Prioritering handelings-perspectieven verduurzaming betonketen

Op basis van kostencurve methodiek

Rapport
Delft, 5 september 2013

Opgesteld door:
M. (Marit) van Lieshout
G.E.A. (Geert) Warringa
G.C. (Geert) Bergsma

[CONCEPT]

Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:
M. (Marit) van Lieshout, G.E.A. (Geert) Warringa, G.C. (Geert) Bergsma
Prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen
Op basis van kostencurve methodiek

Delft, CE Delft, september 2013

@@

Publicatienummer: 13.2A59.@@

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat, directie @@
Alle openbare CE-publicaties zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider @@.

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft
Committed to the Environment

CE Delft is een onafhankelijk onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van structurele en innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken. Kenmerken van CE-oplossingen zijn: beleidsmatig haalbaar, technisch onderbouwd, economisch verstandig maar ook maatschappelijk rechtvaardig.

Inhoud

Voorwoord **5**

Samenvatting **7**

1 Inleiding **9**
1.1 Aanleiding 9
1.2 Doel project 9
1.3 Leeswijzer 10

2 Duurzaamheidsopties **11**
2.1 Selectieproces 11
2.2 Geselecteerde verduurzamingsopties 11
2.3 Samenvatting 15

3 Kostencurve **17**
3.1 Aanpak en uitgangspunten 17
3.2 Kostencurve 18
3.3 Gevoeligheidsanalyse 22
3.4 Samenvatting 24

4 Conclusies en aanbevelingen **25**
4.1 Kostencurve 25
4.2 Kiezen van opties 26

Bijlage A @@ **27**

Bijlage B @@ **29**

Bijlage B-1 Optimaliseren korrelverdeling **31**

Bijlage B-2 Toestaan CEM X **34**

Bijlage B-3 Calciumsulpho-aluminaat cement **36**

Bijlage B-4 Supergesulfateerd cement **38**

Bijlage B-5 Alternatief CSH cement **40**

Bijlage B-6 Geopolymeer **43**

	Bijlage B-7 Demontabel bouwen (hergebruik kanaalplaten kantoren in woningen)	46
	Bijlage B-8 Slim breken in combinatie met Calciumsulpho-alimunaat productie	50
	Bijlage B-9 Kringbouw	54
	Bijlage B-10 Inzet bodemas AECs	56
	Bijlage B-11 Wapeningsstaal vervangen door staalvezels	58
	Bijlage B-13 Langere ontkistingstijd in gietbouw	61
	Bijlage 16 Zelfhelend beton	64
	Bijlage 17 Betonkernactivering met warmtepomp en WKO	67
Bijlage C	Cementchemie en notatie	73
Bijlage D	Methodes om beton te recyclen	75
Bijlage E	Milieueffecten bij inzet van cementen en alternatieve bind-middelen voor beton – nu en straks	79

Voorwoord

Het voorliggende rapport is het eindrapport van het onderzoek naar de reductiekosten en reductiepotentieel van milieumaatregelen voor beton dat CE Delft heeft uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat, als deelnemer aan het Netwerk Beton, vanuit zijn rol in de Green Deal Beton.

Dit onderzoek is in nauwe samenwerking met deelnemers van de begeleidingscommissie tot stand gekomen. Mede dankzij hun input zijn de onderzoekers in staat geweest het reductiepotentieel en de reductiekosten in te schatten en te baseren op actuele marktgegevens en (deels vertrouwelijke) bedrijfsinformatie. Deze input heeft ertoe geleid dat de onderzoekers gebruik konden maken van hoogwaardige informatie.

Namens CE Delft wil ik daarom bij deze de volgende leden van de begeleidingscommissie hartelijk danken voor hun inzet en het aanleveren van informatie:

Evert Schut	MVO Nederland/Rijkswaterstaat
Peter Broere	BRBS
Mantijn van Leeuwen	CRH
Jeroen W. Frenay	ENCI B.V.
Frank Hoekemeijer	Heijmans Wegen & Civiel
Leo Dekker	Mebin
Guus van den Berghe	RWS Leefomgeving
Thies van der Wal	VBI/Spanbeton

Ook naast de begeleidingscommissie is er door een groot aantal mensen een bijdrage geleverd, met name noemen we Mark van Kempen (Inhasco), Koos Schenk (Schenk Concrete Consultancy), David Heijkoop (Reko BV). Aan hen en alle anderen die via telefoon en mail een bijdrage aan deze studie hebben geleverd bij deze hartelijk dank. De geleverde informatie en de zinvolle discussies hebben de kwaliteit van het rapport sterk verbeterd.

De conclusies zijn uiteraard geheel voor rekening van de auteurs,

Marit van Lieshout, Geert Warringa en Geert Bergsma

Samenvatting

Deze studie is onderdeel van het proces dat is afgesproken in de Green deal beton. In oktober 2011 is deze Green Deal Beton gesloten tussen de ministeries EZ en I&M en 24 deelnemende bedrijven en 7 brancheorganisaties uit de betonketen. De betrokken bedrijven en brancheorganisaties werken samen onder de vlag van MVO Nederland in het Netwerk Beton.

Het Netwerk Beton heeft al eerste stappen gezet in de verduurzaming van de betonketen. Op de middellange termijn worden verdergaande verbeteringen wenselijk geacht. Om deze verbeteringen te realiseren zijn 17 duurzame opties geselecteerd. Deze opties verschillen in reductiekosten en reductie-potentieel.

Het doel van het project is een kostencurve op te stellen voor deze 17 opties om op de middellange termijn de betonketen te verduurzamen. Deze curve maakt een vergelijking tussen de opties van reductiekosten en reductie-potentieel mogelijk. Mede op basis van deze kostencurve worden uiteindelijk tien maatregelen geselecteerd waarmee verder aan de slag wordt gegaan.

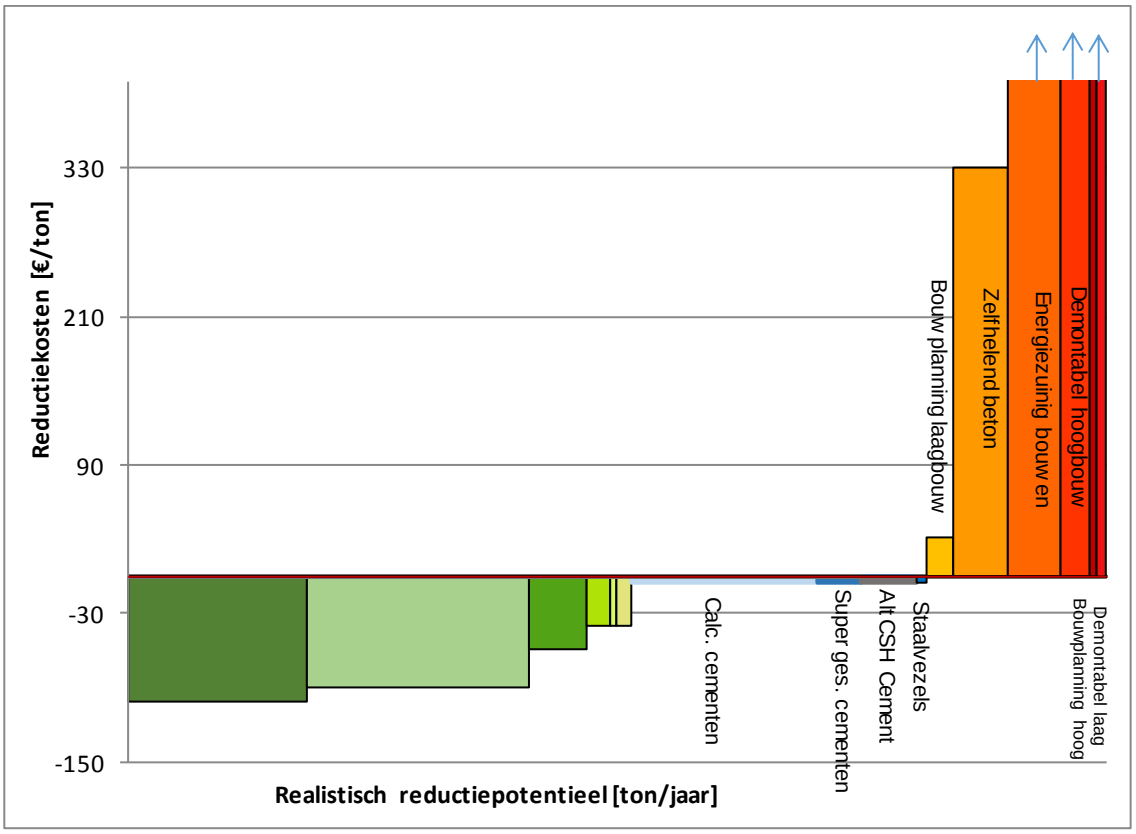
De opties zijn samengevat in Tabel 1.

Tabel 1 **Overzicht van 17 opties voor de verduurzaming van de betonketen op de middellange termijn**

Categorie	Nummer	Verduurzamingsoptie
Verandering van de betonsamenstelling	1	Optimaliseren korrelverdeling
	2	CEM X fractie toestaan
	3	Calcium sulpho-aluminaat cementen
	4	Super gesulfateerde cementen
	5	Alternatief CSH Cement
	6	Inzet van Geopolymeer
Hoogwaardigere recycling van beton	7	Bouwen met demontabele standaard eenheden
	8	Slim breken
	9	REKO thermische activering/kringbouw
	10	Inzet bodemas
Andere wapeningsmethode	11	Inzet staalvezels in plaats van traditionele wapening
Aanpassen bouwproces	12	langere uithardingstijd voor betonproducten
	13	Langere uithardingstijd door bouwplanning
	14	Beperken overdimensionering in ontwerpfase
Langere levensduur van betonnen producten	15	Langere levensduur door flexibel ontwerp
	16	Zelfhelend beton
Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase	17	Energiezuinige gebouwen

Centraal in de kostencurve staan het reductiepotentieel en de reductiekosten. Het technisch reductiepotentieel is het technisch potentieel om CO_2 te reduceren. op basis hiervan is een realistisch reductiepotentieel berekend door te corrigeren voor technische, organisatorische en financiële barrières zoals ruw ingeschat met het implementatiepotentieel. De kostencurve met het realistisch reductiepotentieel is weergegeven in Figuur 1.
De reductiekosten zijn de kosten die gemaakt moeten worden om de emissie van een ton CO_2 te voorkomen uitgedrukt in euro per ton CO_2.

Figuur 1 **Kostencurve met realistisch reductiepotentieel**



Bij optie 7 en 13 is onderscheid gemaakt tussen toepassing op laagbouw en hoogbouw dit is aangegeven met de extensie laag en hoog.

Uit de kostencurve blijkt dat:

1. De opties 1 tot en met 6, 8 t/m 11 verduurzamingsopties kostenneutraal of zelfs tegen een licht kostenvoordeel gerealiseerd kunnen worden.
2. Optie 13 in de laagbouw tegen een beperkte meerprijs gerealiseerd kan worden.
3. Opties 16, 13 (in hoogbouw), 7 en 17 tegen aanzienlijke meerkosten gerealiseerd kunnen worden.

Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de variatie in optie 16 zeer groot is over het bereik van realistische aannames en bovendien een belangrijke kostenpost niet meegenomen kon worden bij de berekening van de reductie-kosten van optie 16.
Daarom verwachten wij dat optie 16 voor een groot aantal toepassingen negatieve of neutrale reductiekosten mogelijk maakt.

Van de opties met de laagste reductiekosten is zowel het reductiepotentieel als het gecorrigeerde reductiepotentieel het hoogst voor optie 1, optie 3 tot en met 6, optie 8 en optie 11.

Voor de opties 12, 14 en 15 bleek onvoldoende kwantitatieve gegevens beschikbaar om opgenomen te worden in de kostencurve. Dit wil niet zeggen dat ontwerpopties geen rol hebben bij het verduurzamen van het beton, alleen dat er op dit moment nog geen informatie beschikbaar is op basis waarvan een kwantitatieve inschatting van het reductiepotentieel gegeven kan worden.

1 Inleiding

Rijkswaterstaat heeft CE Delft verzocht om te ondersteunen bij het opstellen van een kostencurve voor de middellange termijn handelingsperspectieven voor de verduurzaming van de betonketen.

1.1 Aanleiding

In oktober 2011 is de Green Deal Beton gesloten tussen de ministeries van EZ en I&M en 24 deelnemende bedrijven en 7 brancheorganisaties uit de betonketen. De betrokken bedrijven en brancheorganisaties werken samen onder de vlag van MVO Nederland in het Netwerk Beton. Rijkswaterstaat is opdrachtgever voor dit onderzoek als deelnemer aan het Netwerk Beton, vanuit zijn rol in de Green Deal Beton.

Het Netwerk Beton heeft al eerste stappen gezet in de verduurzaming van de betonketen. Op de middellange termijn worden verdergaande verbeteringen wenselijk geacht.

Vanuit verschillende kanten zijn er verduurzamingsopties geopperd voor de branche. Een voorbeeld is de verkenning van CE Delft (CE Delft, 2013) naar de milieukundige aspecten van betonketen en verduurzamingsopties daarin. Om te zorgen dat er nu ook daadwerkelijk stappen gezet worden om een aantal van deze opties branchebreed te realiseren, is het nodig dat er een top tien van handelings-perspectieven is. Hiermee kan het Netwerk Beton concreet aan de slag.

Om dit te doen zijn achtereenvolgens de volgende stappen doorlopen:
Ten eerste is uit een groep van meer dan 70 opties een selectie gemaakt van circa 35 opties. Uit deze opties heeft de begeleidingscommissie tijdens een workshop een selectie gemaakt. In samenwerking met leden van de begeleidingscommissie heeft CE Delft daar een lijst van 17 opties uit opgesteld.

Voor het opstellen van een top tien van handelingsperspectieven, die door het hele Netwerk Beton gedragen wordt, is het nodig om inzicht te krijgen in de kosten van de 17 opties. Hiermee kunnen deze handelingsperspectieven worden uitgewerkt tot het niveau dat er business cases van gemaakt kunnen worden.

1.2 Doel project

Het doel van het project is om een kostencurve op te stellen voor de 17 opties voor de middellange termijn om de betonketen te verduurzamen.

Deze kostencurve wordt 26 september 2013 gepresenteerd aan het Platform-overleg, dat op basis van deze kostencurve de 10 prioritaire handelings-perspectieven kiest. In een vervolgproject worden deze 10 handelings-perspectieven zover uitgewerkt dat ze als basis kunnen dienen voor de middellange termijn doelstellingen voor de Green Deal Beton in de vorm van de overeenkomst ‘Concreet 2.0’.

1.3 Leeswijzer

De opzet van dit rapport is als volgt:
In Hoofdstuk 2 bepalen we de duurzaamheidsopties waarvan de reductiekosten en het besparingspotentieel onderzocht worden. Hiervoor is het nodig dat de duurzaamheidsopties geformuleerd worden op een manier die kwantificatie van het reductiepotentieel en de daarvoor benodigde procesaanpassingen mogelijk maken. Per maatregel staat in bijlage B de volgende aspecten beschreven:

- het werkingsprincipe is van deze maatregel (Hoe draagt deze maatregel bij aan CO_2-emissiereductie in de betonketen?);
- de reductiekosten (hoeveel kost het om op deze manier een ton CO_2 te besparen?);
- het reductiepotentieel (hoeveel CO_2-emissie kan er op deze manier voorkomen worden per jaar, uitgaande van de productie van 2010 als referentiejaar?).

In Hoofdstuk 3 presenteren we de kostencurve:

- Wat zijn de reductiekosten?
- Wat is het reductiepotentieel?
- Wat is het implementatiepotentieel? Dat wil zeggen in welke mate zijn er nog barrières te nemen voordat het reductiepotentieel daadwerkelijk gerealiseerd wordt?
- Hoe gevoelig zijn de gepresenteerde gegevens voor variaties in parameters?

In Hoofdstuk 4 trekken we conclusies en doen we aanbevelingen.

2 Duurzaamheidsopties

Bij de start van deze studie was er sprake van en groot aantal opties (maatregelen), deze opties zijn beperkt en verder gespecificeerd om een kwantitatieve uitspraak over emissies mogelijk te maken. In dit hoofdstuk zijn de opties beschreven.

2.1 Selectieproces

In de voorbereidende fase zijn meer dan 70 opties geïdentificeerd. Na een eerste selectie zijn 35 opties overgebleven (bijlage A). Tijdens de workshop met de begeleidingscommissie begin juni 2013 is uit deze lijst een selectie gemaakt van 17 opties. Deze opties worden in de volgende paragraaf beschreven.

Deze opties zijn geselecteerd op basis van de ervaring en expertise van de deelnemers. Hierbij is met name gekeken naar innovativiteit, reductie-potentieel, mate waarin er naar verwachting kwantitatieve gegevens beschikbaar zouden kunnen zijn over deze opties.

2.2 Geselecteerde verduurzamingsopties

De geselecteerde verduurzamingsopties zijn weergegeven in Tabel 2.

De opties zijn grofweg onder te verdelen in vijf categorieën:
1. Verandering van de betonsamenstelling.
2. Hoogwaardigere recycling van beton.
3. Andere wapeningsmethode.
4. Aanpassen bouwproces.
5. Langere levensduur van betonnen producten.
6. Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase.

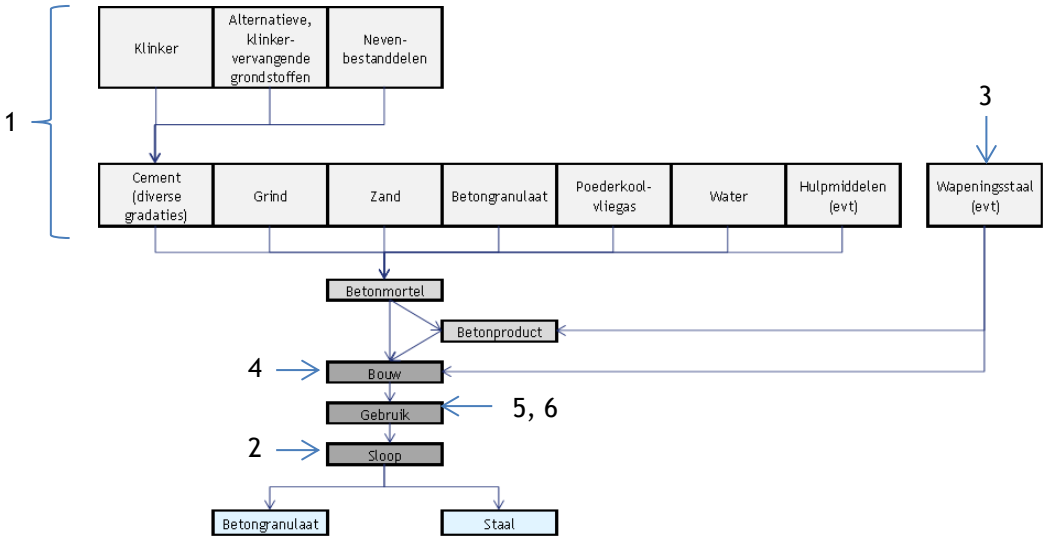
Tabel 2 Overzicht van 17 opties voor de verduurzaming van de betonketen op de middellange termijn

Categorie	Nummer	Verduurzamingsoptie
Verandering van de betonsamenstelling	1	Optimaliseren korrelverdeling
	2	CEM X fractie toestaan
	3	Calcium sulpho-aluminaat cementen
	4	Super gesulfateerde cementen
	5	Alternatief CSH Cement
	6	Alkalisch geactiveerde vliegas/slak systemen (Geopolymeer)
Hoogwaardigere recycling van beton	7	Bouwen met demontabele standaard eenheden
	8	Slim breken
	9	REKO thermische activering/kringbouw
	10	Inzet bodemas
Andere wapeningsmethode	11	Inzet staalvezels in plaats van traditionele wapening

Categorie	Nummer	Verduurzamingsoptie
Aanpassen bouwproces	12	Langere uithardingstijd mogelijk maken door opslagcapaciteit (betonproducten)
	13	Lange uithardingstijd door bouwplanning
	14	Beperken overdimensionering in ontwerpfase
Langere levensduur van betonnen producten	15	Langere levensduur van betonnen gebouwen door flexibel ontwerp
	16	Zelfhelend beton
Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase	17	Energiezuinige gebouwen

In Figuur 2 is weergegeven waar de verschillende categorieën ingrijpen in de levenscyclus van het beton.

Figuur 2 **Schematische weergave van de levenscyclus van beton en zijn ingrediënten**



Bron: Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw (CE Delft, 2013).

In de volgende paragraaf zal per categorie aangegeven worden om welke verduurzamingsopties het gaat en waarom deze verduurzamingsopties de CO_2-emissie over de levenscyclus van het beton kunnen verminderen. In bijlage B wordt het werkingsprincipe, de reductiekosten en het reductie-potentieel per verduurzamingsoptie verder uitgewerkt.

2.2.1 Verandering van de betonsamenstelling

Verduurzamingsoptie 1 tot en met 6 betreffen de samenstelling van het beton[1]. Bij de productie van beton komen CO_2-emissies vrij.

Om te begrijpen hoe veranderingen aan de betonsamenstelling CO_2-emissies kunnen reduceren gaan we nader in op de productie van beton.

[1] Bij maatregel 8 tot en met 10 is dit indirect het geval. Deze maatregelen vallen in de categorie hoogwaardige recycling.

Beton is een mengsel van verschillende bestanddelen. De klassieke bestanddelen zijn cement, grind, zand en water en tegenwoordig worden ook betongranulaat, poederkoolvliegas, en chemische toevoegingen de zogenoemde hulpmiddelen toegevoegd (zie Figuur 2).
Een belangrijk onderdeel van beton is cement. Cement zorgt voor de binding tussen de verschillende ingrediënten van beton en is daarmee cruciaal voor de sterkte van het beton. Van oudsher is Portland klinker een belangrijk onderdeel van cement. De productie van Portlandklinker is heel energie-intensief. Daar komt nog bij dat CO_2 wordt afgescheiden in het chemische proces dat nodig is om van kalk en silicaten Portlandklinker te maken. Hierdoor heeft de productie van Portland klinker een grote klimaatimpact. Zo groot dat de CO_2-emissie door de productie van ongewapend beton bijna volledig bepaald wordt door de hoeveelheid Portland klinker die gebruikt wordt.
Er worden in Nederland een groot aantal cementen verkocht, afhankelijk van de toepassing varieert de samenstelling en het aandeel Portland klinker. Voor de overzichtelijkheid wordt in overzichtstudies deze variatie teruggebracht tot twee soorten cement:

1. Portland cementen, ook wel CEM I cementen genoemd met een aandeel Portland klinker van 90% of meer. De CO_2-emissie die vrijkomt bij de productie van dit type cement is circa 0,9 ton CO_2/ton cement.
2. Laag klinker gehalte cement, ook wel Hoogovencement of CEM III cementen genoemd waarin het cement voor circa 30% uit Portlandklinker bestaat en voor circa 70% uit Hoogovenslak. De CO_2-emissie die vrijkomt bij de productie van dit type cement is circa 0,3 ton CO_2/ton cement.

Door de hoeveelheid Portland klinker in het beton te verminderen kan de CO_2-emissie door de productie van beton afnemen. Er zijn 3 manieren geïdentificeerd waardoor op de middellange termijn de hoeveelheid Portlandklinker in betontoepassingen verminderd of geheel tot nul gereduceerd kan worden zonder de sterkte van het beton in gevaar te brengen.

1. Optimalisatie van de pakkingsdichtheid van de deeltjes in het beton door het aanpassen van de deeltjesgrootteverdeling van het beton zonder aanpassingen te maken aan de chemische interactie tussen de deeltjes. Hierdoor wordt het beton sterker zonder dat er meer chemische bindingen gevormd worden. Als het beton even sterk mag blijven kan het dus toe met minder chemische bindingen en kan dus het aandeel cement omlaag in het beton. Dit is het werkingsprincipe achter optie 1.
2. Inzet van vulstoffen met bindcapaciteit, anders dan hoogovenslak, om het de bindende eigenschap van cement gelijk te houden bij afnemende hoeveelheid Portlandklinker. Dit is het werkingsprincipe achter optie 2[2].
3. Ontwikkeling van een alternatief bindsysteem dat dezelfde werking heeft als Portlandklinker maar bij geen of veel lagere CO_2-emissie. Dit is het werkingsprincipe achter optie 3 tot en met 6[3].

[2] Indirect bepalend voor het reductiepotentieel van optie 8 en 9. Deze opties vallen binnen de categorie hoogwaardige recycling.

[3] Indirect bepalend voor het reductiepotentieel van optie 10. Deze optie valt binnen de categorie hoogwaardige recycling.

2.2.2 Hoogwaardigere recycling van beton

Zoals hierboven beschreven is de productie van (gewapend) beton zeer energie intensief. Het is dus van belang om zoveel mogelijk te zorgen dat oud beton weer als grondstof kunt gebruikt kan worden.
De meest hoogwaardige manier om dat te doen is door betonnen constructies te hergebruiken in hun oorspronkelijke vorm. Hierdoor hoeft er geen nieuw beton gemaakt te worden en wordt een betonnen element, bijvoorbeeld een vloer uit het ene gebouw gehaald om in het volgende bouw geïnstalleerd te worden. Dit is het werkingsprincipe van optie 7.

Als hergebruik niet mogelijk is, is het van belang om zo te slopen dat de stromen die daarbij vrijkomen van eenzelfde kwaliteit zijn als de grondstof-stromen bij de productie van het beton. Dit is het uitgangspunt van Cradle to cradle en het idee achter optie 8 en 9.
Zowel verduurzamingsoptie 8 als 9 richten zich op het uit een halen van beton in zand, grind en een cement fractie. Bij optie 8 gebeurt dit mechanisch door alleen de cementfractie te breken waardoor zand en grind ongeschonden teruggewonnen kunnen worden, waarna de cementfractie gereactiveerd wordt door verhitting tot circa 600 graden. Bij optie 9 wordt het hele beton verhit tot circa 600 graden waarna het beton makkelijk uit elkaar gehaald kan worden in een zand, grind en fijne fractie.

Daarnaast is er de optie om afvalstoffen uit andere industriële processen in te zetten bij de productie van cement. Dit gebeurt al op grote schaal met vliegassen, maar het zou ook kunnen door inzet van bodemassen van afvalenergiecentrales. Dat is het werkingsprincipe van verduurzamings-optie 10.

2.2.3 Andere wapeningsmethode

Beton kan heel goed tegen drukkrachten, maar is niet zo goed bestand tegen trekkrachten. Daarom worden betonnen constructies waarop veel trekkrachten kunnen komen te staan versterkt met een soort stalengeraamte, de zogenoemde wapening. Omdat er veel energie nodig is bij de productie van staal is de CO_2-emissie bij de productie van staal vrij hoog. Door wapenings-staal te vervangen door staalvezels, kan minder staal worden toegevoegd, omdat de staalvezels beter verdeeld kunnen worden. Hierdoor kan eenzelfde treksterkte belasting mogelijk gemaakt worden met minder staal en dus bij een lagere CO_2-emissie. Dit is het werkingsprincipe achter verduurzamings-optie 11.[4]

2.2.4 Aanpassen bouwproces

Het bouwproces kan op twee manieren aangepast worden:

1. Verminderen van de hoeveelheid klinker die nodig is voor het halen van de benodigde initiële sterkte. Beton is een dynamisch materiaal waarvan de sterkte nog lange tijd nadat het gegoten is toeneemt. In veel gevallen wordt de hoeveelheid cement in het beton bepaald door de snelheid waarmee het beton belast moet kunnen worden. Meestal is de eerste belasting het moment dat het beton uit de bekisting gehaald wordt waarin het gegoten wordt. Door 24 uur langer te wachten voordat het beton ontkist wordt kan met minder cement hetzelfde resultaat gehaal worden. Zoals uitgelegd in Paragraaf 2.2.1 betekent minder cement minder Portland klinker en dus minder CO_2-emissie. Dit is het werkingsprincipe achter verduurzamingsopties 12 en 13.

[4] Echter staalvezels kunnen niet gerecycled worden met reguliere sloopmethodes, maar wel door toepassen van optie 8.

2. Verminderen van de hoeveelheid beton die nodig is in de betonnen constructie, door slim te ontwerpen. Gezien de hoge CO_2-emissie die gerelateerd is aan de productie van beton is vermindering van de benodigde hoeveelheid in een betonnen constructie CO_2-reductie kan ook worden bereikt door minder beton toe te passen (optie 14).

2.2.5 Langere levensduur van betonnen producten

Als de levensduur van een betonnen constructie verlengd kan worden dan zijn er geen CO_2-emissies vanwege sloop en de productie van nieuw beton om de oude betonnen constructie te vervangen. Omdat de emissies die optreden tijdens de productie van een betonnen constructie vele malen groter zijn dan de emissies die in latere fasen van de levensduur van het beton gemaakt worden, is het vanuit het oogpunt van terugdringen van CO_2-emissies vaak raadzaam om de levensduur van een betonnen constructie te verlengen in plaats van te vervangen door een nieuwe betonnen constructie.

Er zijn verschillende manieren om dit te doen:

1. Door bij het ontwerp rekening te houden met mogelijke verandering van functie van het gebruik van het gebouw. Hierbij moet gedacht worden aan voldoende grote overspanningen zodat ruimtes naar behoefte opgedeeld kunnen worden, voldoende hoge plafonds zodat eventuele nieuwe installaties in de toekomst onder een eventuele dekvloer weggewerkt kunnen worden, maar ook voldoende sterke constructie zodat er nog één of meerdere verdiepingen of een daktuin aan het gebouw toegevoegd kunnen worden. Dit is het werkingsprincipe van optie 15.
2. Door het aanpassen van de betonsamenstelling waardoor het beton zelf in stat is om kleine scheurtjes te repareren, waardoor er niet alleen een langere levensduur van met name constructies zoals tunnels en bruggen (GWW en civielbeton) verwacht wordt, maar ook een reductie in het onderhoud. Dit is het werkingsprincipe van optie 16.

2.2.6 Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase

In het geval van een woning wordt er in de gebruiksfase door de bewoners over het algemeen vele male meer energie gebruikt dan vrijkomt over de levens-cyclus van de individuele materialen waaruit een huis is opgebouwd. Als het beton zou kunnen bijdragen aan het verlagen van het energiegebruik in de gebruiksfase zou dat veel meer effect hebben op de CO_2-emissie dan het aanpassen van de samenstelling van het beton. Dit is het werkingsprincipe achter optie 17[5].

2.3 Samenvatting

Er zijn 17 verschillende maatregelen onderzocht om de CO_2-emissie van beton te reduceren, zie Tabel 2. In dit hoofdstuk zijn 17 verduurzamingsopties die onderzocht zijn genoemd en is hun werkingsprincipe op hoofdlijnen beschreven. De werkingsprincipes zijn te categoriseren als:

1. Verandering van de betonsamenstelling, opties 1 tot en met 6.
2. Hoogwaardigere recycling van beton, opties 7 tot en met 10.
3. Andere wapeningsmethode, optie 11.
4. Aanpassen bouwproces, opties 12, 13 en 14.
5. Langere levensduur van betonnen producten, optie 15 en 16.

[5] Hierbij moet wel gezegd worden dat de besparing in optie 17 niet van het beton komt maar van de installatie waaraan het beton gekoppeld is. Beton is geen isolator en ook geen energieopwekker en kan daarmee nooit zelfstandig bijdragen aan het verlagen van het energiegebruik van een woning.

6. Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase, optie 17.

In bijlage B is per optie het werkingsprincipe in meer detail beschreven. Deze verduurzamingsopties verschillen in kosten en reductiepotentieel.
In Hoofdstuk 3 zijn de kosten en het reductiepotentieel per optie in de kostencurve weergegeven.

3 Kostencurve

In het vorige hoofdstuk zijn de 17 verduurzamingsopties gepresenteerd en is hun werkingsprincipe op hoofdlijnen uitgelegd. In dit hoofdstuk concentreren we ons op het CO_2-emissiereductiepotentieel van deze maatregelen en de kosten waarmee dit reductiepotentieel gepaard gaat. Het reductiepotentieel en de bijbehorende reductiekosten zijn voor de 17 verduurzamingsopties weergegeven in een kostencurve. In dit hoofdstuk presenteren en analyseren we de kostencurve. In bijlage B is per optie gedetailleerd beschreven hoe de reductiekosten en het reductiepotentieel zijn bepaald.

3.1 Aanpak en uitgangspunten

Het reductiepotentieel en reductiekosten zijn deels gebaseerd op openbare informatie en deels op (confidentiële) praktijkinformatie beschikbaar gesteld door de deelnemers van de begeleidingscommissie. De aangeleverde informatie door de deelnemers is kritisch beoordeeld door CE Delft. Daarbij is de informatie getoetst op basis van aanvullende literatuur, externe expertise en expertise binnen CE Delft.

Het uitgangspunt in deze analyse is het reductiepotentieel als de maatregelen in het jaar 2020 worden toegepast ten opzichte van het business as usual scenario. Het business as usual scenario gaat ervan uit dat de maatregelen niet worden toegepast en het beton in de huidige samenstelling en volgens de huidige bouwprocessen wordt gebruikt. Hierbij gaan we ervan uit dat in 2020 dezelfde bouwvolumes worden toegepast als in het jaar 2010.

Het CO_2-emissiereductiepotentieel geldt voor de gehele levensduur van het beton. Toch is de emissie uitgedrukt in kiloton CO_2-emissie per jaar (kton/jaar), omdat we ervan uitgaan dat verduurzamingsopties tot in de lengte der jaren toegepast blijven worden en dat ieder jaar een vergelijkbaar bouwvolume gerealiseerd wordt als in 2010[6]. Aangezien in 2010 relatief weinig is gebouwd, is dat een conservatieve inschatting.
Het gaat hierbij om het technische reductiepotentieel. De daadwerkelijk toegepaste hoeveelheid is mede afhankelijk van factoren zoals markt-omstandigheden (CO_2-prijs), wet- en regelgeving, overheidsbeleid, normprocedures, etc. Dit effect is kwalitatief beschreven per optie en daarna vertaald in een laag, middelmatig of hoog implementatiepotentieel. Aan deze verschillende implementatiepotentiëlen zijn correctiefactoren toegekend, waardoor een realistisch reductiepotentieel berekend kon worden waarin de invloed van deze factoren in zekere mate is meegenomen. Het verschil tussen het technisch reductiepotentieel en het realistisch reductiepotentieel is een maat voor de verwachte gevoeligheid voor bovengenoemde factoren.

De kosten van de milieumaatregelen zijn uitgedrukt in € per ton CO_2-reductie en bepaald vanuit het perspectief van de gehele keten. Belangrijk uitgangs-punt bij de bepaling van de kosten is de marktprijs. Als bijvoorbeeld cement in beton wordt vervangen door een bestanddeel met een lagere marktprijs, zijn de reductiekosten bepaald op basis van het verschil tussen de marktprijs van

[6] Uitzondering op deze aanname is optie 17 waarin het reductiepotentieel alleen in de periode 2015-2020 toegepast kan worden.

het cement en het vervangende bestanddeel. In de praktijk kan het daadwerkelijke kostenverschil afwijken, omdat de winstmarges (verschil kostenprijs en marktprijs) tussen de bestanddelen kunnen verschillen. Omdat het gaat om een vrije markt, hanteren we de aanname dat de winstmarges per product vergelijkbaar zijn, en de verschillen in marktprijzen representatief zijn voor de verschillen in kostprijs.

De marktprijzen zijn door de leden van de klankbordgroep individueel verstrekt aan CE Delft. Deze prijzen zijn door CE Delft gemiddeld, zodat niet herleidbaar is wie van de leden welke prijs hanteert. De marktprijzen zijn weergegeven in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** in bijlage B.

3.2 Kostencurve

De kostencurve is weergegeven in Figuur 3.

3.2.1 Technisch Reductiepotentieel

Horizontaal in Figuur 3 staat per optie het CO_2-emissiereductiepotentieel weergegeven in kton/jaar. De breedte van de kolom is een indicatie van het CO_2-emissiereductiepotentieel. Hoe breder de kolom hoe meer CO_2-emissie voorkomen kan worden door invoering van de betreffende optie.

De verduurzamingsoptie met verreweg het grootste reductiepotentieel is optie 8 (slim breken) met 1.440 kton/jaar een factor twee groter dan de op één na grootste. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat dit reductiepotentieel alleen gerealiseerd kan worden als de cementfractie die bij slim breken grootschalig ingezet kan worden bij de productie van CSH cement.
Dat betekent dus dat het reductiepotentieel (en de reductiekosten) van slim breken niet los gezien kunnen worden van het grootschalig invoeren van CSH cement. Het reductiepotentieel van slim breken is veel groter dan dat van alternatief CSH cement omdat de benodigde beliet fractie voor alternatief CSH cement via slim breken bij een veel lagere CO_2-emissie verkregen kan worden dan uit virgin grondstoffen zoals bij de berekening van het reductiepotentieel van alternatief CSH cement is gebruikt.

Alle andere opties met een hoog reductiepotentieel zijn de alternatieve bindersystemen (optie 3 t/m 6) en de energiezuinige woningen (optie 17). Dit is weer te verklaren uit de relatief grote CO_2-winst per ton beton en de grote schaal waarop deze opties doorwerken.

3.2.2 Reductiekosten

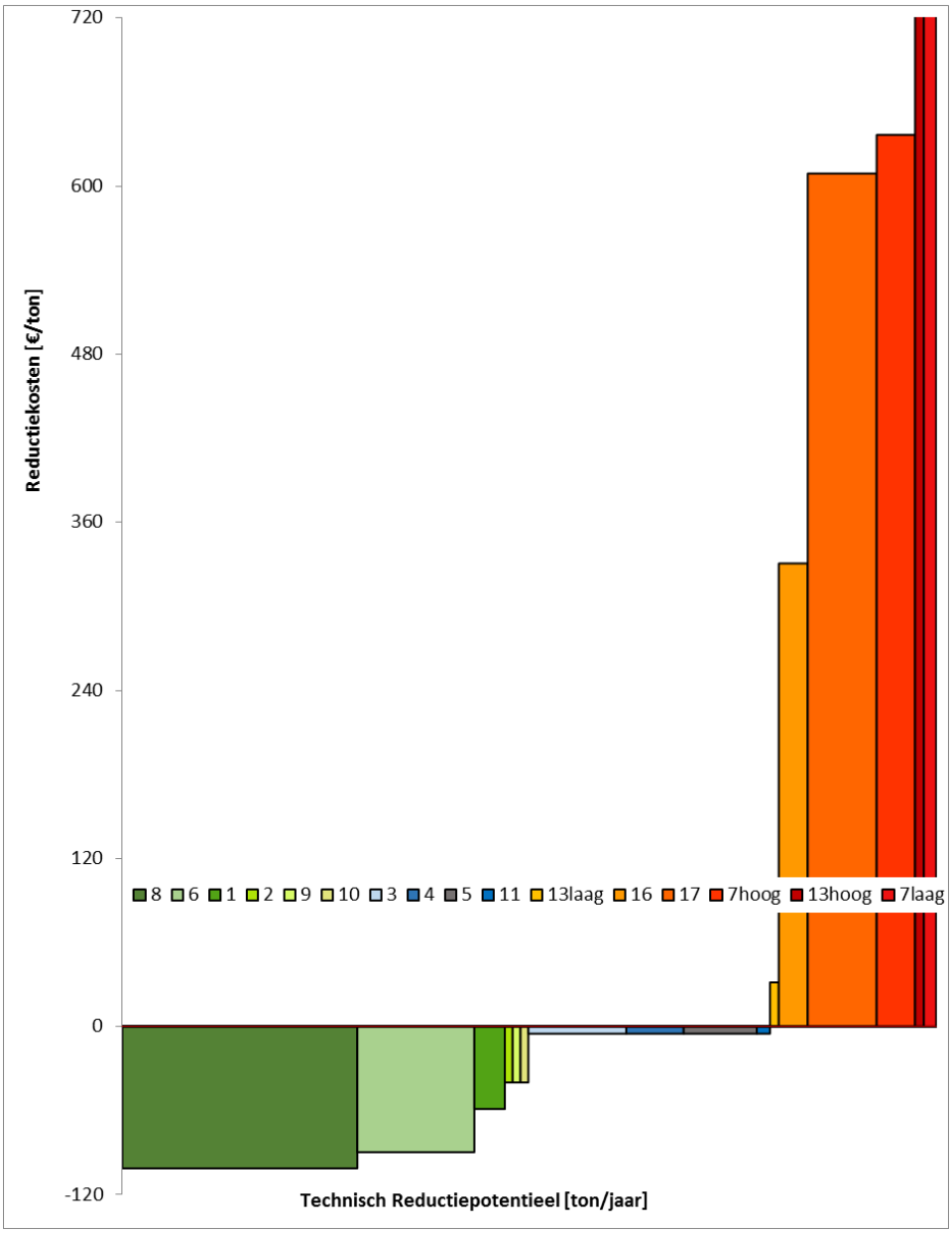
Verticaal staan in Figuur 3 de reductiekosten weergegeven. De reductiekosten zijn de kosten die gemaakt moeten worden om de emissie van een ton CO_2 te voorkomen.

Figuur 3 laat zien dat de reductiekosten grofweg in vier groepen verdeeld kunnen worden:

- negatieve reductiekosten, als de betreffende verduurzamingsoptie toegepast wordt, wordt er niet alleen CO_2-emissies voorkomen, maar er ook geld bespaard wordt;
- reductiekosten 0, als de betreffende verduurzamingsopties toegepast worden, wordt er CO_2 bespaard zonder dat er sprake is van meerkosten;
- reductiekosten van 0-50 €/ton CO_2, de betreffende verduurzamingsopties zijn afhankelijk van de CO_2-emissiehandelsprijs rendabel;
- hoge CO_2-reductiekosten van >600 €/ton.

Nadere beschouwing van de opties met hoge CO_2-reductiekosten laat zien dat het hier gaat om opties waarbij de manier van werken in het bouwproces aangepast moet worden. In de meeste gevallenis de te behalen winst beperkt terwijl de kosten flink doortikken. Uitzondering is de langere uithardingstijd in de laagbouw die ingeschat tussen de 0 en 68 €/ton (gemiddeld 32 €/ton). Dit komt omdat er een aanzienlijke CO_2-reductie van 36% te behalen is bij het langer laten uitharden van cement bij beperkte meerkosten zolang het in laagbouw gebeurt en vooraf voorzien is.

Figuur 3 **Kostencurve op basis van 17 verduurzamingsopties van de levenscyclus van beton**



Bij optie 7 en 13 is onderscheid gemaakt tussen toepassing op laagbouw en hoogbouw dit is aangegeven met de extensie laag en hoog.
De reductiekosten zijn het laagst bij manieren om slim te slopen: slim breken en kringbouw/REKO-concept en bij het vervangen van cement door vliegas of bodemas.

In al deze gevallen is er sprake van dat een goedkope grondstof kan zorgen voor vermindering van de benodigde hoeveelheid cement. Bij het toestaan van de CEM X fractie (optie 2) wordt een gedeelte van cement vervangen door vliegas. Vliegas is een vulmiddel met bindcapaciteit. De berekening van het reductiepotentieel en de reductiekosten van de Kringbouw/REKO-optie (optie 8) en de bodemas optie (optie 9) is gebaseerd op testen waaruit blijkt dat bodemas en de fijne fractie die vrijkomt bij het Kringbouw/REKO-proces vergelijkbare eigenschappen hebben als vulmiddel met bindcapaciteit als vliegas. Daarom zijn voor optie 2, 9 en 10 het reductiepotentieel en de reductiekosten gelijk.
Voor slim breken (optie 8) zijn de reductiekosten lager omdat de fijne fractie die vrijkomt bij slim breken veel beliet bevat en in tegenstelling tot de fijne fractie bij het Kringbouw/REKO-concept slechts een beperkte hoeveelheid silica. Daarmee is de fijne fractie van slim breken waarschijnlijk geschikt als grondstof voor alternatief CSH cement (optie 3). Bij gebruik van deze fijne fractie als grondstof voor alternatief CSH cement is de CO_2-emissiereductie per ton beton zeer groot, tegen lagere kosten.

3.2.3 Realistsch Reductiepotentieel door correctie voor implementatie-potentieel

Het technisch reductiepotentieel is het technisch potentieel als we geen rekening hoeven te houden met barrières zoals investeringen, norm-procedures, technische obstakels, etc.
In werkelijkheid zijn er natuurlijk wel dat soort barrières en zijn ze voor de ene verduurzamingsoptie hoger dan voor de andere. In een vervolgproject zullen alle knelpunten per verduurzamingsoptie en de mate waar daar oplossingen voor zijn in kaart gebracht worden. Nu beperken we ons tot een eerste indicatie van deze knelpunten.
We onderscheiden daarbij drie soorten barrières:

1. Technische ontwikkeling die nog nodig is voordat de betreffende optie in de praktijk toegepast kan worden.
2. Organisatorische aspecten: benodigde opleiding van betrokkenen, normprocedures die doorlopen moeten worden.
3. Financiering die nodig is voor realisatie van bijvoorbeeld nieuwe installaties. Hierbij wordt de hoogte van de reductiekosten expliciet buiten beschouwing gelaten omdat die anders twee maal meegewogen zou worden.

Van iedere optie is ingeschat per type barrière of het implementatiepotentieel laag, middelmatig of hoog was. Het laagste implementatiepotentieel was bepalend voor het eindoordeel over het implementatie potentieel.

Om een indicatie te hebben hoe dit implementatiepotentieel het reductiepotentieel zou kunnen beïnvloeden is gecorrigeerd met de factoren zoals weergegeven in Tabel 3.

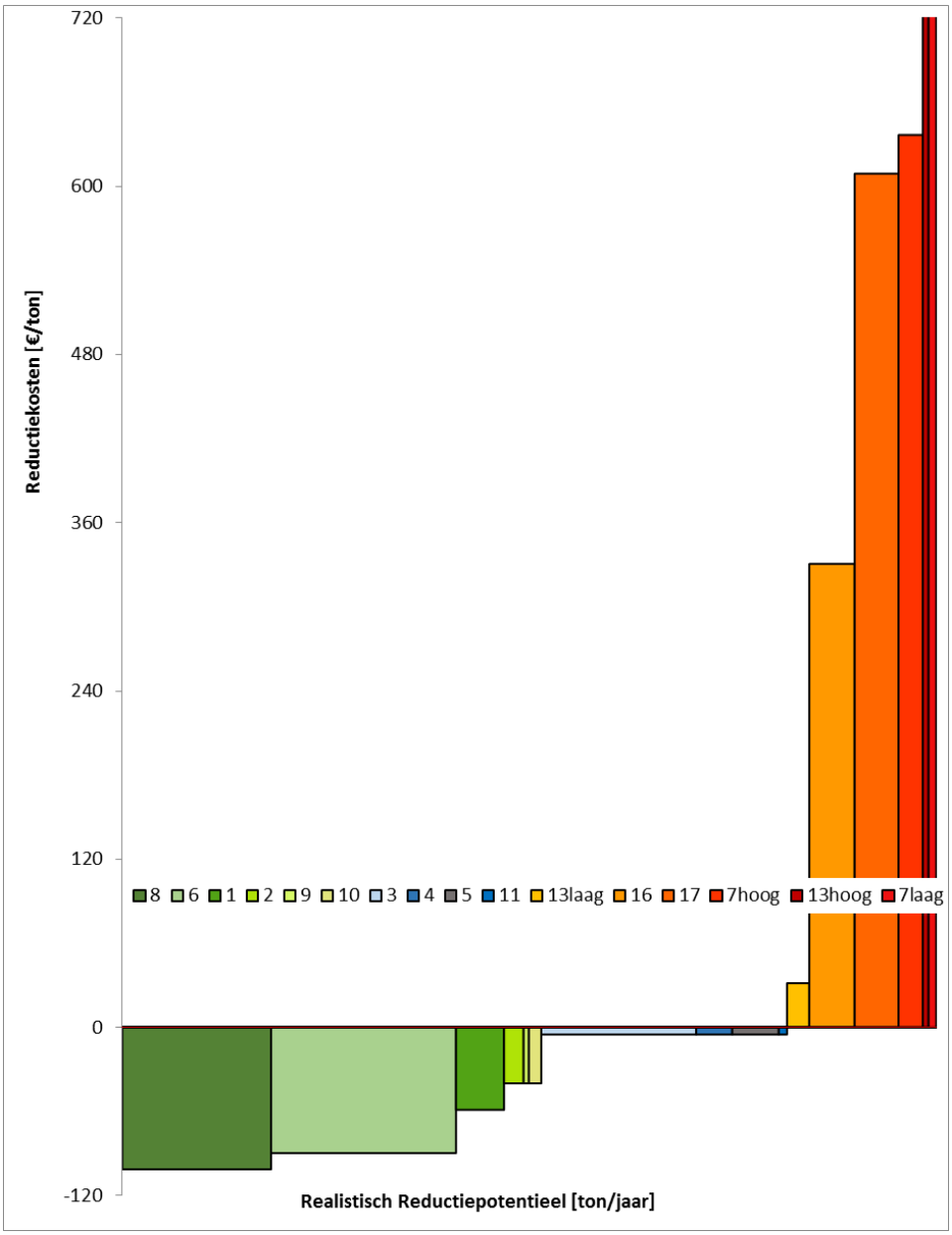
Tabel 3 Reductiepotentieel, reductiekosten, implementatiepotentieel en correctiefactoren

Maatregel	Technisch CO_2-reductiepotentieel (kton/jaar)	CO_2-reductie-kosten (€/ton CO_2)	Implementatie-potentieel	Correctie-factor	Realistisch reductie-potentieel kton/jaar
1	187	-59	Middelmatig	0,5	93
2	48	-40	Hoog	0,8	38
3	600	0	Middelmatig	0,5	300
4	352	0	Laag	0,2	70
5	448	0	Laag	0,2	90
6	717	0	Middelmatig	0,5	358
7 laag	76	1.046	Laag	0,2	15
7 hoog	235	637	Laag	0,2	47
8	1.440	-101	Laag	0,2	288
9	48	-40	Laag	0,2	10
10	48	-40	Middelmatig	0,5	24
11	81	0	Laag	0,2	16
13 laag	54	32	Hoog	0,8	43
13 hoog	54	1.030	Laag	0,2	11
16			Middelmatig	0,5	0
17	423	609	Laag	0,2	85

Gebruikmakend van deze factoren zijn realistische reductiepotentiëlen berekend zoals weergegeven in Tabel 3.
Gebruikmakend van deze factoren is een realistische kostencurve opgesteld, zie Figuur 4.

Het reductiepotentieel van de drie opties met het hoogste reductiepotentieel van 600-1.440 kton/jaar is gedaald tot 288-358 kton/jaar. Waarbij de grootste afname te zien was bij optie 8 van 1.440 naar 288 kton/jaar. Niettemin is optie 8 nog steeds één van de top drie opties als het gaat om reductie-potentieel.

Figuur 4 Kostencurve met realistisch reductiepotentieel



Bij optie 7 en 13 is onderscheid gemaakt tussen toepassing op laagbouw en hoogbouw dit is aangegeven met de extensie laag en hoog.

3.3 Gevoeligheidsanalyse

De reductiekosten curves zijn opgesteld op basis van beperkt beschikbare informatie in een korte tijd, daarnaast gaat het bij veel opties om innovatieve technologie die nog niet grootschalig commercieel toegepast wordt. Er zit daarom een onzekerheidsmarge op zowel de ingeschatte reductiekosten als op het technische en het realistische reductiepotentieel. Daarnaast is er sprake van een zekere mate van overlap of zelfs samenhang tussen de reductiekosten en het reductiepotentieel van de opties. Hieronder zullen we de onzekerheid op deze cijfers toelichten.

3.3.1 Gevoeligheid voortkomend uit de methodiek

Voor alle resultaten geldt dat in deze fase van het onderzoek de reductiekosten en het reductiepotentieel als een indicatie moet worden gezien. We gaan ervan uit dat de gepresenteerde getallen een goede indicatie geven van hoe de reductiepotentiëlen en de reductiekosten zich onderling verhouden. Het is echter nog veel te vroeg in het proces om iets te kunnen zeggen over de daadwerkelijke CO_2-reductie in 2020. Bovendien hangt dat in grote mate af van de maatregelen die het MVO Netwerk Beton neemt naar aanleiding van dit project en het vervolg project waaruit de maatregelen voor concreet 2.0 uit moeten voortkomen.

Reductiekosten

De reductiekosten zijn ingeschat op basis van marktkosten en de waarschijnlijkheid dat deze hoger of lager zullen worden door het invoeren van een bepaalde verduurzamingsoptie. Gezien de beperkte scoop van dit onderzoek en de hoge mate van strategische waarde die door bedrijven aan het geheimhouden van daadwerkelijke kosten en dus winstmarges gehecht wordt is er zeker wel het één en ander op deze kosten af te dingen. Voor de meeste opties wordt de onzekerheid van de berekeningsmethode ingeschat tussen de 10 en 30%.
Een uitzondering hierop is optie 16. Optie 16 heeft een zeer brede range reductiekosten, die varieert van zeer negatieve reductiekosten tot zeer positieve reductiekosten. De variatie is sterk afhankelijk van de aannames die gedaan worden over de kosten die gemaakt worden bij alternatieve methoden om beton te beschermen. Bovendien is in deze kosten de bereikbaarheidskosten die voor de alternatieve methoden sterk kunnen oplopen nog niet meegenomen.
Op basis daarvan willen we erop wijzen dat optie 16 voor een groot aantal toepassingen negatieve of neutrale reductiekosten heeft.

Reductiepotentieel

De belangrijkste aanname waar het reductiepotentieel door beïnvloed is, is de aanname dat 2010 als referentie jaar is gekozen. Dit betekent dat voor de jaarlijkse beton en cement consumptie de cijfers voor 201 zijn aangenomen. Hetzelfde geldt voor het aantal huizen of kantoren dat opgeleverd is.
Nu blijkt uit vergelijking van de cijfers van 2010 met inmiddels beschikbare cijfers uit 2011 dat 2010 een vrij conservatieve inschatting oplevert.

Het verschil tussen het technische en het realistische reductiepotentieel laat zien hoe groot de invloed van factoren zoals de benodigde technische en organisatorische ontwikkelingen en het realiseren van de benodigde financiering kan zijn. Zoals blijkt uit de berekening van het realistisch potentieel is dit slechts een eerste benadering en is er nog grote mate van onzekerheid over hoe groot de correctiefactor daadwerkelijk moet zijn.

3.3.2 Samenhang tussen verduurzamingsopties

Zoals hierboven aangestipt kunnen niet alle verduurzamingsopties onafhankelijk van elkaar beoordeeld worden.
Het potentieel van slim breken is alleen zo hoog als de fijne fractie gebruikt wordt als grondstof voor alternatief CSH cement en als alternatief CSH cement (optie 3) breed toegepast gaat worden.
Staalvezelbeton (optie 11) heeft alleen een besparingspotentieel als er grootschalig slim breken (optie 8) wordt ingevoerd zodat dit type beton ook gerecycled kan worden. Door de lage mate van recycling is het reductiepotentieel van deze optie negatief als er alleen reguliere brekers ingezet worden voor het slopen van beton.

Het reductiepotentieel van CEM X toestaan (optie 2), bodemassen inzetten als vulstof met bindcapaciteit en Kringbouw/REKO fijne fractie inzetten als vulstof met bindcapaciteit (optie 10) is allemaal even hoog ingeschat omdat het om het zelfde reductiepotentieel gaat. Deze reductiepotentiëlen kunnen daarom niet bij elkaar opgeteld worden.

Een vergelijkbare situatie geld voor het reductiepotentieel van de alternatieve bindsystemen (optie 3 tot en met 6). Het reductiepotentieel van deze opties overlapt elkaar in grote mate.

3.4 Samenvatting

Op basis van de gegevens over de 17 verduurzamingsopties die in hoofdstuk twee zijn gepresenteerd, zijn twee kostencurve opgesteld.
Eén kostencurve op basis van het technisch reductiepotentieel en één op basis van het realistisch reductiepotentieel.

Het technisch reductiepotentieel is het technisch potentieel om CO_2 te reduceren van de verduurzamingsoptie op basis van het werkingsprincipe.
Het realistisch reductiepotentieel is het technisch potentieel gecorrigeerd voor technische, organisatorische en financiële factoren die de implementatie bemoeilijken.
Het realistisch reductiepotentieel wijkt af van het technisch reductie-potentieel op de volgende manieren:

- Ten eerste worden de verschillen in reductiepotentieel een stuk kleiner.
- Ten tweede veranderd de volgorde van de opties met het hoogste reductiepotentieel in beperkte mate.

Voor alle gepresenteerde getallen geldt dat ze bedoeld zijn om de opties relatief ten opzichte van elkaar te vergelijken. In dit stadium van de ontwikkeling is de onzekerheidsmarge over met name het reductiepotentieel en in mindere mate de reductiekosten nog te groot om deze waarden absoluut te nemen.

Uit beide kostencurves blijkt dat:

1. Opties 1 tot en met 6, 8 t/m 11, kostenneutraal of zelfs tegen een licht kostenvoordeel gerealiseerd kunnen worden.
2. Optie 13 in de laagbouw tegen een beperkte meerprijs gerealiseerd kan worden.
3. Opties 16, 13 (in hoogbouw), 7 en 17 tegen aanzienlijke meerkosten gerealiseerd kunnen worden.

Hierbij moet opgemerkt worden dat optie 16 een zeer brede range reductiekosten heeft en het zeer waarschijnlijk is dat deze optie voor veel toepassingen negatieve of neutrale reductiekosten biedt.

Van de opties 1 tot en met 6, 8 t/m 11, optie 13 in laagbouw en optie 16 is zowel het reductiepotentieel als het gecorrigeerde reductiepotentieel het hoogst voor optie 1, optie 3 tot en met 6, optie 8 en optie 11.

4 Conclusies en aanbevelingen

De achtergrond van dit project is om een overzichtelijke samenvatting te presenteren van de 17 verduurzamingsopties. Zodat het Platformoverleg, weloverwogen en goed geïnformeerd 10 prioritaire handelingsperspectieven kan kiezen.
In een vervolgproject worden deze 10 handelingsperspectieven zover uitgewerkt dat ze als basis kunnen dienen voor de middellange termijn doelstellingen voor de Green Deal Beton in de vorm van de overeenkomst 'Concreet 2.0'.

4.1 Kostencurve

Op basis van de gegevens over de 17 verduurzamingsopties, is een kostencurve opgesteld.
Centraal in de kostencurve staan het realistisch reductiepotentieel en de reductiekosten. Het realistisch reductiepotentieel is het technisch potentieel om CO_2 te reduceren van de verduurzamingsoptie op basis van het werkings-principe gecorrigeerd voor de moeilijkheden die verwacht worden bij implementatie. De reductiekosten zijn de kosten die gemaakt moeten worden om de emissie van een ton CO_2 te voorkomen.

Voor alle gepresenteerde getallen geldt dat ze bedoeld zijn om de opties relatief ten opzichte van elkaar te vergelijken. In dit stadium van de ontwikkeling is de onzekerheidsmarge nog te groot om absolute getallen over reductiepotentieel en in mindere mate over reductiekosten te geven.

Uit beide kostencurves blijkt dat:
4. De opties 1 tot en met 6, 8 t/m 11 verduurzamingsopties kostenneutraal of zelfs tegen een licht kostenvoordeel gerealiseerd kunnen worden.
5. Optie 13 in de laagbouw tegen een beperkte meerprijs gerealiseerd kan worden.
6. Opties 16, 13 (in hoogbouw), 7 en 17 tegen aanzienlijke meerkosten gerealiseerd kunnen worden.

Hierbij merken we op dat de variatie in optie 16 dusdanig groot is en een belangrijke kostenpost niet in de berekening van de reductiekosten is meegenomen dat wij adviseren om optie 16 te beschouwen als een optie met lage of neutrale reductiekosten.
Van de opties 1 tot en met 6, 8 t/m 11, optie 13 in laagbouw en optie 16 is zowel het reductiepotentieel als het gecorrigeerde reductiepotentieel het hoogst voor optie 1, optie 3 tot en met 6, optie 8 en optie 11.

Voor opties 12, 14 en 15 waren onvoldoende kwantitatieve gegevens beschikbaar om een reductiepotentieel en reductiekosten op te kunnen stellen. Dit wil niet zeggen dat ontwerpopties geen rol hebben bij het verduurzamen van het beton, alleen dat er op dit moment nog geen informatie beschikbaar is op basis waarvan een kwantitatieve inschatting van het reductiepotentieel gegeven kan worden.

4.2 Kiezen van opties

Er zijn grofweg twee manieren om de prioritaire opties te kiezen:

1. Volledig op basis van het potentieel dat blijkt uit de kostencurve.
   Op volgorde van mate van potentieel zijn dat: 6, 3, 8, 1, 5, 4, 13 laag, 16, 2, 10, 11, 9.
2. Verdeling van het beste potentieel en goede verdeling over de verschillende categorieën.
   a Verandering van de betonsamenstelling: In deze categorie bieden de opties 3 en 6 veruit het grootste reductiepotentieel.
   b Hoogwaardigere recycling van beton. In deze categorie biedt optie 8 het grootste reductiepotentieel.
   c Andere wapeningsmethode. Hier is optie 11 de enige optie.
   d Aanpassen bouwproces. In deze categorie is optie 13 bij toepassing bij laagbouw of andere niet toepassingen waarvan het tijdpad niet kritisch is kansrijk.
   e Langere levensduur van betonnen producten: in deze categorie is optie 16 kansrijk.
   f Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase: in deze categorie is optie 17 de enige optie. Echter, we raden aan om deze optie niet te kiezen omdat het zeer gezocht is om de energiebesparing door betonkernactivering aan het beton toe te rekenen.

   Hiermee komt het advies neer op het kiezen van opties 3, 6, 8, 11, 13 (laagbouw), 16.

Bijlage A @@

	Schakel in de keten	Principe handelings-perspectief	Handelingsperspectief	Kennishouders
1	Beton	Minder klinker/m^3 beton	Optimale korrelverdeling toeslagmaterialen	Mantijn van Leeuwen, Thies v/d Wal
2	Beton-recycling	Cement terugwinnen	ADR	Peter Broere, David Heyloop, Edo Peet, Evert Schut
3			Reko/thermisch	
4			VAR/slim breken	
5	Cement	Schoner productieproces	Secundaire brandstoffen	
6		Schoner productieproces	(Zie overige opties genoemd in CE-rapport)	
7		Minder klinker/ton cement	Nieuwe CEM categorieën met laag klinker-gehalte (of opschuiven grenzen in normen)	
8		Lagere prestatiecement met lager emissieniveau	Belite-cement	Mantijn van Leeuwen
9		Nieuwe bindmiddelen/ hulpstoffen	Papierslib	Mantijn van Leeuwen
10			AEC bodemas	ENCI
11		Ander principe bindmiddel	Novacem op magnesiumbasis	Mantijn van Leeuwen
12			'Celitement, een calcium-silicaat'	Mantijn van Leeuwen, Thies v/d Wal
13			Cemroc: hoogovenslakken met calcium silicaat	Mantijn van Leeuwen
14		Minder klinker/ton cement	Betere prestaties bestaande mengsels (door betere korrelopbouw)	Mantijn van Leeuwen
15		Nieuwe bindmiddelen/ hulpstoffen	Zie betonrecycling	Zie 2, 3, 4
16	Toeslag-materialen	Transport	Meer per schip	
17			Andere brandstoffen	
18	Wapening	Minder staal	Wapening op maat	
19			Staalvezelbeton	Mantijn van Leeuwen
20	Betonmortel (gietbouw))	Minder klinker/m^3 beton	"bouwplanning (langere uithardingstijd)"	
21		Vermijden trilnaalden	Zelfverdichtend beton	
22	Beton-producten	Minder klinker/m^3 beton	Langere ontkistingstijd	
23		Vermijden gebruik trilnaalden	Zelfverdichtend beton	
24		Ogisitek betonproducten	Logistiek centrum	
25		Minder klinker/m^3 beton	Slimmer ontwerpen	
26	Bouw/ontwerp voor gebruiker	Beton als isolerende/ drijvende schil	Diverse technieken	
27		Verlengen technische levensduur	'Multifunctioneel en flexibel ontwerpen'	
28			Zelf helend beton?	Mantijn van Leeuwen
29		Rekening houden met kortere levenscyclus	Ontwerp voor deconstructie	
30		Kansen infrastructuur	'Vermindering rolweerstand'	
31		Energie nul gebouw	Betonkernactivering	Thies v/d Wal
32	Bouw/proces-Optimalisatie	'Vermijden van overdimensionering eindsterkte beton'	'Tijd voor ontkisting/eindsterkte beter inplannen'	Thies v/d Wal
33		'Vermijden van overdimensionering eindsterkte beton'	Rijpheidscomputer: chip met gegevens over betonsamenstelling, uithardingstijd, etc.	

	Schakel in de keten	Principe handelings-perspectief	Handelingsperspectief	Kennishouders
34	Gebruiksfase	Beperken bouwafval	Legoisering?	Thies v/d Wal, Nanda Naber (TU Delft)
35		Schoner toeslagmateriaal voor beton	Aanscherpen productcertificaat?	

Bijlage B @@

De 17 verduurzamingsopties die uit de workshop zijn gekomen staan weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4 **@@**

Nummer	Verduurzamingsoptie
1	Optimaliseren korrelverdeling
2	CEM X fractie toestaan
3	Calcium sulpho-aluminaat cementen
4	Super gesulfateerde cementen
5	Alternatief CSH Cement
6	Alkalisch geactiveerde vliegas/slak systemen (Geopolymeer)
7	Bouwen met demontabele standaard eenheden
8	Slim breken
9	REKO thermische activering/kringbouw
10	Inzet bodemas
11	Inzet staalvezels in plaats van traditionele wapening
12	Langere uithardingstijd mogelijk maken door opslagcapaciteit (betonproducten)
13	Lange uithardingstijd door bouwplanning
14	Beperken overdimensionering in ontwerpfase
15	Langere levensduur van betonnen gebouwen door flexibel ontwerp
16	Zelfhelend beton
17	Energiezuinige gebouwen

In bijlage B-1 tot en met Bijlage B-17 worden de werkingsprincipes, de reductiekosten, het reductiepotentieel en het implementatiepotentieel van deze opties uitgewerkt.

De reductiekosten zijn berekend gebruikmakend van de onderstaande prijzen voor grondstoffen. Verschillende leden van de begeleidingscommissie hebben vertrouwelijke prijsopgaaf gedaan voor de onderstaande grondstoffen waarna de opgegeven cijfers gemiddeld zijn.

De standaard deviatie[7] op deze cijfers varieerde tussen de 10 en 20%. Het is dus mogelijk dat lokaal in Nederland 10 tot 20% hogere of lagere prijzen gebruikelijk zijn.

[7] Student s standaard deviatie is berekend omdat het om een te beperkt aantal gegevens ging om een normale verdeling te veronderstellen.

Tabel 5 **Gemiddelde prijzen bestanddelen beton (€$_{2013}$ per ton)**

Bestanddeel beton	Gemiddelde prijs (€/ton)
Portlandcement CEM I 52,5 R	86
Portlandcement CEM I 52,5 N	82
Hoogovencement CEM III	79
Rivierzand	13
Riviergrind	18
Betongranulaat 4-12	12
Poederkoolvliegas	35
Kalksteenmeel	45
Hoogovenslakken	65

Bijlage B-1 Optimaliseren korrelverdeling

Reductiekosten CO_2-emissie: *-71,9 à-45,7 €/ton*

CO_2-emissiereductiepotentieel: *175.000-198.000 ton/jaar*

Implementatie potentieel in 2020: *Middel*

Werkingsprincipe

Naast binding door chemische interactie is ook binding door de pakkings-dichtheid van het materiaal belangrijk voor de sterkte van beton. Uit de theorie volgt dat een heterogeen materiaal als beton bij gelijkblijvende chemische bindingen sterker gemaakt kan worden door de pakkingsdichtheid van het materiaal te verminderen. Dat betekent dat de ruimte, die ingenomen wordt door lucht en water vermindert wordt. Dit gebeurt door te zoeken naar een optimale verdeling van de korrelgrootte verdeling van de deeltjes die samen het beton vormen.
Inmiddels zijn er modellen beschikbaar die aan kunnen geven welke combinaties van deeltjes grootte verdeling per type grondstof voor optimale resultaten kunnen zorgen. Hiervoor is het wel noodzakelijk dat grondstofleveranciers bij iedere batch die geleverd wordt de korrelgrootte verdeling aangeven en dat grondstoffen apart per batch opgeslagen kunnen worden.

Reductiekosten

Als er geoptimaliseerd wordt op basis van grondstoffen, die nu al standaard worden ingekocht is kan er tot 10% minder cement gebruikt worden. Dit komt overeen met een kostenbesparing van circa 5% op grondstof voor cement. Afhankelijk van het soort cement dat ingezet wordt varieert de uitsparing van grondstofkosten tussen de 3,7 en 4,3 €/ton cement (zie grondstof-kostenoverzicht in bijlage B).
Hier staan extra handeling en opslagkosten om de juiste mix van deeltjesgroottes te kunnen garanderen. Deze is door industrie experts ingeschat op 1-2% van de uitsparing van de grondstof kosten. Uitgaande van dezelfde grondstofkosten als voor de uitsparing is dat minimaal 0,8 en maximaal 1,7 €/ton cement.

Omschrijving	Min.	Max.	Eenheid
Uitsparing cement grondstof	-4,3	-3,7	€/ton cement
Kosten handeling en opslag	0,8	1,7	€/ton cement
Cementbesparing door toepassing optie 1	10%	10%	%
Gemiddelde CO_2-emissie bij de productie van cement	0,49	0,49	ton CO_2/ton
Reductie CO_2-emissie per benodigde eenheid cement	0,05	0,05	ton CO_2/ton
Reductie kosten	**-71,9**	**-45,7**	**€/ ton CO_2**

De CO_2-emissiereductie per ton benodigd cement is 10% van het gebruikte cement. Omdat deze optie op bijna alle cementtypes in Nederland van toepassing is gaan we uit van de gemiddelde CO_2-emissie van Nederlands cement volgens opgaaf van de Betondatabase. Deze bedraagt 0,49 ton CO_2 per ton cement. De reductie van de hoeveelheid CO_2 per ton cement door toepassing van deze optie is dan ook 0,05 ton CO_2/ton cement. Hieruit volgt dat door toepassing van deze optie voor iedere ton CO_2-emissie die wordt voorkomen er ook tussen de € 46 en € 72 verdiend wordt.

Reductiepotentieel

Uit praktijkproeven is gebleken dat bij de huidige inkoop van grondstoffen circa 10% vermindering van cement gebruik gerealiseerd kan worden bij 75-85% van de cementen. Bij 15-25% van de betonsoorten kan korrelverdeling optimalisatie nog niet toegepast worden omdat daar een hoog aandeel water wenselijk is vanwege de benodigde vloei-eigenschappen.
De verwachting van de onderzoekers is dat als bedrijven op termijn op deeltjes grootte verdeling grondstoffen gaan inkopen (en er dus ook grondstoffen gebruikt gaan worden die nu nog niet overwogen worden) een potentieel is om 20-40% cement te besparen, hier kunnen wel extra kosten aan verbonden zijn die nu nog niet te overzien zijn.

Daarom berekenen we het reductiepotentieel op basis van de vermindering die mogelijk is op basis van de huidige grondstoffen. Uitgaande van de cementconsumptie in het referentiejaar 2010 van 4,8 Mton (Bijlage E) komt daarmee het CO_2-emissiereductiepotentieel op 175.000 à 198.000 ton CO_2 per jaar.

In de onderstaande tabel staat het berekende CO_2-emissiereductiepotentieel met daaronder de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren.

Omschrijving	Min.	Max.	Eenheid
Cementconsumptie	4,8	4,8	Mton/jaar
Deel van het cement waarop optie 1 toepasbaar is	75%	85%	%
	3.600.000	4.080.000	ton cement/jaar
Cementbesparing door toepassing optie 1	10%	10%	%
Gemiddelde CO_2-emissie bij de productie van cement	0,49	0,49	ton CO_2/ton
Reductie CO_2-emissie per benodigde eenheid cement	0,05	0,05	ton CO_2/ton
CO_2-emissiereductiepotentieel	**174.960**	**198.288**	**ton CO_2/jaar**

Implementatie potentieel (Laag/Middelmatig/Hoog)

Technisch

In de afgelopen twee jaar hebben een aantal bedrijven in samenwerking met de TU Delft onderzocht hoe ze hun betonmengsels zouden kunnen optimaliseren. Ondanks het feit dat dit bij lang niet alle bedrijven gelukt is om dit in de praktijk te realiseren is hieruit een cementreductiepotentieel van grofweg 10 procent naar voren gekomen. Dus het technisch implementatiepotentieel is middelmatig.

Organisatorisch
Om dit potentieel ook daadwerkelijk te realiseren door het implementeren van deze maatregel in de praktijk is voornamelijk een andere manier van werken nodig. Betonmengsels moeten samengesteld worden op deeltjes karakteristieken wat een veel kennisintensievere manier van werken is dan tot nu toe in de cement en betonindustrie gebruikelijk is. Dus het organisatorisch implementatiepotentieel is middelmatig.

Financieel
Er zullen meer silo's gebruikt moeten worden om grondstoffen droog en apart op deeltjes categorie na het malen op te slaan. Dus het financieel implementatie-potentieel is middelmatig.

Conclusie
Middelmatig.

Bijlage B-2 Toestaan CEM X

Reductiekosten CO_2-emissie: *--56 à -24 €/ton CO_2*

CO_2-emissiereductiepotentieel: *44.000-52.000 ton/jaar*

Implementatie potentieel in 2020: *Hoog*

Werkingsprincipe
Alternatief bindersysteem met een lagere CO_2-footprint dan Portland cement (Portland cement wordt ook aangeduid met CEM I of OPC).Samenstellingen van CEM X cementen bestaan uit combinaties van klinker, vliegas, hoogovenslak en kalksteenmeel waardoor de inzet van klinker verlaagd kan worden.
In Nederland is de potentie beperkt doordat het aandeel klinkerarme cementen zoals CEM III al hoog is en vervanging van deze cementen door CEM X nauwelijks CO_2-emissies verlaagd (Bijlage E).

Reductiekosten
Volgens de begeleidingscommissie bestaat het reductiepotentieel van CEM X in Nederland uit vervanging van CEM II en CEM IV cementen. Op basis van de indeling volgens de norm EN197-1 (tabel E-1, bijlage E) is de inschatting gemaakt dat deze cementen gemiddeld circa 70% Portland klinker bevatten en dus ook een CO_2-emissie hebben van 0,7 ton CO_2/ton cement.
De CO_2 emissie van de CEM X cementen is vergelijkbaar met de CO_2-emissie van CEM III cementen en bedraagt 0,3 ton CO_2/ton cement.

Kosten van CEM X worden bepaald door de mate waarin klinker door goedkopere soorten grondstof vervangen worden. De schatting van experts uit de industrie (bijlage E) is dat CEM X 15-30% goedkoper is dan CEM I. Hiermee komt de prijs van CEM X op € 60-€ 73 per ton.

In de onderstaande tabel staat de berekende CO_2-emissiereductiekosten met daaronder de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren.

Omschrijving	Waarde	Eenheid
Kosten huidige cementen	82	€/ton cement
Kosten CEM X	60-73	€/ton cement
CO_2-emissie huidige cementen	0,7	ton CO_2/ton
CO_2-emissie CEM X	0,3	ton CO_2/ton
CO_2-emissiereductiekosten	**-56 à -24**	**€/ton CO_2**

Reductiepotentieel
Voor Nederland zou toepassing van CEM X kunnen leiden tot CO_2-emissie reductie als CEM X cementen worden toegepast voor de vervanging van CEM II en CEM IV cementen bij de productie van betonproducten (prefabricage).
Het gaat hierbij om een afzet van 120.000 ton +/- 10% per jaar in 2020 (Bijlage E). In de vorige paragraaf is toegelicht waarom de CO_2 emissie bij de productie van CEM X circa 0,4 ton CO_2/ton cement lager is dan de CO_2 emissie bij de productie van CEM II en CEM IV.
Hiermee komt het CO_2 emissiereductiepotentieel op gemiddeld 48.000 ton CO_2/jaar.

In de onderstaande tabel staat het berekende CO_2-emissiereductiepotentieel met daaronder de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren.

Omschrijving	Waarde	Eenheid
cementbesparing	110.000-130.000	ton cement
CO_2-emissie huidige cementen	0,7	ton CO_2/ton
CO_2-emissie CEM X	0,3	ton CO_2/ton
CO_2-emissiereductiepotentieel	**44.000-52.000**	**ton CO_2/jaar**

Implementatie potentieel (Laag/Middelmatig/Hoog)

Technisch
De toepasbaarheid van CEM X is al bewezen. Dus het technisch implementatiepotentieel is hoog.

Organisatorisch
De grootste hindernis voor implementatie van CEM X cementsoorten is dat deze cementsoorten nog niet zijn opgenomen in de regelgeving. De procedure voor aanpassing van de regelgeving is al opgestart. De verwachting is dat binnen een paar jaar CEM X is opgenomen binnen EN 197-1 en EN 206-1. De verwachting is dat daarom tegen 2020 het volledige implementatie-potentieel gerealiseerd is (zie Bijlage E). Dus het organisatorisch implementatiepotentieel is hoog.

Financieel
Geen investeringen nodig, lagere kosten voor gebruikers. Dus het financieel implementatiepotentieel is hoog.

Conclusie
Hoog.

Bijlage B-3 Calciumsulpho-aluminaat cement

Reductiekosten CO_2-emissie: *0 €/ton*

CO_2-emissiereductiepotentieel: *480.000-720.000 ton/jaar*

Implementatie potentieel in 2020: Middel

Werkingsprincipe
Alternatief bindersysteem met een lagere CO_2-footprint dan Portland cement (Portland cement wordt ook aangeduid met CEM I of OPC).
Het bindersysteem op basis van Portland klinker wordt vervangen door calciumsulpho-aluminaat bindersysteem, ook wel klinkers op basis van beliet, calcium sulfoaluminate ferriet genoemd. De productie van deze klinkers wordt voorbereid door Lafarge (Walenta en Comparet, 2011) en door Heidelberg-cement (Dienemann e.a., 2013).
De CO_2-emissies zijn lager omdat er minder calcium carbonaat gedecarboniseerd[8] wordt, er een circa 200 graden lagere oven temperatuur gebruikt wordt en omdat er minder energie nodig is voor het malen van de klinker. Alles bij elkaar rapporteert Lafarge een reductie van 20-30% CO_2 per ton vergeleken met CEM I cement, Heidelbergcement rapporteert circa 30% CO_2-reductie. Heidelberg rapporteert ook een goede inzetbaarheid in Hoogovencement ter vervanging van Portland klinker. Dit betekent dat ook de CO_2-emissie van CEM III cement met 20-30% omlaag kan.
Verdere CO_2-reductie is waarschijnlijk mogelijk als het beliet wordt verkregen op basis van het gerecyclede cement (zie Bijlage B-7). Omdat in dat geval geen calciumcarbonaat hoeft te worden gedecarboniseerd bij de productie van cement.

Reductiekosten
Volgens opgave van Lafarge en Heidelbergcement zijn de grondstoffen grotendeels vergelijkbaar met de grondstoffen van Portland Cement, dus daar wordt geen kosten verschil verwacht. Bovendien is dit type bindersysteem ontwikkeld om in de reguliere ovens en maalinstallaties geproduceerd te kunnen worden er hoeft dus geen nieuwe apparatuur aangeschaft te worden.
De operatiekosten zijn lager door het lagere energiegebruik: Er wordt naar schatting 15% minder brandstof gebruikt en 10% minder elektriciteit voor het malen.
In het geval dat er een nieuwe oven aangeschaft gaat worden kan men toe met een veel compactere over die ook goedkoper uitgevoerd kan worden door de lagere procestemperaturen.
Gezien de kwaliteit van deze cementen zal de marktprijs volgens de experts in de begeleidingscommissie (zie bijlage E) vergelijkbaar zijn met dat van CEM I en CEM III afhankelijk in welk cement dit bindersysteem de Portland klinker vervangt. De reductiekosten zijn daarom op 0 €/ton gezet.

[8] Zie Bijlage C voor een toelichting bij het begrip decarbonisatie.

Reductiepotentieel

Het calciumsulpho-aluminaatbindersysteem kan tot 100% alle Portland klinker vervangen. Dit betekent dat van de volledige Nederlandse cement productie de CO_2-emissie met 20-30% gereduceerd kan worden.
De Nederlandse cementproductie bedroeg in 2010 bedroeg 4,8 miljoen ton cement (Bijlage E). De gemiddelde CO_2-uitstoot van dit cement was 0,5 ton CO_2/ton cement (betondatabase). Dit betekent dat het CO_2-emissie-reductiepotentieel van circa 480.000 à 720.000 ton/jaar.

In de onderstaande tabel staat het berekende CO_2-emissiereductiepotentieel met daaronder de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren.

Omschrijving	Min.	Max.	Eenheid
Cementconsumptie in 2010	4,8	4,8	mln. ton/jaar
CO_2-reductie bij vervanging OPC door calciumSulfo-aluminaat klinker	20%	30%	tonCO_2/ton cement
Gemiddelde CO_2-emissie cement NL	0,5	0,5	betondatabase
Reductiepotentieel	**480.000**	**720.000**	**tonCO_2/jaar**

Implementatiepotentieel (Laag/Middelmatig/Hoog)

Technisch
Deze cementen bevinden zich nog in de pilotfase. De eerste demonstratie-testen zijn aangekondigd. Daarna zullen deze cementen zich in de praktijk moeten bewijzen. Dus het technisch implementatiepotentieel is middelmatig.

Organisatorisch
Deze cementen kunnen in de bestaande cementovens gemaakt worden.
Dit bindertype is nog niet in de Nederlandse normen opgenomen. Daar wordt op dit moment wel aan gewerkt door Heidelbergcement. Zodra dat is gebeurd kan via CUR 48 testen gedaan worden waarmee het cement ingezet kan worden in attest beton. Dus het technisch implementatiepotentieel is middelmatig.

Financieel
Geen investeringen nodig, kunnen gewoon in bestaande ovens geproduceerd worden. Dus het financieel implementatiepotentieel is hoog.

Conclusie
Middelmatig.

Literatuur

Walenta en Comparet, 2011
"New cements and innovative binder technologies BCSAF cements – recent developments", presentatie door Dr. G Walenta en Dr. C Comparet van Lafarge research Centre Lyon, tijdens de ECRA Conferentie in Barcelona, 2011

Dienemann et al., 2013
"BCT Technology – a new alternative binder concept" by Dr Wolfgang Dienemann, Ernest Jelito, Frank Bullerjahn, Dr. Dirk Schmitt en Dr. Mohsen BenHaha, gepubliceerd in ZKG, 5, 2013, p 25-27. Beschikbaar via www.zkg.de.

Bijlage B-4 Supergesulfateerd cement

Reductiekosten CO_2-emissie: *0 €/ton*

CO_2-emissiereductiepotentieel: *246.000-457.000 ton/jaar*

Implementatie potentieel in 2020: *Laag*

Werkingsprincipe
Alternatief bindersysteem met een lagere CO_2-footprint dan Portland cement (Portland cement wordt ook aangeduid met CEM I of OPC).
Het alternatieve bindersysteem wordt geproduceerd op basis van hoogovenslak en gips en soms ook met een zeer kleine hoeveelheid klinker.

Reductiekosten
De kosten voor het opzetten van de productie van supergesulfateerde cementen zijn veel lager dan de kosten van het opzetten van een klinkeroven, omdat voor het proces er slechts een compacte fabriek nodig is en alleen een calcineerder en geen klinkeroven. Maar er zijn wel zuiverdere grondstoffen en preciezere doseringsinstallaties voor nodig om het goed te laten werken.
Op dit moment worden deze cementen geproduceerd in traditionele cementovens en aangeboden tegen vergelijkbare prijzen als CEM I.
Om productielocaties te kunnen realiseren die gewijd zijn aan dit type cement zijn investeringen nodig, waarvoor het nodig is dat dit type cement voorlopig vergelijkbare prijzen opbrengt als de typen cement die ze vervangen.
Hierdoor zijn de reductiekosten gezet op 0 €/ton.

Reductiepotentieel
De CO_2-emissie bij de productie van het gipsbranden zijn veel lager dan bij cementen gebaseerd op Portland cement. Dit komt door de lage productie-temperatuur en doordat er geen decarbonisatie optreedt. Hierdoor wordt de CO_2-reductie 90-95% lager dan CEM I ingeschat door experts (Bijlage E).

Echter het wordt alleen geschikt geacht voor betonmorteltoepassingen in het grond- en waterwerken (GWW) segment (Bijlage E). Omdat @??@
De hoeveelheid betonmortel in het GWW-segment wordt ingeschat op 5,8 miljoen ton beton per jaar (opgaaf VOBN voor 2010). De CO_2-emissie van betonmortel in GWW-toepassingen is gemiddeld 0,11ton CO_2/ton beton (CE Delft, 2013).
Aangezien de CO_2-emissie van beton voor meer dan 98% bestaat uit de emissie gerelateerd aan CO_2-emissie van cementproductie is aangenomen dat de CO_2-emissiereductie door productie van supergesulfateerd cement in plaats van CEM I cement ook van toepassing is op de CO_2-emissie van de productie van het beton bij toepassing van supergesulfateerd cement in plaats van regulier cement.
Hiermee komt het CO_2-emissiereductiepotentieel op 569.000-601.000 ton per jaar.

In de onderstaande tabel staat het berekende CO_2-emissiereductiepotentieel met daaronder de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren.

Omschrijving	Waarde	Eenheid
CO_2-emissie reductie door toepassing supergesulfateerd	90-95%	%
betonmortel gebruik in GWW (ongewapend)	1,225	mln. m^3/jaar
CO_2-emissie betonmortel ongewapend	0,11	ton CO_2/m^3beton
Betonmortel gebruik in GWW (gewapend)	1,225	mln. m^3/jaar
CO_2-emissie betonmortel gewapend	0,11 -0,28	ton CO_2/m^3beton
CO_2-emissiereductiepotentieel:	246.000-457.000	ton CO_2/jaar

Implementatie potentieel (Laag/Middelmatig/Hoog)

Technisch
Deze cementen worden al toegepast in de praktijk met zeer wisselend resultaat. Volgens ingewijden omdat de productielocaties niet geschikt zijn voor de preciezere dosering die nodig is om de juiste kwaliteit te bereiken. Door die tegenvallende praktijkresultaten heeft het product geen goede naam. Dus het technisch implementatiepotentieel is laag.

Organisatorisch
Om deze cementen technisch goed te maken moeten ze in een daarvoor ingerichte productielocatie geproduceerd worden. Dit bindertype is nog niet in de Nederlandse normen opgenomen. Daar wordt op dit moment wel aan gewerkt door Holcim. Zodra dat is gebeurd kan via CUR 48 testen gedaan worden waarmee het cement ingezet kan worden in attest beton. Dus het organisatorisch implementatiepotentieel is middelmatig.

Financieel
Er kan in bestaande cementinstallaties geproduceerd worden, maar voor de benodigde kwaliteit is een voor dit doel gebouwde installatie nodig.
De investeringen daarvoor zijn beperkt. Dus het financieel implementatie-potentieel is middelmatig.

Conclusie
Laag.

Literatuur

CE Delft, 2013
Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw, rapport opgesteld door Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout gepubliceerd in april 2013

Bijlage B-5 Alternatief CSH cement

Reductiekosten CO_2-emissie: *0 €/ton*

CO_2-emissiereductiepotentieel: *448.000 ton/jaar*

Implementatie potentieel in 2020: *Laag*

Werkingsprincipe
Alternatief bindersysteem met een lagere CO_2-footprint dan Portland cement (Portland cement wordt ook aangeduid met CEM I of OPC).
Het alternatieve bindersysteem wordt geproduceerd op basis van dezelfde grondstoffen als Portland cement, maar door een andere productieproces wordt er minder kalksteen gedecarboniseerd en minder energieverbruik. Tegelijkertijd is er meer energie nodig bij het malen. Het bekendste merk dat in deze categorie ontwikkeld wordt is Celitement. Hiervoor is door de ontwikkelaars opgegeven dat de netto CO_2 emissiereductie 50% vergeleken met Portlandcement resulterend in 350-480 kg CO_2 per ton cement. Deze lage CO_2-emissie is het resultaat van 15-20 % extra CO_2-emissie door meer elektriciteit voor het malen, 30-35% CO_2-emissiereductie door lagere procestemperaturen, 45-55% CO_2-emissiereductie door minder decarbonisatie (ENCRA, 2011).

Reductiekosten
De proceskosten van dit proces zijn naar verwachting lager door het significant lagere energiegebruik. Daarnaast leert navraag bij de ontwikkelaars van Celitement (KIT, 2013) dat voor productie-uitbreiding van een bestaande klinkerplant met een plant voor dit type cement alleen de autoclaaf en de maler nodig zijn. De maler is dezelfde maler als er in het geval van een reguliere klinkerproductie nodig zou zijn.
Uitgaande van een autoclaaf van 3 meter diameter en 50 meter lengte van het type voor de testen is gebruikt (Quilled autoclaaf) zijn de aanschafkosten inclusief de benodigde mengers, vulsystemen, controlekamers en ketelhuis circa 1,4 miljoen euro (HESS, 2013; Scholz, 2013). Uitgaande van twee batches per 24 uur komt dit neer op circa 740 m^3/dag klinker. Dit wordt tijdens het maalproces opgewerkt tot 2200 m^3 cement per dag. Hiermee komen de investeringen neer op 610 € per m^3 cement/dag aan productiecapaciteit. Deze kosten kunnen nog 40% dalen tot 375 € per m^3 cement/dag aan productiecapaciteit als de productie geoptimaliseerd wordt door met 4 autoclaven te werken die samen één mixer, één vulsysteem en één controlekamer delen.

Hiermee zijn deze investeringskosten waarschijnlijk lager dan voor een uitbreiding of vervanging van een reguliere klinkeroven. Echter er zijn geen recente cijfers bekend gemaakt over de kosten van het bouwen van extra reguliere klinkercapaciteit. Bovendien zal Celitement hoog in de markt gepositioneerd worden om investeerders aan te trekken om de benodigde investeringen mogelijk te maken. Daarom is de prijs minimaal net zo hoog als van CEM I cement en zijn de reductiekosten in 2020 op 0 €/ton gesteld.

Reductiepotentieel

De ontwikkelaars van Celitement claimen dat Celitement niet zozeer één type cement is maar een range aan cementen die op specificatie geproduceerd kunnen worden. Hierbij wordt gemikt op de volledige vervanging van Portland cement. Echter de specialisten in onze begeleidingsgroep (Bijlage E) wijzen er op dat door de efficiëntere manier van produceren er ook minder ongebluste klak vrij beschikbaar is in het materiaal om zuren te kunnen bufferen. Dit betekent dat een wapening minder goed beschermd wordt tegen zuren die de wapening zouden kunnen aantasten. Dit noemen zij een lagere alkaliteit. Daardoor gaan we uit van een beperkte geschiktheid voor gewapend beton. Het ongewapende beton wordt op basis van de VOBN en de BFBN versterkte gegevens voor een eerdere studie (CE Delft, 2013) ingeschat op circa 50% van de betonproducten en circa 20% van het gebruik van de betonmortel.

Omschrijving	Aandeel	Waarde (2010)
Aandeel betonmortel ongewapend	20%	1,6 mln. m^3
CO_2-emissie bij productie van betonmortel (ongewapend)		0,11 ton CO_2/m^3
Aandeel betonproducten ongewapend	50%	3,0 mln.j m^3
CO_2-impact betonproducten		0,24 ton CO_2/m^3
CO_2-reductie toepassing alternatief CSH cement		50%
Reductiepotentieel	**Ongewapend beton**	**448.000 ton CO_2/jaar**

Inmiddels zijn er verschillende methodes in ontwikkeling die het probleem van de lagere alkaliteit omzeilen, bijvoorbeeld door het voorbehandelen van het wapeningsstaal, het aanbrengen van een lichte spanning op het wapeningsstaal via zonnepaneeltjes, het werken met andere typen wapening zoals basalt en glasvezels, etc. Echter gezien de conservatieve aard van de bouwwereld zal het nog wel lang duren voordat deze methoden breed geaccepteerd zijn. Daarom is het reductiepotentieel beperkt tot het ongewapende beton.

Implementatie potentieel(Laag/Middelmatig/Hoog)

Technisch

Deze cementen bevinden zich nu nog in de laboratoriumfase in 2015 wordt de eerste pilotfabriek verwacht. Er is dus nog een behoorlijk ontwikkeltraject nodig, Het technisch implementatiepotentieel is dus laag.

Organisatorisch

De faciliteiten die voor de productie van deze typen cement nodig zijn , zijn industriële installaties die grootschalig worden toegepast om vergelijkbare materialen te produceren. Echter de productie kan niet plaats vinden in de bestaande cementfabrieken. Voor de productie van deze cementen voor de Nederlandse markt, zal er een hele nieuwe fabriek gebouwd moeten worden. Het is in de huidige markt niet waarschijnlijk dat daar voor 2020 investeerders voor te vinden zijn. Verder is dit cement nog niet in de Nederlandse normen opgenomen en wordt daar zover bekend ook nog niet aan gewerkt. Dus het organisatorisch implementatiepotentieel is laag.

Financieel
Investering is waarschijnlijk lager dan een vervangingsinvestering voor een Portland klinker oven. Maar het blijven omvangrijke investeringen. Dus het financieel implementatiepotentieel is laag.

Conclusie
Laag.

Literatuur

CE Delft, 2013
Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw, rapport opgesteld door Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout gepubliceerd in april 2013

ENCRA, 2011
Celitement, A new CSH binder besides OPC, presentatie door Dr Hendrik Möller–SchwenkZementKG/CelitementGmbH tijdens de ECRA Technical Seminar in Barcelona, 2011.

HESS, 2013
Telefonische onderhoud met Gerbrand Holland - Sales Engineer bij HESS AAC Systems B.V., augustus 2013

KIT, 2013
Telefonisch onderhoud met Dr. Hanns-Günther Mayer.

KIT, 2010
Celitement – a sustainable prospect for the cement industry (Celitement – eine nachhaltige Perspektive für die Zementindustrie), CEMENT INTERNATIONAL 4 5/2010 4 VOL. 8 door Dr. P. Stemmermann, U. Schweike, Dr. K. Garbev, Dr. G. Beuchle, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Dr. H. Möller, Celitement GmbH, Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

Scholz, 2013
Telefonisch onderhoud met Marius Graeber van Maschinenbau Scholz GmbH & Co. KG, augustus 2013

Worldcement, 2011
Celitement, in worldcement.com June 2011 Special environmental issue, door Peter Stemmermann, Günter Beuchle, Krassimir Garbev, en Uwe Schweike, Karlsruhe Institute of Technology; Hendrik Möller, Celitement GmbH

Bijlage B-6 Geopolymeer

Reductiekosten CO_2-emissie: *0 €/ton*

CO_2-emissiereductiepotentieel: *717.000 ton/jaar*

Implementatie potentieel in 2020: *Middelmatig*

Werkingsprincipe
Alternatief bindersysteem op basis van vliegas, slak en activator. Kan op basis van een wijde range van grondstoffen geproduceerd worden. Dit cement kan op twee manieren geproduceerd worden:

- Alkalisch dan hoeven de ingrediënten alleen gemalen of gemengd te worden. Dit kan in een reguliere betoncentrale
- Thermisch dan reageren de grondstoffen bij relatief lage temperaturen (700-800°C). Zonder dat daarbij carbonisatie optreed. Door de lagere temperatuur kan dit in een compacte oven.

Voor beide methoden geldt dat het beton gebroken kan worden en dat daaruit betongranulaat gemaakt kan worden maar het is onduidelijk of er met slim breken of het kringbouwconcept ook het bindsysteem gerecycled kan worden.

Reductiekosten
De kosten van de alkalische route worden bepaald door de gebruikte grondstoffen. Voor partijen die toegang hebben tot een goedkope geschikte bron van calcium en silicaten (bijvoorbeeld vliegas en slak, maar kan ook vulkanische as zijn of specifieke kleisoorten), is dit bindersysteem te produceren tegen de laagste prijzen van op Portland klinker gebaseerde cementen. Terwijl er kwalitatief hoogstaande cementen worden geproduceerd (Banah, 2013). Kosten worden circa 20% lager ingeschat. Daarmee komen de reductiekosten op -90 €/ton.

Omschrijving	Waarde	Eenheid
CEM I	86	€/ton
20% reductie	-17	€/ton
Aandeel betonmortel ongewapend	3.752	kton/jaar
Reductie door toepassen Geopolymeer ipv CEM I	-64,3	mln. €/jaar
Reductiepotentieel	716.800	ton CO_2/jaar
Reductiekosten	**-90**	**€/ton**

Reductiepotentieel
De kwaliteit van dit beton is hoog en kan daarom zeer goed met Portland klinker concurreren. Door de manier van produceren er geen ongebluste klak vrij beschikbaar in het materiaal om zuren te kunnen bufferen. Dit betekent dat een wapening minder goed beschermd wordt tegen zuren die de wapening zouden kunnen aantasten. Dit noemen zij een lagere alkaliteit.
Dit betekent dat een wapening minder goed beschermd wordt tegen zuren die de wapening zouden kunnen aantasten. Dit noemen zij een lagere alkaliteit.

Omschrijving		Aandeel	Waarde (2010)
Aandeel betonmortel ongewapend		20%	1,6 mln. m^3
CO_2-impact betonmortel			0,11ton CO_2/m^3
Aandeel betonproducten ongewapend		50%	3,0 mln. m^3
CO_2-impact betonproducten			0,24 ton CO_2/m^3
Reductie CO_2-toepassing geopolymeer			80%
Reductiepotentieel	**Ongewapend beton**		**717.000 ton CO_2/jaar**

Daardoor gaan we uit van een beperkte geschiktheid voor gewapend beton. Het ongewapende beton wordt op basis van de VOBN en de BFBN versterkte gegevens voor een eerdere studie (CE Delft, 2013) ingeschat op circa 50% van de betonproducten en circa 20% van het gebruik van de betonmortel.
De CO_2-emissie bij de productie van geopolymeer is circa 80% lager dan vergeleken met de productie van Portland klinker cement voor de thermische productiemethode (Banah, 2013b), voor de alkalische methode wordt 80-90% reductie verwacht (CRH, 2013).

Inmiddels zijn er verschillende methodes in ontwikkeling die het probleem van de lagere alkaliteit omzeilen, bijvoorbeeld door het voorbehandelen van het wapeningsstaal, het aanbrengen van een lichte spanning op het wapeningsstaal via zonnepaneeltjes, het werken met andere typen wapening zoals basalt en glasvezels, etc. (CRH, 2013). Echter gezien de conservatieve aard van de bouwwereld zal het nog wel lang duren voordat deze methoden breed geaccepteerd zijn. Daarom is het reductiepotentieel beperkt tot het ongewapende beton.

Implementatie potentieel(Laag/Middelmatig/Hoog)

Technisch
Recent is de eerste plant voor thermische productie van geopolymeer geopend in Ierland. In Nederland is er in betoncentrales geëxperimenteerd met de alkalische methode er moet nog ervaring opgedaan worden met verschillende producten. Dus het technisch implementatiepotentieel is middelmatig.

Organisatorisch
De thermische productie heeft een relatief compacte fabriek nodig, de alkalische methode kan in bestaande betoncentrales gerealiseerd worden. Dit type cement valt niet onder de Nederlandse cement normen. Het is dusdanig anders dat er een eigen nieuwe norm voor ontwikkeld moet worden. Daar wordt door CRH aan gewerkt. Dus het organisatorisch implementatie-potentieel is middelmatig.

Financieel
De benodigde investeringen zijn zeker in het geval van de alkalische methode zeer beperkt. Dus het financieel implementatiepotentieel is hoog.

Conclusie
Middelmatig.

Literatuur

CE Delft, 2013
Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw, rapport opgesteld door Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout gepubliceerd in april 2013

Banah, 2013a
http://www.banahuk.co.uk/technicalinfo/index.html

Banah, 2013b
Informatie toegestuurd door naar aanleiding van vragen op de site

CRH, 2013
Informatie vertrouwelijk besproken met Mantijn van Leeuwen.

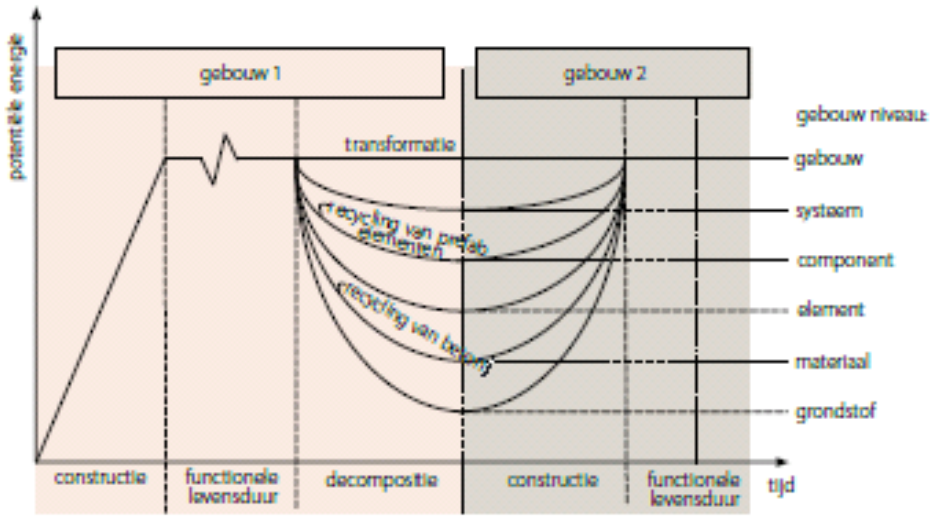
Bijlage B-7 Demontabel bouwen (hergebruik kanaalplaten kantoren in woningen)

Reductiekosten CO_2-emissie:	*419-1.256 €/ton*
CO_2-emissiereductiepotentieel:	*76.000-235.000 ton/jaar*
Implementatie potentieel:	*Laag*

Werkingsprincipe

Bij de huidige manier van slopen, wordt de betonnen hoofddraagconstructie wordt vergruisd waarna het beton wordt gerecycled en gebruikt als fundatie voor wegen of als grindvervanging in nieuw beton. Dit zorgt voor het verkleinen van de hoeveelheid afval, maar levert verder weinig milieuwinst op. De hoeveelheid CO_2 die vrijkomt bij het vervaardigen van beton wordt namelijk voor minstens 97% bepaald door de productie van cement. Voor het recyclen van beton is daarnaast ook veel energie nodig, omdat het beton moet worden vergruisd, gesorteerd en gewassen. Het levert veel milieuwinst op wanneer er een stap hoger op de afvalpreventieladder kan worden gezet en ook de betonnen hoofddraagconstructie kan worden hergebruikt.

Figuur 5 **Schematische weergave energie-efficiency verschillende manieren van betonrecycling**



Bron: Cement, 2013.

Kanaalplaten worden regelmatig toegepast in kantoorgebouwen, woongebouwen of woningen. Aangezien de belastingen op vloeren in woningen lager zijn dan in kantoren, is hergebruik vanuit kantoren naar woningbouw zonder meer mogelijk.

Wel zijn er een aantal functionele eisen aan vloeren die afwijken van de eisen aan kantoorvloeren waarmee rekening gehouden moeten worden:
- geluidswerendheid;
- brandwerendheid;
- visuele afwerking.

Hiervoor bestaan oplossingen, maar die komen wel met een meerprijs.

Reductiekosten:

De meerkosten van deze optie bestaan uit de volgende aspecten(Naber, 2012):
- meerkosten van het uiteen halen van het gebouw vergeleken met sloop: € 31,60 per bruikbare vierkante meter kanaalplaatvloer;
- meerkosten van opslag voor een jaar: € 2,60/m^2 vloer;
- meerkosten bij het leggen van de hergebruikte vloer in de woningen € 7,65/m^2 vloer in eengezinswoning tot € 15,60 /m^2 in appartementen.

Totaal inclusief één jaar opslag en exclusief eventuele extra transportkosten is € 41,85 /m^2 vloer voor een eengezinswoning en € 49,80/m^2 vloer voor appartementen. De inschatting van de onzekerheid op deze berekeningen is ca. 20%. Hiermee komen de reductiekosten op 33-56 €/m^2vloer.
De CO_2-emissiereductie door hergebruik van vloeren is afhankelijk van de mate waarin de toepassing ontworpen is voor hergebruik. Op basis van concrete projecten is uitgerekend dat de CO_2-emissiereductie varieert tussen de 0,040 en 0,095 ton CO_2/m^2 vloer.
Hieruit volgt dat de reductiekosten variëren tussen de 419 en 1.256 €/ton waarbij de kosten het laagst zijn voor appartementen: 419-854 €/ton afhankelijk van de mate waarin de kanaalvloerplaten aangepast moeten worden voordat ze gebruikt kunnen worden.

Omschrijving	Woonhuis	Appartement	
Meerkosten van het uiteen halen van het gebouw vergeleken met sloop: € 31,60 per bruikbare vierkante meter kanaalplaatvloer	31,6	31,6	€/m^2
Meerkosten van opslag voor een jaar: € 2,60/m^2 vloer	2,6	2,6	€/m^2
Meerkosten bij het leggen van de hergebruikte vloer in de woningen € 7,65/m^2 vloer	7,65	15,6	€/m^2
Meerkosten hergebruik totaal	41,85	49,8	€/m^2
Onzekerheidsmarge op inschatting meerkosten	20%	20%	%
Ondergrens meerkosten	33,48	39,84	€/m^2
Bovengrens meerkosten	50,22	59,76	€/m^2
CO_2-besparing laag	0,04	0,07	ton CO_2/m^2
CO_2-besparing hoog	0,04	0,095	ton CO_2/m^2
Reductiekosten (laag)	**837**	**419**	**€/ton CO_2**
Reductiekosten (hoog)	**1256**	**854**	**€/ton CO_2**

Reductiepotentieel

Op basis van cijfers van de VOBN en de BFBN schatten we in dat in 2010 naar schatting 5.000 kton beton is gebruikt voor vloeren/plafonds in woningen. Daarvan wordt circa 50% gelegd in laagbouw en 50% in hoogbouw.
Stel dat 50% van de vloeren inlaagbouw geschikt zijn voor hergebruik van vloeren uit kantoren en 75% van de vloeren in appartementen. Dan is uitgaande van de hoeveelheid beton per vloer volgens de MRPI gietbetonnen vloer er een potentieel van 1,9 miljoen m^2 vloer per jaar in woningen en 2,8 miljoen m^2 vloer per jaar in appartementen die op deze manier geproduceerd kan worden.

De CO_2-emissiereductie bedraagt circa 0,040 ton CO_2/m^2 vloer voor woningen en tussen de 0,07 en 0,095 ton CO_2/m^2 vloer voor appartementen (Naber, 2012). Dus daarmee komt reductiepotentieel op 76.000 ton CO_2 per jaar voor woningen en 235.000 ton CO_2 per jaar voor appartementen.

Omschrijving	Totaal	Woonhuis	Appartement	Eenheid
Hoeveelheid betonnen vloeren in 2010	4.367			kton betonmortel
Betonproducten woningen in 2010	2.428			kton betonproduct
Betongebruik vloeren van woningen	5.176			kton/jaar
Stel	5.000	kton beton voor vloeren/jaar		
MRPI blad VOBN gietbeton vloer	658			kg/m^2 vloer
Verdeling woonhuis appartement 50/50		2.500	2.500	kton vloer/jaar
Geschiktheid vloeren		50%	75%	
		1.250	1875	kton beton
		1.899.696	2.849.544	m^2 vloer
CO_2-emissiereductie door hergebruik voeren		0,04	0,07-0,095	ton CO_2/m^2
Reductiepotentieel		**75.988**	**235.087**	**ton CO_2/jaar**

Implementatiepotentieel (laag/middelmatig/hoog)

Technisch

Het is technisch mogelijk om een gebouw met prefab-betonelementen te demonteren in plaats van te slopen. Dit is gebleken uit twee eerder uitgevoerde projecten waarbij de constructie ook bestond uit geprefabriceerde betonnen wand- en vloerplaten (Naber, 2012).
Het nadeel van het demontageproces ten opzichte van het sloopproces is, dat er veel meer gebruik wordt gemaakt van handgereedschap. Hierdoor hebben bouwvakkers meer last van trillingen en geluidsoverlast. De veiligheid is ook een aspect waar meer aandacht aan moet worden besteed bij het demonteren. Het demontageproces zal dus verder moeten worden ontwikkeld en geoptimaliseerd om deze negatieve aspecten te minimaliseren.
Dus het technisch implementatiepotentieel is middelmatig.

Organisatorisch

De volgende maatregelen bieden de mogelijkheid voor een optimale afstemming van oud naar nieuw:

- Het aanleggen van een voorraad gebruikte platen op één of meerdere plekken in Nederland.
- Documentatie van de eigenschappen van deze platen in een database.
- Bij het ontwerp van een nieuw gebouw in een vroeg stadium checken in de data base welke tweedehands platen beschikbaar zijn, en welke aanpassingen nodig zijn om ze te kunnen plaatsen in het nieuwe pand.
- Ontwerpen van nieuwe woningen op hergebruik, bijvoorbeeld door het voorkomen van het maken van grote sparingen achteraf omdat het tijdrovend is en de kosten van de tweedehands platen hierdoor stijgen.

Dus het organisatorisch implementatiepotentieel is laag.

Financieel
Er zijn geen extra investeringen nodig. Sterker nog op dit moment hoeft niemand te betalen voor de milieukosten van het slopen van een gebouw. Zodra dat wel het geval zou zijn dan is hergebruik van betonnen vloeren veel goedkoper dan slopen. Dus het financieel implementatiepotentieel is hoog.

Conclusie
Laag.

Literatuur/Bronnen

Cement, 2013
Milieuwinst bij hergebruik kanaalplaten, door Nanda Naber (NIBE b.v), Dick van Keulen (TU Delft, fac. CiTG / Ingenieursstudio DCK), Michiel Haas (TU Delft, fac. CiTG / NIBE b.v.)
Dit artikel is een weergave van het afstudeeronderzoek van Nanda Naber (Naber 2012)

Naber, 2012
Reuse of hollow core slabs from office buildings to residential buildings, afstudeerscriptie van Nanda Naber, TU Delft faculteit civiele techniek, augustus 2012

Bijlage B-8 Slim breken in combinatie met Calciumsulpho-alimunaat productie

Reductiekosten CO_2-emissie: *-108 à -94€/ton*

CO_2-emissiereductiepotentieel: *1.320.000 à 1.560.000 ton/jaar*

Implementatie potentieel in 2020: *Laag*

Werkingsprincipe

Bij slim breken wordt het beton niet fijngemalen tot een standaard afmeting zoals in een reguliere breker, maar wordt gericht de zwakste schakel in het beton het cementsteen kapotgeslagen.
Dit heeft een aantal voordelen:

1. Door slim te breken komen de grondstoffen waaruit het beton is opgebouwd weer vrij. De zand en de grind fracties komen vrij als en zand en een grind fractie met het verschil dat uit laboratoriumproeven blijkt dat ze net iets beter binden dan zand en grind uit een zand of grind-winningsgebied. Waarschijnlijk omdat ze door het jarenlange contact met cement in het beton geschikter zijn geworden voor het binden aan cement.
2. De cement fractie komt vrij als fijne fractie. De fijne fractie kan bij 500 graden gedehydrateerd worden. Hierbij ontstaat Beliet en Calciumoxide, dat direct gebruikt kan worden in alternatieve CSH cementen (zie Bijlage B-3) of gebruikt kan worden als vulstof met bindeigenschappen vergelijkbaar met vliegas.
3. De teruggewonnen cementfractie kan ook tot Portland cement omgevormd worden door het te verhitten tot 1.450 graden. De benodigde energie voor verhitting is gelijk, maar de CO_2-emissie is minder omdat er geen decarbonisatie optreedt. Echter hiervoor moet eerst aangetoond worden dat bij slim breken de vervuiling van de cement fractie met alfa kwarts lager is dan bij andere methodes om cement terug te winnen, zie Bijlage D.

Reductiekosten

Door het werkingsprincipe zijn de krachten waaraan een slimme breker blootgesteld circa 10% van de krachten waartegen een reguliere breker bestand moet zijn. Dit betekent dat een slimme breker lichter uitgevoerd kan worden en een minder krachtige motor nodig heeft om een zelfde hoeveelheid puin te kunnen breken, zie Bijlage D.
Dit beperkt naar verwachting de investeringskosten en de energieconsumptie. Verder is er naar verwachting evenveel bedienend personeel nodig als bij een reguliere kraker. Echter, wil je de fijne fractie optimaal toepassen zul je wel overdekt moeten breken of de gebroken fractie direct inzetten in de cementproductie. Daarvoor zullen extra kosten gemaakt moeten worden zoals overkappingen en of silo's.
Daarom is de verwachting dat ondanks de benodigde innovatie de kosten van een slimme breker in aanschaf niet hoger zijn dan de kosten van een reguliere breker. Echter het apparaat bestaat nu alleen nog in de pilot fase dus er zijn nog geen praktijkcijfers beschikbaar.

Aan de baten kant vinden naar verwachting wel significante verschillen plaats. Een slimme breker produceert in plaats van betongranulaat waardevollere fracties op als grind, zand en een fijne fractie die als vliegasvervanger of grondstof voor alternatief CSH cement ingezet kan worden.

Samenstelling beton	%
Zand	38%
Grind	38%
Cementfractie	24%

Uitgaande van een klassieke samenstelling van beton van driekwart minerale fractie (50/50 zand en grind) en de rest cementfractie en de huidige prijzen voor grondstoffen (zie bijlage B) kan bepaald worden wat een ton beton gesloopt opbrengt na conventioneel slopen als betongranulaat en na slim breken als zand, grind en vliegasvervanger.

De CO_2-reductie per ton beton wordt grotendeels bepaald door de manier waarop de fijne fractie ingezet wordt. Hiervoor zijn twee opties:

1. Wordt de fijne fractie ingezet als vulmiddel met bindcapaciteit, dan heeft het hetzelfde emissiereductiepotentieel als vliegas in CEM X:
   De emissiereductiekosten komen in dat geval uit op -19 €/ton CO_2 (zie Bijlage B-2).
2. Wordt de fijne fractie ingezet als grondstof voor Calciumsulpho-aluminaat cement, dan wordt de decarbonisatiestap voor de productie van het beliet voorkomen. Daarmee zou de CO_2-emissiereductie 55-65% van CEM I worden. Dit type cement bevat 40-75% beliet. Afhankelijk van de cementsamenstelling in het beton levert één ton beton dus genoeg beliet op voor één ton beton op bassi van alterntief CSH cement van dezelfde kwaliteit.

Zand en betongranulaat hebben een vergelijkbare prijs, betongranulaat is ietsje goedkoper dan grind circa 3 €/ton. Uit de labtesten bij de TU/e is gebleken dat de cementfractie beter presteert als vulmiddel met bindereigenschappen dan vliegas. Dus we gaan er hier vanuit dat de cementfractie als vliegas verkocht kan worden. Dat betekent dat de opbrengsten per ton beton naar verwachting 6,4 €/ton meer opbrengen dan betongranulaat.

Onder de aanname dat de cementfractie die ontstaat door het hoge beliet gehalte ingezet kan worden als grondstof voor alternatief CSH cement zou de inzet van de slimme breker in combinatie met de productie van alternatief CSH cement voor iedere ton CO_2-emissie die voorkomen wordt € 94 tot € 108 minder kosten over de levenscyclus van het beton dan nu het geval is.

Omschrijving	Waarde
CO_2-reductie toepassen fijne fractie als grondstof beliet	55-65% CEMI
Dichtheid gemiddeld beton	2,36 ton/m^3
CO_2-emissie gemiddeld beton	0,14-0,16 kg CO_2/m^3
	0,06-0,07 kg CO_2/ton beton
Kosten produceren fijne fractie	-6,4€/ton beton
Reductiekosten	-108 à-94 €/ton

Reductiepotentieel

Zoals hierboven is uitgelegd is de mate waarin inzet van de slimme breker CO_2 tot reductie van CO_2-emissies leidt sterk afhankelijk van het gebruik van de fijne fractie die na slopen overblijft.

Uitgaande van de inzet van deze fijne fractie als vulmiddel met bindcapaciteit is het CO_2-reductiepotentieel 43.000-53.000 ton/jaar (zie Bijlage B-2).

Uitgaande van de inzet van deze fijne fractie als grondstof voor Calciumsulpho-aluminaat cement wordt het potentieel bepaald door de hoeveelheid Calciumsulpho-aluminaat dat geproduceerd wordt. Door inzet van de fijne fractie uit slim breken is de CO_2-emissie bij de productie van alternatief CSH cement 55-65% lager is dan dat van de productie van CEM I. Terwijl zonder deze beliet houdende grondstof het verschil 20-30% zou zijn. Dat maakt dat het reductiepotentieel 2,2 tot 2,8 maal hoger is dan ingeschat voor Calciumsulpho-aluminaat cement (zie Bijlage B-3).
Hiermee komt het reductiepotentieel dus op 1,3 tot 1,5 miljoen ton CO_2/jaar.

Omschrijving Waarde	Eenheid	
Cementconsumptie	4,8	Mton/jaar
CO_2-reductie bij vervanging OPC door CSA	55%-65%	%
Gemiddelde CO_2-emissie cement NL	0,5	ton/ton (Betondatabase)
Reductiepotentieel	1.320.000 à 1.560.000	ton CO_2/jaar

Implementatie potentieel(Laag/Middelmatig/Hoog)

Technisch
Recent is de eerste pilot plant van start gegaan bij de VAR. Daar zijn nog geen praktijkresultaten van beschikbaar. Uit de laboratoriumproeven is gebleken dat het principe werkt en dat slim breken zeer goed in staat is om staal, zand, grind en cementsteen van elkaar te scheiden. De vraag is hoe in de praktijk de geschiktheid is. Daarnaast is vooral regel- en sorteertechnologie nodig. Dus het technisch implementatiepotentieel is middelmatig.

Organisatorisch
Om de fijne fractie als actief vulmiddel te kunnen gebruiken moet er droog gebroken worden en moet de fijne fractie daarna meteen in het beton ingezet worden of opgeslagen worden in silo's. Fijne fractie moet door de markt wel erkend worden als grondstof voor alternatief CSH cement. Dit is nog onzeker, daarmee is het organisatorisch implementatiepotentieel vooralsnog laag.

Financieel
Beperkt vergeleken met een reguliere breker. Fijne fractie moet door de markt wel erkend worden als grondstof voor alternatief CSH cement en minimaal als vliegas(=vulmiddel met bindcapaciteit) betaald worden. Dus het financieel implementatiepotentieel is middelmatig.

Conclusie
Laag.

Literatuur/Bronnen

Florea, 2013
Slim breken sluit materiaalkringloop - Onderzoek naar toepassing nieuwe breektechniek door Miruna Florea en Jos Brouwers, TU Eindhoven, fac. Bouwkunde,unit Building Physics and Services in CEMENT 2013

Bijlage B-9 Kringbouw

Reductiekosten CO_2-emissie: *-56 à -24 €/ton CO_2*

CO_2-emissiereductiepotentieel: *44.000-52.000 ton/jaar*

Implementatiepotentieel in 2020: *Laag*

Werkingsprincipe
In het kringbouwconcept wordt gebroken schoon beton opgewarmd tot een temperatuur van circa 650-700 graden. Voor het terugwinnen van stenen uit schoonmetselwerkpuin kan gekozen worden voor een temperatuur van 500 graden. Door deze verwarming dehydrateert het beton(mortel). Daardoor zet het beton(mortel) uit. De afschuifkrachten die daarbij ontstaan zijn groot, waardoor het cementskelet wordt ontleed en het materiaal gemakkelijk mechanisch is te verkleinen tot drie fracties: grind en ander grof toeslag materiaal, zand en ander fijn toeslagmateriaal en een cementsteenrijke fractie.
Door de hoge afschuifkrachten breken bij toepassing va dit concept op metselwerkpuin ook veel stenen waardoor het terugwinnen van stenen uit schoonmetselwerkpuin alleen haalbaar is als de stenen vooraf losgewrikt zijn. Bij toepassing op beton zit er door de hoge afschuifkrachten relatief veel silicaat uit het grind en/of zand in de cementsteen rijke fractie (circa 50%). Dit beperkt de mogelijkheden om deze fractie in te zetten als grondstof voor cement. Maar de cementsteen rijke fractie heeft wel bindende eigenschappen waardoor toepassing 10-20% Portlandcement gebruik verminderd kan worden (TNO, 2008).

Reductiekosten
Het potentieel van de reductie van CO_2-emissie is voornamelijk gelegen in het terugdringen van de hoeveelheid Portland cement door het inzetten van de teruggewonnen fijne fractie als vulstof met bindcapaciteit, vergelijkbaar met de inzet van vliegas in CEM X. Dit betekent dat het CO_2-reductie potentieel vergelijkbaar is met de inzet van CEMX.

Omdat de energie die REKO inzet vrijkomt bij een afvalverbrandingsproces kan aangenomen worden dat zowel de energiekosten als de CO_2-reductie vergelijkbaar is met de inzet vliegas als vulstof met bindcapaciteit.
Hiermee zijn de reductie kosten vergelijkbaar met de inzet van vliegas in CEMX: -19 €/ton (zie Bijlage B-2).

Reductiepotentieel
Reductiepotentieel is meer inzet van vulmiddelen met bindcapaciteit.
Dit potentieel is vergelijkbaar met het potentieel van CEM X: 48.000 +/- 5.000 ton/jaar, zie Bijlage B-2.

Implementatie potentieel (Laag/Middelmatig/Hoog)

Technisch
Het beton moet van te voren gewassen worden, dit levert een fijne fractie waar nog geen toepassing voor is. Het gehele beton opwarmen heeft geen toegevoegde waarde en kost wel veel energie. Het is dus beter alleen de fijne fractie te verwarmen. De silicaatfractie in de fijne cementrijke fractie is met 50% vrij hoog en maakt gebruik als cementgrondstof minder waarschijnlijk. Dus het technisch implementatiepotentieel is laag.

Organisatorisch
De cementsteenrijke fractie wordt nog niet als vergelijkbaar met vliegas erkend (REKO, 2013). Dus het organisatorisch implementatiepotentieel is laag.

Financieel
Doordat het hele beton verhit wordt is het een relatief dure methode. Om het proces financieel rond te krijgen moet de fijne cementsteenrijke fractie als vergelijkbaar met vliegas betaald worden.
Volgens het TNO-rapport is de huidige installatie bij REKO niet optimaal (te lage temperatuur, te lage rotatiesnelheid roterende trommels).
De benodigde investering voor het realiseren van de juiste installatie bedraagt volgens opgaaf van REKO € 60-70 mln (REKO, 2013). Er moet een investeerder gevonden worden om de benodigde installaties te kunnen bouwen, zolang de markt niet een prijs vergelijkbaar aan vliegas wil betalen is er geen business case. Dus het financieel implementatiepotentieel is laag.

Conclusie
Laag.

Literatuur/Bronnen

REKO, 2013
Gesprek met David Heijkoop, directeur REKO BV, augustus 2013

TNO, 2008
TNO-rapport OG-RPT-APD-2008-00182, Kringbouw - Naar een duurzame grondstofvoorziening in de bouw, December 2008, door Evert Mulder

Bijlage B-10 Inzet bodemas AECs

Reductiekosten CO_2-emissie: *--56 à -24 €/ton CO_2*

CO_2-emissiereductiepotentieel: *44.000-52.000 ton/jaar*

Implementatie potentieel: *Laag*

Werkingsprincipe
Afvalenergiecentrales (AEC) produceren uit afvalstromen energie.
Daarbij komen naast elektriciteit en warmte ook rookgassen, vliegas en bodemassen bij vrij. Vliegassen worden al sinds lange tijd in beton toegepast. Nu blijkt dat er ook twee manieren zijn om bodemas in beton in te zetten:

- Als mineraalvervanger (vervanger van zand en grind) in de vorm van bodemasgranulaten (Betoniek, 2013).
- Als vulstof met bindcapaciteit in combinatie met vliegas ter vervanging van 50% van het CEMI cement (Fennis, 2011).

De CO_2-emissiereductie door toepassing van de laatste toepassing is significant. De afname van de CO_2-emissie vergeleken met conventioneel cement is direct gerelateerd aan de afname van het klinkergebruik.

Bodemassen kunnen direct zonder te wassen of na wassen ingezet worden. Wassen heeft als voordeel dat deze processtap alle metalen uit de bodemas verwijdert. Wassen brengt daarmee een extra processtap en een afvalstroom met zich mee die allebei tot hogere kosten van de inzet van bodemas leiden. De enige reden om te wassen is verwijderen van uitloogbare metalen zoals chloriden. Door inzet van bodemas in niet gewapende constructies waarin tot de conventionele materialen gedeeltelijk zijn vervangen is wassen niet nodig. Uit uitloogproeven voor niet vormgegeven bouwstof (dat is een niveau zwaarder dan waaraan stoeptegels moeten voldoen) blijkt dat zelfs na een ultrakorte gebruikstijd van 28 dagen tot 30% vervangen kan worden. Na verwachting zullen toetsen op stenen met een langere levensduur van bijvoorbeeld een paar jaar volledig aan de uitloogeisen voldoen. Dit komt omdat deze metalen enerzijds verdund worden door de aanwezigheid van schone grondstoffen en anderzijds omdat ze gebonden worden aan de andere materialen in het beton en daardoor minder uitlogen (Betoniek, 2013).

Reductiekosten
Het potentieel van de reductie van CO_2-emissie is voornamelijk gelegen in het terugdringen van de hoeveelheid Portland cement door de inzet van bodemas als vulstof met bindcapaciteit, vergelijkbaar met de inzet van vliegas in CEM X. Dit betekent dat het CO_2-reductiepotentieel vergelijkbaar is met de inzet van CEMX.

Aangezien bodemas net als vliegas vrijkomt bij het opwekken van energie uit afval zijn de reductie kosten vergelijkbaar met de inzet van vliegas in CEMX: -19 €/ton (zie Bijlage B-2).

Reductiepotentieel
Reductiepotentieel is meer inzet van vulmiddelen met bindcapaciteit.
Dit potentieel is vergelijkbaar met het potentieel van CEM X: 48.000 +/- 5.000 ton/jaar, zie bijlage B-2.

Implementatie potentieel (Laag/Middelmatig/Hoog)

Technisch
De toepassing van bodemas als vulstof met bindcapaciteiten is nog in de laboratoriumfase (Fennis, 2011). In praktijktesten zal de mate waarin cementreductie mogelijk is bevestigd moeten worden. Daarnaast is er de kwestie met de aanwezigheid van metalen. Door de aanwezigheid van metalen kan bodemas alleen toegepast worden in ongewapend beton. Eerste proeven wijzen uit dat tijdens recycling uitlogen geen probleem hoeft te zijn, de vraag is echter of dat nog steeds geldt in combinatie met recyclingtechnieken zoals kringbouw en slim breken waarbij de cementfractie in veel fijnere vorm wordt opgebroken.
Verder is het de vraag of bodemassen voldoende consistent zijn in kwaliteit om als vulstof met bindcapaciteiten ingezet te kunnen worden voor cementvervanging.
Dus het technisch implementatiepotentieel is laag.

Organisatorisch
Voor toepassingen in kleine betonwaren zoals stoeptegels zijn de benodigde procedures bijna afgerond. De hoop is dat hiermee voldoende ervaring opgebouwd wordt om later verdere toelatingsprocedures mogelijk te maken.
Dus het organisatorisch implementatiepotentieel is middelmatig.

Financieel
Is de oplossing aantrekkelijk, de afvalstroom van de AEC wordt een grondstof met toegevoegde waarde in toepassing als vulstof met bindeigenschappen.
Dus het financieel implementatiepotentieel is hoog.

Conclusie
Laag.

Literatuur

Betoniek, 2013
AEC-granulaat – over het ontstaan en de toepassing in beton. Betoniek, Band 16, uitgave 01 van februari 2013.

CE Delft 2013
Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw, rapport opgesteld door Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout gepubliceerd in april 2013

Fennis, 2011
Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization, Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor aan de Technische Universiteit Delft, 17 januari 2011 door S.A.A.M. Fennis.

Bijlage B-11 Wapeningsstaal vervangen door staalvezels

Reductiekosten CO_2-emissie:	*0 €/ton*
CO_2-emissiereductiepotentieel:	*81.000 ton/jaar*
Implementatie potentieel:	*Laag*

Werkingsprincipe

Om de treksterkte van beton te vergroten wordt er wapeningsstaal aan het beton toegevoegd. Bij gietbouw is er een alternatieve methode beschikbaar: het bijmengen van staalvezels bij het beton. Omdat de staalvezels beter verdeeld kunnen worden over het beton is er in principe minder staal nodig dan bij gebruik van conventionele wapeningsstaal. Hierbij gelden de volgende belangrijke beperkingen:

- De gelijkmatigheid van de verdeling van de staalvezels is beter te controleren naarmate de concentratie van de vezels hoger is.
- Bij gebruik van staalvezels moet het gehele casco met één concentratie betonvezels gebouwd worden anders moet eerst gewacht worden tot de ene laag uitgehard is voordat de volgende laag gestort kan worden.
- Bij conventioneel breken blijft circa 30% van de vezels achter in het beton-granulaat. Betongranulaat waaruit staalvezel steekt, worden egels genoemd. De aanwezigheid van egels, maakt al het betongranulaat van staalvezelbeton onbruikbaar. Tenzij er gebroken wordt met de slim breken methode. Bij deze methode is de fractie egels <0,5% en daarmee verwaarloosbaar.

Het gemiddeld staalgebruik voor wapening in gebouwen is circa 45-65 kg/m^3 (uitgaande van 40-60 kg/m^3 in vloeren, 80 kg/m^3 in funderingen en 1-6 kg/m^3 in wanden). Proeven bij de TU/e uit 2010 met reguliere staalvezelbeton laten zien dat met een concentratie van 50 kg/m^3 een casco gebouwd kan worden (cement, 2010).
Dat betekent dat er met vergelijkbare staal concentraties gebouwd kan worden op basis van staalvezels. Inmiddels heeft Bekaert een nieuw type staalvezel ontwikkeld waarmee hetzelfde casco bij een concentratie van 35 kg/m^3 gebouwd zou kunnen worden (Bekaert, 2013).

Reductiekosten

In het geval van reguliere staalvezels is er geen sprake van een significante reductie in staalgebruik. Dus kan er ook geen sprake zijn van reductiekosten. In het geval van de nieuwe staalvezels is de marktprijs dusdanig hoger dat het betonmengsel met 35 kg/m^3 nieuwe staalvezels verkocht wordt voor dezelfde prijs als anders een betonmengsel met 50 kg/m^3 reguliere vezels verkocht wordt (Bekaert 2013). Hiermee zijn de reductiekosten nul.

Reductiepotentieel

In principe zijn staalvezels toepasbaar op alle gietbetonnen constructies waarin wapeningsstaal toegepast wordt. Er zijn al producten gemaakt tot sterkte klasse B105 (Bruil, 2013)
In voorgespannen beton is het minder bruikbaar omdat er dan alsnog een wapeningsstaal in de vorm aangebracht moet worden om het betonproduct te lossen uit de bekisting.

Daarom gaan we als eerste benadering van het toepassingspotentieel uit van 100% vervanging van alle wapeningsstaal in woningbouw en utiliteitbouw. Hiermee komt het toepassingspotentieel op circa 81.000 ton per jaar.

Omschrijving	Laag	Hoog	Gem.	Eenheid
Hoeveelheid wapening	242	318	280	kton staal/jaar
Hoeveelheid staalvezel als vervanging wapening	179	256	217	kton staal/jaar
CO_2-emissie staalproductie			1,285	ton CO_2/ton staal
CO_2-emissie wapening			360	kton CO_2/jaar
CO_2-emissie staalvezel			279	kton CO_2/jaar
Reductiepotentieel			**81**	**kton CO_2/jaar**

Implementatiepotentieel (laag/middelmatig/hoog)

Technisch
Het gebruik van staalvezels staat nog aan het begin van zijn ontwikkeling. Het wordt toegepast in bijvoorbeeld keldermuren (reguliere vezels in een concentratie van 25-35 kg/m^3) en er is een enkele grootschalige test gedaan zoals bij de TU/e in 2010. Ook de optimale vormgeving en samenstelling van de vezels is nog in ontwikkeling. Dus het technisch implementatiepotentieel is laag.

Organisatorisch
Het gebruik van staalvezelbeton is nog geen standaardonderdeel van ontwerpregels en van het bouwbesluit. Dus het organisatorisch implementatie-potentieel is laag.

Financieel
De ontwikkelaars van staalvezels claimen dat er bespaard kan worden bij het gieten van betonnen constructies op basis van staalvezels omdat in één keer door muren en funderingen gestort kunnen worden zonder dat daar eerst wapeningen in aangebracht hoeven te worden. Dus het financieel implementatie-potentieel is hoog.

Conclusie:
Laag.

Literatuur/Bronnen

Cement, 2010a
Proefproject staalvezelbeton door Michel Menting en Ab van den Bos van ABT in de Cement, 2010

Cement, 2010b
Betontechnologisch onderzoek door Bram Hazenberg en Joris Blom van BAS Research & Technology in de Cement, 2010

Bekaert, 2013
Telefonische consultatie van Anne Hoekstra, Technical Manager bij Bekaert

Bruil, 2013
Telefonische consultatie van Leo Stekelenburg, Bruil in Ede

Bijlage B-13 Langere ontkistingstijd in gietbouw

Reductiekosten CO_2-emissie:	*0 à 1.354 €/ton*
CO_2-emissiereductiepotentieel:	*107.000 ton/jaar*
Implementatie potentieel:	*Hoog(voor laagbouw), laag (voor hoogbouw)*

Werkingsprincipe

Als je het beton 2x zoveel tijd geeft om uit te harden is er minder cement nodig om de benodigde ontkistingssterkte te halen[9]. Hoeveel minder is afhankelijk van de specifieke toepassing. In bepaalde type projecten, zoals slanke hoogbouw wordt de opleverdatum bepaald wordt door de snelheid waarmee de betonnen structuren opgeleverd kunnen worden. In deze situaties zorgt een langere ontkistingstijd voor vertraging in de bouw en dat kost geld. Enerzijds omdat en er boetes staan op later opleveren. Anderzijds omdat langere bouwtijden kosten met zich meebrengen voor materiaalkosten en personeel. Bijvoorbeeld een kraan staat er langer, een uitvoerder werkt langer op een project.
In andere type projecten zoals grootschalige laagbouw in het weiland hoeft een langere ontkistingstijd niet voor vertraging en extra kosten te zorgen, mits er aan het begin van het project al rekening mee gehouden wordt.
Daarnaast heb je nog de bekistingsmethode: bij het gebruik van de 'wand en breekplaat' methode maakt het niet zoveel uit hoeveel langer je ontkistings-tijd is, in het geval van tunnelbouw is er sprake van een relatief hoge huur voor de bekisting, die zich alleen terugverdiend bij een korte ontkistingstijd.

Reductiekosten

De CO_2-emissiereductiekosten is het resultaat van veranderingen in twee typen Reductiekosten: betonkosten en organisatiekosten (materiaal en mensen die langer voor een project beschikbaar moeten zijn).
De organisatiekosten van een twee maal zo lange ontkistingstijd bij gietbouw in hoogbouw van 7-10 etages wordt ingeschat op 100 €/m^3 op de betonkosten. Bij laagbouw in het weiland ligt dat tussen de 0 en 10 €/m^3 (Heijmans, 2013). Volgens de CUR rekentool is de afname van de CO_2-emissie bij de productie van de betonmortel 0,07 ton CO_2/m^3 beton en 0,14 ton CO_2/m^3 beton voor respectievelijk warm en koud gieten. Daarmee komen de organisatiekosten op respectievelijk 91 €/ton CO_2 in de laagbouw en 909 €/ton CO_2 in de hoogbouw.

CO_2-emissie door gietbouw voor gebouwen is gemiddeld 92 kg/m^3 beton (aan de hand van CUR rekentool). Door de langere ontkistingstijd kan de cement-samenstelling aangepast worden en is de CO_2-emissie gemiddeld 36% lager onafhankelijk of het koude of warme gietbouw betreft. De verandering in grondstoffen die daardoor mogelijk is geeft een afname van grondstofkosten van 3% (1,90 €/m^3) voor koud gegoten beton en 9% (5,23 €/m^3) voor warm gegoten beton (Bijlage F: input Leo D).

[9] Overstappen van koude gietbouw naar warme gietbouw levert per eenheid beton een nog groter besparingspotentieel op zowel in emissiereductie als financieel. Dit is echter een maatregel die nu al toegepast wordt en waarvan de toepassing voornamelijk beperkt wordt door veiligheidsafwegingen en het kunnen verkrijgen van hindervergunningen voor de branders.

Dit betekent dat de materiaalkosten met 14 €/ton CO_2 afnemen voor koude gietbouw en 75 €/ton CO_2 afnemen voor warme gietbouw.

Hiermee komen de reductiekosten voor laagbouw uit op 0-58 à 68 €/ton CO_2 en voor hoogbouw op circa 706-1.354 €/ton CO_2, afhankelijk van de mate waarin er al warm gegoten wordt (dan is de CO_2-winst geringer en de reductiekosten dus relatief hoger).

Omschrijving	Warm	Koud	Eenheid
Organisatiekosten laagbouw	0-10	0-10	€/m^3 beton
Organisatiekosten hoogbouw	100	100	€/m^3 beton
CO_2-emissie per ton betonmortel	0,07	0,14	ton CO_2/m^3 beton
Organisatiekosten laagbouw	143	72	€/ton CO_2
Organisatiekosten hoogbouw	1429	719	€/ton CO_2
Reductie materiaalkosten	-75	-14	€/ton CO_2
Reductiekosten laagbouw	**0-68**	**0-58**	**€/ton CO_2**
Reductiekosten hoogbouw	**1.354**	**706**	**€/ton CO_2**

Reductiepotentieel

Het toepassingspotentieel is sterk afhankelijk van hoeveel woningen en kantoren er gebouwd worden. Volgens het CBS (CBS Statline) neemt het aantal huishoudens in Nederland tussen 2011 en 2020 toe met circa 500.000 huishoudens. Samen met de hoeveelheid woningen die vervangen moeten worden betekent dat dat in de komende tien jaar minimaal 60.000 woningen per jaar gebouwd moeten worden. We kunnen dus rustig stellen dat het referentie jaar 2010 van deze studie met 56.000 opgeleverde woningen een conservatieve schatting vormt.
Naar verwachting zal in de toekomst 50% hoogbouw en 50% laagbouw in het weiland zal zijn (Heijmans, 2013). Het reductiepotentieel wordt bepaald door de verandering in het cement die hierdoor mogelijk is. Volgens de CURtool berekening zoals weergegeven in Bijlage G neemt de hoeveelheid CO_2-emissie af met 36%.
Uitgaande van een totale CO_2-emissie in de woningbouw met gietbetonbouw van 297.000 ton CO_2/jaar in 2010 (CE Delft, 2013 op basis van gegevens VOBN en BFBN) zou bij een gelijkblijvende woningbouw het reductiepotentieel van deze maatregel 107.000 ton CO_2 per jaar bedraagt.

Totaal CO_2-emissie woningbouw	**542**	**kton CO_2/jaar**
Totaal betonproducten	245	kton CO_2/jaar
Gietbetonbouw	297	kton CO_2/jaar
Reductiepotentieel	**107**	**kton CO_2/jaar**

Implementatiepotentieel(laag/middelmatig/hoog)

Technisch
Er zijn geen technische belemmeringen om deze optie toe te passen. Dus het technisch implementatiepotentieel is hoog.

Organisatorisch
De implementatie van deze maatregel wordt bemoeilijkt doordat de trend in de bouw is om steeds sneller te moeten opleveren. Verder is afstemming in een vroeg stadium van het project nodig. Voor de onderdelen van de bouw die niet op een kritisch tijdspad zitten kan door goede communicatie van de voordelen van een langere ontkistingstijd voor de CO_2-emissies deze hindernissen voor een groot deel overkomen kunnen worden. Dus het organisatorisch implementatiepotentieel is hoog voor laagbouw. Aangezien bij hoogbouw er wel vaak sprake is van een kritische tijdspad is daar het organisatorisch implementatiepotentieel laag.

Financieel
Langere ontkistingstijd is geen logische combinatie met tunnelbekisting. Deze methode is volledig ontwikkeld op snelheid en daar is de huurprijs van het benodigde materiaal dan ook naar. Als er gekozen wordt voor een langere ontkisingstijd zal er ook gekozen moeten worden voor conventionele bekistingsmethodes. Er hoeven verder geen investeringen gedaan te worden. Dus afgezien van de reductiekosten zelf is het financieel implementatiepotentieel hoog.

Conclusie
Hoog (afgezien van de financiële meerkosten).

Literatuur/bronnen

CBS Statline, 2013
CBSstaline, kerncijfers van de huishoudensprognose 2011-2060, 1 mei 2013 http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=80982NED&LA=NL

CE Delft, 2013
Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw, rapport opgesteld door Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout gepubliceerd in april 2013

Heijmans, 2013
Telefonisch overleg met Theo Smits, Adviseur Energie en Duurzaamheid Vastgoed en Woningbouw bij Heijmans Vastgoed en Woningbouw

Bijlage 16 Zelfhelend beton

Reductiekosten CO_2-emissie:	*-315 à 1.405 €/ton*[10]
CO_2-emissiereductiepotentieel:	*128.000 à 226.000 ton/jaar*
Implementatie potentieel:	*Middelmatig*

Werkingsprincipe
De werking van zelfherstellend beton is te vergelijken met oude bakstenen bruggetjes in Utrecht, Delft en Amsterdam. Professor Rob van Hees van de faculteit Bouwkunde in Delft, heeft een verklaring voor het feit dat die eeuwenoude constructies het zo lang uithouden. “De mortel waarmee die oude bruggetjes zijn opgemetseld, bevat naar moderne maatstaven erg veel kalk. Als er een scheurtje ontstaat, wordt het water waar ze instaan, naar binnen gezogen. Bij modern beton is dat het begin van het einde, maar bij die oude bruggetjes lost het water de kalk in het metselwerk op, de kalk stroomt in de scheurtjes en hardt daar weer uit. Zelfherstellend vermogen ‘avant la lettre’.”

In het hypermoderne zelf herstellend beton is het ook een kwestie van kalk bijmengen. Een exact uitgemeten hoeveelheid van een heel speciale soort kalk moet ervoor zorgen dat het beton circa 20% langer meegaat en circa 30% minder reparaties nodig heeft. Dit is de verwachting van de onderzoekers op basis van proeven in het lab waarbij scheurtjes tot 0,4 mm hersteld werden door het materiaal zelf (Jonkers, 2013). Praktijktesten moeten uitwijzen of dit ook daadwerkelijk het geval is.

Inmiddels zijn in Japan al bruggen gebouwd die zelfs slanker gebouwd zijn op basis van de eigenschappen van dit materiaal (kennislink, 2005).

Reductiekosten
Proeven in het lab hebben inmiddels uitgewezen dat scheurtjes tot 0,4 mm hersteld kunnen worden door het materiaal zelf. Op basis van de test-resultaten verwachten de onderzoekers (Jonkers, 2013).
Het beton zelf is 52,5 €/m^3 beton duurder.

Daar staat tegenover dat het beton niet preventief gecoat hoeft te worden iedere 10 jaar.
De kosten van het coating bedragen de eerste keer 18 €/m^2 beton. De daarop volgende keren kost het meer omdat eerst de oude coatingslaag verwijderd moet worden. Dat is exclusief de kosten voor het bereikbaar maken van het beton. Ervan uitgaande dat 0,1 à 0,3 m^2/m^3 beton gecoat moet worden variëren de kosten van het coaten tussen de 22 en de 65 €/m^3 over de levensduur van het beton. Dit betekent dat de meerkosten variëren tussen de -12 en +31 €/m^3 beton.
De CO_2-emissie van beton in civieltechnische en GWW-toepassingen varieert tussen de 106 en 280 kg CO_2/m^3 afhankelijk van de toepassing, 20% reductie in gebruik betekent dus een reductie van 22 à 39 kg CO_2/m^3.
Hiermee variëren de reductiekosten tussen de -315 en +1405 €/ton CO_2 afhankelijk van de samenstelling van het beton, de levensduur verlenging en de omvang van het oppervlak van het beton dat gecoat dient te worden.

[10] In deze reductiekosten zijn nog geen bereikbaarheidskosten meegenomen. Die zouden het aandeel negatieve of kosten neutrale situaties sterk doen oplopen.

Daarbij moet wel opgemerkt worden dat bij de kostenbesparing van het zelfhelende beton geen kosten voor de bereikbaarheid zijn meegenomen. Deze kosten kunnen sterk oplopen en maken het aandeel waarin deze verduurzamingsoptie kostenneutraal of gunstiger uitvalt nog groter.

Omschrijving			Eenheid
CO_2-emissie GWW beton	50%	50%	
	0,11	0,11-0,28	ton CO_2/m^3
Verlenging levensduur	20%	20%	
CO_2-emissie reductie	**0,022**	**0,039**	**ton CO_2/m^3**
Bestaande methodiek			
1x per 10 jaar coaten	0,1	0,1	keer/jaar
Levensduur GWW	100	100	jaar
Kosten coating per keer	18	18	€/m^2.keer
Aantal keer over de levensduur	12	12	keer
Deel beton dat gecoat wordt	0,1	0,3	m^2/m^3
Kosten coaten over de levensduur	**21,6**	**64,8**	**€/m^3**
Kosten zelfhelend beton	**52,5**	**52,5**	**€/m^3**
Meerkosten	**30,9**	**-12,3**	**€/m^3**
Reductiekosten	**1405**	**-559**	**€/ton**
	792	**-315**	**€/ton**

Reductiepotentieel

De vermindering van de CO_2-emissie is gerelateerd aan de 20% langere levensduur. De inzet van beton in GWW-toepassingen bedroeg in 2010 5,8 miljoen m^3 beton. De CO_2-emissie van beton (exclusief staal) is voor 50% van het GWW beton ingeschat op 0,11 tonCO_2/m^3 voor de andere helft varieert het tussen de 0,11 en 0,28 ton/m^3 afhankelijk van de toepassing. Daarmee komt het reductiepotentieel op 128.000 à 226.000 ton/jaar.

Omschrijving	Waarde	Eenheid
GWW beton gebruik in 2010	5,8	mln. m^3/jaar
CO_2-emissie GWW beton:		
50%	0,11	ton CO_2/m^3
50%	0,11-0,28	ton CO_2/m^3
Verlenging levensduur	20%	
Reductiepotentieel	127.600-226.200	ton/jaar

Implementatiepotentieel(laag/middelmatig/hoog)

Technisch

Deze methode heeft zich op laboratoriumschaal bewezen. Er worden nu praktijktesten gedaan. Inmiddels worden ook spray-on versies aangeboden waarmee makkelijk en goedkoop ervaring opgedaan kan worden met dit product. Het technisch potentieel is dus middelmatig.

Organisatorisch

Om een hogere betonprijs te kunnen accepteren in de bouwfase, zal er gewerkt moeten worden met de total cost of ownership bij de aanbesteding. Deze manier van werken is in opkomst, maar nog niet standaardpraktijk, daarmee wordt het organisatorisch potentieel als middelmatig ingeschat.

Financieel:
Er zijn geen grote investeringen nodig om deze technologie toe te passen, daarmee wordt het financieel potentieel als middelmatig ingeschat.

Conclusie:
Middelmatig.

Bijlage 17 Betonkernactivering met warmtepomp en WKO

Reductiekosten CO_2-emissie:	*609 €/ton*
CO_2-emissiereductiepotentieel:	*423.000 ton/jaar*[11]
Implementatie potentieel:	*Laag*

Werkingsprincipe:
Betonkernactivering is een zeer efficiënte methode om het beton van een gebouw op een gewenste temperatuur te brengen. Als betonkernactivering geïntegreerd is in het gebouwontwerp zorgt de warmtecapaciteit van het beton via stralingswarmte voor het reguleren van de temperatuur van de ruimtes in het gebouw. Als het beton warmer is dan deze ruimtes geeft het beton via warmtestraling deze warmte af aan de ruimten en als het beton koeler is neemt het de warmte uit de omgeving op en koelt zo.
Omdat het oppervlakte waarover de temperatuur uitgewisseld wordt groot is, is betonkernactivering geschikt voor combinatie met lage temperatuur-verwarming op basis van een warmtepomp aangesloten op een warmte/koude-opslag (WKO) systeem in de bodem. Een warmtepomp in combinatie met WKO is een zeer efficiënte manier van warmte en koelte produceren.
De betonkernactivering is dus het afgifte systeem voor de warmtepomp met WKO. De energiebesparing zelf vindt grotendeels plaats door het gebruik van de warmtepomp en de WKO. De bijdrage van de betonkernactivering uit zich voornamelijk in het comfort (minder temperatuurschommelingen).

Voor de bepaling van reductiekosten en reductiepotentieel van de combinatie betonkernactivering met warmtepomp en WKO baseren we ons op berekeningen van DGMR Bouw BV uit Den Bosch (DGMR, 2012).

DGMR Bouw heeft voor een woning doorgerekend wat het effect zou zijn van het toepassen van Betonkernactivering met warmtepomp en WKO :
De toevoeging van betonkernactivering, warmtepomp en WKO in een 15% vermindering van het energieverbruik. De combinatie van betonkernactivering, warmtepomp en WKO wordt in het vervolg aangeduid met BKA.

Van 2015 is voor nieuwbouw woningen een maximale EPC =0,4 toegestaan.
Bij nieuwbouw woningen kan in de laagbouw een EPC van 0,4 gehaald worden zonder lagetemperatuurverwarmingssysteem mits er voldoende ruimte is voor minimaal 8 m^2 PV panelen per dak en het dak de juiste oriëntering heeft.

Vanaf 2020 moeten alle nieuwbouw voldoen aan EPC = 0.Hierdoor is er vanaf 2020 er geen EPC winst meer te halen door toepassing van BKA omdat er dan al sprake is van een lage temperatuurverwarmingssysteem en het effect van alleen de betonkernactivering op de EPC verwaarloosbaar is.

[11] Tussen 2015 en 2020 daarna stop het.

Reductiekosten

Op basis van de informatie in het stuk van DGMR is bepaald welke uitgangssituatie nodig is om een woning te bouwen met een EPC van 0,4 zonder gebruik te maken van een lage temperatuurverwarmingssysteem en op welke EPC je uitkomt door het toevoegen van een BKA-systeem.

Woning EPC = 0,4

Categorie	Omschrijving	Waarde
Energiegebruik in basishuis:	EPC = 0,4	12.000 MJ primair /jaar
Elektriciteit:	1.000 kWh/jaar	7.200 MJ primair in 2010 (CBS, 2013)
Warmte:	537 m^3 gas in HR 107ketel	17.193 MJ primair (32 MJ/m^3)
8 panelen:		8.000 MJp elektriciteit (Agentschap NL, 2011)
Gasrekening	Verbruiksdeel	279 €/jaar
	Aansluitkosten	180 €/jaar
elektriciteitsrekening	Verbruiksdeel	156 €/jaar
CO_2-emissie	Gas	0,73 ton/woning.jaar
	Elektra	0,46 ton/woning.jaar
	Totaal	1,19 ton/woning.jaar

Gebruikmakend van de factsheets WK2020 en cijfers van het CBS en Stimular is berekend hoeveel dit vervolgens oplevert in termen van CO_2-emissiereductie en energiekosten besparing. De belangrijkste besparing is dat er geheel geen gasaansluiting meer nodig is, terwijl de gebouw gebonden elektriciteitskosten al volledig gedekt worden door de benodigde zonnepanelen.

Woning EPC = 0,4 +BKA (netto EPC =0,3)

Categorie	Omschrijving	Waarde
Energiegebruik in basishuis	EPC =0,3	7.620 MJ primair/jaar
8 panelen:		8.000 MJp elektriciteit (Agentschap NL, 2011)
All electric	Panelen + energiegebruik	7.200 MJ primair in 2010 (CBS, 2013)
Gasrekening	Vervalt	0 €/jaar
Elektriciteitsrekening	Verbruiksdeel	166 €/jaar
CO_2-emissie	Gas	0 ton/woning.jaar
	Elektra	0,487 ton/woning.jaar
	Totaal	0,487 ton/woning.jaar

Investeringen om een EPC=0,4 + BKA-woning te maken

Categorie	Omschrijving	Waarde
Extra kosten uitgangssituatie:	8 m^2 zonnepanelen à 200 €/m^2	€ 1.600/woning
Meerkosten BKA i.p.v. HR ketel		€ 12.500/woning
Totale investering		*€ 14.100/woning*
Verandering energiekosten	Gasrekening en aansluiting	€ -459/woning.jaar
	Elektriciteitrekening	€10/woning.jaar
Totale verandering energiekosten		€ -450/woning.jaar
Discontovoet	Voorgeschreven rente ministerie van Financiën	5,5%
Levensduur BKA-systeem	warmtepomp	20 jaar
CO_2-emissiereductie		0,70 ton/woning.jaar
Reductiekosten		609 €/ton

Hiermee komen de reductiekosten op circa 609 €/ton CO_2.

Reductiepotentieel

De eerste aanname is dat deze maatregel alleen toegepast kan worden bij gebouwen die nu nog niet op de tekentafel liggen en die voor 2020 gebouwd worden. De tweede algemene aanname is dat als de norm gehaald wordt met een basis gebouw en daarboven op wordt BKA toegevoegd dat het CO_2-emissiereductiepotentieel circa 15% is per gebouw. Dit betekent dat er een relatief groot dakoppervlak beschikbaar moet zijn voor PV panelen. Dit is alleen het geval in laagbouw.

Dus het gaat bij deze verduurzaming om de nieuwbouwwoningen die tussen 2015 en 2020 gerealiseerd worden. Zoals aangegeven in Bijlage B-12 is het woningpotentieel per jaar circa 60.000 woningen waarvan 50% in laagbouw gerealiseerd wordt. Dus het gaat om 30.000 woningen per jaar gedurende 5 jaar.
Vergelijking van de emissies van de woningen met en zonder BKA laat zien dat invoering van deze optie een netto CO_2-emissiereductie van 0,7 ton CO_2 per woning per jaar mogelijk maakt, gedurende de levensduur van de warmtepomp (20 jaar). Op basis van deze aannames komen we op een gezamenlijk besparingspotentieel van circa 423.000 ton CO_2/jaar in de periode van 2015 tot 2020.

Omschrijving	**Waarde**	**Eenheid**
CO_2-emissiereductie per woning	0,70	ton/woning.jaar
Levensduur warmtepomp	20	jaar
Totale CO_2-reductie over levensduur warmtepomp	14	ton CO_2/woning
Aantal woningen	30.000	woning/jaar
Reductiepotentieel	**422.752**	**ton/jaar**

Implementatiepotentieel (laag/middelmatig/hoog):

Technisch
Niet overal zijn waterdragende lagen beschikbaar op basis waarvan een WKO kan functioneren. Soms moet er dus gekozen worden voor een grondwater warmtepomp of een lucht-water of lucht-lucht warmtepomp. Die pompen zijn vaak goedkoper, maar hebben ook veel lagere CO_2-reductiepotentieel.
Verder is keuze voor laagbouw bij toepassing van betonkernactivering een vreemde keuze, het systeem functioneert het beste in hoogbouw.
Vanuit het verlengen van de levensduur is het de vraag of het mengen van casco en installatie techniek gewenst is. Het casco behoort toch zeker 100 jaar mee te gaan, voor installatietechniek is 20 jaar een reële levensduur. Het scheiden van installatiesystemen is een belangrijk uitgangspunt van duurzaam bouwen waar deze technologie aan voorbij gaat (SBR, 2013).
Daarmee wordt het technisch potentieel als middelmatig ingeschat

Organisatorisch
voor de implementatie van het bovengeschetste concept afhankelijke van het feit dat de opdrachtgever voor een bepaald bouwconcept kiest waarin een EPC plus BKA-concept toegepast kan worden. Het vraagt een bepaalde ambitie om voor meer te kiezen dan alleen de EPC norm. De vraag is of bij mensen die deze ambitie hebben dit concept zo aansprekend is. In de markt bestaan andere concepten, voor huiseigenaren in de vorm van een energienul of notaloze woning en voor utilteitsgebouwen de Breeam score. In beide concepten spelen lagetemperatuursverwarming en koelingsystemen een belangrijke rol, al dan niet gekoppeld aan betonkernactivering. Echter in al die gevallen is de bijdrage van het betonkernactiveringsysteem als toevoeging op de lagetemperatuursverwarming en -koeling verwaarloosbaar. daarmee wordt het organisatorisch potentieel als laag ingeschat

Financieel
Bij platform 31 is een overzicht van duurzaam bouwen concepten opgevraagd. Het gaat hierbij om energienul- en notalozewoningen. In deze concepten wordt nauwelijks melding gemaakt van beton, behalve een enkele keer als er gebruik gemaakt wordt van prefab elementen om snel tegen vaste prijs en kwaliteit te kunnen bouwen (Platform 31, 2013). Beton wordt dus gezien als een manier om duurzaam bouwen betaalbaar te houden. Daarmee wordt het financieel potentieel als hoog ingeschat.

Conclusie
Laag.

Literatuur
CBS, 2013
Rendementen en CO_2-emissie van elektriciteitproductie in Nederland, update 2011 3

DGMR, 2012
“De waardering van thermische massa en betonkernactivering in NEN 7120”, Rapport E.2011.1175.00.R001 door Annemarie Weersink en Ieke Kuijpers – Van Gaalen in opdracht van het Cement en Betoncentrum, opgeleverd november 2012

Platform 31,
Ik heb een idee, ENERGIENOTA=NUL WONINGCONCEPTEN, folder aangeboden door Platform 31, De energiesprong, voorheen SEV
www.ikhebeenidee.nu

SBR, 2013
Telefonisch overleg met Cindy Vissering, Programmamanager Duurzaam Bouwen bij SBR CURnet.

Stimular, 2011
CO_2 factoren in de Milieubarometer, update 26 juni 2011 door Stichting Stimular

WK2020, 2013
Factsheet 7.5 van WK2020 door Laure Itard

Bijlage C Cementchemie en notatie

De wereld van de beton grenst aan die van de chemie. Het omschrijven van de reacties ie plaatsvinden bij het produceren en recyclen van beton in chemische termen kan veel inzicht geven in wat er gebeurt. Echter, de betondeskundigen hebben in de loop der jaren een eigen mineralenschrift ontwikkeld. Voor hen die wel bekend zijn met de notatie van chemische formules, maar niet met het mineraalschrift kan deze manier van noteren verwarrend zijn.
Daarom, zowel voor het inzicht dat de formules kunnen bieden als om de vertaalslag naar het mineraalschrift te maken beschrijven we hieronder de productie van klinker en de dehydratatie van gebruikt cement.

Productie van Portland klinker

Klinker wordt geproduceerd door klei (en schalie) te laten reageren met kalk bij 1450 graden Celsius.
In grote lijnen komt het er op neer dat het silicaat (SiO_2) in de klei en de schalie en de kalk ($CaCO_3$) reageren volgens:
$CaCO_3 + SiO_2 \rightarrow 1450\ ^0C \rightarrow {}_{(}CaO)_3SiO_2 + 3CO_2$.

In mineraalschrift:
$3C+S \rightarrow 1450\ ^0C \rightarrow C_3S$

Het vrijkomen van koolstofdioxide ($CO_2(g)$) heet decarbonisatie en leidt tot extra koolstofdioxide emissie boven op de emissies die vrijkomen door het brandstofgebruik dat nodig is om te kunnen verhitten tot 1.450 ^0C.

Als het cement wordt toegepast wordt het gemengd met water en ontstaat er een cementhydraat volgens:
${}_{(}CaO)_3SiO_2 + 3H_2O \rightarrow {}_{(}CaO)_3SiO_2(H_2O)_3$

In mineraalschrift:
$C_3S + 3H \rightarrow C_3SH_3$

Dehydratatie van gebruikt cement

Voordat de cementfractie die bijvoorbeeld met slim breken teruggewonnen is uit beton weer opnieuw gebruikt kan worden moet het gedehydrateerd worden, hierbij ontstaat bellite (C_2S oftewel ${}_{(}CaO)_2SiO_2$).
Dit gebeurt vanaf 450 graden Celsius volgens de volgende reactie:
${}_{(}CaO)_3SiO_2(H_2O)_3 \rightarrow >450\ ^0C \rightarrow {}_{(}CaO)_2SiO_2 + CaO + 3H_2O$

In mineraalschrift:
$C_3SH_3 \rightarrow C_2S + C+3H$

Als calciumoxide daarna in contact komt met water wordt er calciumhydroxide ofwel gebluste kalk ($Ca(OH)_2$) gevormd:
$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$

Gebluste kalk is basisch. Aanwezigheid van gebluste kalk activeert daarom hoogovenslak, dit zorgt voor sterkteontwikkeling in slak waardoor hoogoven cement toch voldoende kan binden ook al zit er maar weinig Portland klinker in.

Bijlage D Methodes om beton te recyclen

Sinds eind jaren tachtig staat hergebruik van sloopafval van beton in nieuwe betonproducten in de belangstelling. Het gaat hierbij zowel om de inzet van betongranulaat als hergebruik van de verschillende fracties: zand, grind en cement.

In deze bijlage bespreken we de verschillende technieken die hiertoe ontwikkeld zijn, hoe ze elkaar aanvullen en op welke punten ze van elkaar verschillen.

Betongranulaat

De klassieke manier om beton her te gebruiken is als betongranulaat. Hiertoe wordt het beton met een kraakbreker of een kegelbreker in kleine stukjes gebroken en daarna worden vervuilingen van andere bouwmaterialen er zo goed en zo kwaad gescheiden van het betongranulaat.

De toepassing van betongranulaat heeft een paar nadelen:

1. Betongranulaat is een relatief laagwaardige toepassing van de cementfractie in het beton.
2. Betongranulaat is relatief poreus in vergelijking met kiezels. In beton waarin kiezels zijn vervangen door betongranulaat is voor gelijkblijvende sterkte 5% extra cement nodig (@@ref).

De huidige methode om betongranulaat te scheiden van vervuilingen is door het betonpuin te zeven en te wassen. Het slib dat hierbij vrijkomt kan alleen nog tegen hoge kosten gestort worden (Betoniek, 2011).

Daarom wordt er op dit moment gewerkt aan de Advanced Dry Recovery (ADR)methode waarbij de grove zuivere fractie gescheiden wordt van de vervuilde fijne fractie. Er loopt op dit moment een onderzoek naar de mate waarin deze fijne fractie na schoonbranden gebruikt zou kunnen worden bij de productie van cement.

Terugwinnen fracties zand, grind en cement

De ideale situatie bij hergebruik van materialen is als de materialen weer in hun oorspronkelijke vorm gebruikt kunnen worden. In het geval van beton betekent dit dat de zand, grind en cement fractie teruggewonnen moeten worden en dat de cement fractie weer gereactiveerd dient te worden.

Hiervoor komen we twee methoden tegen in de literatuur: thermische behandeling (kringbouwconcept) en slim breken in combinatie van dehydratatie van de cementfractie.

In beide gevallen is de doelstelling hetzelfde namelijk terugwinnen van de zand, grind en cement fractie en die opnieuw inzetten als zand, grind en cement. Daarmee houden de overeenkomsten op.

Het kringbouwconcept wordt gebroken schoon beton opgewarmd tot een temperatuur boven de 600 graden. Door deze verwarming dehydrateert het beton. Daardoor zet het beton uit. De afschuifkrachten die daarbij ontstaan zijn groot, waardoor het cementskelet wordt ontleed en het materiaal gemakkelijk mechanisch is te verkleinen tot drie fracties: grind en ander grof toeslag materiaal, zand en ander fijn toeslagmateriaal en een

cementsteenrijke fractie. Door de hoge afschuifkrachten zit er relatief veel silicaat uit het grind en/of zand in de cementsteen rijke fractie, circa 50% (TNO, 2008). Dit beperkt de bindmiddelbijdrage die deze fractie kan leveren. We komen hier later op terug.

Bij het slim breken concept wordt de slimme breker gevoed met relatief grote brokken betonpuin (< 150 mm). Het verschil tussen een slimme breker en een kaakbreker of een kegelbreker is namelijk dat de slimme breker een relatief lage kracht toepast net genoeg om het cementsteen te breken (> 14 MPa), maar veel te laag om grind of zand te breken (>200 MPa). Hierdoor wordt het cementsteen gebroken en komen alle andere fracties in principe schoon en onveranderd uit de breker. Dit geldt voor het grind en het zand, maar ook voor metaal, plastic en hout. Omdat deze materialen niet allemaal even klein zijn gemalen zijn ze makkelijk te scheiden door de stroom uit de slimme breker te zeven.
Na scheiden kan de cementfractie apart verhit worden tot boven de 450 graden voor dehydratatie.

De veel lagere krachten die de slimme breker toepast heeft een aantal voordelen:

1. De machine wordt goedkoper:
    a Door de lagere krachten hoeft de machine veel minder zwaar uitgevoerd te worden waardoor de machine goedkoper wordt in aanschaf.
    b Door de lagere krachten kost de aandrijving van de machine minder energie.
2. De fracties die uit de machine komen zijn waardevoller:
    a Zand en grind komen schoon de breker uit en kunnen zo ingezet worden in beton. Proeven wijzen uit dat ze zelfs sneller sterkte ontwikkelen dan grind en zand die direct uit de winning komen
    b Hout en plastic komen relatief ongeschonden de breker uit waardoor makkelijk gescheiden kunnen worden en als fractie aangeboden kunnen worden aan opkopers van respectievelijk afvalhout en -plastic.
    c Op deze manier blijken ook metaalvezels goed te verwijderen te zijn uit het beton.
    d De cementfractie zou relatief schoon uit de breker moeten komen. Op laboratoriumschaal is dat nog niet aangetoond. Door een wat ongelukkige combinatie van de grootte van proefstukken en de omvang van de slimme breker op laboratoriumschaal is er waarschijnlijk lokaal te hoge drukbelastingontstaan waardoor er toch 25% silicaat uit het grind en of het zand (alfa kwarts) is vrijgekomen. Op dit moment lopen er proeven op pilot schaal (40 ton per uur) waaruit moet blijken hoeveel minder het alfa kwarts gehalte is bij operatie van de slimme breker op (semi-)industriële schaal.
3. Dehydratatie van de cement fractie is heel energie-efficiënt.
    a De cementfractie komt apart uit de slimme breker. Om de cementfractie te dehydrateren hoeft alleen deze fractie verhit te worden tot iets boven de 450 graden, dit betekent dat slechts 20-30% van het beton verhit wordt tegenover 100% in het kringbouwconcept. Dat scheelt enorm in de energiebehoefte.

Effect van alfa-kwarts op cementrecycling

Kwarts is een silicaat (SiO_2) dat voorkomt in zand, grind en klei.
Het kristalrooster van alfa-kwarts is trigonaal. Zodra alfa-kwarts verhit is boven de 450 graden gaat het over in beta-kwarts wat een hexagonaal kristalrooster heeft. Hierdoor kan gemeten worden of het kwarts in de cementfractie silicaat is uit zand of grind of dat het silicaat is dat gebonden is in een cementfractie.

De cementfractie kan door dehydratatie gereactiveerd worden, zie Bijlage C. Het alfakwarts is geen onderdeel van cement, maar onderdeel van heel fijngemalen zand of grind. Om te zorgen dat het silicaat in het alfakwarts kan bijdragen aan de bindsterkte van het beton moet er eerst klinker van gemaakt worden. Zoals uitgelegd in bijlage C kost dat niet alleen heel veel energie, maar wordt daarbij ook nog eens pure koolstofdioxide afgescheiden omdat kalk in dat proces gedecarboniseerd wordt.

Hierdoor is het vrijkomen van alfakwarts bij cementrecycling ongewenst.

Literatuur:

TNO, 2008
TNO-rapport OG-RPT-APD-2008-00182, Kringbouw - Naar een duurzame grondstofvoorziening in de bouw, December 2008, door Evert Mulder

Bijlage E Milieueffecten bij inzet van cementen en alternatieve bind-middelen voor beton – nu en straks

Opgesteld in augustus 2013 tbv deze studie door:
Dr.ir J.W. Frenaij (ENCI BV)
Ing. P. de Vries (ENCI BV)
Dr.ir M. van Leeuwen (CRH – Sustainable Concrete Centre)

1. Inleiding

Voor de toepassing van beton is het bindmiddel een onmisbaar bestanddeel. Cement is wereldwijd het meest toegepaste bindmiddel, in 2012 was dat ongeveer 3,5 Gigaton. Hiermee werd zo'n 10 miljard m^3 beton geproduceerd en toegepast, omgerekend bijna 1,4 m^3 per wereldburger per jaar. In landen met economische groei zoals Zuidoost-Azië is het verbruik hoger, in rijpe markten zoals West-Europa ligt het onder de 1 m^3 per inwoner per jaar. De cementproductie draagt wereldwijd voor zo'n 4-5% bij aan de door de mens veroorzaakte CO_2-emissie. De basistechnologie van de cementfabrikage berust na bijna twee eeuwen nog steeds op de inzet van portlandcementklinker. Het gaat in deze bijdrage om beantwoording van drie vragen inzake bindmiddelen op het vlak van innovaties, milieueffecten en het marktperspectief:

- Welke vernieuwingen zijn er op basis van cement met portlandcementklinker?
- Mogelijkheden voor de inzet van alternatieve bindmiddelen voor beton?
- Mogelijkheden om fijnkorrelige minerale fracties uit recycling in te zetten bij de productie van milieuvriendelijke bindmiddelen?

2. Productie van cement op basis van portlandcementklinker

Het ovenproces voor de productie van portlandcementklinker veroorzaakt CO_2-emissies, enerzijds omdat fossiele brandstoffen worden ingezet om de grondstoffen te laten reageren bij een 'bed'temperatuur van ca. 1.450°C, anderzijds omdat de belangrijkste grondstof kalksteen (mergel) zich bij ruim 900°C splitst (decarbonatatieproces) in CaO en CO_2, dit genereert ca. 250 kg CO_2 per ton kalksteen. Omdat ca. 2 ton kalksteen nodig is voor de productie van 1 ton klinker, zorgt het calcineren voor 505 kg CO_2 per ton klinker Nederland). Bij Portlandcement voegt de emissie vanuit het verwarmen van de oven (inzet fossiele brandstoffen) en malen van de klinker (elektriciteit) hier nog ca. 400 kg CO_2 per ton klinker aan toen. Dit verklaart waarom Portlandcement met 95% m/m klinkergehalte zo'n relatief hoge emissie heeft, opgeteld ongeveer 850-950 kg CO_2 per ton cement.
De CO_2-emissie van portlandcementklinker verminderen kan met name door inzet van alternatieve brand- en grondstoffen voor de klinkerbereiding. Bijvoorbeeld niet-fossiele brandstoffen zoals biomassa en andere reststromen met voldoende calorische waarde. En secundaire grondstoffen zoals zand, ijzer-oxide, aluminium-oxide en kalk uit industriële processen. Bij de cementproductie moet rekening worden gehouden met gasemissies uit het ovenproces. Er zijn wettelijke milieueisen inzake de emissies van o.a. stof, SO_x, NO_x en geluid.

Naast het ovenproces wordt elektrische energie ingezet voor het malen van de portlandcementklinker. De CO_2-bijdrage van het malen en van het transport van cement naar de klant is beperkt, veelal niet meer dan 10-30% in verhouding tot de emissies ten gevolge van het ovenproces. Minder emissie is mogelijk door energie-efficiënt malen en een optimaal logistiek proces van cementfabriek naar de klant.

a. Cementnorm EN 197-1

De Europese norm EN 197-1 geeft de kaders aan voor de zogeheten 'common cements', dit zijn cement-soorten gebaseerd op portlandcementklinker. Deze norm geeft per cementsoort de samenstelling aan, zoals gehalten aan portlandcementklinker en overige minerale bestanddelen. Voor portlandcement met 95% m/m klinker ligt de emissie op ca. 800–950 kg CO_2 per ton cement. Een effectieve manier om deze emissie te verminderen is het verlagen van het klinkergehalte. Hiertoe biedt EN 197-1 zeer veel mogelijkheden. Van de in Nederland meest toegepaste cementsoort – hoogovencement CEM III/B 42.5N – is het klinkergehalte ongeveer 30% m/m met 70% m/m gegranuleerde hoogovenslak. Dit leidt tot een CO_2-emissie van minder dan 300 kg per ton cement. Dit hoogovencement is niet voor alle betontoepassingen geschikt, zo is de sterkteontwikkeling aanvankelijk te traag om diverse toepassingen in prefabbeton te realiseren. Verder worden in Nederland o.a. portlandvliegascement geproduceerd - met ca. 70% m/m klinker en 30% m/m poederkoolvliegas uit kolengestookte elektriciteitscentrales – en tevens composietcement CEM V/A, een combinatie van ca. 50% m/m klinker en gelijke gehalten aan poeder-koolvliegas en hoogovenslak.
Een andere in de Benelux geproduceerde hoogovencement is CEM III/C met een klinkergehalte van 5-19% m/m, in de praktijk vaak ca. 15%. EN 197-1 laat ook andere cementsoorten met lage klinkerge-halten toe die niet in Nederland worden geproduceerd, bijv. CEM V/B met klinker, vliegas en hoogovenslak. Het klinkergehalte is ten minste 20% m/m. Zowel CEM III/C als CEM V/B is in de Benelux niet erkend als well-tried cement, dit betekent dat beton niet aantoonbaar duurzaam is in alle mogelijke toepassingen (zoals CUR Aanbeveling 48 voorschrift voor well-tried cementsoorten).

De afgelopen jaren is in Europa veel onderzoek uitgevoerd of er naast de bestaande mogelijkheden in EN 197-1 nog andere samenstellingen van cement mogelijk zijn. Er zijn nieuwe samenstellingen gedefinieerd met combinaties van klinker, vliegas, hoogovenslak en kalksteen, met als doel de inzet van klinker te verlagen. Onder de werknaam CEM X zijn door onderzoekers uit de cementindustrie de maximaal en minimaal toegestane gehalten klinker vastgesteld voor de cementsoorten CEM II/C (klinkergehalten > 50%) en CEM VI (< 50%). Zie Tabel E-1 met de geel gemarkeerde aanduidingen. Om beton met deze nieuwe cementsoorten verantwoord (lees: robuust) in te zetten lopen diverse grootschalige onderzoekprogramma's in Europa. Naar verwachting zullen deze cementsoorten de komende jaren in EN 197-1 worden opgenomen.

Tabel E-1– CEM X (geel gemarkeerd) biedt meer mogelijkheden binnen EN 197-1.

Tabel E-1 E-1 EN 197-1:2000 - the 33 products in the family of common cements

Main types	Notation of the 33 products (types of common cement)		Main constituents [proportion by mass[1)]]										
			Clinker K	Blastfur-nace slag S	Silica fume D [2)]	Pozzolana		Fly ash			Limestone*		
						natural P	natural calcined Q	siliceous V	Calca-reous W	Burnt shale T	L	LL	
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland-slag cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-silica fume cement	CEM II/A-D	90-94	-	06-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-pozzolana cement	CEM II/A-P	80-94	-	-	06-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	06-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-fly ash cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	06-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	06-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland-burnt shale cement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	06-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portland-limestone cement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	06-20		0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	06-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland-composite cement [3)]	CEM II/A-M	80-94	<----------6-20 ---------->									0-5
		CEM II/B-M	65-79	<----------21-35 ---------->									0-5
		CEM II/C-M (S-L/LL)	50-64	16-44	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/C-M (P-L/LL)		-	-	16-44	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/C-M (S-V-L/LL)		-	-	-	-	16-44	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/C-M (S-V)		16-44	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
CEM III	Blastfurnace cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pozzolanic cement [3)]	CEM IV/A	65-89	-	<----------11-35 ---------->					-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	<----------36-55 ---------->						-	-	0-5
CEM V	Composite cement [3)]	CEM V/A	40-64	18-30	-	<----------18-30 ---------->			-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	<----------31-50 ---------->			-	-	-	-	0-5
CEM VI		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM VI (S-V)			-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5

b. Klinkergehalte in cement en cementgehalte in beton – de ondergrens bereikt?

Bij cement met zeer lage klinkergehalten van 5-20% m/m is het de vraag of beton wel voldoende duurzaam is. Bij cementen met deze lage klinkergehalten is van belang het principe 'fit for purpose': is de combinatie van cementsoort en beton wel voldoende robuust. Daarbij gaat het erom:

1. of het beton wel voldoet aan de betreffende duurzaamheidsklasse. Duurzaamheid van beton houdt verband met de specifieke omstandigheden waarin het beton moet functioneren om onderhoudsarm/vrij te blijven tijdens de voorziene gebruiksduur:
   a bestandheid tegen de inwerking van chemische en fysische processen, bijv. sulfaat uit zeewater, bestandheid tegen vorst-dooi cycli, carbonatatie en Cl-penetratie, etc.
   b bescherming van wapeningsstaal in beton. De bescherming is gebaseerd op een hoge pH van het beton in combinatie met voldoende betondekking.
2. of de gewenste sterkteontwikkeling (verhardingssnelheid) van het beton wel wordt bereikt;
3. of rekening is gehouden met de hoge gevoeligheid voor nabehandelings-omstandigheden.

Meer algemeen, bij de beoordeling van relatief lage klinkergehalten moet ermee rekening worden gehouden dat in het cement voldoende Ca en Si aanwezig zijn om het bindingsproduct (Ca-Si hydraten, ontstaan door de reactie van portlandcementklinker-mineralen met water) te garanderen in het beton voor de beoogde toepassing.

Het minimumcementgehalte in beton en de maximale waterbindmiddelfactor zijn vastgelegd in o.a. EN 206-1 en NEN 8005. Behalve de criteria duurzaamheid en sterkteontwikkeling is ook van belang de verwerkbaarheid van de betonspecie (niet-verharde fase) waarvoor een minimum hoeveelheid fijn materiaal (< 125 micrometer) moet zijn toegevoegd. Deze eis verklaart waarom in veel gevallen meer bindmiddel (cement) wordt toegevoegd dan het minimumgehalte. Het verlagen van de CO_2-emissie van beton vraagt derhalve om deskundigheid inzake betontechnologie waarbij rekening moet worden gehouden met alle performance eisen die aan de specifieke toepassing van beton worden gesteld.

c. Het k-waarde concept

De latente bindmiddeleigenschappen van vliegas en hoogovenslak bij gebruik in beton worden uitgedrukt met de zgn. k-waarde. Deze secundaire grondstoffen hebben de mogelijkheid een deel van het cement in beton te vervangen qua bindmiddelfunctie. Echter, de bindmiddelfunctie van vliegas wordt pas geactiveerd als er voldoende kalk Ca(OH)2 vanuit de klinker beschikbaar is (puzzolane reactie). En voor het activeren van hoogovenslak (latent hydraulisch) is een minimale pH van 12,5 vereist. Vuistregel is dat een klinkergehalte lager dan 20-25% ten koste gaat van de robuustheid van beton en daarmee beton als niet-duurzaam moet worden beschouwd. Gebruik per m^3 beton van 300 kg hoogovencement CEM III/B 42.5 (klinkergehalte 30%) in combinatie met 100 kg vliegas leidt ertoe dat 300:3 = 100 kg vliegas als bindmiddel mag worden meegeteld via een k-waarde van 0,2 volgens EN 206-1 en NEN 8005. Dit is dan 100x0,2 = 20 kg 'cement'. Het rekentechnische cementgehalte is dan 320 kg. Echter, het klinkergehalte van het totale bindmiddel bedraagt dan 90:400 x 100% = ca. 22%.

d. Verdere CO_2-reductie door gebruik van klinkerarme cementen?

In referentiejaar 2010 was de jaarconsumptie in Nederland ca. 4,8 Mton cement. Nederland is koploper qua consumptie van klinkerarme cementen, met name hoogovencementen. Met ca. 40% marktpenetratie van CEM III/B 42.5N (minder dan 300 kg CO_2-emissie per ton cement). Samen met hoogovencement CEM III/A 52.5N is de marktpenetratie ca. 45%. Deze laatste cementsoort heeft ca. 500 kg CO_2-emissie per ton cement. Het marktaandeel van alle niet-Portlandcementen is naar schatting 55-60%. Bij toepassing in beton wordt duidelijk dat de cementkeuze een belangrijke invloed heeft op de CO_2-emissie per m^3 beton. Een voorbeeld is betonmortel C30/37 (dit is 36-40 MPa betondruksterkte na 28 dagen) en milieuklasse XC3. Deze betonmortel met CEM III/B 42.5N heeft per m^3 een CO_2-uitstoot van 121 kg, en gelijkwaardige betonmortel met Portlandcement CEM I 42.5N een uitstoot van 321 kg.

Door gerichte maatregelen was de man-made CO_2-emissiebijdrage van in Nederland geconsumeerde cementen in 2010 ca. 1%, veel lager dan het wereldwijd gemiddelde van 4-5%. Geschat wordt dat het percentage van 1% in de periode tot 2050 nog met 10-20% kan worden verlaagd door gerichte maatregelen, zoals aanpassing van de productmix van cementsoorten en een nog meer energie-efficiënte wijze van productie en transport. Emissieneutrale cementproductie is alleen mogelijk door CO_2 af te vangen en op te slaan, een oplossing die momenteel niet realistisch is en ook vraagt om maatschappelijke acceptatie van de kostenconsequenties.

Perspectief in 2020 – Tegen die tijd is naar verwachting CEM X opgenomen in de regelgeving (EN 197-1 en EN 206-1) voor cement en beton en hebben Europese cementproducenten CEM X in productie genomen. De introductie van CEM X is wereldwijd van belang om de milieueffecten van cement te verlagen, omdat het klinkerarme cementsoorten mogelijk maakt met een hoofdbestanddeel kalksteen tot 20% m/m. In Nederland als koploperland inzake de consumptie van klinkerarme cementsoorten zal CEM X naar verwachting weinig toepassing vinden omdat vervanging van CEM III/B door CEM X nauwelijks een optie is om de CO_2-emissie verder te verlagen. Zie ook Tabel E-2. Voor Nederland - excl. substitutie van andere klinkerarme cementen - zou CEM X kunnen worden toegepast voor de productie van betonproducten (prefabricage) met een afzet van 120.000 ton per jaar in 2020. Dit jaartonnage berust op een ruwe schatting, nl. max. 5% meer klinkerarme cementsoorten (5% van 0,45 à 0,55 x 4,8 Mton = 110.000 – 130.000 ton). Bij de jaarconsumptie van 4,8 Mton cement is dat een aandeel CEM X van 2,5%. De bijdrage aan de CO_2-reductie is derhalve heel beperkt.

Tabel E-2 Potentie van nieuwe cementsoorten (werknaam CEM X) voor EN 197-1

Generieke naam ten opzichte van CEM I *)	Samenstelling Bedrijf	Energie	CO_2-besparing / footprint	Kosten
CEM X				
CEM II/C tot 50% m/m klinker en CEM VI met 35-49% m/m +vliegas+kalksteen	35-65% lager dan bij CEM I		EN 197-1: klinker+slak 35-65%	
Lager dan CEM I	-15 tot -30%	Traditionele producenten zodra CEM X in EN-197		

3. Alternatieve bindmiddelen voor beton

Naar alternatieve bindmiddelen wordt al decennia lang onderzoek verricht. Het gaat om binders die niet zijn samengesteld met portlandcementklinker maar volgens een geheel ander productieproces waarvoor kalksteen niet nodig is als basisgrondstof. Het niet-calcineren bespaart al heel veel CO_2-emissie. Tabel E-3 geeft aan de belangrijkste ontwikkelingen wereldwijd, en de geschatte CO_2-emissie en kosten (investeringen) vergeleken met CEM I conform EN 197-1. Sommige van de alternatieve bindmiddelen zijn in onderzoek bij diverse concurrerende ondernemingen, die ieder hun (vertrouwelijke) proces en receptuur hebben. De CO_2-emissie en productiekosten (incl. malen) van deze bindmiddelen zijn vastgesteld op basis van de beperkte beschikbaarheid van technische kennis en informatie ('best guess'). Zo is van geopolymeren bekend dat de kosten van een activator niet moeten worden onderschat: bij een dosering van ca. 20%, kosten ca. 200 euro per ton activator, is het kostenaandeel van enkel de activator reeds zo'n 40 euro per ton bindmiddel. Dat is zeer hoog in vergelijking met de verkoopprijs van 1 ton Portlandcement.

Het wereldwijze perspectief van deze alternatieve binders voor beton moet worden ingeschat op basis van de volgende criteria:

- continue beschikbaarheid van grondstoffen lokaal en wereldwijd;
- noodzakelijke R&D;
- beschikbaarheid van technologie;
- investeringen voor grootschalige productie en kostprijs per ton bindmiddel;
- milieueffecten bij productie en inzet in beton.

Tabel E-3 Potentie van alternatieve bindmiddelen

Generieke naam	Samenstelling	Energie	CO_2-besparing t.o.v. CEMI	Kosten ten opzichte van CEM I *)	Bedrijf
Calcium Sulphoaluminaat cement	Si-Ca-Al-S-Fe	Oventemp-eratuur ca. 200°C lager	20-30%	Gelijk	Italcementi, Lafarge,HC Group
Supergesulfateer-de cement	Hoogovenslak, gips en klinker	Lage temp.	Ca. 90-95%	Ten minste gelijk	Holcim **) (CEMROC)
Alternatief CSH cement	Ca-Si/CSH	150-300°C in autoclaaf proces	50%	Grote investeringen	Schwenk **) (Celitement)
Alkalisch geactiveerde vliegas/slak systemen (Geopolymeer)	Vliegas, slak en activator	Alleen malen en mengen (koud proces)	Min. 70-80%	-20%	Diverse initiatiefnemers

*) CEM I = portlandcementklinker. Kosteninschattingen gebaseerd op basis van veranderde samenstelling en energieverbruik.

**) Kostenspecificaties op te vragen bij de producenten.

Het gaat bij milieueffecten om meer dan CO_2, o.a. andere emissies zijn van belang (Cradle to cradle-beoordeling volgens de LCA-aanpak over de levenscyclus van beton). Verder is de vraag cruciaal of beton met een alternatieve binder bij toekomstige recycling wel verenigbaar is met traditionele cement-soorten. Voor succesvolle toepassing in beton gaat het o.a. om de volgende aspecten:

- Verwerkbaarheid en open time.
- Sterkteontwikkeling van beton.
- Lange termijn gedrag van het bindmiddel.
- Technische duurzaamheid (robuustheid) van beton.
- Is beton in combinatie met wapening mogelijk?
- Beschikbaarheid van ontwerptools voor de constructeur en de noodzaak van faciliteiten voor opleiding en scholing.
- Beschikbaarheid van normen en certificering, met name gericht op de veiligheid en betrouwbaarheid van bouwen met beton en van het gebruik van betonnen bouwwerken.

Het is niet de verwachting dat deze alternatieve binders in 2020 een significante rol zullen spelen in de bouwmarkt. Aannemelijk is dat aanzienlijke CO_2-reductie wereldwijd alleen mogelijk is door inzet van meer klinkerarme cementsoorten conform EN 197-1. Dit vereist – om economische en milieutechnische redenen - wel dat slak en vliegas lokaal beschikbaar zijn binnen een straal van 200-400 km tot de cementfabriek. Op basis van de state-of-art kennis van de bouwmarkt en de technische mogelijkheden van de alternatieve bindmiddelen in beton zijn in Tabel E-4 de perspectieven geschetst voor Nederland. De marktsegmenten zijn woningbouw, u-bouw en GWW. Het marktsegment onderhoud en reparatie is niet beschouwd.
De vermelde % betreffen het geschatte marktaandeel per segment(en).

Tabel E-4 Scenario's voor cementsoorten en alternatieve bindmiddelen in 2020 en 2050

Alternatief bind-middel concept	Realistisch scenario 2020 voor Nederland *)	Radicaal scenario 2050 bij wereldwijde intro-ductie van emissietax van 50 euro /ton CO_2	Toelichting
CEM X	Alle toepassingen Min./max. = 0%/5%	Max. 10% **)	Duurzaamheid in specifieke omstandigheden vergt onderzoek. Vooral buiten NL perspectief-vol.
Calciumsulphoalumi-naat cement	Alleen in woningbouw, betonmortel en prefab Min/max. = 0%/5%	Alle toepassingen en tot 100% substitutie van CEM I	Alleen woningbouw, want minst risicovolle marktsegment t.a.v. constructieve veiligheid en technische duurzaamheid
Supergesulfateerde cement	Alleen betonmortel in GWW-segment Min/max. = 0%/5%	Tot 30% van het GWW segment	Vooral massabeton, ook onderwaterbeton
Alternatief CSH cement	0%	Ongewapend breed toepasbaar (50%), gewapend beperkt toepasbaar (20%)	Technologie nog in pilotstadium, invester-ingen onoverzienbaar

Alternatief bind-middel concept	Realistisch scenario 2020 voor Nederland *)	Radicaal scenario 2050 bij wereldwijde intro-ductie van emissietax van 50 euro /ton CO_2	Toelichting
Geopolymeren	Alleen ongewapende prefab Min/max. = 5%/10%	Ongewapend breed toepasbaar (50%), gewapend beperkt toepasbaar (20%)	Lage alkaliteit is risico voor gewapende toepassing

*) Beschouwd zijn de marktsegmenten woningbouw, utiliteitsbouw en civiele bouw (GWW). Tevens rekening gehouden met opties betonproducten en betonmortel.

**) Percentage geschat op basis van CEM X ingeval het meer klinkerarme alternatief binnen EN 197-1.

4. Inzet van minerale fines uit recyclingprocessen voor bindmiddelen

Fijne minerale fracties (fines) met potentiële kansen voor inzet in cement en/of beton komen vrij bij diverse recycling activiteiten:

- Bij de recycling van beton via moderne technologieën zoals Advanced-Dry-Recovery en Slim Breken. In de periode 2000-2008 heeft TNO Bouw samen met diverse marktpartijen gewerkt aan het zgn. Kringbouwproces, d.i. de thermische ontleding van beton in zand, toeslagmateriaal en cementsteen.
- Thermische behandeling van o.a.:
  - huishoudelijk en industrieel afval tot AEC slakken;
  - papierslib tot assen;
  - teerhoudend asfalt tot granulaten en vulstof.

In veel gevallen betreft het de korrelfractie 0-1,0 mm met een hoog gehalte aan Si en in mindere mate Ca, waarbij het de uitdaging is de fines zo cementrijk mogelijk te maken door verbetering van de recycle-technieken. Bij opslag van dergelijke fracties blijkt soms dat ze bindingseigenschappen bezitten in combinatie met water (vocht). De vraag is of dergelijke materialen kunnen worden toegepast in het cement-productieproces. Daartoe is al onderzoek verricht maar meer/verder onderzoek uitvoeren is essentieel.
Heeft het materiaal hydraulische of puzzolane eigenschappen?
Het cementproductieproces proces bestaat uit twee stappen: bereiding van portlandcementklinker in een oven en het malen van deze klinker samen met andere grondstoffen tot cement. Door de inzet van fines in deze processen zou mogelijk kunnen worden bespaard op grondstoffen en uitstoot van CO_2. Deze besparingen zullen optreden als wordt voldaan aan een aantal voorwaarden:

- continue stromen van constante kwaliteit (min. 10 kton per jaar per fractie);
- samenstelling met veel Ca en weinig Si, het liefst met hydraulische of puzzolane eigenschappen;
- economisch aantrekkelijker dan bij inzet van de huidige grondstoffen;
- geen nadelige milieueffecten van transport over relatief grote afstand naar de cementfabriek (oven- of maalproces);
- gelijkblijvende prestaties van het eindproduct op de korte en lange termijn.

Onderstaande is gebaseerd op een recycling procedé waarbij het mogelijk is cementsteen volledig terug te winnen uit beton zonder verontreinigingen van fines uit het toeslagmateriaal. Dan nog kent de inzet van deze cementrijke fines uit beton bij de productie van portlandcementklinker zijn beperkingen: het cementsteen van de fines bevat sulfaat, met name afkomstig uit de bindtijdregelaar, en dat is een complicerende factor bij het opbouwen van de juiste chemie in het klinkermeel bij de productie van portlandcementklinker. De dosering moet binnen nauwe grenzen blijven om de juiste eigenschappen

van het cement te garanderen. Verder is de chemische samenstelling van hoogovencement afwijkend van die van portlandcementklinker. Dus ook hier geldt hetzelfde, dat cementsteen afkomstig vanuit de fines van beton met hoogovencement maar in een beperkte hoeveelheid kan worden toegepast om de chemische samenstelling van het klinkermeel niet teveel te verstoren.

De huidige ervaringen met beschikbare minerale fines zijn dusdanig dat over het algemeen nog niet kan worden voldaan aan een of meerdere van bovengenoemde voorwaarden. Als blijkt dat wel kan worden voldaan aan bovengenoemde voorwaarden dient ook de huidige regelgeving (o.a. de Europese cement-norm EN 197-1) te worden aangepast om toepassing mogelijk te maken. Binnen de Europese Technische Commissie verantwoordelijk voor de cementnorm wordt momenteel nagedacht over toe te passen procedures ter beoordeling van mogelijk nieuwe grondstoffen/bestanddelen van cement.

Alternatief is deze fijne fracties toe te passen als inerte of reactieve vulstof in beton. EN 206-1 opent die mogelijkheid via het Equivalent Concrete Performance Concept. Case to case moet worden bepaald of een en ander technisch en economisch positief is. Zeker is dat toevoeging van fijn materiaal de behoefte aan aanmaakwater verhoogt bij dezelfde verwerkbaarheid. Dit betekent dat meer bindmiddel nodig is bij constante water-bindmiddelfactor voor dezelfde performance van beton (druksterkte, technische duurzaamheid, etc.). Het vergt dus onderzoek naar de fysisch-chemische eigenschappen van de fijne fracties en hun economische waarde, evenals naar de toelaatbaarheid in cement en beton op basis van de EN-normgeving. Essentieel is het lange termijn gedrag (duurzaamheid) van beton bij de inzet van fines (in cement of als vulstof), o.a. bij de inwerking van vorst-dooicycli, mariene omstandigheden, carbonatatie (in relatie met wapeningscorrosie), etc. Dit vergt te allen tijde fundamenteel onderzoek naar de invloed van fines in cement en beton voordat sprake kan zijn van toepassingen in de betonbouw.
Er loopt momenteel een groot onderzoek op basis van een Europese Studie aan de TU Delft (EU FP7 C2CA) waarin eerdergenoemde technieken als Advanced Dry Recovery (ADR) en Slim Breken voor de recycling van beton worden beoordeeld en waarin ook de fines nader zullen worden bestudeerd op toepasbaarheid. Daarnaast is aan de TU/e al onderzoek uitgevoerd naar het Slim Breken principe. Resultaten van dit onderzoek zijn recent gepubliceerd o.a. in het tijdschrift Cement (2013 nr. 4) en in een recent TU/e afstudeerwerk van Masterstudent Ning (Ning Zuokui, 2012).
Bij alle toepassingen moet rekening worden gehouden met de compactheid (korrelstapeling) van alle grondstoffen (met name het toeslagmateriaal, eventuele vulstoffen en het cement) in beton omdat die van belang zijn voor de sterkte en duurzaamheid van het beton. Dit beperkt zich niet tot de korrelverdeling van grof en fijn toeslagmateriaal (grind en zand) maar van belang is zeker ook de korrelverdeling van de zeer fijne fractie (< 100 um) vrijkomend bij de diverse minerale breekprocessen. Er zijn technologieën om vulstoffen met een super hoge fijnheid te produceren uit secundaire grondstoffen. Zij kunnen wellicht leiden tot een optimale korrelverdeling in aanvulling op de korrelverdeling van cement en andere fijne vulstoffen. Echter, de vraag is of het milieueffect en de kosten van het superfijn produceren wel opwegen tegen een mogelijke besparing op bindmiddel.

Besluit
In de periode tot 2020 wordt voorzien dat bindmiddelen op basis van portlandcementklinker zullen blijven voorzien in het wereldwijde bouwen met beton. EN 197-1 biedt nog vele mogelijkheden om de CO_2-reductie per ton cement significant te verminderen en Nederland is daarin koploper.
De ontwikkeling van alternatieve bindmiddelen is nu enkele decennia gaande en het perspectief is dat hun toepassing zich tot 2020 zal beperken tot niche-markten zonder een significante verlaging van de milieu impact van bouwen met beton. Wat betreft de toepasbaarheid van alternatieve binders voor beton zijn er in algemene zin twee wezenlijke drempels: langetermijngedrag van beton is onvoldoende bekend (denk aan technische duurzaamheid, gedrag van wapening in beton, chemische stabiliteit van de binder in relatie met het beton, etc.). Verder ontbreekt het aan ontwerp-/rekenregels voor constructeurs/architecten en zijn er nog geen normen beschikbaar voor ontwerpers, evenals geen opleidingen en cursoria. En verder, hoe zit het met recyclebaarheid? Specifieker kunnen we niet zijn.

Er is milieuwinst is te behalen met 'Duurzaam bouwen', door samenwerking in de betonketen te stimuleren en daadwerkelijk in bouwprojecten te practiseren. Beoordeling op basis van CO_2-emissie is maatschappelijk belangrijk, echter een LCA-benadering over de gehele bouwcyclus (met 'alle' milieueffecten, uitgedrukt in MKI, Milieu Kosten Indicator) heeft de voorkeur. Dit is ook de aanpak die wordt voorgestaan met actuele beoordelingsmodellen zoals Breeam voor gebouwen en Dubocalc voor infrastructurele werken.

Een radicale verandering van de bouwmarkt kan niet worden afgedwongen door enkel CO_2-tax maat-regelen in te voeren. Echter, op de lange termijn moeten bindmiddel-innovaties – op basis van technologie en commercie (andere business concepten) – niet worden uitgesloten, gelet op de volgende verwachtingen en mogelijkheden:
- Energie wordt minder een beperkende factor, omdat lokale opwekking van wind- en zonne-energie zal leiden tot prijsreducties.
- Bindmiddelen worden meer tailormade geproduceerd en niet langer bulkgewijs, bijv. door gescheiden malen van klinker en andere grondstoffen zoals hoogovenslak en vliegas.
- Bindmiddeltechnologie wordt meer chemisch gedreven in plaats van op basis van de inzet van bulkgrondstoffen met enkel fysische stuurparameters (bijv. maalfijnheid, druksterkte en kleur)
- Anders dan kalksteen wordt wellicht klei wereldwijd een veel belangrijker basisgrondstof voor bindmiddelproductie en komen er productieprocessen die bij veel lagere temperatuur werken (geopolymeren).
- Bindmiddelontwikkeling op basis van het ketenconcept (design for recycling), bijv. acceptatie van CO_2-emissies bij productie met parallelle CO_2-afvanging en/of CO_2-binding tijdens de gebruiksduur (carbonatatie van beton). De keten sluiten is mogelijk door bij de recycling van beton de fines af te scheiden. Deze fines zouden via geavanceerde recycling-technologie rijk kunnen zijn aan kalk en ongehydrateerde cementdeeltjes, en daarmee toepasbaar zijn in het cementovenproces en bij het maalproces. Zo zou een CO_2-tax in combinatie met innovaties perspectief kunnen bieden om de cement/betonketen te sluiten. Een en ander is omstreeks 2004-8 al aan de orde gekomen in het zgn. Kringbouw-onderzoekprogramma o.l.v. TNO Bouw.

Referenties

1. Lanser P.A. and A.M. Burger – Carbon dioxide as a stimulus for life cycle thinking in cement and carbon neutral concrete building. Proceedings FIP Congress, Amsterdam, 2008, 6 pp.
2. Lanser, P.A. etc. - Over de risico's van reductie van het cementgehalte in beton en het klinkergehalte in cement. CEMENT, 2013. (CONCEPT)
3. Cement volgens NEN-EN 197-1. Betonpocket 2012, ENCI, p. 198-199.
4. Cementtype en klinkergehalte, milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw. CE rapport, Delft, april 2013, p. 54-57.
5. Roadmap duurzaam cement. Cement & BetonCentrum, Den Bosch, oktober 2012, 27 p.
6. New cement and innovative binder technologies. Proceedings ECRA conference, Barcelona, May 2011.
7. De Vries P. en J.W. Frenay - Duurzame ontwikkelingen in cement en beton. Avondcollege Betonvereniging, Gouda, maart 2013.
8. Ning Zuokui Thermal Treatment of Recycled Concrete Fines, TU Eindhoven Master project Building Services 7YY40, June 2012
9. Fennis, S.A.A.M. Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization, 2010
10. Hunger Martin. An integral design concept for ecological Self-Compacting Concrete, 2010. Chapter 4: Development of a new concrete mix design method.
11. Vries, P. de – Kan cement zonder klinker? Cement 2013 (CONCEPT)
12. Mulder, E. - Kringbouw - Naar een duurzame grondstofvoorziening in de bouw, TNO-rapport OG-RPT-APD-2008-00182, december 2008.