaliteit (sinds mei 2021 verboden in Nederland). Als alternatief kan het bodemas nat-chemisch gereinigd worden. Bij dit proces worden alle bodemassen boven de 2 mm afscheiden, waardoor Cl en zware metalen eruit gefilterd worden. Na het wassen komt het product overeen met gebroken hydraulisch puingranulaat. De bodemas heeft hydraulische (= cementachtige) eigenschappen en kan ingezet worden als granulaat in bestratingmateriaal (laag-risico product). In Nederland wordt momenteel ongeveer 50.000-100.000 ton gewassen bodemas ingezet als bestratingmateriaal, verschillende onzuiverheden worden handmatig verwijderd.

De balans binnen het bodemas is niet sluitend, ongeveer 5 a 10% van het totaal gaat naar beton, de rest heeft geen toepassing in (laagwaardig) beton. Deze reststroom (nu vaak, al dan niet geïmmobiliseerd, toegepast als wegfundering) zou eventueel voor een groter deel gebruikt kunnen worden in beton, maar dan moet de uitloging van stoffen wel voldoen (naast de metalen vanadium en molybdeen is vaak het sulfaat gehalte te hoog). Het beter nabewerken van de assen zou hiervoor een oplossing kunnen zijn, maar het is belangrijk dat dit door de overheid gestuurd wordt. Er wordt verwacht dat bodemassen indien toegepast in cement en beton geen groot probleem m.b.t. onzuiverheden opleveren tijdens de tweede levensfase (na breken).

De meerkosten voor het beter opwerken van bodemassen is vrij gering (2 – 3 euro per ton). Maar als er niet geïnvesteerd wil worden, dan blijft de discussie. De markt reageert namelijk traag en alleen op sturing van de overheid. Het zou doen ook een goed idee zijn als er een maatregel komt waarmee de overheid aangeeft wat de kwaliteit moet zijn, zodat de markt er op in gaat spelen. Er is verder ook weinig uitwisseling van informatie tussen de verschillende sectoren, waardoor ze niet goed op elkaar in kunnen spelen (wat de cement en beton

industrie nodig heeft is niet altijd wat de verbranders aanbieden, en leveranciers van alternatieve grondstoffen zien bodemas als concurrentie op hun markt). Dit schept ook weinig vertrouwen in de bouwmaterialen sector en of zorgt ook niet voor het opstellen van een gezamenlijke visie. Onwil om te willen investeren speelt ook een grote rol.

Het is mogelijk om bodemas granulaat om te zetten naar alternatieve cement vulstof ofwel een hoogwaardigere toepassingen in vergelijk met granulaat in bestratingsproducten. Het is belang is de bodemas dan wel te ontdoen van zouten en zware metalen (ook koper, lood en chlorides). Tot een klein percentage meemengen (5 a 20 wt%) zal het beheersbaar zijn.

Echter is bodemas niet geschikt voor constructief beton, omdat de gewenste sterkte binnen de voorgeschreven tijdsduur (beloopbaar na 1 dag, eindsterkte na 28 dagen) niet bereikt wordt. Aanvullend zijn er mogelijkheden van expansie problemen en de beton levensduur en de zekerheid voor de constructieve levensduur.

Tabel 2 Richtwaarden voor de gemiddelde normsterkte (N) van in Nederland veel gebruikte cementen, STUBECO

cementsoort	codering	normsterkte N in N/mm ²			
		1 dag	2 dagen	3 dagen	28 dagen
portlandcement	CEM I 42,5 N	10	17	25	48
	CEM I 42,5 R	19	30	35	58
	CEM I 52,5 R	29	39	44	63
portlandvliegascement	CEM II/B-V 42,5 N	13	22	25	49
hoogovencement	CEM III/A 32,5 N	7	14	19	46
	CEM III/A 42,5 N	8	17	22	59
	CEM III/A-52,5 N	18	28	35	74
	CEM III/B 32,5 N	5	10	14	48
	CEM III/B 42,5 N	8	17	25	58



Figuur 2 Verhardingstijd Portland versus hoogovencement

Alternatieven

CEM I wordt sterk uitgefaseerd in West Europa (door de sturing op MKI in landen zoals Nederland, Denemarken en voor kosten verlaging in Oost Europa), waardoor de focus langzaam over gaat naar CEM II en CEM III (meer kalksteen). In het westen van Europa is

deze transitie voornamelijk geïnitieerd vanuit het milieuaspect, terwijl lagere productiekosten de driver is in het oosten van Europa. De 28 daagse beton sterkte eigenschappen van CEM II en III zijn ongeveer gelijk aan CEM I (zie Tabel 1 en Figuur 1).

Vliegas bevat aluminium- en siliciumoxiden en vrij kalk, wat vliegas puzzolane en (beperkt) hydrauliseerbare eigenschappen geeft (alkaline activering is nodig). Vliegassen faseren snel uit in Europa. Ook is er menging van biomassa bij vliegassen uit kolen en biomassa centrales, waardoor de geschiktheid van vliegas afneemt (door een lager aluminium- en siliciumoxiden gehalte, een te hoog vrij kalkgehalte en meer zouten, fosfaat, ijzer en carbonaten).

Basic Oxygen Furnace Slag (BOF) slakken worden niet gebruikt doordat er vrij kalk in zit en dat geeft expansie en een groot risico in betonproductie (latere hydratatie en dus scheuren). Er wordt ook gekeken of er andere stoffen zijn die als vulstof gebruikt kunnen worden. Een voorbeeld is het malen van vliegas en slakken die vervolgens worden bewerkt. Ontwikkeling zijn lopende. Er worden tientallen miljoenen slakken geproduceerd in Europa waarvan misschien de helft naar de betonsector gaat. De rest gaat naar stortplaatsen en kan dus potentieel een bron zijn.

De staalindustrie doet geheimzinnig over de samenstelling van de 'toekomstige' staal slakken die met de nieuwe methode (elektrificatie en of waterstof) geproduceerd worden. Tot op heden is er geen direct inzicht. In Europa wordt in Duitslands gezamenlijk onderzoek gedaan met o.a. universiteiten en bedrijven. Wat bekend is, is dat slakken uit een electric arc furnace (EAF), waarbij waterstof en koolmonoxide worden gebruikt voor de reductie van Direct-gereduceerd ijzer (DRI) alleen mogen worden gestort. Dit storten mag in Nederland niet. EAF is puzzolane en kan met toevoeging van kalkzandsteen en alkaline activering als binder fungeren, maar blijft in sterkte achter bij gegraneerde hoogovenslakken. Bovendien bevatten EAF slakken meer zware metalen zoals chroom en vanadium (enkele procenten), voorlopig is er geen goedgekeurde toepassing van EAF als hydraulische binder in cement.

Alternatieve toekomstige SCM's of low carbon cement binder

In de cement en beton industrie worden er stappen gezet mbt de ontwikkeling en productie van alternatieve SCM's en binders, die een negatieve tot neutrale of lage CO2 footprint hebben. Deze nieuwe processen en producten zijn nog in de pilot schaal ontwikkeling maar zullen in de komende 3 tot 8 jaar een grotere invulling nemen in het vervangen van primaire OPC cement klinker en als alternatief/ vervanging van een uit-faserende hoogoven slakken en vliegas aanbod. Producten zijn bijvoorbeeld gecalcineerde klei, CO2 gecarboniseerde assen, slakken en beton recycling fine fractie en of CSA cementen.

Geopolymeren en gecalcineerde klei

Het produceren van beton en binders op basis van geopolymeren is complex en vrij duur. De vraag neemt wel toe, maar de partijen die het produceren nemen niet toe. Geopolymeerbeton wordt over het algemeen niet uit kaoliniet (een klei, ook wel china clay genoemd) gemaakt omdat het te duur is (300 – 500 euro per ton) en te traag reageert door de lage hoeveelheid calcium (kaoliniet wordt eerst gecalcineerd (omzetting hydroxide naar oxide) door verhitting tot 800 °C , waarbij vaak tevens kalk en veldspaten worden toegevoegd voor goede hydraterende eigenschappen).

Alkali-geactiveerd beton is een betere naam voor geopolymeren. Ze worden in de regel namelijk geproduceerd uit hoogovenslakken (met kosten van circa 100-120 euro/ton). Er is in Europa waarschijnlijk veel minder hoogovenslak beschikbaar in de toekomst. Er zal dus geïmporteerd moeten worden van buiten Europa (Azië, Brazilië, China, etc). Kalksteen(meel) is een alternatief, maar dat kan maar tot 10% vervangen worden, omdat de sterke dan achteruit gaat.

Gecalcineerde klei (andere kleisoorten dan kaoliniet) lijkt op te komen, maar de reactiviteit en uithardingstijd is nog een probleem. Er wordt verwacht dat hier in de komende jaren ook meer aandacht op gevestigd wordt. Over het algemeen wordt een lage kwaliteit klei gebruikt, vaak een overblijfsel uit cementmijnen. Er zijn in Europa wel een aantal plants in de aanbouw (rond 2025) voor het produceren van gecalcineerde klei, maar geen nieuwe in Nederland (bestaande locatie Tiel, CERO cementvrij beton, productie van geopolymeerbeton). De Nederlandse industrie is eigenlijk te duur om cement te maken, al zouden we, kijkend naar de beschikbaarheid van klei en kalksteen, gecalcineerde klei kunnen maken. Gecalcineerde klei wordt nu voornamelijk gemaakt in oude, niet in gebruik zijnde, cementmolens.

Verder is het goed om te noemen dat overdimensionering in de betonwereld een groot probleem is. Eigenlijk is er vaak maar 30 MPa nodig, maar wordt er meer gevraagd zodat er na één dag al op gewerkt kan worden. Als we er vanuit gaan dat we pas na 2 à 3 dagen op het beton kunnen, dan hebben we minder bindmiddel nodig (zie Tabel 1). Daar kan veel meer rekening mee gehouden worden. De filler kan dan meer dan gehalveerd worden en er is geen oversterkte.

Wet- en regelgeving

De betonsector is een erg traditionele sector, al zullen er naar de toekomst toe nieuwe producten komen. Er zijn mogelijkheden om meer industriële minerale reststromen (staalslakken en assen) op te werken om te kunnen gebruiken, echter mag dit niet vanuit de wet- en regelgeving. Vaak zit de beperking in de manier waarop een product gemaakt wordt (afkomstige industrie), product status en materiaal type. Waarbij deze materialen niet gedefinieerd zijn in de huidige EU of nationale normen en product richtlijnen waardoor deze niet geactiveerd worden (,. Voor innovatie is het belangrijk om te kijken naar het eindproduct, en niet te focussen op het proces. Als het beton voldoet aan de uitloognormen en sterktenormen en levensduur en recycling eisen, waarom maakt het dan uit welke productie methode gehanteerd wordt en de gebruikte grondstoffen? Het is belangrijk dat hier veel efficiënter en effectiever mee omgegaan kan worden, bijvoorbeeld door het beton onafhankelijk te keuren. Beton op performance...

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl