

Prioritering handelings- perspectieven verduurzaming betonketen

Kostencurve opgesteld op basis van
quickscan van 16 door het MVO Netwerk
Beton geselecteerde verduurzamingsopties

Rapport
Delft, november 2013

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



Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

M.(Marit) van Lieshout, G.E.A. (Geert) Warringa, G.C. (Geert) Bergsma
Prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen
Kostencurve opgesteld op basis van quickscan van 16 door het MVO-netwerk beton
geselecteerde verduurzamingsopties
Delft, CE Delft, november 2013

Publicatienummer: 13.2A59.64

Opdrachtgever: Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rijkswaterstaat, Waterdienst.
Alle openbare CE-publicaties zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Marit van Lieshout.

© copyright, CE Delft, Delft



CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 35 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Voorwoord	5
	Samenvatting	7
1	Inleiding	11
1.1	Aanleiding	11
1.2	Doel project	12
1.3	Leeswijzer	12
2	Duurzaamheidsopties	13
2.1	Selectieproces	13
2.2	Geselecteerde verduurzamingsopties	13
2.3	Verandering van de betonsamenstelling	15
2.4	Samenvatting	19
3	Kostencurve	21
3.1	Aanpak en uitgangspunten	21
3.2	Kostencurve	23
3.3	Gevoeligheidsanalyse	27
3.4	Samenvatting	29
4	Conclusies en aanbevelingen	31
4.1	Kostencurve	31
4.2	Kiezen van verduurzamingsopties	32
	Literatuur	35
Bijlage A	Optie-overzicht tijdens kick-off	37
Bijlage B	Verduurzamingsopties en kosten grondstoffen	39
	Bijlage B-1 Korrelverdeling	41
	Bijlage B-2 CEM X	44
	Bijlage B-3 CSA-beliet	46
	Bijlage B-4 Supergesulfateerd	48
	Bijlage B-5 Alternatief CSH	50
	Bijlage B-6 Geopolymeer	53
	Bijlage B-7 Demontabel bouwen	57
	Bijlage B-8 Mechanische cementrecycling	61
	Bijlage B-9 Thermische cementrecycling	66
	Bijlage B-10 Bodemas	68
	Bijlage B-11 Staalvezels	70
	Bijlage B-12 Bouwplanning	72
	Bijlage B-15 Zelfhelend beton	75
	Bijlage B-16 Betonkernactivering	78



Bijlage C	Cementchemie en notatie	83
Bijlage D	Milieueffecten bij inzet van cementen en alternatieve bindmiddelen voor beton - nu en straks	85
Bijlage E	Berekening effect later ontkisten met CUR-tool	97



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.

De onderzoekers zijn dank verschuldigd aan de deelnemers van de begeleidingscommissie:

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

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.

Ook naast de begeleidingscommissie is er door een groot aantal mensen een bijdrage geleverd, met name noemen we Mark van Kempen (Inashco), Koos Schenk (Schenk Concrete Consultancy), David Heijkoop (Reko BV), Anja Buchwald (Ascem BV).

Aan hen en alle anderen die via telefoon en e-mail een bijdrage aan deze studie hebben geleverd bij deze hartelijk dank. De geleverde informatie en de zinvolle discussies hebben sterk bijgedragen aan de kwaliteit van het rapport.

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 op de middellange termijn (vanaf 2020) te realiseren zijn 16 verduurzamingsopties geselecteerd.

In de inventarisatiestudie naar de 'Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw' (CE Delft, 2013) zijn alle milieueffecten van de betonketen meegenomen. Daaruit bleek een sterke correlatie van de verschillende milieueffecten met de CO₂-emissie. Daarom is in deze vervolgstudie ervoor gekozen om de verbeteropties te beoordelen op CO₂-reductie (reductiepotentieel) en de benodigde kosten per ton voorkomen CO₂-emissie (reductiekosten). De verduurzamingsopties zijn samengevat in Tabel 1.

Het doel van het project is om een ruwe inschatting van de kostencurve op te stellen voor 16 opties die op de middellange termijn de betonketen verder kunnen verduurzamen. CE Delft heeft er voor gezorgd dat de aangeleverde gegevens kritisch zijn geëvalueerd en op een consistente en vergelijkbare manier gebruikt zijn voor de berekening van het CO₂-emissiereductiepotentieel en de CO₂-reductiekosten.

Tabel 1 Overzicht van 16 opties voor de verduurzaming van de betonketen op de middellange termijn

Categorie	Verduurzamingsoptie	Toelichting
Verandering van de betonsamenstelling	Korrelverdeling	Optimaliseren korrelverdeling
	CEM X	Verruimen toegestane grondstoffen voor cement binnen Europese norm
	CSA-beliet	Inzet calcium sulpho-aluminaatcementen
	Supergesulfateerd	Inzet supergesulfateerde cementen
	Alternatief CSH	Inzet alternatief CSH Cement
	Geopolymeer	Inzet alkalisch geactiveerde materialen als cement
Hergebruik/ recycling	Demontabel bouwen	Bouwen met demontabele standaardeenheden
	Mechanische cementrecycling	Mechanische cementrecycling via slim breken en/of ADR
	Thermische cementrecycling	Thermische cementrecycling via kringbouw
	Bodemas	Inzet bodemas als vulstof met bindcapaciteit
Andere wapening-smethode	Staalvezels	Inzet staalvezels in plaats van traditionele wapening in gietbeton
Aanpassen bouwproces	Bouwplanning	Langere uithardingstijd gietbeton door aanpassen bouwplanning
	Overdimensionering	Beperken overdimensionering in ontwerpfase
Verlengen levensduur	Flexibel bouwen	Langere levensduur door flexibel ontwerp
	Zelf helend beton	Zelfhelend beton met calciumcarbonaat producerende bacteriën
Energiegebruik in de gebruiksfase	Betonkernactivering	Betonkernactivering in combinatie met warmtepomp en WKO als extra boven op EPC-eis

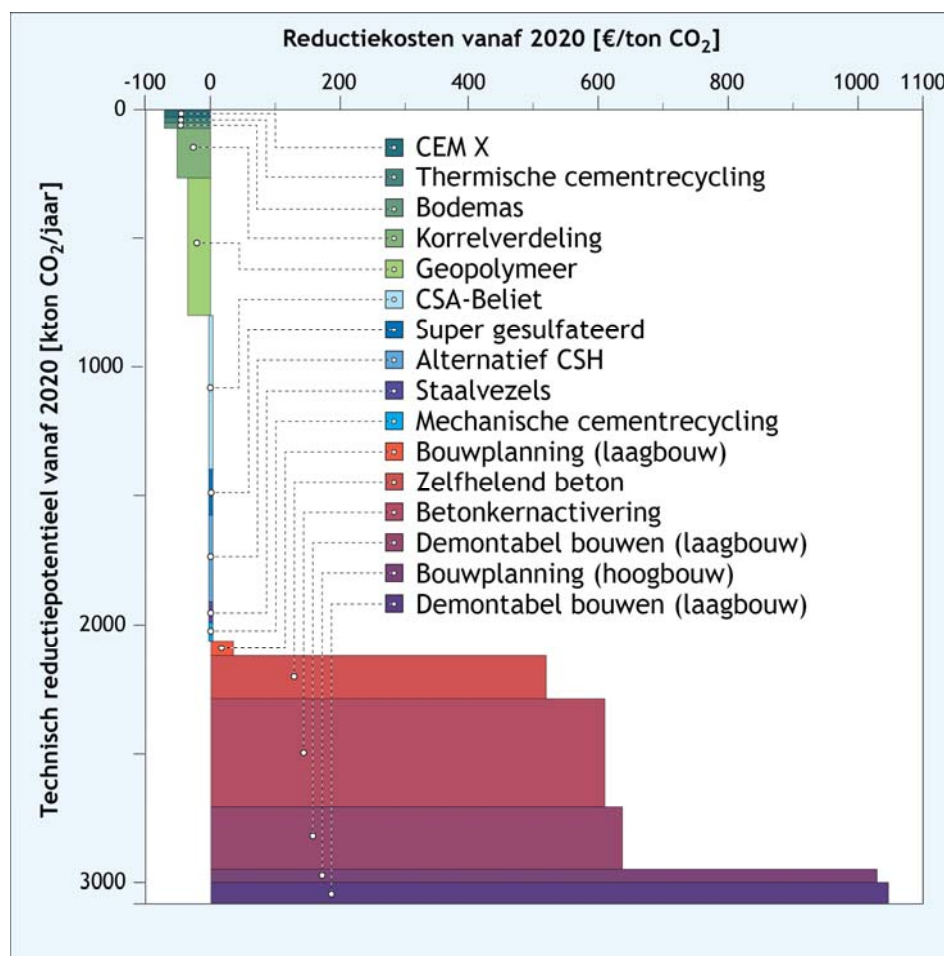


Centraal in de kostencurve staan het CO₂-emissiereductiepotentieel en de CO₂-emissiereductiekosten.

Het CO₂-emissiereductiepotentieel is een technisch reductiepotentieel voor 2020. Het is de hoeveelheid CO₂-emissie die rond 2020 gerealiseerd kan worden als vanaf nu alle betrokken partijen maximaal meewerken om deze verduurzamingsoptie door te voeren en geld geen belemmering vormt. Om het technisch reductiepotentieel te berekenen is uitgegaan van emissiereducties die nu al op laboratoriumschaal of pilotschaal bewezen zijn, zodat alle benodigde procedures voor grootschalige invoering op de markt voor 2020 gerealiseerd kunnen zijn.

De reductiekosten zijn de kosten die gemaakt moeten worden om via de betreffende verduurzamingsoptie de emissie van een ton CO₂ te voorkomen (uitgedrukt in euro per ton CO₂). De kostencurve is weergegeven in Figuur 2.

Figuur 2 Kostencurve verduurzamingsopties in de betonketen in Nederland (2020)



Uit de figuur blijkt dat het economisch rendabele besparingspotentieel circa 2 miljoen ton CO₂ per jaar bedraagt. Tot 1 miljoen ton zijn er vijf maatregelen met een positief economisch plaatje. Tussen de 1 en de 2 miljoen ton zijn er een groot aantal maatregelen die net wel of net niet kostenneutraal zijn. Het gaat hier met name om de opties die ingrijpen op de verandering van de betonsamenstelling zoals ‘geopolymeer’, ‘alternatief CSH’ en ‘CSA-beliet’ en verder de opties ‘thermische en mechanische cementrecycling’, ‘bodemas’ en ‘staalvezels’.



Echter het reductiepotentieel van een groot deel van deze maatregelen beïnvloedt elkaars effect sterk.

In totaal bedraagt het gecombineerde reductiepotentieel 1.300 kton/jaar, ruim een derde van de voetafdruk van de betonketen (3.700 kton/jaar) (CE Delft, 2013). Als je alleen de rendabele maatregelen meeneemt is het iets minder dan 1.100 kton/jaar. Dit betekent dat als het reductiepotentieel van de alle genoemde verduurzamingsopties maximaal gerealiseerd wordt, er een significante reductie van de voetafdruk van de betonketen mogelijk is.

Hierbij plaatsen we een aantal kanttekeningen:

1. De reductiekosten en het reductiepotentieel zijn conservatief ingeschat. De gegevens weergegeven in de kostencurve gelden alleen binnen het bereik waarin bewezen is dat ze toegepast kunnen worden. Dit bereik wordt verder toegelicht in Bijlage B. Zo is het zeer goed mogelijk dat de optie ‘cementrecycling’ een veel groter potentieel heeft zodra aangetoond is dat gerecycled cement grootschalig ingezet kan worden als decarbonisatievrije¹ grondstof voor bijvoorbeeld CSA-beliet cement. In dat geval verdrievoudigt het gecombineerd reductiepotentieel van de verduurzamingsoptie ‘CSA-beliet’ en stijgt het gecombineerde reductiepotentieel tot boven de 2.000 kton per jaar.
2. De reductiekosten zijn bepaald op basis van huidige bekende technologie. Bij eerste bespreking van de resultaten bleek bijvoorbeeld al voor de opties ‘demontabel bouwen’ dat door op deze manier naar opties te kijken, partijen geïnspireerd raakten om alternatieve werkwijzen te ontwikkelen die waarschijnlijk goedkoper zullen uitvallen. Ook is het waarschijnlijk dat bij verdere ontwikkeling zal blijken dat het potentieel voor het gebruik van gerecycled cement veel groter kan zijn dan nu is aangenomen.
3. Reductiekosten zijn zeer gevoelig voor kleine veranderingen in de hoeveelheid CO₂ die per ton beton cement of beton bespaard kan worden. Kleine variaties in de aannames kunnen soms voor grote variatie in de reductiekosten zorgen, met name als de CO₂-reducties per ton beton beperkt zijn.
4. Betonkernactivering is een energie-efficiënte en comfortabele manier om gebouwen te koelen en te verwarmen. Dit blijkt ook uit de kostencurve. Men moet zich echter goed realiseren dat de gerealiseerde energiebesparing zeer goed mogelijk is zonder beton. Het reductiepotentieel door inzet van betonkernactivering is niet direct toe te kennen aan het beton, terwijl het reductiepotentieel van alle andere opties wel direct zijn toe te kennen aan het beton. Daarom adviseren we betonkeractivering te zien als een systeemoptie om energiezuinige gebouwen mogelijk te maken en niet als een betonverduurzamingsoptie. Als betonkernactivering wel als vergelijkbare optie wordt meegeteld komt het gezamenlijk reductiepotentieel op bijna 1.600 kton/jaar (40% van de CO₂-emissies door de betonketen).

Voor de opties ‘beperken overdimensionering in de ontwerpfase’ en ‘langere levensduur door flexibel ontwerp’ bleek onvoldoende kwantitatieve gegevens beschikbaar om opgenomen te worden in de kostencurve.

¹ Bij productie van Portlandklinker wordt gewoonlijk CO₂ afgesplitst van kalksteen (in Nederland wordt meestal mergel gebruikt als bron voor kalksteen). Het afsplitsen van CO₂ heet decarbonisatie. Het reduceren van decarbonisatie door inzet van grondstoffen waarbij geen afsplitsing van CO₂ optreedt is een effectieve stap om CO₂-emissies te verminderen.



Aangezien deze maatregelen ingrijpen op een groot deel van het betongebruik zou aanvullend onderzoek naar het reductiepotentieel een waardevolle aanvulling kunnen leveren op deze studie. Mogelijk bieden de uitkomsten van de Stutech/Stufib-studies, die later dit jaar bekend worden voldoende aanknopingspunten om alsnog de CO₂-emissie-reductiekosten en het CO₂-emissiereductiepotentieel te berekenen.



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 tien verduurzamingsopties uitgekozen worden waar de industrie zich sterk voor wil maken, de zogenoemde handelingsperspectieven. Een innovatieagenda voor de betonketen voor de middellange termijn. Daarmee 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 verduurzamingsopties een selectie gemaakt van circa 35 opties. Door in overleg met andere werkgroepen die opties af te laten vallen die al onderdeel zijn van de verduurzamingsafspraken die afgesproken zijn in het genoemde 'concreet 1.0' of pas op de lange termijn bijdragen aan CO₂-emissiereductie. Vervolgens heeft de begeleidingscommissie tijdens een workshop uit deze opties een selectie gemaakt. In samenwerking met leden van de begeleidingscommissie heeft CE Delft deze selectie uitgewerkt tot de 16 verduurzamingsopties zoals samengevat in Tabel 2.

Tenslotte heeft CE Delft de kostencurve opgesteld op basis van de gegevens die verzameld zijn over deze 16 verduurzamingsopties. Deze kostencurve biedt het Netwerk Beton een objectieve basis voor het kiezen van tien handelingsperspectieven. Deze kostencurve wordt gepresenteerd in Hoofdstuk 3.

Het kiezen van deze handelingsperspectieven en het uitwerken tot concrete werkafspraken valt buiten dit project.



1.2 Doel project

Het doel van het project is om een ruwe inschatting van de kostencurve op te stellen voor de 16 opties voor de middellange termijn om de betonketen te verduurzamen. Op basis van gegevens die nu voorhanden zijn. Op een manier die onderlinge vergelijking van het CO₂-emissiereductiepotentieel en de CO₂-reductiekosten mogelijk maakt.

Het CO₂-emissiereductiepotentieel is een technisch reductiepotentieel, dat wil zeggen dat het reductiepotentieel het technisch potentieel is om CO₂-emissies te reduceren. Om het technisch reductiepotentieel te berekenen is uitgegaan van emissiereducties die nu al op laboratoriumschaal of pilotschaal bewezen zijn, zodat alle benodigde procedures voor grootschalige invoering op de markt voor 2020 gerealiseerd zou moeten kunnen worden.

De reductiekosten zijn de kosten die gemaakt moeten worden om de emissie van een ton CO₂ te voorkomen. De reductiekosten worden uitgedrukt in euro per ton CO₂.

In de inventarisatiestudie naar de 'Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw' (CE Delft, 2013) zijn alle milieueffecten van de betonketen meegenomen. Daaruit bleek een sterke correlatie van de verschillende milieueffecten met de CO₂-emissie. Daarom is in deze vervolgstudie ervoor gekozen om kwantificatie van verbeteropties te baseren op de mate waarin zij CO₂-emissies kunnen reduceren van de betonketen (reductiepotentieel) en daarbij benodigde kosten per ton voorkomen CO₂-emissie (reductiekosten).

1.3 Leeswijzer

De opzet van dit rapport is als volgt:

In Hoofdstuk 2 is het selectieproces van de verduurzamingopties beschreven.

In Bijlage A staat de lijst met opties voor de middellange termijn waarmee de begeleidingsgroep begonnen is. Vervolgens beschrijven we welke verduurzamingsopties geselecteerd zijn waarvan de CO₂-emissiereductiekosten en het CO₂-emissiereductiepotentieel onderzocht zijn.

Hiervoor is het nodig dat de duurzaamheidsopties geformuleerd worden op een manier die het mogelijk maakt om het reductiepotentieel en de daarvoor benodigde procesaanpassingen te kwantificeren.

Daarom zijn in Bijlage B de volgende aspecten beschreven:

- het werkingsprincipe van deze maatregel (hoe draagt deze maatregel bij aan CO₂-emissiereductie in de betonketen?);
- de reductiekosten (hoeveel kost het om op deze manier een ton CO₂ te besparen?);
- het reductiepotentieel (hoeveel CO₂-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?
- 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 een groot aantal verduurzamingsopties, 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 in overleg met de werkgroep kansen en belemmeringen zijn 35 opties overgebleven (Bijlage A). Tijdens de workshop met de begeleidingscommissie begin juni 2013 is uit deze lijst een selectie gemaakt van 16 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 mate van innovatie, reductiepotentieel, 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

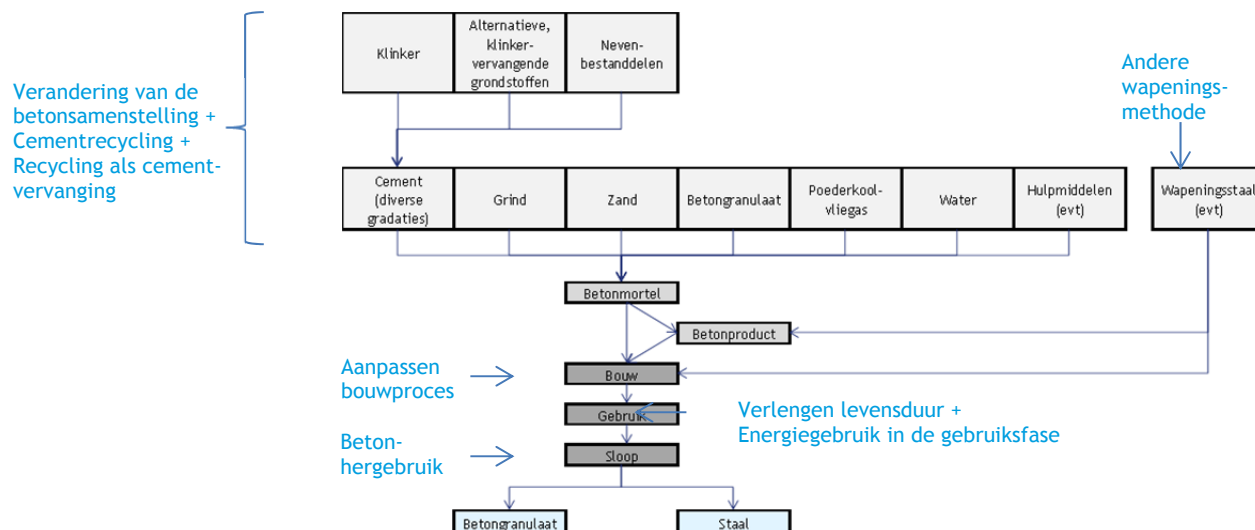
In Figuur 1 is weergegeven waar de verschillende categorieën ingrijpen in de levenscyclus van het beton.

Nadere beschouwing van deze opties laat zien dat er een grote nadruk ligt bij het reduceren van de benodigde hoeveelheid cement (met name het aandeel klinker). Dit is logisch gezien het feit dat over de levenscyclus van beton, de CO₂-emissies door de productie van klinker voor cement significant groter zijn dan de andere emissies (CE Delft, 2013).

Er is daarom een grote groep maatregelen die aansturen op verlaging van de emissie van de cementproductie door de betonsamenstelling te veranderen. Daarnaast is er de mogelijkheid om meer cement opnieuw te gebruiken waardoor minder CO₂-emissies nodig zijn, hetzij omdat er geen nieuw cement nodig is, hetzij omdat het oude cement als decarbonisatievrije grondstof voor nieuw cement wordt ingezet.



Figuur 1 Schematische weergave van de levenscyclus van beton en waar verschillende categorieën opties uit Tabel 2 ingrijpen in deze levenscyclus



Dit betekent niet dat er alleen verduurzamingsopties zijn voor partijen aan het begin en het eind van de productieketen.

Naast het feit dat de andere partijen een bewuste keuze voor emissiearme cementen en wapeningsmethoden zullen moeten ondersteunen zijn er nog een aantal andere zaken die gedaan kunnen worden.

Zo kan het bouwproces zo ingericht worden dat emissiearme cementen ingezet kunnen worden die een lagere initiële sterkte hebben.

Verder kan er anders ontworpen worden, zodat er niet meer beton gebruikt wordt dan strikt noodzakelijk. Of kan er zo ontworpen worden dat gebouwen en constructies hun volledige technische levensduur meegaan en niet voortijdig gesloopt hoeven te worden omdat ze niet meer voldoen aan de functionele eisen die aan hen gesteld worden.

Tabel 2 Overzicht van 16 opties voor de verduurzaming van de betonketen op de middellange termijn

Categorie	Afkorting	Verduurzamingsoptie
Verandering van de betonsamenstelling	Korrelverdeling	Optimaliseren korrelverdeling
	CEM X	Verruimen toegestane grondstoffen voor cement binnen Europese norm
	CSA-beliet	Inzet calcium sulpho-aluminaatcementen
	Supergesulfateerd	Inzet supergesulfateerde cementen
	Alternatief CSH	Inzet alternatief CSH Cement
Betonhergebruik/ cementrecycling/ recycling als cementvervanging	Geopolymeer	Inzet alkalisch geactiveerde materialen als cement
	Demontabel bouwen	Bouwen met demontabele standaard eenheden
	Mechanische cementrecycling	Mechanische cementrecycling via ADR of slim breken
	Thermische cementrecycling	Thermische cementrecycling via kringbouw
Andere wapeningsmethode	Bodemas	Inzet bodemas als vulstof met bindcapaciteit
	Staalvezels	Inzet staalvezels in plaats van traditionele wapening in gietbeton

Categorie	Afkorting	Verduurzamingsoptie
Aanpassen bouwproces	Bouwplanning	Langere uithardingstijd in gietbouw door bouwplanning
	Overdimensionering	Beperken overdimensionering in ontwerpfase
Verlengen levensduur	Flexibel bouwen	Langere levensduur door flexibel ontwerp
	Zelfhelend beton	Zelfhelend beton met calciumcarbonaat producerende bacteriën
Energiegebruik in de gebruiksfase	Betonkernactivering	Betonkernactivering in combinatie met warmtepomp en WKO als extra boven op EPC-eis

2.3 Verandering van de betonsamenstelling

De eerste categorie verduurzamingsopties: ‘verandering van de samenstelling van het beton’ reduceert CO₂-emissie omdat de verduurzamingsopties in deze categorie bepaalde stappen in het betonproductieproces waarbij veel CO₂ vrijkomt verminderen of overbodig maken.

Om te begrijpen hoe veranderingen aan de betonsamenstelling CO₂-emissies kunnen reduceren gaan we hieronder nader in op de productie van beton. Beton is een mengsel van verschillende bestanddelen. De klassieke bestanddelen zijn cement, grind, zand en water. Tegenwoordig worden ook gemalen hoogovenslak, betongranulaat, poederkoolvliegias, en chemische hulpmiddelen toegevoegd (zie Figuur 1).

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 Portlandklinker een belangrijk bestanddeel van cement. De productie van Portlandklinker is heel energie-intensief. Daar komt nog bij dat CO₂ wordt afgescheiden in het chemische proces dat nodig is om van kalk en silicaten Portlandklinker te maken. Hierdoor heeft de productie van Portlandklinker een grote klimaatimpact. Zo groot dat de CO₂-emissie door de productie van ongewapend beton bijna volledig bepaald wordt door de hoeveelheid Portlandklinker die gebruikt wordt (CE Delft, 2013).

Er wordt in Nederland een groot aantal cementen verkocht, afhankelijk van de toepassing varieert de samenstelling en het aandeel Portlandklinker. Voor de overzichtelijkheid en om kwantitatieve gegevens van de brancheverenigingen te kunnen verkrijgen, is in deze studie deze variatie teruggebracht tot twee soorten cement:

1. Portlandcementen, ook wel CEM I-cementen genoemd met een aandeel Portlandklinker van 90% of meer. De CO₂-emissie die vrijkomt bij de productie van dit type cement is circa 0,9 ton CO₂/ton cement.
2. Laagklinkergehalte cement, ook wel hoogovencement of CEM IIIB-cementen genoemd waarin het cement voor circa 30% uit Portlandklinker bestaat en voor circa 70% uit hoogovenslak. De CO₂-emissie die vrijkomt bij de productie van dit type cement is circa 0,3 ton CO₂/ton cement.

Door de hoeveelheid Portlandklinker in het beton te verminderen kan de CO₂-emissie door de productie van beton afnemen. Er zijn drie manieren geïdentificeerd waardoor op de middellange termijn de hoeveelheid Portlandklinker in betontoepassingen vermindert 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. Dit kan gebeuren door aanpassing van de deeltjesgrootteverdeling van het beton zonder dat dit invloed heeft op de chemische interactie tussen de deeltjes (Fennis, 2011). Hierdoor wordt het beton sterker zonder dat er meer chemische bindingen gevormd worden. Als het beton even sterk mag blijven zijn er minder chemische verbindingen in het materiaal nodig en kan dus het aandeel cement omlaag in het beton. Dit is het werkingsprincipe achter de optie ‘korrelverdeling’. Voor meer informatie over deze optie zie Bijlage B-1.
2. Verruiming van de grondstoffen die ingezet mogen worden om cement van te maken. Hierdoor kan de bindende eigenschap van cement gelijk blijven bij afnemende hoeveelheid Portlandklinker. Dit is het werkingsprincipe achter optie CEM X². Voor meer informatie over deze optie zie Bijlage B.2.
3. Ontwikkeling van een alternatief bindstelsel dat dezelfde werking heeft als Portlandklinker, maar bij geen of veel lagere CO₂-emissie. Dit is het werkingsprincipe achter de opties ‘CSA-beliet’, ‘supergesulfateerd’, ‘alternatief CSH’ en ‘geopolymeer’. Voor meer informatie over deze opties zie Bijlage B.3 tot en met Bijlage B.6.

2.3.1 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 gebruikt kan worden.

De meest hoogwaardige manier om dat te doen is door betonconstructies te hergebruiken in hun oorspronkelijke vorm. Hierdoor hoeft er geen nieuw beton gemaakt te worden en wordt een betonelement, bijvoorbeeld een vloer uit het ene gebouw gehaald om in het volgende gebouw geïnstalleerd te worden. Dit is het werkingsprincipe van de optie ‘demontabel bouwen’. Voor meer informatie over deze optie zie Bijlage B.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 grondstoffen bij de productie van het beton. Dit is het uitgangspunt van ‘cradle-to-cradle’ en het idee achter de opties mechanische en thermische cement-recycling.

De technologie achter de opties mechanische en thermische cementrecycling richten zich op het maximaal hergebruiken van het beton. Bij het mechanisch recyclen van beton via ADR ligt de nadruk op het ter plaatse produceren van granulaten die meteen opnieuw ingezet kunnen worden en komt daarnaast ook een fijne fractie vrij die ingezet kan worden als grondstof voor nieuw cement.

Bij mechanische recycling via slim breken en thermische recycling via kringbouw ligt de nadruk op het zo zuiver mogelijk terugwinnen van de verschillende fracties: met name hergebruik van de cementsteenhoudende fractie als decarbonisatievrije¹ grondstof voor nieuw cement is een zeer effectieve manier om door inzet van oud beton nieuw beton een lage carbon footprint te geven. Voor meer informatie over deze opties zie Bijlage B.8 en Bijlage B.9.

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 en hoogovenslakken, maar zou verder kunnen worden uitgebreid door inzet van bodemassen van afvalenergiecentrales.

² Indirect bepalend voor het reductiepotentieel van de opties ‘cementrecycling via kringbouw’ en ‘inzet van bodemas als vulmiddel met bindcapaciteit’. Deze opties vallen binnen de categorie hoogwaardige recycling.



Dat is het werkingsprincipe van verduurzamingsoptie inzet van bodemassen. Voor meer informatie over deze optie zie Bijlage B.10.

2.3.2 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 stalen constructie, de zogenoemde wapening. Omdat er veel energie nodig is bij de productie van staal is de CO₂-emissie bij de productie van staal vrij hoog. Daardoor heeft gewapend beton een relatief hoge CO₂-emissie per ton beton.

In sommige specifieke situaties in de gietbouw is het mogelijk om wapeningsstaal te vervangen door staalvezels. Bij het gebruik van de laatste generatie staalvezels kan minder staal worden toegevoegd, omdat de staalvezels beter verdeeld kunnen worden over het beton. Hierdoor kan in gietbeton in bepaalde situaties eenzelfde treksterkte belasting mogelijk gemaakt worden met minder staal en dus bij een lagere CO₂-emissie. Dit is het werkingsprincipe achter verduurzamingsoptie 'staalvezels'³.

Staalvezels hebben als beperking dat ze bij de huidige sloopmethodes niet volledig teruggewonnen kunnen worden. Dit beperkt de recyclebaarheid van staalvezels sterk. Echter met slim breken (zie mechanische cementrecycling) is volledige recycling van beton versterkt met staalvezels wel mogelijk. Voor meer informatie over deze optie zie Bijlage B.11.

2.3.3 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 eindresultaat behaald worden. Zoals uitgelegd in Paragraaf 2.3 betekent minder cement minder Portlandklinker en dus minder CO₂-emissie. Dit is het werkingsprincipe achter de verduurzamingsopties 'bouwplanning'. Voor meer informatie over de optie 'bouwplanning' zie Bijlage B.12.
De optie is alleen uitgewerkt voor gietbeton. Voor voorgespannen beton is deze optie niet mogelijk zonder evenredig de productiecapaciteit uit te breiden, dat leek geen realistische optie. Voor de betonproducten die niet voorgespannen worden was onvoldoende informatie voorhanden om de reductiekosten te kunnen berekenen. Daarom is alleen het aanpassen van de bouwplanning als manier om later te ontkisten in de kostencurve opgenomen.
2. Verminderen van de hoeveelheid beton die nodig is in de betonconstructie, door het beperken van overdimensionering in de ontwerpfase. Gezien de hoge CO₂-emissie die gerelateerd is aan de productie van beton, kan CO₂-reductie ook worden bereikt door minder beton toe te passen. Dit is het werkingsprincipe achter verduurzamingsoptie 'overdimensionering'.

³ Staalvezels kunnen niet gerecycled worden met reguliere sloopmethodes, maar wel door slimme brekers zoals besproken bij de opties mechanische cementrecycling.



Voor de optie ‘overdimensionering’ was onvoldoende informatie beschikbaar om de reductiekosten en het reductiepotentieel te kunnen berekenen. Daarom is deze optie niet meegenomen in de kosten-curve. Zowel later ontkisten van betonproducten als het beperken van overdimensionering in de ontwerpfase zijn naar verwachting van belang voor een omvangrijk deel van de betonmarkt. Onderzoek naar kosten en potentieel van deze opties zou wellicht een waardevolle aanvulling op deze studie kunnen zijn.

2.3.4 Langere levensduur van betonnen producten

Bij verlenging van de levensduur van een betonnen constructie zijn er geen of minder CO₂-emissies door sloop en vervanging. Omdat de CO₂-emissies tijdens de productie van een betonconstructie groot zijn, kan het raadzaam zijn om de levensduur van een betonconstructie te verlengen in plaats van te vervangen door een nieuwe betonconstructie.

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 de optie ‘flexibel bouwen’. De beschikbare informatie voor de optie ‘flexibel bouwen’ was voornamelijk kwalitatief en daarmee onvoldoende om de reductiekosten en het reductiepotentieel te kunnen berekenen. Daarom is deze optie niet meegenomen in de kostencurve.
2. Door het aanpassen van de betonsamenstelling waardoor het beton zelf in staat is om kleine scheurtjes te repareren, waardoor er niet alleen een langere levensduur van met name constructies zoals tunnels en bruggen (GWW en civiele toepassingen van beton) verwacht wordt, maar ook een reductie in het onderhoud. Dit is het werkingsprincipe van de verduurzamingsoptie ‘zelfhelend beton’. Voor meer informatie over deze optie, zie Bijlage B.15.

2.3.5 Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase

In het geval van een gebouw wordt er in de gebruiksfase door de gebruikers over het algemeen meer energie gebruikt dan dat er vrijkomt over de levenscyclus van de individuele materialen waaruit het gebouw is opgebouwd. Als het beton zou kunnen bijdragen aan het verlagen van het energiegebruik in de gebruiksfase zou dat een groot effect hebben op de CO₂-emissie van het beton.

Dit is het werkingsprincipe achter de verduurzamingsoptie ‘betonkernactivering’⁴. Er was onvoldoende informatie beschikbaar om voor alle soorten gebouwen een berekening te maken. De berekeningen zijn daarom gebaseerd op woningbouw. Voor meer informatie over deze optie, zie Bijlage B.16.

⁴ Hierbij moet wel gezegd worden dat de besparing in de optie betonkernactivering niet losgezien kan worden 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.



2.4 Samenvatting

Er zijn 16 verschillende maatregelen onderzocht om de CO₂-emissie van beton te reduceren, zie Tabel 2. Hun werkingsprincipes zijn op hoofdlijnen beschreven. De werkingsprincipes zijn te categoriseren als:

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.

In Bijlage B is per optie het werkingsprincipe in meer detail beschreven. Deze verduurzamingsopties verschillen in CO₂-emissiereductiekosten en CO₂-emissiereductiepotentieel.

Voor twee verduurzamingsopties was onvoldoende informatie beschikbaar om de CO₂-emissiereductiekosten en het CO₂-emissiereductiepotentieel te berekenen. Deze opties zijn daarom niet opgenomen.

Het gaat hierbij om de opties:

- beperken overdimensionering in de ontwerpfase;
- verlengen levensduur van betonnen gebouwen door flexibel ontwerp.

Door het genoemde gebrek aan informatie zijn deze opties niet opgenomen in de kostencurve die in Hoofdstuk 3 gepresenteerd wordt.

Dit wil niet zeggen dat deze opties niet kansrijk zijn. Onderzoek naar kosten en potentieel van deze opties zou wellicht een waardevolle aanvulling op deze studie kunnen zijn.

Mogelijk bieden de uitkomsten van de Stutech/Stufib-studies, die later dit jaar bekend worden voldoende aanknopingspunten om alsnog de CO₂-emissiereductiekosten en het CO₂-emissiereductiepotentieel te berekenen.





3 Kostencurve

In dit hoofdstuk presenteren en analyseren we het CO₂-emissiereductiepotentieel van de geselecteerde verduurzamingsopties en de reductiekosten waarmee dit reductiepotentieel gepaard gaat. Het reductiepotentieel en de bijbehorende reductiekosten zijn weergegeven in een kostencurve.

3.1 Aanpak en uitgangspunten

Het reductiepotentieel en de reductiekosten zijn deels gebaseerd op openbare informatie en deels op (confidentiële) praktijkinformatie, beschikbaar gesteld door de deelnemers van de begeleidingscommissie. De door de deelnemers aangeleverde informatie 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 CO₂-emissiereductiepotentieel en de CO₂-emissiereductiekosten van de verschillende verduurzamingsopties in het jaar 2020 ten opzichte van de huidige samenstelling, bouwprocessen en bouwvolumes. Hierbij is het referentiejaar 2010. Aangezien daarvoor in het kader van de voorgaande studie door CE Delft over de milieu-impact van beton, door de brancheorganisaties VOBN en BFBM gedetailleerde gegevens over de branche beschikbaar zijn gesteld.

Verder is het reductiepotentieel apart berekend voor ieder van de maatregelen. Aangezien er een aanzienlijke overlap is in reductiepotentieel van de verschillende verduurzamingsopties is het totale reductiepotentieel aanzienlijk minder dan de som van de individuele reductiepotentiëlen, zie Paragraaf 3.2.1.

Voor de emissiekentallen is gebruik gemaakt van de kentallen zoals gepubliceerd in het rapport 'Milieu-impact van betonegebruik in de Nederlandse bouw' (CE Delft, 2013). Aangezien daar slechts beperkt is gepubliceerd over de verdeling gewapend en ongewapend beton, is in Bijlage B uitgelegd hoe we aan de verdeling gewapend en ongewapend beton komen (dit is belangrijk voor de berekening van het reductiepotentieel van sommige verduurzamingsopties).

3.1.1 Aanpak en uitgangspunten bij bepaling van het reductiepotentieel

Het reductiepotentieel in de kostencurve is het CO₂-emissiereductiepotentieel dat technisch haalbaar is. Of dit reductiepotentieel daadwerkelijk gerealiseerd wordt hangt af van de mate waarin een verduurzamingsoptie toegepast wordt. Dit is mede afhankelijk van factoren zoals marktprijsontwikkeling, CO₂-prijs, wet- en regelgeving, overheidsbeleid, etc. Deze factoren zijn niet meegenomen in het technisch reductiepotentieel. De normprocedures zijn gedeeltelijk meegenomen. Er is gekeken wat de minimaal benodigde periode is om verduurzamingsopties toegelaten te krijgen tot de markt. Het gedeelte van de opties dat in 2020 goedgekeurd zou kunnen zijn, volgens de normen als alle betrokken partijen zich daarvoor maximaal zouden inzetten, is meegeteld bij het technisch reductiepotentieel. Door tal van omstandigheden kan de benodigde normprocedure in de praktijk langer uitvallen.



Het reductiepotentieel wordt sterk beïnvloed door twee parameters.

1. De mate waarin inzet van een verduurzamingsoptie CO₂-emissies vermindert vergeleken met inzet van de reguliere werkwijze.
2. De mate waarin een verduurzamingsoptie de huidige werkwijze kan vervangen.

Bij de bepaling van de CO₂-emissies van een verduurzamingsoptie zijn effecten over de hele levensduur meegenomen. Ter illustratie een voorbeeld. Stel dat in een hypothetische optie meer transportbewegingen nodig zijn waardoor er extra transportemissies optreden, maar dat die extra emissies wegvallen tegen de emissies die bespaard worden door uitsparing van betonproductie. Dan is het mogelijk dat er netto over de hele levensduur sprake kan zijn van een CO₂-besparing. Wij hebben voor iedere verduurzamingsoptie bepaald welke netto verandering er optreedt in de CO₂-emissies over de levensduur van het beton.

Het CO₂-emissiereductiepotentieel geldt voor de gehele levensduur van het beton. Toch is de emissie uitgedrukt in kiloton CO₂-emissie per jaar (kton⁵/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 2010⁶.

3.1.2 Aanpak en uitgangspunten bij berekening van de reductiekosten

De reductiekosten zijn uitgedrukt in €/ton. Dit betekent dat ze weergeven hoeveel euro het gemiddeld kost om een ton CO₂-emissie te voorkomen door het toepassen van de betreffende verduurzamingsoptie.

De reductiekosten zijn het product van twee factoren:

1. De mate waarin inzet van een verduurzamingsoptie CO₂-emissies voorkomt, vergeleken met de huidige gang van zaken.
2. De meerkosten die daarvan het gevolg zijn.

Zoals in de bovenstaande paragraaf is beschreven wordt voor de berekening van de CO₂-emissieverlaging alle effecten over de hele keten in ogenschouw genomen. Dit geldt ook voor de bepaling van eventuele meerkosten (of soms zelfs kostenreducties).

Om zicht te krijgen op meerkosten wordt uitgegaan van 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 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. Kort na introductie van bijvoorbeeld een vervangend cement is dit niet altijd het geval, maar in een transparante markt moet deze aanname na verloop van tijd wel opgaan. We zijn uitgegaan van de huidige marktprijzen, omdat er geen betrouwbare projecties beschikbaar waren voor marktprijsprojecties in 2020.

⁵ kton staat voor kiloton; 1 kton = 1000 ton = 1.000.000 kilogram.

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



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 Tabel 4 in Bijlage B.

Verdere uitgangspunten in de kostenberekening zijn:

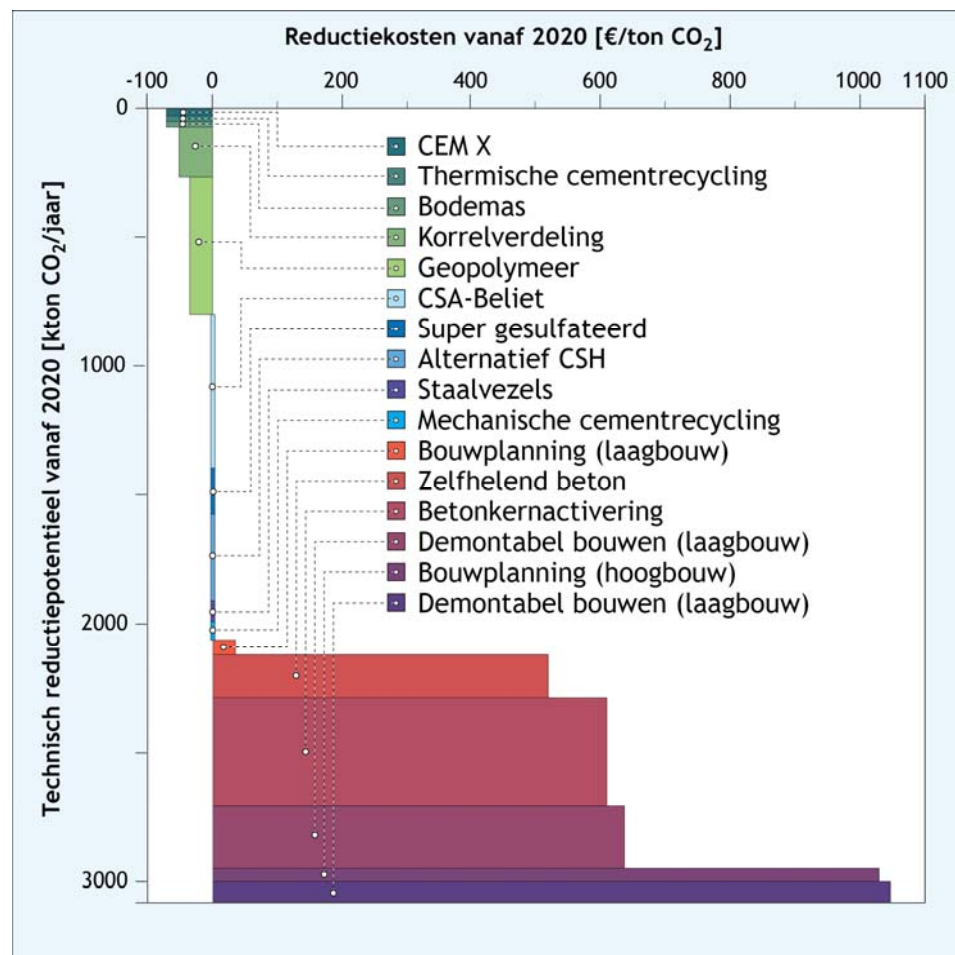
- Conform de voorschriften van het ministerie van Financiën is een reële discontovoet van 5,5% gehanteerd. Reëel wil zeggen dat geen rekening wordt gehouden met inflatie. Stel bijvoorbeeld dat de inflatie in een jaar 2% bedraagt, dan is de nominale rentevoet 5,5% (reëel) plus 2% inflatie is 7,5%.
- Als afschrijvingstermijn is de economische levensduur van de maatregelen gehanteerd.

Meer informatie over de kostenberekeningen is weergegeven in de bijlagen.

3.2 Kostencurve

De kostencurve is weergegeven in Figuur 2.

Figuur 2 Kostencurve verduurzamingsopties in de betonketen in Nederland (2020)



Bij de opties 'demontabel bouwen' en 'bouwplanning' is onderscheid gemaakt tussen toepassing op laagbouw en hoogbouw, dit is aangegeven door (laagbouw) en (hoogbouw) achter de optienaam toe te voegen. Dit is gedaan omdat uit de beschikbare informatie bleek dat de reductiekosten sterk verschilden met het type bouw. Bij demontabel bouwen waren de kosten juist lager in hoogbouw, terwijl bij het langer laten uitharden van de betonmortel in gietbouw de kosten juist hoger waren in de hoogbouw.

3.2.1 Betekenis van weergegeven reductiepotentiëlen

In Figuur 2 staat op de verticale as per optie het CO₂-emissiereductiepotentieel weergegeven in kton/jaar. De breedte van de kolom is een indicatie van het CO₂-emissiereductiepotentieel. Hoe breder de kolom hoe meer CO₂-emissie voorkomen kan worden door invoering van de betreffende optie.

De drie verduurzamingsopties met het grootste CO₂-emissiereductiepotentieel zijn alle drie alternatieve bindersystemen:

1. Inzet alkalisch geactiveerde materialen als cement 'geopolymeer'.
2. Inzet calcium sulpho-aluminaatcementen 'CSA-beliet'.
3. Inzet alternatief CSH Cement 'alternatief CSH'.

De 'CSA-beliet' cementen zijn het meest breed toepasbaar, maar hebben per ton cement dat ze vervangen een lagere CO₂-emissiereductie dan 'geopolymeren'. Daarom komen 'geopolymeren' in deze berekeningen beter naar voren. Daar komt bij dat het reductiepotentieel en de reductiekosten van 'geopolymeren' het gemiddelde zijn van twee zeer verschillende soorten 'geopolymeren' die sterk verschillen in reductiekosten en CO₂-reductiepotentieel. Er zijn dus zowel 'geopolymeren' in ontwikkeling waarvoor het reductiepotentieel kleiner uit zou vallen en de reductiekosten hoger en vice versa.

Bij het vergelijken van het totale reductiepotentieel zoals weergegeven in Figuur 2 met de CO₂-emissie van de Nederlandse betonproductie zoals berekend in het rapport 'Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw' (CE Delft, 2013) moet rekening gehouden worden met het feit dat het CO₂-emissiereductiepotentieel van sommige verduurzamingsopties elkaar overlapt.

Zo kan bij toepassing van het volledige technisch potentieel van de verduurzamingsoptie 'geopolymeer' de huidige Portlandklinkerproductie voor ongewapend beton vervangen worden door 'geopolymeer'. Verdere reductie van de CO₂-emissie door het veranderen van het bindstelsel is dan alleen mogelijk door het toepassen van verduurzamingsopties op gewapend beton, bijvoorbeeld door het toepassen van BSA-beliet cement. Daarmee wordt het reductiepotentieel van BSA-beliet wel beperkt tot 2/3 van het oorspronkelijke reductiepotentieel.

Dit betekent voor andere alternatieve bindersystemen dat als al het ongewapende beton is gemaakt met geopolymeer en BSA-beliet is toegepast als cementvervanger in al het gewapende beton er geen CO₂-emissiereductie mogelijk is door het toepassen van alle andere klinkervervangers zoals 'CEM X', 'supergesulfateerd', 'alternatief CSH', en ook 'bodemas'.

Voor het gerecyclede cement is er nog wel een mogelijkheid dat het bijdraagt aan extra CO₂-reductie, bovenop de reductie van het technisch potentieel van de genoemde bindersystemen. Mits er een manier gevonden wordt om gerecycled cement in te zetten als een decarbonisatievrije grondstof voor CSA-beliet, dan zou het reductiepotentieel voor CSA beliet sterk toenemen zonder te overlappen met het bestaande reductiepotentieel van CSA-beliet. Dat is nu echter nog niet aangetoond.



Het reductiepotentieel van staalvezelinzet blijft onverminderd als er een ander soort bindersysteem ingezet wordt.

Het reductiepotentieel van andere verduurzamingsopties zoals demontabel bouwen, bouwplanning, zelfhelend bouwen neemt proportioneel af met de emissiereductie die optreedt als de Portlandklinker vervangen wordt door alternatieve CO₂-arme bindsystemen zoals 'geopolymeer', 'CSA-beliet', etc.

Het reductiepotentieel van betonkernactivering wordt niet beïnvloed door de invoering van andere verduurzamingsopties. Echter omdat het reductiepotentieel bepaald wordt door de combinatie met de warmtepomp en de WKO, is deze optie niet vergelijkbaar met de andere verduurzamingsopties waar de CO₂-emissiereductie direct is terug te voeren op het beton. Daarom adviseren we om deze CO₂-emissiereductie niet op te nemen in het totale reductie-potentieel.

Het reductiepotentieel komt daarmee op iets meer dan 1.300 kton/jaar uit, ruim een derde van de voetafdruk van de betonketen (3.700 kton/jaar) (CE Delft, 2013). Dit betekent dat als het technisch reductiepotentieel van de genoemde verduurzamingsopties gerealiseerd wordt, er een significante reductie van de voetafdruk van de betonketen mogelijk is.

3.2.2 Betekenis van de weergegeven reductiekosten

In Figuur 2 staan op de horizontale as de reductiekosten weergegeven. De reductiekosten van een verduurzamingsoptie zijn de meerkosten die over de hele levenscyclus van het beton gemaakt moeten worden om één ton CO₂-emissie te voorkomen door het toepassen van de betreffende verduurzamingsoptie.

De vijf verduurzamingsopties met het laagste CO₂-emissiereductiekosten zijn alle vijf gebaseerd op de inzet goedkopere grondstoffen als cementvervanger:

- De reductiekosten van de optie 'korrelverdeling' hebben we berekend op basis van de aanname van een 10% cementreductie, door inzet van goedkopere grondstoffen met een fijne deeltjesgrootteverdeling zoals kalkmeel en vliegias.
- De reductiekosten van de optie 'CEM X' zijn berekend op basis van de aanname dat naast hoogovenslak ook vliegias en deel van het cement kan vervangen.
- De reductiekosten van de optie 'thermische cementrecycling' zijn berekend op basis van de aanname dat de cementrijke fractie die vrijkomt bij thermische recycling ingezet kan worden als een vulstof met bindmiddelcapaciteit. Een vergelijkbare aannames of de inzet van bodemas is gedaan bij de berekening van de reductiekosten bij de optie 'bodemas'.
- De reductiekosten van de optie 'geopolymeer' is berekend op basis van de aanname dat door inzet van goedkope grondstoffen zoals vliegias en slak en een beperkte hoeveelheid activator, een bindstelsel verkregen kan worden dat in kwaliteit kan concurreren met Portlandcement.

Het is duidelijk dat de bovengenoemde opties de goedkoopste manieren om CO₂ te reduceren vertegenwoordigen, maar hoe moeten de kosten van de overige opties gezien worden?



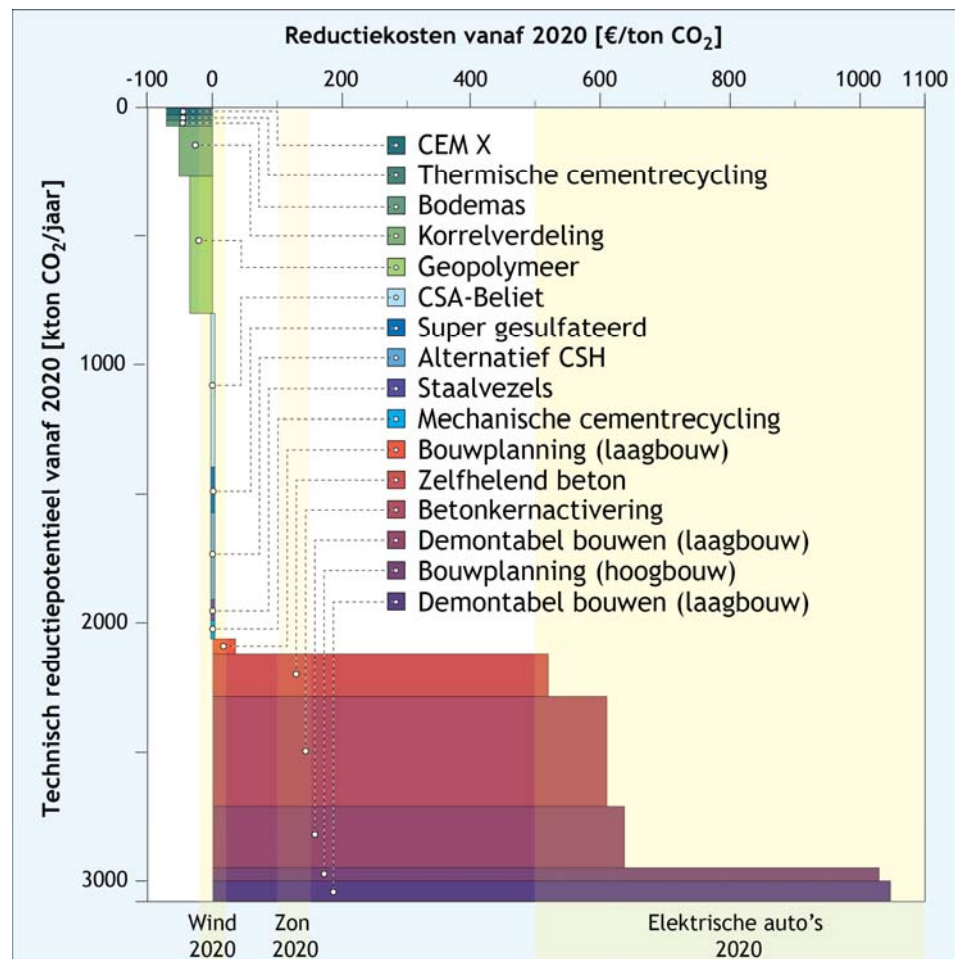
Een belangrijk aspect daarbij is de CO₂-emissieprijs. Hierover is weinig met zekerheid te zeggen. Wat zeker is, is dat het Verenigd Koninkrijk per 1 april van dit jaar een CO₂-bodemprijs (Carbon floor price) ingesteld heeft van 16 £/ton CO₂ (18,80 €/ton), die oploopt tot 30 £/ton CO₂ in 2020.

De opbrengsten worden geïnvesteerd in onder meer duurzame energie-opwekking, om de lange termijnconcurrentiekracht van het Verenigd Koninkrijk te versterken (HM-Treasury, 2011).

Verder is de lobby van het bedrijfsleven verdeeld. De meeste energie-intensieve bedrijven zijn tegen verhoging van de CO₂-emissieprijs. Maar niet allemaal. Opvallend is dat een bedrijf als Shell voor een CO₂-tax van circa 30 €/ton is.

In de berekening van de reductiekosten is de CO₂-prijs expres op nul gesteld zodat makkelijk gecorrigeerd kan worden voor de CO₂-prijs die men verwacht in 2020 door de betreffende prijs van de reductiekosten af te trekken.

Figuur 3 Kostencurve met referentie reductiekosten voor windenergie, zonne-energie en elektrische auto's in 2020



Verder is de vraag hoe de reductiekosten zich verhouden tot de kosten, die in andere sectoren gemaakt worden.

Wij hebben daarbij de volgende voorbeelden gekozen:

1. Windenergie opgewekt in Nederland. Volgens het SER-akkoord moet er in 2020 circa 6.000 MW vermogen aan windturbines op land beschikbaar zijn (54 PJ windenergie per jaar). Volgens een recente studie van het CPB bedragen de emissiereductiekosten van windenergie in Nederland tussen de -20 en + 20 €/ton, afhankelijk van de locatie in Nederland (CPB, 2013).
2. Zonne-energie opgewekt in Nederland. Volgens het SER-akkoord (SER, 2013) moet er in 2023 circa 186 PJ opgewekt worden via zonne-energie. In 2020 worden de reductiekosten van zonne-energie ingeschat op 124 €/ton (VNG, 2013). Voor particulieren zijn de reductiekosten negatief doordat ze mogen salderen en rekenen met de kosten voor elektriciteit inclusief energieheffing.
3. Elektrische auto's zijn belangrijk voor het halen van de duurzame transportdoelstellingen van de EU. In 2020 worden de reductiekosten van elektrische auto's ingeschat tussen de 500 en 1.100 €/ton CO₂ (CE Delft, 2011).

Voor de overzichtelijkheid hebben we deze reductiekosten weergegeven in de kostencurve, zie Figuur 3.

Deze vergelijking laat zien dat zelfs de duurdere opties reële reductiekosten kunnen zijn, mits ze op termijn voldoende reductiepotentieel bieden. Bij de opties die reëel lage reductiekosten hebben (maximaal even hoog als windturbines) beïnvloeden de opties elkaars reductiepotentieel negatief. Dat wil zeggen als het reductiepotentieel van de één wordt gerealiseerd, blijft er geen of veel minder reductiepotentieel van de andere opties over. Daarom is voor de middellange termijn ook inzet van opties nodig, die nu nog als zeer duur te boek staan.

Hierbij is het interessant dat de minimale reductiekosten van 500 €/ton, zoals weergegeven voor elektrische auto's, gebaseerd zijn op een door McKinsey verwachte sterke daling van de kosten van brandceltechnologie.

Mogelijk zal verdere bestudering van bijvoorbeeld de optie demontabel bouwen uitwijzen dat voor deze optie ook sterke kostenreducties mogelijk zijn tussen nu en 2020.

3.3 Gevoeligheidsanalyse

De kostencurves 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.

Hieronder bespreken we de belangrijkste aannames die van invloed zijn op de uitkomsten van de studie. Het gaat daarbij om de volgende aspecten:

1. Gebruik van marktprijs als inschatting van reductiekosten.
2. Reductiepotentieel moet nu al aannemelijk gemaakt kunnen worden op basis van laboratorium- of pilotschaaltesten.
3. Reductiepotentieel berekend op basis van beton- en cementconsumptie van 2010.



3.3.1 Marktprijs als basis voor inschatting van reductiekosten

De reductiekosten zijn ingeschat op basis van marktprijzen en de waarschijnlijkheid dat deze hoger of lager zullen worden door het invoeren van een bepaalde verduurzamingsoptie. Gezien de beperkte scope 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%.

Bij een paar opties lijken veel grotere afwijkingen mogelijk:

- Zelfhelend beton. Deze optie 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 zijn de bereikbaarheidskosten (die voor huidige betonbeschermingsmethoden sterk kunnen oplopen) nog niet meegenomen. Daarom heeft de optie ‘zelfhelend beton’ waarschijnlijk voor een groot aantal toepassingen negatieve of neutrale reductiekosten.
- Demontabel bouwen. Bij deze optie is uitgegaan van de kostengegevens die beschikbaar zijn gekomen uit één demonstratieproject. Deze kosten zouden sterk kunnen oplopen als er langere tijd opgeslagen wordt. Door het grote aantal langdurig leegstaande kantoren kan aan dat probleem echter voorbij worden gegaan door pas te slopen op het moment dat de onderdelen ergens anders toegepast kunnen worden. Verder is er nog niets gedaan om te kijken welke besparingsopties er zijn ten opzichte van het gebruikte demonstratieproject. In hoeverre is er nog te besparen door in het ontwerp rekening te houden met een mogelijk hergebruik van vloeren? In hoeverre zijn alle bewerkingen die in dit demonstratieproject genoemd worden ook daadwerkelijk nodig?
- Bij de cementrecyclingopties hangen de reductiekosten sterk af van de toepassing van de fijne cementsteenfractie. Er is nu uitgegaan van een toepassing als grondstof voor de productie van klinker, maar alleen in een laag percentage. Dat betekent dat deze fijne fractie niet of nauwelijks waarde vertegenwoordigt voor de cementproducent. Als straks blijkt dat bij één van de cementrecyclingopties er wel een mogelijkheid bestaat om de fijne cementsteenfractie als decarbonisatievrije grondstof van klinker of een alternatief bindstelsel te gebruiken, dan krijgt deze cementsteenfractie wel degelijk een waarde. Op dat moment worden de reductiekosten veel lager dan ze nu zijn.

3.3.2 Reductiepotentieel en reductiekosten moeten nu al aangetoond kunnen worden

Het reductiepotentieel is ingeschat op basis van reductiepotentieel dat nu al aangetoond kan worden. Dit betekent dat er ruim zes jaar beschikbaar is om de ontwikkeling marktrijp te maken. Dit zou voldoende moeten zijn. Dit betekent ook dat er veel tijd is voor mogelijke technologische vooruitgang waardoor het reductiepotentieel nog verder kan toenemen en de reductiekosten verder kunnen afnemen.

Zo is het reductiepotentieel van mechanische cementrecycling beperkt omdat slechts één eerste zeer beperkte test met gerecycled cement in de cementoven heeft plaats gehad. Deze proef was succesvol, maar heeft nog niet tot meer onderzoek geleid naar de inzet van gerecycled cement als decarbonisatievrije grondstof voor de productie van Portlandklinker of CSA-beliet cement. Het is zeer aannemelijk dat meer onderzoek een veel grootschaliger inzet van deze grondstof mogelijk maakt, waardoor het reductiepotentieel evenredig toeneemt.



3.3.3 Reductiepotentieel berekend op basis van beton- en cementconsumptie van 2010

Het reductiepotentieel is het berekend uitgaande van dezelfde beton- en cementbehoefte als in 2010. Dit is gedaan om te zorgen dat het resulterende reductiepotentieel ook vergeleken kan worden met de totale CO₂-emissie van 3.700 kton, die berekend was voor het betongebruik in 2010 (CE Delft, 2013). Als er echter meer gebouwd wordt in 2020 dan in 2010 dan stijgt ook het reductiepotentieel per optie. Het besparingspotentieel als aandeel van de voetafdruk zoals berekend voor 2010 stijgt daardoor niet.

Verder is aangenomen dat over de gehele beton- en cementconsumptie de verduurzamingsopties de gebruikelijke aanpak gemiddeld één op één kunnen vervangen. Gemiddeld klopt dit waarschijnlijk, maar voor individuele projecten kan het goed mogelijk zijn dat dat anders uitpakt. Zo is het mogelijk dat er van een alternatief bindersysteem minder of juist meer nodig is om een vergelijkbare performance te realiseren dan wanneer Portlandklinker gebruikt wordt.

3.4 Samenvatting

Op basis van de gegevens over de 16 verduurzamingsopties die in Hoofdstuk 2 zijn gepresenteerd en in Bijlage B zijn uitgewerkt, is de kostencurve opgesteld.

Hieruit kunnen we de volgende conclusies trekken:

De drie opties met het grootste reductiepotentieel zijn drie alternatieve bindersystemen:

1. Inzet alkalisch geactiveerde materialen als cement 'geopolymeer'.
2. Inzet calcium sulpho-aluminaatcementen 'CSA-beliet'.
3. Inzet alternatief CSH Cement 'alternatief CSH'.

Deze systemen hebben echter een dusdanige overlap in reductiepotentieel dat het totale reductiepotentieel van deze opties samen bijna 65% bedraagt van de som van de reductiepotentiëlen van deze opties.

Als we de overlap in reductiepotentieel tussen de verschillende opties meenemen, dan komen we op een reductiepotentieel van ruim 1.300 kton/jaar. Dit komt neer op ruim een derde van de voetafdruk van de betonketen (3.700 kton/jaar) (CE Delft, 2013). Dit betekent dat als het technisch reductiepotentieel van de genoemde verduurzamingsopties gerealiseerd wordt er een significante reductie van de voetafdruk van de betonketen mogelijk is.

De reductiekosten waarmee deze verduurzamingsopties gepaard gaan variëren sterk. Echter het bovengenoemde gezamenlijk reductiepotentieel van ruim 1.300 kton/jaar kan grotendeels gehaald worden op basis van alleen maatregelen met negatieve of neutrale emissiereductiekosten. Daarbij komt dat geen van de reductiemaatregelen duurder is dan de emissiereductiekosten van elektrische auto's.





4 Conclusies en aanbevelingen

De achtergrond van dit project is om een overzichtelijke samenvatting te presenteren van de 16 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 werkafspraken en middellange termijndoelstellingen voor de Green Deal Beton in de vorm van de overeenkomst 'Concreet 2.0'.

4.1 Kostencurve

Op basis van de gegevens over de 16 verduurzamingsopties, is een kostencurve opgesteld, zie Figuur 2.

Centraal in de kostencurve staan het reductiepotentieel en de reductiekosten. Het reductiepotentieel is het technisch potentieel om CO₂ te reduceren van de verduurzamingsoptie. Hierbij is het reductiepotentieel berekend door uit te gaan van wat de maximale graad van toepassing zou kunnen zijn in 2020 als alles op alles gezet werd om de betreffende verduurzamingsoptie zo snel mogelijk klaar te krijgen voor een verantwoord gebruik in de markt.

Verder is uitgegaan van de aanname dat de behoefte aan beton vergelijkbaar is opgebouwd als in 2020.

De reductiekosten zijn de kosten die gemaakt moeten worden om de emissie van een ton CO₂ te voorkomen door inzet van de betreffende verduurzamingsoptie.

Uit de kostencurve kunnen we de volgende conclusies trekken:

De drie opties met het grootste reductiepotentieel zijn drie alternatieve bindersystemen:

1. Inzet alkalisch geactiveerde materialen als cement; 'geopolymeer'.
2. Inzet calcium sulpho-aluminaatcementen; 'CSA-beliet'.
3. Inzet alternatief CSH Cement; 'alternatief CSH'.

Deze systemen hebben echter een dusdanige overlap in reductiepotentieel dat het totale reductiepotentieel van deze opties samen maximaal 60% bedraagt van de som van de reductiepotentiëlen van deze opties.

Als we de overlap in reductiepotentieel tussen de verschillende verduurzamingsopties meenemen dan komen we op een totaal reductiepotentieel van ruim 1.300 kton/jaar. Dit komt neer op ruim een derde van de voetafdruk van de betonketen (3.700 kton/jaar) (CE Delft, 2013).

Dit betekent dat als het technisch reductiepotentieel maximaal gerealiseerd wordt, er een significante reductie van de voetafdruk van de betonketen mogelijk is.

De reductiekosten waarmee deze verduurzamingsopties gepaard gaan variëren sterk. Echter het bovengenoemde gezamenlijk reductiepotentieel van ruim 1.300 kton/jaar kan grotendeels gehaald worden op basis van alleen maatregelen met negatieve of neutrale emissiereductiekosten.



Vanwege de grote onduidelijkheid over de kosten van CO₂-emissierechten, zijn deze niet opgenomen in de berekening van de reductiekosten. Het effect van de CO₂-emissierechten kan verrekend worden door de verwachte CO₂-emissiekosten van de reductiekosten af te trekken.

De reductiekosten van alle verduurzamingsopties zijn lager dan de reductiekosten van een zeer populaire methode om CO₂-emissies te reduceren: elektrische auto's, zie Figuur 3.

Voor twee verduurzamingsopties was onvoldoende informatie beschikbaar om de reductiekosten en het reductiepotentieel te berekenen.

Het gaat hierbij om de opties:

- beperken overdimensionering in de ontwerpfase;
- verlengen levensduur van betonnen gebouwen door flexibel ontwerp.

Door het genoemde gebrek aan informatie zijn deze opties niet opgenomen in de kostencurve die in Hoofdstuk 3 gepresenteerd wordt. Aanvullend onderzoek is hier gewenst. Mogelijk bieden de uitkomsten van de Stutech/Stufib-studies, die later dit jaar bekend worden, voldoende aanknopingspunten om alsnog de reductiekosten en het reductiepotentieel te berekenen.

Voor alle gepresenteerde getallen geldt dat ze bedoeld zijn om de opties ten opzichte van elkaar te vergelijken. In dit stadium van de ontwikkeling is de onzekerheidsmarge op het reductiepotentieel en de reductiekosten vrij groot.

4.2 Kiezen van verduurzamingsopties

Er zijn verschillende manieren om de tien prioritaire handelingsperspectieven te kiezen:

Je kunt je volledig laten leiden op basis van het reductiekosten die blijken uit de kostencurve. Op volgorde van mate van reductiepotentieel zijn dan:

- CSA-Beliet;
- geopolymeer;
- alternatief CSH;
- korrelverdeling;
- supergesulfateerd;
- staalvezels;
- mechanische cementrecycling;
- CEM X;
- thermische cementrecycling;
- bodemas.

Gezien de overlap in het reductiepotentieel is de vraag of dat gewenst is en of je niet beter rekening kunt houden met de overlap tussen reductiepotentiëlen en daarom kiezen voor spreiding over de verschillende categorieën.

Hieronder geven we aan hoe je dat zou kunnen doen:

- Verandering van de betonsamenstelling: in deze categorie bieden de opties 'CSA-beliet' en 'geopolymeer' het grootste reductiepotentieel.
- Cementrecycling via ADR, slim breken of kringbouw. In deze categorie lijkt 'slim breken' het meeste potentieel voor de middellange termijn te hebben.
- Andere wapeningsmethode door het toepassen van de optie 'staalvezels'.
- Aanpassen bouwproces. In deze categorie lijkt een langere uithardingstijd van het cement kansrijk in de laagbouw of bij andere toepassingen waarvan het tijdpad niet kritisch is.



- Langere levensduur van betonproducten: in deze categorie lijkt de optie zelfhelend beton kansrijk.
- Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase: in deze categorie is de optie betonkernactivering de enige optie. Echter, we raden aan om deze optie vooral te zien als een systeem waardoor beton deel uit kan maken van duurzaam bouwen en niet zo zeer als een manier om de CO₂-emissie ten gevolge van betongebruik te verminderen.

Hiermee komen we op zes verduurzamingsopties. Wellicht kunnen de overige handelingsperspectieven ingevuld worden door ontwerpopties die in deze studie niet uitgewerkt konden worden. Dit kan bijvoorbeeld door gebruik te maken van informatie die later dit jaar beschikbaar komt (zoals de Stutech/ Stufib-studie).





Literatuur

CE Delft, 2013

Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout
Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw
Delft : CE Delft, 2013

CPB, 2013

Annemiek Verrips, Rob Aalbers en Free Huizinga
KBA Structuurvisie, 6.000 MW Windenergie op land
Den Haag : Centraal Planbureau, 2013

Fennis, 2011

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

HM Treasury, 2011

Carbon price floor consultation: the Government response
Publicatie van HM Treasury, ISBN 978-1-84532-845-0
Beschikbaar via:
www.hm-treasury.gov.uk/d/carbon_price_floor_consultation_govt_response.pdf

CE Delft, 2011

Gopalakrishnan Duleep (ICF), Huib van Essen (CE Delft), Bettina Kampman
(CE Delft), Max Grünig (Ecologic)
Impacts of Electric Vehicles - Deliverable 2
Assessment of electric vehicle and battery technology
Delft : CE Delft, 2011

SER, 2013

Energieakkoord voor duurzame groei (versie september 2013)
Beschikbaar via:
www.ser.nl/-/media/files/internet/publicaties/overige/2010_2019/2013/energieakkoord-duurzame-groei/energieakkoord-duurzame-groei-09-09-2013.ashx
Den Haag : Sociaal Economische Raad, 2013

VNG, 2013

Lokaal energiek: decentrale duurzame elektriciteit
Business case en maatschappelijke kosten-batenanalyse
Den Haag : Vereniging Nederlandse Gemeenten (VNG), 2013





Bijlage A Optie-overzicht tijdens kick-off

	Schakel in de keten	Principe handelingsperspectief	Handelingsperspectief	Kennishouders
1	Beton	Minder klinker/m ³ beton	Optimale korrelverdeling toeslagmaterialen	Mantijn van Leeuwen, Thies v/d Wal
2	Betonrecycling	Cement terugwinnen	ADR	Peter Broere, David Heykoop, 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 Delft-rapport)	
7		Minder klinker	CEM X	
8		Lagere prestatiecement	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'	ENCI
13			Cemroc: hoogovenslakken met CaSiO ₃	
14		Minder klinker	Verbeterde korrelopbouw	Mantijn van Leeuwen
15	Nieuwe bindmiddelen	Zie betonrecycling	Zie 2,3,4	
16	Toeslagmaterialen	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	Betonproducten	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			Zelfhelend 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.	
34	Gebruiksfase	Beperken bouwafval	Legoisering?	Thies v/d Wal, Nanda Naber (TU Delft)
35		Schoner toeslagmateriaal voor beton	Aanscherpen productcertificaat?	





Bijlage B Verduurzamingsopties en kosten grondstoffen

In deze bijlage staan de uitwerkingen van de verduurzamingsopties zover er voldoende informatie beschikbaar was om het reductiepotentieel en de reductiekosten van de betreffende optie te kunnen berekenen. Een overzicht van alle 16 verduurzamingsopties die uit de workshop zijn gekomen staan weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 Overzicht 16 verduurzamingsopties

Nr	Afkorting	Verduurzamingsoptie
1	Korrelverdeling	Optimaliseren korrelverdeling
2	CEM X	Verruimen toegestane grondstoffen voor cement binnen Europese norm
3	CSA-beliet	Inzet calcium sulpho-aluminaatcementen
4	Supergesulfateerd	Inzet supergesulfateerde cementen
5	Alternatief CSH	Inzet alternatief CSH Cement
6	Geopolymeer	Inzet alkalisch geactiveerde materialen als cement
7	Demontabel bouwen	Bouwen met demontabele standaardeenheden
8	Mechanische cementrecycling	Mechanische cementrecycling via ADR of slim breken
9	Thermische cementrecycling	Thermische cementrecycling via kringbouw
10	Bodemas	Inzet bodemas als vulstof met bindcapaciteit
11	Staalvezels	Inzet staalvezels in plaats van traditionele wapening in gietbeton
12	Bouwplanning	Langere uithardingstijd beton door aanpassing van de bouwplanning
13	Overdimensionering	Beperken overdimensionering in ontwerpfase
14	Flexibel bouwen	Langere levensduur door flexibel ontwerp
15	Zelfhelend beton	Zelfhelend beton
16	Betonkernactivering	Betonkernactivering in combinatie met warmtepomp en WKO als extra bovenop EPC-eis

In Bijlage B-1 tot en met Bijlage B.16 worden de werkingsprincipes, de reductiekosten, het reductiepotentieel en het implementatiepotentieel van deze opties uitgewerkt, het nummer van de bijlage komt overeen met het nummer in Tabel 3.

Voor de Opties 13 en 14 was onvoldoende informatie voor een kwantitatieve inschatting van het potentieel beschikbaar. Van deze opties ontbreekt daarom een bijlage.

In de bijlagen geven we zoveel mogelijk aan welke bronnen gebruikt zijn. Er waren twee typen data waar geen openbare bronnen van beschikbaar waren: de prijzen van betonbestanddelen en het aandeel ongewapend beton.

De prijzen van betonbestanddelen zijn noodzakelijk voor het berekenen van de reductiekosten. Daarom hebben verschillende leden van de begeleidingscommissie vertrouwelijke prijsopgaaf gedaan voor de onderstaande grondstoffen waarna de opgegeven cijfers gemiddeld zijn.



De standaard deviatie⁷ op deze cijfers varieerde tussen de 10 en 20%. Het is dus mogelijk dat lokaal in Nederland tot 20% hogere of lagere prijzen gebruikelijk zijn. De reductiekosten zijn berekend, gebruik makend van de onderstaande prijzen voor grondstoffen.

Tabel 4 Gemiddelde prijzen betonbestanddelen (€₂₀₁₃ per ton)

Bestanddeel beton	Gemiddelde prijs (€/ton)
Portlandcement CEM I 52,5 R	87
Portlandcement CEM I 42,5 N	82
Hoogovencement CEM III	71
Rivierzand	13
Riviergrind	18
Betongranulaat 4-12	12
Poederkoolvliegias	35
Kalksteenmeel	45
Hoogovenslakken	65

Het aandeel ongewapend beton is bepaald op basis van de opgave van VOBN en BFBN over het aandeel beton dat in 2010 is gebruikt, waarbij inschattingen zijn gemaakt over het aandeel ongewapend per categorie.

De gebruikte categorieën waren voor betonproducten: woningbouw, utiliteit, GWW/civiel. De inschatting van het aandeel ongewapend was respectievelijk: 5%, 5%, 85%.

De gebruikte categorieën waren voor betonmortel: wanden, vloeren, constructie, fundering, overig in woningbouw en utiliteit en gewapend en ongewapend beton in GWW/civiel.

De inschatting van ongewapend beton voor wanden, vloeren, constructie, fundering en overig was respectievelijk: 90%, 5%, 5%, 5% en 90%.

In GWW/civiel was de inschatting 50% ongewapend.

Hiermee kwam het aandeel ongewapend in betonmortel op 20% van de 8 miljoen m³ beton die in 2010 gemiddeld was gebruikt.

Het aandeel ongewapend beton in betonproducten kwam op gemiddeld 50% beton van de 6 miljoen m³ die naar schatting in 2010 gemiddeld was gebruikt.

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



Bijlage B-1 Korrelverdeling

Optimaliseren korrelverdeling

Reductiekosten CO₂-emissie: -73 à -36 €/ton
CO₂-emissiereductiepotentieel: 180.000-204.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Optimaliseren van de korrelverdeling in beton biedt de mogelijkheid de sterkte van het beton te verhogen door de pakkingdichtheid van het materiaal te verhogen. Dat betekent dat de ruimte, die ingenomen wordt door lucht en water, verminderd wordt door de deeltjesgrootteverdeling van het beton te optimaliseren.

Inmiddels zijn er modellen beschikbaar die aan kunnen geven welke combinaties van deeltjesgrootteverdeling per type grondstof voor optimale resultaten kunnen zorgen (Fennis, 2011). Hiervoor is het wel noodzakelijk dat grondstofleveranciers bij iedere batch die geleverd wordt, de korrelgrootteverdeling aangeven en dat grondstoffen apart per batch opgeslagen kunnen worden (Fennis, 2013).

Reductiekosten

Als er geoptimaliseerd wordt op basis van grondstoffen, die nu al standaard worden ingekocht, kan er tot 10% minder cement gebruikt worden (Fennis, 2013; CRH-SCC, 2013). 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 grondstofkostenoverzicht in Bijlage B).

Hier staan extra handeling en opslagkosten om de juiste mix van deeltjesgroottes te kunnen garanderen. Deze is door industrieexperts ingeschat op 1-2% van de uitsparing van de grondstofkosten (CRH-SCC, 2013). Uitgaande van dezelfde grondstofkosten als voor de uitsparing is dat minimaal 0,8 en maximaal 1,7 €/ton cement.

De CO₂-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 CO₂-emissie van Nederlands cement, volgens opgave van de Betondatabase. Deze bedraagt 0,5 ton CO₂ per ton cement. De reductie van de hoeveelheid CO₂ per ton cement door toepassing van deze optie is dan ook 0,05 ton CO₂/ton cement.

Hieruit volgt dat door toepassing van deze optie voor iedere ton CO₂-emissie die wordt voorkomen er ook tussen de € 36 en € 73 verdiend wordt.



In het volgende overzicht staan de berekende CO₂-reductiekosten en de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren.

Omschrijving	Min.	Max.	Eenheid
Uitsparing cementgrondstof	-4,4	-3,5	€/ton cement
Kosten handeling en opslag	0,7	1,7	€/ton cement
Cementbesparing door toepassing Optie 1	10%	10%	%
Gemiddelde CO ₂ -emissie bij de productie van cement	0,5	0,5	ton CO ₂ /ton
Reductie CO ₂ -emissie per benodigde eenheid cement	0,05	0,05	ton CO ₂ /ton
Reductie kosten	-73	-36	€/ton CO ₂

Reductiepotentieel

Uit praktijkproeven is gebleken dat bij de huidige inkoop van grondstoffen circa 10% vermindering van cementgebruik 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 vloeieigenschappen (CRH-SCC, 2013). De verwachting van de onderzoekers is dat als bedrijven op termijn op deeltjesgrootteverdeling 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 (Fennis, 2013).

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 D) komt daarmee het CO₂-emissiereductiepotentieel op 180.000 à 204.000 ton CO₂ per jaar.

In het volgende overzicht staan het berekende CO₂-emissiereductiepotentieel en 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	0,5	0,5	ton CO ₂ /ton
Reductie CO ₂ -emissie per benodigde eenheid cement	0,05	0,05	ton CO ₂ /ton
CO ₂ -emissiereductiepotentieel	180.000	204.000	ton CO ₂ /jaar



Implementatie potentieel

Technisch

In de afgelopen twee jaar heeft een aantal bedrijven in samenwerking met de TU Delft onderzocht hoe ze hun betonmengsels zouden kunnen optimaliseren. Ondanks het feit dat het 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.

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.

Financieel

Er zullen meer silo's gebruikt moeten worden om grondstoffen droog en apart op deeltjescategorie na het malen op te slaan.

Literatuur/bronnen

CRH-SCC, 2013

Toelichting door van Mantijn van Leeuwen, bij proeven die door industriële partners van Sonja Fennis zijn uitgevoerd naar aanleiding van haar promotieonderzoek

Fennis, 2011

Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization

Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor aan de Technische

Universiteit Delft, op maandag 17 januari 2011 door S.A.A.M. Fennis-Huijben

Fennis, 2013

Telefonische toelichting door Sonja Fennis bij proefschrift, augustus 2013



Bijlage B.2 CEM X

Verruimen toegestane grondstoffen voor cement binnen Europese norm

Reductiekosten CO₂-emissie: -106 à -41 €/ton CO₂
CO₂-emissiereductiepotentieel: 22.000-26.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

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 onder andere 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 klinkergehalten vastgesteld voor de cementsoorten CEM II/C (klinkergehalten > 50%) en CEM VI (< 50%), zie Tabel E-1, met de geel gemarkeerde aanduidingen.

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 CO₂-emissies verlaagd (Bijlage D).

De introductie van CEM X is wereldwijd van belang om de milieueffecten van cement te verlagen in landen waar geen of weinig hoogovenslak voorhanden is voor de productie van CEM III.

Reductiekosten

Volgens de begeleidingscommissie bestaat het reductiepotentieel van CEM X in Nederland uit vervanging van CEM II- en CEM VI-cementen. Op basis van de indeling volgens de norm EN197-1 (Tabel E-1, Bijlage D) is de inschatting gemaakt dat deze cementen gemiddeld circa 50% Portlandklinker bevatten en dus ook een CO₂-emissie hebben van 0,5 ton CO₂/ton cement.

De CO₂-emissie van de CEM X-cementen is vergelijkbaar met de CO₂-emissie van CEM III-cementen en bedraagt 0,3 ton CO₂/ton cement.

Kosten van CEM X worden bepaald door de mate waarin klinker door goedkopere soorten grondstof vervangen wordt. De schatting van experts uit de industrie (Bijlage D) is dat CEM X 15-30% goedkoper is dan CEM I. Hiermee komt de prijs van CEM X op een bedrag tussen de € 61 en € 74 per ton. Hieruit volgt dat door toepassing van deze optie voor iedere ton CO₂-emissie die wordt voorkomen er ook tussen de € 41 en € 106 verdiend wordt.

In het volgende overzicht staan de berekende CO₂-emissiereductiekosten en de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren.

Omschrijving	Waarde	Eenheid
Kosten huidige cementen	82	€/ton cement
Kosten CEM X	15-30%	onder CEM I
CO ₂ -emissie huidige cementen	0,5	ton CO ₂ /ton
CO ₂ -emissie CEM X	0,3	ton CO ₂ /ton
CO ₂ -emissiereductiekosten	-106 à -41	€/ton CO ₂



Reductiepotentieel

Voor Nederland zou toepassing van CEM X kunnen leiden tot CO₂-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 D). In de vorige paragraaf is toegelicht waarom de CO₂-emissie bij de productie van CEM X circa 0,2 ton CO₂/ton cement lager is dan de CO₂-emissie bij de productie van CEM II en CEM IV. Hiermee komt het CO₂-emissiereductiepotentieel op gemiddeld 24.000 ton CO₂/jaar.

In het volgende overzicht staan het berekende CO₂-emissiereductiepotentieel en 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	0,5	ton CO ₂ /ton
CO ₂ -emissie CEM X	0,3	ton CO ₂ /ton
CO ₂ -emissiereductiepotentieel	22.000-26.000	ton CO ₂ /jaar

Implementatie potentieel

Technisch

De toepasbaarheid van CEM X is al bewezen.

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 implementatiepotentieel gerealiseerd is (zie Bijlage D).

Financieel

Geen investeringen nodig, lagere kosten voor gebruikers.

Literatuur/Bronnen

Bijlage D

Milieueffecten bij inzet van cementen en alternatieve bindmiddelen voor beton - nu en straks, oor Dr.ir J.W. Frenaij (ENCI BV), Ing. P. de Vries (ENCI BV), Dr.ir M. van Leeuwen (CRH - Sustainable Concrete Centre), 2013



Bijlage B.3 CSA-beliet

Inzet calcium sulpho-aluminaat cementen

Reductiekosten CO_2 -emissie: 0 €/ton
 CO_2 -emissiereductiepotentieel: 480.000-720.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Calcium sulpho-aluminaatcementen bieden een alternatief bindersysteem met een lagere CO_2 -footprint dan Portlandcement (Portlandcement wordt ook aangeduid met CEM I of OPC).

Bij toepassen van de verduurzamingsoptie CSA-beliet wordt in het beton het bindersysteem op basis van Portlandklinker vervangen door calciumsulpho-aluminaat bindersysteem, ook wel klinkers op basis van beliet, calcium sulfoaluminateferriet genoemd. De productie van deze klinkers wordt voorbereid door Lafarge (Walenta en Comparet, 2011) en door Heidelbergcement (Dienemann e.a., 2013).

De CO_2 -emissies zijn lager omdat er minder calcium carbonaat gedecarboneerd⁸ wordt, er een circa 200 graden lagere oventemperatuur 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 Portlandklinker. Dit betekent dat ook de CO_2 -emissie van CEM III-cement met 20-30% omlaag kan.

Als er een decarbonisatievrije bron voor beliet wordt gevonden zou een veel grotere CO_2 -emissiereductie mogelijk zijn. Een mogelijke bron zou gerecycled cement kunnen zijn omdat bij de dehydratatie van cement beliet en ongebluste kalk (calciumoxide) ontstaat (zie Bijlage C).

Reductiekosten

Volgens opgave van Lafarge en Heidelbergcement zijn de grondstoffen grotendeels vergelijkbaar met de grondstoffen van Portlandcement, dus daar wordt geen kostenverschil 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 is een veel compactere oven, die ook goedkoper uitgevoerd kan worden mogelijk door de lagere procestemperaturen.

Gezien de kwaliteit van deze cementen zal de marktprijs volgens de experts in de begeleidingscommissie (zie Bijlage D) vergelijkbaar zijn met dat van CEM I en CEM III afhankelijk in welk cement dit bindersysteem de Portlandklinker 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 Portlandklinker vervangen. Dit betekent dat van de volledige Nederlandse cementproductie de CO₂-emissie met 20-30% gereduceerd kan worden.

De Nederlandse cementproductie bedroeg in 2010 bedroeg 4,8 miljoen ton cement (Bijlage D). De gemiddelde CO₂-uitstoot van dit cement was 0,5 ton CO₂/ton cement (Betondatabase). Dit betekent dat het CO₂-emissiereductiepotentieel circa 480.000 à 720.000 ton/jaar bedraagt.

In het volgende overzicht staan het berekende CO₂-emissiereductiepotentieel en 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 calcium Sulfo-aluminaatklinker	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

Technisch

Deze cementen bevinden zich nog in de pilotfase. De eerste demonstratietesten zijn aangekondigd. Daarna zullen deze cementen zich in de praktijk moeten bewijzen.

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 Heidelberg cement.

Financieel

Geen investeringen nodig, kan in bestaande ovens geproduceerd worden.

Literatuur/bronnen

Walenta en Comparet, 2011

New cementsandinnovative 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

Dr Wolfgang Dienemann, Ernest Jelito, Frank Bullerjahn, Dr. Dirk Schmitt, Dr. MohsenBenHaha

BCT Technology - a new alternative binder concept

Gepubliceerd in ZKG, 5, 2013, p 25-27. Beschikbaar via www.zkg.de.



Bijlage B.4 Supergesulfateerd

Inzet supergesulfateerde cementen

Reductiekosten CO₂-emissie: 0 €/ton
CO₂-emissiereductiepotentieel: 81.000-284.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Supergesulfateerde cementen bieden een alternatief bindersysteem met een lagere CO₂-footprint dan Portlandcement (Portlandcement wordt ook aangeduid met CEM I of OPC).

Dit 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 CO₂-emissie bij de productie van het gipsbranden zijn veel lager dan bij cementen gebaseerd op Portlandcement. Dit komt door de lage productietemperatuur en doordat er geen decarbonisatie optreedt. Hierdoor wordt de CO₂-reductie 90-95% lager dan CEM I-opgave Holcim (Greenthinker, 2013).

Het supergesulfateerd cement is met name geschikt voor omgevingen waar het beton bloot staat aan agressieve omgevingsfactoren. Als veelbelovende toepassingen wordt het gebruik voor betonmortel GWW/civiel-toepassingen genoemd.

Het potentieel van toepassing in betonmortel voor GWW/civiel-toepassingen heeft een potentieel van 0,995 m³ beton/jaar (CE Delft, 2013; Tabel 2).

De CO₂-emissie van beton varieert in deze toepassingen tussen de 0,09 ton CO₂/ton beton en de 0,3 ton CO₂/ton beton (CE Delft, 2013; p33).

Hiermee komt het CO₂-emissiereductiepotentieel op 81.000-284.000 ton per jaar.

In het volgende overzicht staan het berekende CO₂-emissiereductiepotentieel en de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren.



Omschrijving	Waarde	Eenheid
CO ₂ -emissiereductie door toepassing super-gesulfateerd	90-95%	%
Betonmortel gebruik in GWW/civiel/agrarisch/overig	0,995	mln. m ³ /jaar
CO ₂ -emissie betonmortel	0,09-0,3	ton CO ₂ /m ³ beton
CO ₂ -emissiereductiepotentieel	81.000-284.000	ton CO ₂ /jaar

Implementatie potentieel

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.

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.

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.

Literatuur/bronnen

CE Delft, 2013

Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout
Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw
Delft : CE Delft, 2013

Greenthinker, 2013

Persbericht van Holcim over Cemroc op Greenthinker network site:
<http://www.greenthinkernetwork.com/guide/products/masonry-and-concrete/concrete/holcim-us-inc.html>

Bijlage D

Milieueffecten bij inzet van cementen en alternatieve bindmiddelen voor beton - nu en straks, door Dr.ir J.W. Frenaij (ENCI BV), Ing. P. de Vries (ENCI BV), Dr.ir M. van Leeuwen (CRH - Sustainable Concrete Centre), 2013



Bijlage B.5 Alternatief CSH

Inzet alternatief CSH-cement

<i>Reductiekosten CO₂-emissie:</i>	<i>0 €/ton</i>
<i>CO₂-emissiereductiepotentieel:</i>	<i>312.000-352.000 ton/jaar</i>

Werkingsprincipe

Alternatief CSH-cement is een bindersysteem met een lagere CO₂-footprint dan Portlandcement (Portlandcement wordt ook aangeduid met CEM I of OPC). Het alternatieve bindersysteem wordt geproduceerd op basis van dezelfde grondstoffen als Portlandcement, 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 CO₂-emissiereductie 50% vergeleken met Portlandcement resulterend in 350-480 kg CO₂ per ton cement. Deze lage CO₂-emissie is het resultaat van 15-20 % extra CO₂-emissie door meer elektriciteit voor het malen, 30-35% CO₂-emissiereductie door lagere proces-temperaturen, 45-55% CO₂-emissiereductie door minder decarbonisatie (ENCRA, 2011).

De benaming alternatief CSH-cement komt voort uit het feit dat de werkzaamheid van Portlandcement gebaseerd is op de vorming van calciumsilicaathydraten. In mineraal schrift afgekort tot CSH. In alternatief CSH worden er ook calciumsilicaathydraten gevormd maar in een andere verhouding dan in Portlandcement. Dus de bouwstenen zijn hetzelfde, maar de moleculen die ermee gevormd worden verschillen. Omdat het bouwproces ook anders is de CO₂-emissie ook circa 50% van de CO₂-emissie bij de productie van Portlandcement.

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 m³/dag klinker. Dit wordt tijdens het maalproces opgewerkt tot 2.200 m³ cement per dag. Hiermee komen de investeringen neer op 610 € per m³ cement/dag aan productiecapaciteit. Deze kosten kunnen nog 40% dalen tot 375 € per m³ cement/dag aan productiecapaciteit als de productie geoptimaliseerd wordt door met vier 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 alternatieve CSH-cementen 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 Portlandcement. Echter de specialisten in onze begeleidingsgroep (Bijlage D) 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 aandeel 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 6 miljoen m³ beton voor betonproducten (= 3,0 miljoen m³) en circa 20% van de 8 miljoen m³ betonmortel (= 1,6 miljoen m³) zie uitleg in Bijlage B. Hierbij heeft de beton voor ongewapende betonproducten gemiddeld een emissie van 0,16 ton CO₂/m³ en de beton voor ongewapende betonmorteltoepassingen een emissie tussen de 0,09 en 0,14 ton CO₂/m³ (CE Delft, 2013; p33).

Bij de productie van 'alternatief CSH' via de benodigde autoclaaftechnologie wordt 50% reductie van de CO₂-emissie verwacht (Bijlage D).

Dit betekent dat het CO₂-emissiereductiepotentieel 312.000-352.000 ton/jaar bedraagt.

In het volgende overzicht staan het berekende CO₂-emissiereductiepotentieel en de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren.

Omschrijving	Waarde (2010)
Aandeel betonmortel ongewapend	1,6 mln. m ³
CO ₂ -emissie bij productie van betonmortel (ongewapend)	0,09-0,14 ton CO ₂ /m ³
Aandeel betonproducten ongewapend	3,0 mln. m ³
CO ₂ -impact ongewapende betonproducten	0,16 ton CO ₂ /m ³
CO ₂ -reductie toepassing alternatief CSH cement	50%
Reductiepotentieel	312.000-352.000 ton CO ₂ /jaar

Implementatie potentieel

Technisch

Deze cementen bevinden zich nu nog in de laboratoriumfase in 2015 wordt de eerste pilotfabriek verwacht.



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.

Financieel

Investing is waarschijnlijk lager dan een vervangingsinvestering voor een Portlandklinkeroven. Maar het blijven omvangrijke investeringen.

Literatuur/bronnen

CE Delft, 2013

Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout
Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw
Delft : CE Delft, 2013

ENCRA, 2011

Celitement, A new CSH binder besides OPC, presentatie door Dr Hendrik Möller-Schwenk Zement KG/Celitement GmbH 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 - einenachhaltige 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

Inzet alkalisch geactiveerde materialen als cement

Reductiekosten CO₂-emissie: -48 à 0 €/ton
CO₂-emissiereductiepotentieel: 499.000-563.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Alkalisch geactiveerde materialen kunnen functioneren als een alternatief bindersysteem met een lagere CO₂-footprint dan Portlandcement (Portlandcement wordt ook aangeduid met CEM I of OPC). Dit bindersysteem kan op basis van een wijde range van grondstoffen geproduceerd worden.

De belangrijkste bestanddelen zijn (calcium)aluminaten en silicaten. Productie is dus mogelijk op basis van vliegashoudend slak, maar is ook mogelijk op basis van vulkanische as of specifieke kleisoorten. Daarnaast is er een alkalische activator nodig, gewoonlijk natronloog en natriummetasilicaat. Deze laatste verbinding wordt ook wel waterglas genoemd.

Afhankelijk van grondstofkeuze en productsamenstelling vindt de productie plaats bij verschillende temperaturen variërend van omgevingstemperatuur tot verglazingstemperatuur (circa 1.450 graden Celsius).

Zoals hierboven genoemd is er een wijde range aan productiemethoden en grondstoffen voor de groep producten die aangeduid worden als alkalisch geactiveerde bindersysteem of kortweg geopolymeer. Hierdoor is er ook een wijde variatie in de eigenschappen van deze producten. In Nederland zijn er twee partijen die grootschalige productie van geopolymeer voorbereiden. CRH op basis van een proces bij omgevingstemperatuur en ASCEM op basis van een proces waarbij de grondstoffen eerst verglaasd worden bij circa 1.450 graden Celsius. Om het hele spectrum aan reductiepotentieel en reductiekosten inzichtelijk te maken is voor beide processen inzichtelijk gemaakt wat de reductiekosten en het reductiepotentieel is. Onderscheid in de resultaten wordt gemaakt via de toevoeging van respectievelijk (omgevingstemperatuur) en (verglaasd).

Voor alle methoden geldt dat de toepassing op de lange termijn verwacht wordt in de ongewapende toepassingen. Zoals toegelicht in Bijlage B betreft dit 1,6 miljoen m³ betonmortel en 3 miljoen m³ beton in betonproducten.

Reductiekosten

De reductiekosten zijn het product van twee factoren:

1. De mate waarin inzet van geopolymeer CO₂-emissies voorkomt, vergeleken met inzet van reguliere cementen.
2. De meerkosten die daarvan het gevolg zijn.

Het eerste punt wordt berekend bij het onderdeel reductiepotentieel.

De meerkosten hangen samen met het gekozen productieproces.

Reductiekosten van geopolymeer (verglaasd)

De kosten voor de productieroute waarbij de grondstoffen eerst verglaasd worden om een constante productkwaliteit te kunnen garanderen heeft vergelijkbare energiekosten als reguliere cementproductie. Daarom is de verwachting dat dit type geopolymeer tegen vergelijkbare prijzen aangeboden zal worden als cement (ASCEM, 2013). De reductiekosten zijn daarom op 0 €/ton gesteld.



Reductiekosten van geopolymer (omgevingstemperatuur)

De kosten worden voor de productieroute bij omgevingstemperatuur circa 20% lager ingeschat dan voor de productie van Portlandklinker (Bijlage D).

Uitgaande van de opgegeven prijs voor CEM I en de jaarlijkse vraag naar ongewapend beton kan daardoor op jaarbasis € 25 miljoen bespaard worden. Bij de berekening van de jaarlijkse hoeveelheid cement in ongewapend beton zijn we uitgegaan van de gemiddelde hoeveelheid cement in beton en de gemiddelde dichtheid van beton (CE Delft, 2013; Tabel 4).

Uit de volgende paragraaf blijkt dat het jaarlijkse reductiepotentieel gemiddeld 531.000 ton per jaar bedraagt. Daarmee komen de reductiekosten op -48 €/ton.

In het volgende overzicht staan de berekende CO₂-reductiekosten met de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren.

Omschrijving	Waarde	Eenheid
Marktprijs CEM I	87	€/ton
20% kosten reductie	-17	€/ton
Aandeel ongewapend beton	4,6	Miljoen m ³ beton/jaar
Gemiddelde dichtheid beton is 2,334 kg/m ³	10.7	Miljoen ton beton/jaar
Gemiddelde aandeel cement in beton	14	Massa%
Hoeveelheid cement in ongewapend beton	1,45	Miljoen ton cement/jaar
Reductie door toepassen Geopolymeer i.p.v. CEM I	-25	mln. €/jaar
Reductiepotentieel	531.000	ton CO ₂ /jaar
Reductiekosten	-48	€/ton

Reductiepotentieel

Het reductiepotentieel wordt sterk beïnvloed door twee parameters.

1. De mate waarin inzet van geopolymer CO₂-emissies vermindert, vergeleken met inzet van reguliere cementen.
2. De mate waarin geopolymer de huidige praktijk kan vervangen.

Er zijn verschillende kwaliteiten geopolymer. De verwachting is dat geopolymeren ook met CEM I-kwaliteit cement kunnen concurreren. Echter, door de manier van produceren is 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 kan aantasten. Deze lagere buffer tegen zuren wordt een lagere alkaliteit genoemd.

Hierdoor is de verwachting dat op de middenlange termijn geopolymer alleen toegepast wordt in ongewapende toepassingen. In Bijlage B is aangegeven dat deze toepassing is ingeschat op circa 50% van de 6 miljoen m³ beton voor betonproducten (= 3 miljoen m³) en circa 20% van de 8 miljoen m³ betonmortel (= 1,6 miljoen m³). Hierbij heeft de beton voor betonproducten een emissie van 0,16 ton CO₂/m³ en het beton voor betonmortel een emissie tussen de 0,09 en de 0,14 ton CO₂/m³ (CE Delft, 2013; p33).

De verwachting is dus dat geopolymer ingezet kan worden in ongewapende betontoepassingen. De vraag is alleen in welke orde van grootte de emissie-reductie ligt bij toepassing van geopolymeren.



Reductiepotentieel van geopolymeer (verglaasd)

De CO₂-emissie over de productie van geopolymeer geproduceerd op basis van de verglaasde grondstoffen heeft een CO₂-emissie van 0,39 ton CO₂/ton geopolymeer. In het geval dat geopolymeer één op één cement kan vervangen komt dat overeen met een emissiereductie van gemiddeld 55% vergeleken met CEM I. Echter deze CO₂-emissie is berekend uitgaande van een energievoorziening die volledig gebaseerd is op reguliere fossiele bronnen. In het geval dat hernieuwbare brandstoffen ingezet worden zoals bijvoorbeeld de gedeeltelijk organische reststromen van de papierindustrie, dan kan deze emissie nog met 30-50% verminderd worden. Dit is zeer waarschijnlijk omdat de inzet van reststromen als brandstof ook vanuit economische redenen wenselijk is. Hiermee komt de emissie van de verglaasde geopolymeer op 70-80% vergeleken met CEM I.

Reductiepotentieel van geopolymeer(omgevingstemperatuur)

Bij de productie van geopolymeer via de alkalische methode op omgevingstemperatuur, wordt een reductie van 80-90% van de CO₂-emissie verwacht vergeleken met CEM I (CRH-SCC, 2013).

Uit het bovenstaande blijkt dat gemiddeld 80% emissiereductie bij toepassing van geopolymeer mogelijk is.

Berekening CO ₂ -emissie ongewapend beton	Waarde (2010)
Aandeel betonmortel ongewapend	1,6 mln. m ³
CO ₂ -emissie betonmortel	0,09-0,14 ton CO ₂ /m ³
Aandeel betonproducten ongewapend	3,0 mln. m ³
CO ₂ -emissie betonproducten	0,16 ton CO ₂ /m ³
CO ₂ -emissiereductie door toepassen geopolymeer	80%
CO ₂ -emissie ongewapend beton	499.000-563.000 ton CO ₂ /jaar

Implementatie potentieel

Technisch

In Nederland is er in betoncentrales geëxperimenteerd met de methode op omgevingstemperatuur. Hier zijn echter nog geen resultaten van gepubliceerd, er is dus nog niets over de kwaliteit te zeggen.

Er zijn ook proeven uitgevoerd voor de methode waarbij de grondstoffen eerst verglaasd worden. Uit deze kleinschalige proeven blijkt dat het beton dat met deze methode wordt geproduceerd voldoet aan sterkteklasse 42 R.

Voor alle productiemethoden geldt dat het beton gebroken kan worden en dat het hergebruikt kan worden als betongranulaat, maar het is onduidelijk in hoeverre het bindsysteem zelf gerecycled kan worden.

Organisatorisch

Dit type cement valt niet onder de Nederlandse cementnormen. Het is dusdanig anders dat er een eigen nieuwe norm voor ontwikkeld moet worden. Gebruik in ongewapend beton zou echter geen probleem hoeven vormen omdat de meeste ongewapende toepassingen onder een eigen productnorm vallen die op prestatie gericht is en dus ook geopolymeer toestaan.



Financieel

De productie waarbij de grondstof eerst verglaasd wordt heeft een relatief compacte fabriek nodig, de methode bij omgevingstemperatuur kan in bestaande betoncentrales gerealiseerd worden. De benodigde investeringen zijn dus beperkt vergeleken met vervangingsinvesteringen voor reguliere cementproductie.

Literatuur/bronnen

ASCEM, 2013

Telefonische toelichting door Anja Buchwald deputy director van ASCEM BV

Bijlage D

Dr.ir J.W. Frenaj (ENCI BV), Ing. P. de Vries (ENCI BV), Dr.ir M. van Leeuwen (CRH - Sustainable Concrete Centre)

Milieueffecten bij inzet van cementen en alternatieve bindmiddelen voor beton - nu en straks

CE Delft, 2013

Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout

Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw

Delft : CE Delft, 2013

Cement, 2012

Dr-ing A. Buchwald, ASCEM BV

ASCEM cement - a contribution towards conserving primary resources and reducing the output of CO₂

In : Cement International vol 5, 2012

CRH-SCC, 2013

Informatie vertrouwelijk besproken met Mantijn van Leeuwen, directeur CRH-SCC



Bijlage B.7 Demontabel bouwen

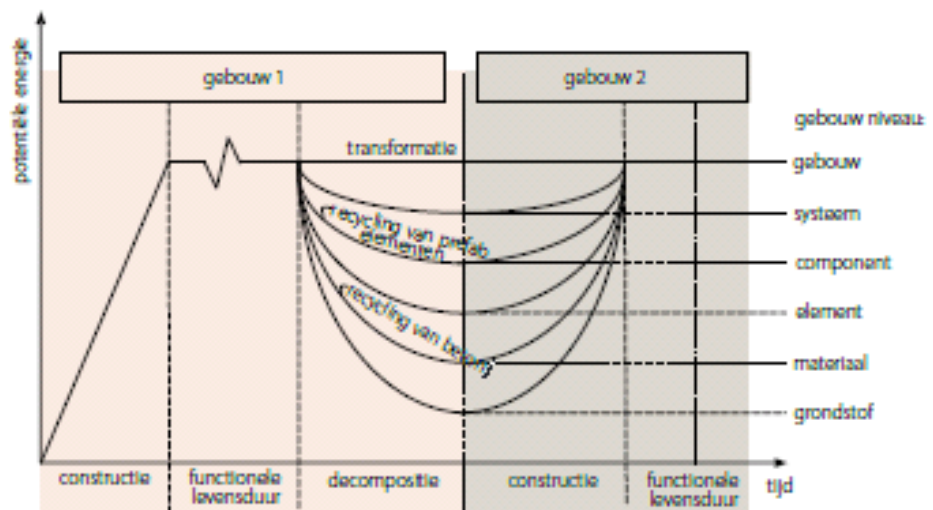
Bouwen met demontabele standaard eenheden

Reductiekosten CO₂-emissie: 419-1.256 €/ton
CO₂-emissiereductiepotentieel: 76.000-235.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Bij de huidige manier van het slopen van gebouwen en betonnen constructies, wordt de betonnen hoofdconstructie verbrijzeld, 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 vermindert slechts in zeer beperkte mate de CO₂-emissies over de levensduur van beton. De hoeveelheid CO₂ die vrijkomt bij het vervaardigen van beton wordt namelijk voor minstens 97% bepaald door de productie van cement. Het levert meer milieuwinst op wanneer er een stap hoger op de afvalpreventieladder kan worden gezet en ook de betonnen hoofdconstructie kan worden hergebruikt.

Figuur 4 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.

Reductiekosten

Om aan de voorgaande eisen te kunnen voldoen zijn maatregelen beschikbaar, maar die komen wel met meerkosten. De meerkosten van deze optie bestaan uit de volgende aspecten (Naber, 2012):

- meerkosten van het uithalen van het gebouw vergeleken met sloop: € 31,60/m² kanaalplaatvloer;
- meerkosten van opslag voor een jaar: € 2,60/m² vloer;
- meerkosten bij het leggen van de hergebruikte vloer in de woningen € 7,65/m² vloer in eengezinswoning tot € 15,60/m² in appartementen.

Totaal inclusief één jaar opslag en exclusief eventuele extra transportkosten is € 41,85/m² vloer voor een eengezinswoning en € 49,80/m² vloer voor appartementen. De inschatting van de onzekerheid op deze berekeningen is ca. 20%. Hiermee komen de reductiekosten op 33-56 €/m² vloer.

De CO₂-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 CO₂-emissiereductie varieert tussen de 0,040 en 0,095 ton CO₂/m² 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.

In het volgende overzicht staan de berekende reductiekosten en de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren

Omschrijving	Woonhuis	Appartement	
Meerkosten van het uithalen 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 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 in laagbouw geschikt is 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 gietbeton vloer er een potentieel van 1,9 miljoen m² vloer per jaar in woningen en 2,8 miljoen m² vloer per jaar in appartementen, die op deze manier geproduceerd kan worden.



De CO₂-emissiereductie bedraagt circa 0,040 ton CO₂/m² vloer voor woningen en tussen de 0,07 en 0,095 ton CO₂/m² vloer voor appartementen (Naber, 2012). Dus daarmee komt reductiepotentieel op 76.000 ton CO₂ per jaar voor woningen en 235.000 ton CO₂ per jaar voor appartementen.

In het volgende overzicht staat het berekende CO₂-emissiereductiepotentieel en de gegevens die nodig zijn om deze berekening te valideren

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 vloeren		0,04	0,07-0,095	ton CO ₂ /m ²
Reductiepotentieel		75.988	235.087	ton CO ₂ /jaar

Implementatiepotentieel

Technisch

Het is technisch mogelijk om een gebouw met prefabbetonelementen 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.

Wat betreft beschikbaarheid van voldoende vloeren: jaarlijks is tussen 2007 en 2011 gemiddeld 599.000 m² kantoorvloer toegevoegd (NEPROM, 2013). Ervan uitgaande dat de nieuwbouw in hetzelfde tempo doorgaat hoeft slechts 7% van de gemiddelde hoeveelheid nieuwbouw gesloopt te worden om voldoende vloeren beschikbaar te hebben. Dat betekent dat er veel minder hoeft te worden gesloopt dan dat er bijgebouwd wordt in een markt die al jaren met onderbezetting kampt.

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 database 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.

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 is hergebruik van betonnen vloeren veel goedkoper dan slopen.

Literatuur/bronnen

Cement, 2013

Nanda Naber (NIBE b.v.), Dick van Keulen (TU Delft, fac.CiTG/Ingenieursstudio DCK), Michiel Haas (TU Delft, fac.CiTG/NIBE b.v.)

Milieuwinst bij hergebruik kanaalplaten

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

NEPROM, 2013

Gegevens beschikbaar gesteld door Margriet Schepman, Sr. Beleidsmedewerker Commercieel Vastgoed bij Neprom uit onderzoeken uit 2008-20012



Bijlage B.8 Mechanische cementrecycling

Mechanische cementrecycling via ADR of slim breken

Reductiekosten CO₂-emissie: 0-6€/ton
CO₂-emissiereductiepotentieel: 60.000-90.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Bij de huidige manier van het slopen van gebouwen en betonnen constructies, wordt de betonnen hoofdconstructie verbrijzeld 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 en maakt recycling van de wapening mogelijk, maar vermindert slechts in zeer beperkte mate de CO₂-emissies over de levensduur van het beton zelf. De hoeveelheid CO₂ die vrijkomt bij het vervaardigen van beton wordt namelijk voor minstens 97% bepaald door de productie van cement. Er wordt meer CO₂-emissie voorkomen wanneer er een stap hoger op de afvalpreventieladder kan worden gezet en de cementfractie kan worden hergebruikt als decarbonisatievrije grondstof voor de productie van Portlandklinker of CSA-beliet.

Een manier om dit te doen is mechanische cementrecycling. Mechanische cementrecycling kan via twee methodes:

- ADR;
- slim breken.

De methodes variëren in opzet en daarmee in de stromen die ze opleveren, de bijkomende kosten en de vrijkomende emissies.

De ADR-methode richt zich in hoofdzaak op de productie van hoogwaardige betongranulaten uit tot 16 mm voorgebroken betonpuin. Daarnaast komt er een fijne fractie vrij, bestaande uit zand en cementsteen. De bedoeling is om uit deze fijne fractie de grove zandfractie en de fijnere cementsteenfractie van elkaar te scheiden. De hoeveelheid fijne fractie die vrijkomt is circa 20% per massa beton, de hoeveelheid cementsteen die vrijkomt is circa 6% per massa beton.

Omdat de focus bij ADR is om zoveel mogelijk puin op locatie te verwerken met zo min mogelijk overlast voor de omgeving, is ervoor gekozen om puin vochtig te verwerken. Dit bemoeilijkt de scheiding van zand en cementsteen. In een grootschalige praktijkproef is de fijne fractie (zonder eerst zand en cementsteen te scheiden) succesvol ingezet bij de cementproductie als een laag percentage bijmengstroom ter vervanging van de silicatenfractie die anders aan het fornuis toegevoegd wordt.

Voordeel van deze methode is dat de verwerking op locatie kan gebeuren, het nadeel is dat het aandeel alfakwarts uit gebroken steen en zand relatief groot is (maximaal 50%).

Slim breken richt zich op het splitsen van het beton (en bijkomend sloopafval) in de originele fracties: zand, grind, cementsteen, hout, pvc, etc.

Dit gebeurt op basis van betonpuin dat tot 150 mm is voorgebroken.

De fracties worden van elkaar gescheiden door gericht de verbinding tussen alle fracties, het cementsteen, te breken.

Omdat de focus bij slim breken ligt op het breken van het cementsteen is de benodigde kracht maximaal 20 bar. Dit is 10% van de kracht die een reguliere breker nodig heeft om beton tot een vaste afmeting te breken. Hierdoor is de benodigde hoeveelheid energie lager dan bij een reguliere breker en worden andere sloopafvalfracties zoals hout en plastic niet verder verkleind, wat de scheiding van de betonfracties vergemakkelijkt.



Door de druk die uitgeoefend wordt in een breker en een slimbreker, loopt de temperatuur van het betonpuin op waardoor het betonpuin droog is na het breken. Doordat het breken met name gericht is op de cementsteenfracties is het aandeel alfakwarts uit gebroken steen en zand lager dan in andere methodes (maximaal 25%).

Reductiekosten

De reductiekosten worden bepaald door twee factoren:

1. De hoeveelheid CO₂ die bespaard kan worden door inzet van decarbonisatievrije grondstof
2. De meerkosten die gemaakt worden vergeleken met reguliere sloop-activiteiten om deze decarbonisatievrije¹ grondstof te verkrijgen.

Inzet van de cementfractie als decarbonisatievrije grondstof bespaart 0,5 ton CO₂ per ton Portlandklinker (zie Bijlage C). Het aantal ton gerecycled cement dat ingezet kan worden hangt sterk af van de samenstelling van de gerecyclede cementfractie.

Omdat hier nog nauwelijks ervaring mee is opgedaan zijn cementproducenten terughoudend in het bijmengen in hun ovens. Echter, invoeren van het gerecyclede cement ter vervanging van de silicaten die anders toegevoegd worden is mogelijk. Dit is in een eerste praktijkproef bewezen: In het kader van het Europese onderzoek naar ADR is er een grootschalige praktijkproef gedaan, waarbij twee torenflats in Groningen gesloopt zijn. De fijne fractie (cement en zand) is ingezet als vervanger van de silicaten bijmengstroom (5%) in de oven. Hiermee is succesvol cement geproduceerd. De fijne fractie bestond voor 70% uit zand en voor 30% uit teruggewonnen cement. Het beton was voor 100% gemaakt uit CEM I.

Reductiekosten ADR

De kosten van deze scheidingsstap worden op basis van de praktijkproeven ingeschat op 3 €/ton teruggewonnen cement. De CO₂-reductie is 0,5 ton CO₂ per ton gerecycled cement, die netto ingezet kan worden (zie Bijlage C). Dan betekent dat op iedere ton cement die geproduceerd wordt de reductiekosten⁶ €/ton cement bedragen.

In het volgende overzicht staan de reductiekosten en de benodigde gegevens om deze berekening te valideren.

Berekening reductiekosten ADR	Waarde	Eenheid
Voorkomen CO ₂ emissie decarbonisatie	0,5	ton CO ₂ /ton Portlandklinker
Additionele kosten selectieve milling circuit	3	€/ton beton
Reductiekosten	6	€/ton CO ₂

Reductiekosten slim breken

Uit laboratoriumproeven bleek het maximumaandeel alfakwarts 25% te zijn. Door de specifieke omstandigheden tijdens de laboratoriumproef is het waarschijnlijk dat dit bij de pilotproeven die op dit moment uitgevoerd worden lager zal uitvallen.

Door het werkingsprincipe zijn de krachten waaraan een slimme breker blootgesteld wordt 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.



Dit beperkt naar verwachting de investeringskosten en de energieconsumptie. Verder is er naar verwachting evenveel bedienend personeel nodig als bij een reguliere kraker.

Wel is er een scheidingsstap nodig om de verschillende fracties van elkaar te scheiden. Op laboratoriumschaal is dit gebeurd met zeven, daar zal nog een grootschaligere oplossing voor bedacht moeten worden.

De verwachting is daarom dat netto er geen kostenreductie optreedt.

De reductiekosten zijn daarom op nul gesteld.

Reductiepotentieel

Jaarlijks wordt circa 14 miljoen ton beton gesloopt (CE Delft, 2013).

Op basis van opgaaf van VOBN en BFBN is het gemiddelde aandeel cement in beton berekend op 14% en het gemiddelde aandeel Portlandklinker op 7%.

In het volgende overzicht staan de benodigde gegevens om deze inschatting te valideren.

Berekening aandeel Portlandklinker in cement	Waarde	Eenheid
Aandeel CEM I in beton (Tabel 4 uit CE Delft, 2013)	120	kg/m ³
Aandeel Portlandklinker in CEM I	95	%
Aandeel CEM III in beton (Tabel 4 uit CE Delft, 2013)	196	kg/m ³
Aandeel Portlandklinker in CEM III	25	%
Totaal	2334	kg/m ³
Aandeel cement	14	%
Aandeel Portlandklinker	7	%

Reductiepotentieel ADR

Van het jaarlijkse potentieel van 14 miljoen ton beton dat gesloopt wordt is circa 50% van dit beton geschikt voor ADR. Van het geschikte beton kan ADR circa 6% terugwinnen als cementfractie (TU Delft, 2013). Dit komt neer op een potentieel van 420.000 ton grondstof per jaar.

Gemiddeld is 50% van deze grondstof cement (bij ADR ligt dit percentage waarschijnlijk hoger omdat niet alle betonsoorten geschikt geacht worden voor ADR). Dit komt overeen met minimaal 210.000 ton decarbonisatievrije en maximaal 420.000 ton decarbonisatievrije grondstof voor klinker. Bij 0,5 ton CO₂-uitstoot per ton cement (zie Bijlage C). Komt dit overeen met een potentiële CO₂-emissiereductie van 105.000-210.000 ton/jaar.

Echter, zoals hierboven is aangegeven is tijdens de praktijkproef in Groningen deze gerecyclede fractie slechts zeer beperkt ingezet als voedingsstroom voor de productie van cement.

In de proef in Groningen werd alleen de silicaat bijmengstroom van 5% vervangen door de fijne fractie. In deze fijne fractie was de verhouding alfkwarts tot cementfractie 70/30. Inmiddels is een eerste optimalisatieproef gedaan waarin is bewezen dat het cement gescheiden kan worden van het zand waarbij de verhouding cement alfa-kwarts maximaal 50/50 is. De verwachting is dat dit verder verbeterd kan worden tot 20/80.

Uitgaande van de bewezen haalbare zuiverheid van 50% alfkwartsvervuiling kan er dus netto 2,5% teruggewonnen cement als decarbonisatievrije grondstof ingezet worden. De totale cementproductie in 2010 bedroeg 4,8 miljoen ton. De maximale hoeveelheid die probleemloos bijgemengd kan worden bedraagt dus 120.000 ton/jaar. Dit komt overeen met een CO₂-reductie van 60.000 ton CO₂/jaar.



Berekening reductiepotentieel ADR	Waarde	Eenheid
Totale cementproductie	4,8	Miljoen toncement/jaar
Bewezen maximale Inzet van teruggewonnen cement	2,5	%
Voorkomen CO ₂ -emissie decarbonisatie	0,5	ton CO ₂ /ton Portlandklinker
Reductiepotentieel	60.000	ton CO ₂ /jaar

Reductiepotentieel slim breken

Het principe van slim breken is dat de volledige cementfractie teruggewonnen kan worden. Zoals hierboven aangegeven bevat beton gemiddeld 14% cement waarvan circa de helft Portlandklinker is. Bij een jaarlijks hoeveelheid van 14 miljoen betonpuin, kan dus met slim breken 1.960.000 ton cement teruggewonnen worden. Ervan uitgaande dat dit cement voor 50% bestaat uit Portlandklinker en voor 50% uit hoogovenslak heeft dit een potentieel reductiepotentieel tussen de 527.000 en 1.054.000 ton CO₂/jaar.

Echter, zoals hierboven is aangegeven werd in de proef in Groningen alleen de silicaat bijmengstroom van 5% vervangen door de fijne fractie. Van slim breken is bewezen dat een maximum van 25% alfakwarts haalbaar is (Florea, 2013). De verwachting is dat dit verder verbeterd kan worden tot minder dan 10%. Uitgaande van de bewezen haalbare zuiverheid van 25% alfakwarts kan er dus netto 3,75% teruggewonnen cement als decarbonisatievrije grondstof ingezet worden. De totale cementproductie in 2010 bedroeg 4,8 miljoen ton. De maximale hoeveelheid die probleemloos bijgemengd kan worden bedraagt dus 180.000 ton/jaar. Dit komt overeen met een CO₂-reductie van 90.000 ton CO₂/jaar.

Berekening reductiepotentieel slim breken	Waarde	Eenheid
Totale cementproductie	4,8	Miljoen ton cement/jaar
Bewezen maximale Inzet van teruggewonnen cement	3,75	%
Voorkomen CO ₂ -emissie decarbonisatie	0,5	ton CO ₂ /ton Portlandklinker
Reductiepotentieel	90.000	ton CO ₂ /jaar

Implementatie potentieel

Technisch

Er is nog weinig bekend over de precieze samenstelling van de cementfracties. Verder is er nog weinig bekend over hoe en onder welke randvoorwaarden deze cementfracties het beste ingezet kunnen worden. Grondstof voor de productie van Portlandcement lijkt een valide optie. Daarnaast valt cementsteen bij verwarming uit elkaar in ongebluste kalk en vrij zuivere beliet (zie Bijlage C). Daarmee zou de gerecyclede cementsteen mogelijk een goede bron zijn voor decarbonisatievrije beliet voor CSA-beliet cement.

Organisatorisch

Er zijn inmiddels voor beide methode pilotinstallaties beschikbaar.

Financieel

De cementsteenfractie wordt nog niet erkend als een decarbonisatievrije grondstof voor cement of CSA-beliet. Hierdoor heeft deze stroom nog een zeer beperkte of zelfs negatieve waarde.



Literatuur/bronnen

CE Delft, 2013

Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout
Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw
Delft : CE Delft, 2013

TU Delft, 2013

Mondeling toelichting door Prof. Peter Rem, Dr. Francesco Di Maio (TU Delft) en Eric van Roekel (Strukton) bij de presentatie die 30 mei is gegeven tijdens de kennismakingsmiddag hoogleraren Bouw & Infra TU Delft op 30 mei 2013

Florea, 2013

Miruna Florea en Jos Brouwers, TU Eindhoven, fac. Bouwkunde
Slim breken sluit materiaalkringloop
Onderzoek naar toepassing nieuwe breektechniek: smart crushing
In : CEMENT, 2013



Bijlage B.9 Thermische cementrecycling

Thermische cementrecycling via kringbouw

Reductiekosten CO₂-emissie: -124 à -62 €/ton CO₂
CO₂-emissiereductiepotentieel: 22.000-26.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Bij de huidige manier van het slopen van gebouwen en betonnen constructies, wordt de betonnen hoofdconstructie verbrijzeld 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 vermindert slechts in zeer beperkte mate de CO₂-emissies over de levensduur van beton. De hoeveelheid CO₂ die vrijkomt bij het vervaardigen van beton wordt namelijk voor minstens 97% bepaald door de productie van cement. Het levert meer milieuwinst op wanneer er een stap hoger op de afvalpreventieladder kan worden gezet en de cementfractie kan worden hergebruikt.

Een manier om dat te doen is via thermisch recycelen zoals onderzocht in de kringbouwstudie (TNO, 2008).

In het kringbouwconcept wordt gebroken schoon beton opgewarmd tot een temperatuur van circa 650-700 graden Celsius. Voor het terugwinnen van stenen uit schoon metselwerkpuin kan gekozen worden voor een temperatuur van 500 graden Celsius. Door deze verwarming zet het beton(mortel) uit. De afschuifkrachten die daarbij ontstaan zijn groot, waardoor het cementskelet ontleeft en het materiaal gemakkelijk mechanisch is te verkleinen tot drie fracties: grind en ander grof toeslagmateriaal, zand en ander fijn toeslagmateriaal en een cementsteenrijke fractie.

Door de hoge afschuifkrachten breken bij toepassing van dit concept op metselwerkpuin ook veel stenen waardoor het terugwinnen van stenen uit schoon metselwerkpuin 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 cementsteenrijke fractie (circa 50%). Dit beperkt de mogelijkheden om deze fractie in te zetten als grondstof voor cement. Maar de cementsteenrijke fractie heeft wel bindende eigenschappen waardoor toepassing 10-20% Portlandcement gebruik verminderd kan worden (TNO, 2008). Een ander voordeel is dat aangekleefd vuil meteen ook verwijderd wordt.

Reductiekosten

Het potentieel van de reductie van CO₂-emissie is voornamelijk gelegen in het terugdringen van de hoeveelheid Portlandcement door het inzetten van de teruggewonnen fijne fractie als vulstof met bindcapaciteit, vergelijkbaar met de inzet van vliegias in CEM X. Dit betekent dat het CO₂-reductiepotentieel 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 CO₂-reductie vergelijkbaar is met de inzet vliegias als vulstof met bindcapaciteit. Hiermee zijn de reductiekosten vergelijkbaar met de inzet van vliegias in CEMX: -62 à -124 €/ton (zie Bijlage B.2).

Reductiepotentieel

Reductiepotentieel is meer inzet als vulstof met bindcapaciteit. Dit potentieel is vergelijkbaar met het potentieel van CEM X: 24.000 +/- 2.000 ton/jaar, zie Bijlage B.2.



Implementatie potentieel

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. Volgens het TNO-rapport is de huidige installatie bij REKO niet optimaal.

Organisatorisch

De cementsteenrijke fractie wordt nog niet door de markt als vulstof met bindmiddelcapaciteit vergelijkbaar met vliegaskerkend (REKO, 2013).

Financieel

Doordat het hele beton verhit wordt is het een relatief dure methode. De benodigde investering voor het realiseren van de juiste installatie bedraagt volgens opgave van REKO € 60-70 mln (REKO, 2013). Er moet een investeerder gevonden worden om de benodigde installaties te kunnen bouwen. Volgens REKO is dat geen probleem zodra de markt bereid is om de cementsteenrijke fractie te betalen als vulstof met bindmiddelcapaciteit vergelijkbaar met vliegask.

Literatuur/bronnen

REKO, 2013

Gesprek met David Heijkoop, directeur REKO BV, augustus 2013

TNO, 2008

Evert Mulder

TNO-rapport OG-RPT-APD-2008-00182

Kringbouw - Naar een duurzame grondstofvoorziening in de bouw



Bijlage B.10 Bodemas

Inzet bodemas als vulstof met bindcapaciteit

<i>Reductiekosten CO₂-emissie:</i>	<i>-124 à -62 €/ton CO₂</i>
<i>CO₂-emissiereductiepotentieel:</i>	<i>22.000-26.000 ton/jaar</i>

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:

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

We richten ons bij deze optie op de toepassing als vulstof met bindcapaciteit. Enerzijds omdat de andere toepassing nu al toegepast kan worden en dus geen verbeteroptie voor de middellange termijn is. Anderzijds omdat de CO₂-emissiereductie door toepassing als vulstof met bindcapaciteit veel groter is. De afname van de CO₂-emissie vergeleken met conventioneel cement is direct gerelateerd aan de afname van het klinkergebruik.

Bij inzet van bodemas in ongewapende constructies waarin cement gedeeltelijk is vervangen door bodemas blijkt wassen niet nodig. Uit uitloogproeven voor niet vormgegeven bouwstof waarbij het materiaal is gebroken tot materiaal van < 4 mm (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 duurtesten over een paar jaar uitwijzen dat zelfs cement met hogere bijmengpercentages aan de uitloogeisen voldoen.

Enerzijds omdat het bodemas maximaal 50% van het cement vervangt. Met andere woorden, eventueel aanwezige zouten worden verdund door mengen met 'schoon' cement.

Anderzijds omdat deze zouten gebonden worden aan de andere materialen in het beton en daardoor minder uitloggen (Betoneik, 2013).

Reductiekosten

Het potentieel van de reductie van CO₂-emissie is voornamelijk gelegen in het terugdringen van de hoeveelheid Portlandcement door de inzet van bodemas als vulstof met bindcapaciteit, vergelijkbaar met de inzet van vliegas in CEM X. Dit betekent dat het CO₂-reductiepotentieel vergelijkbaar is met de inzet van CEMX.

Aangezien bodemas net als vliegas vrijkomt bij het opwekken van energie uit afval, zijn de reductiekosten vergelijkbaar met de inzet van vliegas in CEMX: -62 à -124 €/ton (zie Bijlage B.2).

Reductiepotentieel

Reductiepotentieel is meer inzet als vulstof met bindcapaciteit.

Dit potentieel is vergelijkbaar met het potentieel van CEM X: 24.000 +/- 2.000 ton/jaar, zie Bijlage B.2.



Implementatie potentieel

Technisch

De toepassing van bodemas als vulstof met bindcapaciteiten in ongewapend beton is nog in de laboratoriumfase (Fennis, 2011). Inashco claimt dat in verschillende praktijktesten dit cementreductiepotentieel bevestigd is (Inashco, 2013).

Daarnaast is er de kwestie met de aanwezigheid van zouten in de sloopfase. Bij reguliere sloopmethoden waarbij het beton verbrijzeld wordt tot granulaat blijkt dit geen probleem te zijn (Betoniek, 2013). De vraag is echter of dat nog steeds geldt in combinatie met de cementrecyclingtechnieken die in de vorige twee bijlagen zijn besproken. Bij deze cementrecyclingtechnieken wordt de cementfractie in zeer fijne vorm teruggewonnen.

Verder is het de vraag of bodemassen voldoende consistent zijn in kwaliteit om als vulstof met bindcapaciteiten ingezet te kunnen worden voor cementvervanging.

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.

Financieel

Is de oplossing aantrekkelijk, de afvalstroom van de AEC wordt een grondstof met toegevoegde waarde in toepassing als vulstof met bindeigenschappen.

Literatuur/bronnen

Betoniek, 2013

AEC-granulaat - over het ontstaan en de toepassing in beton

Betoniek, Band 16, uitgave 01 van februari 2013

CE Delft, 2013

Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout

Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw

Delft : CE Delft, 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

Inashco, 2013

Correspondentie met Mark van Kempen, sales manager minerals bij Inashco in augustus en september 2013



Bijlage B.11 Staalvezels

Inzet staalvezels in plaats van traditionele wapening in gietbeton

Reductiekosten CO_2 -emissie: 0 €/ton

CO_2 -emissiereductiepotentieel: 81.000 ton/jaar

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 het gebruik van conventioneel 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 betongranulaat. Betongranulaat waaruit staalvezel steekt, worden egels genoemd. De aanwezigheid van egels, maakt al het betongranulaat van staalvezelbeton onrecyclebaar. Tenzij er gebroken wordt met de slim brekenmethode. Bij deze methode is de fractie egels < 0,5% en daarmee verwaarloosbaar. Daarmee is deze optie alleen een reële optie in combinatie met slim breken.

Het gemiddeld staalgebruik voor wapening in gebouwen is circa 45-65 kg/m³ (uitgaande van 40-60 kg/m³ in vloeren, 80 kg/m³ in funderingen en 1-6 kg/m³ in wanden). Proeven bij de TU/e uit 2010 met reguliere staalvezelbeton laten zien dat met een concentratie van 50 kg/m³ een casco gebouwd kan worden (Cement, 2010).

Dat betekent dat er met vergelijkbare staalconcentraties gebouwd kan worden op basis van staalvezels. Inmiddels heeft Bekaert een nieuw type staalvezel ontwikkeld waarmee het aannemelijk is dat hetzelfde casco bij een concentratie van 35 kg/m³ 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/m³ nieuwe staalvezels verkocht wordt voor dezelfde prijs als anders een betonmengsel met 50 kg/m³ reguliere vezels verkocht wordt (Bekaert 2013). Hiermee zijn de reductiekosten nul.

Reductiepotentieel

In principe zijn staalvezels toepasbaar op alle gietbetonnenconstructies waarin wapeningsstaal toegepast wordt. Er zijn al producten gemaakt tot sterkteklasse 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 gietbetontoepassingen 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

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/m³) en er is een enkele grootschalige test gedaan zoals bij de TU/e in 2010. Ook de optimale vormgeving en samenstelling van de vezels zijn nog in ontwikkeling.

Organisatorisch

Het gebruik van staalvezelbeton is nog geen standaardonderdeel van ontwerpregels en van het bouwbesluit.

Financieel

De ontwikkelaars van staalvezels claimen dat er bespaard kan worden bij het gieten van betonconstructies op basis van staalvezels omdat in één keer muren en funderingen gestort kunnen worden zonder dat daar eerst wapeningen in aangebracht hoeven te worden.

Literatuur/bronnen

Bekaert, 2013

Telefonische consultatie van Anne Hoekstra, Technical Manager bij Bekaert

Bruil, 2013

Telefonische consultatie van Leo Stekelenburg, Bruil in Ede

Cement, 2010a

Michel Menting en Ab van den Bos van ABT

Proefproject staalvezelbeton

In : Cement, 2010

Cement, 2010b

Bram Hazenberg en Joris Blom van BAS

Betontechnologisch onderzoek

Research & Technology in Cement, 2010



Bijlage B.12 **Bouwplanning**

Langere uithardingstijd gietbeton door bouwplanning

Reductiekosten CO₂-emissie: 0 à 1.354 €/ton

CO₂-emissiereductiepotentieel: 107.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Als je het beton 2x zoveel tijd geeft om uit te harden is er minder cement nodig om de benodigde sterkte te halen⁹. 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 later ontkisten voor vertraging in de bouw en dat kost geld. Enerzijds omdat er boetes staan op later opleveren. Anderzijds omdat langere bouw tijden kosten met zich meebrengen voor materiaalhuur en personeel. Denk daarbij aan een langere huurtijd voor een kraan, en een langere inzet van een uitvoerder op een project.

In andere type projecten zoals grootschalige laagbouw in het weiland hoeft later ontkisten 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 later je ontkist, in het geval van tunnelbouw is er sprake van een relatief hoge huur voor de bekisting, die zich alleen terugverdient bij een korte uithardingstijd.

Reductiekosten

De meerkosten van later ontkisten zijn het resultaat van veranderingen in twee typen kosten: betonkosten en organisatiekosten (materiaal en mensen die langer voor een project beschikbaar moeten zijn).

De organisatiekosten van twee maal zo lang wachten voordat je gaat ontkisten bij een hoogbouwproject van 7-10 etages in gietbouw wordt ingeschat op 100 €/m³ op de betonkosten. Bij laagbouw in het weiland ligt dat tussen de 0 en 10 €/m³ (Heijmans, 2013).

Volgens de CUR-rekentool is de afname van de CO₂-emissie bij de productie van de betonmortel 0,07 ton CO₂/m³ beton en 0,14 ton CO₂/m³ beton voor respectievelijk warm en koud gieten. Daarmee komen de organisatiekosten op respectievelijk 91 €/ton CO₂ in de laagbouw en 909 €/ton CO₂ in de hoogbouw.

CO₂-emissie door gietbouw voor gebouwen is gemiddeld 92 kg/m³ beton (aan de hand van CUR-rekentool). Door later te ontkisten kan de cement-samenstelling aangepast worden en is de CO₂-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 €/m³) voor koud gegoten beton en 9% (5,23 €/m³) voor warm gegoten beton (Bijlage E).

Dit betekent dat de materiaalkosten met 14 €/ton CO₂ afnemen voor koude gietbouw en 75 €/ton CO₂ afnemen voor warme gietbouw.

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 een Omgevingswet vergunning voor de branders.



Hiermee komen de reductiekosten voor laagbouw uit op 0-58 à 68 €/ton CO₂ en voor hoogbouw op circa 706-1.354 €/ton CO₂, afhankelijk van de mate waarin er al warm gegoten wordt (dan is de CO₂-winst geringer en de reductiekosten dus relatief hoger).

In het volgende overzicht staan de reductiekosten en de benodigde gegevens om deze berekening te valideren.

Berekening reductiekosten	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, 2013a) 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 er in de komende tien jaar minimaal 60.000 woningen per jaar gebouwd moeten worden. We gaan uit van het referentiejaar 2010 met 56.000 opgeleverde woningen (CBS, 2013b).

Naar verwachting zal in de toekomst 50% hoogbouw en 50% laagbouw in het weiland zijn (Heijmans, 2013). Het reductiepotentieel wordt bepaald door de verandering in het cement die hierdoor mogelijk is. Volgens de CUR-tool-berekening zoals weergegeven in Bijlage E neemt de hoeveelheid CO₂-emissie af met 36%.

Uitgaande van een totale CO₂-emissie in de woningbouw met gietbetonbouw van 297.000 ton CO₂/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 CO₂ per jaar bedragen.

In het volgende overzicht staan het reductiepotentieel en de benodigde gegevens om deze berekening te valideren.

Berekening reductiepotentieel	Waarde	Eenheid
Gietbetonbouw in woningbouw	297	kton CO ₂ /jaar
Besparingspotentieel volgens CUR-tool berekening	36%	
Reductiepotentieel	107	kton CO ₂ /jaar



Implementatiepotentieel

Technisch

Er zijn geen technische belemmeringen om deze optie toe te passen.

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 kunnen door goede communicatie van de voordelen van later ontkisten deze hindernissen overkomen worden.

Financieel

Later ontkisten 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 later ontkisten zal er ook gekozen moeten worden voor conventionele bekistingsmethodes. Er hoeven verder geen investeringen gedaan te worden.

Literatuur/bronnen

Bijlage E

Berekening effect later ontkisten met CUR-tool, door Leo Dekker (Mebin), 2013

CBS, 2013a

CBS Statline

Kerncijfers van de huishoudensprognose 2011-2060, 1 mei 2013

<http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=80982NED&LA=NL>

CBS, 2013b

Statistieken nieuwbouw in database statline

<http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=7413&D1=3-4,6-7,12-15,21-22,47,53&D2=0,13,131,340&D3=21-23&HDR=G2&STB=G1,T&VW=T>

CE Delft, 2013

Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout

Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw

Delft : CE Delft, 2013

Heijmans, 2013

Telefonisch overleg met Theo Smits, Adviseur Energie en Duurzaamheid

Vastgoed en Woningbouw bij Heijmans Vastgoed en Woningbouw



Bijlage B.15 Zelfhelend beton

Zelfhelend beton met calciumcarbonaat producerende bacteriën

Reductiekosten CO₂-emissie: -559 à 1.405 €/ton¹⁰

CO₂-emissiereductiepotentieel: 22.000 à 60.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Wetenschapper Henk Jonkers heeft de Delft Design & Engineering Award ontvangen voor zijn ontwerp voor zelfhelend beton. In het beton leven alkalifielebacteriën¹¹ die kalksteen produceren waarmee scheurtjes die in het beton zijn ontstaan, worden gedicht (website TU Delft, 2013).

Proeven in het lab hebben inmiddels uitgewezen dat scheurtjes tot 0,4 mm hersteld kunnen worden door het materiaal zelf. Op basis van deze testresultaten verwachten de onderzoekers dat het beton circa 20% langer meegaat en circa 30% minder reparaties nodig heeft (Jonkers, 2013).

Reductiekosten

Het beton zelf is 52,5 €/m³ beton duurder.

Daar staat tegenover dat het beton niet preventief gecoat hoeft te worden iedere 10 jaar. De kosten van het coaten bedragen de eerste keer 18 €/m² 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 m²/m³ beton gecoat moet worden variëren de kosten van het coaten tussen de 22 en de 65 €/m³ over de levensduur van het beton. Dit betekent dat de meerkosten variëren tussen de -12 en +31 €/m³ beton.

In het volgende overzicht staan de reductiekosten en de benodigde gegevens om deze berekening te valideren.

Berekening meerkosten bestaande methodiek		
1x per 10 jaar coaten	0,1	keer/jaar
Levensduur GWW	100	jaar
Kosten coating per keer	18	€/m ² .keer
Aantal keer over de levensduur	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	€/m ³
Meerkosten	-12,3 à 30,9	€/m ³

De CO₂-emissie van beton in civieltechnische en GWW/civiel-toepassingen varieert tussen de 0,09 en 0,3ton CO₂/m³, afhankelijk van de toepassing (CE Delft, 2013, p33). Een reductie van 20 in gebruik betekent dus een reductie van 18 à 41 kg CO₂/m³.

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

¹¹ Beton heeft een hoge pH of alkaliteit en daarom kunnen alleen bacteriën die zich gespecialiseerd hebben in het leven bij een hoge alkaliteit in het beton overleven. Dit type bacteriën wordt ook wel alkalifielebacteriën genoemd.



Hiermee variëren de reductiekosten tussen de -683 en +1.717 €/ton CO₂, afhankelijk van de samenstelling van het beton, de levensduur verlenging en de omvang van het oppervlak van het beton dat gecoat dient te worden. In het volgende overzicht staan de reductiekosten en de benodigde gegevens om deze berekening te valideren.

Berekening reductiekosten	Waarde	Eenheid
CO ₂ -emissie van het GWW beton	0,09-0,3	ton CO ₂ /m ³
Verlenging levensduur	20%	% levensduur
CO ₂ -emissiereductie	0,018-0,041	ton CO ₂ /m ³
Meerkosten	-12,3 à 30,9	€/m ³
Reductiekosten	-683 à 1.717	€/ton

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.

Reductiepotentieel

De vermindering van de CO₂-emissie is gerelateerd aan de 20% langere levensduur. De inzet van beton in GWW/civiel-toepassingen bedroeg in 2010 0,995 miljoen m³ beton (CE Delft, 2013). De CO₂-emissie van beton (exclusief staal) varieert tussen 0,09 en 0,3 ton CO₂/m³beton. Daarmee komt het reductiepotentieel op 128.000 à 226.000 ton/jaar.

In het volgende overzicht staan het reductiepotentieel en de benodigde gegevens om deze berekening te valideren.

Omschrijving	Waarde	Eenheid
GWW beton gebruik in 2010	0,995	mln. m ³ /jaar
CO ₂ -emissie GWW/civiel beton:	0,09-0,3	ton CO ₂ /m ³
Verlenging levensduur	20%	
Reductiepotentieel	21.900-59.700	ton/jaar

Implementatiepotentieel(laag/middelmatig/hog)

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.

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.

Financieel

Er zijn geen grote investeringen nodig om deze technologie toe te passen.



Literatuur/bronnen:

Jonkers, 2013

Mondelinge toelichting door Henk Jonkers (TU Delft) bij stand van zaken

Website TU Delft, 2013

Verschillende verwijzingen naar het zelfhelend beton op de website van de TU Delft:

- Toelichting onderzoek zelfherstellend beton:
<http://www.citg.tudelft.nl/onderzoek/projecten/zelfherstellend-beton/>
- Zelfhelend bio-beton winnaar Design & Engineering Award:
http://tudelft.nl/no_cache/actueel/laatste-nieuws/artikel/detail/zelfhelend-bio-beton-winnaar-design-engineering-award/



Bijlage B.16 Betonkernactivering

<i>Reductiekosten CO₂-emissie:</i>	<i>609 €/ton</i>
<i>CO₂-emissiereductiepotentieel:</i>	<i>423.000 ton/jaar¹²</i>

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 gebouwtwerp 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 temperatuurverwarming op basis van een warmtepomp aangesloten op een warmtekoelopslagsysteem (WKO) in de bodem. Een warmtepomp in combinatie met warmtekoelopslag in de bodem (WKO) is een zeer efficiënte manier van warmte en koelte produceren. De betonkernactivering is dus het afgiftesysteem 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.

Vanaf 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 lage temperatuurverwarmingssysteem, mits er voldoende ruimte is voor minimaal 8 m² PV-panelen per dak en het dak de juiste oriëntering heeft.

Vanaf 2020 moet alle nieuwbouw voldoen aan EPC = 0. Hierdoor is er vanaf 2020 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.

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.

In het onderstaande overzicht staan de berekende CO₂-emissies voor een woning met EPC = 0,4, zonder gebruik te maken van een lage temperatuurverwarmingssysteem.

¹² Tussen 2015 en 2020 daarna stop het.



CO ₂ -emissies bij EPC = 0,4	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 CO₂-emissiereductie en energiekostenbesparing. De belangrijkste besparing is dat er geheel geen gasaansluiting meer nodig is, terwijl de gebouwgebonden elektriciteitskosten al volledig gedekt worden door de benodigde zonnepanelen.

In het onderstaande overzicht staan de berekende CO₂-emissies voor een woning met EPC = 0,4 zonder gebruik te maken van een lage temperatuurverwarmingssysteem waarbij extra een warmtepomp met WKO en betonkernactivering is aangebracht waardoor de EPC netto uitkomt op 0,3.

CO ₂ -emissies bij EPC = 0,3 door EPC = 0,4+BKA	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



In het volgende overzicht staan de benodigde investeringen om een EPC = 0,4 woning met daarbij extra een warmtepomp met WKO en betonkernactivering aan te leggen.

Investeringskosten	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
<i>Totale investering</i>		<i>€ 14.100/woning</i>
Verandering energiekosten	Gasrekening en aansluiting	€ -459/woning.jaar
	Elektriciteitsrekening	€10/woning.jaar
<i>Totale verandering energiekosten</i>		<i>€ -450/woning.jaar</i>
Discontovoet	Voorgescreven 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 CO₂.

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 basisgebouw en daarbovenop wordt BKA toegevoegd dat het CO₂-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 CO₂-emissiereductie van 0,7 ton CO₂ 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 CO₂/jaar in de periode van 2015 tot 2020.

In het volgende overzicht staat het reductiepotentieel voor CO₂-emissiereductie door in nieuwbouwhuizen bovenop de verplichte EPC-score extra energiebesparing te realiseren door aanleg van betonkernactivering. Zodanig dat de EPC netto op 0,3 uitkomt.

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

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 een veel lager CO₂-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 installatietechniek 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).

Organisatorisch

Voor de implementatie van het bovengeschetste concept is de bouwsector afhankelijk van de wil van de opdrachtgever om meer te doen dan strikt noodzakelijk volgens het bouwbesluit. Vervolgens moet die opdrachtgever dan ook kiezen voor een EPC plus BKA-concept. Het vraagt een bepaalde ambitie van de opdrachtgever 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 utiliteitsgebouwen de Breeam-score. In beide concepten spelen lage temperatuurverwarmingssystemen en -koelingsystemen een belangrijke rol, al dan niet gekoppeld aan betonkernactivering.

Financieel

Platform 31 heeft een overzicht van duurzaam bouwen gemaakt. Het gaat hierbij om energienul- en notaloze woningen. 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.

Literatuur

CBS, 2013

Rendementen en CO₂-emissie van elektriciteitsproductie in Nederland, update 2011

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
Beschikbaar via: www.ikhebeenidee.nu

SBRCURnet, 2013

Telefonisch overleg met Cindy Vissering, Programmamanager Duurzaam Bouwen bij SBRCURnet



Stimular, 2011
CO₂-factoren in de Milieubarometer, update 26 juni 2011 door Stichting
Stimular

WK2020, 2013
Laure Itard
Factsheet 7.5 van WK2020
TU Delft/Haagse Hogeschool



Bijlage C Cementchemie en notatie

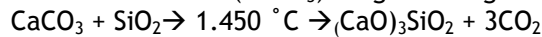
De wereld van beton grenst aan die van chemie. Het omschrijven van de reacties die plaatsvinden bij het produceren en recyclen van beton in chemische termen kan veel inzicht geven in wat er gebeurt. Echter, de betondeskundigen hebben in de loop der jaren een eigen mineralenschrift ontwikkeld. Voor hen 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.

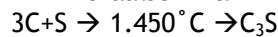
Decarbonisatie tijdens de productie van Portlandklinker

Klinker wordt geproduceerd door klei (en schalie) te laten reageren met kalk bij 1.450 graden Celsius.

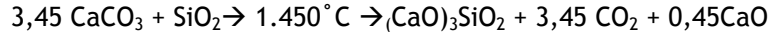
In grote lijnen komt het er op neer dat het silicaat (SiO_2) in de klei en de schalie en de kalk (CaCO_3) reageren volgens:



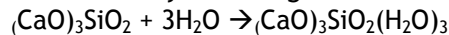
In mineraalschrift:



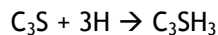
Het vrijkomen van koolstofdioxide ($\text{CO}_2(\text{g})$) heet decarbonisatie en leidt tot extra koolstofdioxide-emissie bovenop de emissies die vrijkomen door het brandstofgebruik dat nodig is om te kunnen verhitten tot 1.450 graden Celsius. Omdat er een kleine overmaat van calciumoxide nodig is om het silicaat te laten reageren is in praktijk de verhouding:



Als het cement wordt toegepast wordt het gemengd met water en ontstaat er een cementshydraat volgens:

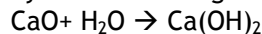


In mineraalschrift:



Op basis van de bovenstaande vergelijking zou de hoeveelheid CO_2 die vrijkomt per eenheid cement door decarbonisatie berekend kunnen worden op 0,538 ton CO_2 per ton cement. Omdat in cement naast C_3SH_3 ook nog andere verbindingen voorkomen waaronder aluminaten met een hogere molmassa komt de emissie door decarbonisatie volgens de industrie lager uit op circa 0,5 ton CO_2 per ton cement.

Als de overmaat calciumoxide in contact komt met water wordt er calciumhydroxide ofwel gebluste kalk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gevormd:



Geblyste kalk is basisch. Aanwezigheid van de overmaat van gebluste kalk activeert hoogovenslak, dit zorgt voor sterkteontwikkeling in slak waardoor hoogovencement toch voldoende kan binden ook al zit er maar weinig Portlandklinker in.



Gerecycled cement als decarbonistatievrije grondstof voor cement
 Voordat de cementfractie die bijvoorbeeld met slim breken teruggewonnen is uit beton weer opnieuw gebruikt kan worden moet het gedehydrateerd worden, hierbij ontstaat beliet (C_2S oftewel $(CaO)_2SiO_2$).
 Dit gebeurt vanaf 450 graden Celsius volgens de volgende reactie:
 $(CaO)_3SiO_2(H_2O)_3 \rightarrow >450^\circ C \rightarrow (CaO)_2SiO_2 + CaO + 3H_2O$

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

De cementsteenfractie kan ook gebruikt worden als grondstof voor Portlandklinker door de gerecyclede cementfractie verder te verhitten tot 1.450 graden Celsius.

In dat geval reageert het beliet met de calciumoxide door tot cement, maar nu zonder dat er decarbonisatie hoeft op te treden. De benodigde calciumoxide is immers al aanwezig:

Gerecycled cement $\rightarrow 450^\circ C \rightarrow$ beliet en calciumoxide $\rightarrow 1.450^\circ C \rightarrow$ cement
 $(CaO)_3SiO_2(H_2O)_3 \rightarrow 450^\circ C \rightarrow (CaO)_2SiO_2 + CaO \rightarrow 1.450^\circ C \rightarrow (CaO)_3SiO_2$
 $C_3SH_3 \rightarrow 450^\circ C \rightarrow C_2S + C + 3H \rightarrow 1.450^\circ C \rightarrow C_3S$

Alfakwarts als ongewenste factor

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 Celsius 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.

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. Door het te laten reageren met een overmaat aan kalk.

$CaCO_3 + SiO_2 \rightarrow 1.450^\circ C \rightarrow (CaO)_3SiO_2 + 3CO_2$.

Hierbij treedt dus decarbonisatie op. Daarom is alfakwarts ongewenst.



Bijlage D Milieueffecten bij inzet van cementen en alternatieve bindmiddelen voor beton - nu en straks

Opgesteld in augustus 2013 t.b.v. 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 m³ beton geproduceerd en toegepast, omgerekend bijna 1,4 m³ 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 m³ per inwoner per jaar.

De cementproductie draagt wereldwijd voor zo'n 4-5% bij aan de door de mens veroorzaakte CO₂-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 CO₂-emissies, enerzijds omdat fossiele brandstoffen worden ingezet om de grondstoffen te laten reageren bij een 'bed'temperatuur van ca. 1.450 graden Celsius, anderzijds omdat de belangrijkste grondstof kalksteen (mergel) zich bij ruim 900 graden Celsius splitst (decarbonatatieproces) in CaO en CO₂, dit genereert ca. 250 kg CO₂ per ton kalksteen. Omdat ca. 2 ton kalksteen nodig is voor de productie van 1 ton klinker, zorgt het calcineren voor 505 kg CO₂ 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 CO₂ per ton klinker aan toe. Dit verklaart waarom Portlandcement met 95% m/m klinkergehalte zo'n relatief hoge emissie heeft, opgeteld ongeveer 850-950 kg CO₂ per ton cement.

De CO₂-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, ijzeroxide, aluminiumoxide 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 CO₂-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 maken 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 cementsoorten 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 CO₂ 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 CO₂-emissie van minder dan 300 kg per ton cement. Dit hoogovencement is niet voor alle beton-toepassingen 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 poederkoolvliegascement uit kolengestookte elektriciteitscentrales - en tevens composietcement CEM V/A, een combinatie van ca. 50% m/m klinker en gelijke gehalten aan poeder-koolvliegascement 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 klinkergehalten toe die niet in Nederland worden geproduceerd, bijv. CEM V/B met klinker, vliegascement 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-graded cement, dit betekent dat beton niet aantoonbaar duurzaam is in alle mogelijke toepassingen (zoals CUR-aanbeveling 48 voorschrijft voor well-graded 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, vliegascement, 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	Blast-furnace slag S	Silica fume D ²⁾	Pozzolana		Fly ash		Limestone*				
						natural P	natural calcined Q	siliceous V	Calcareous W	Burnt shale T	L		LL	
CEM I	Portlandcement	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
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 nabehandeling-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 Portlandcementklinkermineralen 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 CO₂-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-waardeconcept

De latente bindmideleigenschappen van vlieg-as 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 vlieg-as 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 m³ beton van 300 kg hoogovencement CEM III/B 42.5 (klinkergehalte 30%) in combinatie met 100 kg vlieg-as leidt ertoe dat 300:3 = 100 kg vlieg-as 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 CO₂-reductie door gebruik van klinkerarme cementen?

In referentiejaar 2010 was de jaarconsumptie in Nederland ca. 4,8 Mtoncement. 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 CO₂-emissie per ton cement). Samen met hoogovencement CEM III/A 52.5N is de marktpenetratie ca. 45%. Deze laatste cementsoort heeft ca. 500 kg CO₂-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 CO₂-emissie per m³ 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 m³ een CO₂-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 CO₂-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 CO₂ 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 CO₂-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 CO₂-reductie is derhalve heel beperkt.

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

Generieke naam	Samenstelling	Energie	CO ₂ -besparing/ footprint	Kosten ten opzichte van CEM I *)	Bedrijf
CEM X, CEM II/C tot 50% m/m klinker en CEM VI met 35-49% m/m	EN 197-1: klinker+slak +vliegaskalksteen	35-65% lager dan bij CEM I	35-65% lager dan CEM I	- 15 tot - 30%	Traditionele producenten zodra CEM X in EN-197 is opgenomen



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 CO₂-emissie. Tabel E-3 geeft aan de belangrijkste ontwikkelingen wereldwijd, en de geschatte CO₂-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 CO₂-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	Oven-temp. ca. 200° C lager	20-30%	Gelijk	Italcementi, Lafarge, HC Group
Super-gesulfateerde 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 CO₂, 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 cementsoorten. Voor succesvolle toepassing in beton gaat het o.a. om de volgende aspecten:

- verwerkbaarheid en open time;
- sterkteontwikkeling van beton;
- lange termijngedrag 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 CO₂-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 vliegashouding 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 introductie 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 perspectiefvol
Calcium-sulphoaluminaat 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	Voorals massabeton, ook onderwaterbeton
Alternatief CSH cement	0%	Ongewapend breed toepasbaar (50%), gewapend beperkt toepasbaar (20%)	Technologie nog in pilotstadium, investeringen 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 recycletechnieken. 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 cementproductieproces. Daartoe is al onderzoek verricht maar meer/verder onderzoek uitvoeren is essentieel. Heeft het materiaal hydraulische of puzzolane eigenschappen? Het cementproductieproces 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 CO₂. 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 cementnorm 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 fysischchemische 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 termijngedrag (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 brekenprincipe. 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 (NingZuokui, 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 ($< 100 \mu\text{m}$) vrijkomend bij de diverse minerale breekprocessen. Er zijn technologieën om vulstoffen met een superhoge 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 Portland-cementklinker zullen blijven voorzien in het wereldwijde bouwen met beton. EN 197-1 biedt nog vele mogelijkheden om de CO₂-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: lange termijngedrag 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 te behalen met 'Duurzaam bouwen', door samenwerking in de betonketen te stimuleren en daadwerkelijk in bouwprojecten te praktiseren. Beoordeling op basis van CO₂-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 CO₂-tax maatregelen in te voeren. Echter, op de lange termijn moeten bindmiddelinnovaties - 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 vliegashoudend materiaal.
- 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 CO₂-emissies bij productie met parallelle CO₂-afvangings- en/of CO₂-bindings-technologie 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 CO₂-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 Delft-rapport, Delft, april 2013, p. 54-57.
5. Roadmap duurzaam cement. Cement & Beton Centrum, 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. NingZuokui 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.





Bijlage E Berekening effect later ontkisten met CUR-tool

Opgesteld door Leo Dekker, Manager Technology & Sustainability Mebin B.V.

Om het effect van de verhardingstijd duidelijk te maken heb ik een voorbeeld genomen uit een lopend onderzoek van studiecél 61 van Stutech/Stufib. In dit onderzoek worden een aantal praktijkvoorbeelden om de betonbouw te verduurzamen uitgerekend via de zogenaamde CUR-tool (β -versie Rekenool Groen Beton fase 2 versie 2.0). Met de CUR-tool kan een LCA-berekening uitgevoerd worden van (beton)bouwwerken met prefab en ter plaatse gestorte onderdelen. De output bestaat uit een milieuprofiel conform de Nationale Milieudatabase en een MKI, de milieukostenindicator. De milieukostenindicator neemt alle LCA-milieuaspecten in beschouwing, dus niet alleen CO₂.

In Werkgroep 5 van de genoemde studiecél, waarvan ik de trekker ben, worden voorbeelden uitgewerkt voor de woningbouw. Hierbij wordt gekeken naar zowel prefab als ter plaatse gestort (gietbouw). De methode ter plaatse gestort kent in principe twee varianten: koude gietbouw (KG) en warme gietbouw (WG). Koude en warme gietbouw worden overigens ook toegepast bij utiliteitsbouw als sprake is van ter plaatse gestort beton. Als voorbeeld kan hierbij genoemd worden de Jheronimus toren die op dit moment wordt gebouwd in 's-Hertogenbosch. Een belangrijk constructief criterium bij deze wijze van bouwen is dat ontkisten van de wanden en vloeren pas mag geschieden, als een sterkte is bereikt van minimaal 14 N/mm². Wanneer in grote series wordt gewerkt, zal de aannemer altijd aansturen op een dagcyclus voor het opbouwen van de bekisting, aanbrengen van de wapening, storten en ontkisten. In de praktijk betekent dit, dat de eerder genoemde sterkte in een periode van 16 uur onder alle omstandigheden (zomer/winter) moet zijn opgebouwd. Wanneer KG wordt toegepast moet de samenstelling van het mengsel ervoor zorgen dat onder alle omstandigheden de beoogde sterkte wordt bereikt. Hierbij wordt vooral gestuurd door de verhouding CEM I/CEM III te variëren. In de winter wordt meer CEM I toegepast, in de zomer uiteraard minder. Bij warme gietbouw wordt, vaak computer gestuurd, warmte toegevoerd tijdens de verharding (heaters) en is het aandeel CEM I (veel) lager. Er is een model ontwikkeld om de sterkteontwikkeling in de constructie te volgen: de methode van de gewogen rijpheid. Hierbij wordt de temperatuur in de constructie als functie van de tijd gemeten. Deze temperatuurontwikkeling is gerelateerd aan de sterkte-ontwikkeling. Als de juiste temperatuur/tijd cyclus is doorlopen, kunnen heaters worden afgeschakeld en/of kan ontkist worden. De methode wordt zowel bij koude- als warme gietbouw toegepast.

Om de vraag te beantwoorden zijn een aantal varianten doorgerekend:

- Verschil tussen koude en warme gietbouw.
- Ontkisten na 16 of 40 uur (= + 1 dag) met een sterkte van 14 N/mm² (verlengen verhardingstijd).
- Ontkisten bij een lagere sterkte: 10 N/mm² i.p.v. 14 N/mm² (verlagen criterium ontkisten). Deze optie is vooralsnog vrij willekeurig gekozen om de effecten duidelijk te maken. Constructieve veiligheid speelt hierbij natuurlijk een belangrijke rol!

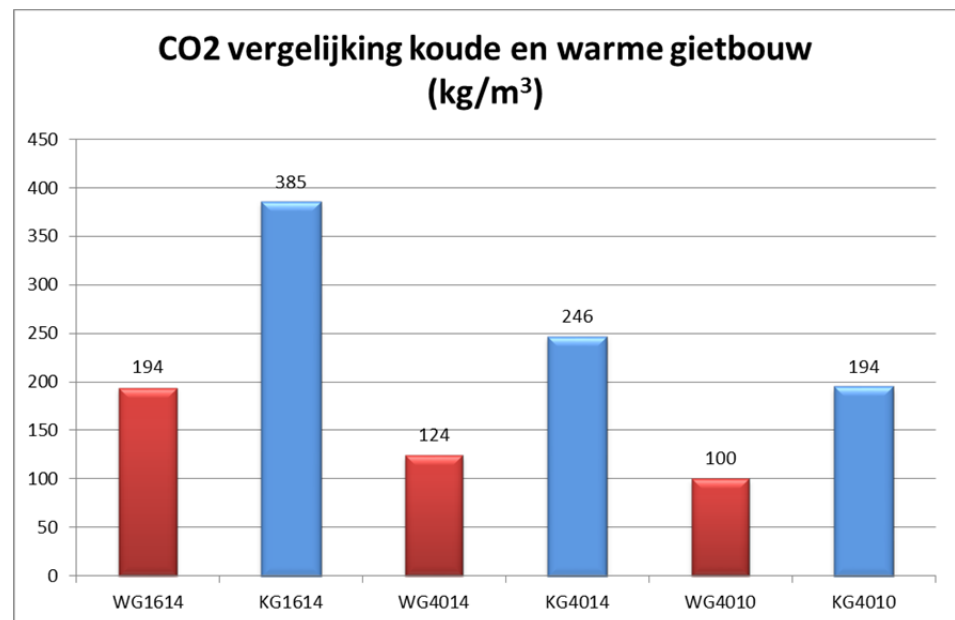


In de berekeningen met de CUR-tool zijn de volgende aannames gemaakt:

- betonmortelcentrale locatie Amsterdam;
- gemiddelde etmaaltemperatuur 12 graden Celsius;
- default transportafstanden voor grondstoffen;
- zeemateriaal (zand/grind);
- CEM I, gemiddelde NMD;
- CEM III, gemiddelde NMD;
- truckmixer gemiddelde grootte, transportafstand naar het werk 20 km (enkele reisafstand);
- gasverbruik centrale = 0,25 m³/m³;
- elektriciteit verbruik centrale, groene stroom = 3,9 kWh/m³;
- diesilverbruik centrale = 0,2 l/m³;
- gerekend zijn effecten tot de bouwplaats.

In de volgende grafiek is het effect op de CO₂-emissie (kg/m³) weergegeven. De verschillende varianten zijn volgens het volgende format gecodeerd:

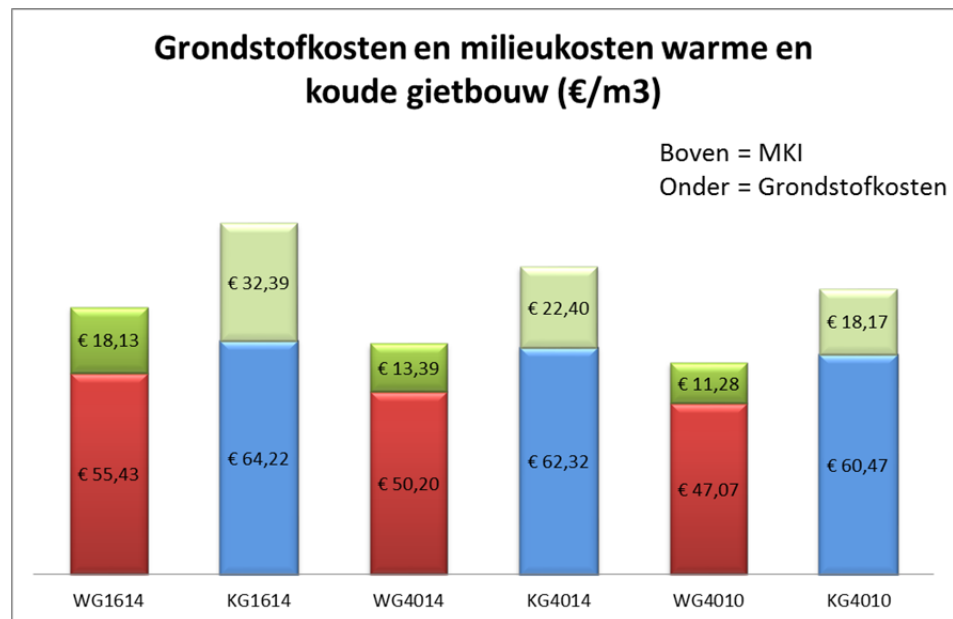
KG1614 = Koude Gietbouw, ontkisten na 16 uur, ontkistingssterkte 14 N/mm².



De CO₂-effecten zijn duidelijk:

- De CO₂-emissie van de warme variant is in alle gevallen duidelijk lager dan de vergelijkbare koude variant.
- Verlengen van de verhardingstijd met één etmaal, waarbij aan de constructieve eisen wordt voldaan, reduceert zowel bij warme als koude gietbouw de CO₂-emissie tot circa 64% (WG:194→124 kg/m³; KG: 385→246 kg/m³).
- Wanneer het criterium voor de ontkistingssterkte wordt verlaagd naar 10 N/mm², én de verhardingstijd met één etmaal wordt verlengd is de reductie in beide gevallen circa 50% (WG:194→100 kg/m³; KG: 385→194 kg/m³).

Met dezelfde CUR-tool is het ook mogelijk om de milieukosten weer te geven als MKI (milieukostenindicator). Hierin zijn de financiële aspecten van alle LCA-parameters, inclusief CO₂, meegenomen. Daarnaast zijn, op basis van de berekende samenstellingen, de grondstofkosten berekend. In de onderstaande grafiek zijn beide bedragen voor warme en koude gietbouw weergegeven.



De MKI-effecten kunnen als volgt worden samengevat:

- De MKI van koude gietbouw is in alle gevallen hoger dan de MKI van warme gietbouw.
- Verlengen van de verhardingstijd met één etmaal, waarbij aan de constructieve eisen wordt voldaan, reduceert bij warme gietbouw de MKI tot circa 74% (€ 18,13 → € 13,39) en bij koude gietbouw tot circa 70% (€ 32,39 → € 22,40).
- Wanneer het criterium voor de ontkistingsterkte wordt verlaagd naar 10 N/mm², én de verhardingstijd met één etmaal wordt verlengd reduceert bij warme gietbouw de MKI tot circa 62% (€ 18,13 → € 11,28) en bij koude gietbouw tot circa 56% (€ 32,39 → € 18,17)
- Grondstofkosten variëren afhankelijk van de benodigde mengsel-samenstelling. Wanneer de sterkte op een later tijdstip kan worden bereikt (40 i.p.v. 16 uur) of lager mag/kan zijn (10 i.p.v. 14 N/mm²) is minder cement nodig en/of kan meer van de goedkopere CEM III-cement toegepast worden.