

## Prioritering handelings- perspectieven verduurzaming betonketen

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

### **Rapport**

Delft, november 2013

### **Opgesteld door:**

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



# Colofon

## Bibliotheekgegevens rapport:

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

Publicatienummer: 13.2A59.64

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](http://www.ce.nl)

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

© copyright, CE Delft, Delft



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



# Inhoud

	<b>Voorwoord</b>	<b>5</b>
	<b>Samenvatting</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1	Aanleiding	11
1.2	Doel project	12
1.3	Leeswijzer	12
<b>2</b>	<b>Duurzaamheidsopties</b>	<b>13</b>
2.1	Selectieproces	13
2.2	Geselecteerde verduurzamingsopties	13
2.3	Verandering van de betonsamenstelling	15
2.4	Samenvatting	19
<b>3</b>	<b>Kostencurve</b>	<b>21</b>
3.1	Aanpak en uitgangspunten	21
3.2	Kostencurve	23
3.3	Gevoeligheidsanalyse	27
3.4	Samenvatting	29
<b>4</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>31</b>
4.1	Kostencurve	31
4.2	Kiezen van verduurzamingsopties	32
	<b>Literatuur</b>	<b>35</b>





# Voorwoord

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

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

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

Mede dankzij hun input zijn de onderzoekers in staat geweest het reductiepotentieel en de reductiekosten in te schatten en te baseren op actuele marktgegevens en (deels vertrouwelijke) bedrijfsinformatie. Deze input heeft ertoe geleid dat de onderzoekers gebruik konden maken van hoogwaardige informatie.

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

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

De conclusies zijn uiteraard geheel voor rekening van de auteurs Marit van Lieshout, Geert Warringa en Geert Bergsma





# Samenvatting

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

Het Netwerk Beton heeft al eerste stappen gezet in de verduurzaming van de betonketen. Op de middellange termijn worden verdergaande verbeteringen wenselijk geacht. Om deze verbeteringen op de middellange termijn (vanaf 2020) te realiseren zijn 16 verduurzamingsopties geselecteerd.

In de inventarisatiestudie naar de 'Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw' (CE Delft, 2013) zijn alle milieueffecten van de betonketen meegenomen. Daaruit bleek een sterke correlatie van de verschillende milieueffecten met de CO<sub>2</sub>-emissie. Daarom is in deze vervolgstudie ervoor gekozen om de verbeteropties te beoordelen op CO<sub>2</sub>-reductie (reductiepotentieel) en de benodigde kosten per ton voorkomen CO<sub>2</sub>-emissie (reductiekosten). De verduurzamingsopties zijn samengevat in Tabel 1.

Het doel van het project is om een ruwe inschatting van de kostencurve op te stellen voor 16 opties die op de middellange termijn de betonketen verder kunnen verduurzamen. CE Delft heeft er voor gezorgd dat de aangeleverde gegevens kritisch zijn geëvalueerd en op een consistente en vergelijkbare manier gebruikt zijn voor de berekening van het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel en de CO<sub>2</sub>-reductiekosten.

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

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

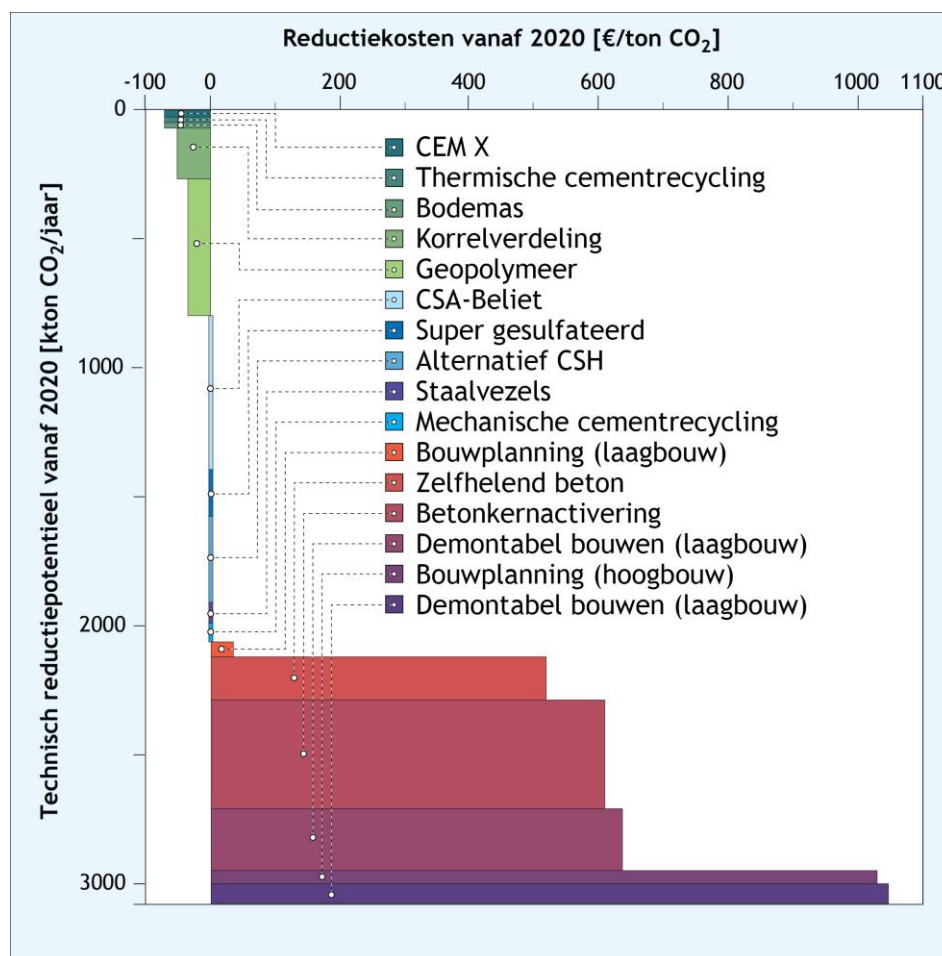


Centraal in de kostencurve staan het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel en de CO<sub>2</sub>-emissiereductiekosten.

Het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel is een technisch reductiepotentieel voor 2020. Het is de hoeveelheid CO<sub>2</sub>-emissie die rond 2020 gerealiseerd kan worden als vanaf nu alle betrokken partijen maximaal meewerken om deze verduurzamingsoptie door te voeren en geld geen belemmering vormt. Om het technisch reductiepotentieel te berekenen is uitgegaan van emissiereducties die nu al op laboratoriumschaal of pilotschaal bewezen zijn, zodat alle benodigde procedures voor grootschalige invoering op de markt voor 2020 gerealiseerd kunnen zijn.

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

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



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



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

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

Hierbij plaatsen we een aantal kanttekeningen:

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

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

---

<sup>1</sup> Bij productie van Portlandklinker wordt gewoonlijk CO<sub>2</sub> afgesplitst van kalksteen (in Nederland wordt meestal mergel gebruikt als bron voor kalksteen). Het afsplitsen van CO<sub>2</sub> heet decarbonisatie. Het reduceren van decarbonisatie door inzet van grondstoffen waarbij geen afsplitsing van CO<sub>2</sub> optreedt is een effectieve stap om CO<sub>2</sub>-emissies te verminderen.



Aangezien deze maatregelen ingrijpen op een groot deel van het betonegebruik zou aanvullend onderzoek naar het reductiepotentieel een waardevolle aanvulling kunnen leveren op deze studie. Mogelijk bieden de uitkomsten van de Stutech/Stufib-studies, die later dit jaar bekend worden voldoende aanknopingspunten om alsnog de CO<sub>2</sub>-emissie-reductiekosten en het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel te berekenen.



# 1 Inleiding

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

## 1.1 Aanleiding

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

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

Vanuit verschillende kanten zijn er verduurzamingsopties geopperd voor de branche. Een voorbeeld is de verkenning van CE Delft (CE Delft, 2013) naar de milieukundige aspecten van betonketen en verduurzamingsopties daarin. Om te zorgen dat er nu ook daadwerkelijk stappen gezet worden om een aantal van deze opties branchebreed te realiseren, is het nodig dat er tien verduurzamingsopties uitgekozen worden waar de industrie zich sterk voor wil maken, de zogenoemde handelingsperspectieven. Een innovatieagenda voor de betonketen voor de middellange termijn. Daarmee kan het Netwerk Beton concreet aan de slag.

Om dit te doen zijn achtereenvolgens de volgende stappen doorlopen: Ten eerste is uit een groep van meer dan 70 verduurzamingsopties een selectie gemaakt van circa 35 opties. Door in overleg met andere werkgroepen die opties af te laten vallen die al onderdeel zijn van de verduurzamingsafspraken die afgesproken zijn in het genoemde 'concreet 1.0' of pas op de lange termijn bijdragen aan CO<sub>2</sub>-emissiereductie. Vervolgens heeft de begeleidingscommissie tijdens een workshop uit deze opties een selectie gemaakt. In samenwerking met leden van de begeleidingscommissie heeft CE Delft deze selectie uitgewerkt tot de 16 verduurzamingsopties zoals samengevat in Tabel 2.

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

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



## 1.2 Doel project

Het doel van het project is om een ruwe inschatting van de kostencurve op te stellen voor de 16 opties voor de middellange termijn om de betonketen te verduurzamen. Op basis van gegevens die nu voorhanden zijn. Op een manier die onderlinge vergelijking van het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel en de CO<sub>2</sub>-reductiekosten mogelijk maakt.

Het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel is een technisch reductiepotentieel, dat wil zeggen dat het reductiepotentieel het technisch potentieel is om CO<sub>2</sub>-emissies te reduceren. Om het technisch reductiepotentieel te berekenen is uitgegaan van emissiereducties die nu al op laboratoriumschaal of pilotschaal bewezen zijn, zodat alle benodigde procedures voor grootschalige invoering op de markt voor 2020 gerealiseerd zou moeten kunnen worden.

De reductiekosten zijn de kosten die gemaakt moeten worden om de emissie van een ton CO<sub>2</sub> te voorkomen. De reductiekosten worden uitgedrukt in euro per ton CO<sub>2</sub>.

In de inventarisatiestudie naar de 'Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw' (CE Delft, 2013) zijn alle milieueffecten van de betonketen meegenomen. Daaruit bleek een sterke correlatie van de verschillende milieueffecten met de CO<sub>2</sub>-emissie. Daarom is in deze vervolgstudie ervoor gekozen om kwantificatie van verbeteropties te baseren op de mate waarin zij CO<sub>2</sub>-emissies kunnen reduceren van de betonketen (reductiepotentieel) en daarbij benodigde kosten per ton voorkomen CO<sub>2</sub>-emissie (reductiekosten).

## 1.3 Leeswijzer

De opzet van dit rapport is als volgt:

In Hoofdstuk 2 is het selectieproces van de verduurzamingopties beschreven.

In Bijlage A staat de lijst met opties voor de middellange termijn waarmee de begeleidingsgroep begonnen is. Vervolgens beschrijven we welke verduurzamingsopties geselecteerd zijn waarvan de CO<sub>2</sub>-emissiereductiekosten en het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel onderzocht zijn.

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

Daarom zijn in Bijlage B de volgende aspecten beschreven:

- het werkingsprincipe van deze maatregel (hoe draagt deze maatregel bij aan CO<sub>2</sub>-emissiereductie in de betonketen?);
- de reductiekosten (hoeveel kost het om op deze manier een ton CO<sub>2</sub> te besparen?);
- het reductiepotentieel (hoeveel CO<sub>2</sub>-emissie kan er op deze manier voorkomen worden per jaar, uitgaande van de productie van 2010 als referentiejaar?).

In Hoofdstuk 3 presenteren we de kostencurve:

- Wat zijn de reductiekosten?
- Wat is het reductiepotentieel?
- Hoe gevoelig zijn de gepresenteerde gegevens voor variaties in parameters?

In Hoofdstuk 4 trekken we conclusies en doen we aanbevelingen.



## 2 Duurzaamheidsopties

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

### 2.1 Selectieproces

In de voorbereidende fase zijn meer dan 70 opties geïdentificeerd. Na een eerste selectie in overleg met de werkgroep kansen en belemmeringen zijn 35 opties overgebleven (Bijlage A). Tijdens de workshop met de begeleidingscommissie begin juni 2013 is uit deze lijst een selectie gemaakt van 16 opties. Deze opties worden in de volgende paragraaf beschreven.

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

### 2.2 Geselecteerde verduurzamingsopties

De geselecteerde verduurzamingsopties zijn weergegeven in Tabel 2.

De opties zijn grofweg onder te verdelen in vijf categorieën:

1. Verandering van de betonsamenstelling.
2. Hoogwaardigere recycling van beton.
3. Andere wapeningsmethode.
4. Aanpassen bouwproces.
5. Langere levensduur van betonnen producten.
6. Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase

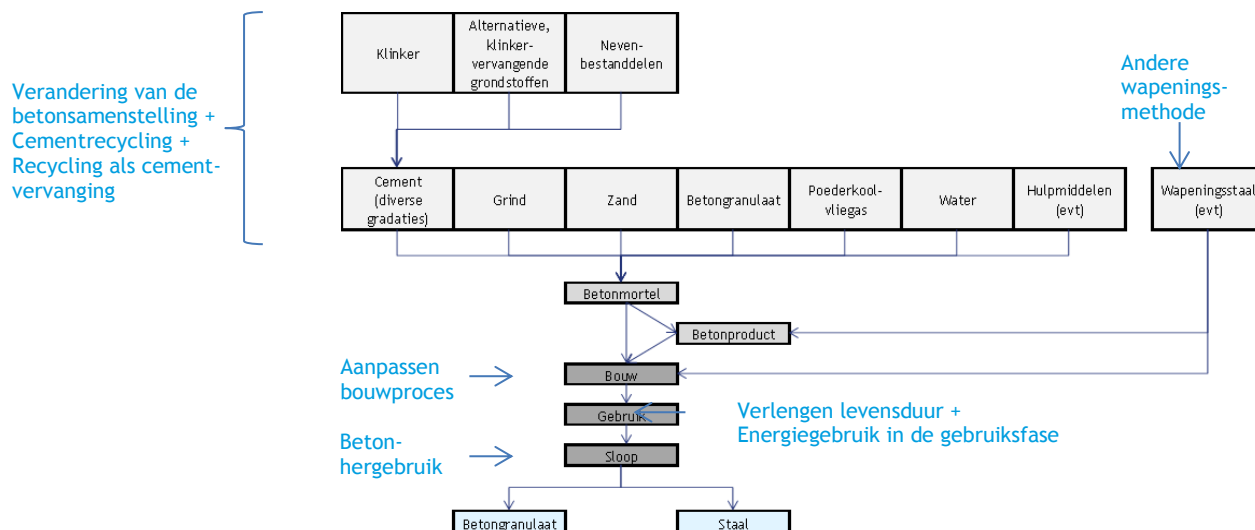
In Figuur 1 is weergegeven waar de verschillende categorieën ingrijpen in de levenscyclus van het beton.

Nadere beschouwing van deze opties laat zien dat er een grote nadruk ligt bij het reduceren van de benodigde hoeveelheid cement (met name het aandeel klinker). Dit is logisch gezien het feit dat over de levenscyclus van beton, de CO<sub>2</sub>-emissies door de productie van klinker voor cement significant groter zijn dan de andere emissies (CE Delft, 2013).

Er is daarom een grote groep maatregelen die aansturen op verlaging van de emissie van de cementproductie door de betonsamenstelling te veranderen. Daarnaast is er de mogelijkheid om meer cement opnieuw te gebruiken waardoor minder CO<sub>2</sub>-emissies nodig zijn, hetzij omdat er geen nieuw cement nodig is, hetzij omdat het oude cement als decarbonisatievrije grondstof voor nieuw cement wordt ingezet.



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



Dit betekent niet dat er alleen verduurzamingsopties zijn voor partijen aan het begin en het eind van de productieketen. Naast het feit dat de andere partijen een bewuste keuze voor emissiearme cementen en wapeningsmethoden zullen moeten ondersteunen zijn er nog een aantal andere zaken die gedaan kunnen worden. Zo kan het bouwproces zo ingericht worden dat emissiearme cementen ingezet kunnen worden die een lagere initiële sterkte hebben. Verder kan er anders ontworpen worden, zodat er niet meer beton gebruikt wordt dan strikt noodzakelijk. Of kan er zo ontworpen worden dat gebouwen en constructies hun volledige technische levensduur meegaan en niet voortijdig gesloopt hoeven te worden omdat ze niet meer voldoen aan de functionele eisen die aan hen gesteld worden.

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

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



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

### 2.3 Verandering van de betonsamenstelling

De eerste categorie verduurzamingsopties: ‘verandering van de samenstelling van het beton’ reduceert CO<sub>2</sub>-emissie omdat de verduurzamingsopties in deze categorie bepaalde stappen in het betonproductieproces waarbij veel CO<sub>2</sub> vrijkomt verminderen of overbodig maken.

Om te begrijpen hoe veranderingen aan de betonsamenstelling CO<sub>2</sub>-emissies kunnen reduceren gaan we hieronder nader in op de productie van beton. Beton is een mengsel van verschillende bestanddelen. De klassieke bestanddelen zijn cement, grind, zand en water. Tegenwoordig worden ook gemalen hoogovenslak, betongranulaat, poederkoolvliegias, en chemische hulpmiddelen toegevoegd (zie Figuur 1).

Een belangrijk onderdeel van beton is cement. Cement zorgt voor de binding tussen de verschillende ingrediënten van beton en is daarmee cruciaal voor de sterkte van het beton. Van oudsher is Portlandklinker een belangrijk bestanddeel van cement. De productie van Portlandklinker is heel energie-intensief. Daar komt nog bij dat CO<sub>2</sub> wordt afgescheiden in het chemische proces dat nodig is om van kalk en silicaten Portlandklinker te maken. Hierdoor heeft de productie van Portlandklinker een grote klimaatimpact. Zo groot dat de CO<sub>2</sub>-emissie door de productie van ongewapend beton bijna volledig bepaald wordt door de hoeveelheid Portlandklinker die gebruikt wordt (CE Delft, 2013).

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

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

Door de hoeveelheid Portlandklinker in het beton te verminderen kan de CO<sub>2</sub>-emissie door de productie van beton afnemen. Er zijn drie manieren geïdentificeerd waardoor op de middellange termijn de hoeveelheid Portlandklinker in betontoepassingen vermindert of geheel tot nul gereduceerd kan worden zonder de sterkte van het beton in gevaar te brengen.



1. Optimalisatie van de pakkingsdichtheid van de deeltjes in het beton. Dit kan gebeuren door aanpassing van de deeltjesgrootteverdeling van het beton zonder dat dit invloed heeft op de chemische interactie tussen de deeltjes (Fennis, 2011). Hierdoor wordt het beton sterker zonder dat er meer chemische bindingen gevormd worden. Als het beton even sterk mag blijven zijn er minder chemische verbindingen in het materiaal nodig en kan dus het aandeel cement omlaag in het beton. Dit is het werkingsprincipe achter de optie 'korrelverdeling'. Voor meer informatie over deze optie zie Bijlage B-1.
2. Verruiming van de grondstoffen die ingezet mogen worden om cement van te maken. Hierdoor kan de bindende eigenschap van cement gelijk blijven bij afnemende hoeveelheid Portlandklinker. Dit is het werkingsprincipe achter optie CEM X<sup>2</sup>. Voor meer informatie over deze optie zie Bijlage B-2.
3. Ontwikkeling van een alternatief bindstelsel dat dezelfde werking heeft als Portlandklinker, maar bij geen of veel lagere CO<sub>2</sub>-emissie. Dit is het werkingsprincipe achter de opties 'CSA-beliet', 'supergesulfateerd', 'alternatief CSH' en 'geopolymeer'. Voor meer informatie over deze opties zie Bijlage B-3 tot en met B-6.

### 2.3.1 Hoogwaardigere recycling van beton

Zoals hierboven beschreven is de productie van (gewapend) beton zeer energie-intensief. Het is dus van belang om zoveel mogelijk te zorgen dat oud beton weer als grondstof gebruikt kan worden.

De meest hoogwaardige manier om dat te doen is door betonconstructies te hergebruiken in hun oorspronkelijke vorm. Hierdoor hoeft er geen nieuw beton gemaakt te worden en wordt een betonelement, bijvoorbeeld een vloer uit het ene gebouw gehaald om in het volgende gebouw geïnstalleerd te worden. Dit is het werkingsprincipe van de optie 'demontabel bouwen'. Voor meer informatie over deze optie zie Bijlage B-7.

Als hergebruik niet mogelijk is, is het van belang om zo te slopen dat de stromen die daarbij vrijkomen van eenzelfde kwaliteit zijn als de grondstoffen bij de productie van het beton. Dit is het uitgangspunt van 'cradle-to-cradle' en het idee achter de opties mechanische en thermische cement-recycling.

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

Bij mechanische recycling via slim breken en thermische recycling via kringbouw ligt de nadruk op het zo zuiver mogelijk terugwinnen van de verschillende fracties: met name hergebruik van de cementsteenhoudende fractie als decarbonisatievrije<sup>1</sup> grondstof voor nieuw cement is een zeer effectieve manier om door inzet van oud beton nieuw beton een lage carbon footprint te geven. Voor meer informatie over deze opties zie Bijlage B-8 en 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.

<sup>2</sup> Indirect bepalend voor het reductiepotentieel van de opties 'cementrecycling via kringbouw' en 'inzet van bodemas als vulmiddel met bindcapaciteit'. Deze opties vallen binnen de categorie hoogwaardige recycling.





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

### 2.3.2 Andere wapeningsmethode

Beton kan heel goed tegen drukkrachten, maar is niet zo goed bestand tegen trekkrachten. Daarom worden betonnen constructies waarop veel trekkrachten kunnen komen te staan versterkt met een stalen constructie, de zogenoemde wapening. Omdat er veel energie nodig is bij de productie van staal is de CO<sub>2</sub>-emissie bij de productie van staal vrij hoog. Daardoor heeft gewapend beton een relatief hoge CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-emissie. Dit is het werkingsprincipe achter verduurzamingsoptie ‘staalvezels’<sup>3</sup>.

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

### 2.3.3 Aanpassen bouwproces

Het bouwproces kan op twee manieren aangepast worden:

1. Verminderen van de hoeveelheid klinker die nodig is voor het halen van de benodigde initiële sterkte. Beton is een dynamisch materiaal waarvan de sterkte nog lange tijd nadat het gegoten is toeneemt. In veel gevallen wordt de hoeveelheid cement in het beton bepaald door de snelheid waarmee het beton belast moet kunnen worden. Meestal is de eerste belasting het moment dat het beton uit de bekisting gehaald wordt waarin het gegoten wordt. Door 24 uur langer te wachten voordat het beton ontkist wordt kan met minder cement hetzelfde eindresultaat behaald worden. Zoals uitgelegd in Paragraaf 2.3 betekent minder cement minder Portlandklinker en dus minder CO<sub>2</sub>-emissie. Dit is het werkingsprincipe achter de verduurzamingsopties ‘bouwplanning’. Voor meer informatie over de optie ‘bouwplanning’ zie Bijlage B-12.  
De optie is alleen uitgewerkt voor gietbeton. Voor voorgespannen beton is deze optie niet mogelijk zonder evenredig de productiecapaciteit uit te breiden, dat leek geen realistische optie. Voor de betonproducten die niet voorgespannen worden was onvoldoende informatie voorhanden om de reductiekosten te kunnen berekenen. Daarom is alleen het aanpassen van de bouwplanning als manier om later te ontkisten in de kostencurve opgenomen.
2. Verminderen van de hoeveelheid beton die nodig is in de betonconstructie, door het beperken van overdimensionering in de ontwerpfase. Gezien de hoge CO<sub>2</sub>-emissie die gerelateerd is aan de productie van beton, kan CO<sub>2</sub>-reductie ook worden bereikt door minder beton toe te passen. Dit is het werkingsprincipe achter verduurzamingsoptie ‘overdimensionering’.

---

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



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

#### **2.3.4 Langere levensduur van betonnen producten**

Bij verlenging van de levensduur van een betonnen constructie zijn er geen of minder CO<sub>2</sub>-emissies door sloop en vervanging. Omdat de CO<sub>2</sub>-emissies tijdens de productie van een betonconstructie groot zijn, kan het raadzaam zijn om de levensduur van een betonconstructie te verlengen in plaats van te vervangen door een nieuwe betonconstructie.

Er zijn verschillende manieren om dit te doen:

1. Door bij het ontwerp rekening te houden met mogelijke verandering van functie van het gebruik van het gebouw. Hierbij moet gedacht worden aan voldoende grote overspanningen zodat ruimtes naar behoefte opgedeeld kunnen worden, voldoende hoge plafonds zodat eventuele nieuwe installaties in de toekomst onder een eventuele dekvloer weggewerkt kunnen worden, maar ook voldoende sterke constructie zodat er nog één of meerdere verdiepingen of een daktuin aan het gebouw toegevoegd kunnen worden. Dit is het werkingsprincipe van de optie ‘flexibel bouwen’. De beschikbare informatie voor de optie ‘flexibel bouwen’ was voornamelijk kwalitatief en daarmee onvoldoende om de reductiekosten en het reductiepotentieel te kunnen berekenen. Daarom is deze optie niet meegenomen in de kostencurve.
2. Door het aanpassen van de betonsamenstelling waardoor het beton zelf in staat is om kleine scheurtjes te repareren, waardoor er niet alleen een langere levensduur van met name constructies zoals tunnels en bruggen (GWW en civiele toepassingen van beton) verwacht wordt, maar ook een reductie in het onderhoud. Dit is het werkingsprincipe van de verduurzamingsoptie ‘zelfhelend beton’. Voor meer informatie over deze optie, zie Bijlage B-15.

#### **2.3.5 Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase**

In het geval van een gebouw wordt er in de gebruiksfase door de gebruikers over het algemeen meer energie gebruikt dan dat er vrijkomt over de levenscyclus van de individuele materialen waaruit het gebouw is opgebouwd. Als het beton zou kunnen bijdragen aan het verlagen van het energiegebruik in de gebruiksfase zou dat een groot effect hebben op de CO<sub>2</sub>-emissie van het beton.

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

---

<sup>4</sup> Hierbij moet wel gezegd worden dat de besparing in de optie betonkernactivering niet losgezien kan worden van de installatie waaraan het beton gekoppeld is. Beton is geen isolator en ook geen energieopwekker en kan daarmee nooit zelfstandig bijdragen aan het verlagen van het energiegebruik van een woning.



## 2.4 Samenvatting

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

1. Verandering van de betonsamenstelling.
2. Hoogwaardigere recycling van beton.
3. Andere wapeningsmethode.
4. Aanpassen bouwproces.
5. Langere levensduur van betonnen producten.
6. Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase.

In Bijlage B is per optie het werkingsprincipe in meer detail beschreven. Deze verduurzamingsopties verschillen in CO<sub>2</sub>-emissiereductiekosten en CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel.

Voor twee verduurzamingsopties was onvoldoende informatie beschikbaar om de CO<sub>2</sub>-emissiereductiekosten en het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel te berekenen. Deze opties zijn daarom niet opgenomen.

Het gaat hierbij om de opties:

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

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

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

Mogelijk bieden de uitkomsten van de Stutech/Stufib-studies, die later dit jaar bekend worden voldoende aanknopingspunten om alsnog de CO<sub>2</sub>-emissiereductiekosten en het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel te berekenen.





# 3 Kostencurve

In dit hoofdstuk presenteren en analyseren we het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel van de geselecteerde verduurzamingsopties en de reductiekosten waarmee dit reductiepotentieel gepaard gaat. Het reductiepotentieel en de bijbehorende reductiekosten zijn weergegeven in een kostencurve.

## 3.1 Aanpak en uitgangspunten

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

Het uitgangspunt in deze analyse is het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel en de CO<sub>2</sub>-emissiereductiekosten van de verschillende verduurzamingsopties in het jaar 2020 ten opzichte van de huidige samenstelling, bouwprocessen en bouwvolumes. Hierbij is het referentiejaar 2010. Aangezien daarvoor in het kader van de voorgaande studie door CE Delft over de milieu-impact van beton, door de brancheorganisaties VOBN en BFBM gedetailleerde gegevens over de branche beschikbaar zijn gesteld.

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

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

### 3.1.1 Aanpak en uitgangspunten bij bepaling van het reductiepotentieel

Het reductiepotentieel in de kostencurve is het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel dat technisch haalbaar is. Of dit reductiepotentieel daadwerkelijk gerealiseerd wordt hangt af van de mate waarin een verduurzamingsoptie toegepast wordt. Dit is mede afhankelijk van factoren zoals marktprijsontwikkeling, CO<sub>2</sub>-prijs, wet- en regelgeving, overheidsbeleid, etc. Deze factoren zijn niet meegenomen in het technisch reductiepotentieel. De normprocedures zijn gedeeltelijk meegenomen. Er is gekeken wat de minimaal benodigde periode is om verduurzamingsopties toegelaten te krijgen tot de markt. Het gedeelte van de opties dat in 2020 goedgekeurd zou kunnen zijn, volgens de normen als alle betrokken partijen zich daarvoor maximaal zouden inzetten, is meegeteld bij het technisch reductiepotentieel. Door tal van omstandigheden kan de benodigde normprocedure in de praktijk langer uitvallen.



Het reductiepotentieel wordt sterk beïnvloed door twee parameters.

1. De mate waarin inzet van een verduurzamingsoptie CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-emissies van een verduurzamingsoptie zijn effecten over de hele levensduur meegenomen. Ter illustratie een voorbeeld. Stel dat in een hypothetische optie meer transportbewegingen nodig zijn waardoor er extra transportemissies optreden, maar dat die extra emissies wegvallen tegen de emissies die bespaard worden door uitsparing van betonproductie. Dan is het mogelijk dat er netto over de hele levensduur sprake kan zijn van een CO<sub>2</sub>-besparing. Wij hebben voor iedere verduurzamingsoptie bepaald welke netto verandering er optreedt in de CO<sub>2</sub>-emissies over de levensduur van het beton.

Het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel geldt voor de gehele levensduur van het beton. Toch is de emissie uitgedrukt in kiloton CO<sub>2</sub>-emissie per jaar (kton<sup>5</sup>/jaar), omdat we ervan uitgaan dat verduurzamingsopties tot in de lengte der jaren toegepast blijven worden en dat ieder jaar een vergelijkbaar bouwvolume gerealiseerd wordt als in 2010<sup>6</sup>.

### 3.1.2 Aanpak en uitgangspunten bij berekening van de reductiekosten

De reductiekosten zijn uitgedrukt in €/ton. Dit betekent dat ze weergeven hoeveel euro het gemiddeld kost om een ton CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-emissieverlaging alle effecten over de hele keten in ogenschouw genomen. Dit geldt ook voor de bepaling van eventuele meerkosten (of soms zelfs kostenreducties).

Om zicht te krijgen op meerkosten wordt uitgegaan van de marktprijs.

Als bijvoorbeeld cement in beton wordt vervangen door een bestanddeel met een lagere marktprijs, zijn de reductiekosten bepaald op basis van het verschil tussen de marktprijs van het cement en het vervangende bestanddeel.

In de praktijk kan het daadwerkelijke kostenverschil afwijken, omdat de winstmarges (verschil kostenprijs en marktprijs) tussen de bestanddelen kunnen verschillen. Omdat het gaat om een vrije markt, hanteren we de aanname dat de winstmarges per product vergelijkbaar zijn, en de verschillen in marktprijzen representatief zijn voor de verschillen in kostprijs. Kort na introductie van bijvoorbeeld een vervangend cement is dit niet altijd het geval, maar in een transparante markt moet deze aanname na verloop van tijd wel opgaan. We zijn uitgegaan van de huidige marktprijzen, omdat er geen betrouwbare projecties beschikbaar waren voor marktprijsprojecties in 2020.

---

<sup>5</sup> kton staat voor kiloton; 1 kton = 1.000 ton = 1.000.000 kilogram.

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



De marktprijzen zijn door de leden van de klankbordgroep individueel verstrekt aan CE Delft. Deze prijzen zijn door CE Delft gemiddeld, zodat niet herleidbaar is wie van de leden welke prijs hanteert. De marktprijzen zijn weergegeven in Tabel 4 in Bijlage B.

Verdere uitgangspunten in de kostenberekening zijn:

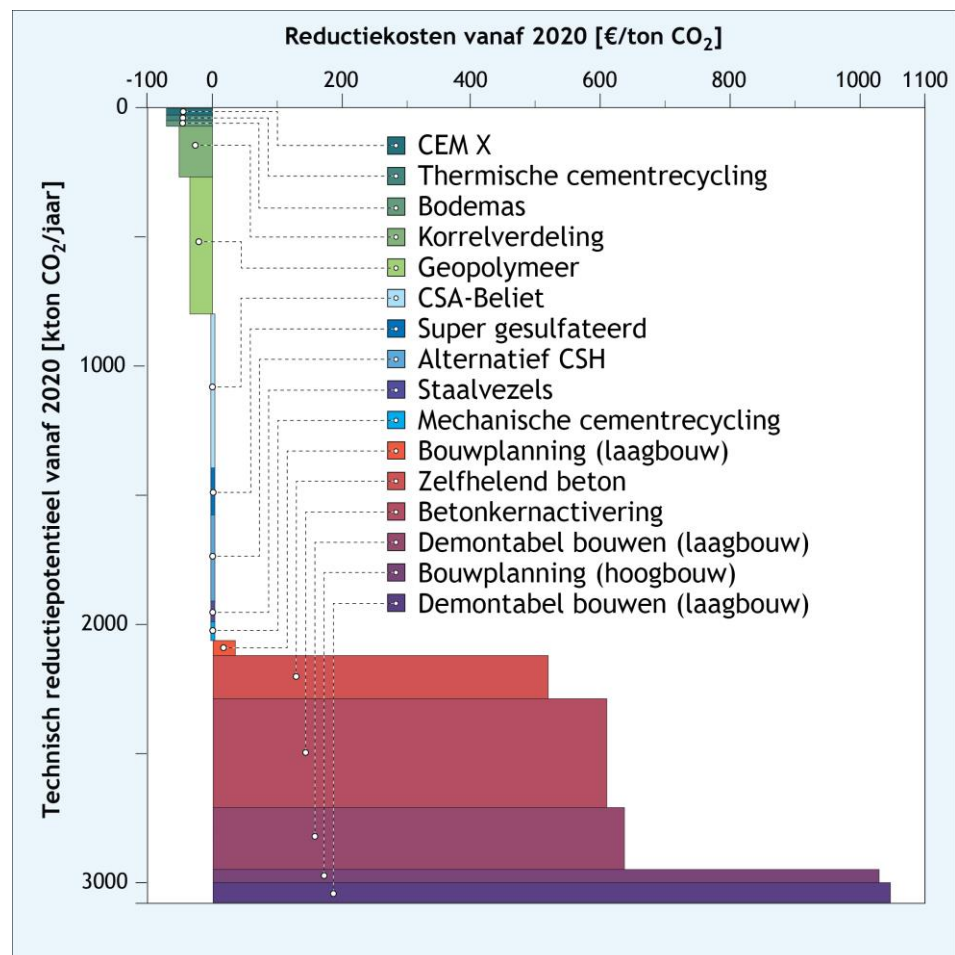
- Conform de voorschriften van het ministerie van Financiën is een reële discontovoet van 5,5% gehanteerd. Reëel wil zeggen dat geen rekening wordt gehouden met inflatie. Stel bijvoorbeeld dat de inflatie in een jaar 2% bedraagt, dan is de nominale rentevoet 5,5% (reëel) plus 2% inflatie is 7,5%.
- Als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

Meer informatie over de kostenberekeningen is weergegeven in de bijlagen.

### 3.2 Kostencurve

De kostencurve is weergegeven in Figuur 2.

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



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

### 3.2.1 Betekenis van weergegeven reductiepotentiëlen

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

De drie verduurzamingsopties met het grootste CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel zijn alle drie alternatieve bindersystemen:

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

De ‘CSA-beliet’ cementen zijn het meest breed toepasbaar, maar hebben per ton cement dat ze vervangen een lagere CO<sub>2</sub>-emissiereductie dan ‘geopolymeren’. Daarom komen ‘geopolymeren’ in deze berekeningen beter naar voren. Daar komt bij dat het reductiepotentieel en de reductiekosten van ‘geopolymeren’ het gemiddelde zijn van twee zeer verschillende soorten ‘geopolymeren’ die sterk verschillen in reductiekosten en CO<sub>2</sub>-reductiepotentieel. Er zijn dus zowel ‘geopolymeren’ in ontwikkeling waarvoor het reductiepotentieel kleiner uit zou vallen en de reductiekosten hoger en vice versa.

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

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

Dit betekent voor andere alternatieve bindersystemen dat als al het ongewapende beton is gemaakt met geopolymeer en BSA-beliet is toegepast als cementvervanger in al het gewapende beton er geen CO<sub>2</sub>-emissiereductie mogelijk is door het toepassen van alle andere klinkervervangers zoals ‘CEM X’, ‘supergesulfateerd’, ‘alternatief CSH’, en ook ‘bodemas’.

Voor het gerecyclede cement is er nog wel een mogelijkheid dat het bijdraagt aan extra CO<sub>2</sub>-reductie, bovenop de reductie van het technisch potentieel van de genoemde bindersystemen. Mits er een manier gevonden wordt om gerecycled cement in te zetten als een decarbonisatievrije grondstof voor CSA-beliet, dan zou het reductiepotentieel voor CSA beliet sterk toenemen zonder te overlappen met het bestaande reductiepotentieel van CSA-beliet. Dat is nu echter nog niet aangetoond.





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

Het reductiepotentieel van andere verduurzamingsopties zoals demontabel bouwen, bouwplanning, zelfhelend bouwen neemt proportioneel af met de emissiereductie die optreedt als de Portlandklinker vervangen wordt door alternatieve CO<sub>2</sub>-arme bindsystemen zoals 'geopolymeer', 'CSA-beliet', etc.

Het reductiepotentieel van betonkernactivering wordt niet beïnvloed door de invoering van andere verduurzamingsopties. Echter omdat het reductiepotentieel bepaald wordt door de combinatie met de warmtepomp en de WKO, is deze optie niet vergelijkbaar met de andere verduurzamingsopties waar de CO<sub>2</sub>-emissiereductie direct is terug te voeren op het beton. Daarom adviseren we om deze CO<sub>2</sub>-emissiereductie niet op te nemen in het totale reductie-potentieel.

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

### 3.2.2 Betekenis van de weergegeven reductiekosten

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

De vijf verduurzamingsopties met het laagste CO<sub>2</sub>-emissiereductiekosten zijn alle vijf gebaseerd op de inzet goedkopere grondstoffen als cementvervanger:

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

Het is duidelijk dat de bovengenoemde opties de goedkoopste manieren om CO<sub>2</sub> te reduceren vertegenwoordigen, maar hoe moeten de kosten van de overige opties gezien worden?



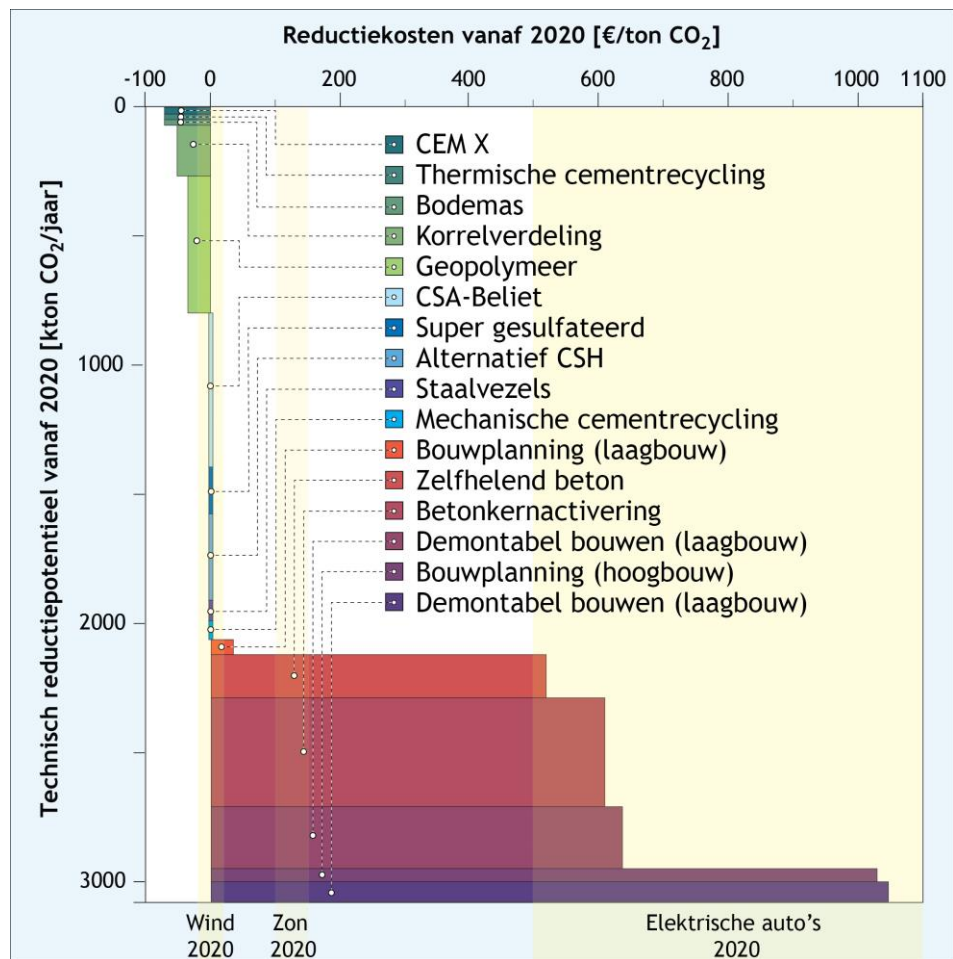
Een belangrijk aspect daarbij is de CO<sub>2</sub>-emissieprijs. Hierover is weinig met zekerheid te zeggen. Wat zeker is, is dat het Verenigd Koninkrijk per 1 april van dit jaar een CO<sub>2</sub>-bodemprijs (Carbon floor price) ingesteld heeft van 16 £/ton CO<sub>2</sub> (18,80 €/ton), die oploopt tot 30 £/ton CO<sub>2</sub> in 2020.

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

Verder is de lobby van het bedrijfsleven verdeeld. De meeste energie-intensieve bedrijven zijn tegen verhoging van de CO<sub>2</sub>-emissieprijs. Maar niet allemaal. Opvallend is dat een bedrijf als Shell voor een CO<sub>2</sub>-tax van circa 30 €/ton is.

In de berekening van de reductiekosten is de CO<sub>2</sub>-prijs expres op nul gesteld zodat makkelijk gecorrigeerd kan worden voor de CO<sub>2</sub>-prijs die men verwacht in 2020 door de betreffende prijs van de reductiekosten af te trekken.

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



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

Wij hebben daarbij de volgende voorbeelden gekozen:

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

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

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

Hierbij is het interessant dat de minimale reductiekosten van 500 €/ton, zoals weergegeven voor elektrische auto's, gebaseerd zijn op een door McKinsey verwachte sterke daling van de kosten van brandceltechnologie. Mogelijk zal verdere bestudering van bijvoorbeeld de optie demontabel bouwen uitwijzen dat voor deze optie ook sterke kostenreducties mogelijk zijn tussen nu en 2020.

### 3.3 Gevoeligheidsanalyse

De kostencurves zijn opgesteld op basis van beperkt beschikbare informatie in een korte tijd. Daarnaast gaat het bij veel opties om innovatieve technologie, die nog niet grootschalig commercieel toegepast wordt. Er zit daarom een onzekerheidsmarge op zowel de ingeschatte reductiekosten als op het technische en het realistische reductiepotentieel.

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

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



### 3.3.1 Marktprijs als basis voor inschatting van reductiekosten

De reductiekosten zijn ingeschat op basis van marktprijzen en de waarschijnlijkheid dat deze hoger of lager zullen worden door het invoeren van een bepaalde verduurzamingsoptie. Gezien de beperkte scope van dit onderzoek en de hoge mate van strategische waarde die door bedrijven aan het geheimhouden van daadwerkelijke kosten en dus winstmarges gehecht wordt, is er zeker wel het één en ander op deze kosten af te dingen. Voor de meeste opties wordt de onzekerheid van de berekeningsmethode ingeschat tussen de 10 en 30%.

Bij een paar opties lijken veel grotere afwijkingen mogelijk:

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

### 3.3.2 Reductiepotentieel en reductiekosten moeten nu al aangetoond kunnen worden

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

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



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

Het reductiepotentieel is het berekend uitgaande van dezelfde beton- en cementbehoefte als in 2010. Dit is gedaan om te zorgen dat het resulterende reductiepotentieel ook vergeleken kan worden met de totale CO<sub>2</sub>-emissie van 3.700 kton, die berekend was voor het betongebruik in 2010 (CE Delft, 2013). Als er echter meer gebouwd wordt in 2020 dan in 2010 dan stijgt ook het reductiepotentieel per optie. Het besparingspotentieel als aandeel van de voetafdruk zoals berekend voor 2010 stijgt daardoor niet.

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

### 3.4 Samenvatting

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

Hieruit kunnen we de volgende conclusies trekken:

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

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

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

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

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





# 4 Conclusies en aanbevelingen

De achtergrond van dit project is om een overzichtelijke samenvatting te presenteren van de 16 verduurzamingsopties. Zodat het Platformoverleg, weloverwogen en goed geïnformeerd 10 prioritaire handelingsperspectieven kan kiezen.

In een vervolgproject worden deze 10 handelingsperspectieven zover uitgewerkt, dat ze als basis kunnen dienen voor werkafspraken en middellange termijndoelstellingen voor de Green Deal Beton in de vorm van de overeenkomst 'Concreet 2.0'.

## 4.1 Kostencurve

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

Centraal in de kostencurve staan het reductiepotentieel en de reductiekosten. Het reductiepotentieel is het technisch potentieel om CO<sub>2</sub> te reduceren van de verduurzamingsoptie. Hierbij is het reductiepotentieel berekend door uit te gaan van wat de maximale graad van toepassing zou kunnen zijn in 2020 als alles op alles gezet werd om de betreffende verduurzamingsoptie zo snel mogelijk klaar te krijgen voor een verantwoord gebruik in de markt.

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

De reductiekosten zijn de kosten die gemaakt moeten worden om de emissie van een ton CO<sub>2</sub> te voorkomen door inzet van de betreffende verduurzamingsoptie.

Uit de kostencurve kunnen we de volgende conclusies trekken:

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

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

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

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

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

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



Vanwege de grote onduidelijkheid over de kosten van CO<sub>2</sub>-emissierechten, zijn deze niet opgenomen in de berekening van de reductiekosten. Het effect van de CO<sub>2</sub>-emissierechten kan verrekend worden door de verwachte CO<sub>2</sub>-emissiekosten van de reductiekosten af te trekken.

De reductiekosten van alle verduurzamingsopties zijn lager dan de reductiekosten van een zeer populaire methode om CO<sub>2</sub>-emissies te reduceren: elektrische auto's, zie Figuur 3.

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

Het gaat hierbij om de opties:

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

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

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

## 4.2 Kiezen van verduurzamingsopties

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

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

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

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

Hieronder geven we aan hoe je dat zou kunnen doen:

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





- Langere levensduur van betonproducten: in deze categorie lijkt de optie zelfhelend beton kansrijk.
- Verminderen energiegebruik in de gebruiksfase: in deze categorie is de optie betonkernactivering de enige optie. Echter, we raden aan om deze optie vooral te zien als een systeem waardoor beton deel uit kan maken van duurzaam bouwen en niet zo zeer als een manier om de CO<sub>2</sub>-emissie ten gevolge van betongebruik te verminderen.

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





# Literatuur

## **CE Delft, 2013**

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

## **CPB, 2013**

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

## **Fennis, 2011**

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

## **HM Treasury, 2011**

Carbon price floor consultation: the Government response  
Publicatie van HM Treasury, ISBN 978-1-84532-845-0  
Beschikbaar via:  
[www.hm-treasury.gov.uk/d/carbon\\_price\\_floor\\_consultation\\_govt\\_response.pdf](http://www.hm-treasury.gov.uk/d/carbon_price_floor_consultation_govt_response.pdf)

## **CE Delft, 2011**

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

## **SER, 2013**

Energieakkoord voor duurzame groei (versie september 2013)  
Beschikbaar via:  
[www.ser.nl/-/media/files/internet/publicaties/overige/2010\\_2019/2013/energieakkoord-duurzame-groei/energieakkoord-duurzame-groei-09-09-2013.ashx](http://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

