

Update Prioritering handelings- perspectieven verduurzaming betonketen 2015

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

Rapport
Delft, maart 2015

Opgesteld door:
M. (Marit) van Lieshout



Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

M. (Marit) van Lieshout

Update Prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen 2015

Kostencurve opgesteld op basis van quickscan van 16 door het MVO-netwerk beton
geselecteerde verduurzamingsopties

Delft, CE Delft, maart 2015

Publicatienummer: 15.2A59.22

Beton / Duurzaamheid / Duurzaam produceren / Bedrijfsbeleid / Kosten / Grondstoffen /
Ketenbeheer

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

Committed to the Environment

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

Samenvatting	5
1 Inleiding	9
1.1 Aanleiding	9
1.2 Doel project	9
1.3 Wijzigingen ten opzichte van eerdere versies	10
1.4 Leeswijzer	11
2 Duurzaamheidsopties	13
2.1 Selectieproces	13
2.2 Geselecteerde verduurzamingsopties	13
2.3 Verandering van de betonsamenstelling	14
2.4 Samenvatting	18
3 Methodiek	21
3.1 Algemeen	21
3.2 Aanpak en uitgangspunten bij bepaling van het reductiepotentieel	22
3.3 Aanpak en uitgangspunten bij berekening van de reductiekosten	23
4 Kostencurve	25
4.1 Omvang van het CO ₂ -reductiepotentieel	26
4.2 Omvang van de reductiekosten	26
4.3 Reductiepotentieel van 7 handelingsperspectieven	29
4.4 Samenvatting	31
5 Conclusies en aanbeveling	33
5.1 Reductiepotentieel	33
5.2 Reductiekosten	34
5.3 Duurzaam inkopen kan dit grote potentieel helpen onsluiten:	34
Literatuur	35
Bijlage A Optie-overzicht tijdens kick-off	37
Bijlage B Verduurzamingsopties en kosten grondstoffen	39
Bijlage B-1 Korrelpakking	41
B.2 CEM X	43
B.3 CSA-beliet	45
B.4 Supergesulfateerd	47
B.5 Alternatief CSH	49
B.6 Geopolymeer	52
B.7 Demontabel bouwen	55
B.8 Mechanische cementrecycling	58
B.9 Thermische cementrecycling	62



B.10	Bodemas	64
B.11	Staalvezels	66
B.12	Bouwplanning	68
B.15	Zelfhelend beton	71
B.16	Betonkernactivering	76
Bijlage C	Cementchemie en notatie	81
Bijlage D	Milieueffecten bij inzet van cementen en alternatieve bindmiddelen voor beton - nu en straks	83
Bijlage E	Berekening effect later ontkisten met CUR-tool	95
Bijlage F	Bepaling overlap	99



Samenvatting

Deze studie vervangt het rapport 'Prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen' (CE Delft 2013b) en de 'Update Prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen' (CE Delft, 2014b).

Dit rapport is een update van de eerdere kostencurves die opgesteld zijn als 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 (convenant Concreet 1.0). Op de middellange termijn worden verdergaande verbeteringen wenselijk geacht. Om deze verbeteringen op de middellange termijn (rond 2020) te realiseren zijn 16 verduurzamingsopties geselecteerd.

In de inventarisatiestudie naar de 'Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw' (CE Delft, 2013a) zijn alle milieueffecten van de betonketen meegenomen. Daaruit bleek een sterke correlatie van de verschillende milieu-effecten 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 geupdate kostencurve is weergegeven in Figuur 1. De wijzingen die gemaakt zijn in vergelijking met de laatste update betreffen de volgend onderwerpen:

- betonkernactivering;
- geopolymeer;
- zelfhelend beton.

Betonkernactivering

Na correctie bleek het reductiepotentieel in woningen uit te komen op 100 kton. Dit is significant lager dan aanvankelijk berekend. Verder zijn er nieuwe praktijkgegevens beschikbaar gekomen over de kosten en toepassingsmogelijkheden van lucht-water warmtepompen in Nederlandse woningen. Dit had ook consequenties voor de reductiekosten die daardoor uitkwamen op 350 €/ton CO₂-emissiereductie). Het reductiepotentieel voor kantoren blijft zoals in de vorige update (CE Delft, 2014b) 30 kton bij reductiekosten van 0 €/ton.

Geopolymeer

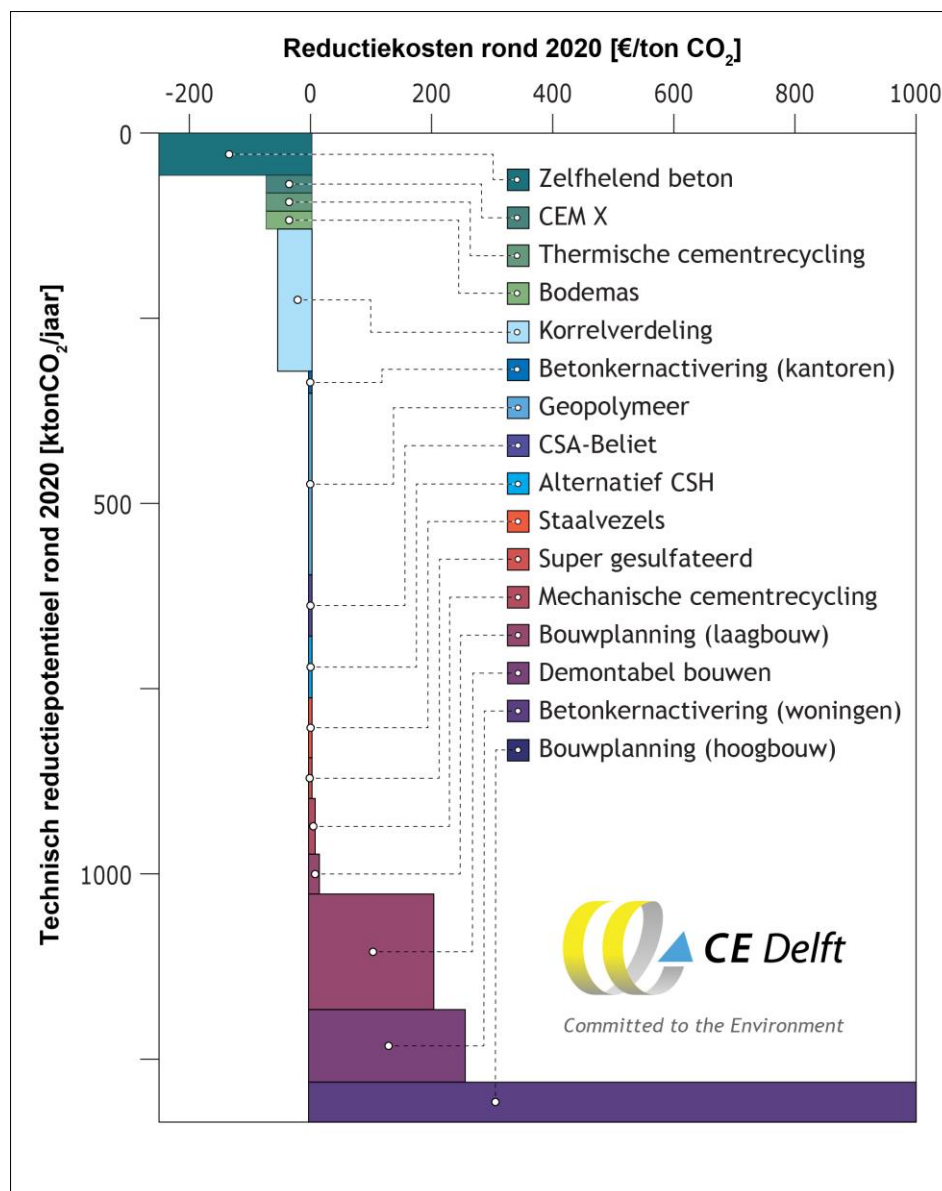
We hebben in deze update de berekening van de emissiereductie gelijkgetrokken met de berekening van de CO₂-footprint van cement en betongebruik in Nederland (CE Delft, 2013a). Dit betekent dat er met een gemiddelde emissie voor CEM III/A en CEM III/B bij gebruik in niet-constructieve betonproducten is gewerkt, in plaats van de totale range aan emissies zoals in eerdere berekeningen was gedaan. Hierdoor neemt de spreiding in de berekende waarde af en de gemiddelde waarde voor het reductiepotentieel toe. Deze aanpassing heeft geen effect op de reductiekosten zoals berekend in de vorige update.



Zelfhelend beton

De verhouding van investeringskosten en onderhoudskosten is verekend met de net present value methode (NPV) bij een discontovoet van 5,5% (deze werkwijze is ook toegepast bij de kostenberekening van de betonkernactivering). Hiermee kwamen de gemiddelde reductiekosten op -260 €/ton (bij een spreiding van -1.230 tot +660 €/ton).

Figuur 1 Kostencurve verduurzamingsopties in de betonketen in Nederland (2020)



Uit de figuur blijkt dat de som van alle reductiepotentiëlen 1,3 miljoen ton CO₂ per jaar bedraagt. Echter er is sprake van overlap van de reductiepotentiëlen. Hierdoor is het netto besparingspotentieel 1,1 miljoen ton CO₂ per jaar. Dat is nog steeds 31% van de CO₂-footprint van de totale Nederlandse betonproductie in het referentiejaar 2010 (CE Delft, 2013a).

Als we naar de maatregelen kijken die door het MVO Netwerk Beton gekozen zijn als handelingsperspectief (CE Delft, 2014), dan zijn dat:

- betonkernactivering;
- circulaire betoneconomie CSA-Beliet;
- geopolymeer;
- korrelpakking optimalisatie;
- smart concrete;
- innovatieve betonrecyclingtechnologie.

Het reductiepotentieel voor deze opties gecorrigeerd voor overlap is 1 miljoen ton CO₂ (992 kton CO₂ per jaar). Dit komt overeen met 27% van de CO₂-footprint van beton (CE Delft, 2013).

Hierbij moet wel opgemerkt worden dat dit een moment opname is. De verwachting is dat dit potentieel in de loop van de jaren verandert enerzijds doordat het CO₂-potentieel voor betonkernactivering vanaf 2020 afneemt tot nul.

Anderzijds doordat het bewezen potentieel van de andere opties sterk toeneemt doordat de toepasbaarheid vergroot wordt.

Belangrijk is nu dat de markt zich realiseert dat een gigantisch potentieel beschikbaar is om de CO₂-emissie te reduceren en dat dit gerealiseerd kan worden als de hele keten samengewerkt. Duurzaam inkopen nieuwe stijl kan daarbij ingezet worden als marktorganiserend mechanisme (CE Delft, 2014c).





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. Gaande het proces komen er nieuwe inzichten, in deze Update Prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen 2015 zijn de laatste inzichten verwerkt.

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, convenant 'Concreet 1.0'. Op de middellange termijn worden verdergaande verbeteringen wenselijk geacht.

Vanuit verschillende kanten zijn er verduurzamingsopties geopperd voor de branche. Vervolgens is uit deze lijst van meer dan 70 verduurzamingsopties een selectie gemaakt van circa 35 opties. In overleg met leden van het MVO Netwerk Beton is een selectie van 16 verduurzamingsopties gemaakt voor de middellange termijn. CE Delft deze selectie uitgewerkt tot de 16 verduurzamingsopties zoals samengevat in Tabel 2.

1.2 Doel project

Het doel van het project is om een ruwe inschatting te hebben van de hoeveelheid CO₂ die per verduurzamingsoptie per jaar bespaard kan worden rond 2020 en hoeveel het kost om met een bepaalde verduurzamingsoptie een ton CO₂ te besparen.

De hoeveelheid CO₂ die bespaard kan worden is het CO₂-reductiepotentieel en de kosten per CO₂-emissie die voorkomen zijn door een verduurzamingsoptie toe te passen zijn de CO₂-reductiekosten.

Als je het reductiepotentieel uitzet in een figuur tegen de reductiekosten ontstaat een kostencurve.

Deze kostencurve kan gebruikt worden als input voor een objectieve discussie over nut en noodzaak van de verschillende verduurzamingsopties.

Hierbij gelden twee randvoorwaarden:

1. De kostencurve wordt opgesteld op basis van gegevens die nu voorhanden zijn.
2. De kostencurve wordt opgesteld 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 alleen technische beperkingen meegenomen zijn in de berekening en niet zaken als een tegenvallende marktprijsontwikkeling, negatief sentiment, etc.

Om het technisch reductiepotentieel te berekenen is uitgegaan van emissie-reducties, die nu al op laboratoriumschaal of pilotschaal bewezen zijn, zodat alle benodigde procedures voor grootschalige invoering op de markt voor 2020 technisch realiseerbaar zijn.

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, 2013a) 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 Wijzigingen ten opzichte van eerdere versies

De wijzigingen die gemaakt zijn in vergelijking met de laatste update betreffen de volgend onderwerpen:

- betonkernactivering;
- geopolymeer;
- zelfhelend beton.

Betonkernactivering

In de oorspronkelijke berekening was gerekend met een te hoge CO₂-emissie reductie. Na aanpassing op basis van de cijfers van de meest recente aanscherpingsstudie en praktijkcijfers voor de besparing (Alklima, 2015) bleek het reductiepotentieel in woningen uit te komen op 98 kton. Dit is significant lager dan aanvankelijk berekend. Dit had ook consequenties voor de reductiekosten die daardoor uitkwamen op € 777 per ton CO₂-emissiereductie).

Het reductiepotentieel voor kantoren blijft zoals in de vorige update (CE Delft, 2014b) 29 kton bij reductiekosten van 0 €/ton.

Geopolymeer

We hebben in deze update de berekening van de emissiereductie gelijkgetrokken met de berekening van de CO₂-footprint van cement en betongebruik in Nederland (CE Delft, 2013a). Dit betekent dat er met een gemiddelde emissie voor CEM III/A en CEM III/B bij gebruik in niet constructieve betonproducten is gewerkt. Terwijl de berekening van de CO₂-emissies in de vorige update (CE Delft, 2014b) gebaseerd was op de volledige range van emissies die mogelijk zijn voor CEM III/A- en CEM III/B-cementen.

Hierdoor neemt de spreiding in het gerekende reductiepotentieel af en neemt de gemiddelde waarde voor het reductiepotentieel toe. Deze aanpassing heeft geen effect op de reductiekosten zoals berekend in de vorige update.

Zelfhelend beton

Het effect van zelfhelend beton is berekend aan de hand van voorbeelden die die uit de Stufib-Stutech-rapport naar voren zijn gekomen (een betonnenplaat met een dikte van 90 cm die eenzijdig aan de elementen wordt blootgesteld



en een pilaar met een diameter van 80 cm, die rondom aan de elementen is blootgesteld). De berekende reductiekosten variëren van -1.230 tot +660 kton CO₂ per jaar afhankelijk van de gekozen betondimensies. De waarde in de grafiek is het gemiddelde van deze range: -285 kton CO₂-emissiereductie per jaar.

1.4 Leeswijzer

De opzet van dit rapport is als volgt:

In Hoofdstuk 2 is het selectieproces van de verduurzamingsopties voor de oorspronkelijke kostencurve 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 voor opname in de kostencurve.

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 Methodiek die gebruikt is om de reductiekosten en het reductiepotentieel te berekenen.

In Hoofdstuk 4 de resultaten van de berekeningen in de vorm van de kostencurve.

In Hoofdstuk 5 trekken we conclusies en doen we aanbevelingen.

Hoofdstuk 4 en 5 zijn aangepast naar de laatste inzichten, Hoofdstuk 2 is ongewijzigd gebleven. Hoofdstuk 3 is de ongewijzigde informatie over de methodiek die in voorgaande rapporten in één hoofdstuk stond met de kostencurve. In deze update is voor de leesbaarheid ervoor gekozen om methodiek en resultaten te scheiden.

In Bijlage B staan alle berekeningen beschreven, deze zijn waar nodig aangepast.





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 Figuur 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.

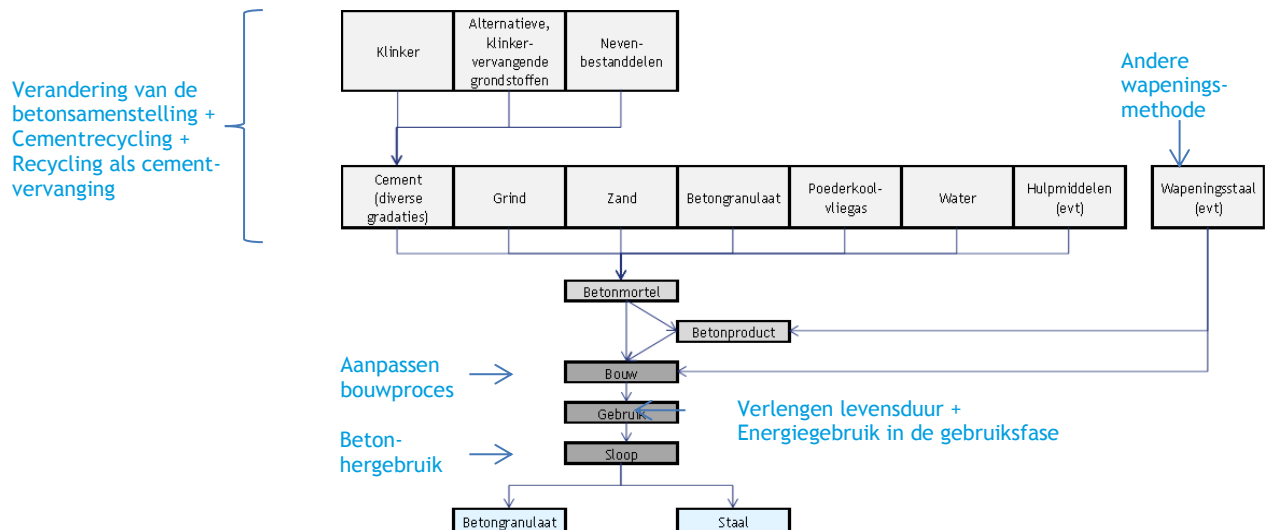
In Figuur 2 is weergegeven waar de verschillende categorieën ingrijpen in de levenscyclus van het beton. De gekozen verduurzamingsopties en de bijbehorende categorieën zijn samengevat in Bijlage B.

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, 2013a).

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 2 Schematische weergave van de levenscyclus van beton en waar verschillende categorieën opties uit Tabel 1 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.

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, poederkoolvliegas, en chemische hulpmiddelen toegevoegd (zie Figuur 2).

Een belangrijk onderdeel van beton is cement. Cement zorgt voor de binding tussen de verschillende ingrediënten van beton en is daarmee cruciaal voor de sterkte van het beton. Van oudsher is Portlandcementklinker een belangrijk bestanddeel van cement. De productie van Portlandcementklinker is heel energie-intensief. Daar komt nog bij dat CO₂ wordt afgescheiden in het chemische proces dat nodig is om van kalk en silicaten Portlandcementklinker te maken.

Hierdoor heeft de productie van Portlandcementklinker een grote klimaat-impact. Zo groot dat de CO₂-emissie door de productie van ongewapend beton bijna volledig bepaald wordt door de hoeveelheid Portlandcementklinker die gebruikt wordt (CE Delft, 2013a).

Er wordt in Nederland een groot aantal cementen verkocht, afhankelijk van de toepassing varieert de samenstelling en het aandeel Portlandcementklinker. 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 Portlandcementklinker 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 Portlandcementklinker 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 Portlandcementklinker 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 Portlandcementklinker in betontoepassingen vermindert of geheel tot nul gereduceerd kan worden zonder de sterkte van het beton in gevaar te brengen.

1. Optimalisatie van de pakingsdichtheid 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 'Korrelpakking'. 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 Portlandcementklinker. Dit is het werkingsprincipe achter optie CEM X¹. Voor meer informatie over deze optie zie B.2.
3. Ontwikkeling van een alternatief bindsysteem dat dezelfde werking heeft als Portlandcementklinker, 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 B.3 tot en met 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

¹ 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.



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 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 cementrecycling.

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 decarbonisatievrije² 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 B.8 en 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. Dat is het werkingsprincipe van verduurzamingsoptie inzet van bodemassen. Voor meer informatie over deze optie zie 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.

² Staalvezels kunnen niet gerecycled worden met reguliere sloopmethodes, maar wel door slimme brekers zoals besproken bij de opties mechanische cementrecycling.

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



Voor meer informatie over deze optie zie 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 Portlandcementklinker en dus minder CO₂-emissie. Dit is het werkingsprincipe achter de verduurzamingsopties 'bouwplanning'. Voor meer informatie over de optie 'bouwplanning' zie 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'.

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 kostencurve.

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 (GWV 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 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 'betonkern-activering'⁴. Er was onvoldoende informatie beschikbaar om voor alle soorten gebouwen een berekening te maken. De berekeningen zijn daarom gebaseerd op woningbouw en kantoren. Voor meer informatie over deze optie, zie Bijlage B-16.

2.4 Samenvatting

Er zijn 16 verschillende maatregelen onderzocht om de CO₂-emissie van beton te reduceren, zie Tabel 1.

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.

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.



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

Categorie	Afkorting	Verduurzamingsoptie
Verandering van de betonsamenstelling	Korrelpakking	Optimaliseren korrelpakking
	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
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

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-emissie-reductiekosten en het CO₂-emissiereductiepotentieel te berekenen.



3 Methodiek

In dit hoofdstuk presenteren we de methodiek die gebruikt is voor de berekening van het reductiepotentieel en de reductiekosten op basis waarvan de kostencurve gemaakt wordt.

3.1 Algemeen

Het reductiepotentieel en de reductiekosten in de kostencurve is technische potentiëlen. Dit betekent dat alleen technische beperkingen meegenomen zijn in de bepaling van dit potentieel. Technische beperkingen zijn: beschikbare productiecapaciteit, tijd die nodig is om productiecapaciteit uit te breiden.

Of een technisch potentieel 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 sociaal economische factoren zijn niet meegenomen in de bepaling van het technisch potentieel.

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.

Verder zijn deze potentiëlen ingeschat op basis van bewijs uit de praktijk of minimaal op pilotschaal (met uitzondering van zelfhelend beton dat alleen op laboratorium schaal beproefd was). 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 Portlandcementklinker 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.



3.2 Aanpak en uitgangspunten bij bepaling van het reductiepotentieel

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 verduurzamingsoptie A meer transportbewegingen nodig zijn waardoor er 2 ton extra transportemissies optreden in vergelijking met de uitgangssituatie. Tegelijkertijd zorgt optie A voor 4 ton CO₂-besparing bij de productie van beton. Dan is het netto resultaat $+2-4=-2$ ton. Dus een netto CO₂-besparing over de hele levensduur.

Wij hebben voor iedere verduurzamingsoptie bepaald welke netto verandering er optreedt in de CO₂-emissies over de levensduur van het beton.

Het CO₂-emissiereductiepotentieel is uitgedrukt in kton per jaar (1 kton is 1 miljoen kg). Het CO₂-emissiereductiepotentieel geldt voor de gehele levensduur van het beton. Toch is de emissie uitgedrukt in kiloton CO₂-emissie per jaar (kton⁵/jaar). Dit heeft twee redenen:

1. Alle emissies over de levensduur van beton zijn toegerekend aan het jaar dat het beton toegepast wordt.
2. De ambitie is dat de verduurzamingsopties tot in de lengte der jaren toegepast worden en dat ieder jaar een vergelijkbaar bouwvolume gerealiseerd wordt als in 2010⁶.

De uitzondering op deze regel is het besparingspotentieel van betonkernactivering. Dit potentieel geldt tot 1 januari 2010. Vanaf 2020 moeten alle gebouwen bijna energieneutraal (BENG-norm) zijn. Dit betekent dat vanaf 2020 het reductiepotentieel van de optie 'Betonkernactivering' 0 kton CO₂/jaar is. Dit is ook de reden waarom het besparingspotentieel voor betonkernactivering gearceerd is.

Verder is het van groot belang om te relatieseren dat het reductiepotentieel is 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 3,7 miljoen ton, die berekend was voor het betonegebruik in 2010 (CE Delft, 2013a). 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.

⁵ kton staat voor kiloton; 1 kton = 1.000 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.



Zo is het mogelijk dat er van een alternatief bindersysteem minder of juist meer nodig is om een vergelijkbare performance te realiseren dan wanneer Portlandcementklinker gebruikt wordt.

3.3 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 kostprijen. 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.

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 is de optie ‘zelfhelend beton’ waarschijnlijk voor een groot aantal toepassingen aantrekkelijker dan blijkt uit de gemiddelde waarde voor de reductiekosten die gebruikt is in de kostencurve.
- 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 grondstof met lage CO₂-footprint voor beton of cement te gebruiken kan de waarde ook oplopen. In dat geval nemen de reductiekosten af.
- Bij betonkernactivering in woningen hangen de reductiekosten sterk af van de prijs van warmtepompen en WKO-systemen. De reductiekosten nemen zeer sterk af met afnemende kosten voor de prijs voor warmtepompen en WKO-systemen, dit verband is sterker dan linear door de NPV-berekening.

Voor de grondstoffen van beton zijn de marktprijzen 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 3.

Verekening van kosten en inkomsten over verschillende periode van de levensduur via de netto contante waarde (NCW) methode

Bij een aantal verduurzamingsopties komen kosten en baten op verschillende momenten in de levensduur van het beton. Om deze kosten en baten met elkaar te kunnen vergelijken worden alle bedragen Eruggerekend naar jaar 0 (het jaar dat het beton geproduceerd wordt).

Hiervoor wordt de netto contante waarde methode (NCW) ook wel net present value (NPV) genoemd.

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%.

Verder is als afschrijvingstermijn de economische levensduur van de verduurzamingsopties gehanteerd.

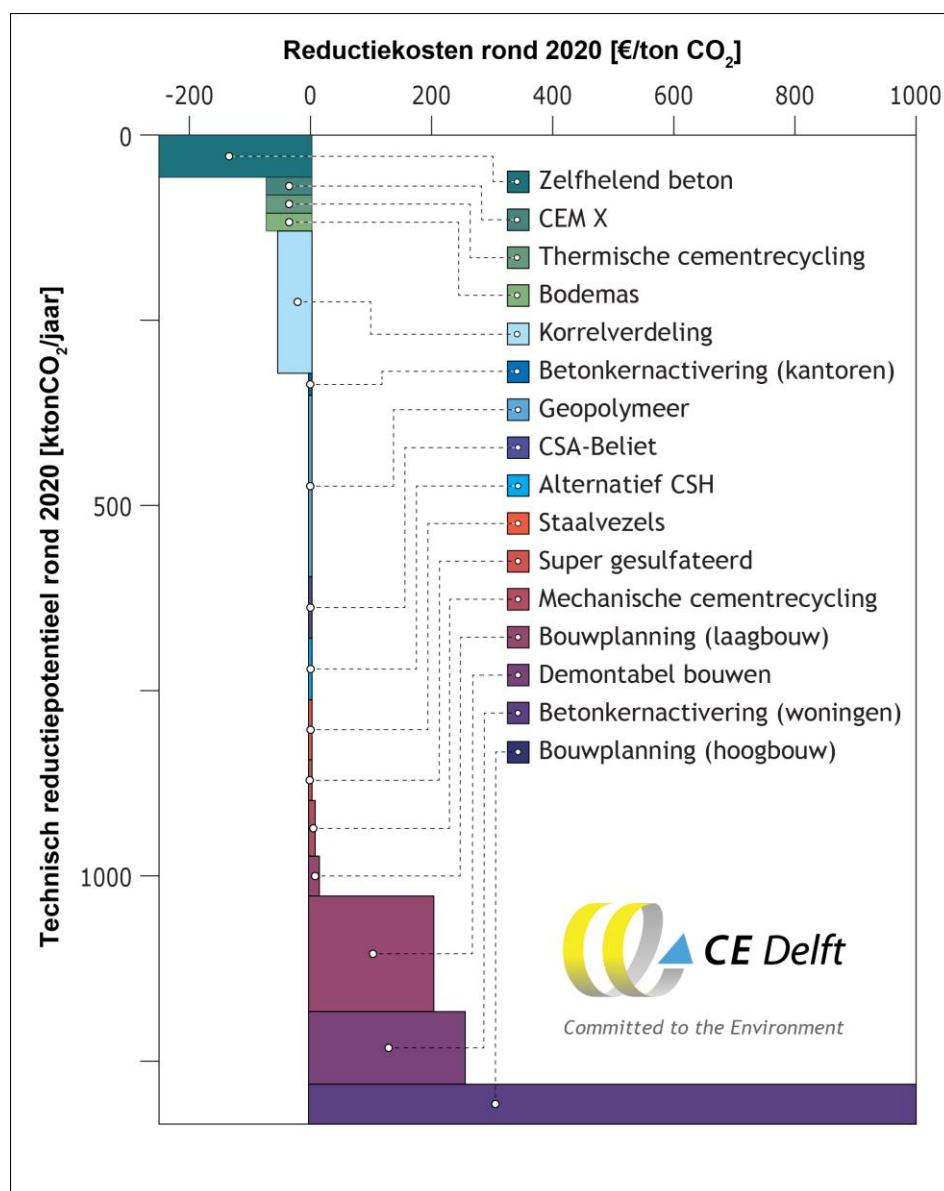
Meer informatie over de kostenberekeningen is weergegeven in de bijlagen.



4 Kostencurve

In dit hoofdstuk presenteren en analyseren we het CO₂-emissiereductie-potentieel van de geselecteerde verduurzamingsopties en de reductiekosten waarmee dit reductiepotentieel gepaard gaat. Het reductiepotentieel en de bijbehorende reductiekosten zijn weergegeven in een kostencurve, zie Figuur 3. Het CO₂-reductiepotentieel (op de y-as) en de CO₂-reductiekosten (op de x-as).

Figuur 3 Kostencurve verduurzamingsopties in de betonketen in Nederland (2020)



4.1 Omvang van het CO₂-reductiepotentieel

De drie opties met het hoogste reductiepotentieel zijn:

- geopolymeer, 245 kton CO₂-emissiereductie/jaar;
- korrelpakkingoptimalisatie 190 kton CO₂-emissiereductie/jaar;
- demontabel bouwen 155 kton CO₂-emissiereductie/jaar.

Hierbij kan opgemerkt worden dat het CO₂-emissiereductiepotentieel van deze verduurzamingsopties voor een klein gedeelte overlapt.

Als beton op basis van geopolymeer gemaakt wordt in plaats van op basis van Portlandcement dan kan er nog steeds bindmiddel uitgespaard worden door korrelpakkingoptimalisatie, alleen wordt er dan geopolymeer uitgespaard in plaats van Portlandcement. De CO₂-reductie is bij uitsparen van geopolymeer minder dan bij uitsparing van Portlandcement.

Als totaal CO₂-reductiepotentieel staat 1.335 kton CO₂/jaar genoemd = 1,3 miljoen ton).

Om de mate van overlap te kunnen bepalen is in kaart gebracht welke opties overlappen en hoe groot dat effect is, zie Bijlage F.

Hierbij onderscheiden we drie situaties:

1. Overlap is niet mogelijk. Bijvoorbeeld de energie besparing die door betonkernactivering gerealiseerd wordt, wordt niet significant beïnvloed door de samenstelling van het beton.
2. Overlap is onwaarschijnlijk voor 2030. Het is bijvoorbeeld onwaarschijnlijk dat voor 2030 grootschalig beton gesloopt wordt dat gemaakt is met geopolymeer.
3. Er is sprake van een beperkte mate van overlap als het volledige potentieel van de betreffende verduurzamingsopties allebei gerealiseerd wordt. De mate van overlap is weergegeven met een percentage. Dit percentage is berekend als de kans dat overlap optreedt maal het product van de mate waarin de beide opties de CO₂-emissie reduceren:
$$\% = \text{kans op overlap} \times \text{CO}_2\text{-reductie optie 1} \times \text{CO}_2\text{-reductie optie 2}$$

Op deze manier is berekend dat als alle opties hun volledige technische potentieel realiseren dat er dan een overlap optreedt van 205 kton CO₂-reductie.

Het totale reductiepotentieel gecorrigeerd voor overlap komt daarmee op 1,1 miljoen ton CO₂ (dit komt overeen met 31% van de footprint van de totale cement- en betonproductie in 2010 in Nederland).

4.2 Omvang van de reductiekosten

De vier verduurzamingsopties met het laagste CO₂-emissiereductiekosten (<0 €/ton CO₂) zijn:

- zelfhelend beton, gemiddeld -285 €/ton;
- CEM X/thermische cementrecycling /bodemas gemiddeld -75 €/ton;
- korrelpakking optimalisatie gemiddeld -55 €/ton.

Hierbij moet opgemerkt worden dat de berekening van de reductiekosten nog heel grove bepaling is die sterk varieert met de aannames die gedaan worden. Zo is zijn de reductiekosten voor het toepassen van zelfhelend beton op een plaat met een dikte van 90 cm die eenzijdig wordt blootgesteld aan de elementen berekend op € 660 per ton CO₂ die vermeden wordt.

Voor een pilaar met een diameter van 80 cm die rondom wordt blootgesteld zijn de reductiekosten negatief en brengt het geld op om deze technologie in te zetten. Volgens deze eerste indicatieve berekening € -1.230 per ton vermeden CO₂. Gemiddeld komt dit op € -285 per ton CO₂.



Verder is het belangrijk om te realiseren dat het reductiepotentieel van CEM X, thermische cementrecycling en bodemas volledig overlapt en daarom als één optie is weergegeven

Ondanks dat de verschillen in reductiekosten vrij groot lijken tussen deze opties raden we aan gezien de onzekerheid in de gebruikte data deze drie als één groep met negatieve reductiekosten te beschouwen en niet daarbinnen nog onderscheid te maken.

Daarna komt een grote groep verduurzamingsopties die allemaal rond de 0 €/ton uitkomen:

- betonkernactivering (kantoren);
- geopolymeer;
- CSA-Beliet;
- alternatief CSH;
- staalvezels;
- super gesulfateerd;
- mechanische cementrecycling;
- bouwplanning (laagbouw).

Verder zijn er de opties die een significante meerprijs hebben per ton vermeden CO₂-emissie:

- demontabel bouwen;
- betonkernactivering (woningen);
- bouwplanning (hoogbouw).

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

Daarom hebben we besloten de resultaten te tonen in combinatie met andere bekende voorbeelden om CO₂-emissies te verminderen.

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 4.

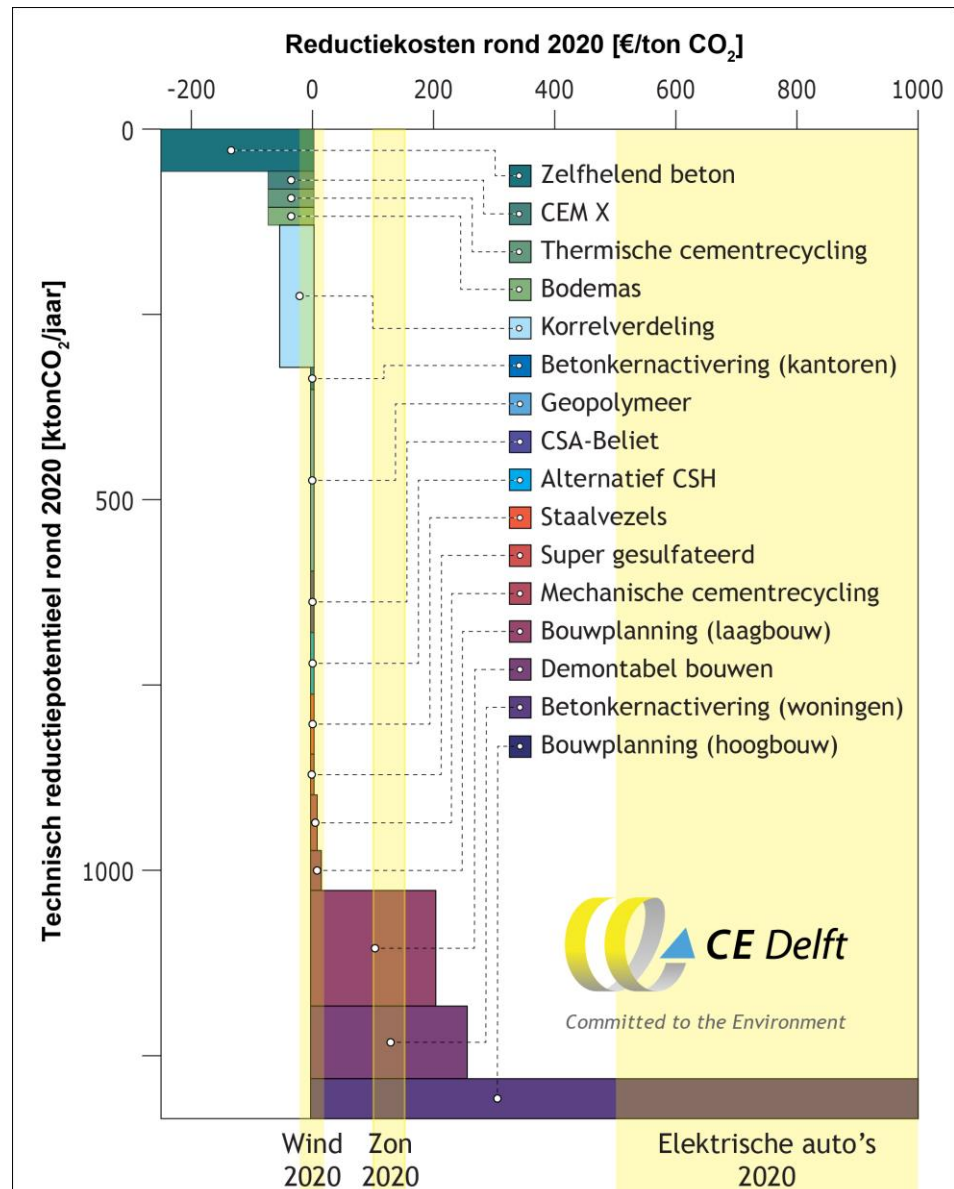
Deze vergelijking laat zien dat zelfs de duurdere opties reële reductiekosten kunnen zijn, mits ze op termijn voldoende reductiepotentieel bieden.

Verder geldt dat de opties die relatief lage reductiekosten hebben (maximaal even hoog als windturbines) beïnvloeden de opties elkaars reductiepotentieel negatief (er is een grote mate van overlap tussen de vier goedkoopste opties). Dat wil zeggen dat als het reductiepotentieel van de één wordt gerealiseerd,



er geen of veel minder reductiepotentieel van de andere opties overblijft. 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 opties demontabel bouwen of betonkernactivering uitwijzen dat voor deze opties ook sterke kostenreducties mogelijk zijn tussen nu en 2020.

Figuur 4 Kostencurve met referentie reductiekosten voor windenergie, zonne-energie en elektrische auto's in 2020



Een ander aspect is de CO₂-emissieprijs. Hierover is weinig met zekerheid te zeggen. Wat zeker is, is dat het Verenigd Koninkrijk per 1 april van 2014 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).

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.

4.3 Reductiepotentieel van 7 handelingsperspectieven

Inmiddels zijn door het MVO Netwerk Beton 7 handelingsperspectieven uitgekozen om de verduurzaming van het beton in Nederland te verduurzamen.

Deze 7 handelingsperspectieven zijn:

1. Innovatief geopolymeer.
2. CSA-B-cement.
3. Korrelpakking optimalisatie.
4. Smart concrete.
5. Betonkernactivering nieuwe stijl.
6. Innovatieve recyclingstechnologie.
7. Circulaire betoneconomie.

Figuur 5 geeft een grafische weergave van de 7 handelingsperspectieven.

Het Reductiepotentieel van deze 7 handelingsperspectieven is bepaald als de som van de verduurzamingsopties:

- geopolymeer;
- CSA-Beliet;
- korrelpakkingoptimalisatie;
- bouwplanning (hoog en laagbouw) als inschatting voor smart concrete;
- betonkernactivering voor woningen en kantoren;
- mechanische betonrecycling als innovatieve recyclingstechnologie;
- demontabel bouwen en zelfhelend beton als eerste benadering voor de circulaire betoneconomie.

Het totale reductiepotentieel komt daarmee op 1.043 kton CO₂ per jaar. Na correctie voor overlap op basis van de matrix in Bijlage F, is het gecorrigeerde reductiepotentieel 1 miljoen ton CO₂ per jaar (992 kton CO₂/jaar), dit komt overeen met 27% van de footprint van de totale cement- en betonproductie in 2010

Hierbij moet wel opgemerkt worden dat dit een moment opname is.

Eenzijds zijn er zaken waardoor het CO₂-reductiepotentieel afneemt. Zo gaat de CO₂-footprint reductie van betonkernactivering naar nul gaat vanaf 1 januari 2020, omdat dan alle gebouwen bijna energieneutraal gebouwd moeten worden (BENG-norm) en er dus geen besparingen ten opzicht van de bouwnorm mogelijk zijn. Dit betekent dat vanaf 2020 het reductiepotentieel van de optie 'Betonkernactivering' 0 ton CO₂ per jaar is.

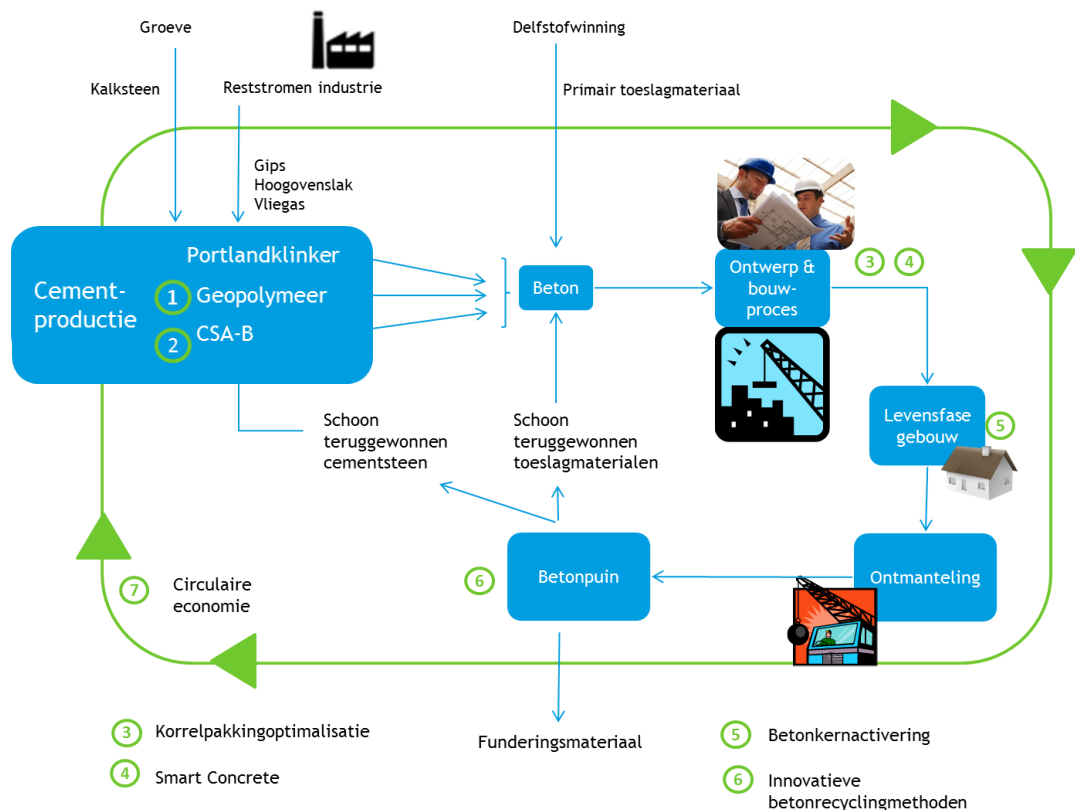
Anderzijds neemt het reductiepotentieel in de tijd waarschijnlijk toe vanwege de volgende aspecten:

- Het potentieel van met name geopolymeer en CSA-beliet is nog beperkt in 2020 omdat er eerst normeringsprocedures doorlopen moeten worden om de veiligheid aan te tonen voordat deze alternatieve bindmiddelen algemeen gebruikt kunnen worden.



- Daarnaast is voor de optie smart concrete alleen de besparing die door bouwplanning optimalisatie gerealiseerd zou kunnen worden in de woningbouw berekend. Andere opties van smart concrete zoals hoogwaardig rekenen, betere planning in andere bouwwerken zijn niet meegenomen.
- Verder is alleen een heel klein deel van de CO₂-productie die mogelijk is door het hergebruik van cementsteen als grondstof voor nieuw cement en beton berekend omdat alle andere mogelijke toepassingen nog te weinig data van bekend is. Voor de circulaire economie is alleen hergebruik van kanaalplaatvloeren en zelfhelend beton doorgerekend. Mogelijk blijkt het potentieel voor innovatieve betonrecyclingtechnologie en circulair betongebruik vele malen groter dan hier berekend.

Figuur 5 Grafische weergave zeven handelingsperspectieven



Belangrijk is nu dat de markt zich realiseert dat er een gigantisch milieuwinst gerealiseerd kan worden door dit reductiepotentieel te realiseren. Dit reductiepotentieel kan gerealiseerd worden als de hele keten samengewerkt. Duurzaam inkopen nieuwe stijl zou daarbij ingezet kunnen worden als een marktorganiserend mechanisme (CE Delft, 2014c).

4.4 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. Als we corrigeren voor de overlap in reductiepotentieel tussen de verschillende opties, dan komen we op een reductiepotentieel van 1,1 miljoen ton/jaar.

Dit komt neer op 31% van de voetafdruk van de betonketen (3,7 miljoen ton/jaar) (CE Delft, 2013a).

Als we ons beperken tot de verduurzamingsopties die een inschatting geven voor de 7 handelingsperspectieven die door het MVO Netwerk Beton gekozen zijn om de verduurzaming van betongebruik verder vorm te geven dan is het gecorrigeerde potentieel 1 miljoen ton CO₂ per jaar in 2020 dit komt overeen met 27% van de footprint van beton.

De verwachting is dat dit potentieel in de loop van de jaren verandert enerzijds doordat het CO₂-potentieel voor betonkernactivering vanaf 2020 afneemt tot nul.

Anderzijds doordat het bewezen potentieel van de andere opties sterk toeneemt doordat de toepasbaarheid vergroot wordt.

Er is nog een aanzienlijk potentieel voor vergroting van het besparingspotentieel omdat enerzijds een groot aantal zaken nog onvoldoende onderzocht zijn en anderzijds een aantal producten normprocedures moeten doorlopen om een veilige toepassing in dragende constructies te kunnen garanderen.





5 Conclusies en aanbeveling

De oorspronkelijke kostencurve is opgesteld om een overzichtelijke samenvatting te presenteren van het verduurzamingspotentieel en de bijbehorende kosten van de gekozen 16 verduurzamingsopties. Zodat het MVO Netwerk Beton weloverwogen en goed geïnformeerd 10 prioritaire handelingsperspectieven kan kiezen.

Inmiddels heeft het MVO Netwerk Beton haar keuze gemaakt en dient deze rapportage als onderbouwing van het reductiepotentieel en de reductiekosten van de 7 handelingsperspectieven die door het MVO Netwerk Beton gekozen zijn.

Op basis van het reductiepotentieel en de reductiekosten die voor ieder van de 16 verduurzamingsopties berekend is, is een kostencurve opgesteld, zie Figuur 3.

Centraal in de kostencurve staan het reductiepotentieel en de reductiekosten. Voor alle gepresenteerde getallen geldt dat in dit stadium de onzekerheidsmarge op het reductiepotentieel en de reductiekosten vrij groot is voor alle gepresenteerde opties.

5.1 Reductiepotentieel

Uit de figuur blijkt dat de som van alle reductiepotentiëlen 1,3 miljoen ton CO₂ per jaar bedraagt. Echter er is sprake van overlap van de reductiepotentiëlen. Hierdoor is het netto besparingspotentieel 1,1 mln ton CO₂ per jaar. Dat is nog steeds 31% van de CO₂-footprint van de totale Nederlandse betonproductie in het referentiejaar 2010 (CE Delft, 2013a).

Het Reductiepotentieel van deze 7 handelingen is bepaald als de som van de verduurzamingsopties:

- geopolymeer;
- CSA-Beliet;
- korrelpakkingoptimalisatie;
- bouwplanning (hoog en laagbouw) als inschatting voor smart concrete;
- betonkernactivering voor woningen en kantoren;
- mechanische betonrecycling als innovatieve recyclingstechnologie;
- demontabel bouwen en zelfhelend beton als eerste benadering voor de circulaire betoneconomie.

Het totale reductiepotentieel komt daarmee op 1.043 kton CO₂ per jaar. Na correctie voor overlap op basis van de matrix in Bijlage F, is het gecorrigeerde reductiepotentieel 1 miljoen ton CO₂ per jaar (992 kton CO₂/jaar), dit komt overeen met 27% van de footprint van de totale cement en betonproductie in 2010

Hierbij moet wel opgemerkt worden dat dit een moment opname is. De verwachting is dat dit potentieel in de loop van de jaren verandert enerzijds doordat het CO₂-potentieel voor betonkernactivering vanaf 2020 afneemt tot nul.



Anderzijds doordat het bewezen potentieel van de andere opties sterk toeneemt doordat de toepasbaarheid vergroot wordt.

5.2 Reductiekosten

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

De opties met geen of negatieve reductiekosten zijn:

- zelfhelend beton;
- CEM X/thermische cementrecycling/bodemass;
- korrelpakkingoptimalisatie;
- betonkernactivering (kantoren);
- geopolymeer;
- CSA-beliet;
- alternatief CSH;
- staalvezels;
- super gesulfateerd;
- mechanische cementrecycling;
- bouwplanning (laagbouw).

Vergelijking met de kosten van CO₂-emissiereductie door de inzet van windturbines op land laat zien dat de bovenstaande opties qua kosten concurrerend zijn.

Vergelijking met elektrische auto's laat zien dat ook de duurdere opties reeel kunnen zijn als het reductiepotentieel voldoende groot is en er zicht is op kostenreductie toe toekomstige technische ontwikkeling.

5.3 Duurzaam inkopen kan dit grote potentieel helpen onsluiten:

Er is een gigantisch potentieel beschikbaar en dat kan gerealiseerd worden als de hele keten samengewerkt. Duurzaam inkopen nieuwe stijl zou daarbij als een marktorganiserend mechanisme ingezet kunnen worden (CE Delft, 2014c).



Literatuur

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

CE Delft, 2013a

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

CE Delft, 2013b

Marit van Lieshout, Geert Warringa en Geert Bergsma
Prioritering handelings-perspectieven verduurzaming betonketen
Delft : CE Delft, 2013

CE Delft, 2014a

Marit van Lieshout en Geert Bergsma
Handelingsperspectieven verduurzaming betonsector, Resultaten van zeven werkgroepen van het MVO Netwerk Beton
Delft : CE Delft, 2014

CE Delft, 2014b

Marit van Lieshout
Update prioritering handelings-perspectieven verduurzaming betonketen:
Delft : CE Delft, 2014

CE Delft, 2014c

Marit van Lieshout en Geert Bergsma
Vorbereiding Green Deal Concreet 2.0, Gespreksagenda voor overleg tussen de Rijksoverheid en het MVO Netwerk Beton
Delft : CE Delft, 2014

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



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 korrelpakking 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 ENCI
12			'Celitement, een calcium-silicaat'	
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 ontlastingstijd	
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 ontlasting/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 2.

Tabel 2 Overzicht 16 verduurzamingsopties

Nr	Afkorting	Verduurzamingsoptie
1	Korrelpakking	Optimaliseren korrelpakking
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 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 2. 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 standaarddeviatie⁷ 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 3 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 opgaaf 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/civil. 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/civil.

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

In GWW/civil 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 standaarddeviatie is berekend omdat het om een te beperkt aantal gegevens ging om een normale verdeling te veronderstellen.



Bijlage B-1 Korreelpakking

Optimaliseren korreelpakking

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

Werkingsprincipe

Optimaliseren van de korreelpakking in beton biedt de mogelijkheid de sterkte van het beton te verhogen door de pakkingsdichtheid 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 4,4 €/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 0,7 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 opgaaf 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
Reductiekosten	-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 korreelpakking-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

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



B.2 CEM X

Verruimen toegestane grondstoffen voor cement binnen Europese norm

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

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, vliegashoudend, 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% Portlandcementklinker 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. De prijs van het CEM II en CEM V dat vervangen wordt is ingeschat op 82 €/ton cement (de prijs van Portlandcement CEM I 52,5 N in Tabel 3). 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	61-74	€/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 -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

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



B.3 CSA-beliet

Inzet calcium sulpho-aluminaat cementen

Reductiekosten CO ₂ -emissie:	0 €/ton
CO ₂ -emissiereductiepotentieel:	83.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Calcium sulpho-aluminaatcementen bieden een alternatief bindersysteem met een lagere CO₂-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 Portlandcementklinker 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 Heidelberg-cement (Dienemann e.a., 2013).

De CO₂-emissies zijn lager omdat er minder calcium carbonaat gedecarboniseerd⁸ 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% CO₂ per ton vergeleken met CEM I-cement, Heidelbergcement rapporteert circa 30% CO₂-reductie t.o.v. CEM I-cement.

Als er een decarbonisatievrije bron voor beliet wordt gevonden zou een veel grotere CO₂-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).

In Nederland wordt naast CEM I-cement ook veel hoogovencement gebruikt, waarin een gedeelte van het Portlandcementklinker vervangen is door met name hoogovenslak. De CO₂-footprint van hoogovencement is 35-90% lager dan de CO₂-footprint van CEM I (afhankelijk van het resterende aandeel Portlandcementklinker). Als het mogelijk is om het aandeel Portlandcementklinker te vervangen door CSA-Beliet klinker kan die CO₂-footprint met maximaal 30% verder verlaagd worden.

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 Portlandcementklinker 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 Portlandcementklinker in alle CEM I-toepassingen vervangen.

In Nederland werd in 2010 1.658 kton CEM I toegepast. Uitgaande van een gemiddelde CO₂-emissie van 0.88 ton CO₂/ton CEM I-cement (Bijlage D) en een CO₂-reductiepotentieel van 30% betekent dit dat het CO₂-emissiereductiepotentieel circa 438.000 ton/jaar bedraagt. Echter CEM I wordt voornamelijk in constructieve toepassingen. Voor constructieve toepassingen gelden strenge eisen voordat een nieuw product op de markt toegelaten wordt. Dit traject kan volgens de inschatting van de geraadpleegde experts in het meest gunstige geval voor woningbouw in 2020 gerealiseerd zijn (Bijlage D).

Op basis van de gegevens van de VOBN en de BFBN is berekend hoeveel CEM I in 2010 in de woningbouw gebruikt is: 314 kton CEM I. Dit betekent dat er in 2020 nog maar 314 kton CEM I vervangen kan worden dit komt neer op een CO₂-reductie van 83.000 ton CO₂/jaar.

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

Hoeveelheid CEM I in woningbouw in 2010	Betonmortel	Betonproducten
Hoeveelheid CEM I (kg/m ³)	59	199
Dichtheid beton (kg/m ³)	2.346	2.386
Totale betonproductie in 2010 (kton)	18.438	14.314
Totale betonproductie in 2010 (m ³)	7.859.335	5.999.162
Hoeveelheid CEM I in 2010 (kg)	463.700.767	1.193.833.194
Hoeveelheid CEM I in 2010 (kton)	464	1.194
Aandeel woningbouw	24%	17%
Totaal	314	kton CEM I

Berekening reductiepotentieel		Eenheid
CEM I-consumptie in woningbouw in 2010	314	kton/jaar
CO ₂ -reductie bij vervanging CEM I door CSA-Beliet	30%	TonCO ₂ /ton cement
CO ₂ -emissie CEM I	0,88	TonCO ₂ /ton cement
Reductiepotentieel	83.000	TonCO₂/jaar

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.



B.4 Supergesulfateerd

Inzet supergesulfateerde cementen

Reductiekosten CO ₂ -emissie:	0 €/ton
CO ₂ -emissiereductiepotentieel:	24.000-85.000 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/civil-toepassingen genoemd.

Het potentieel van toepassing ligt volgens de geraadpleegde experts voornamelijk in betonmortel voor GWW/civil-toepassingen. Vanwege normgeving wordt verwacht dat in 2020 het technisch haalbaar is om in 2020 30% van dit potentieel supergesulfateerde cementen toe te passen (Bijlage D). Het totale potentieel van betonmortel in civil GWW toepassingen is 995.000 m³ beton/jaar (CE Delft, 2013a; 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, 2013a; p33).

Hiermee komt het CO₂-emissiereductiepotentieel op 24.000-85.000 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 (tov CEM I)	90-95%	%
Betonmortel gebruik in GWW/civil/agrarisch/overig	995.000	m ³ /jaar
Aandeel dat in 2020 vervangen mag worden	30	%
CO ₂ -emissie betonmortel	0,09-0,3	Ton CO ₂ /m ³ beton
CO ₂ -emissiereductiepotentieel	24.000-85.000	Ton CO ₂ /jaar

Literatuur/bronnen

CE Delft, 2013a

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

Greenthinker, 2013

Persbericht van Holcim over Cemroc op Greenthinker network site:

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



B.5 Alternatief CSH

Inzet alternatief CSH-cement

Reductiekosten CO₂-emissie:

0 €/ton

CO₂-emissiereductiepotentieel:

83.000 ton/jaar

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 calcium-silicaathydraten. 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, 2013a) 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, 2013a; 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.

Echter net als voor CSA-Belietcement geldt dat het om en geheel nieuw type cement gaat dat eerst via strenge toelatingsprocedures moet aantonen dat het gebruik van dit type cementvervanger op de lange termijn veilig is.

Daarom zal dit type cement in 2020 in het meest gunstige geval alleen in woningbouw toegepast kunnen worden ter vervanign van CEM I (bij vervanging van CEM III is er geen of slechts in zeer beperkte mate sprake van CO₂-besparing). Het reductiepontieel is daarmee gelijk aan dat van CSA-B, zie Bijlage B.3.

Literatuur/bronnen

CE Delft, 2013a

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

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



B.6 Geopolymeer

Inzet alkalisch geactiveerde materialen als cement

Reductiekosten CO₂-emissie: 0 €/ton

CO₂-emissiereductiepotentieel: 199.000-292.000 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.

Bij het proces op basis van omgevingstemperatuur is de CO₂-reductie ingeschat op 80% in vergelijking met CEM I cement (Bijlage D).

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 67-76% vergeleken met CEM I.

Voor alle methoden geldt dat normprocedures doorlopen moeten worden om de veiligheid van deze alternatieve bindmiddelen aan te tonen. Aangezien de procedures voor niet-constructieve toepassingen relatief eenvoudig zijn, wordt verwacht dat geopolymeer in eerste instantie toegepast wordt in betonproducten voor niet-constructieve toepassingen. In deze toepassingen concurreert het gedeeltelijk met Portlandcement en gedeeltelijk met hoogovencementen die al een veel lagere CO₂-footprint dan Portlandcement hebben.



Reductiekosten

De kosten worden voor de productie van geopolymeer worden circa 20% lager ingeschat dan voor de productie van Portlandcementklinker (Bijlage D). Echter zoals aangegeven is de verwachting dat in de toepassing van niet-constructief beton het geopolymeer met name concurreert met hoogovencement (CEM III/A en CEM III/B). Uitgaande van de opgegeven prijzen voor CEM I en CEM III betekent dit dat het prijsverschil 0 is.

Daarnaast is het niet zeker of in alle toepassingen Portlandcement door een even grote hoeveelheid geopolymeer vervangen kan worden, mogelijk is in sommige toepassingen meer geopolymeer nodig.

Daarmee komen de reductiekosten voor geopolymeer op 0 €/ton.

Reductiepotentieel

Er zijn verschillende kwaliteiten geopolymeer. De verwachting is dat geopolymereen ook met CEM I-kwaliteit cement kunnen concurreren. Waarbij de kanttekening gezet wordt dat, door de manier van produceren, er geen ongebluste kalk vrij beschikbaar is in het beton dat op basis van geopolymeer bereidt wordt. Dit betekent dat een wapening in beton op basis van geopolymeer mogelijk minder goed beschermd wordt tegen zuren die de wapening kan aantasten. Deze lagere buffer tegen zuren wordt een lagere alkaliteit genoemd.

Voor de toepassing rond 2020 is dit niet relevant omdat in verband met de toelatingseisen die aan bindmiddelen gesteld worden in eerste instantie toepassingen op de markt voor niet constructieve betonproducten gezocht worden. Deze toepassingen kennen geen wapening.

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

Daarom berekenen we eerst de CO₂-reductie die nu veroorzaakt wordt door de productie van niet constructieve betonproducten.

Volgens opgaaf van de BFBN werd in 2010 2,856 miljoen m³ beton gegruikt voor de productie van niet constructieve betonproducten.

Het aandeel Portlandcement (OPC) was 120 kg/m³ beton en de CO₂-footprint van het CEM I bedroeg gemiddeld 0,818 kg CO₂/kg cement.

Het aandeel hoogovencement was 180 kg/m³ beton en de CO₂-footprint van het hoogovencement bedroeg gemiddeld 0,296 kg CO₂/kg cement.

2010	BFBN	
Totaal GWW betonproducten	betonproducten	
Niet constructief	2,856	mln m ³ beton
aandeel Portlandcement	120	kg CEM I/m ³ beton
aandeel hoogovencement	180	kg CEM III/m ³ beton
totaal Portlandcement	343	kton CEM I
totaal hoogovencement	514	kton CEM III
CO ₂ -emissie Portlandcement	0,818	ton CO ₂ /ton cement
CO ₂ -emissie hoogovencement	0,296	ton CO ₂ /ton cement
totaal Portlandcement	280	kton CO ₂
totaal hoogovencement	152	kton CO ₂

Hiermee kwam de totale CO₂-footprint van betonproducten in 2010 op 433 kton. Afhankelijk van de soort geopolymeer is de volgende CO₂-reductie mogelijk.



Vervanging van de hoogovencementen door geopolymeer, maakt een reductie van 8-45% mogelijk. Dit komt overeen met 12-68 kton CO₂-reductie per jaar. Vervanging van het Portlandcement door geopolymeer een reductie van 67-80% mogelijk. Dit komt overeen met 187-224 kton CO₂-reductie per jaar. In totaal is het CO₂-reductiepotentieel van de inzet van geopolymeer in niet-constructieve betonproducten 199-292 kton CO₂ per jaar.

Literatuur/bronnen

ASCEM, 2013

Telefonische toelichting door Anja Buchwald deputy director van ASCEM BV

CE Delft, 2013a

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

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



B.7 Demontabel bouwen

Bouwen met demontabele standaard eenheden

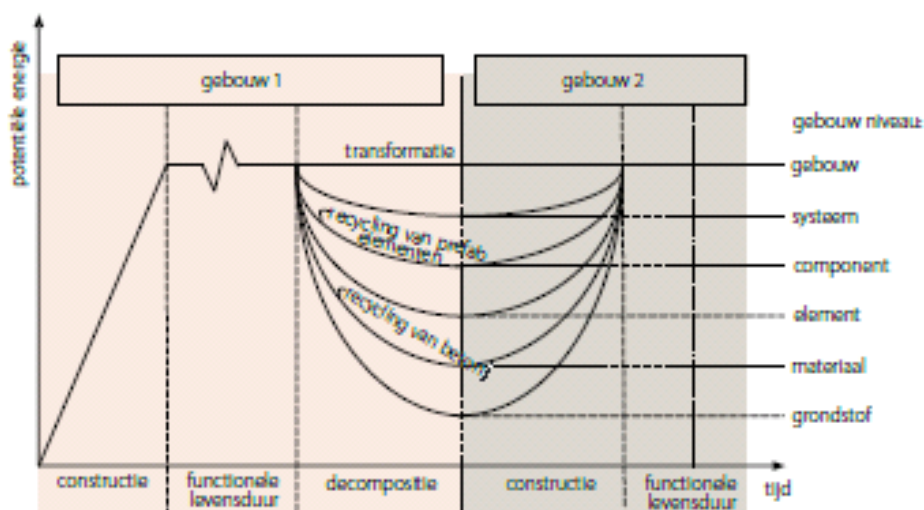
Reductiekosten CO₂-emissie: 131-267 €/ton

CO₂-emissiereductiepotentieel: 76.000-235.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Bij de huidige manier van het slopen van gebouwen en betonnen constructies, wordt de betonnen hoofddraagconstructie 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 grotendeels bepaald door de productie van cement. Het levert meer milieuwinst op wanneer er een stap hoger op de afval-preventieladder kan worden gezet en ook de betonnen hoofddraagconstructie kan worden hergebruikt.

Figuur 6 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 kosten van deze optie bestaan uit de volgende aspecten (Naber, 2012):

- vrijmaken van de vloer uit bestaand gebouw: € 31,60/m² kanaalplaatvloer;
- opslag voor een jaar: € 2,60/m² vloer;
- 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 € 42,64/m² vloer voor een eengezinswoning en € 60,57/m² vloer voor appartementen. Daarmee wordt een vloer van € 35/m² in woonhuizen en € 45/m² in appartementen mee uitgespaard.

De inschatting van de onzekerheid op deze berekeningen is ca. 20%.

Hiermee komen de reductiekosten op 6-19 €/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 131 en 267 €/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	
Vrijmaken van vloer uit gebouw	31,6	31,6	€/m ²
Opslag voor een jaar	2,6	2,6	€/m ²
Leggen van de hergebruikte vloer	7,65	15,6	€/m ²
Uitgespaarde nieuwe vloer	-35,00	-45,00	€/m ²
Onzekerheidsmarge op inschatting meerkosten	20%	20%	%
Ondergrens meerkosten	6,11	12,46	€/m ²
Bovengrens meerkosten	9,17	18,68	€/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)	152,8	131	€/ton CO ₂
Reductiekosten (hoog)	229	267	€/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 gietbetonvloer 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 VOB 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

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



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 hoofddraagconstructie 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 Portlandcementklinker of CSA-beliët.

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 alfabakwars 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 alfabakwarts 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 decarbonisatievrije grondstof⁹ te verkrijgen.

Inzet van de cementfractie als decarbonisatievrije grondstof bespaart 0,5 ton CO₂ per ton Portlandcementklinker (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. De CO₂-reductie in deze proef was minder dan 0,5 ton CO₂ per ton fijne fractie door het hoge aandeel alfabakwarts in deze fractie.

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 reductiekosten 6 €/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 Portlandcementklinker
Additionele kostenselectieve milling circuit	3	€/ton beton
Reductiekosten	6	€/ton CO ₂

Reductiekosten slim breken

Uit laboratoriumproeven bleek het maximumaandeel alfabakwarts 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.

⁹ De betekens van decarbonisatie en decarbonisatie vrije grondstof wordt in Bijlage C uitgelegd.



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, 2013a). Op basis van opgaaf van VOB en BFB is het gemiddelde aandeel cement in beton berekend op 14% en het gemiddelde aandeel Portlandcementklinker op 7%. In het volgende overzicht staan de benodigde gegevens om deze inschatting te valideren.

Berekening aandeel Portlandcementklinker in cement	Waarde	Eenheid
Aandeel CEM I in beton (Tabel 4 uit CE Delft, 2013a)	120	kg/m ³
Aandeel Portlandcementklinker in CEM I	95	%
Aandeel CEM III in beton (Tabel 4 uit CE Delft, 2013a)	196	kg/m ³
Aandeel Portlandcementklinker in CEM III	25	%
Totaal	2334	kg/m ³
Aandeel cement	14	%
Aandeel Portlandcementklinker	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 Portlandcementklinker (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 Portlandcementklinker
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 Portlandcementklinker 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 Portlandcementklinker 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% alfabakwarts 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% alfabakwarts 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 Portlandcement
Reductiepotentieel	90.000	ton CO ₂ /jaar

Literatuur/bronnen

CE Delft, 2013a

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

TU Delft, 2013

Modeling 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



B.9 Thermische cementrecycling

Thermische cementrecycling via kringbouw

Reductiekosten CO₂-emissie: -106 à -41 €/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 afval-preventieladder kan worden gezet en de cementfractie kan worden hergebruikt.

Een manier om dat te doen is via thermisch recycleren 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 cement-skelet ontleedt 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 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 vliegash 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 vliegash als vulstof met bindcapaciteit. Hiermee zijn de reductiekosten vergelijkbaar met de inzet van vliegash in CEMX: -106 à -41 €/ton (zie B.2).

Reductiepotentieel

Reductiepotentieel is meer inzet als vulstof met bindcapaciteit. Dit potentieel is vergelijkbaar met het potentieel van CEM X: 22.000-26.000 ton/jaar, zie B.2.



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



B.10 Bodemas

Inzet bodemas als vulstof met bindcapaciteit

Reductiekosten CO₂-emissie: -124 à -62 €/ton CO₂

CO₂-emissiereductiepotentieel: 22.000-26.000 ton/jaar

Werkingsprincipe

Afvalenergiecentrales (AEC) produceren uit afvalstromen energie.

Daarbij komen naast elektriciteit en warmte ook rookgassen, vliegashouders en bodemassen bij vrij. Vliegashouders 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 (Betonek, 2013).
2. Als vulstof met bindcapaciteit in combinatie met vliegashouders ter vervanging van 50% van het CEM I-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 uitlogen (Betonek, 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 vliegashouders in CEM X. Dit betekent dat het CO₂-reductiepotentieel vergelijkbaar is met de inzet van CEM X.

Aangezien bodemas net als vliegashouders vrijkomt bij het opwekken van energie uit afval, zijn de reductiekosten vergelijkbaar met de inzet van vliegashouders in CEM X: -106 à -41 €/ton (zie B.2).

Reductiepotentieel

Reductiepotentieel is meer inzet als vulstof met bindcapaciteit.

Dit potentieel is vergelijkbaar met het potentieel van CEM X: 22.000 - 26.000 ton/jaar, zie B.2.



Literatuur/bronnen

Betoniek, 2013

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

CE Delft, 2013a

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

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



B.11 Staalvezels

Inzet staalvezels in plaats van traditionele wapening in gietbeton

Reductiekosten CO₂-emissie: 0 €/ton

CO₂-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

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



B.12 Bouwplanning

Langere uithardingstijd gietbeton door bouwplanning

Reductiekosten CO₂-emissie: -75 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 halen¹⁰. 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.

¹⁰ 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 -75 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	-75 - +68	-14 - +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, 2013a 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

Literatuur/bronnen

Bijlage E

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

CBS, 2013a

CBS Staline

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, 2013a

Marijn Bijleveld, Geert Bergsma en Marit van Lieshout

Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw

Delft : CE Delft, 2013a

Heijmans, 2013

Telefonisch overleg met Theo Smits, Adviseur Energie en Duurzaamheid

Vastgoed en Woningbouw bij Heijmans Vastgoed en Woningbouw



B.15 Zelfhelend beton

Zelfhelend beton met calciumcarbonaat producerende bacteriën

Levensduur 50 jaar (geen levensduurverlenging)

Reductiekosten CO₂-emissie: -8.000 à 6.900 €/ton

CO₂-emissiereductiepotentieel 2.700 à 12.300 ton/jaar

Met levensduur verlenging van 20%, levensduur 120 jaar

Reductiekosten CO₂-emissie: -1.230 à 660 €/ton¹¹

CO₂-emissiereductiepotentieel: 24.700 à 90.240 ton/jaar

Werkingsprincipe

Wetenschapper Henk Jonkers heeft de Delft Design & Engineering Award ontvangen voor zijn ontwerp voor zelfhelend beton. In het beton leven alkalifielebacteriën¹² 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 test-resultaten verwachten de onderzoekers dat het beton circa 20% langer meegaat en circa 30% minder reparaties nodig heeft (Jonkers, 2013).

Algemene aspecten van de berekening:

Deze berekening heeft twee uitgangspunten:

1. De variatie van het belang van de technische levensduur van het beton.
2. De variatie in de mate waarin het beton bloot staat aan de elementen.

De technische levensduur van normaal beton is 100 jaar door het toepassen van de zelfhelend beton wordt de technische levensduur van het beton met 20% verlengd tot 120 jaar. Mits de technische levensduur bepalend is voor het vervangen van de bestaande constructie, betekent een 20% langere levensduur een 20% reductie van de CO₂-emissie voor de productie van het beton

Aangezien in veel gevallen de levensduur van het beton korter is dan de technische levensduur zijn alle berekeningen gedaan voor twee verschillende levensduren van het beton:

- een levensduur van 50 jaar waarbij de levensduur door andere factoren dan de technische levensduur van het beton beperkt wordt;
- een levensduur van 120 jaar waarbij de technische levensduur, bepalend is voor de levensduur van het beton en de levensduur door toepassen van zelfhelend beton 20% verlengd is.

In normaal beton de buitenzijde van het beton eens in de 10 jaar gecoat worden, door het toepassen van zelfhelend beton aan het begin van de levensduur is dat niet meer nodig.

Omdat de verhouding van de buitenzijde tov het volume van het beton sterk kan verschillen, hebben we dit doorgerekend voor twee sterk verschillende soorten geometrien waarin het beton gebruikt wordt: pilaren die rondom blootstaan aan weersinvloeden of oppervlakten die eenzijdig beschermd

¹¹ In deze reductiekosten zijn nog geen bereikbaarheidskosten meegenomen. Die zouden het aandeel negatieve of kosten neutrale situaties sterk doen oplopen.

¹² 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.



moeten worden. Het bepalende kenmerk is de oppervlakte volume verhouding van de betreffende geometrie.

Om representatieve verhoudingen te bepalen zijn de afmetingen van pijlers en een deklaag van een voorbeeld viaduct uit het Stutech /Stufib rapport 30/34 genomen. Dit viaduct heeft pijlers met een diameter van 800 mm en een dekdikte van 0,9 meter.

Dit betekent dat in het geval van de pijlers de oppervlakte volume verhouding $5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ bedraagt en bij de deklaag $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Reductiepotentieel

Er zijn twee manieren waarop CO₂ uitgespaard wordt:

1. Regulier beton dat bloot staat aan de elementen moet één maal in de 10 jaar gecoat worden. Bij zelfhelend beton is naar verwachting geen coating meer nodig. Dat betekent dat de CO₂-emissies van het vervoer naar de plek waar gecoat moet worden en van de productie van nieuwe coating en de verwijdering van oude coating uitgespaard worden.
2. Als de technische levensduur van het beton de beperking is van de levensduur van de constructie dan zorgt de 20% langere levensduur voor CO₂-besparing.

Reductiepotentieel door overbodig worden coating

Over het aanbrengen van de coating was zeer weinig informatie over beschikbaar. Om toch een inschatting van dit effect te kunnen maken zijn een aantal aannames gemaakt.

- De CO₂-emissie voor de productie van de coating is vergelijkbaar met de CO₂-emissie van een 65% vaste stof acrylemulsie zonder water (Ecoinventdatabese3). Dit komt overeen met 2,7 kg CO₂ per kilogram coating.
- De onderlaag van het beton is van een dusdanige kwaliteit dat eenmalig coaten met 0,25 liter/m² afdoende is
- De CO₂-emissie voor het verwijderen van de oude coating voordat de nieuwe coating aangebracht kan worden is onbekend, we nemen aan dat dit 10% is van de CO₂-emissie van de coatingproductie.
- De coating moet 11 maal aangebracht worden en 10 maal verwijderd worden over de levensduur van 120 jaar van het beton en 4 maal aangebracht en 3 maal verwijderd worden over een levensduur van 50 jaar. De uitstoot van het verwijderen is op 10% van het aanbrengen van de coating geschat.
- Eén persoon kan in één dag 160 m² coaten en moet daar in totaal 70 kilometer voor afleggen
- De uitstoot van het personenvervoer is berekend op basis van reizigers kilometers¹³. Er zijn geen officiële cijfers bekend over hoe de reizigers kilometers zich ontwikkelen in de komende 120 jaar daarom is een expert inschatting gemaakt waarin de reizigers kilometer afneemt van gemiddeld 0.12 kg CO₂/km in 2025 naar gemiddeld 0.01 kg CO₂/km in 2085, om daarna constant te blijven.

Op basis van de bovenstaande aannames is het aanbrengen en verwijderen van de coating ingeschat voor een levensduur van 50 jaar en voor een levensduur van 120 jaar (20% verlenging van de technische levensduur)

¹³ We maken onderscheid tussen de uitstoot van een auto en de uitstoot van een reiziger in een auto. De uitstoot door auto's is hoger omdat reizigers soms carpoolen.



Situatie	CO ₂ -emissie-reductie (kton)
Levensduur 50 jaar	
Uitsparen van aanbrengen en verwijderen coating voor 1 m ² /m ³	2,7
Uitsparen van aanbrengen en verwijderen coating voor 5 m ² /m ³	12,3
Levensduur 120 jaar	
Uitsparen van aanbrengen en verwijderen coating voor 1 m ² /m ³	6,8
Uitsparen van aanbrengen en verwijderen coating voor 5 m ² /m ³	30,5

Reductiepotentieel door levensduurverlenging

De inzet van beton in GWW/civieltoepassingen bedroeg in 2010 0,995 miljoen m³ beton (CE Delft, 2013a). De CO₂-emissie van beton (exclusief staal) varieert tussen 0,09 en 0,3 ton CO₂/m³beton. Daarmee komt het reductiepotentieel op 17,9-59,7 kton/jaar afhankelijk van het aandeel Portlandcement dat gebruikt is in het beton.

In het volgende overzicht staan het reductiepotentieel door de levensduurverlenging 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	17.910-59.700	ton/jaar

Totale reductiepotentieel met en zonder levensduurverlenging

Op basis van de bovenstaande situatie kan het totale reductiepotentieel voor deze optie berekend worden voor de situatie waarin het beton korter gebruikt wordt dan de technische levensduur (levensduur van 50 jaar, dus zonder levensduurverlengend effect) en voor de situatie waarin de technische levensduur bepalend is voor het tijdstip waarop de constructie vervangen wordt (levensduur 120 jaar).

Reductiepotentieel	CO ₂ -emissie-reductie (kton)
Levensduur 50 jaar, geen levensduurverlenging beton	2,7-12,3
Levensduur 120 jaar	
Uitsparen van aanbrengen en verwijderen coating	6,8-30,5
Verlenging levensduur met 20%	17,9-59,7
Totaal reductiepotentieel bij levensduur van 120 jaar	24,7-90,2

Daarmee komt het reductiepotentieel bij een levensduur van 50 jaar op 2,7-12,3 kton CO₂ per jaar afhankelijk van hoeveel gecoat oppervlakte per volume eenheid beton.

Voor de situatie waarin de technische levensduur van het beton bepalend is neemt dit toe tot 25-90 kton CO₂ per jaar.



Reductiekosten

Voor het bepalen van de reductiekosten is het van belang dat de kosten die op de verschillende momenten over de levensduur gemaakt worden met elkaar vergeleken kunnen worden.

Volgens opgave van de onderzoeker (Jonkers, 2013) is het beton bij productie 52,5 €/m³ 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. Hoeveel meer is niet aangegeven dus we gaan uit van 1,5 keer zoveel (27 €/m²). 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 de nu gepresenteerde reductiekosten een zeer voorzichtige inschatting. Zodra kosten voor bereikbaarheid meegerekend worden, worden de reductiekosten van deze optie nog een stuk gunstiger. Helaas was onvoldoende informatie beschikbaar om dit aspect in de berekening mee te nemen.

Bij een 20% levensduur verlenging staat daar ook uitgespaarde kosten door het verlaten van de investering tegenover.

Om deze kosten en baten op verschillende momenten in de tijd te kunnen vergelijken gebruiken we de Net Present Value (NPV)¹⁴, in het Nederlands ook wel Netto Contante Waarde (NCW) genoemd.

Voor de berekening van de NPV gaan we uit van een discontovoet van 5,5%.

Levensduur 50 jaar

Bij een levensduur van 50 jaar wordt de NPV van de initiele investering van 52,5 €/m³ beton 101 €/m³ beton.

De NPV van de uitgespaarde kosten van het coaten komen op €34 per m³ beton bij 1 m²/m³ beton en op €151 per m³ beton bij 5 m²/m³ beton (bijkomende kosten voor wegafzettingen niet meegerekend!).

Het totale reductiepotentieel bij een levensduur van 50 jaar is berekend op 2,7-12,3 kton CO₂. Daarmee komen de reductiekosten bij een levensduur van 50 jaar op 24.753 €/ton CO₂ bij een constructie die relatief weinig coating nodig heeft (1 m²/m³) en op negatieve reductiekosten van -4.040 €/ton CO₂ voor een constructie die meer coating nodig heeft (5 m²/m³).

Oppervlakte met coating /m ³ beton	1	5	m ² /m ³
Kosten voor het zelfhelend maken van het beton	€ -52,50	€ -52,50	
Uitgespaarde kostencoating over 50 jaar (NPV)	€ 33,60	€ 151,19	€/m ³ beton
Reductiepotentieel	2,7	12,3	kton CO ₂
Reductiekosten bij levensduur 50 jaar	€ 6.902	€ -8.007	€/ton CO ₂

Levensduur 120 jaar

Bij een levensduur van 120 jaar wordt de NPV e NPV van de uitgespaarde kosten van het coaten komen op €36 per m³ beton bij 1 m²/m³ beton en op € 164 per m³ beton bij 5 m²/m³ beton (bijkomende kosten voor wegafzettingen niet meegerekend!).

¹⁴ Door de NPV te berekenen wordt in feite de huidige waarde van toekomstige kasstromen vastgesteld, het zogenaamde actualiseren. Op deze wijze is het mogelijk om te bepalen of er meerwaarde kan worden gecreëerd door nu een bepaalde investering te doen. Met andere woorden: levert de investering wel voldoende rendement op?



De investering in het beton in jaar 0 is altijd hetzelfde omdat we het jaar 0 als referentie hebben genomen. Maar de investeringen die later moeten worden gedaan worden wel steeds lager gewaardeerd. Daarom berekenen of er nog een kostenreducerend effect is van de levensduurverlenging van 20%.

De NPV voor de investering in nieuw beton is over 100 jaar € 0,33 per m³ CEM III/B en € 0,41 per m³ CEM I. Over 120 jaar is dat afgenomen tot respectievelijk € 0,11 per m³ en € 0,14 per m³. Het verschil zijn de uitgespaarde cementkosten door 20% levensduur verlenging. Dit toont aan dat bij lange levensduren zoals gebruikelijk bij beton, verlenging van de levensduur niet tot een significante kostenreductie leidt in de huidige financieringsystemen.

Oppervlakte met coating /m ³ beton	1	5	m ² /m ³
Kosten voor het zelfhelend maken van het beton	€ -52,50	€ -52,50	
Uitgespaarde kostencoating	€ 35,93	€ 163,99	€/m ³ beton
Uitgespaarde kosten betonproductie (NPV)	€ 0,22	€ 0,27	€/m ³ beton
Totaal uitgespaarde kosten	€ 36,14	€ 164,26	€/m ³ beton
Totaal reductiepotentieel	24,7	90,2	kton CO ₂
Reductiekosten bij levensduur 120 jaar	€ 659	€ -1229	€/ton CO ₂

Het totale reductiepotentieel bij een levensduur van 120 jaar is berekend op 24,7-90,2 kton CO₂. Daarmee komen de reductiekosten bij een levensduur van 120 jaar op 660 €/ton CO₂ bij een constructie die relatief weinig coating nodig heeft (1 m²/m³) en op negatieve reductiekosten van -1.230 €/ton CO₂ voor een constructie die meer coating nodig heeft (5 m²/m³).

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/

Stutech/Stufib, 2013

Stutech/Stufib-rapport 30/34 Duurzaamheid als ontwerpcriterium voor beton-toegespitst op CO₂. Rapport van Stufib/Stutech studiecél 61/23 in concept versie ter beschikking gesteld.



B.16 Betonkernactivering

Woningen

Reductiekosten CO ₂ -emissie:	351 €/ton
CO ₂ -emissiereductiepotentieel:	98.400 ton/jaar ¹⁵

Kantoren:

Reductiekosten CO ₂ -emissie:	0 €/ton
CO ₂ -emissiereductiepotentieel:	29.600 ton/jaar ¹⁶

Werkingsprincipe

Bij betonkernactivering wordt de warmtecapaciteit ingezet om een gebouw op een gewenste temperatuur te brengen en te houden. Een betonnen constructie heeft een hoge warmtecapaciteit. In dit rapport beschouwen we betonkernactivering als de situatie waarin het ontwerp van een gebouw maximaal is ingericht om deze warmtecapaciteit te benutten voor regeling van de temperatuur. In dat geval zorgt 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 zeer lage temperatuurverwarming en relatief warme koeling. Hierdoor is het optimaal geschikt voor combinatie met een warmtepomp.

Vanaf 2015 is voor nieuwbouw woningen een maximale EPC = 0,4 toegestaan, voor kantoren is dit EPC=0,8.

Alleen gebouwen die beter presteren dan deze norm (in meer detail uitgewerkt in de Aanscherpingsstudie EPC woningbouw en utiliteitsbouw 2015 (W/E Adviseurs, 2013)) kunnen een CO₂-besparing claimen.

Vanaf 2020 moet alle nieuwbouw bijna energieneutraal zijn (BENG-norm).

Hierdoor is er vanaf 2020 geen energiebesparing meer te claimen door betonkernactivering omdat alle gebouwen dan een dusdanig laag energieverbruik moeten hebben dat besparingen die verder gaan dan de norm niet meer mogelijk zijn.

Kantoren

Voor kantoren is een situatie doorgerekend waarin de enige variabele het wel of niet inzetten van de warmtecapaciteit van het beton was.

Kentallen voor berekening aan Kantoren

	Waarde	Eenheid
Elektriciteit	0,0613	kgCO ₂ /MJ prim
Energieinhoud gas	35,10	MJ/m ³
Omrekenen kwh/Mjprim	0,108	kWh/MJ
Prijs gas	0,64	€/m ³
	0,022	€/MJp gas
Prijs elek	0,137	€/kWh
	0,015	€/MJp elektr

¹⁵ Tussen 2015 en 2020 daarna stop het.

¹⁶ Tussen 2015 en 2020 daarna stop het.



Reductiepotentieel Kantoren

Om het reductiepotentieel voor kantoren te kunnen berekenen is in de Aanscherpingsstudie EPC woningbouw en utiliteitsbouw 2015 (W/E Adviseurs, 2013) opgezocht wat het energieverbruik is van een middelgroot kantoor (4.800 m²) bij EPC=0,8 (De EPC waarde die vanaf 1 januari 2015 van toepassing is op kantoren).

Deze informatie is gecombineerd met informatie over het energiegebruik in kantoren voor een traditioneel kantoor en voor hetzelfde kantoor waarin voor verwarming, koeling en ventilatie optimaal gebruik is gemaakt van de betonconstructie (Consolis, 2014).

Daarmee komen we op het volgende energieverbruik:

Rc=5	Betonkernactivering	Traditioneel
Raamoppervlakte 20%	MJ/m ²	MJ/m ²
Primair tot	222	260
Verwarming (aardgas)	13	17
Tap (aardgas)	19	19
Koel (elektrisch)	21	55
Verlichting (elektrisch)	169	169

Op basis van de bovenstaande gegevens is berekend dat het besparingspotentieel per vierkante meter kantoor 2,3 kg CO₂/m² per jaar bedraagt.

Uitgaande van een levensduur van 20 jaar en 645.645 m² (bvo) toevoeging aan het kantooroppervlak in 2010 (NEPROM, 2013) komt dat overeen met een reductiepotentieel van 29 kton CO₂ per jaar in Nederland.

Reductiekosten kantoren

De reductiekosten van CO₂ door het toepassen van betonkernactivering in de kantoren zoals berekend bij het reductiepotentieel vergt geen extra investeringen. Consolis heeft verschillende cases die illustreren dat de investeringskosten verlaagd kunnen worden door dit concept.

Verder is er sprake van een lager energieverbruik dat ook tot minder kosten leidt.

Gebruikmakend van de energieverbruiken in de bovenstaande tabel en de kentallen voor kantoren is berekend dat de energierekening afneemt met 0,60 €/m².

Om deze kosten en baten op verschillende momenten in de tijd te kunnen vergelijken gebruiken we de Net Present Value (NPV)¹⁷, in het Nederlands ook wel Netto Contante Waarde (NCW) genoemd.

Voor de berekening van de NPV gaan we uit van een discontovoet van 5,5%.

Over de levensduur is daarmee de uitgespaarde energie rekening (NPV) € 7,39 per vierkante meter kantoor oppervlakte. Gezien het reductiepotentieel van 29 kton, zijn deze inkomsten verwaarloosbaar en betekent dit dat de reductiekosten 0 €/ton zijn.

Woningen

Voor de berekeningen van het CO₂-reductiepotentieel van betonkernactivering in woningbouw is uitgegaan van de cijfers voor een tussenwoning met een EPC

¹⁷ Door de NPV te berekenen wordt in feite de huidige waarde van toekomstige kasstromen vastgesteld, het zogenaamde actualiseren. Op deze wijze is het mogelijk om te bepalen of er meerwaarde kan worden gecreëerd door nu een bepaalde investering te doen. Met andere woorden: levert de investering wel voldoende rendement op?



van 0,39 uit de aanscherpingsstudie EPC woningbouw en utiliteitsbouw 2015 (W/E Adviseurs, 2013)). De CO₂-emissiereductie en de kosten zijn bepaald door bij dezelfde hoeveelheid isolatie en zonnepanelen ook betonkernactivering en een lucht-water warmtepomp toe te passen. Hierdoor daalt de EPC tot 0,29, Volgens dit principe worden op dit moment grootschalig woonhuizen gerealiseerd in Nederland (Alklima, 2015). Het idee is dat op deze wijze all-electric huizen gebouwd worden die door het aanbrengen van zonnepanelen energieneutraal gemaakt kunnen worden. Ook wel nul op de meter huizen genoemd.

Een warmtepomp in combinatie met betonkernactivering is een zeer efficiënte manier van warmte en koelte produceren. Het nadeel is dat warmtepompen in Nederland nog vrij duur zijn. Omdat de volledige energiebesparing door de combinatie van de betonkernactivering en de warmtepomp aan de betonkernactivering wordt toegeschreven zijn ook alle kosten van deze combinatie aan de betonkernactivering toegeschreven. Hierdoor zijn de berekende kosten voor betonkernactivering in woningen veel hoger dan voor betonkernactivering in kantoren.

Kentallen voor berekeningen woningen (W/E Adviseurs, 2013):

	Waarde	Eenheid	Toelichting
CO ₂ -emissie aardgas	0,0506	kgCO ₂ /MJ prim	(W/E Adviseurs, 2013):
CO ₂ -emissie elektriciteit	0,0613	kgCO ₂ /MJ prim	
Energieinhoud gas	35,10	MJprim/m ³	
Omrekenen kWh/MJ prim	0,108	kWh/MJ prim	
Prijs gas	0,698	€/m ³	
Prijs elek	0,226	€/kWh	
Opgeleverde woningen in 2010	56.000	aantal/jaar	CBS, 2013
aandeel woningen nieuwbouw met BKA	50%		
aantal nieuwbouwwoningen met BKA	28.000	aantal/jaar	
rentevoet	5,50%		
levensduur systeem	20	jaar	

Reductiepotentieel woningen

Om het reductiepotentieel voor de woningen te kunnen berekenen is een aantal aannames gedaan.

Ten eerste is in de Aanscherpingsstudie EPC woningbouw en utiliteitsbouw 2015 (W/E Adviseurs, 2013) opgezocht wat het energieverbruik is van een tussenwoning zonder warmtepomp bij EPC = 0,39.

Vervolgens heeft Alklima aangegeven wat hun warmtepompen in combinatie met betonkernactivering aan elektriciteit verbruikt (bij voldoende grote warmtepomp om geen gas meer nodig te hebben). Hierdoor komt de EPC uit op EPC=0,29.

Het verschil in electriciteitsverbruik en gasverbruik is gebruikt om de CO₂-reductie per woning te berekenen.

De standaard tussenwoning zonder warmtepomp en met EPC = 0,39 is de referentiewoning in deze studie.



De woning met toepassing van een warmtepomp in combinatie met betonkernactivering is de situatie waarin zuiniger gebouwd wordt dan de norm (nl 0,29 ipv 0,4).

Tussenwoning:	EPC=0,39	EPC = 0,29	Eenheid
Totaal energiegebruik	188	139	MJ/m ²
Gas	545	0	m ³
Electra	459	1872	kWh

Op basis van de bovenstaande gegevens is berekend dat het besparingspotentieel per woning 176 kg CO₂ per jaar bedraagt.

Uitgaande van een levensduur van 20 jaar en 28.000 nieuwbouwwoningen per jaar (50% van het aantal dat in 2010 gerealiseerd is) komt dat overeen met een reductiepotentieel van 98,4 kton CO₂ per jaar in Nederland

Reductiekosten woningen

Zoals hierboven aangegeven is er voor de berekening van het reductiepotentieel in woningen uitgegaan van het gecombineerde energiebesparingspotentieel van betonkernactivering en warmtepomp. Daarom moeten ook de gecombineerde investeringskosten meegenomen worden.

Omschrijving	Waarde	NCW jaar 0	Toelichting
Eenmalige investering warmtepomp incl installatie	€ 6.000	€ 6.000,00	Cijfers inclusief installatie en BTW opgaaf Alklima uitgaande van seriematige bouw (>15 woningen)
Eenmalig uitgespaarde kosten HR installatie (incl installatie)	€ 1.500	€ 1.500,00	Opgaaf Feenstra
Eenmalig vermeden aansluitkosten gas	€ 999,18	€ 999,18	(Stedin-tarieven 2015)
Verschil in gasrekening EPC=0,3 en 0,4	€ 380,41 /jaar	€ 4.691,16	Afname per jaar door afname in gasgebruik
Verschil in electrarekening EPC =0,3 en 0,4	€ - 319,32 /jaar	€ -3.937,85	Toename per jaar door toename in electragebruik
Aansluit- en transport-vergoedingen gas	€ 116,66 /jaar	€ 1.515,35	Stedin-tarieven 2015

Bij deze berekening zijn een aantal aspecten van belang.

Ten eerste wordt er aan het begin van de levensduur van het systeem een investering gedaan (de warmtepomp), die over de levensduur van het systeem gedeeltelijk terugverdient wordt door een lagere energieverbruik.

Om de kosten die aan het begin van de levensduur van het systeem gemaakt worden te kunnen vergelijken met de inkomsten over de levensduur van 20 jaar te kunnen vergelijken hebben we gebruik gemaakt van de netto contante waarde (NCW) ookwel de nett present value (NPV) berekening genoemd. Hierbij zijn we uitgegaan van een discontovoet van 5,5%.

De warmtepomp is een lucht-waterwarmtepomp. Hierdoor zijn er geen extra boringen nodig naar een water dragende laag. De investeringskosten bedragen € 6.000 inclusief BTW en montage. Uitgaande van seriematige bouw van 15-20 woningen.



Er is geen gasaansluiting meer nodig. Hierdoor worden de volgende kosten vermeden:

- HR-ketel inclusief montage;
- eenmalige aansluitkosten;
- jaarlijkse aansluit- en transportvergoedingen voor gas;
- kosten voor gasgebruik.

Daar staan de extra elektrakosten door toegenomen elektriciteitsgebruik en de investering in de warmtepomp tegenover.

Als deze kosten omgerekend worden naar de netto contante waarde in jaar 0 op basis van een levensduur van 20 jaar en een rentevoet van 5,5% bedragen de reductiekosten € 350 per ton vermeden CO₂.

Literatuur

CBS, 2013

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

Consolis, 2014

Consolis Green Office building Concept, Subreport C: Energy demand in the office building, for different ventilation systems, door Peter Roots, 30 September 2014

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

NEPROM, 2013

NEPROM - NIEUW Commercieel Vastgoed, gepubliceerd oor NEPROM in 2013

Platform 31

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

W/E adviseurs, 2013

Aanscherpingsstudie EPC woningbouw en utiliteitsbouw 2015, in opdracht van Agentschap NL, uitgevoerd door W/E adviseurs en Arcadis Nederland BV Utrecht/Eindhoven, 20 december 2013

Beschikbaar via: <http://www.bouwbesluitinfo.nl/media/download/WE-rapport-8504-Aanscherping-EPC-2015-eindrapport-versie-20-12-2013.pdf>



Bijlage C Cementchemie en notatie

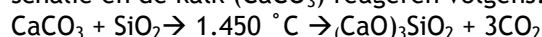
De wereld van beton grenst aan die van chemie. Het omschrijven van de reacties die plaatsvinden bij het produceren en recyclen van beton in chemische termen kan veel inzicht geven in wat er gebeurt. Echter, de betondeskundigen hebben in de loop der jaren een eigen mineralenschrift ontwikkeld. Voor hen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

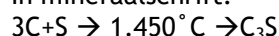
Decarbonisatie tijdens de productie van Portlandcementklinker

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

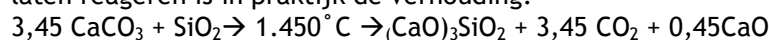
In grote lijnen komt het er op neer dat het silicaat (SiO_2) in de klei en de schalie en de kalk (CaCO_3) reageren volgens:



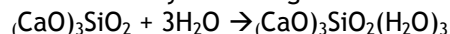
In mineraalschrift:



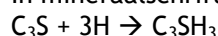
Het vrijkomen van koolstofdioxide ($\text{CO}_2(\text{g})$) heet decarbonisatie en leidt tot extra koolstofdioxide-emissie bovenop de emissies die vrijkomen door het brandstofgebruik dat nodig is om te kunnen verhitten tot 1.450 graden Celsius. Omdat er een kleine overmaat van calciumoxide nodig is om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

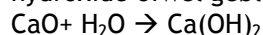


In mineraalschrift:



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:



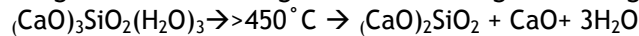
Gebluste kalk is basisch. Aanwezigheid van de overmaat van gebluste kalk activeert hoogovenslak, dit zorgt voor sterkteontwikkeling in slak waardoor hoogovencement toch voldoende kan binden ook al zit er maar weinig Portlandcementklinker in.



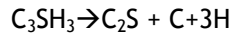
Gerecycled cement als decarbonistatievrije grondstof voor cement

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:



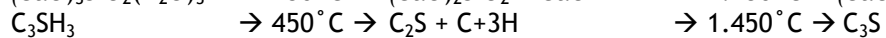
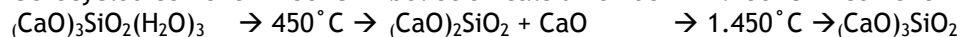
In mineraalschrift:



De cementsteenfractie kan ook gebruikt worden als grondstof voor Portland-klinker 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

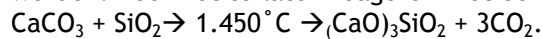


Alfakwarts als ongewenste factor

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.



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 (decarbonatieproces) 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-tryed cement, dit betekent dat beton niet aantoonbaar duurzaam is in alle mogelijke toepassingen (zoals CUR-aanbeveling 48 voorschrijft voor well-tryed 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		Burnt shale T	Limestone*			
						natural P	natural calcined Q	siliceous V	Calcareous W		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	0-5
		CEM II/C-M (P-L/LL)		-	-	16-44	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM II/C-M (S-V-L/LL)		-	-	-	-	16-44	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM II/C-M. (S-V)		16-44	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
CEM III	Blastfurnace cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Pozzolanic cement ³⁾	CEM IV/A	65-89	-	<-----11-35----->					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	<-----36-55----->					-	-	-	0-5	
CEM V	Composite cement ³⁾	CEM V/A	40-64	18-30	-	<-----18-30----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	<-----31-50----->			-	-	-	-	0-5	
CEM VI		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
	CEM VI (S-V)	-			-	-	6-20	-	-	-	-	0-5		

b Klinkergehalte in cement en cementgehalte in beton - de ondergrens bereikt?

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

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

Meer algemeen, bij de beoordeling van relatief lage klinkergehalten moet ermee rekening worden gehouden dat in het cement voldoende Ca en Si aanwezig zijn om het bindingsproduct (Ca-Si hydraten, ontstaan door de reactie van 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 bindmiddeleigenschappen van vliegashoogovenslak 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 vliegashoogovenslak 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 vliegashoogovenslak leidt ertoe dat 300:3 = 100 kg vliegashoogovenslak 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 +vliegas+kalksteen	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 vliegask/slak systemen (Geopolymeer)	Vliegask, 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 vliegashoud 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 introductie 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 bindtijddregelaar, 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 korrelpakking van grof en fijn toeslagmateriaal (grind en zand) maar van belang is zeker ook de korrelpakking 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 korrelpakking in aanvulling op de korrelpakking 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 vliegas.
- Bindmiddeltechnologie wordt meer chemisch gedreven in plaats van op basis van de inzet van bulkgrondstoffen met enkel fysische stuurparameters (bijv. maalfijnheid, druksterkte en kleur)
- Anders dan kalksteen wordt wellicht klei wereldwijd een veel belangrijker basisgrondstof voor bindmiddelproductie en komen er productieprocessen die bij veel lagere temperatuur werken (geopolymere).
- Bindmiddelontwikkeling op basis van het ketenconcept (design for recycling), bijv. acceptatie van CO₂-emissies bij productie met parallelle CO₂-afvang en/of CO₂-binding tijdens de gebruiksduur (carbonatatie van beton). De keten sluiten is mogelijk door bij de recycling van beton de fines af te scheiden. Deze fines zouden via geavanceerde recycling-technologie rijk kunnen zijn aan kalk en ongehydrateerde cementdeeltjes, en daarmee toepasbaar zijn in het cementovenproces en bij het maalproces. Zo zou een 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 & BetonCentrum, Den Bosch, oktober 2012, 27 p.
6. New cement and innovative binder technologies. Proceedings ECRA conference, Barcelona, May 2011.
7. De Vries P. en J.W. Frenay - Duurzame ontwikkelingen in cement en beton. Avondcollege Betonvereniging, Gouda, maart 2013.
8. 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 Rekentool 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 sterkteontwikkeling. 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 voornamelijk vrij willekeurig gekozen om de effecten duidelijk te maken. Constructieve veiligheid speelt hierbij natuurlijk een belangrijke rol!

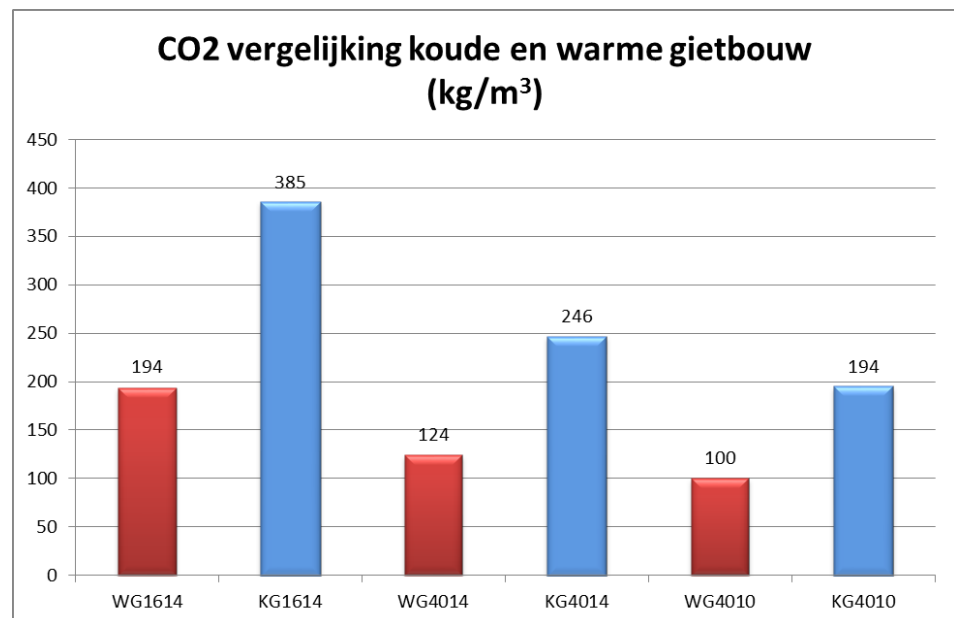


In de berekeningen met de CUR-tool zijn de volgende aannames gemaakt:

- 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:

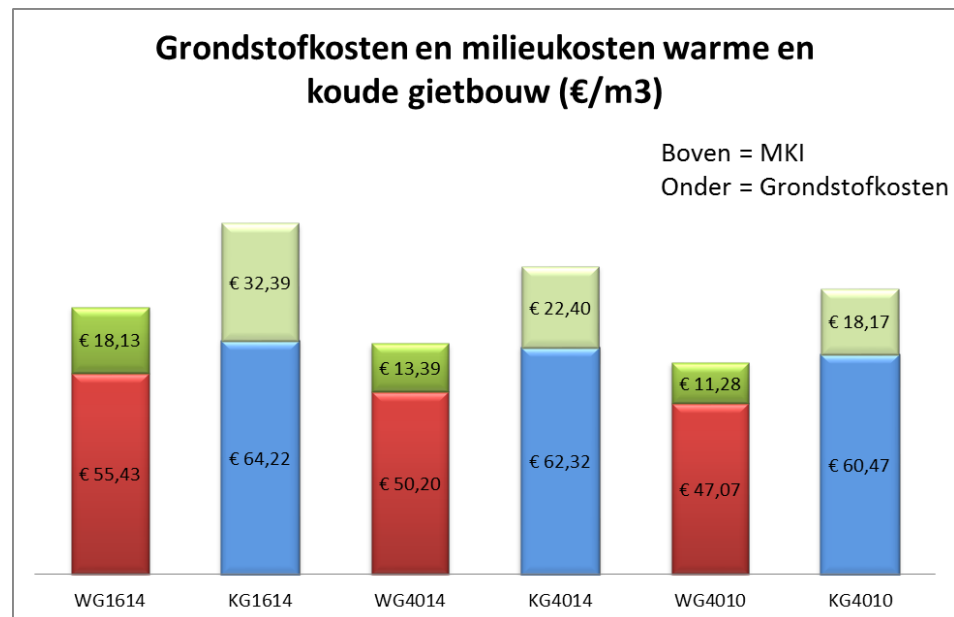
KG1614 = Koude Gietbouw, ontkisten na 16 uur, ontkistingssterkte 14 N/mm².



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 ontkistingssterkte 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.



Bijlage F Bepaling overlap

De mate waarin de reductiepotentiëlen elkaar overlappen kent drie degarاداتies:

- Niet mogelijk (nm de ondertaande matrix), een voorbeeld is betonkernactivering en korreplakking optimalisatie. Deze twee opties zullen elkaars besparingspotentieel nooit beïnvloeden.
- Onwaarschijnlijk in 2020 (ow in de ondertaande matrix), demontabel bouwen en geopolymeer kunnen op de lange termijn elkaars reductiepoteniteel negatief beïnvloeden, maar het is niet waarschijnlijk dat voor 2020 al grootschalig demontabel bouwen en geopolymeer bij één gebouw wordt toegepast.
- Een kans %, als de kans 100% is staat er een 1, anders staat er een %. Dit percentage is berekend als de kans dat overlap plaatsvindt x de CO₂-reductie door optie 1 x de CO₂-reductie door optie 2.



[illegible]