



Ontwikkelingen betreffende hoofdbestanddelen voor klinkergebaseerde cementen en geopolymeren

Rapport SGS INTRON B.V.

Status: Eindrapport
Datum: 20 mei 2021
Documentnummer: A117240/R20201150a-NL

WHEN YOU NEED TO BE SURE

SGS

Colofon

Klant:

Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud
t.a.v. de heer E. Drenth
Griffioenlaan 2
3526 LA UTRECHT

Referentie:

A117240/BO20200251/GWe/ILa

Bestelling:

Bestelnummer: 4500298072

E-mail:

eize.drenth@rws.nl

Datum:

14 april 2020

Datum:

13 mei 2020

Opdrachtnemer:

SGS INTRON B.V.

Telefoonnummer:

+31882145206

Mobiel nummer:

+31653731832

Contactpersoon:

Gert van der Wegen

E-mail:

gert.vanderwegen@sgs.com

Auteur:

dr. N. Muehleisen

Handtekening:



Autorisatie:

dr. G. van der Wegen

Handtekening:



Datum:

20 mei 2021

Reden wijziging:

Verwerking commentaar + vertaling NL

Disclaimer

Tenzij anders overeengekomen worden opdrachten uitgevoerd in overeenstemming met de meest recente versie van de Algemene Voorwaarden van SGS INTRON B.V. Op eenvoudig verzoek worden deze voorwaarden u opnieuw toegestuurd. De aandacht wordt gevestigd op de beperking van de aansprakelijkheid, schadeloosstelling en bevoegdheidskwesties die daarin worden gedefinieerd. Elke houder van dit document wordt erop gewezen dat de informatie in dit document enkel de bevindingen van het bedrijf op het ogenblik van zijn interventie weergeeft, en dit binnen de grenzen van de instructies van de cliënt, indien van toepassing. SGS INTRON B.V. draagt uitsluitend verantwoordelijkheid tegenover zijn cliënt, en onderhavig document ontheft de partijen bij een transactie niet van de uitoefening van hun rechten en verplichtingen uit hoofde van de transactiedocumenten. Ongeoorloofde wijzigingen, valsheid in geschrifte of vervalsing van de inhoud of het uiterlijk van dit document zijn onwettig, en overtreders kunnen worden vervolgd met gebruikmaking van alle rechtsmiddelen. © SGS INTRON B.V.

Inhoud

Colofon.....	2
Managementsamenvatting	5
1. Inleiding.....	12
1.1. Algemeen.....	12
1.2. Opzet van het rapport	12
2. Huidige situatie en verwachte ontwikkelingen	14
2.1. Huidige vraag naar cement en beton in Nederland	14
2.2. Gegraneerde hoogovenslak en poederkoolvliegass.....	15
2.3. Belangrijkste akkoorden over de CO ₂ -uitstoot.....	17
2.4. Verwachte beschikbaarheid van gegraneerde hoogovenslak	19
2.5. Verwachte beschikbaarheid van poederkoolvliegass.....	20
3. Alternatieve cementen	23
3.1. Belietrijk portlandcement	23
3.2. Calciumsulfoaluminaatcement (CSA)	23
3.3. Beliet-calciumsulfoaluminaat-ternesiet (BCT)	24
3.4. Hydraulische calciumsilicaatklinker gemaakt met hydrothermisch proces.....	24
3.5. Door carbonatatie verhard cement	24
3.6. Kalksteen-gecalcineerde klei-cement (LC ³).....	25
4. Alternatieve supplementaire cementeuze materialen (SCM)	27
4.1. Kalksteen	27
4.2. Gecalcineerde klei	28
4.3. Biomassa-vliegass.....	29
4.4. Glasafval	30
5. Alkali-geactiveerde bindmiddelen / geopolymeren	31
5.1. Marktontwikkeling	31
5.2. Beschikbaarheid van grondstoffen	32
6. Alternatieve benaderingen.....	34
6.1. Efficiënter materiaalgebruik	34
6.2. Recycling van cementsteen.....	34
7. Normen	36
8. Verwachte ontwikkeling van kosten en CO ₂ -uitstoot	37
8.1. Kostenontwikkeling	37
8.2. Ontwikkeling van de CO ₂ -uitstoot	37
9. Conclusies	38
10. Referenties.....	40

Bijlage A. Interview met Karen Scrivener (EPFL).....	44
Bijlage B. Interview met Gert Speets (Spetac)	47
Bijlage C. Interview met Rene Albers (Ecocem Benelux)	49
Bijlage D. Interview met Peter de Vries (Heidelberg/ENCI)	51
Bijlage E. Interview met Patrick Ammerlaan (Cementbouw/SQAPE)	54

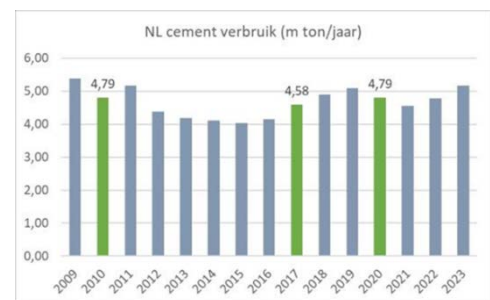
Managementsamenvatting

Rijkswaterstaat (RWS) heeft SGS Intron gevraagd een overzichtsrappport op te stellen over de ontwikkelingen rond de grondstoffen die worden gebruikt als belangrijkste componenten in op klinker gebaseerd cement en alkali-geactiveerde materialen. Het doel van dit rapport is Rijkswaterstaat een overzicht te geven van de beschikbaarheid van klinkervervangende materialen en grondstoffen voor cement voor de Nederlandse markt in de komende 10 jaar. SGS Intron heeft dit rapport opgesteld op basis van interne kennis en ervaring, een uitgebreide literatuurstudie en gesprekken met vijf vooraanstaande marktvertegenwoordigers. Het rapport gaat dieper in op de volgende aspecten:

- Gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias als bestanddeel in op klinker gebaseerd cement of alkali-geactiveerde bindmiddelen
- Alternatieve cementen met een aanzienlijk lagere milieu-impact ten opzichte van CEM I
- Alternatieve supplementaire cementeuze materialen (SCM)
- Alkali-geactiveerde bindmiddelen
- Alternatieve benaderingen op grondstofniveau voor de reductie van de CO₂-uitstoot in de betonindustrie.

De vraag naar cement in Nederland

Aan de huidige vraag naar cement in Nederland wordt voornamelijk voldaan door ingevoerde klinker die in eigen land wordt gebruikt om portlandcement (CEM I), portlandvliegiascement (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.



Figuur 1: Cementverbruik in Nederland

Gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias

Productie en gebruik

Gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias zijn de meest gebruikte vervangingen voor portlandcementklinker en cement in Nederland. Wereldwijd werd naar schatting 480-560 miljoen ton hoogovenslak geproduceerd in 2014, die nagenoeg volledig in cement of beton wordt toegepast. De hoeveelheid gegraneerde hoogovenslak die wereldwijd wordt gebruikt voor de productie van cement en beton bedraagt ca. 8% van de totale wereldproductie aan cement. Een verdere reductie aan CO₂-uitstoot van cement of beton door verhoogde inzet van gegraneerde hoogovenslak is dus beperkt.

Tabel 1: Wereldwijde productie en gebruik van gegraneerde hoogovenslak en poederkoolvliegias

	Gegraneerde hoogovenslak	Poederkoolvliegias
Wereldwijde productie in 2014 [miljoen ton]	480	675
Wereldwijd gebruik in cement of beton [miljoen ton]	ca. 400	ca. 250
Percentage van cementproductie [%]	8%	5%

In 2014 werd wereldwijd naar schatting 675 miljoen ton poederkoolvliegias geproduceerd. In 2018 bedroeg het gebruik wereldwijd ca. 250 miljoen ton. Dit is ca. 5% van de totale cementproductie.

Beleid en toekomstige ontwikkelingen

Het Klimaatakkoord maakt deel uit van het Nederlandse klimaatbeleid dat erop is gericht om de CO₂-eq uitstoot¹ te verminderen, en op die manier het aandeel van Nederland in de wereldwijde klimaatverandering verder te beperken [1, 2]. De doelstelling van het Klimaatakkoord is om de CO₂-uitstoot tegen 2030 te verminderen met 49% ten opzichte van 1990. Bovendien moet de uitstoot van broeikasgassen tegen 2050 met 95% zijn verminderd. Deze doelstellingen hebben grote gevolgen voor de energieproductie in kolengestookte centrales en de staalproductie in de staalindustrie in Nederland.

In Nederland worden technologieën zoals CO₂-afvang en -opslag en een smeltreductieproces verkend om de staalsector in leven te houden en tegelijkertijd de bijbehorende CO₂-uitstoot aanzienlijk te verminderen. Aangezien staal een noodzakelijk bouw materiaal is en de staalindustrie een strategische sector is binnen de EU, is het Nederlandse beleid gericht op mogelijkheden om het productieproces van staal te wijzigen en duurzamer te maken. Wanneer de Nederlandse staalfabriek omschakelt op waterstofreductie, dan kan de productie van gegranuleerde hoogovenslak worden voortgezet. Het is echter nog niet aangetoond dat de gegranuleerde hoogovenslak die met die methode wordt geproduceerd, dezelfde latent-hydraulische eigenschappen heeft als die uit het traditionele proces. Bovendien is het niet duidelijk of dezelfde hoeveelheden gegranuleerde hoogovenslak zullen worden geproduceerd. Er is meer onderzoek nodig naar de kwaliteit en de hoeveelheid van de gegranuleerde hoogovenslak die wordt verkregen door middel van het waterstofreductieproces vooraleer voorspellingen over de stabiliteit en de prijs van deze materiaalstroom kunnen worden gedaan. Als de staalindustrie in de Europese Unie geen nieuwe technologieën introduceert om de CO₂-uitstoot te verminderen, zal de staalproductie naar alle waarschijnlijkheid uit de EU verdwijnen en verhuizen naar landen waar producenten niet worden geconfronteerd met hoge CO₂-heffingen. Momenteel overstijgt de vraag naar gegranuleerde hoogovenslak als bestanddeel van op klinker gebaseerde cementen de binnenlandse productie. Daarom importeert Nederland hoogovenslak uit Duitsland, Frankrijk, Ierland, Engeland, Turkije en Brazilië.

In overeenstemming met het Klimaatakkoord plant Nederland de sluiting van alle kolengestookte centrales tegen 2030. Naast Nederland plannen ook andere EU-lidstaten de sluiting of vermindering van hun kolengestookte centrales. De Energy-Union in de EU dringt aan op een CO₂-neutraal energiesysteem dat zal resulteren in een aanzienlijke afname van de lokale productie van poederkoolvliegias. Wanneer de nationale klimaat- en energieplannen van de verschillende EU-lidstaten worden uitgevoerd, worden we geconfronteerd met een daling van de capaciteit van kolengestookte centrales met meer dan 60% tegen 2030. Mogelijke toekomstige Europese leveranciers van poederkoolvliegias zijn Polen, Tsjechië, Bulgarije, Roemenië, Slovenië, Griekenland, Slowakije, Kroatië, Turkije, Servië en Bosnië-Herzegovina.

Een toename van kolengestookte elektriciteitsproductie zal zich concentreren in India, Zuidoost-Azië en enkele andere landen in Azië, terwijl rekening moet worden gehouden met een daling in Europa, Canada, de Verenigde Staten en China. De verwachting is dat het grootste deel van het toegeleverde poederkoolvliegias tegen 2030 uit India zal komen. Naast nieuw geproduceerd poederkoolvliegias is er een groeiende belangstelling en research naar de kwaliteit en het gebruik van oud poederkoolvliegias dat wereldwijd is gestort of opgeslagen.

Alternatieve op klinker gebaseerde cementen

In de afgelopen jaren heeft de technologie achter lage CO₂-alternatieven voor zowel cement als klinker flinke stappen gezet, waardoor steeds meer alternatieve cementen zich aandienen. In dit rapport worden de status, het potentieel, afwijkingen in de technische eigenschappen en de duurzaamheid, en de milieu-impact van producten als belietrijke portlandcement, calciumsulfoalumiinaatcement (CSA), hydraulische calciumsilicaat cement geproduceerd met een hydrothermisch proces, door carbonatatie verhard cement en kalksteen-gecalcineerde klei-cement (LC³) besproken. Een overzicht van de potentiële vermindering van de CO₂-uitstoot, het TRL niveau (TRL = Technology Readiness Level) en de mogelijkheid van toepassing op grote schaal tegen 2030 van deze lage CO₂-portlandcement-alternatieven is in tabel 2 aangegeven.

¹ In dit rapport staat CO₂ voor de CO₂-equivalent

Tabel 2: Vermindering van CO₂-uitstoot, TRL-niveau en indicatie grootschalige toepassing in 2030 alternatieve bindmiddelen

	Vermindering van de CO ₂ -uitstoot*	TRL	Mogelijkheid van gebruik op grote schaal tegen 2030
Belietrijke portlandcement	10%	TRL 7	Laag/middelmatig
Calciumsulfoalumiinaatcement (CSA)	25–30 %	TRL 5-6	Laag/middelmatig
Beliet-CSA-ternesiet (BCT)	25–30 %	TRL 6-7	Middelmatig/hoog
Hydrothermisch vervaardigd cement	10%	TRL 3	Laag
Carbonatatie verhard cement	60%	TRL 9**	Middelmatig/hoog
Kalksteen-gecalcineerde klei-cement	30%	TRL 7	Middelmatig/hoog
Alkali-geactiveerde bindmiddelen	40-80%	TRL 5-7	Middelmatig/hoog

* Vermindering ten opzichte van CEM I CO₂-uitstoot

** Voor kleine, niet-gewapende betonelementen

Belietrijke portlandcementen zijn samengesteld uit meer dan 40% beliet (C₂S) en worden qua productietechnologie en grondstoffen op vergelijkbare wijze geproduceerd als gewone portlandcementen. Gemiddeld hebben ze een ongeveer 10% lagere CO₂-uitstoot in vergelijking met CEM I. Ze vertonen echter een trage sterkteontwikkeling en een bijbehorende lage hydradatiewarmte, waardoor ze vooral geschikt zijn voor toepassing in massabeton.

Calciumsulfoalumiinaatcement (CSA) wordt ook op vergelijkbare wijze geproduceerd als gewone portlandcement, maar de grondstofmix bestaat uit meer aluminiumbronnen en minder kalksteen. Dit resulteert in de ye'elimate fase (C₄A₃Ŝ). Hoe hoger de concentratie ye'elimate in CSA, hoe lager de CO₂-uitstoot, maar des te hoger de productiekosten van het cement.

Als alternatief om de productiekosten te verlagen, kan de ferriet fase (C₄AF) worden geïntroduceerd om een beliet-calcium sulfoalumiinaat-ternesiet (BCT) te creëren. BCT-cement wordt door Heidelberg Cement als "Ternocem" en door Lafarge als "Aether" op de markt gebracht. In vergelijking met portlandcement is de CO₂-uitstoot van Ternocem 30% lager; de CO₂-uitstoot van Aether is 25-30% lager dan CEM I.

Als alternatief kan een belietachtig hydraulisch bindmiddel worden geproduceerd met een hydrothermisch proces, dat een vergelijkbare samenstelling heeft als belietrijke portlandcement, maar dat veel reactiever is en een hogere sterkteontwikkeling heeft. Het productieproces is veel complexer dan gewone portlandcement en er zijn extra processtappen voor nodig. Deze methodes worden momenteel enkel in laboratoria getest. Thermodynamische berekeningen suggereren dat CO₂-reducties vergelijkbaar zijn met die van belietrijke portlandcement.

Door carbonatatie verhard cement, dat is samengesteld uit calciumsilicaat mineralen met laag kalksteengehalte, wordt steeds populairder en is niet langer beperkt tot de prefab-industrie. Deze klinkers kunnen worden vervaardigd in bestaande cementovens met traditionele grondstoffen in verschillende verhoudingen, en hebben in totaal een ongeveer 60% lagere CO₂-uitstoot in vergelijking met CEM I.

Het cement- en technologiebedrijf Solidia maakt gebruik van CO₂-uitharding voor de productie van Solidia beton. Solidia produceert eerst een alternatief cement met 30-40% minder CO₂-uitstoot in vergelijking met CEM I, dat vervolgens wordt uitgehard met CO₂, zodat in totaal een 60% lagere CO₂-uitstoot ten opzichte van CEM I wordt bereikt. Solidia cement wordt al commercieel toegepast bij de fabricage van niet-gewapende prefabbeton. Solidia cement is in de Verenigde Staten ook gekwalificeerd als een vervanger voor portlandcement in ter plaatse gestort beton. Solidia beton kan tot 25% sterker zijn dan CEM I, is beter vorstdooibestand en vergt een kortere nabehandeling. Het biedt echter geen bescherming tegen staalcorrosie.

Het bedrijf CarbonCure heeft een systeem ontwikkeld om vloeibare CO₂ tijdens het mengen in het natte beton te injecteren. De CO₂ gaat een chemische reactie aan met het cement en vormt massief calciumcarbonaat. CarbonCure is beschikbaar voor zowel ter plaatse gestort beton als voor prefabbeton. De vermindering van de

CO₂-uitstoot hangt af van het betreffende product, maar over het algemeen vertoont het een verhoging van de druksterkte in de orde van 10-20% in vergelijking met CEM I.

Kalksteen-gecalcineerde klei-cement of LC³ is een ander opkomend alternatief voor cement dat een hoge mate van klinkervervanging mogelijk maakt. LC³-50 bestaat uit 50% portlandcementklinker, 30% gecalcineerde klei, 15% kalksteen en 5% gips. Wanneer de gecalcineerde klei voldoende kaoliniet bevat, zijn de mechanische eigenschappen van LC³-50 vergelijkbaar met die van portlandcement (CEM I). Bovendien maakt LC³-50 een vermindering van de CO₂-uitstoot met 30% mogelijk ten opzichte van portlandcement (CEM I).

Er zijn geen nadelige effecten te verwachten van de hierboven genoemde alternatieve cementen op de circulariteit van beton. Daarom wordt verwacht dat de circulariteit vergelijkbaar is met cementen die vandaag de dag worden geproduceerd.

Alternatieve supplementaire cementeuze materialen

Cement op basis van portlandcementklinker zal een dominante factor blijven tot zeker 2030. Daarom is het van cruciaal belang om de portlandcementklinker gedeeltelijk te blijven vervangen door geschikte puzzolane of latent-hydraulische materialen (Supplementary Cementitious Materials, SCM) om de CO₂-uitstoot laag te houden. Naast gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias zijn er alternatieve SCM's zoals gemalen kalksteen, gecalcineerde klei, biomassa-vliegias, glasafval, bodemas van verbrandingsovens, lava, enz.

Kalksteen is een van de meest gebruikte SCM's wereldwijd, ondanks het feit dat het bijna inert is. Het effect van kalksteen is zowel fysisch als chemisch, en deze effecten kunnen de druksterkte verhogen. De vervanging van portlandcementklinker met 35 tot 50% kalksteen is mogelijk als CEM II/C-M in de norm EN 197-5 norm. CEM II/C-M kan eenvoudig worden toegepast vóór 2030 en kan de CO₂-uitstoot in vergelijking met CEM I tot 50% verminderen.

Gecalcineerde klei kan ook als SCM worden gebruikt. Terwijl klei overvloedig beschikbaar is, zich dicht bij het aardoppervlak en in alle geologische omgevingen bevindt, zijn de best functionerende kleisoorten gecalcineerde kleisoorten die kaoliniet bevatten. Die zijn doorgaans te vinden in tropische en subtropische omgevingen. De klei die in Nederland wordt gevonden is minder geschikt, omdat het kaolinietgehalte te laag is. De klei kan echter wel worden verrijkt. Gecalcineerde klei kan worden gebruikt om tot 30% portlandcementklinker te vervangen, zonder nadelige effecten voor de sterkteontwikkeling of duurzaamheid op lange termijn van het beton. Het gebruik van gecalcineerde klei kan in Nederland vóór 2030 worden geïmplementeerd.

Vliegias afkomstig van biomassa verbranding kan ook worden gebruikt als SCM of als alternatieve grondstof voor de productie van portlandcementklinker. De potentiële hoeveelheid biomassa-vliegias die jaarlijks in Nederland kan worden geproduceerd uit biomassa-afval bedraagt meer dan 2,7 miljoen ton (54% van het jaarlijkse cementverbruik in Nederland). Hoewel dit een enorme hoeveelheid materiaal lijkt te zijn, zijn er aanzienlijke ontwikkelingen nodig om dit op grote schaal te implementeren. Het is bijgevolg niet waarschijnlijk dat biomassa-vliegias vóór 2030 zal bijdragen tot de grondstoffenmix in Nederland.

Glasafval is voorgesteld als een mogelijk alternatief voor poederkoolvliegias of gegranuleerde hoogovenslak, vanwege de overvloedige beschikbaarheid, de chemische compatibiliteit met cement, en de lage kosten. Glasafval kan puzzolane eigenschappen vertonen wanneer het zeer fijn wordt gemalen. In vergelijking met poederkoolvliegias heeft gemalen glas een betere reactiviteit en een vergelijkbare sterkte op lange termijn. Het gebruik van gemalen glasafval als een gedeeltelijke vervanging voor portlandcement kan in Nederland mits voldoende stimulering al vóór 2030 worden geïmplementeerd.

Gemalen bodemas van verbrandingsovens, waarin een grote hoeveelheid glasafval aanwezig is, geeft nu al goede resultaten in betonproducten zoals betonnen straatstenen en tegels bij 25% vervanging van CEM I cement.

Momenteel wordt gewerkt aan regelgeving voor diverse reactieve vulstoffen in beton, zoals gemalen bodemas, lavasteen, e.d. Deze kunnen op korte termijn worden toegepast in beton.

Alkali-geactiveerde bindmiddelen

Ondanks decennia van onderzoek blijft het wereldwijde gebruik van alkali-geactiveerde bindmiddelen bijzonder klein, en beperkt tot nichetoeepassingen. Grootschalig gebruik wordt belemmerd door ontbrekende regelgeving, door vaak hogere kosten en de beschikbaarheid van grondstoffen die al in cement worden toegepast. Bovendien vraagt de verwerkbaarheid van alkali-geactiveerde bindmiddelen extra aandacht en vergen de sterk alkalische activatoren extra veiligheidsmaatregelen.

Alkali-geactiveerde bindmiddelen worden geproduceerd op basis van drie componenten: een aluminosilicaatbron, grove en fijne aggregaten en een activerende alkalische vloeistof. De aluminosilicaatbron bestaat meestal uit gegraneerde hoogovenslak, poederkoolvliegias of metakaolien (gecalcineerde vorm van het kleimineraal kaoliniet). De toekomstige beschikbaarheid van gegraneerde hoogovenslak en poederkoolvliegias in Nederland is onzeker. Momenteel worden deze materialen hoofdzakelijk gebruikt als gedeeltelijke vervanging van portlandcementklinker in cement. In vergelijking met gegraneerde hoogovenslak of poederkoolvliegias is voor metakaolien beduidend meer natriumsilicaat nodig voor de activering, waardoor het als bron van aluminosilicaat minder interessant is.

Als activator wordt momenteel voornamelijk natriumhydroxide in combinatie met natriumsilicaat gebruikt. Naast een beperkte productie-omvang zijn de productiekosten voor natriumsilicaat erg hoog. Net als natriumhydroxide is het bovendien een agressieve chemische stof waarvoor bijzondere veiligheidsmaatregelen vereist zijn. De wereldwijde vraag naar natriumhydroxide is veel groter dan de jaarlijkse productie. De beperkte beschikbaarheid en de hoge productiekosten voor natriumhydroxide beperken het gebruik van alkali-geactiveerde bindmiddelen.

Het gebrek aan geschikt precursormateriaal en de vereiste regelgeving zijn de grootste belemmeringen voor een wereldwijd, grootschalig gebruik van alkali-geactiveerde bindmiddelen. Daarom zijn ze momenteel gerangschikt als TRL 5-7. Alkali-geactiveerde bindmiddelen hebben echter een CO₂-uitstoot die 40 tot 80% lager kan zijn dan die van CEM I. Verdere ontwikkeling is dus meer dan gerechtvaardigd, met name wat betreft alternatieve grondstoffen voor alkali-geactiveerde bindmiddelen.

Alternatieve benaderingen

Om de beperkte beschikbaarheid van gegraneerde hoogovenslak of poederkoolvliegias te compenseren, kunnen alternatieve benaderingen (bijvoorbeeld een efficiënter materiaalgebruik en recycleren van cement) worden toegepast. Het noodzakelijke gehalte aan cement in beton kan worden gereduceerd door het optimaliseren van het mengselontwerp of het gebruik van chemische dispergeermiddelen en minerale vulstoffen. In plaats van "cement voor generieke toepassing" moet het bindmiddel worden gebruikt dat het meest geschikt is voor de betreffende toepassing en dat de laagste impact op het milieu heeft. Het materiaalverbruik kan worden gereduceerd door bijvoorbeeld meer geschikte toepassingen van hogesterktebeton. Bovendien kan de grote hoeveelheid bouw- en slooafval uit beton die in de EU wordt gegenereerd, worden gebruikt voor cement recycling. De ervaring leert dat zeer fijn materiaal uit gerecycleerd beton bruikbaar is als primaire grondstof voor de productie van portlandcementklinker. Daarnaast kan dit zeer fijn materiaal ook worden gebruikt als cementvervanging.

Normen (zoals EN 206/NEN 8005) zijn vaak een grote obstakel voor het verbeteren van de CO₂-uitstoot van beton, omdat ze gebaseerd zijn op een minimaal cementgehalte. Beton zou niet uitsluitend mogen worden gedefinieerd op basis van de samenstelling, maar zou eerder geclassificeerd moeten worden op basis van prestatie-eigenschappen zoals bestandheid tegen aantastingsmechanismen, duurzaamheid en circulariteit. Normen op basis van prestaties (zoals CUR-Aanbeveling 48 in Nederland, ASTM C1157 in de VS en de Exposure Resistance Classes (weerstandsklassen) in de toekomstige norm EN 206) zijn een stap in de goede richting. Om de verlaging van de CO₂-uitstoot bij de productie van beton te bevorderen, moet meer nadruk worden gelegd op CUR-Aanbeveling 48 die het gebruik van alternatieve bindmiddelen met gelijkwaardige prestaties

mogelijk maakt. Hierdoor kan beton worden geproduceerd dat geoptimaliseerd is voor specifieke toepassingen en op basis van plaatselijk beschikbare grondstoffen, in plaats van de conventionele benadering van één type beton voor alle toepassingen.

Vooruitzichten voor 2030

Verwacht wordt dat de CO₂-uitstoot en dus ook de MilieuKostenIndicator (MKI) van de bindmiddelen portlandcement (CEM I), portlandvliegascement (CEM II/B-V) en cement op basis van gegranuleerde hoogovenslak (CEM III/A en CEM III/B) in de komende jaren zullen toenemen als gevolg van de grotere transportafstanden van de grondstoffen.

Aangezien er in Nederland en de omliggende landen een groeiend tekort aan poederkoolvliegascement is, en er in de nabije toekomst een tekort aan gegranuleerde hoogovenslak te verwachten is, zullen deze materialen van op verre afstanden, meestal buiten de EU, geïmporteerd moeten worden. Hierdoor zullen zowel de CO₂-uitstoot als de kosten van bindmiddelen die met deze materialen worden geproduceerd, tegen 2030 toenemen.

Een groene transformatie van de binnenlandse staalproductie zou voldoende gegranuleerde hoogovenslak kunnen opleveren om CEM III/A en CEM III/B te produceren met een marginale stijging van de CO₂-uitstoot (als gevolg van de verwachte stijging van de CO₂-uitstoot van portlandcementklinker die verantwoordelijk is voor 20-64% van deze cement). Daarvoor is echter nog meer onderzoek nodig.

Tabel 3: Berekende toename van de CO₂-uitstoot voor enkele cementen door grotere transportafstanden grondstoffen (gebaseerd op de indicatieve berekeningen van SGS INTRON)

Cementtype	Toename van de CO ₂ -uitstoot			
	Portlandcement- klinker uit België, Duitsland en Portugal	Hoogovenslak uit Turkije	Poederkool- vliegascement uit India	Totale toename
CEM I	3%	nvt	nvt	3%
CEM III/A (50% slak)	1,5%	+7%	nvt	8,5%
CEM III/B (65% slak)	1%	+12%	nvt	13%
CEM II/B-V (30% vliegascement)	2%	nvt	+8%	10%

Alternatieve cementen zoals beliet-CSA-ternesiet (BCT), LC³-50 en CEM II/C hebben een 30% lagere CO₂-uitstoot dan het traditionele CEM I cement en vergelijkbare prestaties met betrekking tot sterkte en duurzaamheid (levensduur). Bijgevolg zal de vervanging van CEM I door deze alternatieve cementen bijdragen aan onze ambitie om de CO₂-uitstoot van beton tegen 2030 aanzienlijk te verminderen. Deze cementen zijn echter geen alternatieven voor CEM III cement voor het verminderen van de CO₂-uitstoot. Enkel door carbonatatie gehard cement zoals Solidia en CarbonCure heeft een vergelijkbare reductie van de CO₂-uitstoot als CEM III/B. Door carbonatatie gehard cement kan echter niet in alle soorten beton worden gebruikt. Bovendien zijn speciale apparatuur en processen nodig. Met uitzondering van CEM II/C wordt verwacht dat de kosten voor de productie en/of de toepassing van het alternatieve cement hoger zullen zijn dan voor CEM I cement, vooral in de eerste tien jaar in een zich ontwikkelende markt.

Alkali-geactiveerde bindmiddelen kunnen een vergelijkbare of zelfs lagere CO₂-uitstoot hebben dan CEM III/B. De toenemende (transport) kosten voor het traditionele precursormateriaal en de verwachte toename van de CO₂-heffing op de activatoren zal waarschijnlijk na verloop van tijd resulteren in hogere kosten voor alkali-geactiveerde bindmiddelen.

De verwachting is dat de beschikbaarheid en/of het gebruik van nieuwe CO₂-arme bindmiddelen tegen 2030 beperkt zal zijn. Voor de momenteel beschikbare nieuwe CO₂-arme cementen en alkali-geactiveerde bindmiddelen zal het gebruik afhankelijk zijn van de marktacceptatie en de tolerantiegraad van de regelgeving. Vanuit het oogpunt van levensduur en materiaalbeschikbaarheid zal het mogelijk zijn om met alternatieve cementen, alternatieve SCM's en/of alkali-geactiveerde bindmiddelen dezelfde constructies te bouwen als we nu

doen, maar het zal moeilijk zijn om dat te bereiken tegen 2030. Met uitzondering van CEM II/C met een hoog percentage kalksteen (36-50%) is voor de meeste van deze alternatieven een specifieke stimulering noodzakelijk.

Om de doelstellingen voor de reductie van de CO₂-uitstoot in 2030 te halen, zijn vanuit betontechnologisch perspectief extra maatregelen nodig, zoals bijvoorbeeld: optimalisering van het mengselontwerp en toepassing van de poederfractie die vrijkomt bij recycling van betonreststromen.

1. Inleiding

1.1. Algemeen

Een bindmiddel is een materiaal dat wordt gebruikt voor het binden van andere materialen (zoals aggregaten, vulstoffen, vezels en andere stoffen) tot een samenhangend geheel, als een middel om het materiaal een structurele stabiliteit te geven. Cementen en alkali-geactiveerde bindmiddelen zijn daar voorbeelden van. Cement is fijngemalen anorganisch materiaal dat bij vermenging met water een pasta vormt. Door middel van hydratatiereacties hardt de pasta uit, waardoor het materiaal zijn sterkte en stabiliteit zelfs onder water behoudt [3]. Portlandcementklinker is een hydraulisch materiaal waarvan tenminste twee derde bestaat uit calcium-silicaten. Portlandcementklinker wordt vervaardigd door het sinteren van een specifiek mengsel van grondstoffen die de oxiden CaO , SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 bevatten. Bij cement op basis van klinker wordt portlandcementklinker gebruikt als een van de hoofdbestanddelen, maar het kan worden gemengd met andere minerale bestanddelen, zoals gedefinieerd in EN 197-1[3]. Hoewel er enige discussie is over de werkelijke definitie van alkali-geactiveerde bindmiddelen [4], gaat het daarbij in het algemeen over latent-hydraulische en puzzolane materialen die hun sterkte en stabiliteit verkrijgen door een chemische reactie tussen een alkalische activator en aluminosilicaatrijke grondstoffen (precursors). Deze worden alkali-geactiveerde bindmiddelen of geopolymeren genoemd, afhankelijk van de exacte samenstelling en het reactiemechanisme.

De cementen die in Nederland doorgaans worden gebruikt (CEM I, CEM III en CEM II/B-V) en hun betonequivalent 'Attestbeton' zijn al decennia lang gebaseerd op de vertrouwde grondstoffen: portlandcementklinker, gegraneerde hoogovenslak en poederkoolvliegias. Als gevolg van het overheidsbeleid (o.a. versnelde sluiting van kolengestookte centrales) en autonome marktontwikkelingen (o.a. technologische ontwikkelingen in de productie van staal) zal tegen 2030 plaatselijk minder gegraneerde hoogovenslak en minder poederkoolvliegias worden geproduceerd.

Cement op basis van deze twee grondstoffen wordt gebruikt bij de productie van duurzaam beton, zowel in de zin van een lange levensduur als van een lagere CO_2 -uitstoot. Bovendien zijn gegraneerde hoogovenslak en poederkoolvliegias momenteel de meest gebruikte grondstoffen (precursors) in alkali-geactiveerde bindmiddelen, die ook kunnen worden gebruikt om duurzaam beton te produceren. Aangezien onze samenleving afhankelijk is van deze grondstoffen, is het van cruciaal belang om te anticiperen op de marktsituatie die zich zal ontwikkelen tegen 2030.

1.2. Opzet van het rapport

Dit rapport is gebaseerd op de kennis en ervaring die beschikbaar is bij SGS INTRON, aangevuld met actuele literatuur (zie hoofdstuk 10), data en gesprekken met vijf belangrijke marktvertegenwoordigers. De gesprekken werden gehouden met Karen Scrivener van de École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Gert Speets van Spetac, Rene Albers van Ecocem Benelux, Peter de Vries van Heidelberg/ENCI, en Patrick Ammerlaan van Cementbouw en SQAPE (zie Bijlage A-E). De volgende aspecten werden in overweging genomen en besproken:

- De huidige situatie en de verwachte ontwikkelingen tegen 2030 met betrekking tot de beschikbaarheid en de kwaliteit van gegraneerde hoogovenslak en poederkoolvliegias voor de Nederlandse markt, voor cement op basis van portlandcementklinker en als component in beton met gelijkwaardige prestaties ('Attestbeton').
- De status en het potentieel van alternatieve cementen met een beduidend lagere milieu-impact ten opzichte van CEM I die worden ontwikkeld door de cementindustrie. Waar mogelijk is aangegeven in hoeverre de technische eigenschappen van deze nieuwe cementen verschillen van het huidige cement, in het bijzonder met betrekking tot de verwachte levensduur van het beton (duurzaamheid). Er is ook nagegaan in hoeverre de milieu-impact (CO_2 -uitstoot en MKI-waarde) naar verwachting zal dalen en of er sprake is van invloed op de circulariteit van beton (CI-waarde).

- De ontwikkelingen op de markt en in de (alternatieve) grondstoffen (precursoren) die kunnen worden gebruikt voor alkali-geactiveerde bindmiddelen tegen 2030. Waar mogelijk is aangegeven in hoeverre de technische eigenschappen van deze nieuwe bindmiddelen afwijken van het cement dat momenteel in Nederland wordt gebruikt, in het bijzonder met betrekking tot de verwachte levensduur van het beton (duurzaamheid). Met betrekking tot de precursors is ook nagegaan in hoeverre de milieu-impact (MKI-waarde) naar verwachting zal dalen en of er sprake is van invloed op de circulariteit van beton (CI-waarde). Voor de betonmengsels met actuele precursors is op dit moment al een monitoringsonderzoek² in uitvoering, waarbij de milieu-impact en de circulariteit van de verschillende geopolymeerbetonmengsels worden gekwantificeerd.

² Project met TNO in opdracht van RWS. Projectnummer: A110090.

2. Huidige situatie en verwachte ontwikkelingen

2.1. Huidige vraag naar cement en beton in Nederland

In de afgelopen 20 jaar bedroeg het gebruik van cement in Nederland gemiddeld ongeveer 5 miljoen ton per jaar (0,1% van het wereldwijde productie) [5]. Na de sluiting van de ENCI-cementoven in Maastricht in 2019 wordt in Nederland geen portlandcementklinker meer geproduceerd. Er wordt in Nederland echter nog steeds cement gemalen, met name portlandcement (CEM I), portlandvliegascement (CEM II/B-V) en hoogovencement (CEM III/A en CEM III/B). Aangezien de CO₂-uitstoot van cement hoofdzakelijk wordt bepaald door het gehalte aan portlandcementklinker, is het voordelig om cement te mengen met gegraneerde hoogovenslak en/of poederkoolvliegascement. Om dit cement te malen wordt portlandcementklinker geïmporteerd uit onder andere België, Duitsland en Portugal. Het transport van die portlandcementklinker verhoogt de CO₂-uitstoot enigszins en dus ook de MKI-waarde van het cement. Vanwege het extra transport is er een gemiddelde verhoging van 3% in de CO₂-uitstoot in vergelijking met CEM I dat is gemaakt met plaatselijk geproduceerde klinker (zie tabel 4).

Tabel 4: Toename in de CO₂-uitstoot voor portlandcementklinker, geïmporteerd uit België (vrachtwagen), Duitsland (vrachtwagen) en Portugal (schip), in vergelijking met in Nederland geproduceerde klinker [%] (indicatieve berekeningen van SGS INTRON)

	België	Duitsland	Portugal
Aardopwarmingsvermogen (GWP)	+2%	+4%	+4%

In 2018 importeerde Nederland meer dan 190 kiloton cementklinker en 1700 kiloton portlandcement (zie tabel 5) [6]. De betonmortelindustrie is goed voor ongeveer 50-55% van het gebruik van cement in Nederland, terwijl geprefabriceerde betonproducten goed zijn voor 35-40%. Het resterende aandeel cement wordt onder andere gebruikt door aannemers, bouwmaterialenhandel en leveranciers van vloer- en metselspecies [5].

Tabel 5: Import en export van cementklinker, portlandcement en andere hydraulische cementen in Nederland in 2018 [6]

	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

Al bijna een eeuw wordt in Nederland cement op basis van gegraneerde hoogovenslak (vergelijkbaar met de huidige equivalent CEM III/B) gebruikt voor grote infrastructuren [7], vanwege de hoge weerstand tegen chloridepenetratie en alkali-silicareactie (ASR). Al decennia lang vertrouwt Nederland in grote mate op CEM III/B, en in vergelijking met andere EU-landen is het gebruik van CEM I laag. Van het totale gebruik aan cement in Nederland, bedraagt CEM III 55-60%, CEM I 30-35% en CEM II + CEM V samen de resterende 5-10% [5].

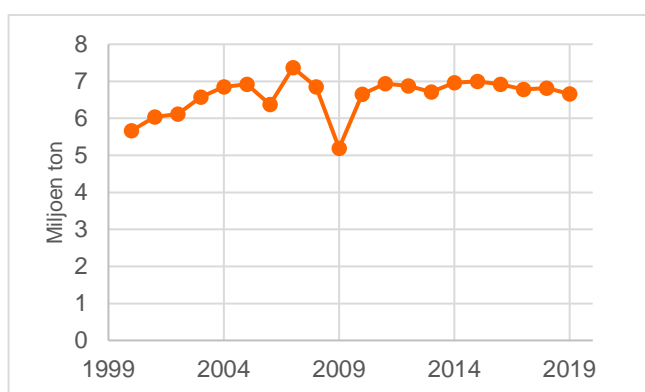
Het gemiddelde gehalte aan portlandcementklinker in cement die in Nederland wordt gebruikt, bedraagt ongeveer 50%, wat aanzienlijk lager is dan het gemiddelde gehalte wereldwijd, dat ongeveer 75% bedraagt [8]. De verwachting is dat het wereldwijde gemiddelde gehalte van portlandcementklinker in cement zal dalen tot ongeveer 70% in 2050, maar dat ligt nog steeds aanzienlijk hoger dan het huidige gemiddelde in Nederland. Dit huidige gemiddelde gehalte van 50% portlandcementklinker in Nederland zou tegen 2030 nog verder moeten dalen, als gevolg van het Betonakkoord. Vanwege het grootschalige gebruik van cement met een laag klinkergehalte (CEM III/B) heeft het cement dat in Nederland wordt gebruikt, het laagste CO₂-profiel in de wereld. De productie van het cement dat in Nederland wordt gebruikt, is verantwoordelijk voor 1,2% van de totale antropogene CO₂-uitstoot, terwijl de productie van cement op wereldwijde schaal verantwoordelijk is voor ongeveer 7% van de totale antropogene CO₂-uitstoot [8]. Het aanscherpen van het Nederlandse milieubeleid zal geen grote impact hebben op de reductie van de wereldwijde CO₂-uitstoot van de cementindustrie, omdat we slechts 0,1% van de wereldwijde cementproductie gebruiken en het CO₂-profiel van Nederlands cement al aanzienlijk lager ligt dan het wereldgemiddelde. Nederland heeft echter de unieke gelegenheid om het voortouw

te nemen en met zijn kennis en ervaring andere EU-landen bij te staan in de uitwerking van een adequaat milieubeleid. Bovendien kan de kennis en ervaring in Nederland een voorbeeld stellen voor een wereldwijde overgang. Om deze positie te kunnen behouden, moet Nederland voortdurend op de hoogte blijven van nieuwe ontwikkelingen in de industrie, en moet het die steeds in een vroeg stadium blijven implementeren.

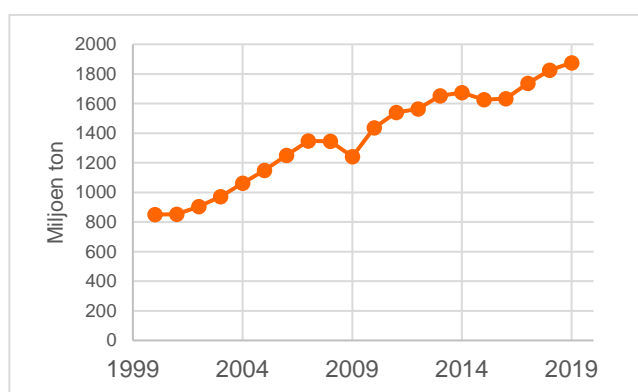
Wereldwijd gaat de groei in de productie van cement gelijk op met de groeisnelheid van de bevolking. Naar verwachting zal de huidige wereldbevolking tegen 2030 met 9% groeien, van 7,8 miljard naar 8,5 miljard [9]. In diezelfde periode zal de wereldwijde productie van cement naar verwachting met ongeveer 4% groeien van 4100 miljoen ton per jaar naar 4250 miljoen ton per jaar. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat landen zich geïnteresseerd hebben om de uitstoot van CO₂ te beperken en de energie-efficiëntie te verhogen, met inbegrip van nationaal vastgestelde bijdragen in het kader van het Akkoord van Parijs [1, 10]. De voorspelling is dat de groei van de vraag naar cement geconcentreerd zal zijn in ontwikkelingslanden. In deze landen loopt de bevolkingsgroei parallel op met een kwantitatief en kwalitatief tekort in de bebouwde omgeving en een streven naar urbanisatie [11]. Aangezien dit niet het geval is in Nederland, kunnen we aannemen dat de vraag naar cement tot 2030 vrij stabiel zal blijven en de natuurlijke schommelingen van de economie zal volgen. Bovendien is de vraag naar cement in Europa al bijna een decennium stabiel gebleven, en vertegenwoordigt die momenteel 5% van de mondiale productie [12].

2.2. Gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias

Gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias zijn naast de cementklinker de meest gebruikte hoofdbestanddelen in Nederlandse cementen. Op mondiaal vlak variëren de materialen die kunnen worden gebruikt als vervanging voor portlandcementklinker aanzienlijk, afhankelijk van wat er lokaal beschikbaar is en wat door de plaatselijke regelgeving toegelaten is [13]. De beschikbaarheid van poederkoolvliegias is afhankelijk van voldoende dichtbijgelegen kolengestookte centrales. De beschikbaarheid van gegraneerde hoogovenslak is afhankelijk van de ligging van hoogovens voor de productie van ruwrijzer die zijn uitgerust met een installatie voor het granuleren van slakken [14]. Wanneer die materialen lokaal niet beschikbaar zijn, kunnen ze uit andere landen worden geïmporteerd. De kwaliteit van poederkoolvliegias kan echter variëren, terwijl de kwaliteit van gegraneerde hoogovenslak redelijk constant is [15, 16].



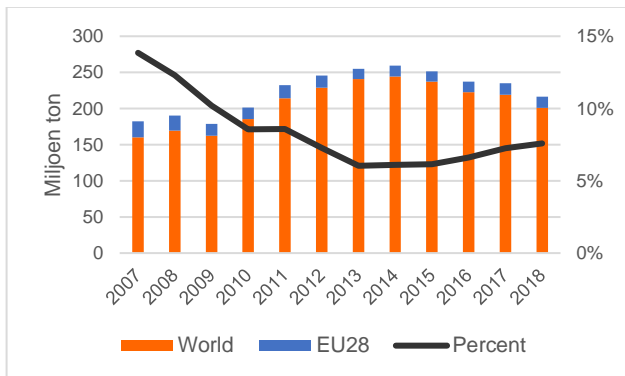
Figuur 2: Productie van ruwstaal in Nederland tussen 2000 en 2019 [17]



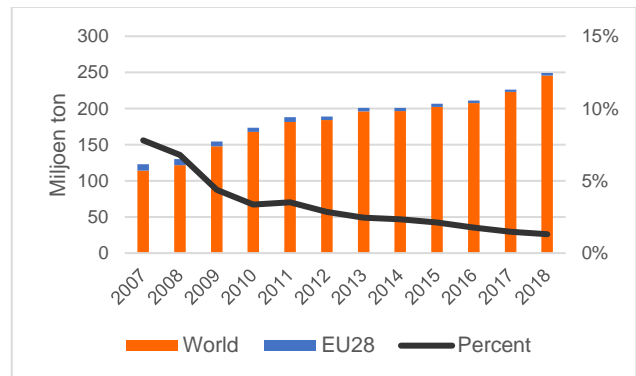
Figuur 3: Wereldwijde productie van ruwstaal tussen 2000 en 2019 [17]

In de afgelopen negen jaar bleef de productie van ruwstaal in Nederland redelijk stabiel rond 7 miljoen ton per jaar (zie figuur 2), terwijl de wereldwijde productie van staal is gegroeid tot ongeveer 1800 miljoen ton per jaar (zie figuur 3). Voor elke geproduceerde ton ruwrijzer werd ongeveer 0,20-0,25 ton hoogovenslak gegenereerd [18]. In Nederland wordt de hoogovenslak nagenoeg volledig gegraneerd en toegepast in cement. Wereldwijd wordt ook al 80-90% van de hoogovenslak gegraneerd en toegepast in cement of beton. Daarom is er nog maar een beperkte mogelijkheid om de CO₂-uitstoot van cement te reduceren door meer gebruik van gegraneerde hoogovenslak te maken [11].

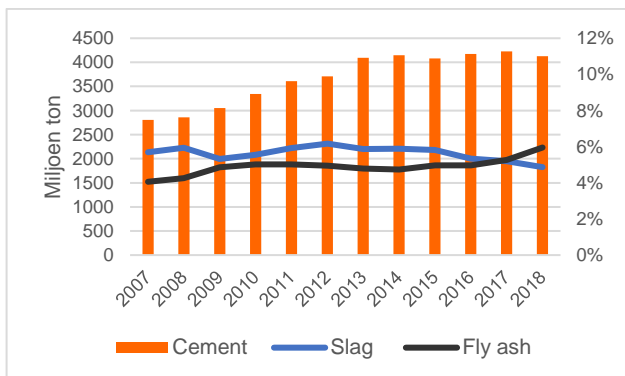
Wereldwijd werd naar schatting 480 miljoen ton gegranuleerde hoogovenslak geproduceerd in 2014 [1]. In datzelfde jaar werd in de EU 14,9 miljoen ton gegranuleerde hoogovenslak gebruikt voor de productie van CEM II en CEM III cement. Het percentage gegranuleerde hoogovenslak dat wordt gebruikt voor de productie van cement in de EU varieerde sinds 2007 tussen 6% en 14% ten opzichte van het wereldwijde verbruik (zie figuur 4).



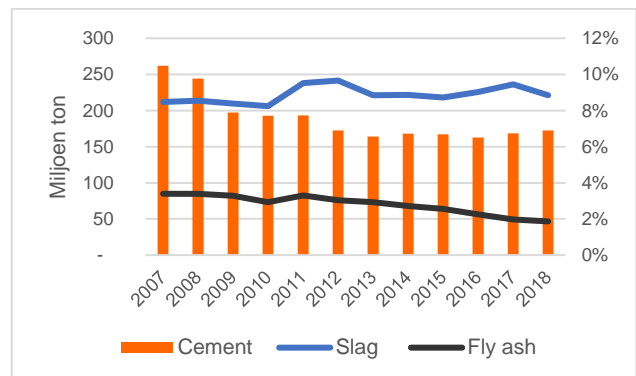
Figuur 4: Gegranuleerde hoogovenslak die wordt gebruikt voor de productie van gemengd cement of als vervanging van cement, wereldwijd en in de EU [miljoen ton] en het percentage gebruikte gegranuleerde hoogovenslak in de EU ten opzichte van het gebruik wereldwijd [%]. [10]



Figuur 5: Poederkoolvliegias dat wordt gebruikt voor de productie van gemengd cement of als vervanging van cement, wereldwijd en in de EU [miljoen ton] en het percentage gebruikte poederkoolvliegias in de EU ten opzichte van het gebruik wereldwijd [%]. [10]



Figuur 6: Totale wereldwijde productie van cementgebonden producten [miljoen ton] in vergelijking met het percentage daarvan van gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias dat wordt gebruikt voor de productie van gemengd cement of als vervanging van cement wereldwijd [%]. [10]



Figuur 7: Totale EU-productie van cementgebonden producten [miljoen ton] in vergelijking met het percentage daarvan van gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias dat wordt gebruikt voor de productie van gemengd cement of als vervanging van cement in de EU [%]. [10]

In 2014 werd wereldwijd naar schatting 675 miljoen ton poederkoolvliegias geproduceerd [1]. In de EU piekte het gebruik van poederkoolvliegias (voor de productie van gemengd cement of als vervanging van cement) op 8,9 miljoen ton in 2007, maar is sindsdien gedaald tot 3,2 miljoen ton in 2018 [10]. Tegelijkertijd steeg het verbruik wereldwijd van 114 miljoen ton naar 246 miljoen ton. Als gevolg daarvan is de hoeveelheid toegepaste poederkoolvliegias in de EU ten opzichte van het wereldwijde gebruik gedaald van 8% naar 1% (figuur 5). Aangezien steeds meer kolengestookte elektriciteitscentrales in West-Europa worden gesloten, zal het gebruik van poederkoolvliegias in cement tegen 2030 afhankelijk zijn van import, of moeten alternatieve vervangende materialen worden gebruikt (zie hoofdstuk 4).

Door variaties in de kwaliteit van poederkoolvliegias daalt de hoeveelheid die in cement kan worden gebruikt [19]. De aard en de eigenschappen van poederkoolvliegias zijn afhankelijk van een aantal factoren, zoals de minerale samenstelling van de steenkool, de oven-/keteltemperatuur, het type en de fijnheid van de steenkool en de

verblijfsduur in de oven [20]. Omwille van de sterke variatie in kwaliteit ligt de hoeveelheid wereldwijd geproduceerd poederkoolvliegias die uiteindelijk in cement kan worden gebruikt, rond 5% (200 miljoen ton) van de jaarlijkse wereldwijde cementproductie (4000 miljoen ton) [1, 19]. Wereldwijd bedroeg de hoeveelheid poederkoolvliegias die werd gebruikt voor de productie van cement of cementvervanger tussen 2007 en 2018 gemiddeld 5% van de totale wereldproductie van cement (figuur 6) [10]. In de EU is dat ca. 3% (figuur 7) [10]. In dezelfde periode bedroeg de hoeveelheid gegraneerde hoogovenslak die wereldwijd werd gebruikt voor de productie van cement of cementvervanger gemiddeld 6% van de totale wereldproductie van cement (figuur 6) en in de EU 9% (figuur 7) [10].

In 2016 werd in de EU 27 miljoen ton poederkoolvliegias gebruikt voor bouwdoeleinden, waarvan 14% (3,8 miljoen ton) werd gebruikt als grondstof voor cement (zie tabel 6) [21]. Terwijl 27 miljoen ton poederkoolvliegias werd gebruikt in de EU, werd in dat jaar slechts 26 miljoen ton geproduceerd. Dit geeft aan dat 96% van het poederkoolvliegias voor bouwdoeleinden in de EU werd gedekt door de eigen EU-productie. De rest werd van buiten de EU geïmporteerd.

Tabel 6: Toepassingen van poederkoolvliegias in de EU in 2016 [21]

Gebruik	Hoeveelheid (kiloton)	Percentage van het totale verbruik
Grondstof voor cement	1.881	7,0%
Gemengd cement	1.936	7,2%
Vulstof in beton	4.638	17,3%
Cellenbeton	433	1,6%
Betonstenen	195	0,7%
Bakstenen + keramiek	63	0,2%
Mortels	229	0,9%
Vulstof voor asfalt	22	0,1%
Stabilisatielagen	71	0,3%
Ophoogmateriaal algemeen	928	3,5%
Ophoogmateriaal constructief	569	2,1%
Bodemverbeteraar	43	0,2%
Infill	167	0,6%
Andere toepassingen	187	0,7%
Herinrichting, restauratie	13.854	51,6%
Tijdelijke voorraad	263	1,0%
Storten/verwijderen	1.359	5,1%
Totaal gebruik (inclusief hergebruik)	26.838	
Productietotaal	25.741	95,9%

2.3. Belangrijkste akkoorden over de CO₂-uitstoot

Het Klimaatverdrag, het Kyoto-protocol, het Akkoord van Parijs en de Europese Green Deal zijn bekende initiatieven die gericht zijn op het verminderen van de CO₂-uitstoot en van de risico's van de klimaatopwarming. Om de doelstellingen van deze internationale initiatieven te realiseren, hebben nationale regeringen hun eigen beleid daarop ingesteld. Het Klimaatakkoord maakt deel uit van het Nederlandse klimaatbeleid om de CO₂-uitstoot te verminderen, en op die manier het aandeel van Nederland in de wereldwijde klimaatverandering te beperken [2]. De doelstelling van het Klimaatakkoord is om de CO₂-uitstoot tegen 2030 te verminderen met 49% ten opzichte van 1990. Bovendien moet de uitstoot van deze broeikasgassen tegen 2050 met 95% zijn

verminderd. Het doel van deze beide ambities is om ervoor te zorgen dat de klimaatopwarming 1,5°C niet overstijgt. Deze doelstellingen hebben grote gevolgen voor zowel de productie van energie door kolengestookte centrales als voor de productie van ijzer en staal in Nederland.

Aangezien staal een noodzakelijk bouw materiaal is en de staalindustrie een strategische sector is binnen de EU, is het Nederlandse beleid gericht op mogelijkheden om het productieproces van staal te wijzigen en duurzamer te maken. Als onderdeel van het Klimaatakkoord benadrukt de Taakgroep Innovatie hoe de Nederlandse staalindustrie ertoe kan bijdragen om de reductiedoelstellingen tegen 2050 te bereiken door middel van interdisciplinaire technologieën [22]. Het gaat daarbij om een breed scala aan alternatieve technologieën die het potentieel hebben om de CO₂-uitstoot bij de staalproductie aanzienlijk te verminderen. Als onderdeel van hun meerjarige, missiegedreven innovatieprogramma's heeft de Taakgroep Innovatie koolstofafvang en -opslag (CCS - Carbon Capture and Storage) en een smeltreductieproces (Hisarna) geïdentificeerd als potentiële technieken voor ontwikkeling en demonstratie. Momenteel is een Hisarna-proeffabriek in IJmuiden operationeel [23]. De opschaling van deze fabriek is gepland door Tata Steel in Jamshedpur, India.

In overeenstemming met het Klimaatakkoord plant Nederland de sluiting van alle kolengestookte centrales tegen 2030. Naast Nederland plannen ook andere lidstaten de sluiting of vermindering van hun kolengestookte centrales. Uit de nationale akkoorden van verschillende lidstaten is een overzicht van de sluiting van kolengestookte elektriciteitscentrales opgesteld (zie tabel 7). De Energy-Union in de EU dringt aan op een CO₂-neutraal energiesysteem dat is gebaseerd op hernieuwbare energie, slimme netwerken, decentrale energieopwekking en de actieve deelname van prosumers (= productie door consumenten) via de digitalisering van energiediensten. Dit zal uiteraard leiden tot een forse daling in de plaatselijke productie van poederkoolvliegast tegen 2030.

Tabel 7: Nationale Klimaat- en Energieplannen voor 2021 tot 2030 zoals ingediend door de lidstaten

	Elimineren/reduceren van de steenkoolverbranding	Geen plannen of toename van de productie
Oostenrijk	Oostenrijk heeft kolengestookte elektriciteitsopwekking uitgefaseerd.	
België	België heeft kolengestookte elektriciteitsopwekking uitgefaseerd.	
Bulgarije		De Bulgaarse regering, die zich baseert op uitzonderingsmogelijkheden in de EU-wetgeving om haar energie-activiteiten te behouden, heeft geen plannen om steenkool uit de energiemix te halen.
Kroatië		De twee resterende kolengestookte centrales in Kroatië zijn nog steeds in werking, en het land heeft geen plannen aangekondigd om het gebruik van die brandstof uit te faseren.
Cyprus		
Tsjechië		De Tsjechische Republiek heeft geen officiële plannen voor de ontmanteling van zijn kolengestookte centrales.
Denemarken	Uitfaseren van het gebruik van kolen in de elektriciteitsproductie tegen 2030.	
Finland	Uitfaseren van het gebruik van kolen in de energieproductie tegen 2029.	
Frankrijk	Uitfaseren van het gebruik van kolen in de energieproductie tegen 2022.	
Duitsland	Geleidelijke afbouw en uitfasering van kolengestookte elektriciteitsopwekking tegen uiterlijk 2038 (op zijn vroegst in 2030).	
Griekenland	De Griekse premier heeft aangekondigd dat het land alle kolengestookte elektriciteitsproductie tegen 2028 geleidelijk zal uitfaseren, en op die manier de weg zal vrijmaken voor een overgang naar duurzame energie. Op	

	één na zullen alle bruinkoolgestookte elektriciteitscentrales tegen 2023 worden gesloten. Het is de bedoeling dat de laatst overblijvende centrale de productie van elektriciteit stopt in 2028, 6 jaar na de voltooiing van de fabriek.	
Hongarije	De Hongaarse regering heeft aangekondigd dat het land het gebruik van steenkool tegen 2030 uitfaseert en volledig afhankelijk zal zijn van hernieuwbare energiebronnen.	
Ierland	Uitfaseren van het gebruik van turf en kolen in de elektriciteitsproductie tegen 2025.	
Italië	Uitfaseren van het gebruik van kolen in de energieproductie tegen 2025.	
Nederland	Uitfaseren van het gebruik van kolen in de energieproductie tegen 2030.	
Polen		In Polen zijn vijf nieuwe kolengestookte centrales in aanbouw. Het land staat onder druk om zijn doelstellingen inzake de bestrijding van de luchtvervuiling te halen, maar heeft geen officiële plannen om steenkool uit te faseren.
Portugal	Uitfaseren van het gebruik van kolen in de energieproductie tegen 2021.	
Roemenië		Als gevolg van de economische druk in de mijnbouwsector heeft Roemenië verklaard de intentie te hebben om af te stappen van het gebruik van steenkool tegen 2040, maar het heeft daarover nog geen officiële verklaring afgelegd. De overheid heeft één kolengestookte centrale in aanbouw met een Chinese investeerder, maar het project heeft nog geen noemenswaardige vooruitgang geboekt.
Slowakije	Uitfaseren van het gebruik van kolen in de elektriciteitsproductie tegen 2030.	
Slovenië		Slovenië heeft geen plannen voor de uitfasering van het gebruik van steenkool, en voegde in 2016 de Sostanj 6 kolengestookte centrale toe aan het elektriciteitsnetwerk. Het is de bedoeling dat die centrale actief blijft tot 2054.
Spanje	Uitfaseren van het gebruik van kolen in de elektriciteitsproductie tegen 2030 (met een vroegere mogelijkheid tegen mid-2020).	
Zweden	Zweden heeft kolengestookte elektriciteitsopwekking uitgefaseerd.	

2.4. Verwachte beschikbaarheid van gegranuleerde hoogovenslak

De wereldwijde beschikbaarheid van gegranuleerde hoogovenslak staat niet ter discussie tussen nu en 2030. Na 2030 echter is de toekomst van de staalindustrie in de EU en meer bepaald in Nederland onzeker [24]. Steeds strengere milieuwetten die gericht zijn op het beperken van de klimaatverandering zijn in strijd met de staalindustrie als een strategische sector van het EU-beleid. De Europese staalindustrie wordt ertoe verplicht om de CO₂-uitstoot tegen 2050 te verminderen tot 80-95% van het niveau van 1990 [25]. Voor die overgang zullen aanzienlijke investeringen nodig zijn in nieuwe technologische ontwikkeling en toepassing, en in energieinfrastructuur, energiebronnen en energie. Dit betekent dat veranderingen in een geleidelijk proces zullen plaatsvinden met een gecontroleerde overgang tussen de verschillende fasen. De ontwikkeling en implementatie van diverse nieuwe technologieën is gestart, maar de industrie moet beslissen in welke nieuwe technologie in de komende 5-10 jaar zal worden geïnvesteerd, omwille van de beperkte investeringscycli die nog resteren vóór de 'deadline' van 2050 [24].

De wereldwijde vraag naar ruwstaal bedraagt op dit moment 1800 miljoen ton per jaar, en zal naar verwachting tussen 15 en 40% groeien tegen 2050 [26–28]. Na China is de EU de op één na grootste staalproducent ter wereld, met een geschatte productie van 9,3% (200 miljoen ton) van de totale wereldproductie in 2018. Staal zal geproduceerd blijven worden, omdat het een noodzakelijk basisproduct is in de EU en in de rest van de wereld. Ondanks de toenemende wereldwijde vraag naar staal is de productie geconcentreerd in enkele landen zoals de Verenigde Staten, China, Japan en Rusland. Bijgevolg wordt het grootste deel van de gegraneerde hoogovenslak daar geproduceerd. Op basis van de lokale vraag naar gegraneerde hoogovenslak voor de productie van cement wordt een groot deel van de wereld geconfronteerd met een binnenlands aanbodtekort, en rekent het op een overproductie van slakken in de Verenigde Staten, China, Japan en Rusland [29]. Gegraneerde hoogovenslak (naast de binnenlandse productie in Nederland) wordt momenteel aan Nederland geleverd vanuit Duitsland, Frankrijk, Ierland, Engeland en Brazilië.

Tata Steel IJmuiden is de enige staalproducent in Nederland. Het is één van de twee geïntegreerde staalfabrieken die deel uitmaken van Tata Steel Europe, een onderdeel van de Tata Steel Group. De tweede staalfabriek is gelegen in Port Talbot, Verenigd Koninkrijk. Tata Steel IJmuiden produceert ongeveer 7 miljoen ton (3,4% van de EU-productie) ruwstaal per jaar. In november 2020 voerde de Zweedse staalproducent SSAB gesprekken met Tata Steel over de aankoop van de fabriek in IJmuiden. In januari 2021 besliste SSAB echter om de gesprekken te beëindigen. Het bedrijf voerde technische problemen aan voor die beslissing. SSAB was geïnteresseerd om de fabriek te converteren naar het gebruik van waterstofreductie [30, 31]. Ondanks de mislukte overname kan Tata Steel IJmuiden nog steeds overschakelen naar de integratie van waterstofreductie. Technische ontwikkelingen hebben aangetoond dat de duurzame productie van staal op basis van waterstof die wordt geleverd door groene energiemethoden in de nabije toekomst haalbaar lijkt [32]. De productie van hoogovenslakken in Nederland zou verzekerd zijn als deze technologie wordt geïmplementeerd. Er moet echter worden opgemerkt dat de hoeveelheid gegraneerde hoogovenslak die met deze methode wordt geproduceerd, nog niet duidelijk is en dat de geschiktheid ervan voor betontoepassingen nog niet onderzocht zijn. Hoewel de hoogovenslak in principe vergelijkbaar zou moeten zijn, is er op dit moment nog geen verificatie dat het dezelfde latente hydraulische eigenschappen zal vertonen als de huidige producten. Wanneer de hoogovenslak die door de nieuwe technologieën in de EU wordt geproduceerd, onvoldoende is voor het vervangen van cementklinker omwille van de kwaliteit of kwantiteit, of wanneer de productie van staal uit de EU verdwijnt om hoge CO₂-heffingen te vermijden, zal meer gegraneerde hoogovenslak van buiten de EU moeten worden geïmporteerd.

CEM III/B dat wordt geproduceerd met gegraneerde hoogovenslak uit Nederland is verantwoordelijk voor ongeveer 300 kg CO₂ / ton cement. Het transport van gegraneerde hoogovenslak uit bijvoorbeeld Turkije zal de CO₂-uitstoot van de slak met 56 kg CO₂ / ton slak doen toenemen. Voor CEM III/B-cement met 65% slak betekent dit een toename van ongeveer 12% in de CO₂-uitstoot. Voor CEM III/A-cement met 50% slak bedraagt de toename ongeveer 7%. Hoewel de CO₂-uitstoot van deze cementen toeneemt door het transport van de slak, is hun CO₂-uitstoot nog steeds ongeveer 60% respectievelijk 40% lager dan CEM I.

2.5. Verwachte beschikbaarheid van poederkoolvliegias

Uit de vooruitzichten voor kolengestookte elektriciteitscentrales in de EU, kunnen we een beeld krijgen van de mogelijke hoeveelheden poederkoolvliegias die regionaal beschikbaar zullen zijn (tabel 8). Wanneer de nationale klimaat- en energieplannen van de verschillende lidstaten worden uitgevoerd, worden we geconfronteerd met een daling van de productiecapaciteit met meer dan 60% in vergelijking met de huidige hoeveelheden poederkoolvliegias.

Tabel 8: Kolengestookte energiecentrales in de EU en de buurlanden [33]

Land	Energiecentrales			Capaciteit (MW)	
	In aanbouw	Open	Nationale plannen	2017	Nationale plannen voor 2030
Bulgarije	0	10	10	5.039	5.039
Kroatië	0	1	1	335	210
Tsjechië	0	33	30	8.798	7.993
Denemarken	0	4	0	2.237	0
Finland	0	7	0	1.760	0
Frankrijk	0	6	0	3.240	0
Duitsland	0	68	0	47.430	0
Griekenland	1	6	1	3.775	660
Hongarije	0	2	0	1.134	0
Ierland	0	1	0	915	0
Italië	0	9	0	8.552	0
Nederland	0	4	0	4.457	0
Polen	1	44	41	29.573	29.027
Portugal	0	2	0	1.978	0
Roemenië	0	8	8	4.955	4.955
Slowakije	0	5	3	638	552
Slovenië	0	2	2	1.069	995
Spanje	0	7	0	5.101	0
Verenigd Koninkrijk	0	4	2	6.328	4.361
Bosnië & Herzegovina	0	5	5	2.073	2.073
Kosovo	0	2	2	1.288	1.288
Noord-Macedonië	0	2	2	800	800
Montenegro	0	1	1	225	225
Servië	0	6	6	4.401	4.781
Turkije	1	29	29	20.692	22.012

Toekomstige EU bronnen van poederkoolvliegias zullen waarschijnlijk Polen, Tsjechië, Bulgarije, Roemenië, Slovenië, Griekenland, Slowakije en Kroatië zijn. Naast de EU zijn Turkije, Verenigd Koninkrijk, Servië en Bosnië-Herzegovina potentiële leveranciers van poederkoolvliegias. Om de kosten en de milieu-impact laag te houden is het beter om poederkoolvliegias over water in plaats van over land te vervoeren. Daarom is het zeer waarschijnlijk dat van de hierboven genoemde landen met name Turkije in aanmerking zal komen als belangrijk exportland. Er moet echter worden opgemerkt dat de landen die het meeste poederkoolvliegias produceren, tegelijk ook de landen zijn waar het meest wordt gebouwd, en die de poederkoolvliegias dus voor hun binnenlandse productie nodig hebben.

Kolengestookte elektriciteitsopwekking, en daarom ook de productie van poederkoolvliegias, zal in absolute cijfers wereldwijd toenemen, maar dit aandeel in de energiemix zal naar verwachting tegen 2030 in de EU fors afnemen als gevolg van de groei van duurzame energie en aardgas [34]. De toename zal zich concentreren in India, Zuidoost-Azië en enkele andere landen in Azië, terwijl rekening moet worden gehouden met een daling in Europa, Canada, de Verenigde Staten en China [15]. Op dit moment zijn China en India de grootste producenten van poederkoolvliegias met respectievelijk ongeveer 600 en 200 miljoen ton per jaar.

De verwachting is dat in de volgende 10 jaar het grootste deel van het toegeleverde poederkoolvliegias in Nederland uit India zal komen (zie bijlagen B en E). Door het transport van poederkoolvliegias uit India zal de CO₂-uitstoot van CEM II/B-V met 30% vliegias met ongeveer 8% toenemen, maar het zal nog steeds ongeveer 20% lager liggen dan CEM I.

Naast nieuw geproduceerd poederkoolvliegias uit (moderne) kolengestookte elektriciteitscentrales is er een groeiende belangstelling en research naar het gebruik van oud poederkoolvliegias dat is gestort of opgeslagen.

De hoeveelheid oude poederkoolvliegias bedraagt wereldwijd naar schatting meer dan 1000 miljoen ton [35]. Vanwege de kwaliteit, de regelgeving, de haalbaarheid en economische redenen is niet al dit materiaal herbruikbaar. Poederkoolvliegias dat is opgeslagen op dergelijke locaties, waar geen sterk alkalische omstandigheden aanwezig zijn, kan zijn potentiële puzzolane eigenschappen behouden. Het herwinningsproces kan bestaan uit ontwateren, baggeren, drogen, vermalen, classificeren en opslaan, afhankelijk van de specifieke kenmerken van het materiaal en de opslagomstandigheden. Als deze poederkoolvliegias op een geschikte wijze wordt gewonnen en bewerkt, kan het voldoen aan de betreffende eisen en worden gebruikt als cementvervanger in beton.

3. Alternatieve cementen

In dit hoofdstuk worden de alternatieven voor portlandcement beschreven die de meeste potentie inhouden op basis van hun stand van ontwikkeling. De reductie in CO₂-uitstoot ten opzichte van CEM I wordt voor elk alternatief aangegeven. Bovendien worden de belangrijkste verschillen in technische eigenschappen tussen de alternatieven en portlandcement beschreven. Een eventuele nadelige invloed op de circulariteit van het product beton wordt aangegeven.

3.1. Belietrijk portlandcement

In tegenstelling tot traditioneel portlandcement, dat 15-30% van de fase beliet ($C_2S = 2CaO.SiO_2$) bevat, is het belietgehalte in belietrijk portlandcement hoger dan 40%. Het proces om belietrijke portlandcementklinker te produceren is hetzelfde als voor gewone portlandcementklinker, maar op een lagere brandtemperatuur (ongeveer 1350 °C in plaats van 1450 °C), en in de grondstoffen zit minder kalksteen en meer silica. Dit resulteert in een lagere CO₂-uitstoot van ca. 10% ten opzichte van CEM I [8, 11, 36]. Zolang de massaverhouding CaO/SiO₂ niet lager is dan 2 valt dit cement onder de norm EN 197-1 [3]. Bovendien wordt het toegelaten onder ASTM C150 type IV, lagetemperatuur-portlandcement. Als zodanig werd het gebruikt bij de bouw van de Hoover Dam in de Verenigde Staten tussen 1931 en 1936. Als gevolg van de aanwezigheid van een groot demonstratieproject kan het worden geclassificeerd als TRL 7.

Door het lagere gehalte aan aliet ($C_3S = 3CaO.SiO_2$) in belietrijk portlandcement worden de technische eigenschappen van het cement beïnvloed. Het meest opvallend is de tragere sterkteontwikkeling van beliet, ten opzichte van aliet [37]. Dat is de belangrijkste reden waarom belietrijk portlandcement nog niet op grote schaal wordt gebruikt. Het is daardoor echter wel meer geschikt voor nichemarkten, zoals massabeton. Omwille van de langzame sterkteontwikkeling en de bijbehorende lage hydratatiwarmte is het ideaal voor de bouw van massieve betonconstructies zoals sluizen, dammen en bepaalde funderingen. In die toepassingen kunnen de dwarsdoorsneden zo dik zijn dat temperatuurspanningen kunnen leiden tot scheurvorming. Daarom moet rekening worden gehouden met de hydratatiwarmte van het cement.

Beliet-portlandcement heeft in principe geen nadelige effecten op de circulariteit van beton.

3.2. Calciumsulfoaluminaatcement (CSA)

Vergelijkbaar met belietrijk portlandcement zijn de cementsoorten die de fase ye'elimite ($C_4A_3\hat{S} = 4CaO.3Al_2O_3.SO_3$) bevatten, en die ook bekend staan als calciumsulfoaluminaatcement (CSA). CSA-cement wordt ook geproduceerd op soortgelijke wijze als traditioneel portlandcement, maar met wijzigingen in de hoeveelheden grondstoffen. In dit geval wordt kalksteen gedeeltelijk vervangen door een aluminiumrijke bron (bijv. bauxiet) en de klinker wordt geproduceerd bij lagere temperaturen. Om die reden heeft CSA-cement een lagere CO₂-uitstoot van ongeveer 25 tot 30% in vergelijking met CEM I [8]. Het gehalte aan ye'elimite is omgekeerd evenredig aan de CO₂-uitstoot, dus hoe hoger het gehalte aan ye'elimite, des te lager de CO₂-uitstoot. Voor een hoger gehalte aan ye'elimite zijn echter meer aluminiumrijke grondstoffen nodig, die aanzienlijk meer kosten dan kalksteen. Een lagere CO₂-uitstoot is dus gekoppeld aan hogere kosten, en tot nu toe is dat de belangrijkste belemmering geweest voor een breder gebruik. CSA-cement is beperkt gebleven tot niche toepassingen waar de extra kosten gerechtvaardigd kunnen worden [11, 36]. Voor sommige toepassingen is het krimpcompenserend karakter en de snelle sterkte-ontwikkeling van doorslaggevend voordeel [38]. CSA heeft een TRL van 5-6 [39].

Er zijn geen nadelige effecten te verwachten op de circulariteit van beton dat is gemaakt met calciumsulfoaluminaatcement.

3.3. Beliet-calciumsulfoaluminaat-ternesiet (BCT)

Om de productiekosten van CSA cement te verlagen, kan de ferriet fase (C_4AF) worden toegevoegd, waarmee een beliet-calciumsulfoaluminaat-ternesiet (BCT) cement wordt verkregen. In BCT-klinker is beliet nog steeds de belangrijkste component, maar het ye'elimate gehalte blijft beperkt tot minder dan 35%, en de rest van de klinker bestaat uit ferriet. BCT is veel goedkoper dan CSA aangezien de hoeveelheid aan de duurdere aluminiumrijke grondstoffen lager is. BCT-klinkers worden door Heidelberg Cement als "Ternocem" en door Lafarge als "Aether" op de markt gebracht. Vanwege de gewijzigde chemische samenstelling en de lagere brandtemperaturen (ongeveer 1250 °C) is de CO_2 -uitstoot van Ternocem 30% lager in vergelijking met conventioneel portlandcement, en het energieverbruik wordt met ongeveer 15% verminderd [40]. Ook bij Aether ligt de CO_2 -uitstoot 25-30% lager dan CEM I, als gevolg van de gewijzigde chemische samenstelling, de lagere brandtemperaturen en de eenvoudigere vermaling [41]. Lafarge voerde in 2013 met succes industriële testen uit met Aether, waarbij 10.000 ton Aether-klinker werd geproduceerd. De lancering van het product was gepland voor 2014, maar momenteel blijkt Aether niet beschikbaar te zijn. Voor grote voorgespannen elementen heeft BCT een TRL van 6-7 [42].

Er zouden geen nadelige gevolgen mogen zijn op de circulariteit van beton dat wordt geproduceerd met dit type cement.

3.4. Hydraulische calciumsilicaatklinker gemaakt met hydrothermisch proces

Een ander opkomend alternatief voor portlandcement is een belietachtig hydraulisch bindmiddel dat wordt geproduceerd met een hydrothermisch proces. Een gehydrateerde calciumsilicaat verbinding ($\alpha-C_2SH$) kan op relatief lage temperatuur worden gemaakt door het autoclaveren van kalksilicamengsels [43, 44]. De $\alpha-C_2SH$ wordt daarna geactiveerd door het malen met zand of door verwarmen bij relatief lage temperaturen. Dit resulteert in een bindmiddel dat een vergelijkbare samenstelling heeft met beliet, maar dat veel reactiever is.

Het fabricageproces verschilt sterk van traditioneel portlandcementklinker en is veel complexer vanwege de noodzaak aan meer verwerkingsstappen, zoals het voorbereiden van kalk, het vermalen van silicabronnen, het mengen van de grondstoffen, autoclaveren, verhitten op relatief lage temperatuur en tenslotte mengen met vulstoffen. De ontwikkeling van dit type bindmiddel bevindt zich nog in de laboratoriumfase. Verwacht wordt dat de CO_2 -uitstoot op hetzelfde niveau ligt als belietrijke portlandcementklinker.

Dit hydraulisch calciumsilicaatbindmiddel heeft een goede sterkte-ontwikkeling maar geen alkalisch milieu, waardoor het vooralsnog niet geschikt is voor gewapend beton [8, 11, 36]. Aangezien de techniek op het niveau van toegepast onderzoek blijft, heeft dit bindmiddel een TRL van 3.

Er is geen informatie bekend over nadelige effecten op de circulariteit van beton.

3.5. Door carbonatatie verhard cement

Als aanvulling op de traditionele hydratatie van cement is verharding door carbonatatie verder ontwikkeld. Momenteel wordt deze technologie al gebruikt voor sommige prefabbetonproducten. Carbonatatie verhard cement maakt gebruik van nieuwe calciumsilicaatklinkers met een laag kalkgehalte, zoals wollastoniet ($CS = CaO.SiO_2$). Deze klinkers kunnen worden vervaardigd in bestaande cementovens met traditionele grondstoffen in verschillende verhoudingen. Als gevolg van de lagere brandtemperatuur (ongeveer 1250 °C), het lagere gehalte aan kalk en de verharding door CO_2 te binden, hebben ze een ongeveer 60% geringere CO_2 -uitstoot dan CEM I [8]. Mineralen zoals wollastoniet hebben een zeer lage hydraulische reactiviteit. Wanneer ze echter worden geplaatst in een atmosfeer van zuivere CO_2 met een relatieve vochtigheid van minder dan 100% kunnen ze snel verharden. Er zijn aanpassingen nodig aan traditionele verhardingskamers zodat de vrijkomende waterdamp kan worden verwijderd en de CO_2 -circulatie kan worden bevorderd [11, 36]. Voor kleine, niet-gewapende betonelementen heeft door carbonatatie verhard cement een TRL van 9 [42]. Vanwege de lage pH (ca. 9) is dit bindmiddel niet geschikt voor toepassing in gewapend beton.

Hoewel er slechts beperkte informatie is over het effect op de circulariteit van beton, is bekend dat na verwerking tot betongranulaat de ingebrachte CO_2 bij het verharden, gebonden blijft [45].

Solidia is een cement- en technologiebedrijf dat is gevestigd in de Verenigde Staten. Het bedrijf maakt gebruik van CO₂-verharding voor de productie van Solidia-beton. Het bedrijf krijgt ondersteuning van Lafarge en het Amerikaanse Department of Transportation's Federal Highway Administration. De technologie van Solidia is gebaseerd op het produceren van een alternatief cement met een 30-40% lagere CO₂-uitstoot dan CEM I, dat daarna wordt verhard door permanente binding van CO₂ [46]. Solidia cementen zijn al gecommmercialiseerd voor de vervaardiging van niet-gewapende prefab cementshoudende producten. Volgens de chief technology officer zijn ze in een aantal onderzoekslaboratoria in de VS ook gekwalificeerd als vervanging voor portlandcement voor stortklaar cement, maar normen en specificaties verhinderen dat ze op grotere schaal worden toegepast [47]. Momenteel maakt Solidia voor de verharding gebruik van CO₂ die wordt geleverd door leveranciers van industriële gassen, maar ze zijn van plan om CO₂ uit industriële rookgassen daarvoor te gaan gebruiken. De effectiviteit van deze aanpak zal afhangen van de mate waarin zich een circulaire economie voor CO₂ ontwikkelt. Het bedrijf stelt dat Solidia beton door de CO₂-binding 10 tot 25 procent sterker kan worden, en beter bestand is tegen vorstdoobelastingen [48]. Bovendien kan het in minder dan 24 uur uitharden. Verharding door carbonatatie verlaagt echter de pH van het beton van een alkalisch milieu naar een meer neutraal milieu. Als gevolg daarvan beschermt het niet tegen de corrosie van de traditionele stalen wapening. Solidia lijkt het meest geschikt voor niet-gewapende cementshoudende producten.

Een ander bedrijf dat gebruik maakt van verharding door CO₂ is CarbonCure. Dit Canadese bedrijf heeft een systeem ontwikkeld om een deel van het cement in beton te vervangen door vloeibare CO₂, waardoor de CO₂-uitstoot vermindert en de hoeveelheid gebonden CO₂ toeneemt. Vloeibare CO₂ wordt in de betonspecie geïnjecteerd tijdens het mengen. De CO₂ gaat een chemische reactie aan met het cement en vormt calciumcarbonaat. Het CarbonCure proces werd in 2013 gecommmercialiseerd voor de productie van metselwerkblokken. Momenteel produceert het bedrijf ook CarbonCure voor stortklaar beton en CarbonCure voor prefabbeton. De vermindering van de CO₂-uitstoot hangt af van het specifieke product, omdat verschillende hoeveelheden cement worden vervangen en verschillende hoeveelheden CO₂ worden opgenomen in het verhardingsproces. Net als Solidia stelt CarbonCure dat er bij hun technologie een toename van de druksterkte optreedt van ca. 10-20% [48].

3.6. Kalksteen-gecalcineerde klei-cement (LC³)

Een ander opkomend alternatief voor portlandcement is kalksteen-gecalcineerde klei-cement of LC³, die de twee meest voorkomende SCM's, gecalcineerde klei en kalksteen, combineert met traditionele portlandcementklinker [11]. Een hoge mate van klinkervervanging is mogelijk wanneer gecalcineerde klei en kalksteen worden gecombineerd [49]. Klei die ongeveer 40% kaoliniet bevat, wordt sterk puzzolaan wanneer het wordt gecalcineerd tussen 700 en 850 °C [50, 51]. De materialen die naast kaoliniet in de klei aanwezig zijn (zoals silica, ijzeroxide of andere kleimineralen), blijken weinig invloed te hebben op de functionaliteit van de klei. De gecalcineerde klei (AS₂ = Al₂O₃.2SiO₂) reageert met calciumhydroxide en vormt C(A)SH fasen en aluminaathydraten. Het aluminiumoxide reageert ook met de kalksteen en produceert carbo-aluminaat hydraten [49]. De klei die wordt gevonden in Nederland is doorgaans samengesteld uit 25-30% kaoliniet, waardoor die van marginale kwaliteit is voor de LC³-technologie. Het kaolinietgehalte kan echter worden verrijkt. Meestal is silica het andere hoofdbestanddeel van klei. Silica kan gemakkelijk van de klei worden gescheiden, en dit wordt vaak gedaan om silica te leveren aan andere industrieën (glasproductie).

LC³-50 is een specifiek bindmiddel dat bestaat uit 50% gemalen klinker, 30% gecalcineerde klei, 15% kalksteen en 5% gips. Wanneer het kaolinietgehalte van klei ongeveer 40% bedraagt, zijn de mechanische eigenschappen van LC³-50 vergelijkbaar met die van portlandcement [52, 53]. Naast de vergelijkbare prestaties heeft LC³-50 een betere ecologische voetafdruk, met een 30% vermindering van de CO₂-uitstoot in vergelijking met CEM I en ongeveer 10% in vergelijking met CEM II. LC³-50 vertoont vergelijkbare eigenschappen als portlandcement met silica fume vervanging, maar er is minder superplastificeerder nodig, en de duurzaamheid (levensduur) is beter. Dit cement blijkt ook betere prestaties te leveren dan CEM III [54]. LC³-50 geeft een goede bescherming van de

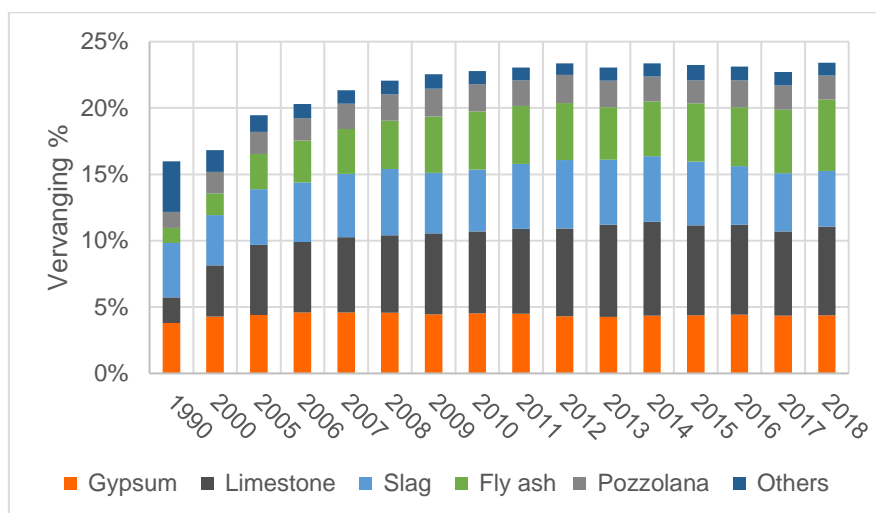
wapening, een uitstekende weerstand tegen chloridepenetratie, vermindering van ASR met reactieve aggregaten, goede prestaties bij aanwezigheid van sulfaten en een carbonatatie die vergelijkbaar is met andere mengcementen [51].

LC³-50 voldoet momenteel niet aan de Europese norm EN 197-1, die een klinkergehalte van minimaal 65% eist. Andere combinaties van gecalcineerde klei en kalksteen zijn momenteel echter wel toegestaan, zolang het gehalte aan portlandcementklinker op 65% of hoger blijft, CEM II/B-M(Q-LL). De nieuwe Europese norm EN 197-5 (zie hoofdstuk 7) met de CEM II/C-M klasse zal wel een klinkerreductie van 50% toestaan, inclusief de vervanging met natuurlijk gecalcineerde puzzolaan [51, 55]. Kalksteen-gecalcineerde klei-cement heeft een TRL van 7 [39].

Er is geen informatie bekend over nadelige effecten op de circulariteit van daarmee vervaardigd beton.

4. Alternatieve supplementaire cementeuze materialen (SCM)

Er wordt algemeen aangenomen dat portlandcement in de nabije toekomst een dominante rol zal blijven spelen dankzij de schaalvoordelen, de wijdverspreide beschikbaarheid van grondstoffen, het eenvoudige gebruik en de bewezen duurzaamheid [11]. Het is daarom van cruciaal belang om een deel van de portlandcementklinker te blijven vervangen door supplementaire cementeuze materialen (SCM). Momenteel zijn gegranuleerde hoogovenslak, poederkoolvliegias en kalksteen de meest gebruikte SCM's. Er zijn echter andere alternatieven die belangrijker zullen worden wanneer de beschikbaarheid van gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias onzeker c.q. minder wordt. Klinkervervanging begint af te vlakken omdat de beschikbaarheid van gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias van voldoende kwaliteit achterblijft bij de toename van de cementproductie (zie figuur 8). De werkelijke vervangingspercentages zijn hoger dan aangegeven in figuur 8 omdat literatuur [10] geen volledige database betreft, maar de tijdsafhankelijkheid geeft een representatief beeld weer.



Figuur 8: Wereldwijd gebruikte SCM's voor de productie van op klinker gebaseerde portlandcement [10]

4.1. Kalksteen

Samen met gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias is kalksteen één van de meest gebruikte SCM's wereldwijd, ondanks het feit dat het bijna inert is. Het effect van kalksteen is zowel fysisch als chemisch. De fijnkorreligheid van kalksteen maakt het materiaal geschikt als vulstof tussen de cementkorrels, en het verbetert op die manier de pakkingsdichtheid. Dit kan op zijn beurt de druksterkte ten goede komen. Bovendien kan kalksteen zorgen voor meer nucleatielocaties, waardoor de neerslag van C-S-H en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wordt bevorderd en de hydratatiereactie wordt versneld [57]. Op chemisch vlak beïnvloedt kalksteen de verdeling van kalk, aluminiumoxide en sulfaat tijdens hydratatie, waardoor de mineralogie van de gehydrateerde pasta wijzigt. Hoewel de CSH onaangetast blijft, verschuift de balans tussen de AFm- en Aft-fasen, afhankelijk van de hoeveelheid toegevoegde kalksteen [58].

Kalksteen kan gemengd met klinker worden gemalen, waarbij vanwege de geringere hardheid van de kalksteen een hogere fijnheid kan worden bereikt voor de kalksteen. De vervanging van portlandcementklinker door 5% kalksteen vóór de vermalings kan een kleine energiebesparing in de productie opleveren, met slechts een kleine daling in de kwaliteit van het cement [37, 59]. Bij CEM II/A-L en CEM II/A-LL is een vervanging van 6-20% portlandcementklinker door kalksteen mogelijk; bij CEM II/B-L en CEM II/B-LL kan 21-35% portlandcementklinker door kalksteen worden vervangen. In de verwachte EN 197-5 (zie hoofdstuk 7) zou bij de nieuwe klasse CEM II/C-M een vervanging van 36-50% portlandcementklinker door kalksteen mogelijk zijn [55].

Hoewel de CO₂-uitstoot van kalksteen (3 kg CO₂/ton) [60] niet zo laag is als die van gegranuleerde hoogovenslak of poederkoolvliegias (0 kg CO₂/ton), is die toch aanzienlijk lager dan CEM I (788 kg CO₂/ton). De afname in de CO₂-uitstoot is evenredig met het vervangingspercentage van portlandcementklinker. 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.

4.2. Gecalcineerde klei

Het mengen van portlandcementklinker met gecalcineerde klei en kalksteen is hierboven in detail besproken (zie paragraaf 3.6). Gecalcineerde klei kan echter ook als SCM worden gebruikt. Gecalcineerde klei wordt al tientallen jaren als SCM gebruikt en hoewel het niet wijdverspreid is in Europa, wordt het nog steeds gebruikt op plaatsen waar de aanvoer van andere SCM's beperkt is. Klei is overvloedig beschikbaar, en het bevindt zich dicht bij het aardoppervlak en in alle geologische omgevingen. Het is meestal samengesteld uit silicium en aluminiumoxiden, die alleen al driekwart van de aardkorst uitmaken [61]. De meest functionele kleisoorten zijn echter die, die kaoliniet bevatten. Die worden meestal gevonden in tropische en subtropische klimaten. Bentoniet heeft ook bewezen een effectieve SCM te zijn [62, 63]. Volgens de US Geological Survey is de kleivoorraad in de wereld bijzonder groot [64]. In tabel 9 wordt de geschatte mijnproductie van zowel bentoniet en kaolien weergegeven voor een aantal geselecteerde landen in 2019.

Tabel 9: Geschatte productie van bentoniet en kaolien in 2019 in kiloton [64]

Land	Bentoniet	Kaolien
Verenigde Staten	4.700	5.500
Brazilië (voorbereid)	520	1.800
China	5.600	3.200
Tsjechië	280	3.600
Duitsland	390	4.300
Griekenland	1.400	—
India	810	4.000
Iran	360	790
Mexico	470	330
Spanje	180	450
Turkije	1.500	1.400
Oekraïne	110	2.400
Verenigd Koninkrijk	—	1.000
Andere landen	2.200	13.000
Wereldtotaal (afgerond)	18.500	42.000

Gecalcineerde klei kan worden gebruikt om tot 30% portlandcementklinker te vervangen, zonder nadelige effecten voor de sterkteontwikkeling of duurzaamheid op lange termijn van het beton [52, 65]. Om 30% van het cement wereldwijd te vervangen zou 1,2 miljard ton klei nodig zijn. Ervan uitgaande dat de klei 40% kaolien bevat, zou dat neerkomen op 490 miljoen ton kaolien, wat veel meer is dan de 42 miljoen ton die per jaar wordt geproduceerd. Om 30% te vervangen van het cement dat jaarlijks in Nederland gebruikt wordt, zou daarvoor 1,5 miljoen ton klei nodig zijn, hetgeen neerkomt op 0,6 miljoen ton kaolien.

Terwijl een hogere vervangingspercentage de productie van portlandcementklinker compenseert, moet worden opgemerkt dat de klei vóór gebruik bewerkt moet worden. Om optimaal te functioneren in een cementmengsel moet de calcinatie van klei gebeuren op temperaturen rond 700-850 °C [50, 52]. De CO₂-uitstoot van kaolien bedraagt 423 kg CO₂/ton; die van bentoniet 435 kg CO₂/ton [66]. In de verwachte EN 197-5 (zie hoofdstuk 7) laat de nieuwe klasse CEM II/C-M het gebruik van gecalcineerde klei toe, wat zou kunnen bijdragen tot een wijdverspreid gebruik [55].

4.3. Biomassa-vliegas

In Nederland is ongeveer 60% van het verbruik van hernieuwbare energie afkomstig van biomassa. In de komende tien jaar zal dat cijfer naar verwachting vrij constant blijven, maar er zal waarschijnlijk een verschuiving plaatsvinden van de gezamenlijke verbranding van biomassa in kolengestookte centrales naar het gebruik van biomassa in ketels bij individuele bedrijven [67]. Afvalbiomassa kan worden omgezet in van biomassa afgeleide brandstoffen met torrefactie die dan in staat zijn om steenkool direct te vervangen bij de elektriciteitsopwekking [68]. De totale wereldwijde beschikbaarheid van biomassa-as uit landbouwafval wordt geschat op ongeveer 100-200 miljoen ton per jaar, uitgaande van een gemiddeld asgehalte van 5% [69, 70]. Dit materiaal bevindt zich echter doorgaans in agrarische gebieden, en bovendien in kleine hoeveelheden. De meest bestudeerde biomassa die afkomstig is van vliegas is de biomassa die wordt geproduceerd uit rijstvliesen. Rijstvliesen kunnen worden verwerkt tot een silicarijke puzzolaan met een groot oppervlak dat leidt tot hoge chemische reactiviteit. Rijstvliesen hebben aangetoond goede prestaties te leveren als SCM [11]. Voor as van agrarisch afval zijn er een aantal belemmeringen voor een meer algemeen gebruik als SCM. Vaak wordt deze as gebruikt als minerale meststof om de landbouwgrond productief te houden. Een goede verbranding kan ook moeilijk te bereiken zijn (met name op kleine schaal) omdat hogere temperaturen en langere verblijftijden kunnen resulteren in een niet-reactief kristallijn kwarts. Anderzijds kan onvolledige verbranding leiden tot koolstofverontreiniging.

De meeste afvalbiomassa is afkomstig van landbouw (agrarische biomassa) en van het onderhoud van natuurgebieden, openbare parken en bossen (onderhoudsbiomassa) [71, 72]. Andere aanvullende biomassastromen omvatten organisch huishoudelijk afval, slib en industrieel afval afkomstig van producten van organische materialen (industriële biomassa). In Nederland zijn met name uitdunningshout, stro, bermgras, gewasresten en broeikasafval primaire vormen van afvalbiomassa [72, 73].

Landbouwafval is biomassaresidu afkomstig van de productie, oogst en verwerking in landbouwgebieden. Het omvat gewasresten en niet-productieve biomassa. Met behulp van de nationale en Europese gegevens [74, 75] over gewasopbrengsten voor Nederland en gewasspecifieke oogstindexen [76–79] kan het volume van gewasresten berekend worden en vervolgens omgezet worden in hoeveelheid biomassa-as die wordt gegenereerd door het gebruik van specifieke asfracties [80] van elke gewasrest. De berekende totale agrarische biomassa-as (met inbegrip van organisch huishoudelijk afval en boomgaardafval) in Nederland bedraagt ruim 2 miljoen ton/jaar.

Onderhoudsbiomassa is het afval dat wordt geproduceerd bij het onderhoud en bestaat grotendeels uit bermgras of houtachtige biomassa. Op basis van de verschillende vormen van bodemgebruik in Nederland, de grootte van hun oppervlak en de hoeveelheid biomassa die ze jaarlijks produceren [72, 74], kan de hoeveelheid jaarlijks geproduceerde, beschikbare biomassa-droge stof worden berekend. Gebaseerd op het relevante asgehalte van de verschillende types biomassa kan de hoeveelheid beschikbare biomassa-droge stof worden omgezet in de mogelijke hoeveelheid biomassa-as. De totale hoeveelheid onderhoudsbiomassa-as in Nederland bedraagt ca. 350 kiloton/jaar.

Industrieel afval van het recyclageproces van papier en hout kan waardevolle biomassa-as opleveren. Gebaseerd op beschikbare gegevens wordt de totale hoeveelheid industriële biomassa-as in Nederland ingeschat op ca. 300 kiloton/jaar.

Opgeteld kan er in principe 2,7 miljoen ton/jaar aan uit biomassa-afval geproduceerd vliegas in Nederland vrijkomen, die theoretisch portlandcement (of grondstof voor portlandcement) zou kunnen vervangen [81]. De CO₂-uitstoot van uit biomassa afgeleide vliegas zou in theorie 0 kg CO₂/ton bedragen, en daarmee een potentieel interessante SCM. Echter, zuivere biomassa-as wordt momenteel in de cement- en betonregelgeving niet toegestaan. EN 450-1 laat de gezamenlijke verbranding van poederkool met maximaal 50% biomassa wel toe.

4.4. Glasafval

Glasafval is voorgesteld als een mogelijk alternatief voor poederkoolvliegias of hoogovenslak, vanwege de overvloedige materiaalstroom, de chemische compatibiliteit met cement, en de lage kosten. Glasrecycling genereert diverse soorten glasafval tijdens het proces, die momenteel niet worden gebruikt. De afvalstromen zijn een verliespost voor glasrecyclingsbedrijven, die hoge verwijderingsbijdragen moeten betalen. Door het gebruik van gemalen glasafval als SCM gaat minder glas naar stortplaatsen. Op die manier wordt bovendien de glasrecyclingsindustrie geholpen.

Glasafval kan puzzolane eigenschappen vertonen wanneer het fijn wordt gemalen. In vergelijking met poederkoolvliegias vertoont gemalen glas een betere reactiviteit in de Frattini-test voor puzzolaniteit. Bovendien is de activiteitsindex (bijdrage in sterkte) op lange termijn voor cementgebonden mortels met gemalen glas vergelijkbaar met die van mortels met poederkoolvliegias [82]. Sommige studies hebben potentiële alkali silica reacties als gevolg van het gebruik van glasafval onderzocht, maar dit kan enkel optreden wanneer het glasafval niet fijn genoeg gemalen is [83]. De CO₂-uitstoot van glasafval zou in theorie ook 0 kg CO₂/ton bedragen en dus interessant zijn als SCM. 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. AEC-bodemas bestaat voor een groot deel uit glasafval.

5. Alkali-geactiveerde bindmiddelen / geopolymeren

5.1. Marktontwikkeling

Alkali-geactiveerde bindmiddelen gaan al terug tot het einde van de jaren '30 en het begin van de jaren '40, en er is sindsdien uitgebreid onderzoek uitgevoerd. Hoewel het exacte reactiemechanisme van alkali-geactiveerde bindmiddelen niet volledig wordt begrepen, bestaat het uit ontbinding, oriëntering en verharding [84]. De resulterende reactieproducten zijn afhankelijk van de specifieke activator(en) en de gebruikte grondstoffen (precursoren). Systemen met dominant silicium en calcium vormen een C(A)SH gel als belangrijkste reactieproduct, en systemen met dominant silicium en aluminium vormen een zeoliet reactieproduct.

Ondanks tientallen jaren van onderzoek blijft het wereldwijde gebruik van alkali-geactiveerde bindmiddelen bijzonder klein. Hoewel er geen beschikbare gegevens zijn over de exacte statistieken, schatten we het marktaandeel van alkali-geactiveerde bindmiddelen op minder dan 1%. De markt voor alkali-geactiveerde bindmiddelen is specifiek voor niche toepassingen die baat hebben bij hun unieke eigenschappen in vergelijking met cement gebaseerde betonmengsels. Eén dergelijke eigenschap is het superieure hoge-temperatuur gedrag die bepaalde alkali-geactiveerde bindmiddelen vertonen, waardoor ze geschikt zijn voor brandbescherming [85]. Niche toepassingen waar brandwerende bindmiddelen van nut zijn, zijn onder meer tunnelbekledingen, hoogbouw, liftdeuren en maritieme constructies/coatings [86, 87]. Aangezien alkali-geactiveerde bindmiddelen verbonden zijn met hogere kosten dan portlandcement, moet het gebruik ervan in niche toepassingen de extra kosten rechtvaardigen [84].

De meeste normen voor betonproducten zijn gebaseerd op cement als bindmiddel. Dit betekent dat alkali-geactiveerde bindmiddelen die geen portlandcement bevatten, niet voldoen aan de bestaande normen [88]. Omdat ze in de normen niet worden toegestaan, worden alkali-geactiveerde bindmiddelen niet gezien als vervanging van portlandcement in bulktoepassingen, en blijven ze beperkt tot niche toepassingen [88]. Om die reden hebben alkali-geactiveerde bindmiddelen momenteel een TRL van 5-7.

Naast de hogere kosten en de afwezigheid van regelgeving is één van de belangrijkste obstakels voor een meer wijdverspreide toepassing het gebruik van gegranuleerde hoogovenslak als precursor [11]. Aangezien de grootste hoeveelheid gegranuleerde hoogovenslak al wordt gebruikt in op portlandcementklinker gebaseerd mengcement of voor de vervanging van cement in beton is er een beperkt aanbod beschikbaar voor alkali-geactiveerde materialen. Bovendien kan de omschakeling van het gebruik van slak voor de huidige toepassingen naar alkali-activering leiden tot een algemene toename in de wereldwijde CO₂-uitstoot, aangezien niet alle alkali-geactiveerde bindmiddelen een lagere CO₂-uitstoot hebben dan CEM III.

Een ander obstakel voor grootschalig gebruik is de moeilijkere verwerkbaarheid van en de agressievere chemische stoffen bij alkali-geactiveerde bindmiddelen. Deze twee factoren maken het moeilijk om beton op basis van portlandcement te vervangen op de bouwplaats, aangezien daarvoor gespecialiseerde kennis en scholing nodig is. Bovendien brengt het gebruik van agressieve chemische stoffen nieuwe risico's met zich mee voor de bouwvakkers.

Er zijn breed uiteenlopende waarden voor de CO₂-uitstoot van alkali-geactiveerde bindmiddelen. De uitstoot van beton op basis van alkali-geactiveerd bindmiddel kan variëren van 97% lager tot 14% hoger dan de uitstoot van beton die is gemaakt met CEM I [89]. De CO₂-uitstoot is afhankelijk van de samenstelling van het bindmiddel, en bij alkali-geactiveerde bindmiddelen is er een grote variatie in de grondstoffen die worden gebruikt en de hoeveelheden waarin die worden gebruikt. Voor een aanzienlijke vermindering van de CO₂-uitstoot moeten de meest geschikte grondstoffenbron, locatie en transport worden geselecteerd [89]. Alkali-geactiveerde bindmiddelen hebben normaal gezien een lagere CO₂-uitstoot dan CEM I, maar het verschil kan overal tussen 40 en 80% liggen [90].

Omdat er een duidelijk potentieel is voor aanzienlijke reducties in de CO₂-uitstoot verdient het gebruik van alkali-geactiveerde bindmiddelen nadere aandacht, ondanks de beschreven nadelen. Onderzoek naar andere grondstoffen dan gegraneerde hoogovenslak en poederkoolvliegias moet worden aangemoedigd, zowel voor alkali-geactiveerde bindmiddelen als voor de vervanging van portlandcementklinker. De in hoofdstuk 4 genoemde materialen zijn ook relevante kandidaten voor alkali-geactiveerde bindmiddelen. Rijkswaterstaat bevindt zich in de unieke positie om de ontwikkeling en het gebruik van alkali-geactiveerde bindmiddelen op de Nederlandse markt te kunnen stimuleren, en ze zouden dit moeten zien als een mogelijkheid om alkali-geactiveerde bindmiddelen in een vroeg stadium te implementeren.

5.2. Beschikbaarheid van grondstoffen

Alkali-geactiveerde bindmiddelen worden geproduceerd op basis van drie componenten: een aluminosilicaatbron, grove en fijne aggregaten en een activerende vloeistof. De grove en fijne aggregaten kunnen afkomstig zijn van dezelfde materiaalstromen als voor traditioneel cementbeton. Aangezien de beschikbaarheid van deze materiaalstromen niet ter discussie staat, zal dit niet verder worden besproken in dit rapport.

Aluminosilicaten (precursors)

De aluminosilicaatbron bestaat meestal uit gegraneerde hoogovenslak, poederkoolvliegias of metakaolien (gecalcineerde klei) [29]. Afhankelijk van de gewenste betoneigenschappen kunnen deze aluminosilicaten allemaal uitwisselbaar worden gebruikt in alkali-geactiveerde betonmengsels. Het meest geschikte aluminosilicaat voor de productie van alkali-geactiveerde bindmiddelen is gegraneerde hoogovenslak, omdat het functioneel is op kamertemperatuur, geen voorbereiding vereist en een industrieel restproduct is.

Maar zoals eerder besproken (zie hoofdstuk 2) is de toekomstige beschikbaarheid van gegraneerde hoogovenslak in de EU niet duidelijk, en het grootste deel van de beschikbare slak wordt momenteel gebruikt als vervanging voor portlandcementklinker in mengcementen [11]. Van de naar schatting ca. 500 miljoen ton hoogovenslak die wereldwijd jaarlijks wordt geproduceerd, wordt ca. 80-90% gegraneerd [11]. Nagenoeg alle gegraneerde hoogovenslak wordt toegepast in mengcement of als reactieve vulstof (SCM) in beton.

Er is gesuggereerd dat op wereldschaal slechts ongeveer 50% van de jaarlijkse productie van poederkoolvliegias (675 miljoen ton) wordt gebruikt. De resterende poederkoolvliegias wordt gemengd met water en ondergronds opgeslagen, zodat er wereldwijd voorraden van poederkoolvliegias aanwezig zijn (meer dan 1000 miljoen ton) die kunnen worden gebruikt in alkali-geactiveerde bindmiddelen [10, 29, 35]. Deze claim houdt echter geen rekening met de locatie en de kwaliteit van deze reserves aan poederkoolvliegias. Er wordt onderzoek uitgevoerd naar het terugwinnen van de poederkoolvliegias op stortplaatsen en in waterbekkens voor cementgebonden toepassingen [35], maar onderzoek naar gebruik in alkali-geactiveerde bindmiddelen blijft beperkt.

Metakaolien kan gebruikt worden in alkali-geactiveerde bindmiddelen. Metakaolien wordt gevormd wanneer kaolinietrijke klei wordt verhit tot 600-750 °C. Jaarlijks wordt ongeveer 40 miljoen ton metakaolien geproduceerd, voornamelijk in de Verenigde Staten, India, Duitsland en China [29, 91]. De wereldwijde vraag naar metakaolien is echter niet groter dan ongeveer 10 miljoen ton. De overvloed van dit materiaal lijkt veelbelovend te zijn, maar toch zijn er nog enkele nadelen. Op de eerste plaats zijn de kosten voor het winnen en bewerken van metakaolien (600-700 \$/ton) aanzienlijk hoger dan die van gegraneerde hoogovenslak of poederkoolvliegias, maar nog belangrijker is dat aanzienlijke hoeveelheden natriumsilicaat nodig zijn om gecalcineerde klei te activeren [11]. Omdat er grote hoeveelheden activator nodig zijn, is het beter om metakaolien te gebruiken als vervanging voor portlandcementklinker, of in bindmiddelen als LC³.

Om één kuub alkali-geactiveerd beton te produceren, is ongeveer 450 kg gegraneerde hoogovenslak of metakaolien nodig, of 470 kg poederkoolvliegias [29]. Vanwege de beschikbare hoeveelheden aan deze reactieve SCM's (precursors) kunnen alkali-geactiveerde bindmiddelen nooit cementbeton volledig vervangen. Hoewel er

voldoende klei op de aarde aanwezig is om metakaolien te calcineren en te produceren, maken de daaraan verbonden kosten en benodigde activator het onmogelijk om portlandcementbeton te vervangen door alkali-geactiveerde bindmiddelen. Bovendien heeft metakaolien een hogere CO₂-uitstoot (423 kg CO₂/ton) dan gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias [66].

Activatoren

Activerende vloeistoffen die momenteel veelal worden gebruikt, zijn natriumhydroxide in combinatie met natriumsilicaat of soms silica fume. Vanwege de hoge kosten is natriumsilicaat (ook bekend als waterglas) minder aantrekkelijk als activerende oplossing. De huidige wereldwijde productie bedraagt minder dan 10 miljoen ton per jaar. Met de huidige beschikbaarheid van natriumsilicaat kan minder dan 1% van het cementbeton worden vervangen door beton op basis van alkali-geactiveerde bindmiddelen [29]. Bovendien zijn de CO₂-uitstoot (424 kg CO₂/ton [66]) en het energieverbruik van het productieproces van natriumsilicaat erg hoog. De grotere hoeveelheden die nodig zijn om van natriumsilicaat een activator te maken en de hoge CO₂-uitstoot tijdens de productie kunnen een negatieve invloed hebben op de totale CO₂-uitstoot van alkali-geactiveerde bindmiddelen op basis van natriumsilicaat [11]. Silica fume daarentegen is een haalbare grondstof voor een activerende oplossing, als we de hoeveelheid beschouwen. In vergelijking met natriumsilicaat is 55% minder silica fume nodig om hetzelfde resultaat te bereiken [29]. Hoewel minder silica fume nodig is, is het echter beperkt beschikbaar en is het een dure grondstof. Afhankelijk van het feit of de CO₂-uitstoot wordt toegewezen op economische basis of op massabasis kan deze voor silica fume 27 kg CO₂/ton of 736 kg CO₂/ton bedragen [66].

Natriumhydroxide is een noodzakelijke component voor activatoren, omdat er momenteel geen alternatieven zijn. De wereldwijde jaarlijkse productie van natriumhydroxide bedraagt ongeveer 70 miljoen ton. De vraag is ongeveer 120 miljoen ton, wat resulteert in een fors tekort. In de regio's waar de meeste natriumhydroxide wordt geproduceerd (China, Noord-Amerika en Europa) is er echter een overschot. Er zijn andere belangrijke toepassingen zoals drinkwater, zeep, pulp, papier en afvoerreiniger die natriumhydroxide verbruiken [92]. De beperkte beschikbaarheid en de hoge kosten van natriumhydroxide zijn een belangrijk obstakel voor een wereldwijd grootschalig gebruik van beton op basis van alkali-geactiveerde bindmiddelen [29]. Wanneer de volledige beschikbaarheid (met inbegrip van regionale overschotten) van natriumhydroxide (met uitsluiting van beperkingen van andere grondstoffen) wordt gebruikt, kan niet meer dan 7% van het jaarlijkse wereldwijd geproduceerde cementbeton worden vervangen door beton op basis van alkali-geactiveerde bindmiddelen. Natriumhydroxide heeft een CO₂-uitstoot van 513 kg CO₂/ton [66].

6. Alternatieve benaderingen

6.1. Efficiënter materiaalgebruik

Een alternatieve benadering voor het verminderen van het totale gebruik aan portlandcement (en daardoor de totale impact op het milieu), is het cement efficiënter gebruiken. In de eerste plaats heeft een optimalisatie van het betonmengsel door een verbeterde korrelpakking en het gebruik van chemische dispergeermiddelen en minerale vulstoffen het potentieel om het gehalte aan portlandcement te verlagen met behoud van de huidige prestaties van het beton. Het loslaten van het idee van “cement voor algemene doeleinden” en het gebruik van een bindmiddel dat het meest geschikt is voor de betreffende toepassing met de laagste milieu-impact kan eveneens de CO₂-uitstoot in vergelijking met CEM I verlagen. Geschikte toepassingen van hogesterktebeton kan ook het materiaalgebruik die nodig is voor een bepaalde betonconstructie verminderen.

Portlandcement (CEM I) heeft de hoogste weerstand tegen carbonatatie. Bij de voorgeschreven dekking en betonkwaliteit leidt carbonatatie niet tot een beperking van de technische levensduur van een gewapende betonconstructie. Carbonatatie treedt op wanneer CO₂ uit de lucht reageert met het calciumhydroxide in de cementsteen en calciumcarbonaat vormt. Daardoor wordt de pH verlaagd tot ongeveer 9 en kan corrosie van de wapening plaatsvinden. Omdat deze reactie enkel optreedt in het poriewater van het beton, zijn de meest gunstige omstandigheden voor carbonatatie wanneer er voldoende vocht is voor de reactie maar niet voldoende om het beton te verzadigen en te fungeren als een barrière tegen het binnendringen van kooldioxide [37]. De mate van carbonatatie bereikt een maximum bij een relatieve vochtigheid rond 60%, maar die relatieve luchtvochtigheid is te laag voor actieve staalcorrosie [11]. Omgekeerd, bij een hogere relatieve vochtigheid waarbij staalcorrosie kan optreden, is de carbonatatiesnelheid erg traag. Het meest kritisch zijn toepassingen buiten beschut en bij nat/droogcycli. De inzet van CEM I beton zou dus in dit opzicht kunnen worden beperkt tot situaties waarin corrosie door carbonatatie een ernstig risico vormt.

6.2. Recycling van cementsteen

Ongeveer 500 miljoen ton bouw- en sloopafval (CDW - Construction and Demolition Waste) wordt elk jaar in Europa gegenereerd. In Nederland is dat ongeveer 20 miljoen ton, waarvan 12 miljoen ton betonreststromen. Momenteel zijn innovatieve recyclingsmethoden van beton in volle ontwikkeling, waarbij ook een poederfractie vrijkomt die voornamelijk uit cementsteen van het bewerkte beton bestaat. Deze zeer fijne fractie kan, eventueel na verdere bewerking, worden toegepast als grondstof voor de productie van portlandcementklinker, in mengcement (CEM II/B) of als vulstof in beton [82].

De ervaring leert dat de zeer fijne fractie uit gerecycled beton bruikbaar is als grondstof voor de productie van portlandcementklinker met traditionele productiemethodes in cementovens. Aangezien het fijne materiaal bestaat uit calcium- en siliciumverbindingen, kan het natuurlijke grondstoffen zoals kalksteen en klei vervangen. Hoewel de chemische samenstelling van deze fijne fractie vergelijkbaar is met portlandcementklinker, is het iets meer aan de SiO₂-zijde van het CaO-SiO₂-Al₂O₃/Fe₂O₃ ternair diagram. Dit betekent dat kalksteen (of een alternatieve bron van calcium) nog steeds moet worden toegevoegd aan het ovenmengsel. Bij de traditionele productiewijze is aangetoond dat 3% van de grondstoffen voor de productie van portlandcementklinker kan worden vervangen door deze fijne fractie met behoud van de vereiste grondstofkwaliteit voor het sinteren in de cementoven [93]. Een vervanging van 3% grondstof zou al leiden tot een reductie van de CO₂-uitstoot met 0,6% door besparingen op primaire brandstof (omdat er minder energie nodig is om minder kalksteen te ontleden) en mogelijk een vermindering van 1% in de CO₂-procesuitstoot door het lagere kalksteengehalte in de grondstoftoevoer. In totaal heeft dit een potentieel voor het verminderen van de CO₂-uitstoot met 1,6% in vergelijking met CEM I dat is geproduceerd zonder grondstofvervanging. Waarschijnlijk zijn hogere percentages dan 3% vervanging realiseerbaar.

De poederfractie die vrijkomt bij (innovatieve) recycling van beton kan mogelijk ook worden gebruikt als een precursor in alkali-geactiveerde bindmiddelen. Deze zeer fijne fractie kan thermisch worden behandeld en gebruikt worden als reactieve vulstof alkali-activering [42].

Dit materiaal kan ook rechtstreeks worden gebruikt als gedeeltelijke vervanging van portlandcementklinker [94, 95]. Volgens recente studies kan cement met 30% vervanging worden gebruikt in binnenbeton [93, 96].

Terwijl het onderzoek naar recycling en hergebruik van betonreststromen nog steeds wordt voortgezet, evenals de rol van niet-gehydrateerde cement in de vulstoffractie [97–99], zijn significante verbeteringen nodig in de scheidingstechnologie om de verschillende fracties beter te kunnen recyclen uit fijn betonmateriaal [100]. De niet-gehydrateerde cementdeeltjes worden vaak verontreinigd door fijn materiaal uit het aggregaat [101]. Nederland loopt echter voorop op het gebied van betonrecyclingstechnologie en heeft dit probleem aangepakt. Smart Crusher heeft een systeem ontwikkeld dat volgens hen het niet-gehydrateerd cement selectief kan terugwinnen. Als vervanging voor portlandcementklinker of als vervanging voor de grondstoffen van portlandcementklinker wordt de Smart Crusher geëvalueerd op een TRL niveau van 5-6.

7. Normen

De huidige Europese norm voor cement is EN 197-1 Cement - Deel 1: Samenstelling, specificaties en conformiteitscriteria voor gewone cementsoorten [3]. Hierin worden 27 cementproducten en hun hoofdbestanddelen beschreven, verdeeld over 5 hoofdtypen (CEM I - CEM V). Terwijl CEM I uitsluitend is gebaseerd op portlandcementklinker, bevat de rest portlandcementklinker en verschillende hoeveelheden SCM's. Het Europees Comité voor de vaststelling van normen voor cement heeft gewerkt aan een geactualiseerde versie van EN 197-1. De nieuwe norm zal naar verwachting de cementproducten uitbreiden tot 39 verschillend gedefinieerde cementen.

Naast de gewone cementen die onder EN 197-1 vallen, heeft het Europees Comité voor normalisatie onlangs de ontwerpnorm prEN 197-5 ingevoerd. Deze norm heeft betrekking op portland-composietcement CEM II/C-M en een nieuw type composietcement CEM VI. CEM II/C-M cement mag 50-64% portlandcementklinker bevatten. Gegraneerde hoogovenslak, silica fume, puzzolaan, poederkoolvliegias, gebrande schalie en kalksteen kunnen 36-50% van het mengsel uitmaken, en nevenbestanddelen de resterende 0-5%. CEM VI cement mag 35-49% portlandcementklinker en 31-59% gegraneerde hoogovenslak bevatten. Natuurlijke puzzolanen, silicaatrijk poederkoolvliegias of kalksteen kunnen 6-20% van het mengsel uitmaken, en nevenbestanddelen de resterende 0-5%. De nieuwe cementsoorten die in deze norm worden gedefinieerd, maken meer duurzame opties mogelijk voor constructies op basis van cement, en helpen om het gebruik van natuurlijke grondstoffen te minimaliseren [55].

Ondanks de aanstaande uitbreiding van EN 197-1 en de verwachte invoering van EN 197-5 zijn normen vaak één van de grootste obstakels voor het introduceren van nieuwe bouwmaterialen. Cementsoorten mogen niet uitsluitend worden gedefinieerd op basis van de samenstelling, maar zouden eerder geclassificeerd moeten worden op basis van prestatie-eigenschappen zoals bestandheid tegen aantastingsmechanismen en duurzaamheid. Op prestaties gebaseerde normen lossen veel problemen op. Om de verlaging van de CO₂-uitstoot te bevorderen, moet meer nadruk worden gelegd op CUR-Aanbeveling 48 die het gebruik van alternatieve cementsoorten met gelijkwaardige prestaties mogelijk maakt. Hierdoor kan beton worden geoptimaliseerd voor specifieke toepassingen en op basis van plaatselijk beschikbare grondstoffen, in plaats van de conventionele benadering van één type cement voor alle toepassingen.

Nieuwe bindmiddelen met gelijkwaardige prestaties hebben doorgaans niet dezelfde bewezen duurzaamheid op lange termijn als gestandaardiseerde cementsoorten. Meer geavanceerde toepassingen van datamining en 'machine learning' kunnen echter helpen om prestaties op lange termijn te voorspellen en zo dit obstakel te overwinnen.

8. Verwachte ontwikkeling van kosten en CO₂-uitstoot

8.1. Kostenontwikkeling

Verwacht wordt dat de kosten van Nederlandse cementen en bindmiddelen en daarom ook van beton in de nabije toekomst zullen toenemen, als gevolg van:

- Hogere transportkosten van portlandcementklinker, poederkoolvliegias en hoogovenslak als gevolg van regionale tekorten. Daarnaast zullen voor sommige geïmporteerde materialen extra kosten voor kwaliteitsborging moeten worden gemaakt.
- Een hoger kostenniveau van de nieuwe alternatieve cementsoorten, vooral in een markt die nog moet worden ontwikkeld, in vergelijking met het huidige portlandcement.
- Een hoger kostenniveau van alkali-geactiveerde bindmiddelen in vergelijking met het huidige portlandcement.
- Een verhoogde CO₂-heffing.

Een uitzondering is CEM II/C-M geproduceerd met een hoog percentage kalksteen (36-50%), dat waarschijnlijk een lager kostenniveau zal hebben als gevolg van de beschikbaarheid van kalksteen en de maalinstallaties in de cementfabrieken.

8.2. Ontwikkeling van de CO₂-uitstoot

Verwacht wordt dat de CO₂-uitstoot en dus ook de MKI (MilieuKostenIndicator) van de Nederlandse bindmiddelen voor beton niet zal dalen in de komende jaren, als gevolg van:

- Een extra CO₂-uitstoot als gevolg van de grotere transportafstand van portlandcementklinker, poederkoolvliegias en gegraneerde hoogovenslak (zie tabel 10).
- Toegenomen gebruik van CEM I en kalksteenmeel (in vergelijking met CEM II en CEM V) als gevolg van een gebrek aan poederkoolvliegias.
- Nieuwe cementsoorten met een lage CO₂-uitstoot zijn niet grootschalig beschikbaar en/of mogen nog niet worden toegepast tegen 2030. Normen (EN zowel als NEN) moeten beschikbaar zijn en een goed prestatieniveau moet in de praktijk zijn aangetoond vooraleer deze nieuwe cementsoorten een aanzienlijk deel van de markt kunnen veroveren.

CEM II/C-M met een hoog kalksteengehalte (36-50%) kan wel op korte termijn worden gebruikt. De CO₂-uitstoot van dit cement kan meer dan 30% lager liggen dan die van CEM I.

Tabel 10: Berekende toename van de CO₂-uitstoot voor enkele cementen door grotere transportafstanden grondstoffen (gebaseerd op indicatieve berekeningen van SGS INTRON)

Cementtype	Toename van de CO ₂ -uitstoot			
	Portlandcement- klinker uit België, Duitsland en Portugal	Hoogovenslak uit Turkije	Poederkool- vliegias uit India	Totale toename
CEM I	3%	nvt	nvt	3%
CEM III/A (50% slak)	1,5%	+7%	nvt	8,5%
CEM III/B (65% slak)	1%	+12%	nvt	13%
CEM II/B-V (30% vliegias)	2%	nvt	+8%	10%

9. Conclusies

Elk jaar wordt in Nederland ongeveer 5 miljoen ton cement gebruikt. Verwacht wordt dat het langjarig gemiddelde op dit niveau zal blijven. Geïmporteerde portlandcementklinker wordt plaatselijk gemalen voor de productie van portlandcement (CEM I), portlandvliegascement (CEM II/B-V) en hoogovencement (CEM III/A en CEM III/B). CEM III is het meest gebruikte cement met 55-60% van de Nederlandse cementmarkt, gevolgd door CEM I met 30-35% en CEM II + CEM V met 5-10%.

Doordat Nederland zelf geen portlandcementklinker meer produceert, moet deze worden geïmporteerd, waardoor de CO₂-uitstoot vanwege het transport met ca. 3% toeneemt.

De beschikbaarheid van poederkoolvliegascement voor de Nederlandse markt staat onder druk door de geplande sluiting van kolengestookte centrales in veel EU-landen. Maar deze zal worden aangevuld door import, waarschijnlijk uit landen buiten de EU, zoals India. Hierdoor zal de CO₂-uitstoot van CEM II/B-V toenemen met ongeveer 10%, in vergelijking met CEM II/B-V dat voorheen werd geproduceerd met Nederlandse poederkoolvliegascement en portlandcementklinker.

De toekomst van de staalindustrie in de EU is op dit moment minder zeker, aangezien het streven om de sector te beschermen in strijd is met de grote CO₂-uitstoot die niet voldoet aan de klimaatambities. De productie van hoogovenslak in Nederland zou verzekerd zijn als minder milieubelastende technologieën, zoals bijvoorbeeld waterstofreductie, zouden worden geïmplementeerd. De hoeveelheid en kwaliteit van de gegraneerde hoogovenslak die met deze nieuwe technologieën worden geproduceerd, is niet bekend. Nederland zal naar alle waarschijnlijkheid gegraneerde hoogovenslak in toenemende mate moeten blijven importeren. In het geval van import uit Turkije zal dit de CO₂-uitstoot van CEM III/A met ongeveer 9% en van CEM III/B met ongeveer 13% verhogen, inclusief de verhoogde bijdrage van de geïmporteerde portlandcementklinker.

Nieuwe alternatieve cementsoorten dienen zich steeds vaker aan. Dit is voornamelijk het geval voor beliet-calciumsulfoaluminaat-ternesiet cement, door carbonatatie verhard cement en kalksteen-gecalcineerde klei-cement, omdat ze mogelijk voor 2030 toegepast kunnen worden. Beliet-calciumsulfoaluminaat-ternesiet kan de CO₂-uitstoot verlagen met 30% ten opzichte van CEM I. Het wordt momenteel door Heidelberg Cement als "Ternocem" en door Lafarge als "Aether" op de markt gebracht.

Door carbonatatie verhard cement kan een 60% lagere CO₂-uitstoot hebben in vergelijking met CEM I. Twee verschillende benaderingen van door carbonatatie verhard cement worden op de markt gebracht door de bedrijven Solidia en CarbonCure. Beide bedrijven leveren zowel prefab en als betonmortelopties.

Kalksteen-gecalcineerde klei-cement (LC³) maakt een hoge mate van portlandcementklinkervervanging mogelijk. LC³-50 bestaat uit 50% klinker, 30% gecalcineerde klei, 15% kalksteen en 5% gips. LC³-50 maakt een reductie van de CO₂-uitstoot met 30% mogelijk ten opzichte van CEM I.

Wereldwijd gebruik van alkali-geactiveerde bindmiddelen blijft bijzonder klein en beperkt tot niche toepassingen. Grootschalig gebruik wordt onder meer belemmerd door het ontbreken van regelgeving en door hogere kosten. De aluminosilicaatbron bestaat meestal uit gegraneerde hoogovenslak, poederkoolvliegascement of metakaolien. De beschikbaarheid van gegraneerde hoogovenslak en poederkoolvliegascement in de toekomst is onzeker, en het grootste deel ervan wordt momenteel gebruikt in mengcementen. Voor metakaolien moeten grotere hoeveelheden natriumsilicaat als activator worden toegepast, waardoor het een minder ideale bron van aluminosilicaat is.

Als activator worden oplossingen van natriumhydroxide in combinatie met natriumsilicaat, of soms silica fume gebruikt. Wereldwijd wordt weinig natriumsilicaat geproduceerd. Zowel natriumsilicaat als silica fume zijn slechts beperkt beschikbaar en tevens erg duur. Natriumhydroxide is eveneens een belangrijke activator. De wereldwijde vraag is vele malen groter dan de jaarlijkse productie van natriumhydroxide. Op basis van de huidige productie en de overschotten van natriumhydroxide kan slechts 7% van het wereldwijd geproduceerde beton op basis van portlandcementklinker worden vervangen door beton op basis van alkali-geactiveerde bindmiddelen. Alkali-geactiveerde bindmiddelen hebben echter een significant reductiepotentieel van de CO₂-uitstoot. Alternatieve

grondstoffen (met een lage CO₂-uitstoot) als bron van aluminosilicaat moeten worden onderzocht. Bovendien moeten normen worden uitgewerkt die het gebruik van alkali-geactiveerde bindmiddelen toelaten, om toepassingen mogelijk te maken waarin gemengd portlandcement een dominante rol vervult.

Naast alternatieve cementsoorten kunnen SCM's, waaronder de zeer fijne fractie die vrijkomt bij innovatieve recyclingstechnieken, een belangrijke rol spelen.

Ook efficiënter materiaalgebruik kan een wezenlijke bijdrage leveren aan het bereiken van de doelstellingen van het Betonakkoord. Het cementgehalte in beton kan worden verminderd door het optimaliseren van het mengselontwerp door een verbeterde korretpakking en/of door het gebruik van geschikte hulpstoffen en minerale vulstoffen.

Het materiaalverbruik kan worden gereduceerd door meer geschikte toepassingen van hogesterktebeton. Cementsoorten mogen niet uitsluitend worden gedefinieerd op basis van de samenstelling, maar zouden eerder geclassificeerd moeten worden op basis van prestatie-eigenschappen zoals bestendigheid, duurzaamheid en circulariteit. Dit zal het gebruik mogelijk maken van bindmiddelen die niet gebaseerd zijn op een minimum gehalte aan portlandcementklinker. Om die reden moet er meer belang worden gehecht aan CUR-Aanbeveling 48.

De prijs voor poederkoolvliegias, gegranuleerde hoogovenslak, traditionele en nieuwe alternatieve cementsoorten en alkali-geactiveerde bindmiddelen zal waarschijnlijk in de nabije toekomst stijgen als gevolg van hogere transportkosten en een hogere CO₂-heffing.

Nederlands cement heeft het laagste CO₂-profiel in de wereld als gevolg van het gebruik van cement met een laag klinkergehalte (bijv. CEM III/B). Om die reden wordt verwacht dat de CO₂-uitstoot en dus ook de MKI (MilieuKostenIndicator) van de Nederlandse bindmiddelen voor beton niet aanzienlijk zal dalen in de komende jaren. Grotere transportafstanden van grondstoffen die het CO₂-profiel van Nederlands cement zo laag houden (gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias) zullen een negatieve invloed hierop hebben.

Om het lage CO₂-profiel te behouden of het verder te verlagen zijn meer stimulansen nodig om alternatieve materialen (in het bijzonder reststoffen met een verwaarloosbare CO₂-uitstoot) te gebruiken. Bovendien zal de beschikbaarheid en/of het gebruik van nieuwe cementsoorten met een lage CO₂-uitstoot moeten worden gestimuleerd.

Kernpunten:

- Door import en daaraan gekoppeld extra transport van portlandcementklinker, poederkoolvliegias en gegranuleerde hoogovenslak zal de CO₂-uitstoot van Nederlandse cementen toenemen. Een uitzondering hierop is CEM II/C-M met een hoog percentage kalksteen.
- Nieuwe cementsoorten, zoals beliet-calciumsulfoaluminaat-ternesiet (BCT), kalksteen-gecalcineerde klei-cement (LC³) en door carbonatie verhard cement, kunnen een 30% of meer lagere CO₂-uitstoot hebben dan portlandcement (CEM I).
- Alkali-geactiveerde bindmiddelen kunnen een lage CO₂-uitstoot hebben, soms zelfs lager dan CEM III/B. Echter, deze bindmiddelen zijn meestal gebaseerd op gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias, die steeds minder beschikbaar zijn. Om de toepassing van alkal-geactiveerde bindmiddelen te bevorderen, dient betonregelgeving hiervoor te worden ontwikkeld.
- Efficiënter mengselontwerp (bijvoorbeeld verbeterde korretpakking) en toepassing van de poederfractie die vrijkomt bij innovatieve recyclingstechnieken zijn belangrijk voor een reductie van de CO₂-uitstoot.
- Verwacht wordt dat de CO₂-uitstoot van de Nederlandse cementen en bindmiddelen de komende jaren niet beduidend zullen afnemen vanwege de toenemende transportafstanden. Dit zal waarschijnlijk ook de kostprijs verhogen.

10. Referenties

1. World Business Council for Sustainable Development (2018) Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry
2. Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (2019) Klimaatakkoord
3. European Committee for Standardization (2011) EN 197-1: Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements
4. (2019) Talk:Geopolymer. Wikipedia
5. Kramer W (2020) Cement market in the Netherlands. In: Betonhuis.
<https://betonhuis.nl/cement/cementmarkt-nederland>
6. European Commission (2019) Eurostat. Total production by PRODCOM list (NACE Rev. 2) - annual data. In: Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
7. Polder RB, Nijland TG, de Rooji MR (2014) Slag cement concrete-the Dutch experience. Traffic Safety, Environ Technol Dep
8. Vermeulen E Alternatieve bindmiddelen. In: Betonakkoord - Richtlijn Duurzame Betonconstructies.
<https://www.betonakkoord.nl/resultaten/duurzame-betonconstructies/>
9. Melorose J, Perroy R, Careas S (2015) World population prospects. United Nations 1:587–592
10. Global Cement and Concrete Association (2018) GNR Database – GCCA in Numbers
11. Scrivener KL, John VM, Gartner EM (2018) Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. *Cem Concr Res* 114:2–26.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
12. Favier A, Scrivener KL, Habert G (2019) Decarbonizing the cement and concrete sector: integration of the full value chain to reach net zero emissions in Europe. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Institute of Physics, p 12009
13. Mehta PK, Monteiro PJM (2014) Concrete: microstructure, properties, and materials. McGraw-Hill Education
14. CEMBUREAU (2013) Cements for a low-carbon Europe
15. Harris D, Heidrich C, Feuerborn J (2019) Global aspects on Coal Combustion Products. In: World of Coal Ash Conferenc
16. Lang E (2002) Blast furnace cements. Spon Press London
17. World Steel Association (2020) Total production of crude steel. https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-data-viewer/P1_crude_steel_total/CHN/IND. Accessed 30 Nov 2020
18. (2008) Hoogovenslak. *Betoniek* 14:
19. Snellings R (2016) Assessing, understanding and unlocking supplementary cementitious materials. *RILEM Tech Lett* 1:50–55
20. Harder J (2019) Secondary use of mineral raw materials. *Miner. Process.*
21. European Coal Combustion Products Association (ECOBA) (2016) Production.
<http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>. Accessed 15 Nov 2020
22. TAAKGROEP INNOVATIE (2019) Innoveren met een missie
23. TATA Steel Europe (2020) Hlsarna. In: Duurzaamheid Innov.
<https://www.tatasteel.nl/nl/duurzaamheid/innovatie/Hlsarna>
24. Ito A, Langefeld B, Götz N (2020) The future of steelmaking / How the European steel industry can achieve carbon neutrality
25. Ghenda JT (2019) Low Carbon Roadmap: Pathways to a CO2-Neutral European Steel Industry
26. Bataille C (2020) Low and zero emissions in the steel and cement industries: Barriers, technologies and policies
27. EUROFER A (2013) Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050
28. Skoczkowski T, Verdolini E, Bielecki S, et al (2020) Technology innovation system analysis of decarbonisation options in the EU steel industry. *Energy* 212:118688

29. Assi LN, Carter K, Deaver E, Ziehl P (2020) Review of availability of source materials for geopolymer/sustainable concrete. *J Clean Prod* 263:121477. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121477>
30. Hellstrom J, Meijer BH, Roy A (2020) SSAB eyes Tata Steel's Dutch assets as European consolidation picks up. Reuters
31. Schimmelpenninck S (2020) Groen in eigen land, daarbuiten niet zo: waarom de schone Zweden de vuile hoogovens willen kopen. *de Volkskrant*
32. Skorianz M, Engel E, Schenk J Sustainable steelmaking—A strategic evaluation of the future potential of hydrogen in the steel industry
33. EBC secretariat (2017) Europe Beyond Coal Database. <https://beyond-coal.eu/database/>
34. International Energy Agency (2018) Coal 2018 - Analysis and forecasts to 2023
35. Diaz-Loya I, Juenger M, Seraj S, Minkara R (2019) Extending supplementary cementitious material resources: Reclaimed and remediated fly ash and natural pozzolans. *Cem Concr Compos* 101:44–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.011>
36. Gartner E, Sui T (2018) Alternative cement clinkers. *Cem Concr Res* 114:27–39
37. Lea FM (Frederick M, Hewlett PC (2001) *Lea's chemistry of cement and concrete*. Elsevier Butterworth- Heinemann
38. Chaunsali P, Vaishnav K (2020) Calcium-sulfoaluminate-belite cements: Opportunities and challenges. *Indian Concr J* 94:18–25
39. European Commission (2020) Cement Sector - Non-exhaustive list of technological pathways and some examples of project
40. CEMBUREAU (2018) Cement's role in a low-carbon future. <http://useofcement.cembureau.eu/2018/12/03/cements-role-low-carbon-future/>
41. ZKG (2013) Industrial trial for Aether successful. *ZKG Cem. Lime Gypsum*
42. CE Delft (2020) *Kostencurves Beton 2020*. Delft
43. Stemmermann P, Schweike U, Garbev K, et al (2010) Celitement—a sustainable prospect for the cement industry. *Cem Int* 8:52–66
44. Link T, Bellmann F, Ludwig HM, Haha M Ben (2015) Reactivity and phase composition of Ca₂SiO₄ binders made by annealing of alpha-dicalcium silicate hydrate. *Cem Concr Res* 67:131–137
45. Beiser V (2020) Concrete Is Awful for the Planet. Clever Chemistry Can Help. *Wired*
46. Solidia (2020) Solidia Solutions. <https://www.solidiatech.com/solutions.html>
47. Koss H (2020) THE STARTUPS CREATING CONCRETE ALTERNATIVES. In: *builtin*. <https://builtin.com/founders-entrepreneurship-raleigh-durham/startups-saving-world-concrete>
48. Majcherarchive K (2015) What Happened to Green Concrete? *MIT Technol. Rev.*
49. Antoni M, Rossen J, Martirena F, Scrivener K (2012) Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cem Concr Res* 42:1579–1589
50. Fernandez R, Martirena F, Scrivener KL (2011) The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cem Concr Res* 41:113–122
51. Scrivener K, Martirena F, Bishnoi S, Maity S (2018) Calcined clay limestone cements (LC3). *Cem Concr Res* 114:49–56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
52. Alujas A, Fernández R, Quintana R, et al (2015) Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Appl Clay Sci* 108:94–101
53. Avet F, Snellings R, Diaz AA, et al (2016) Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cem Concr Res* 85:1–11
54. Avet F, Scrivener K (2020) Study of Concrete Made of Limestone Calcined Clay Cements (LC 3). In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, pp 257–261
55. European Committee for Standardization (2020) prEN 197-5: Cement - Part 5: Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI
56. Müller N, Harnisch J (2008) *A Blueprint for a Climate Friendly Cement Industry*

57. Wang D, Shi C, Farzadnia N, et al (2018) A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Constr Build Mater* 181:659–672
58. Matschei T, Lothenbach B, Glasser FP (2007) The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cem Concr Res* 37:551–558. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.013>
59. Ingram KD, Daugherty KE (1992) Limestone additions to portland cement: uptake, chemistry, and effects. *Int Congr Chem Cem*, 9 th, III pp 160:
60. CE Delft (2020) *Klimaatimpact van betongebruik in de Nederlandse bouw*. Delft
61. Scrivener KL (2014) Options for the future of cement. *Indian Concr J* 88:11–21
62. Trümer A, Ludwig H-M, Schellhorn M, Diedel R (2019) Effect of a calcined Westerwald bentonite as supplementary cementitious material on the long-term performance of concrete. *Appl Clay Sci* 168:36–42
63. Tironi A, Trezza MA, Scian AN, Irassar EF (2013) Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. *Cem Concr Compos* 37:319–327
64. U.S. Geological Survey (2020) *Mineral commodity summaries 2020*
65. Gmür R, Thienel K-C, Beuntner N (2016) Influence of aging conditions upon the properties of calcined clay and its performance as supplementary cementitious material. *Cem Concr Compos* 72:114–124
66. Heath A, Paine K, Mcmanus M (2014) Minimising the global warming potential of clay based geopolymers. *J Clean Prod* 78:75–83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.046>
67. European Commission (2019) *Integrated National Energy and Climate Plan 2021-2030*. The Netherlands
68. Nunes LJR, Matias JCO (2020) Biomass Torrefaction as a Key Driver for the Sustainable Development and Decarbonization of Energy Production. *Sustainability* 12:922
69. Obernberger I, Supancic K (2009) Possibilities of ash utilisation from biomass combustion plants. In: *Proceedings of the 17th European biomass conference & exhibition*
70. Steinberger JK, Krausmann F, Eisenmenger N (2010) Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis. *Ecol Econ* 69:1148–1158
71. Faaij A, Steetskamp I, van Wijk A, Turkenburg W (1998) Exploration of the land potential for the production of biomass for energy in the Netherlands. *Biomass and Bioenergy* 14:439–456. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(98\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(98)00002-6)
72. Rabou LPLM, Deurwaarder EP, Elbersen HW, Scott EL (2006) Biomass in the Dutch energy infrastructure in 2030
73. Stassen IHEM (1994) Biogas and biomass technology: Energy generation from biomass and waste in the Netherlands. *Renew Energy* 5:819–823. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90096-5](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90096-5)
74. Centraal Bureau voor Statistics (2013) *StatLine*. <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/>
75. European Commission (2019) Eurostat. Crop production (apro_cp). In: Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
76. Smil V (1999) Crop Residues: Agriculture's Largest Harvest: Crop residues incorporate more than half of the world's agricultural phytomass. *Bioscience* 49:299–308
77. Khawaja C, Janssen R (2014) Sustainable supply of non-food biomass for a resource efficient bioeconomy: A review paper on the state-of-the-art. *WIP-Renewable Energies, S2Biom Proj*
78. Unkovich M, Baldock J, Forbes M (2010) Variability in Harvest Index of Grain Crops and Potential Significance for Carbon Accounting. pp 173–219
79. Munns R, Schmidt S, Beveridge C (2018) *Plants in Action*, 2nd ed
80. Energy Research Centre of the Netherlands (2012) *Phyllis2 Database for biomass and waste*. <https://phyllis.nl/>
81. Carr NN (2019) Biomass Derived Binder: Development of the scientific basis for methodologies that enable the production of renewable sustainable cement based on ashes derived from the conversion of biomass residues as determined by qualitative mineralogical analysis. Delft University of Technology
82. Carsana M, Frassoni M, Bertolini L (2014) Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials. *Cem Concr Compos* 45:39–45

83. Bueno ET, Paris JM, Clavier KA, et al (2020) A review of ground waste glass as a supplementary cementitious material: A focus on alkali-silica reaction. *J Clean Prod* 257:120180
84. Pacheco-Torgal F, Castro-Gomes J, Jalali S (2008) Alkali-Activated Binders: A Review: Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products. *Constr Build Mater* 22:1305–1314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>
85. Zhao R, Sanjayan JG (2011) Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. *Mag Concr Res* 63:163–173
86. Kovalchuk G, Krienko P V (2009) Producing fire-and heat-resistant geopolymers. In: *Geopolymers*. Elsevier, pp 227–266
87. Bernal S, Krivenko P, Provis J, et al (2013) Other Potential Applications for Alkali-Activated Materials. In: *Alkali-activated Materials, State of the Art Report, RILEM TC 224-AAM*. pp 339–379
88. Provis JL, Van Deventer JSJ (2013) Alkali-activated binders: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM. Springer Science & Business Media
89. McLellan BC, Williams RP, Lay J, et al (2011) Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *J Clean Prod* 19:1080–1090
90. Provis JL (2018) Alkali-activated materials. *Cem Concr Res* 114:40–48
91. Virta RL (2010) Clay and shale. *Miner Yearb*
92. (2020) Sodium Hydroxide | Uses, Benefits, and Chemical Safety Facts. In: *ChemicalSafetyFacts.org*. <https://www.chemicalsafetyfacts.org/sodium-hydroxide/>. Accessed 11 Nov 2020
93. Schneider M (2019) The cement industry on the way to a low-carbon future. *Cem Concr Res* 124:105792
94. Pavlů T, Kočí V, Šefflová M (2016) Study replacement of cement with recycled cement powder and the environmental assessment. In: *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publ, pp 136–141
95. Tang Q, Ma Z, Wu H, Wang W (2020) The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. *Cem Concr Compos* 114:103807
96. Severins K, Mueller C (2018) Crushed sand as main constituent in cement. In: *20th International Conference on Building Materials (Ibausil)*
97. Shui Z, Xuan D, Wan H, Cao B (2008) Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. *Constr Build Mater* 22:1723–1729
98. Poon C-S, Qiao XC, Chan D (2006) The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. *Waste Manag* 26:1166–1172
99. Evangelista L, Guedes M, De Brito J, et al (2015) Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Constr Build Mater* 86:178–188
100. CEMBUREAU (2013) The role of cement in the 2050 low carbon economy. The European Cement Association Brussels
101. van Deventer JSJ, White CE, Myers RJ (2020) A Roadmap for Production of Cement and Concrete with Low-CO₂ Emissions. *Waste and Biomass Valorization* 1–31

Bijlage A. Interview met Karen Scrivener (EPFL)

Gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias

- De hoeveelheden gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias zullen alsmaar verder afnemen. Wereldwijd maakt gegranuleerde hoogovenslak slechts 8% uit van de productie van cement. In de EU wordt de CO₂-heffing steeds concreter, en er zijn geen ijzer- en staalproducenten in Europese handen. Zij zullen dus hun activiteiten verplaatsen naar waar er geen CO₂-heffing is. Vroeg of laat gaan hoogovenslakken uit de EU verdwijnen. Bovendien zijn staalproducenten op zoek naar alternatieve processen met een lagere CO₂. Wanneer de CO₂-heffing hoog genoeg stijgt, zullen ze voldoende stimulans hebben om een alternatief te zoeken.
- Poederkoolvliegias is nog erger. De meeste landen in West-Europa hebben zich er al toe verbonden om hun kolengestookte elektriciteitsproductie uit te faseren. Er zijn enkele uitzonderingen, zoals bijvoorbeeld Polen. Het is onduidelijk hoe lang dat zal blijven duren. Bovendien moet vliegias worden vervoerd. Fundamenteel gezien is vliegias geen goed product (in termen van reactiviteit).
- Gegranuleerde hoogovenslak nadert dezelfde prijs als portlandcementklinker en dat is nu al een tijdje het geval. Vliegias is nog steeds wat goedkoper, maar zodra de transportkosten er bovenop komen, zal vliegias even duur worden als klinker.
- Een belangrijke factor waar we rekening mee moeten houden is de kwaliteit. De grote cementproducenten maken afspraken over gunstige langetermijncontracten met de energiebedrijven. Wat overblijft is niet altijd van goede kwaliteit. Slak is een uniform product. Wanneer het gegranuleerd is, is het volledig reactief. Maar vliegias is variabel, wat problemen zal veroorzaken met de manier waarop betonmengsels zich gedragen. Vliegias kan nog steeds gebruikt worden, maar het is niet de beste oplossing voor onze grondstoffen in de toekomst.

Gecalcineerde klei

- Gecalcineerde klei is een interessant alternatief omdat het zo overvloedig beschikbaar is. Er zijn wereldwijd enorme voorraden van uitstekende kwaliteit. Het is veel logischer om gecalcineerde klei te importeren, omdat het een product is met een veel hogere toegevoegde waarde. Er is waarschijnlijk ongeveer 30 keer meer klei aanwezig in de aardkorst dan kalksteen.
- Er is voldoende klei aanwezig in Europa. De kwaliteit van de klei is over het algemeen beter in tropische of subtropische gebieden, maar er zijn ook veel goede kleilagen in Europa. Dat is meer bepaald het geval rond de Balkan, tot in Rusland.
- De klei in Nederland heeft slechts een marginale kwaliteit voor de LC³-technologie. Over het algemeen is een kaolinietgehalte van ongeveer 40% een goede kwaliteit. De Nederlandse klei ligt meer rond de 25-30%. Die kun je echter wel verrijken. Over de hele wereld gebeurt dat op grote schaal, in het bijzonder voor het maken van glas.
- Er zijn heel wat initiatieven in Europa voor de grootschalige productie van gecalcineerde klei. De meeste grote producenten in Europa zijn actief geëngageerd en willen beginnen te produceren in één of twee testfabrieken. Misschien al vanaf volgend jaar. Naar verwachting zal in 3 of 4 jaar tijd gecalcineerde klei in een groot deel van hun fabrieken in Europa zal worden geproduceerd. Over 10 jaar zal het overal grootschalig verkrijgbaar zijn.
- In het Initiatiefverslag over de duurzaamheid van cement uit 2009 werd gecalcineerde klei niet vermeld. In 2015 werd gezegd dat men ervan uitgaat dat 27% van het wereldwijd geproduceerde cement gecalcineerde klei zal bevatten.
- Overal waar er een keramische industrie is die aardewerk of witte keramische producten vervaardigt, is de kans groot dat er stortplaatsen van afvalklei zijn.
- De prijs van gecalcineerde klei ligt niet vast, omdat het in tegenstelling tot poederkoolvliegias of hoogovenslak vervaardigd moet worden. Wanneer gecalcineerde klei op grote schaal wordt geproduceerd, zal er een echte marktprijs worden bepaald. De productiekosten liggen aanzienlijk lager dan voor

portlandcementklinker, maar de prijs is afhankelijk van de marktomstandigheden. In een haalbaarheidsstudie die is uitgevoerd, was de kostprijs voor klinker \$30/ton; de kostprijs voor gecalcineerde klei zal ca. \$14-\$15/ton zijn. Maar dan is de kwestie wat producenten als marktprijs ervoor gaan vragen. Qua prestaties doet gecalcineerde klei het veel beter dan vliegias in cement.

- Voor cementfabrikanten is het een aantrekkelijk product, omdat het een SCM is die onder hun controle wordt gefabriceerd. Ze zijn dus onafhankelijk van de staalproducenten en van de prijs die zij vragen voor gegranuleerde hoogovenslak.
- Het is moeilijk om te concurreren met cementfabrikanten. Zij hebben de brandstofbronnen en die zijn bepalend voor de kosten. Door het gebruik van duurdere brandstofbronnen zoals diesel zal de kostprijs van gecalcineerde klei hoger liggen. Dat is waarom de kostprijs voor puur metakaolien (die wit moet zijn) drie tot vier keer hoger ligt dan de kostprijs voor cement. Voor LC³ is een meer flexibel gamma brandstoffen mogelijk. Het is ook een kwestie van schaalgrootte. Hoe groter de schaal waarop je calcineert, hoe goedkoper het is. Ook daar zijn de cementfabrikanten in het voordeel.
- Op lange termijn is er de mogelijkheid om te calcineren met elektriciteit in plaats van een brandstof. Verschillende producenten maken elektrische calcinatieovens die gemakkelijk kunnen opwarmen tot 800 °C. Gebruik van elektriciteit voor de productie van klinker tijdens het volledige proces is niet praktisch. Met temperaturen van 1400 °C heb je een enorm probleem met warmteoverdracht en refractoren.

LC³ als alternatief voor cement met een lagere CO₂-uitstoot

- LC³ is de gecombineerde vervanging van portlandcementklinker door gecalcineerde klei en kalksteen. Dit kan in een cementfabriek gebeuren, maar ook in een betonfabriek. Het klinkergehalte in het cement bedraagt ca. 50%. Dit zal binnenkort in de Europese cementnorm worden opgenomen met de nieuwe klasse CEM II/C-M. Wanneer je CEM II/C-M vergelijkt met CEM I, is een vermindering van de CO₂-uitstoot tot 40% mogelijk. Dit betekent dat met LC³ 50 (met een gehalte van 50% klinker) een besparing van 40% mogelijk is.
- De nieuwe cementnorm EN 197-5 zal binnenkort worden voorgesteld, eerst als een niet-geharmoniseerde norm. Zodra er een nationale norm is, is de basis gelegd voor een geharmoniseerde norm.
- LC³ is meer een CEM II op het gebied van duurzaamheid (levensduur). Het heeft een veel betere weerstand tegen chloridepenetratie en de alkali-silica reactie wordt volledig onderdrukt. Het enige nadeel is de carbonatatie. Alle lage-CO₂ cementen zullen onvermijdelijk een snellere carbonatatie hebben. Er is de volgende cyclus: je neemt calciumcarbonaat, je decarboniseert het, waardoor CO₂ ontstaat, en daarna kan het calcium opnieuw combineren met CO₂. Het is een cyclus en je kunt niet meer CO₂ opnemen dan er vooraf is ontstaan. Aangetoond is dat de carbonatatie vergelijkbaar is met poederkoolvliegias- en hoogovencement. Het eventuele carbonatatieprobleem kan worden opgelost met een aangepaste dekking. Vorstdooi is iets dat meer aandacht verdient, maar is op zich geen groot probleem.
- Aangezien de vroege sterkte uitstekend is, is de nabehandeling van het beton niet zo kritisch als bij CEM III/B.
- Voor LC³ kun je dezelfde constructieve rekenregels gebruiken. Er is dezelfde verhouding tussen trek- en druksterkte en een veel kleinere kruip. Dat zou mogelijk een voordeel kunnen zijn. De kruip is mogelijk twee of drie keer kleiner. De krimp is vergelijkbaar.

Andere alternatieven voor cement met een lagere CO₂-uitstoot

- 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%.

- Op papier lijken calciumsulfoaluminaatcementen interessant te zijn, omdat ze minder calcium en dus minder CO₂-uitstoot geven. Maar ook hier is er een probleem met de bronnen. Om deze cement te kunnen maken, heb je mineralen nodig die een veel hoger gehalte aan aluminiumoxide hebben in vergelijking met silica. De meeste mineralen hebben een 2:1 verhouding tussen silica en aluminiumoxide, met uitzondering van bauxiet. 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 vliegslag met een hoog aluminiumoxidegehalte, is ook erg klein. Er is echt geen potentieel aanwezig om dit op grote schaal te doen, puur vanuit het perspectief van beschikbare bronnen. Dit is ook een materiaal dat geen goede uithardingstijd heeft (een snelle en variabele uithardingstijd) en zeer duur is, zodat we weer terug zijn bij het argument dat we niche toepassingen nodig hebben. En nogmaals, die zijn er niet. Het heeft ook een slechte weerstand tegen carbonatatie, zodat het prestatieniveau niet gelijkwaardig is. Met betrekking tot de vermindering van de CO₂-uitstoot liggen de gepubliceerde waarden slechts rond 20%.
- Ik denk dat de wollastoniet-technologie interessant is. Maar het kan niet gebruikt worden met wapeningsstaal. Je hebt vrij kleine producten nodig, omdat je CO₂ 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.

Geopolymeren en alkali-geactiveerde cementen

- Ondanks de enorme hoeveelheid geld die in de afgelopen 30 of 40 jaar is besteed aan het onderzoek naar geopolymeren, vinden we op de markt weinig terug.
- Het allerbelangrijkste probleem zijn de beschikbare bronnen. Er is gewoonweg onvoldoende basismateriaal beschikbaar. Alle formuleringen die vandaag de dag zijn ontwikkeld, zijn gebaseerd op hoogovenslak of vliegslag, en die komen steeds minder beschikbaar. Al het bruikbare materiaal gaat naar de productie van conventioneel cement.
- Het heeft geen enkele zin om geopolymeren te maken op basis van gecalcineerde klei. Gecalcineerde klei blijkt een grote hoeveelheid activator nodig te hebben, en dat moet natriumsilicaat zijn. Natriumsilicaat heeft een vrij hoge CO₂-uitstoot. De formuleringen die zijn gepubliceerd voor alkali-geactiveerde gecalcineerde klei zouden bijna dezelfde CO₂-uitstoot hebben als CEM I.
- Dan zijn er ook nog de technische beperkingen. Deze materialen harden bijna onmiddellijk uit, er zijn geen geschikte hulpstoffen om de reologie te controleren, ze vertonen een grote krimp en ze hebben geen enkele buffer tegen carbonatatie.
- Alkali-geactiveerde bindmiddelen kunnen speciale eigenschappen hebben, zodat ze kunnen worden gebruikt voor bepaalde toepassingen, maar ze zijn geen vervanging voor klinkergebaseerde cementen. Al meer dan 30 jaar wordt gewag gemaakt van speciale toepassingen, en nog steeds is daar geen enkel spoor van. Toch niets van enige omvang.
- Alle grote cementproducenten hebben hier projecten aan besteed, en ze zijn allemaal op onoverkomelijke problemen gestoten, dus economisch gezien heeft het geen succes opgeleverd. Vandaag de dag heeft het economisch nog minder zin, omdat de prijs voor slag stijgt.

Bijlage B. Interview met Gert Speets (Spetac)

Algemeen

- Er zal voor 2030 vanwege meerdere redenen nog maar weinig veranderen wat betreft de beschikbare cementen/bindmiddelen en de CO₂-emissie ervan.
- Door de snelle afbouw van E-centrales is er ook een tekort ontstaan van rookgasontzwavelingsgips, die grootschalig in de cement- en gipsindustrie wordt toegepast. Hierdoor wordt steeds meer natuurgips gebruikt.

Poederkoolvliegias

- De markt voor poederkoolvliegias ziet er de komende 10 jaar goed uit: ca. 5 Mton/jaar voor Nederland, Duitsland en België. De productie ervan neemt snel af in deze landen.
- Wereldwijd (o.a. India, China, Vietnam) maar ook in Europa (o.a. Turkije, Polen, Baltische staten) zijn zeer grote hoeveelheden vliegias van goede kwaliteit beschikbaar. Betreffende landen zijn bereid om te investeren in benodigde faciliteiten om export mogelijk te maken, om zodoende het storten van overtollige poederkoolvliegias in eigen land te voorkomen.
- De kwaliteit van de vliegias is goed en voldoet aan de gestelde eisen in EN 450. Dit komt mede doordat er nog nauwelijks meestoken van andere energiedragers plaatsvindt.
- De uitdaging ligt in de totale transportkosten (inclusief overslag) in relatie tot de marktprijs die men bereid is te betalen voor poederkoolvliegias (ca. €60/ton), de logistiek (beschikbare grote havens aan de export- en importzijde) en opslagcapaciteit bij transporten van ca. 100 kton en de vergunningverlening voor dergelijke transporten en over/opslag.
- Wat betreft het laatstgenoemde aspect zou de overheid oog moeten hebben voor het belang van deze grondstof voor het realiseren van een lagere CO₂-emissie van cement.
- Poederkoolvliegias kan worden geïmporteerd als een niet-gevaarlijke afvalstof (REACH) en krijgt bij nuttige toepassing een 'End-of-waste' verklaring. Er dient dan wel een sluitende registratie van de nuttige toepassing plaats te vinden.

Hoogovenslak

- De productie van hoogovenslak zal de komende periode in Europa fors afnemen. Hoogovenslak zal nog wel beschikbaar zijn in landen zoals China, India, Japan, Brazilië en Turkije.
- Kwaliteit, kostprijs en leverbetrouwbaarheid zijn nogal eens een probleem. Voor een goede kwaliteit hoogovenslak wordt bentoniet aan het proces toegevoegd, hetgeen zeker niet overal gebeurt. De transportkosten zijn vaak hoog omdat veel staalfabrieken niet aan groot vaarwaters liggen. Een vaste leverstroom is met sommige landen nogal eens lastig te realiseren.

Alternatieve cementen met lagere CO₂-emissie

- De totale kostprijs en prestaties van de in ontwikkeling zijnde alternatieve cementen zijn nog niet concurrerend met de bestaande cementen.
- Daarnaast heeft de cementindustrie nog voldoende CO₂-rechten. De CO₂-beprijzing is essentieel voor brede toepassing alternatieve cementen.
- Om echt een structurele verandering te krijgen moet het overgrote deel van de cementindustrie (80-20 regel) gelijktijdig die stap zetten. Dat is ook noodzakelijk want op de langere termijn zullen ook wereldwijd de hoeveelheden en kwaliteiten van de huidige grondstoffen zoals hoogovenslak en poederkoolvliegias sterk verminderen door vergroening van de betreffende industrietak. Die trend is nu al in gang gezet.
- Met het afvangen van CO₂, het carbon capture systeem, wordt druk mee geoefend, maar echte vorderingen daarmee worden nog niet gemeld. Ook hier zou CO₂-beprijzing een stimulans zijn, maar de Europese Commissie is nog niet zo voortvarend daarin. Dat is een belangrijk gegeven om vast te stellen dat dan alles min of meer bij het oude blijft.

Gecalcineerde kleien

- Er zijn een aantal initiatieven op het vlak van gecalcineerde klei. Baumineral heeft een pilot project gemaakt samen met Uniper in Scholven en testen nu een aantal kleisoorten uit om te kijken welke geschikt zijn. Ook Dyckerhoff is daar mee bezig, gedreven door een Russische cementfabriek die zij hebben en waar dit al wat langer wordt toegepast.
- Hoewel wereldwijd gigantische kleivoorraden aanwezig zijn, is die klei niet altijd geschikt zowel materiaaltechnisch als wat betreft milieubelasting.
- Verder is het de vraag of het economisch haalbaar is. De tijd zal het leren.

Kalksteenmeel

- Betoncentrales en leveranciers van kalksteenmeel denken dat kalksteenmeel een vervanger zal worden voor poederkoolvliegias.
- Betonmengsels met kalksteenmeel hebben andere eigenschappen dan vliegiasbeton, met name wat betreft de levensduur. Belangrijk om de beoordelingssystematiek voor de geschiktheid van een beton in specifieke milieuklassen nog eens zorgvuldig te bekijken.

Geopolymeren/alkalisch geactiveerde bindmiddelen

- Geopolymeren zullen naar verwachting voornamelijk in ongewapend beton worden toegepast.
- Het aandachtspunt met geopolymeren (maar dat geldt ook voor andere betonsoorten) is recycling. Hoe gaan we daar in de toekomst mee om?
- Er zijn ook hybride vormen van cement- en geopolymeerbeton in ontwikkeling (Voorbij Beton/ABT).
- De markt wordt met vallen en opstaan gecreëerd. We zullen zien waar het ons allemaal brengt. Maar er moet nog heel veel (onderzoek) gebeuren om geopolymeren breed toegepast te krijgen.

Tot besluit

- De circulariteit van beton hebben we niet expliciet aan de orde gesteld, maar is wel meerdere keren ter sprake gekomen.
- Het is een goede zaak dat de overheid (RWS) deze ontwikkelingen initieert en faciliteert. Als beleidsmaker én opdrachtgever speelt de overheid een belangrijke rol, waar anderen dan makkelijker op inhaken. De betonindustrie kan die trekkersrol moeilijk oppakken omdat ze al de handen vol hebben aan hun eigen continuïteit.

Bijlage C. Interview met Rene Albers (Ecocem Benelux)

Algemeen

- Voor structurele inzet van innovatieve betonsamenstellingen c.q. bindmiddelen met een lage CO₂-emissie is een hogere CO₂-beprijzing noodzakelijk.
- Veel nieuwe minder milieubelastende innovaties zijn economisch (nog) niet rendabel of hebben een hogere milieubelasting dan hoogovenslak en poederkoolvliegass.
- De huidige maalfijnheid van cementen is niet optimaal om de beste prestatie uit het materiaal te halen. Maar bij fijner malen wordt de output lager en dan is de output maal de opbrengst lager. Dus economisch minder aantrekkelijk. Maar dat plaatje kan anders worden als we de CO₂-emissie op een andere manier gaan waarderen.
- Bij eisen op prestaties in plaats van op samenstelling, kunnen we het minimum cementgehalte loslaten en daarmee de CO₂-emissie van beton verlagen.
- Indien we de betonhuid hoogwaardiger maken op het onderliggend bulkbeton kan de combinatie mogelijk veel minder milieubelastend zijn. Een durable betonhuid op een sustainable bulkbeton.
- Ontwikkeling van de betonregelgeving is een belangrijke voorwaarde voor vernieuwingen. In Nederland hebben we daar een goede 'infrastructuur' voor. Vervolgens is het belangrijk dat de kennis over deze nieuwe regelgeving en betonmengsels bij de betontechnologen wordt ingebed.
- Het is heel belangrijk is dat we materiaalpaspoorten aan betonconstructies mee gaan geven zodat we ze in de toekomst op de juiste manier weer te kunnen hergebruiken.
- 'The battle of raw materials' is begonnen en met de stijgende vraag stijgen de prijzen van de grondstoffen.

Poederkoolvliegass

- In Nederland wordt het aantal kolengestookte E-centrales in een rap tempo afgebouwd. Dit leidt nu al tot tekorten aan poederkoolvliegass op de markt.
- Maar in Oost-Europa en Aziatische landen worden nog steeds kolengestookte E-centrales gebouwd. Daar komen grote hoeveelheden poederkoolvliegass extra vrij, waarvan de kwaliteit vergelijkbaar zal zijn met die van de huidige Nederlandse vliegassen. Import van dergelijke poederkoolvliegassen op de Nederlandse markt zal, ondanks de hogere transportkosten, een optie zijn.
- Daarnaast zijn er ook nog grote hoeveelheden poederkoolvliegass uit het verleden opgeslagen in depots ('Blue lagoon vliegassen'), zoals bijvoorbeeld in VK. Er wordt nagegaan of die ook kunnen worden ingezet (kwaliteit en kosten).
- Op dit moment stijgen de prijzen van de grondstoffen flink en dat is natuurlijk van invloed op de economische haalbaarheid van dergelijke alternatieve stromen poederkoolvliegass.

Hoogovenslak

- Ondanks de (verlengde) importheffingen van de EU zal de Europese staalindustrie toch langzaam gaan verschuiven naar Azië en Zuid-Amerika.
- Wereldwijd neemt de productie van staal nog steeds toe, maar de verschillen zijn regionaal erg groot.
- Door procesverbeteringen neemt de hoeveelheid hoogovenslak per geproduceerde ton staal steeds verder af. Er zijn al technologieën in ontwikkeling waarbij staal wordt geproduceerd zonder dat er hoogovenslak vrijkomt. Het zal echter nog lang duren voordat die grootschalig zullen worden ingezet (afschrijving bestaande staalfabrieken).
- De Ecocem hoogovenslakken komen tijdelijk niet enkel uit Europa. Op dit moment moet Ecocem die soms ook al van verder weg halen en dat heeft een significante invloed op de grondstoffenprijs.

- De transportkosten naar de productielocatie en de afnemers worden door meerdere factoren bepaald, maar zijn in alle gevallen een substantieel deel van de totale kostprijs van de gemalen gegraneerde hoogovenslak.
- Ondanks verschil in herkomst en kwaliteit van de verschillende stromen hoogovenslak, kan de kwaliteit van de gemalen gegraneerde hoogovenslak op niveau worden gehouden, maar dat is meer dan enkel de maalfijnheid aanpassen.
- Mits de staalindustrie niet volledig verdwijnt in Europa, zal het komend decennium de huidige goede kwaliteit van de gemalen gegraneerde hoogovenslak kunnen worden gecontinueerd, maar waarschijnlijk tegen een hogere kostprijs.

Alternatieve cementen met lagere CO₂-emissie

- We zijn gewend dat we altijd het beste cement onbelemmerd kunnen toepassen, maar dat is aan het veranderen. Dat betekent dat er compromissen gesloten moeten worden, maar wie gaat die compromissen sluiten?
- Wij zullen steeds meer de overstap van de "all purpose cements" naar specifieke toepassing van de cementen waar ze geschikt voor zijn, gaan maken.
- De eerste/snelste stap die we gaan zetten met de huidige grondstoffen, is CEM VI cement en dan met de speciale focus op de combinaties van klinker, slak en kalksteenmeel, die we in andere verhoudingen gaan gebruiken. Momenteel zijn al attesten op de markt met dezelfde samenstelling als CEM VI. Let wel! Deze cementen/bindmiddelen hebben een hogere milieubelasting dan CEM III.
- 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.

Geopolymeren/alkalisch geactiveerde bindmiddelen

- Alkalisch geactiveerde bindmiddelen/geopolymeren zijn volop in ontwikkeling en doen tevens hun intrede in de markt.
- De stap naar volwaardige geopolymeren of alkalisch geactiveerde bindmiddelen is nog groot. Het hele systeem van het activeren van de basisgrondstoffen zal zich stapsgewijs gaan ontwikkelen.
- De MKI van geopolymeren wordt sterk beïnvloed door de herkomst van de activatoren: uit een primair of secundair proces.
- Je zit met twee systemen: het traditionele systeem van de (portland)cementen en je hebt de geopolymeren aan de andere kant. Daar zit een heel traject tussen in van hybride systemen. Denk hierbij ook aan (alkali)sulfaat- en carbonaat-activatie.
- Hierbij kunnen calcium(sulfo)aluminaatcementen ook een rol spelen, maar zijn nu prijstechnisch nog niet interessant.
- Ecocem heeft ook een alkalisch geactiveerd bindmiddel, dat voor een groot gedeelte bestaat uit hoogovenslak. Er zijn al constructieve toepassingen mee gerealiseerd en Ecocem wil dit verder uitbouwen.

Gecalcineerde kleien

- Kleien en sedimenten zijn wereldwijd in een grote hoeveelheden voorradig en de technieken om ze thermisch te activeren zijn beschikbaar. Maar de CO₂-emissie en productiekosten zijn beduidend hoger dan van poederkoolvliegias of hoogovenslak.
- Gecalcineerde kleien hebben perspectief in gecombineerde cementen en mogelijk ook in geopolymeren.

Bijlage D. Interview met Peter de Vries (Heidelberg/ENCI)

Algemeen

- Beschikbaarheid grondstoffen voor de betonindustrie wordt voor een belangrijk deel politiek gestuurd.
- Afgelopen 10-15 jaar is de reductie van CO₂-emissie steeds belangrijker geworden. Meest effectieve maatregel is verlaging van het gehalte aan portlandcementklinker. Maar die moet wel worden vervangen door een geschikt ander materiaal!

Poederkoolvliegias

- Op basis van eerdere ervaringen in Duitsland, gebruiken we sinds beginjaren '80 poederkoolvliegias in ons cement, waarin het 30% portlandcementklinker kan vervangen. Dit bindmiddel heeft de afgelopen decennia bewezen de technische duurzaamheid van beton te verbeteren.
- Om CO₂-emissie te verlagen is een politiek besluit genomen om de kolengestookte E-centrales op korte termijn te sluiten, waardoor er steeds minder poederkoolvliegias vrijkomt voor toepassing in cement/beton. Dat volume moet worden ingevuld door andere geschikte reactieve vulstoffen of als die er niet zijn door portlandcementklinker! In het laatste geval zal de CO₂-emissie van Nederlandse cement weer gaan toenemen.
- Wereldwijd neemt echter het aantal kolengestookte E-centrales en dus hun CO₂-emissie nog steeds toe. Dus ook de totale productie aan poederkoolvliegias.

Hoogovenslak

- Het toepassen van hoogovenslak in cement/beton heeft 3 grote voordelen:
 - Een betere prestatie van het beton met name bij chloride/sulfaat/ASR belasting, zoals bijvoorbeeld in zeewatermilieu
 - Een beduidend lager klinkergehalte en dus een veel lagere CO₂-emissie
 - Lagere kostprijs cement
- Cementfabrieken staan altijd in de directe omgeving van hun belangrijkste grondstof om transportkosten te minimaliseren. Het voordeel van een cementfabriek (ENCI/Heidelberg) naast een staalproducent (Tata Steel te IJmuiden) blijkt al bijna een eeuw. Hoe lang dat zo blijft hangt af van bedrijfseconomische en politieke keuzes die gemaakt gaan worden. De continuïteit van Tata Steel is momenteel onzeker.
- Indien de productie van hoogovenslak bij Tata Steel wegvalt, dan kan dat niet zomaar worden ingevuld door import uit andere landen. Grootschalige import is enkel rendabel indien de slak direct in het productieproces kan worden ingevoerd. Verder is van belang dat de geïmporteerde hoogovenslak van voldoende kwaliteit is en over langere tijd in voldoende hoeveelheid geleverd kan worden. In 2008/2009 viel de slakproductie bij Tata Steel een periode gedeeltelijk weg door aanpassingen van hun hoogovens. ENCI/Heidelberg moest toen tijdelijk hoogovenslak uit China importeren, dat in vrachten van 70.000 ton werd verscheept. Voor binnenlands transport moest zo'n vracht worden overgeslagen naar schepen met een capaciteit van ca. 6 ton. De extra transportkosten brachten de kostprijs boven de marktprijs.
- Er wordt ook hoogovenslak in België, Frankrijk en Duitsland geproduceerd. Korte afstanden zijn economisch nog haalbaar, maar de afstand IJmuiden-Maastricht (>200 km) is al niet meer rendabel.

Alternatieve cementen met lagere CO₂-emissie

- Er is de afgelopen jaren veel werk verricht op labschaal en in demonstratieprojecten om alternatieve cementen te ontwikkelen met een lagere CO₂-emissie. Maar er wordt geen belangrijke doorbraak in de komende 10 jaar verwacht, tenzij de CO₂-beprijzing de komende 2-3 jaar zeer sterk zal toenemen, waardoor de hogere prijs van de alternatieve cementen kan worden gecompenseerd.

- Het gevaar bestaat zelfs dat Nederlandse cement de komende jaren een hogere CO₂-emissie zal hebben. Niet alleen de verminderde beschikbaarheid van poederkoolvliegias en hoogovenslak speelt hierbij een rol, maar ook het wegvallen van de cementklinkerproductie van ENCI te Maastricht is een belangrijke factor. We hebben het stuur nu niet meer zelf in handen. De portlandcementklinker wordt nu van andere Heidelberg cementfabrieken uit België en Duitsland betrokken en soms zelfs uit Polen of Turkije. Naast de transportafstand moet ook rekening worden gehouden met de CO₂-emissie van de cementklinkerproductie. ENCI Maastricht nam wereldwijd een vooraanstaande positie in wat betreft het milieuvriendelijk produceren van cementklinker, zoals bijvoorbeeld het al 20 jaar gebruiken van zuiveringsslib als hoogcalorische brandstof.
- De Heidelberg Cement Group heeft de ambitie om de CO₂-emissie te verlagen door het gemiddeld klinkergehalte in 2030 te verminderen naar 500 kg per ton cement. Dat ambitieniveau ligt echter toch nog ruim boven die van het huidige Nederlandse cement (400-450 kg klinker per ton cement).
- 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 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.
- Voor de productie van CalciumSulfoAluminaat-Beliet cementen is meer aluminiumhoudende grondstof benodigd, hetgeen betrokken kan worden van bauxiet of aluminiumrijke secundaire reststromen.
- Hoewel er al veel onderzoek is uitgevoerd aan deze CalciumSulfoAluminaat-Beliet cementen zijn er ook nog veel aspecten niet bekend. Er is dus nog veel werk te verzetten alvorens dergelijke cementen breed worden toegepast. Denk hierbij aan het gedrag op lange termijn en of onze constructieve rekenregels ongewijzigd van toepassing zijn.

Gecalcineerde kleien

- Klei is bijna overal in de wereld in grote hoeveelheden aanwezig. Maar wel in een grote verscheidenheid aan soorten. Na thermische behandeling heeft het veel potentie en past in de bestaande cementnormen.
- De cementindustrie heeft hier nog niet veel aandacht aan besteed, omdat met de reeds beschikbare kalksteen voor de productie van de cementklinker tevens een CEM II cement kan worden vervaardigd waarin 15-20% van de cementklinker is vervangen door kalksteen. Zowel wat betreft kostprijs als CO₂-profiel een aantrekkelijke optie.
- Maar gecalcineerde klei kan zeker een mooie toekomst in cement hebben. Er moet dan wel worden geïnvesteerd in grootschalige winning en (thermische) bewerking van de kleien, hetgeen de kostprijs van de daarmee geproduceerde cement zal verhogen.
- Omdat de thermische behandeling van klei bij 700-800 °C plaatsvindt, hetgeen veel lager is dan de 1450 °C bij de productie van cementklinker, en geen kalksteen als grondstof wordt gebruikt, zal de totale CO₂-emissie substantieel lager zijn dan die van een CEM I cement. Dit kan in landen die geen hoogovenslak of poederkoolvliegias beschikbaar hebben een groot milieuvoordeel opleveren. Misschien niet specifiek voor Nederland maar zeker wel wereldwijd een kansrijke duurzame oplossing in onze toekomstige cementvoorziening.

Geopolymeren/alkalisch geactiveerde bindmiddelen

- Belangrijk om een onderscheid te maken tussen geopolymeren vervaardigd met precursors die een laag CaO-gehalte hebben (zoals poederkoolvliegias) en alkalisch geactiveerde precursors met een hoog CaO-

gehalte (zoals hoogovenslak). Geopolymeren vergen een zeer sterke activator en verkrijgen door een polymerisatiereactie een 3D-netwerkstructuur. Alkalisch geactiveerde hoogovenslak vergt een minder sterke activator en verkrijgt door een hydratatiereactie een CSH-structuur vergelijkbaar met die van cement.

- Het werken met de activators vergt extra veiligheidsmaatregelen ten opzichte van cement.
- Omdat er maar een beperkte hoeveelheid hoogovenslak in Nederland beschikbaar is (ca. 1,5 Mton/jaar) en deze nagenoeg volledig wordt gebruikt in cement, zal de toepassing in alkalisch geactiveerde bindmiddelen enkel resulteren in een verschuiving van de toepassing maar zal op nationaal niveau nauwelijks of geen vermindering in CO₂-emissie plaatsvinden.
- Door thermische behandeling (verglazen) van bodemassen (proces Ascem) komt er een nieuwe precursor beschikbaar die mogelijk wel een bijdrage kan leveren aan de reductie van het CO₂-profiel van bindmiddelen voor beton.
- Geopolymeren hebben bijzondere eigenschappen die specifieke toepassingen mogelijk maken. Nadeel van geopolymeren is dat ze minder robuust zijn dan cement, zodat de productie ervan kritischer is. De betonsector moet hier nog leren mee om te gaan.

Bindmiddelen gebaseerd op CO₂

- Er zijn diverse bindmiddelen ontwikkeld op basis van CO₂, zoals Solidia en Novacem. Deze bindmiddelen en daarmee vervaardigde producten hebben een negatief CO₂-profiel. Solidia wordt al commercieel toegepast bij de productie van betonstraatstenen. Novacem is gebaseerd op de vorming van MgCO₃ en is nog een te kostbaar bindmiddel om commercieel toe te passen, maar ligt 'op de plank' om bij een juiste CO₂-beprijzing operationeel te worden.
- Beperking bij CO₂-gebaseerde bindmiddelen is dat de CO₂ 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.

Portlandcement zal altijd een belangrijke rol in beton blijven spelen, maar er is zeker behoefte en plaats voor bindmiddelen met een lage of zelfs negatieve CO₂-emissie met hun eigen betontechnologische eigenschappen.

Tot besluit

- De recente film 'A Life On Our Planet' van David Attenborough geeft een belangrijke boodschap: het is niet te laat! We hebben de kennis en technologie om het beter te doen, maar die moet wel gedeeld worden. Een belangrijke voorwaarde is dat we de welvaart voor alle mensen wereldwijd op een vergelijkbaar niveau moeten brengen, zodat er geen noodzaak meer is voor overbevolking.

Bijlage E. Interview met Patrick Ammerlaan (Cementbouw/SQAPE)

Algemeen

- Er zal de komende 10 jaar weinig veranderen in de CO₂-emissie/MKI van bindmiddelen. Poederkoolvliegias en gegranuleerde hoogovenslak zullen in onze regio steeds minder worden geproduceerd, maar wereldwijd nog wel steeds meer en die zullen deels naar West-Europa worden geëxporteerd.
- Er komen steeds meer maal- en menginstallaties bij de grotere zeehavens in Frankrijk, België, Nederland en Duitsland, die geïmporteerde cementklinker, hoogovenslak, kalksteen en poederkoolvliegias verwerken tot bindmiddelen.
- Kijk echter ook naar geschikte alternatieve grondstoffen in eigen omgeving.
- In 2021 zou een heel nieuw systeem van CO₂-belasting gaan komen, maar dat is uitgesteld tot 2024. De cementindustrie heeft voldoende CO₂-rechten voor de komende jaren.
- Deze aspecten bevorderen niet het duurzaam denken en handelen, zoals bijvoorbeeld het voorkomen van bulktransport van voorgenoemde grondstoffen over grote afstanden.
- Worden voorgenoemde aspecten wel op een juiste wijze in de LCA verdisconteerd? Worden die ook gehandhaafd in de praktijk?
- De regelgeving en de ingenieursbureaus belemmeren de implementatie van duurzame innovaties omdat die zich eerst in de praktijk volledig hebben moeten bewijzen.

Poederkoolvliegias

- Door het versneld sluiten van kolengestookte E-centrales in West-Europa neemt de productie van poederkoolvliegias snel af. De 5 Mton die jaarlijks in Nederland en Duitsland werd geproduceerd, kan worden opgevangen met import uit landen uit het verre Oosten en India al lijkt dit nu onwaarschijnlijk of uit oude depots (bijvoorbeeld in België en Duitsland) waar in het verleden poederkoolvliegias nat is opgeslagen.
- De kolen die in de jaren '60 en '70 als brandstof werden gebruikt, waren van veel hogere kwaliteit dan die we nu gebruiken. De daarmee geproduceerde poederkoolvliegias is dan ook van goede kwaliteit. Echter, de kosten om dergelijke vliegias in depots weer geschikt te maken voor toepassing in beton zijn momenteel nog te hoog. Daarnaast werkt de bestaande betonregelgeving belemmerend en is het moeilijk om die bij bestaande marktbelangen aan te passen op duurzame ontwikkelingen.

Hoogovenslak

- De wereldbevolking groeit en dus zal de staalindustrie wereldwijd ook blijven groeien. Echter, door hogere loonkosten en een toenemende CO₂-beprijzing zullen de grote staalbedrijven mogelijk op termijn uit West-Europa verdwijnen. Staal importeren vanuit China is goedkoper.
- Onze behoefte aan gegranuleerde hoogovenslak zal dan ook moeten worden gedekt door import uit China, India, Zuid-Amerika of Turkije. Dat dient dan te geschieden met zeer grote schepen met een fors dieselverbruik.

Gecalcineerde kleien

- Gecalcineerde kleien worden nog niet grootschalig gebruikt omdat de regelgeving belemmerd werkt en de kosten voor het geschikt maken nog te hoog zijn. Er zijn nog te veel alternatieven die ingezet kunnen worden en die vanwege meerdere redenen de voorkeur krijgen.

Alternatieve cementen met lagere CO₂-emissie

- De cementindustrie zal steeds meer gemalen kalksteen in hun cementen gaan toepassen, hetgeen in een aantal Europese landen al lange tijd gebruikelijk is.
- Je wil het hoogst haalbare rendement op je productenpallet. Nieuwe cementen gebaseerd op andere klinkersamenstellingen zullen daarom niet op korte termijn grootschalig worden toegepast.
- Als CO₂ wordt afgevangen in een cementfabriek dan heb je een CO₂-arm bindmiddel, mits je een toepassing voor de afgevangen CO₂ hebt. Onderzoeken vinden nu plaats.

Geopolymeren/alkalisch geactiveerde bindmiddelen

- Geopolymeren gaan cement niet structureel vervangen. De toekomst voor geopolymeren ligt in hun bijzondere eigenschappen, die gewone cementen niet hebben.
- Geopolymeren kun je ook maken met grondstofstromen anders dan hoogovenslak of poederkoolvliegias. Dergelijke ontwikkelingen vinden nu al volop plaats.



WWW.SGS.COM/INTRON

OVER SGS

SGS is 's werelds grootste onderneming op het vlak van inspectie, verificatie, tests en certificering, en wordt erkend als de wereldwijde referentie voor kwaliteit en integriteit. SGS beschikt over een netwerk van 89.000 medewerkers, verspreid over 2.600 kantoren en laboratoria over de hele wereld.

SGS INTRON B.V.

**Dr. Nolenslaan 126
P.O. Box 5187**

NL-6130 PD Sittard
+31 (0)88 214 52 04

SGS INTRON B.V.

**Venusstraat 2
P.O. Box 267**

NL-4100 AG Culemborg
+31 (0)88 214 51 00

SGS NEDERLAND

**Malledijk
P.O. Box 200**

NL-3200 AE Spijkenisse
+31 (0)88 214 33 33

SGS BELGIË

**18 SGS House
Noorderlaan 87**

B-2030 Antwerpen
+32 (0)3 545 44 00