Kostencurves beton 2020

CE Delft

Committed to the Environment

Kostencurves beton 2020

Versie januari 2021

Dit rapport is geschreven door:
Sanne Nusselder, Isabel Nieuwenhuijse, Maarten Bruinsma

Delft, CE Delft, oktober 2020, aanpassing januari 2021

Publicatienummer: 20.190459.131

Beton / Ketenbeheer / Productie / Innovatie / Duurzaamheid / Kosten / Overheidsbeleid / Kooldioxide / Reductie

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij Isabel Nieuwenhuijse (CE Delft)

© 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 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

Aanpassing ten opzichte van versie oktober 2020 4

Samenvatting 5

Verklarende woordenlijst 13

1 Introductie 14

2 Eerder uitgevoerd onderzoek 16
2.1 Prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen (o.a. (CE Delft, 2016)) 16
2.2 Kostencurves scope 3-upstream Rijkswaterstaat (CE Delft, 2018) 17
2.3 Verduurzaming betongebruik bij RWS (CE Delft ; Delta Concrete Consult, 2019) 18
2.4 Kostencurves asfalt 2019 19

3 Aanpak en Methodiek 21
3.1 Kostencurve methodiek 21
3.2 Data en bronnen 26
3.3 Onzekerheden 27

4 Selectie innovaties 30
4.1 Selectiecriteria 30
4.2 Geïnventariseerde innovaties 30
4.3 Geselecteerde innovaties 31

5 Onafhankelijke kostencurves 38
5.1 Reductiepotentieel per m^3 2020 38
5.2 Reductiepotentieel per innovatie bij Rijkswaterstaat in 2020 41
5.3 Reductiepotentieel per m^3 2030 43
5.4 Reductiepotentieel per innovatie bij Rijkswaterstaat in 2030 46
5.5 Onafhankelijke kostencurve Rijkswaterstaat 2030 48

6 Afhankelijke kostencurves 52
6.1 Combinatiematrix 52
6.2 Innovatiepakketten 54
6.3 Afhankelijke kostencurve 2020 55
6.4 Afhankelijke kostencurve 2030 57
6.5 Doelstellingen Rijkswaterstaat 61

7 Onzekerheden 62
7.1 Achtergrondscenario 62
7.2 Toepasbaarheid 64

	7.3 TRL en betrouwbaarheid van de gebruikte gegevens	67
8	Conclusies en aanbevelingen	68
	8.1 Innovaties en regelgeving	68
	8.2 Handelingsperspectieven innovatiebeleid	71
	8.3 Handelingsperspectieven duurzaam inkopen	75
	8.4 Verder onderzoek innovaties	78
9	Bibliografie	82
A	Areaalgegevens	90
	A.1 Volume betongebruik Rijkswaterstaat per jaar	90
	A.2 Volume betongebruik per objectcategorie	93
	A.3 Samenstelling beton per objectcategorie	94
B	Gebruikte gegevens voor berekeningen	95
	B.1 Algemene kengetallen energie en transport	95
	B.2 Module A1: Materialen	97
	B.3 Module A2 & A4: Transport	99
	B.4 Module A3: Productie	102
	B.5 Module A5: Bouw- en installatieproces, aanleg	103
	B.6 Module B1-B7: gebruiksfase	105
	B.7 Module C1-D: Sloop en verwerkingsfase	105
C	Beschrijving innovaties	109
	C.1 Carbstone™	109
	C.2 CSA-beliet	114
	C.3 Geopolymeren	119
	C.4 Solidia	131
	C.5 Carbon8	135
	C.6 Mechanische grind-/zandrecycling	140
	C.7 Mechanische cementrecycling	144
	C.8 Mechanische/thermische cementrecycling	147
	C.9 Basaltvezelstaven	151
	C.10 Staalvezels	156
	C.11 CO_2-afvang en opslag bij cementklinkerproductie (CCS)	161
	C.12 Demontabel bouwen	167
	C.13 Optimaal ontwerpen en bouwen	168
	C.14 Alternatieve materialen/alternatieve productiemethoden objecten	169
D	Beschrijving niet-geselecteerde innovaties	171
	D.1 Niet-geselecteerde innovaties	171

Aanpassing ten opzichte van versie oktober 2020

In deze versie van dit rapport is de eenheid van het reductiepotentieel dat is bepaald voor 2020 en 2030 door het toepassen van betoninnovaties in de jaren op het areaal van Rijkswaterstaat aangepast naar ton CO_2-eq. en € MKI. In de eerder versie stond er achter deze eenheden nog "/jaar".

In principe was die eenheid niet fout, maar het zou tot verwarring kunnen leiden wanneer deze studie naast onze eerdere kostencurvestudie voor Rijkswaterstaat over asfalt uit 2019 wordt gehouden (CE Delft en TNO, 2019a). Hierin worden eenheden per jaar gegeven omdat er voor de resultaten is teruggerekend over de levensduur. Dat is in de huidige studie over beton niet gedaan. Daarom is het verwarrend om hier ook eenheden per jaar te gebruiken (ook al kijken we naar het areaal per jaar van Rijkswaterstaat). De nieuwe eenheden kunnen worden gelezen als ton CO_2-eq.-reductie of € MKI-reductie ***in*** het beschouwde jaar.

Samenvatting

Introductie

De Rijksoverheid heeft als doel om in 2050 95% minder broeikasgassen (in CO_2-eq.) uit te stoten dan in 1990. Als tussendoel is voor 2030 gesteld dat een reductie van tenminste 49% behaald moet worden en eind 2020 moet al een reductie van 25% behaald zijn (Rijksoverheid, 2019a). Het ministerie van IenW en Rijkswaterstaat stellen zichzelf daarom de ambitie om alle projecten in 2030 klimaatneutraal uit te voeren (Ministerie van IenW, 2019).

Dit houdt in dat alle aanleg, onderhoud en sloop van de infrastructuur in beheer van Rijkswaterstaat in 2030 klimaatneutraal moet zijn. Dit geldt ook voor de aanleg, het onderhoud en de sloop van objecten waarin beton toegepast wordt.

Afbakening en doel

Om de verduurzaming van de betonketen voor objecten in beheer van Rijkswaterstaat te versnellen is Rijkswaterstaat op zoek naar een aantal concrete handelingsperspectieven. Het doel van deze studie is daarom tweeledig:

1. Handelingsperspectieven bieden voor het innovatie- en inkoopbeleid van Rijkswaterstaat voor duurzaam beton.
2. Handelingsperspectieven bieden voor het duurzaam inkopen van innovaties die leiden tot milieu-impactreductie en geïmplementeerd kunnen worden bij Rijkswaterstaat.

We focussen ons in deze studie op CO_2-reductie in het jaar 2030, en brengen daarbij ook in kaart welke stappen in 2020 al kunnen worden genomen om de klimaatdoelstellingen van Rijkswaterstaat in 2030 te bereiken. Er worden daarom alleen betoninnovaties meegenomen die minimaal een Technology Readiness Level (TRL) 6 hadden bij aanvang van deze studie omdat deze innovaties naar verwachting in 2026 technisch zijn uitontwikkeld en daarmee naar verwachting in 2030 breed toepasbaar zijn door Rijkswaterstaat

Methodiek

Om tot handelingsperspectieven te komen is het van belang om een overzicht te hebben van de technische mogelijkheden om de klimaatimpact van beton dat door Rijkswaterstaat wordt ingekocht te reduceren. In deze studie stellen we daarom kostencurves op voor innovaties die kunnen leiden tot een reductie van de klimaatimpact (CO_2-eq.-emissies-reductie) en de MilieuKostenIndicator-waarde (€ MKI-reductie). Hierbij wordt zowel het totale reductiepotentieel op het areaal van RWS in 2020 en 2030 (ton CO_2-eq. en € MKI) als de kosten om deze reductie te behalen (€/ton CO_2-eq. en €/€ MKI) inzichtelijk gemaakt. Daarnaast presenteren we van iedere geselecteerde innovatie de CO_2-eq.-reductie en MKI-reductie per m^3 beton. Om zo goed mogelijk aan te sluiten bij het areaal van Rijkswaterstaat en de ontwikkeling van de verschillende innovaties per type betonobject te kunnen bekijken, maken we gebruik van Objectcategorieën (OC's), zie Figuur 1. We nemen in deze studie alleen betoninnovaties mee, en kijken niet naar innovaties voor bijvoorbeeld de werktuigen op de bouwplaats, ook al hebben die innovaties ook invloed op de impact van beton.

Figuur 1 - Objectcategorieën (toepassing) van beton

Bron figuur: CE Delft ; Delta Concrete Consult (2019).

Voor het bepalen van het reductiepotentieel in 2020 en 2030 wordt de milieu-impact van de maatregel afgezet tegen een referentie. Met behulp van betonexperts bij Rijkswaterstaat is een inschatting gedaan van de hoeveelheid gebruikt beton per jaar per objectcategorie door RWS (het 'areaal'). Ook van de samenstelling van beton in iedere objectcategorie is een inschatting gedaan. Zo heeft iedere categorie een ander referentiebeton.

Voor het bepalen van het reductiepotentieel maken we gebruik van gegevens uit de Nationale Milieudatabase (NMD) versie 3.1 en de Ecoinvent v3.5 database (cut-off). Hierbij volgen we zoveel mogelijk de modellering van beton in DuboCalc 5.1 in 2020. Tot slot maken we voor het bepalen van het reductiepotentieel gebruik van gegevens uit literatuur, de bronnen worden toegelicht per innovatie. Voor het bepalen van de kosten maken we gebruik van gegevens uit (CE Delft, 2020c), voor de innovaties baseren we ons op informatie van marktpartijen en betonexperts. sluiten we zoveel mogelijk bij al bekende kosten uit (CE Delft en TNO, 2019b).

We kijken in de kostencurve naar de kosten voor RWS. De kosten zijn het saldo van kosten en baten in de investering en beheer en onderhoud van een maatregel inclusief de baten van energiebesparing of duurzame energieproductie. We gaan hierbij uit van:
- een discontovoet van 3%;
- het prijspeil van 2019;
- kosten inclusief 21% btw.

De externe effecten en maatschappelijke kosten en baten blijven buiten beschouwing evenals R&D kosten. Investeringskosten worden alleen meegenomen als de inschatting is dat deze kosten doorgerekend zullen worden aan Rijkswaterstaat.

Resultaten

Afhankelijke kostencurves: te behalen klimaatimpactreductie in 2020 en 2030 op basis van door ons meegenomen innovaties

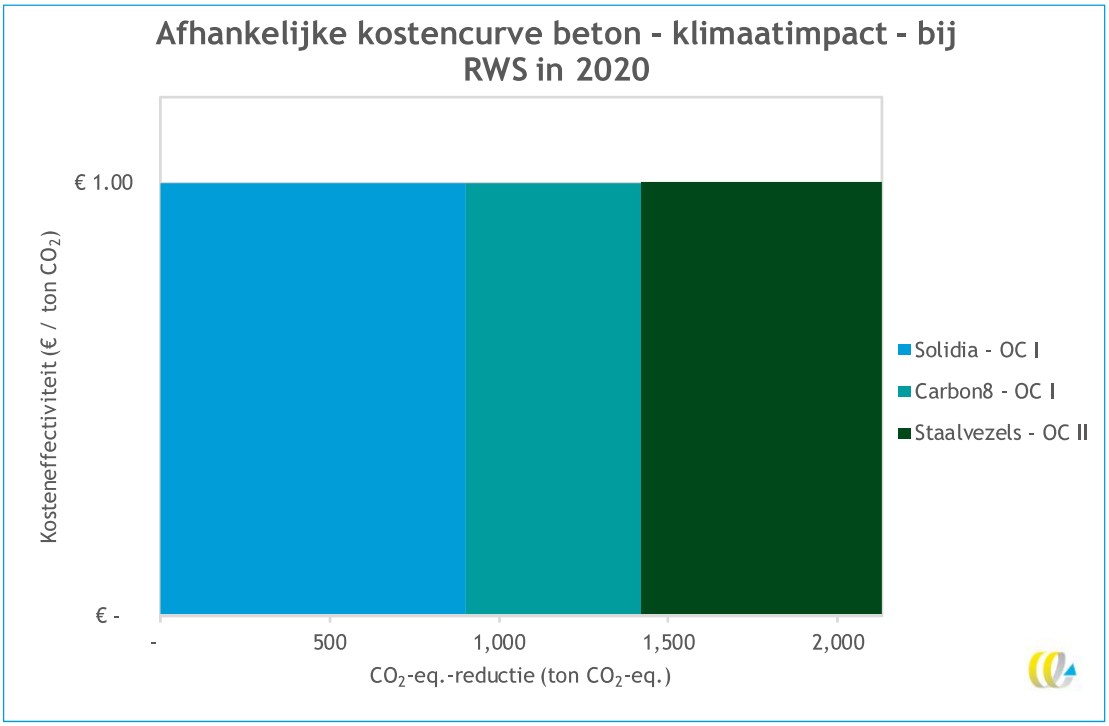
De afhankelijke kostencurves zijn opgesteld door per objectcategorie een pakket samen te stellen van innovaties die de hoogste klimaatreductiepotentiëlen met zich meebrengen én samen toepasbaar zijn op hetzelfde areaal. Dit is gedaan voor 2020 en 2030, waarbij voor 2020 alleen innovaties beschikbaar zijn voor OC I en OC II. Voor die laatste categorie is slechts één innovatie beschikbaar in 2020: staalvezels. Het reductiepotentieel van de innovaties in de afhankelijke kostencurves in optelbaar. Die optelling geeft het maximale reductiepotentieel dat voor Rijkswaterstaat haalbaar is in dat jaar, met de door ons in deze studie meegenomen innovaties.

Als Rijkswaterstaat geen betoninnovaties toepast in betonprojecten (business-as-usual), dan is de klimaatimpact van betongebruik 188.300 ton CO_2-eq. in 2020, wanneer wordt uitgegaan van het door ons ingeschatte areaal en samenstelling van referentiebeton in iedere objectcategorie. Uit de afhankelijke kostencurve voor 2020 (Figuur 2) blijkt dat een reductie van 2.131 ton CO_2-eq. in 2020 mogelijk is door het toepassen van de in dat jaar beschikbare en meest veelbelovende innovaties. Dit is een reductie van ongeveer 1% ten opzichte van de business-as-usual-situatie. Tot slot is het belangrijk om te vermelden dat de innovatie staalvezels wel een CO_2-eq.-emissiereductie geeft, maar geen MKI-score-reductie.

We schatten in dat geen van de in 2020 beschikbare innovaties — Solidia, Carbon8 en staalvezels — een kostenstijging of -daling met zich meebrengen. De kosteneffectiviteit van de innovaties is daarom 0 (€/ton CO_2-eq.). Omdat de maatregelen daarmee niet zichtbaar zouden zijn in de kostencurve is deze handmatig op één gezet.

De belangrijkste onzekerheden worden genoemd in de toelichting bij de figuren. We gaan overal uit van 100% beschikbaarheid van de grondstoffen voor de innovaties, ook wanneer die onzeker zijn. Op alle onzekerheden wordt dieper ingegaan in de rapportage.

Figuur 2 - Afhankelijke kostencurve betoninnovaties klimaatimpact voor maatregelenpakket 2020

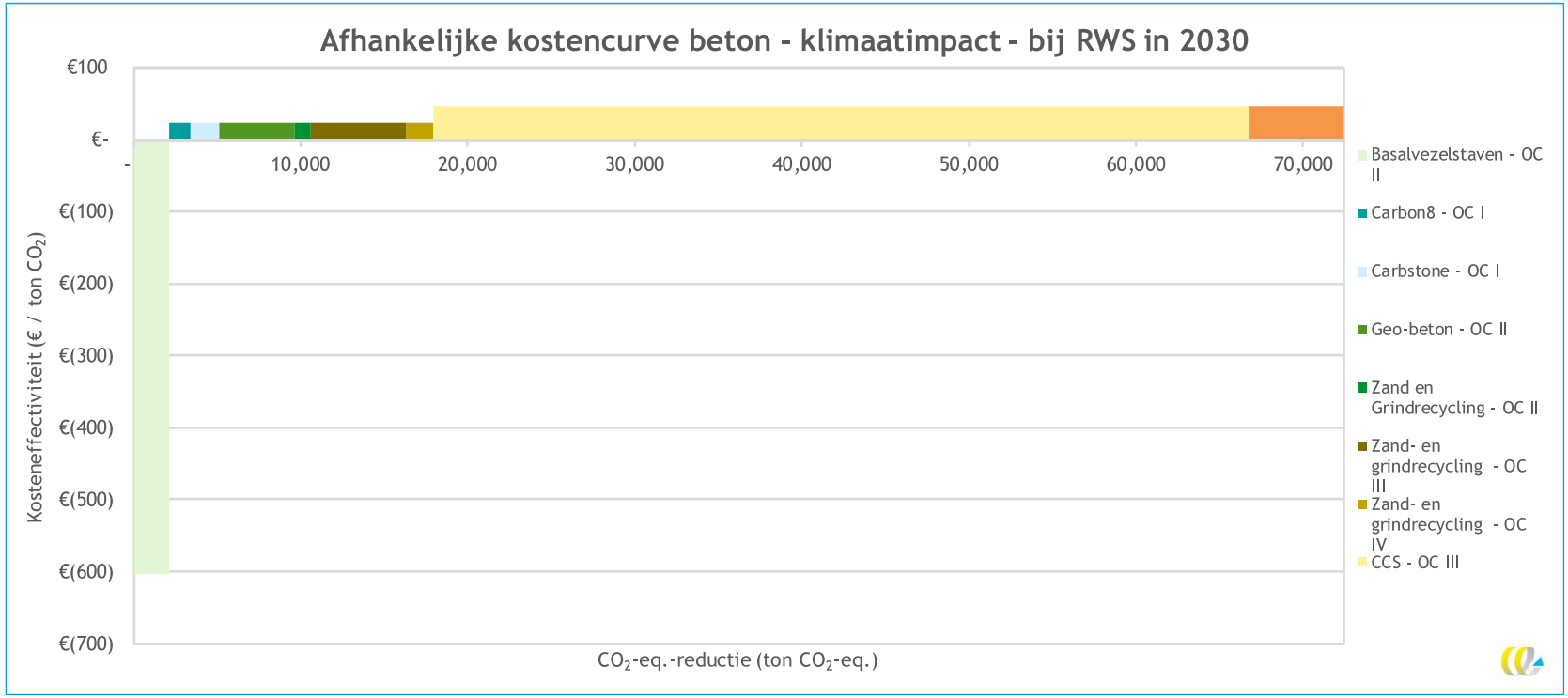


Let op!

- De kosteneffectiviteit van de maatregelen Solidia, Carbon8 en staalvezels zijn handmatig op een waarde rond de nul gezet om deze zichtbaar te maken in de grafiek. De kosteneffectiviteit is daadwerkelijk € 0/ton CO_2-eq.
- Carbon8 en Solidia slaan CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de CO_2-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.

Als Rijkswaterstaat geen betoninnovaties toepast in betonprojecten (business-as-usual), dan is de klimaatimpact van betongebruik 186.820 ton CO_2-eq. in 2030, wanneer wordt uitgegaan van het door ons ingeschatte areaal en samenstelling van referentiebeton. Uit de afhankelijke kostencurve voor 2030 (Figuur 3) blijkt dat een reductie van 72.490 ton CO_2-eq. in 2030 mogelijk is door het toepassen van de in dat jaar beschikbare en meest veelbelovende innovaties. Dit is een reductie van ongeveer 39% ten opzichte van de business-as-usual-situatie.

Figuur 3 - Afhankelijke kostencurve betoninnovaties klimaatimpact voor maatregelenpakket 2030



Let op!

- De kosteneffectiviteit van de maatregelen Carbon8, Carbstone™, Geo-beton™ en zand- en grindrecycling zijn handmatig op een waarde rond de nul gezet om deze zichtbaar te maken in de grafiek. De kosteneffectiviteit is daadwerkelijk € 0/ton CO_2-eq.
- Carbon8 en Carbstone™ slaan CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de CO_2-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.

Uit deze resultaten blijkt dat op basis van de door ons meegenomen innovaties, de doelstelling voor 2030 *klimaatneutraal werken* niet kan worden gehaald. Omdat de klimaatimpact van betongebruik door Rijkswaterstaat in 1990 niet bekend is, kunnen we de potentiele reductie niet kunnen afzetten tegen dat jaar. De verwachting is dat de impact in 1990 hoger was dan de impact van het business-as-usual-scenario voor 2030. Daarmee kunnen we wel stellen dat het reductie die met het door ons voorgestelde innovatiepakket voor 2030 te behalen is ten opzichte van 1990 groter is dan 39%.

Aanbevelingen

Veelbelovende innovaties

In Figuur 4 wordt voor iedere in deze studie meegenomen betoninnovatie het CO_2-eq.-reductiepotentieel per m^3 in 2030 weergegeven. Daarbij wordt ook getoond wat de onzekerheid van de berekeningen is, op basis van het TRL van de innovatie op dit moment en de bron van de gebruikte gegevens. De genoemde onzekerheidspercentages zijn niet kwantitatief te gebruiken op de gepresenteerde resultaten, ze geven slechts een mate van onzekerheid aan op een schaal van 0-100%. Daarnaast zijn de belangrijkste maatregelspecifieke onzekerheden in de toelichting bij de figuur beschreven. We gaan overal uit van 100% beschikbaarheid van de grondstoffen voor de innovaties, ook wanneer die onzeker zijn.

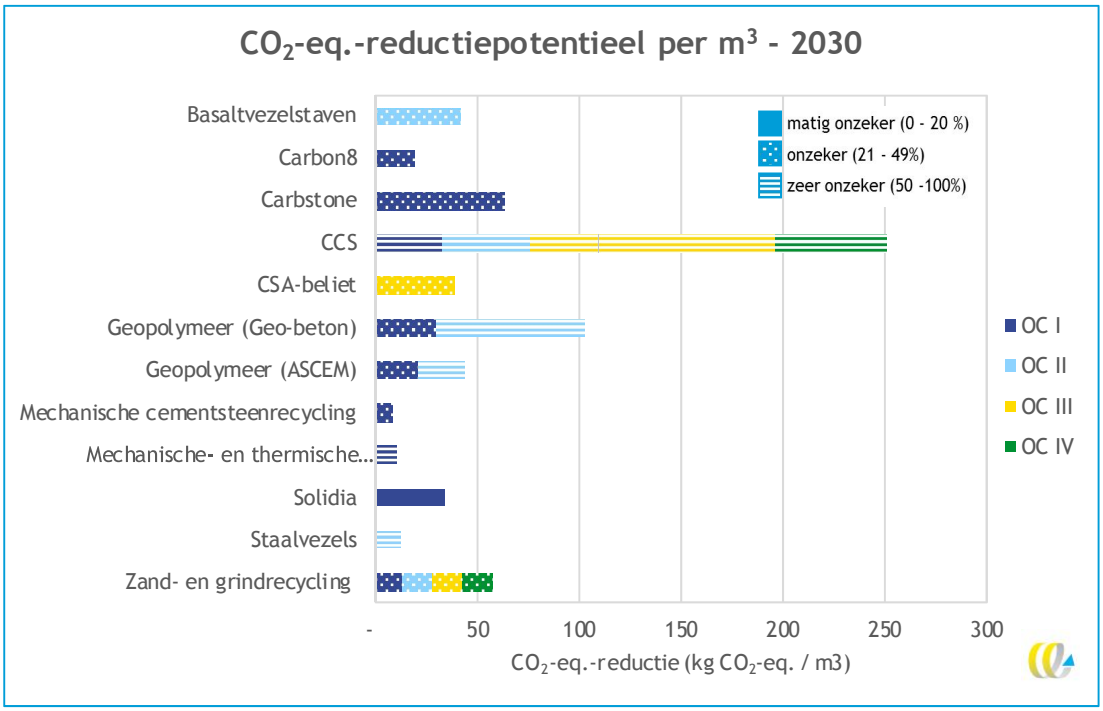
Op basis van de uitkomsten van dit onderzoek wordt aangeraden om CSA-beliet, verschillende soorten geopolymeren (zowel ASCEM®-cement en Geo-beton™ als andere geopolymeren), mechanische/thermische recycling en alternatieve wapening zoals basaltvezelstaven te (blijven) ondersteunen via het launching customer-traject. Daarnaast is demontabel bouwen een interessante innovatie voor de kunstwerken van Rijkswaterstaat. Dit zijn innovaties met veel potentie, maar waar nog wel een ontwikkeltraject voor nodig is om tot opschaling te komen. CCS bij cementklinkerproductie heeft ook veel potentie, maar lijkt niet heel geschikt voor het launching customer-traject, aangezien het beton niet verandert door deze innovatie. Er zijn dan geen testen nodig zijn om de functionaliteit ervan vast te stellen.

Carbstone™, Solidia en Carbon8 zijn alleen relevant voor toepassing in Objectcategorie I en hebben alle drie TRL 9. Deze innovaties hoeven dus niet verder technisch te worden ontwikkeld in een launching customer-traject.

Binnen launching customer-trajecten is het ook interessant om te kijken naar welke combinaties van innovaties mogelijk zijn, zeker wanneer innovaties richting TRL 8/9 gaan. Denk hierbij aan recycling in combinatie met betoninnovaties of betoninnovaties in combinatie met wapeningsinnovaties.

Tot slot is het belangrijk om te noemen dat Rijkswaterstaat relatief veel beton in Objectcategorie III en IV beheerd. Uit deze studie blijkt dat er naar verwachting nog maar weinig innovaties al in 2030 beschikbaar zijn voor deze objectcategorieën. Het is daarom aan te bevelen daar expliciet naar te kijken: wat is er mogelijk om innovatietrajecten te versnellen, zodat ook voor de zwaardere constructies sneller alternatieven beschikbaar komen.

Figuur 4 - Onafhankelijk CO_2-eq.-reductiepotentieel per m^3 - 2030



Toelichting: Alleen de innovaties met TRL 9 in 2030 zijn getoond in deze figuur. De weergegeven onzekerheid gaat over de bron van de gebruikte gegevens en het TRL van de innovatie.

Let op!

- Carbon8, Solidia en Carbstone™ slaan alle drie CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de CO_2-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit.
- Het gaat bij mechanische cementsteenrecycling om 15% gerecycled cement, en bij mechanische- en thermische cementsteenrecycling om 20% gerecycled cement (de rest is regulier cement).

Innovatiebeleid

Interviews met betonexperts uit de markt en Rijkswaterstaat en literatuur hebben we inzicht gekregen in het innovatiebeleid van Rijkswaterstaat. Hieruit volgen nog een aantal extra aanbevelingen Deze gaan vooral over het gebied tussen innoveren en het breed toepassen van een innovatie wanneer deze technisch is uitontwikkeld

- Maak tijd en budget vrij om een technisch marktrijpe innovatie in te bedden in de praktijk.
- Speel vroeg in de technische ontwikkeling van een innovatie in op de mogelijke acties die nodig zijn om een innovatie toe te mogen passen binnen normen en regelgeving.
- Ontwikkel een protocol voor marktpartijen dat duidelijk maakt hoe een innovatie van pilot naar praktijk kan komen. Geef daarnaast marktpartijen perspectief op afname van de innovaties in de toekomst.

- Blijf aandacht houden voor verschillende milieu-impacts: let naast klimaatimpact op grondstofbeschikbaarheid en risico op impactverschuiving (bij deze laatste kan MKI helpen).
- Ontwikkel een systeem binnen Rijkswaterstaat om bij te houden welke betonobjecten in beheer zijn, welke hoeveelheden en soorten beton hierin aanwezig zijn en hoeveel er jaarlijks wordt gebruikt. Idealiter zou onderscheid worden gemaakt tussen een aantal categorieën beton(objecten), zoals in deze studie in gedaan met de objectcategorieën. Zo kan goed worden bekeken voor welk deel van de objecten in beheer van RWS bepaalde innovaties al geschikt zijn. Zie ook het punt over het Materialenpaspoort onder het kopje Inkoopbeleid.
- Ontwikkel een methodiek waarin kennis uit pilots systematisch kan worden bijgehouden, zodat opgedane ervaring niet verloren gaat.
- Werk samen met medewerkers uit de gehele organisatie: zo worden innovaties zo goed mogelijk ontwikkeld om aan te sluiten bij de dagelijkse praktijk (denk aan collega's van inkoopafdelingen, projectleiders, e.d.).

Inkoopbeleid

We kunnen ook een aantal aanbevelingen formuleren over het inkoopbeleid van Rijkswaterstaat. Deze zijn met name gericht op het overbruggen van de kloof tussen innovatie, milieudoelstellingen en inkoop in de praktijk:

- Om alle milieu-impacts in de gaten te houden, zou het goed zijn om zowel op MKI als op specifiek klimaatimpact te laten rapporteren bij de inkoop van beton. Werk hierbij samen met andere opdrachtgevers, zodat duurzaamheid uniform wordt uitgevraagd.
- Ga naar uitvragen op functionaliteit in plaats van op materiaal. Hierdoor krijgen alternatieve materialen voor beton, zoals hout, meer ruimte.
- Integreer duurzaamheid in projectontwikkeling, bijvoorbeeld door verplichtingen en handreikingen, en kennisverspreiding over doelstellingen en mogelijkheden.
- Neem de gehele levensduur van kunstwerken mee in de inkoop. Zo kan al bij de inkoop worden nagedacht over hoe het beton aan het eind van de levensduur zo schoon mogelijk kan worden teruggewonnen (door middel van hergebruik van onderdelen of recycling).
- Ontwikkel een instrumentarium waarmee duurzaamheid kan worden meegenomen in de ontwerpfase van een project. Ruim hiervoor ook tijd in: ieder project is anders en zal een andere optimale invulling van duurzaamheid hebben.
- Ontwikkel een toetsingsmethode om te controleren of innovaties die op de bouwplaats moeten plaatsvinden daadwerkelijk worden uitgevoerd.
- Zet in op het gebruik van een Materialenpaspoort. Dit kan veel kansen bieden voor zowel circulariteit als milieu-impact.
- Behoud zeggenschap over sloopmaterialen. Deze vervallen nu vaak aan de aannemer. Door zeggenschap over sloopmaterialen uit eigen objecten te houden, kan hoogwaardige toepassing (hergebruik en recycling) van deze materialen in de toekomst beter worden gewaarborgd en gestimuleerd door Rijkswaterstaat.

Verklarende woordenlijst

Term	Toelichting
AEC	Afvalenergiecentrale
CCU	Carbon Capture and Utilization, koolstofafvang en toepassing in het Nederlands.
CCS	Carbon Capture and Storage, koolstofafvang en opslag in het Nederlands.
CO_2-eq.	Een optelling van de klimaatimpact van alle broeikasgassen, uitgedrukt in de klimaat-impact van de emissie van CO_2. De klimaatimpact van de emissies van 1 kg N_2O is bijvoorbeeld 298 kg CO_2-eq.
Objectcategorie (OC)	Objectcategorieën van beton is een groepering van verschillende typen objecten die gebouwd kunnen worden op basis van beton. In deze studie onderscheiden we de volgende categorieën op basis van (CE Delft ; Delta Concrete Consult, 2019): – Objectcategorie I: Kleine niet constructieve betonwaren – Objectcategorie II: Klein gewapend beton – Objectcategorie III: Grote voorgespannen elementen – Objectcategorie IV: Complexe zwaarbelaste constructies
RWS	Rijkswaterstaat
Stikstof	Stikstof is een element (N_2). Stikstof is niet schadelijk. Wél zijn er soorten stikstofverbindingen die schadelijk zijn. Als we spreken over stikstof(emissies) in deze rapportage bedoelen we daarmee stikstofoxiden (NO_x). Dit zijn emissies die vrijkomen door de verbranding van (fossiele) brandstoffen).

1 Introductie

Verduurzaming betonketen: Nederland

Al jaren wordt in Nederland gewerkt aan verduurzaming van de betonketen. In 2018 is het Betonakkoord voor Duurzame Groei ondertekend door de Rijksoverheid, diverse gemeenten en provincies, ProRail en verschillende partijen uit de betonsector. Binnen dit akkoord is de ambitie uitgesproken om in 2030 over de gehele keten 49% minder broeikasgassen uit te stoten dan in 1990, met als ondergrens minimaal 30% minder uitstoot. Daarnaast is afgesproken om 100% hoogwaardig hergebruik van beton te realiseren in 2030.

Verduurzaming betonketen: Rijkswaterstaat

Klimaatimpactreductie

De Rijksoverheid heeft als doel om in 2050 95% minder broeikasgassen (in CO_2-eq.) uit te stoten dan in 1990. Als tussendoel is voor 2030 gesteld dat een reductie van tenminste 49% behaald moet worden en eind 2020 moet al een reductie van 25% behaald zijn (Rijksoverheid, 2019a). Het ministerie van IenW en Rijkswaterstaat stellen zichzelf daarom ten doel dat alle projecten in 2030 klimaatneutraal moeten zijn (Ministerie van IenW, 2019).

Dit houdt in dat alle aanleg, onderhoud en sloop van de infrastructuur in beheer van Rijkswaterstaat in 2030 klimaatneutraal moet zijn. Ook de aanleg, het onderhoud en de sloop van objecten waarin beton toegepast wordt.

Circulaire economie

De Rijksoverheid heeft als doel om een volledige circulaire economie in Nederland te hebben gerealiseerd in 2050. Dit houdt in dat alle reststromen in 2050 hoogwaardig toegepast kunnen worden en afval niet meer bestaat. Als tussendoel is gesteld dat er in Nederland 50% minder materiaalverbruik plaatsvindt in 2030. Aangezien de bouwsector 50% van het materialenverbruik in Nederland voor zijn rekening neemt, is er speciale aandacht voor deze sector. Voor Rijkswaterstaat is zodoende een strenger doel gesteld, namelijk 100% circulair werken in 2030 (Rijksoverheid, 2019b) (Rijkswaterstaat, 2019).

Dit houdt in dat alle betonreststromen vanaf 2030 blijvend kunnen worden toegepast in nieuw beton en dat alle vrijkomende betonreststromen vanaf 2030 terug worden genomen door de betonketen (Rijksoverheid, et al., 2018).

Doel studie

Om de verduurzaming van de betonketen voor objecten in beheer van Rijkswaterstaat te versnellen is Rijkswaterstaat op zoek naar een aantal concrete handelingsperspectieven. Het doel van deze studie is daarom tweeledig:

1. Handelingsperspectieven bieden voor het innovatie- en inkoopbeleid van Rijkswaterstaat voor duurzaam beton. Hierbij is het belangrijk om in kaart te brengen wat de belemmeringen zijn om betoninnovaties die leiden tot milieu-impactreductie geïmplementeerd te krijgen in de reguliere opgave bij Rijkswaterstaat.

2. Handelingsperspectieven bieden voor het duurzaam inkopen van innovaties die leiden tot milieu-impactreductie en geïmplementeerd kunnen worden bij Rijkswaterstaat. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het aanpassen van de bestaande plafondwaardes die gehanteerde worden bij het inkopen van beton.
3. Deze studie is een update van eerdere studies, die worden geïntroduceerd in Hoofdstuk 2.

Aanpak en Methodiek

Om tot handelingsperspectieven te komen is het van belang om een overzicht te hebben van de technische mogelijkheden voor het reduceren van de klimaatimpact van beton dat door Rijkswaterstaat wordt ingekocht. In deze studie stellen we daarom kostencurves op voor betoninnovaties die kunnen leiden tot een milieu-impactreductie op het gebied van klimaatimpact (CO_2-eq.-emissiesreductie) en MilieuKostenIndicator-waarde (€ MKI-reductie). Hierbij wordt zowel het totale reductiepotentieel op het areaal van RWS in 2020 en in 2030 (ton CO_2-eq. en € MKI) als de kosten om deze reductie te behalen (€/ton CO_2-eq. en €/€ MKI) inzichtelijk gemaakt. Daarnaast presenteren we van iedere geselecteerde innovatie de CO_2-eq.-reductie en MKI-reductie per m^3.

Omdat er meer milieu-impacts zijn dan alleen klimaatimpact — bijvoorbeeld stikstof-emissies en grondstoffengebruik — nemen we deze ook mee in deze studie in de vorm van de MilieuKostenIndicator (MKI), die nu al in de inkoop van beton wordt gebruikt. Op die manier houden we in de gaten dat een focus op klimaatdoelstellingen niet leidt tot een verschuiving naar andere milieu-impacts.

Leeswijzer

De indeling van deze rapportage is als volgt:
- in Hoofdstuk 2 geven we een overzicht van eerder uitgevoerd onderzoek waar dit rapport op voort bouwt;
- in Hoofdstuk 3 beschrijven we de aanpak en methodiek in meer detail;
- in Hoofdstuk 4 beschrijven we de geïnventariseerde innovaties in het kort, evenals de geselecteerde innovaties om op te nemen in de kostencurves;
- in Hoofdstuk 5 en 6 geven we respectievelijk de onafhankelijke en afhankelijke kostencurves weer;
- in Hoofdstuk 7 geven we een overzicht van de onzekerheden in de analyse;
- in Hoofdstuk 8 doen we aanbevelingen over handelingsperspectieven voor innovatie-beleid en voor duurzaam inkopen.

Alle achtergrondgegevens en achtergrondinformatie over de innovaties zijn terug te vinden in de bijlagen.

2 Eerder uitgevoerd onderzoek

Deze studie bouwt voort op eerdere studies uitgevoerd door CE Delft op het gebied van beton en kostencurves in 2016, 2018 en 2019. In hoofdstuk lichten we kort de samenhang tussen dit onderzoek en eerder uitgevoerd onderzoek toe. Voor de rapportages over beton doen we dit in chronologische volgorde om zo de kennisopbouw over een duurzame betonketen door de jaren heen weer te geven.

2.1 Prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen (o.a. (CE Delft, 2016))

In 2011 is de Green Deal Beton gesloten tussen de toenmalige ministeries van Economische Zaken en Infrastructuur & Milieu, 24 deelnemende bedrijven en zeven brancheorganisaties uit de betonketen. Zij werkten samen onder de vlag van MVO Nederland in het MVO Netwerk Beton. CE Delft heeft een aantal studies uitgevoerd ter ondersteuning van het MVO Netwerk Beton. Deze studies zijn input geweest voor het in 2018 afgesloten betonakkoord. De laatst uitgevoerde studie 'Update prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen 2016' bevat een overzicht van alle gegevens uit de eerdere studies voor het MVO Netwerk beton (CE Delft, 2016). Deze rapportage beschrijven we hieronder daarom kort.

In totaal zijn in deze rapportage zeventien verschillende innovaties beschreven om de CO_2-footprint van het Nederlandse betongebruik te verminderen. Van iedere innovatie is bepaald hoeveel CO_2 er bespaard zou kunnen worden; het reductiepotentieel.
Dit reductiepotentieel is berekend op basis van twee aannames:

1. Het technisch potentieel voor 2020 (dat wil zeggen wat kan er in 2020 veilig toegepast worden als vanaf 2016 iedereen meewerkt aan de benodigde technologie).
2. Het betongebruik zoals dat bekend is van 2010 zodat de besparing vergeleken kan worden met de CO_2-footprint in het referentiejaar 2010.

Daarnaast is berekend wat voor iedere optie de kosten waren om een ton CO_2-emissie te voorkomen; de kosteneffectiviteit. De kosteneffectiviteit zijn alle meerkosten van een innovatie gedeeld door alle CO_2 die niet geëmitteerd wordt door toepassing van een innovatie.

Omdat er een brede range aan technologieën is verkend van eerste (pilot)testen tot commercieel beschikbare technologieën is ook de volwassenheid van de technologie in kaart gebracht. Want hoe volwassener de technologie is hoe waarschijnlijker het berekende reductiepotentieel[1]. Op basis van de rijpheid van de technologie is geconcludeerd dat:

- 0,1 miljoen ton CO_2-reductie per jaar zeker is (TRL 9 in 2016);
- 0,6-0,8 miljoen ton CO_2-reductie per jaar waarschijnlijk is (TRL 6-8 in 2016);
- 0,3-0,5 miljoen ton CO_2-reductie per jaar onzeker is (TRL 1-5 in 2016).

Dit betekent dat bij elkaar 0,9 miljoen ton CO_2-reductie per jaar vanaf 2020 zeker/waarschijnlijk werd geacht, dit was 24% van de totale emissies in 2010. Zeker/waarschijnlijk betekende in dit geval een TRL van minimaal 6.

[1] Deze methodiek is niet geheel gelijk aan de in de huidige studie gebruikte methodiek om met onzekerheid door TRL om te gaan, die wordt beschreven in Paragraaf 3.3. We kunnen daarom geen vergelijking daarmee maken.

De innovaties waarvan het reductiepotentieel waarschijnlijk werd gezien in 2016, zijn met hun TRL en kosteneffectiviteit weergegeven in Tabel 1. Van deze innovaties is betonkern-activering[2] niet van toepassing op het areaal van Rijkswaterstaat omdat de objecten in beheer van Rijkswaterstaat niet verwarmd of gekoeld hoeven te worden tijdens hun gebruiksfase.

Tabel 1 - Innovaties waarvan het reductiepotentieel als 'waarschijnlijk' werd gezien in 2016

Innovatie	TRL in 2016	Kosteneffectiviteit (€/ton CO_2-emissiebesparing)
Betonkernactivering (kantoren)	9	0
Betonkernactivering (woningen)	9	26
Bodemas	9	Tussen -130 en -65
Bouwplanning (laagbouw)	9	Tussen -14 en 68
Bouwplanning (hoogbouw)	9	Tussen 708 en 1345
Carbon8 op basis van vliegas	9	0
CEM X cement	9	Tussen -130 en -65
Supergesulfateerd	9	0
Solidiacement	8-9	Tussen -100 tot -86
Geopolymeren	8	49
Zelfhelend beton	8	Tussen -4.569 en 111
Carbstone™-beton	7-8	0
Demontabel bouwen	7	Tussen 40 en 206
Mechanische cementrecycling	6-8	Tussen 0 en 2

Bron: (CE Delft, 2016)[3].

2.2 Kostencurves scope 3-upstream Rijkswaterstaat (CE Delft, 2018)

In 2018 heeft CE Delft kostencurves opgesteld voor (potentiele) innovaties die kunnen leiden tot klimaatimpactreductie in vier inkoopketens van Rijkswaterstaat: nat en droog grondverzet, asfalt en beton. Voor de inkoopketen 'beton' zijn de volgende innovaties bekeken (we nemen al deze innovaties behalve optimalisering korrelpakking (alleen kwalitatief) en supergesulfateerd cement ook mee in de huidige studie — zie Hoofdstuk 4 en Bijlage D voor meer informatie over wel en niet geselecteerde innovaties voor de huidige studie):

- optimalisering korrelpakking;
- solidiacement;
- carbstone™-beton;
- mechanische recycling;
- supergesulfateerd cement;
- CSA-belietcement;
- geopolymeren.

[2] Betonkernactivering is het gebruiken van de warmtecapaciteit van het beton in een woning of kantoor om de binnentemperatuur op een gewenste temperatuur te brengen en te houden.

[3] Opmerking Rijkswaterstaat: ondanks het hoge reductiepotentieel van de innovaties, is geen van de innovaties tot op heden ingekocht door Rijkswaterstaat of toegepast in een werk, met name vanwege uitdagingen met betrekking tot toepassing van innovatieve materialen in constructieve werken. We gaan daar in de huidige studie dieper op in (Hoofdstuk 8).

De innovaties in die studie waren geselecteerd omdat ze een hoge mate van technologische ontwikkeling kennen (TRL 8 of 9), een hoog reductiepotentieel hadden op basis van (CE Delft, 2016), ze relevant zijn voor betontoepassingen van Rijkswaterstaat en gegevens over de innovaties voor handen waren.

De milieu- en kostendata waren vooral afkomstig uit (CE Delft, 2016), deze studie staat beschreven in Paragraaf 2.1. Afwijkende resultaten tussen deze twee studies werden voornamelijk veroorzaakt door het verschil tussen het Nederlandse gemiddelde van betontoepassingen en de betontoepassingen van Rijkswaterstaat. Uit dit project bleek dat er nog veel onbekend was over de toepassingsmogelijkheden van alternatieve betonsoorten voor Rijkswaterstaat, vanwege de onzekerheid van de toepassing in constructieve objecten van veel van de alternatieve betonsoorten. Daarnaast is weinig bekend over hoe en of de innovaties te combineren zijn, omdat de innovaties zelf nog in ontwikkeling zijn.

Zelfhelend beton, demontabel bouwen en bouwplanning werden ook als veelbelovende innovaties voor Rijkswaterstaat genoemd, alleen waren tijdens het project niet genoeg gegevens beschikbaar om deze innovaties door te rekenen. Ook betonstaal is in deze studie niet meegenomen (CE Delft, 2018).

De resultaten zijn weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 - Resultaten innovaties bekeken in (CE Delft, 2018)

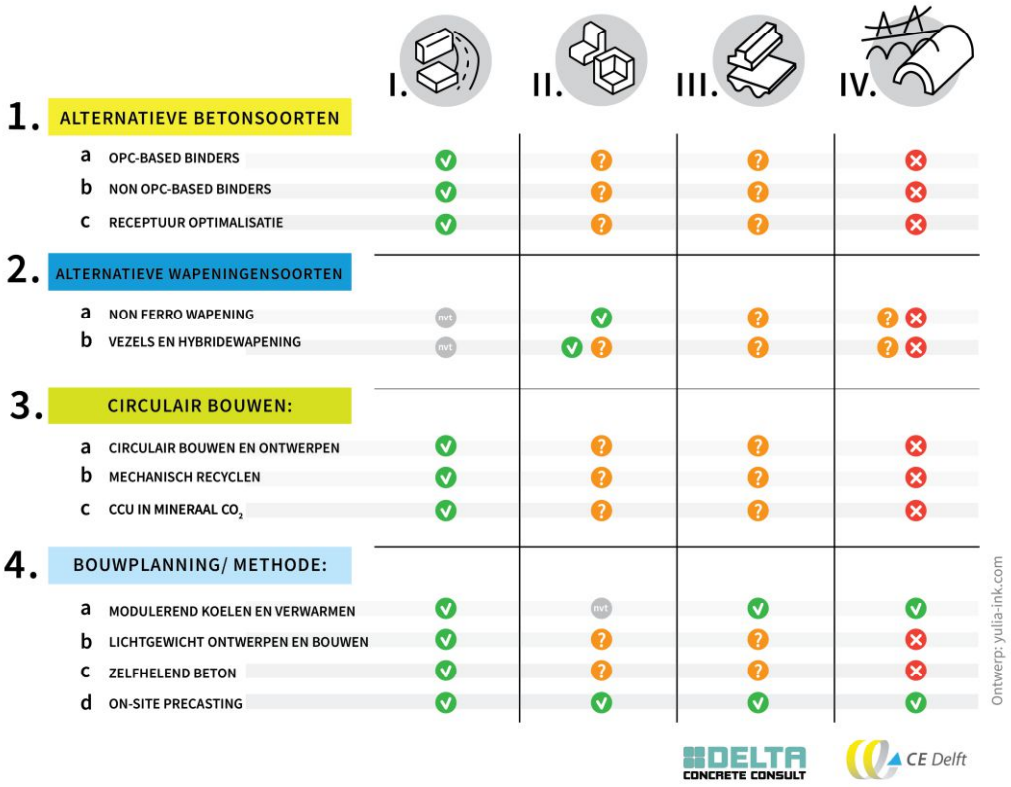
Innovatie	TRL in 2018	Kosteneffectiviteit (€/ton CO_2-emissiebesparing)
Optimalisering korrelpakking	Op basis van (CE Delft, 2016) (TRL 4-9)	Tussen -120 en 86
Solidiacement	Op basis van (CE Delft, 2016) (zie Tabel 1)	-78
Carbstone™-beton	Op basis van (CE Delft, 2016) (zie Tabel 1)	0
Mechanische recycling	Op basis van (CE Delft, 2016) (zie Tabel 1)	0
Supergesulfateerd cement	Op basis van (CE Delft, 2016) (zie Tabel 1)	0
CSA-belietcement	Op basis van (CE Delft, 2016) (TRL 5-8)	0
Geopolymeren	Op basis van (CE Delft, 2016) (zie Tabel 1)	59

2.3 Verduurzaming betongebruik bij RWS (CE Delft ; Delta Concrete Consult, 2019)

In 2019 is door CE Delft en Delta Concrete Consult een kansenmatrix opgesteld van technologiecategorieën voor vier typen objectcategorieën die bij Rijkswaterstaat te onderscheiden zijn. Figuur 5 geeft de kansenmatrix weer. Hierbij geldt de volgende legenda: 'De groene vinkjes geven aan welke technologieën al toegepast worden in de praktijk[4]. De oranje vraagtekens geven weer welke technologieën kansrijk zijn, maar wel wat verdere uitwerking behoeven. De object-technologie combinaties met een oranje vraagteken zijn zeer geschikt voor demonstratieprojecten bij Rijkswaterstaat. De rode kruisjes geven aan welke technologieën in een experimentele fase zitten'. De grijze figuurtjes geven aan 'niet van toepassing'.

[4] In een specifieke objectcategorie, zie voor meer informatie hierover Paragraaf 3.1 van de huidige studie.

Figuur 5 - Kansenmatrix voor technologiecategorieën voor gebruik bij Rijkswaterstaat



Bron: (CE Delft ; Delta Concrete Consult, 2019).

Uit Figuur 5 blijkt dat de technologiecategorieën al toegepast worden in de praktijk voor Objectcategorie I en in het geval van alternatieve wapeningssoorten voor Objectcategorie II. Voor toepassing in de Objectcategorieën II en III werd vaak aangemerkt als kansrijk voor demonstratieprojecten bij Rijkswaterstaat. Voor de Objectcategorie IV waren volgens CE Delft en Delta Concrete Consult (2019) nog nauwelijks kansrijke technologiecategorieën beschikbaar in 2019.

Naast een kansenmatrix bevatte de studie ook een overzicht van de normen die een invloed hebben op de ontwikkeling van de innovaties, evenals mogelijkheden binnen de normen om innovaties in demonstratieprojecten te kunnen toepassen.

2.4 Kostencurves asfalt 2019

In 2019 hebben TNO en CE Delft gezamenlijk kostencurves voor asfaltinnovaties bij Rijkswaterstaat opgesteld (CE Delft en TNO, 2019a). De methodiek voor het opstellen van kostencurves die in die studie is gebruikt, hebben we hier overgenomen; dit wordt aangegeven waar relevant. Naast de algemene kostencurvemethodiek is daar een methode voorgesteld om de onzekerheid van de berekeningen van innovaties op basis van hun TRL en de bron van de gebruikte data weer te geven, net als een methode voor het bepalen van de overlap tussen innovaties. Ook deze methodes zijn in deze studie gebruikt.

Er is in de studie gekeken naar innovaties van asfaltmengsels, maar ook voor energiegebruik in de asfaltcentrale en brandstofgebruik in het transport en werktuigen. De meegenomen asfalttypes waren SMA, DZOAB, 2L-ZOAB en AC bin/base. Niet alle asfaltmengselinnovaties zijn bekeken voor ieder type asfalt. Uit de studie bleek dat wanneer alle bekeken maatregelen die beschikbaar zijn in de genoemde jaren genomen worden, er in 2020 een klimaatimpactreductie van 30% behaald kan worden. In 2030 zou deze klimaatimpactreductie 60% zijn.

3 Aanpak en Methodiek

In dit hoofdstuk beschrijven we de aanpak en de methodiek. Hierbij beginnen we in Paragraaf 3.1 met het beschrijven van de kostencurve methodiek, in Paragraaf 3.2 beschrijven we de data en bronnen die gebruikt worden in de analyse en in Paragraaf 3.3 de manier waarop we omgaan met onzekerheden.

3.1 Kostencurve methodiek

In deze studie stellen we kostencurves op voor innovaties die kunnen leiden tot een milieu-impactreductie op het gebied van klimaatimpact (CO_2-eq.-emissiesreductie) en MilieuKostenIndicator-waarde (€ MKI-reductie). Hierbij sluiten we aan bij de methodiek die in samenwerking met TNO is ontwikkeld, en eerder is toegepast voor de kostencurves asfalt zoals beschreven in (CE Delft en TNO, 2019a). Omdat er wordt gekeken naar de milieu-impact- en kosten**reductie**, wordt iedere innovatie afgezet tegen de milieu-impact en kosten van referentiebeton.

Objectcategorieën, referentiebeton

Om de potentiële impactreducties voor het areaal van Rijkswaterstaat te berekenen is het van belang om een differentiatie in verschillende typen referentiebeton te maken. Rijkswaterstaat beheerd verschillende objectcategorieën, met verschillende functies voor het beton. De samenstelling van beton in deze objectcategorieën verschilt, vanwege verschillende eisen aan de werken. Om hier op een werkbare en transparante manier rekening mee te houden onderscheiden we binnen het areaal van Rijkswaterstaat vier objectcategorieën beton, op basis van de methodiek die CE Delft en Delta Concrete Consult (2019) hebben ontwikkeld. Deze objectcategorieën zijn beschreven in Figuur 6.

Figuur 6 - Objectcategorieën (toepassing) van beton

Bron figuur: (CE Delft ; Delta Concrete Consult, 2019).

Met deze objectcategorieën is het mogelijk om in kaart te brengen wat de potentiële emissiereductie van innovaties is per objectcategorie, zodat de totale reductie in detail geanalyseerd kan worden. Deze objectcategorieën gaan hierbij verder dan een opdeling in 'constructief' en 'niet-constructief' beton, of een opdeling in 'betonmortel' en 'beton-producten' zoals aangehouden is bij algemener onderzoek naar beton door CE Delft (2020a). Dit is met name relevant omdat 'constructief' beton, 'betonmortel' en 'betonproducten' zeer divers zijn en veel innovaties (momenteel of in de toekomst) alleen relevant zijn voor specifieke constructieve toepassingen. Om het reductiepotentieel voor het gehele areaal van Rijkswaterstaat in te schatten, is ook een inschatting van gebruikt beton per objectcategorie per jaar gemaakt.

Onafhankelijk en afhankelijk kostencurves

In een kostencurve worden jaarlijks reductiepotentieel en kosten van alle mogelijke reductie-innovaties getoond in één figuur, zodat een overzicht ontstaat van de kostenefficiënte van innovaties en maximale reductiepotentieel. Kostencurves helpen bij het kiezen tussen verschillende innovaties om CO_2-emissies en milieu-impact te reduceren. Om een kostencurves op te stellen worden eerst de volgende resultaten gepresenteerd:

- Het milieu-impactreductiepotentieel (klimaatimpact (CO_2-eq.-emissies) en MilieuKostenIndicator-score (€ MKI-reductie)) van de betoninnovaties per m^3 beton.
- **Het reductiepotentieel voor RWS in een bepaald jaar**: De milieu-impactreductie in CO_2-eq. en MKI van een innovatie voor de gebruikte hoeveelheid beton in een bepaald jaar bij Rijkswaterstaat.

In dit rapport worden eerst onafhankelijke kostencurves voor beide milieu-indicatoren opgesteld (Hoofdstuk 5). Deze geven inzicht in de kostenefficiëntie (€/ton CO_2-eq. of €/€ MKI) van de verschillende individuele innovaties. Het reductiepotentieel van de verschillende innovaties in de onafhankelijk kostencurve is niet op te tellen tot een totaal, vanwege overlap tussen de innovaties.

Omdat het mogelijk is om verschillende innovaties te combineren en er tegelijkertijd overlap tussen de verschillende innovaties kan zijn (waarmee ze elkaar uitsluiten of de reductie van de innovaties verandert) worden vervolgens zogenoemde afhankelijke kostencurves opgesteld (Hoofdstuk 6). Hierin worden de meest veelbelovende innovaties (op basis van de onafhankelijke kostencurve) die elkaar niet uitsluiten gecombineerd tot een innovatiepakket (ook wel genoemd: maatregelpakket). Het optellen van het (aangepaste) reductiepotentieel van de verschillende individuele innovaties in het pakket toont het maximale totale reductiepotentieel van de maatregelpakketten. Tabel 3 geeft het verschil weer tussen beide typen kostencurves. Van zowel de referentie als de innovaties wordt de milieu-impact van de gehele keten bekeken.

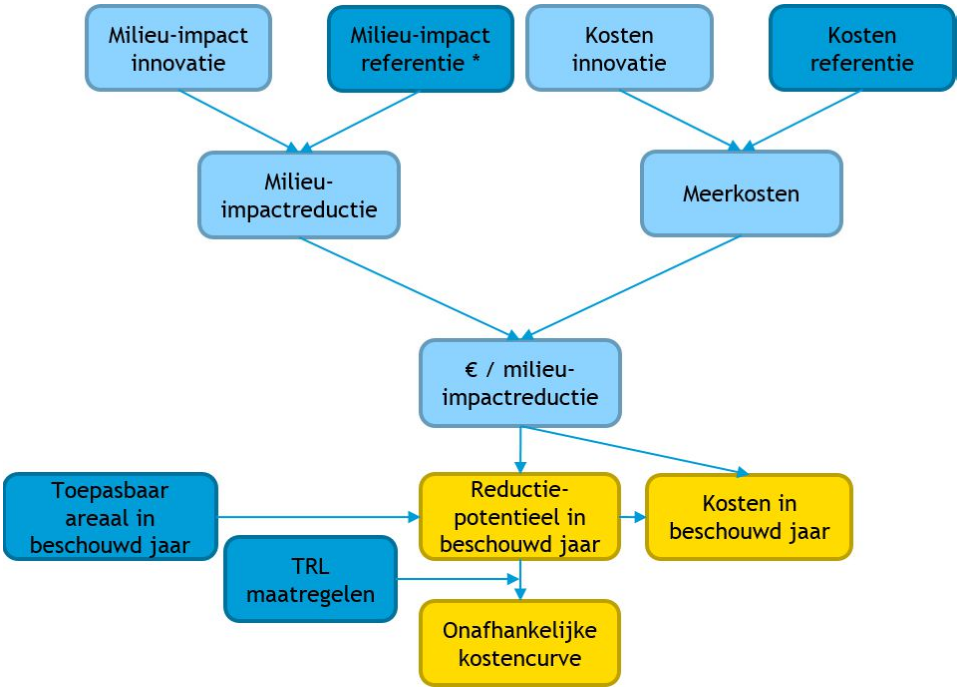
Tabel 3 – Verschil onafhankelijke en afhankelijke kostencurve

Aspect meegenomen?	Onafhankelijke kostencurve	Afhankelijke kostencurve
Overlap innovaties	Nee	Ja
Beleidsontwikkelingen	Ja	Ja
TRL-niveau maatregel	Ja	Ja

Figuur 7 geeft de aanpak weer voor de onafhankelijke kostencurves, en Figuur 8 de aanpak voor de afhankelijke kostencurves. In beide figuren wordt in het donkerblauw aangeduid

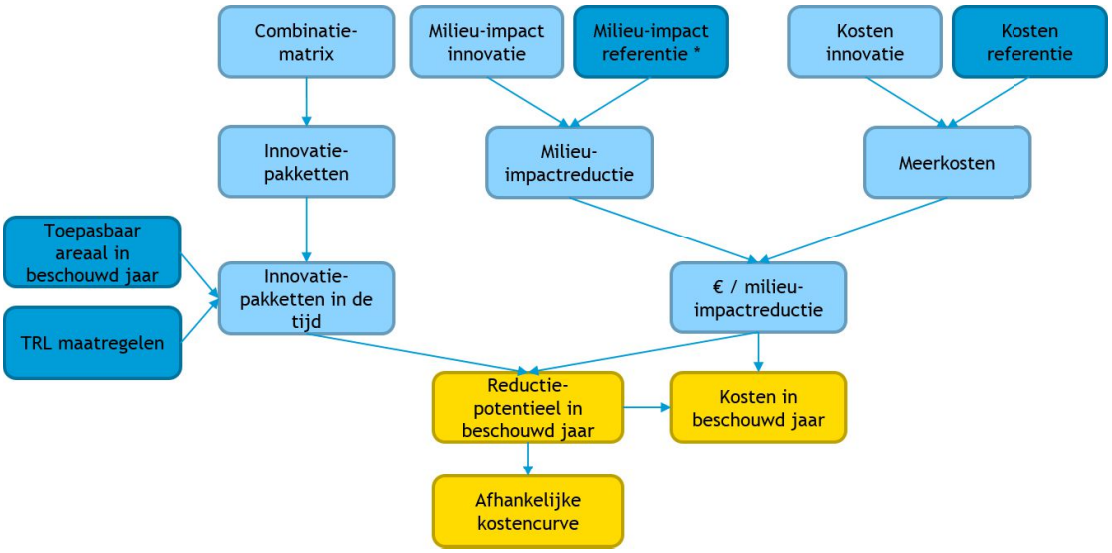
welke gegevens er verzameld moeten worden, in het lichtblauw welke berekeningen er uitgevoerd dienen te worden en in het geel welke resultaten er gepresenteerd worden. In de figuren is te zien dat de basis voor de resultaten de kostenefficiëntie van de milieu-impactreductie is per maatregel. Voor het bepalen van de afhankelijke kostencurves worden innovaties gecombineerd tot maatregelpakketten die gezamenlijk leiden tot de meest kostenefficiënte milieu-impactreductie per tijdsperiode.

Figuur 7 - Aanpak onafhankelijke kostencurves



* In de milieu-impact van de referentie voor 2030 worden autonome ontwikkelingen meegenomen.
Donkerblauw = dataverzameling, lichtblauw = berekening, geel = resultaten.

Figuur 8 - Aanpak afhankelijke kostencurves



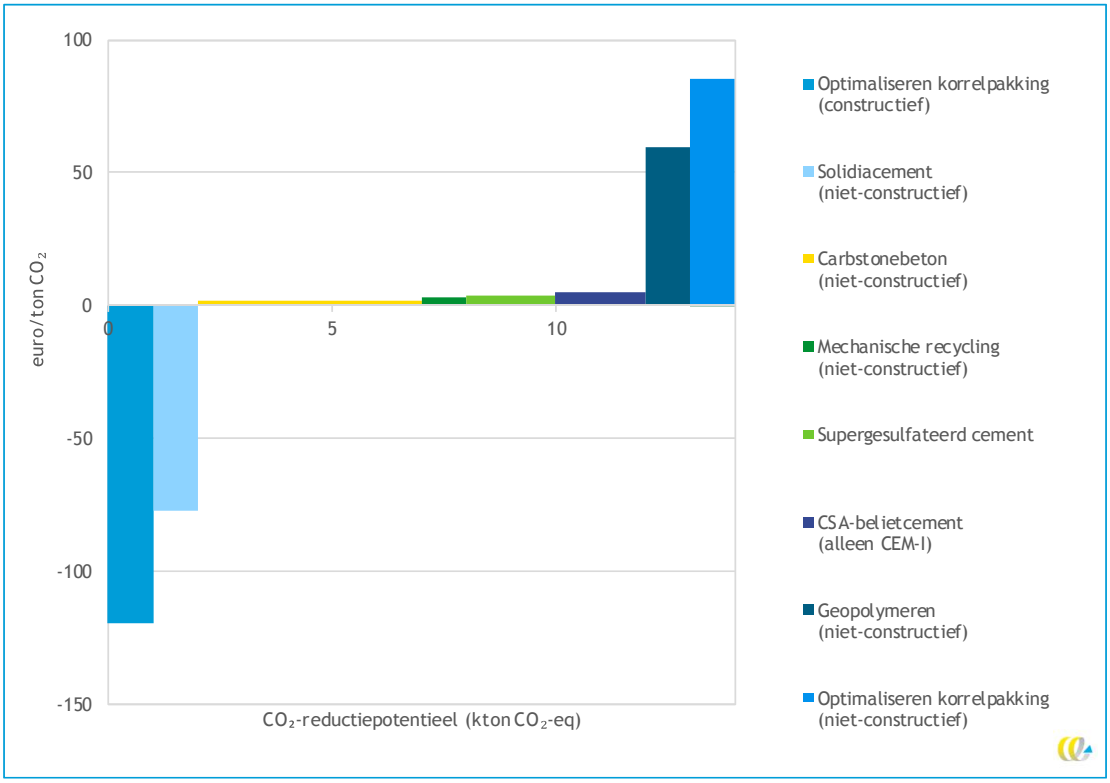
* In de milieu-impact van de referentie voor 2030 worden autonome ontwikkelingen en beleidsontwikkelingen meegenomen.
Donkerblauw = dataverzameling, lichtblauw = berekening, geel = resultaten.

In een kostencurve zijn innovaties geordend van de laagste kosten per ton vermeden CO_2 of per € vermeden MKI naar de hoogste kosten per ton vermeden CO_2 of per € vermeden MKI.

- Op de **verticale as** in de curve staan de kosten in euro's per ton CO_2-reductie/per € vermeden MKI. Dit zijn netto kosten: een saldo van kosten en baten. Als de baten groter zijn dan de kosten zijn de netto kosten negatief.
- Op de **horizontale as** staat het reductiepotentieel van een innovatie in ton CO_2-eq. óf € vermeden MKI. De breedte van een innovatie in de kostencurve geeft dus weer hoeveel CO_2 of € MKI bespaard kan worden met die maatregel, door toepassing op het te vervangen/aan te leggen areaal in het jaar waarvoor de kostencurve is opgesteld.

Figuur 9 laat een voorbeeld zien van een kostencurve voor beton, zoals deze bepaald is in de eerdere studie uitgevoerd door CE Delft en TNO (CE Delft en TNO, 2019b). Let op! Het voorbeeld is een ***onafhankelijke*** kostencurve. Dat wil zeggen dat het reductiepotentieel van de innovaties alleen ***per innovatie*** is bepaald, zonder rekening te houden met overlap tussen de innovaties. De kostencurve is daarom niet cumulatief en het totale CO_2-reductiepotentieel kan niet vergeleken worden met de CO_2-reductiedoelstelling van Rijkswaterstaat.

Figuur 9 - Voorbeeld Kostencurve - Kostencurve 2019-2030 voor de innovaties Scope 3-up 'beton' - innovaties los van elkaar beschouwd uit (CE Delft en TNO, 2019b)



Let op!

- Dit voorbeeld is een ***onafhankelijke*** kostencurve. Dat wil zeggen dat het reductiepotentieel van de innovaties alleen ***per innovatie*** is bepaald; er is niet gekeken hoe de innovaties kunnen worden gecombineerd. De kostencurve is daarom niet cumulatief en het totale CO_2-reductiepotentieel kan niet vergeleken worden met de CO_2-reductiedoelstelling van Rijkswaterstaat.

3.1.1 Reductiepotentieel op het areaal van RWS in een bepaald jaar

Het jaarlijks reductiepotentieel wordt bepaald door de milieu-impactreductie te vermenigvuldigen met het toepasbaar areaal in een bepaald jaar. We vermenigvuldigen de milieu-impactreductie per m^3 beton ten opzichte van het referentiebeton met de totale hoeveelheid beton die Rijkswaterstaat inkoopt in dat jaar. Bij de **onafhankelijke kostencurve** kijken we enkel naar de onderhoudsplanning van Rijkswaterstaat voor het bepalen van het areaal in een bepaald jaar, terwijl in de **afhankelijke kostencurves** ook de overlap tussen verschillende innovaties en de TRL-niveau van verschillende technieken meegenomen wordt in het bepalen van een realistisch jaarlijks reductiepotentieel voor alle innovaties gecombineerd.

CO_2-eq. en MKI-reductiepotentieel

Het CO_2-eq.- en MKI-reductiepotentieel van een innovatie betreft de reductie op de broeikasgasemissies van Rijkswaterstaat die mogelijk is in een bepaald zichtjaar, aangevuld met de effecten van het materiaal en materialengebruik in de inkoopketen. Hierbij wordt de referentieketen met de keten van de innovatie vergeleken. De MKI-milieukosten worden

uitgedrukt in de MilieuKostenIndicator-waarde (MKI) in euro's (deze noemen we schaduweuro's om ze te onderscheiden van de directe kosten).

Voor het bepalen van het CO_2-eq.- en MKI-reductiepotentieel maken we gebruik van de rekenmethode die voorgeschreven wordt door de SBK Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en Bouwwerken 3.0, genaamd CML-SBK (Stichting Bouwkwaliteit, 2020). In de milieu-impact worden alle onderdelen van de levenscyclus zoals benoemd in de SBK-bepalingsmethode meegenomen. Dit betekent dat gekeken wordt naar de reductie van milieu-impact van grondstofwinning tot einde levensduur van de innovaties in verhouding met de referentie (Stichting Bouwkwaliteit, januari 2019).

Scope reductiepotentieel in bepaald jaar

Voor het bepalen van het reductiepotentieel in een bepaald jaar wordt de milieu-impact van de innovatie afgezet tegen een referentie, zoals eerder in dit hoofdstuk al genoemd. Deze referentie is gebaseerd op betonsamenstellingen in 2017 (CE Delft, 2020a) en geëxtrapoleerd voor betonreferenties in 2020 en 2030 in vier objectcategorieën. Het areaal ingekocht beton in de beschouwde jaren bij Rijkswaterstaat per objectcategorie is bepaald met expertinschattingen in samenspraak met Rijkswaterstaat. Het referentiebeton en de referentiesamenstelling voor de vier objectcategorieën zijn weergegeven in Bijlage A.
De gebruikte gegevens voor het referentiebeton is weergegeven in Bijlage B.

3.1.2 Kosten

In CE Delft & TNO (2019b) is gebruik gemaakt van een berekenmethode voor het bepalen van de jaarlijkse kosten omdat verschillende asfaltdeklagen een verschillende levensduur hebben. Omdat in het geval van objecten uitgevoerd in beton prestatie specifiek wordt uitgevraagd, bijvoorbeeld voor een levensduur van 100 jaar, is het terugrekenen van de kosten over de levensduur ven een object niet nodig. Dit betekent dat we voor de kosten enkel kijken naar de kosten van een innovatie voor aanleg.

Omdat het gaat om de kosten van de innovaties voor Rijkswaterstaat gaan we in de kostenberekening voor de kostencurves alleen uit van de kosten en baten voor I&W/ Rijkswaterstaat, externe effecten en maatschappelijke kosten en baten blijven buiten beschouwing, evenals R&D kosten. Investeringskosten in nieuw materiaal bij bijvoorbeeld de aanleg of bij de cementcentrale die voor rekening komen van de producent/aannemer worden alleen meegenomen als de inschatting is dat deze kosten doorgerekend zullen worden aan Rijkswaterstaat.

In de kostenberekening, maken we gebruik van kosten inclusief 21% btw.

Marktontwikkelingen ná 2020 worden niet meegenomen in het bepalen van de kosten omdat dit extra onzekerheden introduceert in de analyse. Wél wordt de invloed van al vastgesteld beleid op prijzen meegenomen, zoals bijvoorbeeld een vastgestelde verhoging van accijns.

3.2 Data en bronnen

Voor het bepalen van het areaal in beheer van Rijkswaterstaat zijn voor 2020 en 2030 expertinschattingen gemaakt in samenspraak met Rijkswaterstaat. De gehanteerde areaalgegevens zijn terug te vinden in Bijlage A.

Voor het bepalen van het reductiepotentieel maken we gebruik van gegevens uit de Nationale Milieudatabase versie 3.1 en de Ecoinvent v3.5 database (cut-off). Hierbij volgen we zoveel mogelijk de modellering van beton in DuboCalc 5.1 in 2020. Hierbij moet vermeld worden dat de MKI van proceskaarten in DuboCalc 5.1 in 2020 in sommige gevallen afwijken van de NMD 3.1. Dit komt doordat DuboCalc 5.1 in 2020 in sommige gevallen gebruik maakt van een verouderde NMD 3.1-versie. We beschrijven in het geval van een verschil tussen de twee, en welke versie we gebruiken. Tot slot maken we voor het bepalen van het reductie-potentieel gebruik van gegevens uit literatuur, de bronnen worden toegelicht per innovatie.

Voor het bepalen van de kosten maken we gebruik van gegevens uit (CE Delft, 2020c) en voor de innovaties van marktpartijen en betonexperts. Hierbij wordt daarnaast zoveel mogelijk aangesloten bij al bekende kosten uit (CE Delft en TNO, 2019b).

De gegevens die gebruikt zijn voor het bepalen van de milieu-impact en de kosten voor het huidige betongebruik zijn terug te vinden in Bijlage B, de gegevens gebruikt voor het bepalen van de milieu-impact en de kosten van de innovaties zijn per innovatie terug te vinden in Bijlage C.

3.3 Onzekerheden

Omdat in deze studie gekeken wordt naar (deels) innovatieve innovaties zal er onzekerheid bestaan over de gebruikte gegevens. Door de gehele rapportage wordt daarom aandacht besteed aan mogelijke onzekerheden.

We besteden hierbij aandacht aan de volgende typen onzekerheden (op basis van CE Delft en TNO (2019b)):

1. Het **achtergrondscenario**; hierbij gaat het om de invloed van reeds vastgesteld beleid op de milieu-impactreductie en prijs van verschillende innovaties. Denk hierbij aan de verduurzaming van de elektriciteitsmix door het sluiten van kolencentrales. Beleid veranderd en de invloed van sommige beleidsinnovaties kan nog niet precies ingeschat worden, dit levert onzekerheden op in de resultaten.
2. De **toepasbaarheid**; er is een inschatting gemaakt voor het toepasbaar areaal van de verschillende innovaties bij volledige opschaling. De vraag naar bepaalde materialen die benodigd zijn voor innovaties kan veranderen door de tijd, bijvoorbeeld omdat er innovaties plaatsvinden in andere sectoren. Dit heeft een invloed op de schaal waarop een innovatie toegepast zou kunnen worden. Mogelijk is het areaal waarop een innovatie toegepast kan worden daarom kleiner dan ingeschat, en daarmee ook de totale milieu-impactreductie die behaald kan worden met een maatregel. Het is ook mogelijk dat een innovatie breder toepasbaar is.
3. De mate van ontwikkeling van de bekeken innovaties, het Technology Readiness Level (TRL). Als een innovatie nog niet op grote schaal commercieel is toegepast dan zijn zowel de kosten als de milieu-impact (bijvoorbeeld gebruikte materialen, energie) bij volledige opschaling voor toepassing bij Rijkswaterstaat nog niet zeker. Dit levert onzekerheden op om de resultaten.
4. De **betrouwbaarheid** van de gebruikte **bronnen**. Ook al zijn innovaties volledig uitontwikkeld, niet alle benodigde gegevens voor het bepalen van de kostprijs en milieu-impactreductie van innovaties zijn beschikbaar in openbare bronnen. Bijvoorbeeld door concurrentiegevoeligheid. Dit levert onzekerheden op om de resultaten.

Tekstkader 1 - Technology Readiness Level (TRL)

Het Technology Readiness Level is een indicator voor de volwassenheid van een techniek. De indicator is ooit ontwikkeld door de NASA, wordt veel gebruikt in de Amerikaanse defensie-industrie en wordt ook steeds meer gebruikt in andere techniekvelden. Ook in Europa hebben ESA en de Europese commissie de TRL-systeem in gebruik en beide hebben deze ook gedefinieerd. Tegenwoordig wordt het vooral voor innovatiestimulering veel gebruikt. De indicator wordt onder andere in het Horizon 2020 (H2020) toegepast om de impact die innovatie-subsidies hebben te benchmarken. De indicator kent negen fasen van innovatie/productontwikkeling, die in Tabel 4 worden weergegeven. Deze definitie is afkomstig van de Europese Commissie.

Tabel 4 - Beschrijving Technology Readiness Levels (TRLs)

TRL	Beschrijving
1	Basisprincipes geobserveerd.
2	Technologisch concept geformuleerd.
3	Technologisch concept bewezen.
4	Technologie gevalideerd in labsetting.
5	Technologie gevalideerd in een relevante omgeving.
6	Technologie gedemonstreerd in een relevante omgeving.
7	Prototype systeem gedemonstreerd in een operationele omgeving.
8	Systeem compleet en gekwalificeerd.
9	Daadwerkelijke systeem bewezen in een operationele omgeving (competitief in de markt).

Bron: Gebaseerd op European Commission (2014).

Per innovatie geven we aan waar de onzekerheden zitten voor deze vier typen onzekerheden. De eerste twee onzekerheden beschrijven we alleen kwalitatief. Voor de laatste twee onzekerheden doen we een semi-kwantitatieve inschatting van de onzekerheid, en de range waartussen de resultaten kunnen variëren bij het verder doorontwikkelen van de technologie en bij beschikbaarheid van betere data. Hier gaan we in de volgende paragraaf verder op in.

Onzekerheden op basis van TRL-niveau en betrouwbaarheid van gebruikte bronnen

Om de onzekerheden over het TRL en de gebruikte bronnen per innovatie op een zo goed mogelijk en vergelijkbare manier in kaart te brengen, maken we gebruik van de semi-kwantitatieve matrix die opgesteld is voor de kostencurves asfalt voor Rijkswaterstaat (CE Delft en TNO, 2019b). Hieronder wordt de methodiek kort beschreven. De genoemde percentages zijn niet kwantitatief te gebruiken op de gepresenteerde resultaten, ze geven slechts een mate van onzekerheid aan op een schaal van 0-100%.

Omdat er geen systematiek is die onzekerheid in LCA verbindt aan het TRL van een innovatie is de onzekerheid geschat op basis van expertschattingen. Onzekerheden door de TRL van de maatregelen zijn geschat op:

- TRL 9: 5%;
- TRL 8: 10%;
- TRL 6: 25%;
- TRL 4: 40%;
- TRL < 3: 50%.

De mate van betrouwbaarheid van een bron kan ook gebruikt worden om een beeld van de onzekerheid te verkrijgen. Deze is met name relevant als het gaat om het afleiden van prioriteiten voor verdere verbetering van de kostencurves. Daartoe zijn ook de voor handen zijnde bronnen gegroepeerd in typen vergelijkbare betrouwbaarheid:

- bewezen in tenders, of geboden als echte verkoopprijs (TRL 9) of transparante afwijking ten opzichte van de referentie gedocumenteerd door aannemer (lagere TRLs) of gebaseerd op openbare informatie: 5%;
- door aannemer gerapporteerd, maar niet alle aannames/veranderingen zijn goed te volgen of interne informatie: 10%;
- gebaseerd op bronnen binnen Rijkswaterstaat of expert-inschattingen: 20%;
- eigen inschattingen gebaseerd op afwijkingen referentie of anderszins goed herleidbaar: 30%;
- eerste grove inschatting: 50%.

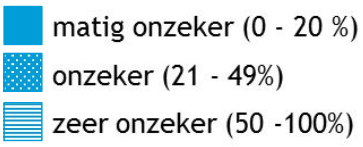
Deze schattingen zijn samengevoegd in onderstaande tabel. De schattingen zijn bij elkaar opgeteld omdat de inschatting is dat het onafhankelijke bronnen van onzekerheden zijn. Deze waarden worden gehanteerd in deze studie.

Tabel 5 - Geschatte onzekerheid op basis van TRL en databronnen (overgenomen uit CE Delft en TNO (2019b))

Bron | TRL	TRL 9	TRL 8	TRL 6	TRL 4	TRL < 3
Aannemer transparant	10%	15%	30%	45%	55%
Aannemer minder transparant	15%	20%	35%	50%	60%
Rijkswaterstaat	25%	30%	45%	60%	70%
Expertschattingen en extrapolaties	35%	40%	55%	70%	80%
Schatting	55%	60%	75%	90%	100%

We laten de onzekerheid in de reductiepotentieel figuren zien zoals weergegeven in Figuur 10.

Figuur 10 - Voorbeeld van de manier waarop onzekerheid o.b.v. TRL en bron van gegevens wordt weergegeven in resultatenfiguren in dit rapport. De percentages zijn bepaald door de methodiek die is beschreven in Paragraaf 3.3 en Tabel 5 toe te passen



4 Selectie innovaties

In dit hoofdstuk beschrijven we de geselecteerde innovaties voor de huidige studie, op basis van de meest recente gegevens. We beginnen hierbij met een beschrijving van de selectie-criteria in Paragraaf 4.1, gevolgd door een overzicht van alle geïnventariseerde innovaties in Paragraaf 4.2 en de geselecteerde innovaties in Paragraaf 4.3. In het selectieproces zijn ook innovaties afgevallen voor deelname aan deze studie. Deze innovaties worden wel beschreven in Bijlage D, waaronder de reden dat ze niet zijn geselecteerd.

4.1 Selectiecriteria

In deze rapportage wordt een beperkt aantal innovaties opgenomen in de kostencurves. We selecteren innovaties op basis van de volgende selectiecriteria:

1. De innovatie heeft in 2020 minimaal de TRL-niveau 6 bereikt voor één van de object-categorieën, zodat de innovatie hoogstwaarschijnlijk vóór 2030 toegepast kan worden bij Rijkswaterstaat (RWS beheert betonobjecten in alle gedefinieerde categorieën). Dit betekent een brede inzetbaarheid in minimaal één van de objectcategorieën en niet enkel een toepassing in een niche. Figuur 6 voor de objectcategorieën die kunnen worden onderscheiden.
2. De innovatie zorgt ***niet*** voor een significante afname in de mate van/mogelijkheid tot recycling van het beton aan het einde van de levensduur. Dit houdt in dat de innovatie niet in de weg zit bij het terugwinnen en het opnieuw toepassen van andere (conventionele) materialen uit het beton).
3. De innovatie leidt (naar verwachting) ***wel*** tot een significante milieu-impactreductie.
4. Er zijn afdoende gegevens beschikbaar om de kosten en de milieubesparing van de innovatie te bepalen.

4.2 Geïnventariseerde innovaties

In Tabel 6 geeft een overzicht van alle geïnventariseerde, geselecteerde innovaties. Per innovatie wordt het technology readiness level (TRL) weergegeven. Zoals genoemd bij de selectiecriteria in Paragraaf 4.1 hebben we in deze studie alleen innovaties meegenomen die een TRL van minstens zes hebben in begin 2020. Zo kunnen we ervan uitgaan dat de innovatie voor 2030 op de markt kan worden gebracht en dat deze in 2030 breed toepasbaar is in minimaal 1 van de 4 objectcategorieën.

We hebben meer innovaties dan hier weergegeven geïnventariseerd. Niet geselecteerde innovaties worden kort beschreven in Bijlage D, evenals de reden waarom ze voor deze studie niet zijn geselecteerd. Het is belangrijk om ook die innovaties in het oog te houden, de meeste zijn niet geselecteerd omdat ze een TRL lager dan 6 hebben. Ze kunnen echter wel degelijk interessant zijn voor Rijkswaterstaat.

Tabel 6 - Overzicht geselecteerde betoninnovaties

Innovatie	Techniek	I. Klein niet-constructief	II. Klein gewapend	III. Groot voorgespannen	IV. Complexe constructies
Alternatieve betonsamenstelling					
Carbstone™	TRL 9	TRL 9	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
CSA-beliet *Bijvoorbeeld: Ternocem®*	TRL 9	TRL 9	TRL 6-7	TRL 6-7	TRL 4
Geopolymeer *Bijvoorbeeld: Geo-beton™, ASCEM®-cement*	TRL 9	TRL 9	TRL 7	TRL 4	TRL 4
Solidia	TRL 9	TRL 9	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Circulair bouwen					
Carbon8 - vliegas	TRL 9	TRL 9	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Demontabel bouwen	TRL 8	N.v.t.	TRL 3	TRL 3	TRL 3
Mechanisch grind/zandrecycling *Bijvoorbeeld: Circuton, Smart liberator*	TRL 9	TRL 8	TRL 7	TRL 7	TRL 7
Mechanische cementrecycling *Bijvoorbeeld: Smart liberator*	TRL 8	TRL 8	TRL 4	TRL 4	TRL 4
Mech./thermische cementrecycling *Bijvoorbeeld Circuton*	TRL 6	TRL 6	TRL 4	TRL 4	TRL 4
Bouwplanning					
Korrelpakking	TRL 9	TRL 9	TRL 9	TRL 9	TRL 9
Licht ontwerpen en bouwen	TRL 9	TRL 9	TRL 9	TRL 9	TRL 9
Modulerend koelen/verwarmen	TRL 9	TRL 9	N.v.t.	TRL 9	TRL 9
On-site precasting	TRL 9	TRL 9	TRL 9	TRL 9	TRL 9
Wapening					
Basaltvezelstaven	TRL 9	N.v.t.	TRL 8	TRL 4	TRL 4
Staalvezels	TRL 9	N.v.t.	TRL 9	TRL 5	TRL 5
Overig					
CO_2-afvang en opslag bij cementklinkerproductie (CCS)	TRL 6	TRL 6	TRL 6	TRL 6	TRL 6

4.3 Geselecteerde innovaties

Op basis van de selectiecriteria is ervoor gekozen om twaalf innovaties kwantitatief uit te werken. De geselecteerde innovaties zijn weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7 - Geselecteerde innovaties en toepassingsmogelijkheden vóór 2030 per objectcategorie

Geselecteerde innovatie	I. Klein niet-constructief	II. Klein gewapend	III. Groot voorgespannen	IV. Complexe constructies
Alternatieve betonsamenstellingen				
Carbstone™	Ja	Ja	Nee	Nee
CSA-beliet	Nee*	Nee*	Ja	Nee
Geopolymeren: Geo-beton™	Ja	Ja	Nee	Nee
Geopolymeren: ASCEM®-cement	Ja	Ja	Nee	Nee
Solidia	Ja	Nee	Nee	Nee
Circulair bouwen				
Carbon8 op basis van vliegassen	Ja	Nee	Nee	Nee

Geselecteerde innovatie	I. Klein niet-constructief	II. Klein gewapend	III. Groot voorgespannen	IV. Complexe constructies
Mechanische grind/zandrecycling	Ja	Ja	Ja	Ja
Mechanische cementrecycling	Ja	Nee	Nee	Nee
Mechanische/thermische cementrecycling	Ja	Nee	Nee	Nee
Alternatieve wapening				
Basaltvezelstaven	Nee	Ja	Nee	Nee
Staalvezels	Nee	Ja	Nee	Nee
CO_2-afvang en opslag bij cementklinkerproductie (CCS)	Ja	Ja	Ja	Ja

* Ondanks dat de toepassing van CSA-beliet in Objectcategorie I op TRL 9 staat en in Objectcategorie II op TRL 6-7, passen we deze innovatie in deze studie alleen toe in Objectcategorie III. Dit omdat CSA-beliet een vervanger van Portlandcement is, maar in de referentiesamenstelling voor Objectcategorie I en II geen Portlandcement aanwezig is. Het milieuvoordeel ten opzichte van hoogovencement is nog niet bekend.

We beschrijven de innovaties hieronder kort en leggen daarbij uit waarom ze wel of niet geselecteerd zijn. Uitgebreide informatie over deze innovaties is terug te vinden in Bijlage C. Daarnaast zijn er drie innovaties niet geselecteerd om mee te nemen in de kostencurves, maar we beschrijven ze in de bijlage toch uitgebreider omdat deze wél veelbelovend zijn maar moeilijk te kwantificeren zijn. Hierbij gaat het om:

- demontabel bouwen;
- optimaal ontwerpen en bouwen (o.a. korrelpakking optimalisatie, modulerend koelen en verwarmen, bouwplanning);
- alternatieve materialen in plaats van beton bijvoorbeeld houtbouw.

4.3.1 Alternatieve betonsamenstellingen

Carbstone™

Carbstone™ is een betonsoort met een alternatief bindmiddel. Het beton wordt geproduceerd op basis van LD-staalslakken die reageren met CO_2. De CO_2 wordt hierbij opgenomen en daarmee in het materiaal opgeslagen. Dit is dus een *carbon capture and utilization*-techniek (CCU). De Carbstone™-technologie wordt al in de praktijk toegepast in objecten van Objectcategorie I, en richt zich niet op andere objectcategorieën. De TRL is 9 voor Objectcategorie I. Ook is het milieu-impactreductiepotentieel hoog, is onze inschatting dat Carbstone™ geen probleem oplevert in het huidige recycleproces voor beton en zijn er genoeg gegevens beschikbaar om deze innovatie door te rekenen. Hiermee voldoet Carbstone™ aan Selectiecriterium 1, 2, 3 en 4.

CSA-beliet

CSA-beliet is een alternatieve klinker die Portlandcementklinker in Portlandcement kan vervangen. CSA-belietcement heeft ongeveer dezelfde eigenschappen als Portlandcement, maar leidt tot lagere CO_2-emissies omdat de klinkers onder lagere temperatuur worden geproduceerd en makkelijker te malen zijn. Daarnaast wordt er ook minder calciumcarbonaat gedecarboneerd tijdens de productie van de klinker. CSA-beliet is ter vervanging van hoogovencement echter niet interessant, aangezien de klimaatimpact van CSA-beliet hoger is dan van hoogovencement.

CSA-beliet heeft voor Objectcategorie I TRL 9 en voor Objectcategorie II en III TRL 7. Hiermee voldoet deze innovatie aan Selectiecriterium 1. Voor zover bekend heeft het gebruik van CSA-belietcement geen nadelig effect op recycling van beton (Selectiecriterium 2). Er zijn daarnaast voldoende gegevens beschikbaar om de kosten en milieubesparing van de innovatie te bepalen (Selectiecriterium 4). Het reductiepotentieel is echter alleen voor Objectcategorie III hoog genoeg dat aan Selectiecriterium 3 wordt voldaan, aangezien er geen Portlandcement aanwezig is in de referentiesamenstellingen van Objectcategorie I en II. Daarom nemen we deze maatregel alleen voor Objectcategorie III mee.

Solidia

Solidiacement is een alternatieve binder die conventioneel cement in beton kan vervangen. Het kan worden geproduceerd in dezelfde fabrieken als waar Portlandcement wordt geproduceerd, hoewel het proces wel licht moet worden aangepast. Solidia wordt geproduceerd op basis van dezelfde ingrediënten als Portlandcement, alleen heeft het een andere uithardingsreactie waarbij CO_2 wordt vastgelegd. Het kan worden toegepast in Objectcategorie I, waarvoor de TRL 9 is. Het reductiepotentieel van Solidia is hoog, onze inschatting is dat Solidia geen probleem oplevert in het huidige recycleproces voor beton, en de beschikbaarheid van gegevens voldoende. Hiermee voldoet Solidia aan alle selectiecriteria.

Geopolymeren

Geopolymeren omvatten een brede groep alternatieve bindmiddelen van *alkalisch-activeerbare materialen* (ACCM's). Geopolymeren bestaan in de basis uit een reactieve precursor en een alkalische activator, die samen reageren tot een cementachtig product dat cement in beton kan vervangen.

Geopolymeren zijn als innovatie geselecteerd omdat deze met TRL 9 voor Objectcategorie I en TRL 7 voor Objectcategorie II voldoen aan Selectiecriterium 1. Daarnaast heeft deze innovatie een hoog CO_2-reductiepotentieel (Selectiecriterium 3) en wordt verwacht dat beton met geopolymeren geen nadelig effect op recycling van beton heeft (Selectiecriterium 2). Geopolymeermengsels van de drie verschillende geopolymeermerken Geo-beton™, SQAPE en ASCEM®-cement worden bekeken. Van Geo-beton™ en ASCEM®-cement zijn genoeg gegevens beschikbaar om de kosten en milieubesparing van de innovatie te bepalen (Selectiecriterium 4).

4.3.2 Circulair bouwen

Carbon8 op basis van AEC-vliegas

Carbon8 Systems heeft een technologie en proces ontwikkeld waarin op basis van vliegas, zand en CO_2-aggregaten worden geproduceerd die kunnen worden gebruikt als grindvervanger in beton. Het zand in de aggregaten kan ook deels worden vervangen door bodemassen, maar vanwege de wisselendere samenstelling daarvan, gaan we daar niet van uit in deze studie.

Het produceren van de aggregaten op basis van vliegas heeft een TRL van 9 voor Objectcategorie I. Omdat er CO_2 wordt opgenomen bij de productie ervan en het energiegebruik laag is, heeft het een lagere milieu-impact dan primair grind. Daarnaast verlaagt het de hoeveelheid primaire materialen gebruikt door Rijkswaterstaat en daarmee sluit het aan bij

de circulariteitsdoelstelling van RWS. Ook zijn er voldoende gegevens bij ons bekend om de innovatie door te rekenen en schatten we in dat Carbon8 geen probleem oplevert in het huidige recyclingproces voor beton. Daarmee voldoet Carbon8 aan Selectiecriterium 1, 2, 3 en 4.

Mechanische grind-/zandrecycling

Wanneer betonobjecten worden gesloopt, wordt het beton momenteel vaak in de vorm van betongranulaat hergebruikt. Het is ook mogelijk om de materiaalfracties (zand, grind en cement) uit beton terug te winnen. Deze eerste innovatie richt zich op het terugwinnen uit betonresten en toepassen in nieuw beton van zand en grind. Er worden verschillende technieken ontworpen om zand en grind terug te winnen uit beton. Deze hebben met elkaar gemeen dat ze zijn gebaseerd op mechanische recyclingprincipes.

Door zand en grind mechanisch te recyclen wordt bespaard op primair zand- en grindgebruik - een materiaalbesparing waar ook een klimaatimpactreductie mee behaald wordt. Dit kan deels al bij Rijkswaterstaat en wordt vaak ook al aangeboden[5]. Momenteel loopt er een onderzoek door CROW om het officieel als zand en grind te kunnen toepassen. Hierbij zou in principe al het zand en grind in nieuw beton vervangen kunnen worden in alle object-categorieën. Deze innovatie kent TRL 9 voor Objectcategorie I en TRL 7 voor de overige objectcategorieën. Er zijn genoeg gegevens beschikbaar om het effect van deze innovatie door te kunnen rekenen, waarmee de innovatie aan alle selectiecriteria voldoet.

Mechanische cementrecycling

Wanneer betonobjecten worden gesloopt, wordt het beton momenteel vaak in de vorm van betongranulaat als vulmiddel hergebruikt. Het is ook mogelijk om de materiaalfracties (zand, grind en cement) uit beton terug te winnen. Naast de innovatie mechanische zand-/grindrecycling kijken we hier naar het ***mechanisch*** terugwinnen van cementsteen uit betonresten en het toepassen hiervan in nieuw beton. Deze techniek wordt ontwikkeld door Rutte Groep onder de naam Slimbreken, wat gebeurt in een Smart Liberator-installatie.

Er lopen momenteel verschillende onderzoeken naar het toepassen van het teruggewonnen cement. Dit kan op verschillende manieren: als grondstof voor cement(vervangers) of als reactieve vulstof. Door het teruggewonnen cement op zo'n manier in te zetten wordt bespaard op primair cementgebruik — een materiaalbesparing waar ook een mee behaald wordt. Het TRL van deze innovatie is ongeveer TRL 8 voor Objectcategorie I en TRL 7 voor de overige objectcategorieën. Er zijn genoeg gegevens beschikbaar om het effect van deze innovatie door te kunnen rekenen, waarmee de innovatie aan alle selectiecriteria voldoet.

Mechanische/Thermische cementrecycling

Wanneer betonobjecten worden gesloopt, wordt het beton momenteel vaak in de vorm van betongranulaat als vulmiddel hergebruikt. Het is ook mogelijk om de materiaalfracties (zand, grind en cement) uit beton terug te winnen. Naast de innovatie mechanische cement-, zand- en grindrecycling kijken we hier naar een combinatie van ***mechanisch en thermisch*** terugwinnen uit betonresten en toepassen in nieuw beton van cement. Deze techniek wordt ontwikkeld door GBN in combinatie met de TU Delft (eerder ook wel C2CA genoemd). Hierbij worden de verschillende fracties eerst mechanisch van elkaar gescheiden, waarna de cementfractie thermisch wordt gereactiveerd.

5 Interview Sonja Fennis, Rijkswaterstaat.

Er lopen momenteel verschillende onderzoeken naar het toepassen van het teruggewonnen cement. Dit kan op verschillende manieren: als grondstof voor cement(vervangers) of als reactieve vulstof. Door het teruggewonnen cement op zo'n manier in te zetten wordt bespaard op primair cementgebruik - een materiaalbesparing waar ook een klimaatimpact-reductie mee behaald wordt. Het TRL van deze innovatie is ongeveer TRL 6 voor Object-categorie I en TRL 4 voor de overige objectcategorieën. Er zijn genoeg gegevens beschik-baar om het effect van deze innovatie door te kunnen rekenen, waarmee de innovatie aan alle selectiecriteria voldoet.

4.3.3 Alternatieve wapening

Basaltvezelstaven

Basaltvezelstaven bieden een alternatief voor traditionele wapening in betonobjecten. Basaltvezelstaven zijn drie keer lichter dan stalen wapeningsstaven en hebben een hogere elasticiteit en treksterkte. Daarnaast zijn basaltvezelstaven bestand tegen zuren, alkaliën en temperatuurverschillen, waardoor dit type wapening minder beschermd hoeft te worden tegen invloeden van buitenaf, dan conventionele stalen wapening. Daardoor is het ook mogelijk om minder cement toe te passen in beton dat gewapend is met basaltvezelstaven.

Voor Objectcategorie II geldt TRL 8 en voor Objectcategorie III geldt een TRL 4 of lager. Voor Objectcategorie I is deze innovatie niet relevant, aangezien die objecten geen wapening bevatten.

Deze innovatie verlaagt de milieu-impact van wapening in beton binnen Objectcategorie II en zorgt niet voor een significante afname van de mogelijkheid tot recycling. Er zijn daarnaast voldoende gegevens bij ons bekend om de innovatie door te rekenen. Daarmee voldoet het toepassen van alternatieve wapeningsstaven aan alle selectiecriteria.

Staalvezels

Staalvezels bieden een alternatief voor traditionele wapening in betonobjecten.
Ze verhogen de treksterkte in beton door hun lengte en onderlinge, willekeurige ordening. Deze vorm van wapening is momenteel vooral toepasbaar voor klein gewapend beton (Objectcategorie II) en voor specifieke toepassingen waarbij wapening door het hele object nodig is. Voor Objectcategorie II is de TRL 9, waarmee aan het eerste selectiecriterium wordt voldaan.

Deze innovatie verlaagt de hoeveelheid staal die nodig is in beton en daarmee de milieu-impact van de wapening van betonobjecten. Dit draagt ook bij aan de circulariteitsdoel-stellingen van Rijkswaterstaat. Staalvezels hebben bij regulier recyclen door middel van breken wel een negatieve invloed op de recycling van beton, maar bij de toepassing van mechanisch recyclen is er geen verschil tussen regulier beton en staalvezelbeton. Deze innovatie voldoet zodoende aan Selectiecriteria 2 en 3.

Ten slotte is er nog niet veel bekend over staalvezelbeton, maar zijn er genoeg gegevens beschikbaar om de innovatie door te rekenen. Daarmee voldoet het toepassen van staalvezels als alternatieve wapening ook aan Selectiecriterium 4.

4.3.4 Overige innovaties

CO_2-afvang en opslag bij cementklinkerproductie (CCS)

Tijdens de productie van portlandklinker voor gebruik in cement komt CO_2 vrij uit kalksteen. Deze CO_2 zou afgevangen kunnen worden voor opslag (*carbon capture and storage,* CCS) of kunnen worden gebruikt als grondstof in een ander productieproces (*carbon capture and utilization*, CCU). Er bestaan verschillende CO_2-afvangtechnieken die kunnen worden toegepast bij cementklinkercentrales. We bekijken hier de oxyfuel combustion-techniek, omdat deze volgens de Horizon 2020-studie CEMCAP het meest kosteneffectief is (Gardarsdottir, et al., 2019).

We schatten het TRL van deze innovatie in op TRL 7. Er zijn genoeg gegevens beschikbaar om de innovatie door te rekenen, de innovatie verlaagt de milieu-impact van portland-klinker aanzienlijk én levert zorgt niet voor een verandering in de samenstelling van beton en levert dus geen probleem op voor recycling. Daarmee voldoet de innovatie aan alle selectiecriteria.

4.3.5 Innovaties die alleen kwalitatief worden meegenomen

Demontabel bouwen

Demontabel bouwen houdt in dat al in de ontwerpfase van een kunstwerk rekening wordt gehouden met het einde van de levensduur ervan. Zo wordt gezorgd dat het kunstwerk (of delen ervan) wanneer het aan het einde van z'n levensduur is, kan worden ingezet in een nieuw kunstwerk of als onderdeel van een al bestaand kunstwerk (bijvoorbeeld als dat moet worden hersteld).

Er wordt al geëxperimenteerd met deze innovatie door Rijkswaterstaat. Uit de interviews met betonexperts bij Rijkswaterstaat blijkt dat deze innovatie vooral geschikt is voor Objectcategorie I en II, omdat daarin veel niet-unieke objecten voorkomen[6,7,8]. Objecten in Categorie III zouden eventueel ook geschikt zijn om op deze manier te ontwerpen.
Deze innovatie biedt kansen op zowel het gebied van klimaat, als op het gebied van circulariteit. Omdat het lastig is de innovatie te kwantificeren omdat deze erg object specifiek is, nemen we deze alleen kwalitatief mee.

Optimaal ontwerpen en bouwen

Bij optimaal ontwerpen worden objecten vooraf zo ontworpen dat alleen de strikt noodzakelijke hoeveelheid cement, wapening en beton toegepast hoeft te worden in objecten. Daarnaast kan ook rekening worden gehouden met de bouwplanning, bijvoorbeeld door activiteiten af te stemmen op de uithardingstijden van het beton. Dit kan tot een verlaagd energieverbruik tijdens de bouw en/of materiaalbesparingen leiden.

Voorbeelden van innovaties bij optimaal ontwerpen en bouwen zijn korrelpakking en modulerend koelen en verwarmen. De kosten- en milieueffecten van deze innovaties zijn

6 Interview Sonja Fennis, Rijkswaterstaat.
7 Interview Jan Mijnsbergen, Rijkswaterstaat.
8 Interview Hans de Vries, Rijkswaterstaat.

echter lastig in beeld te brengen, omdat ze erg object specifiek zijn. Daarom nemen we deze innovaties alleen kwalitatief mee.

Alternatieve materialen/alternatieve productiemethoden objecten

De objecten in beheer van Rijkswaterstaat die uitgevoerd worden in gewapend beton zouden in de toekomst ook uitgevoerd kunnen worden in alternatieve materialen of op basis van een alternatieve productiemethode dan gegoten beton. Hierbij kan gedacht worden aan het gebruik van hout of 3D-geprint beton. De mogelijkheden hiervan worden al getest bij Rijkswaterstaat[9].

De milieu-impactreductie die behaalt kan worden met deze innovatie is lastig te becijferen omdat dit sterk afhangt van het type kunstwerk. We nemen deze daarom ook niet mee in de kostencurves.

[9] Interview Jan Mijnsbergen, Rijkswaterstaat.

5 Onafhankelijke kostencurves

In dit hoofdstuk worden de onafhankelijke kostencurves voor 2020 en 2030 met de door ons geselecteerde innovaties gepresenteerd. Hierin worden voor 2020 alleen de innovaties met TRL 9 getoond en voor 2030 alle door ons geselecteerde innovaties (een van de selectie-criteria was immers dat de innovatie in 2020 een TRL van 6 heeft, zodat deze in 2030 breed ingezet kan worden).

Naast de onafhankelijke kostencurves voor beton bij Rijkswaterstaat, worden in dit hoofdstuk ook onafhankelijke reductiepotentiëlen per m^3 gepresenteerd voor innovaties in 2020 en 2030. Deze laatste resultaten staan los van het betongebruik bij Rijkswaterstaat en geven dus weer wat de milieu-impactreductie van de innovaties is, ten opzichte van het gebruik van een kuub beton in dezelfde objectcategorie, zoals door ons gedefinieerd in Tabel 17. Het is belangrijk om op te merken dat alle resultaten zijn bekeken van een inkoopperspectief: dit geldt met name voor de kosten, dat zijn hier kosten voor de inkoper. In sommige gevallen is ook een keuze gemaakt over de aan de inkoper toe te rekenen klimaatimpact- of MKI-scorereductie in Scope 3. De inkoper is hier Rijkswaterstaat.

Het reductiepotentieel van de innovaties kan voor onafhankelijke kostencurves nog overlappen omdat ze van toepassing zijn voor dezelfde m^3 beton. De resultaten in dit hoofdstuk kunnen dus gebruikt worden om het reductiepotentieel en de kosteneffectiviteit van **individuele innovaties** te vergelijken, maar niet om het totale reductiepotentieel voor Rijkswaterstaat in de desbetreffende jaren te bepalen. In Hoofdstuk 6 geven we afhankelijke kostencurves, waarin we het totale reductiepotentieel van de gecombineerde maatregelen met de totale klimaatimpact van betongebruik door Rijkswaterstaat in de beschouwde jaren vergelijken.

5.1 Reductiepotentieel per m^3 2020

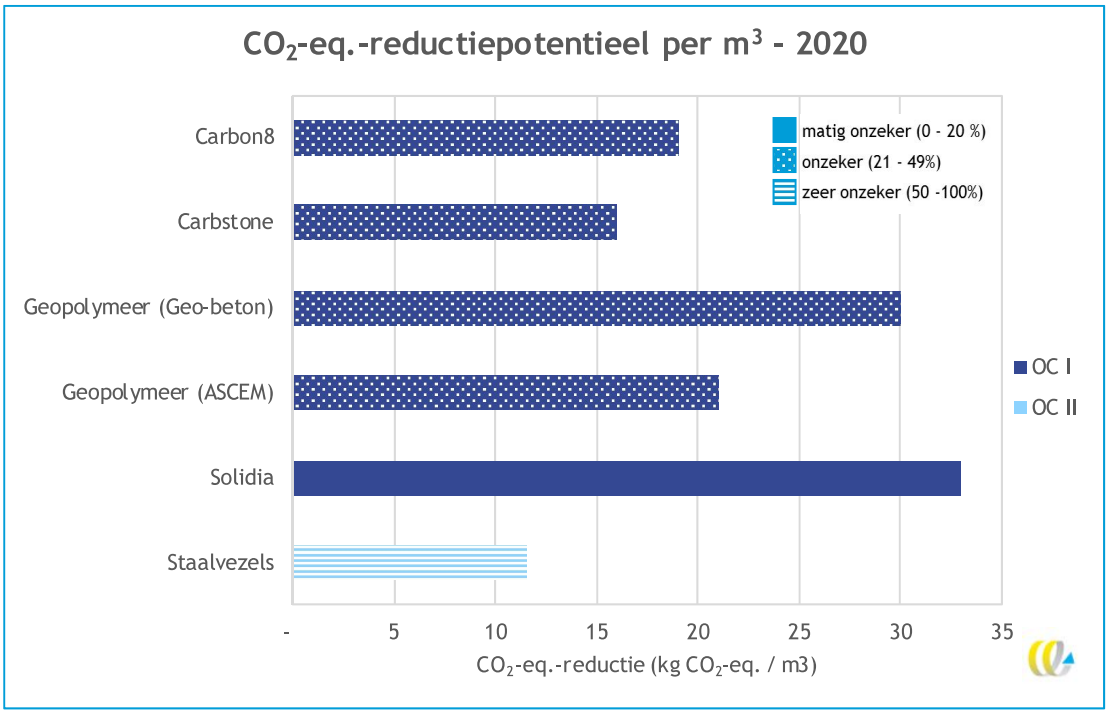
In de figuren in deze paragraaf worden de klimaatimpactreductie en de MKI-reductie van iedere betoninnovatie die door ons is geselecteerd in deze studie én beschikbaar is in 2020 gepresenteerd. Deze resultaten staan los van het betongebruik bij Rijkswaterstaat en geven dus weer wat de milieu-impactreductie van de innovaties is, ten opzichte van het gebruik van een kuub beton in dezelfde objectcategorie, zoals door ons gedefinieerd in Tabel 17. Daarnaast zijn ze onafhankelijk: het is bijvoorbeeld niet mogelijk om een hele kuub beton in een Object uit Categorie I te vervangen met zowel Carbstone™ als Solidia, omdat ze precies hetzelfde vervangen.

In de figuren in deze paragraaf laten we de onzekerheid op basis van TRL en gegevens van gebruikte bronnen zien. Om die onzekerheid te bepalen in de methodiek zoals beschreven in Paragraaf 3.3 gebruikt. De genoemde percentages zijn niet kwantitatief te gebruiken op de gepresenteerde resultaten, ze geven slechts een mate van onzekerheid aan op een schaal van 0-100%. Daarnaast zijn de belangrijkste maatregel-specifieke onzekerheden in de toelichting bij de figuur beschreven. We gaan overal uit van 100% beschikbaarheid van de grondstoffen voor de innovaties, ook wanneer die onzeker zijn. Voor meer informatie over de onzekerheden, zie Hoofdstuk 7 en de innovatiebeschrijvingen in Bijlage C.

Figuur 11 geeft het CO_2-eq.-reductiepotentieel per m^3 beton weer voor innovaties die beschikbaar zijn in 2020. Uit de figuur blijkt dat Solidia en Geopolymeer (Geo-beton™) momenteel de grootste klimaatimpactreductie hebben ten opzichte van het reguliere beton

dat wordt gebruikt in Objectcategorie I (niet-constructief), zie Tabel 17 voor de in deze studie aangenomen samenstelling voor dat beton. Voor Objectcategorie II is alleen de innovatie Staalvezels als alternatieve wapening beschikbaar. Meer informatie over het tot stand komen van deze resultaten, staat voor iedere innovatie in Bijlage C.

Figuur 11 - Onafhankelijk CO_2-eq.-reductiepotentieel per m^3 - 2020



Toelichting: Alleen de innovaties met TRL 9 in 2020 zijn getoond in deze figuur. De weergegeven onzekerheid gaat over de bron van de gebruikte gegevens en het TRL van de innovatie.

Let op!

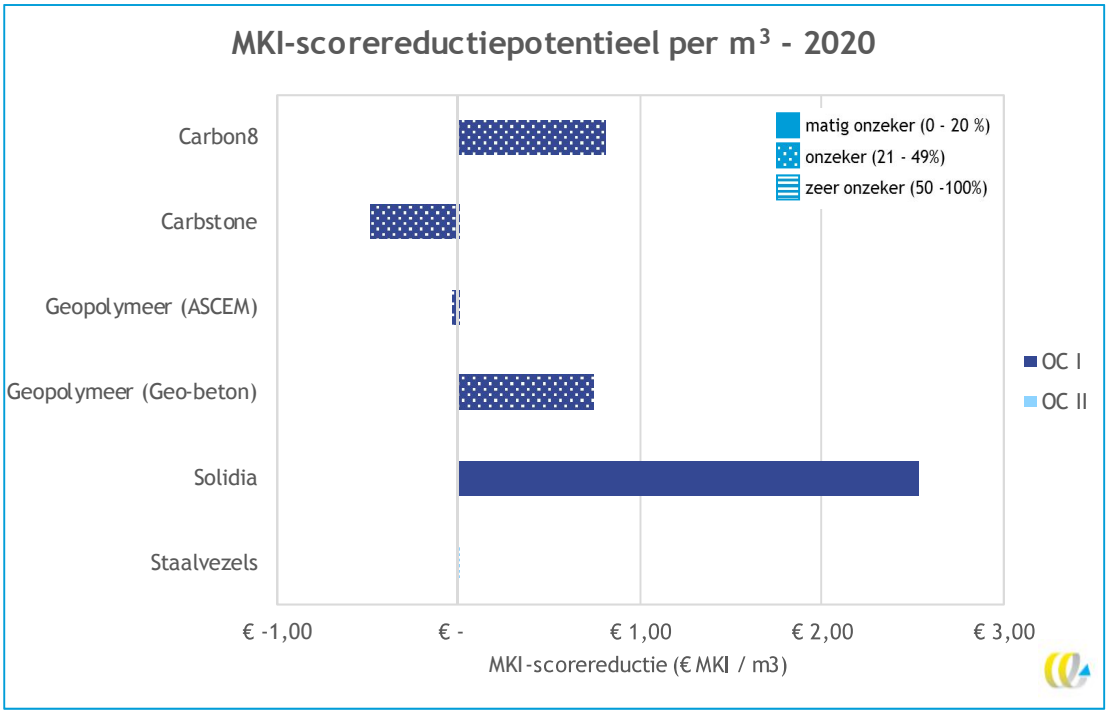
- Carbon8, Solidia en Carbstone™ slaan alle drie CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de CO_2-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit.

Figuur 12 geeft het MKI-reductiepotentieel per m^3 beton weer voor innovaties die beschikbaar zijn in 2020. Uit de figuur blijkt dat Solidia momenteel de grootste MKI-reductie heeft ten opzichte van het reguliere beton dat wordt gebruikt in Objectcategorie I (niet-constructief), zie Tabel 17 voor de in deze studie aangenomen samenstelling voor dat beton. Ook Geo-beton™ en Carbon8 scoren relatief goed. Opvallend is de negatieve MKI-score van voornamelijk Carbstone™. Dit heeft met name te maken met de hoge inschatting van het elektriciteitsgebruik bij de productie van Carbstone™-beton. Deze inschatting is echter vrij onzeker: er worden verschillende hoeveelheden elektriciteit in verschillende bronnen gegeven en dit is de worstcase. Mocht dit elektriciteitsgebruik lager uit blijken te vallen, dan leidt deze innovatie mogelijk wel tot een MKI-scorereductie. Ook ASCEM®-

cement heeft een licht negatief MKI-reductiepotentieel. Dit heeft met name te maken met het feit dat de impact op humane toxiciteit van ASCEM®-cement hoger is dan van hoogovencement, wat relatief zwaar mee weegt in de uiteindelijke MKI-score.

Voor Objectcategorie II is alleen de innovatie Staalvezels als alternatieve wapening beschikbaar. Deze heeft een negatieve MKI-scorereductie, aangezien staalvezelbeton niet goed gerecycled kan worden met regulier breken en er zodanig primair staal verloren gaat bij de afvalverwerking. Dit betekent dat de MKI-score van reguliere wapening in Objectcategorie II een lagere (=betere) MKI-score heeft. Meer informatie over het tot stand komen van deze resultaten, staat voor iedere innovatie in Bijlage C.

Figuur 12 - Onafhankelijk MKI-reductiepotentieel per m^3 - 2020



Toelichting: Alleen de innovaties met TRL 9 in 2020 zijn getoond in deze figuur. De weergegeven onzekerheid gaat over de bron van de gebruikte gegevens en het TRL van de innovatie.

Let op!

- Carbon8, Solidia en Carbstone™ slaan alle drie CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de CO_2-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit.

5.2 Reductiepotentieel per innovatie bij Rijkswaterstaat in 2020

Het CO_2-eq.-reductiepotentieel en het MKI-reductiepotentieel van de beschikbare, onafhankelijke maatregelen in 2020 op het areaal van Rijkswaterstaat in dat jaar zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 13 en Figuur 14.

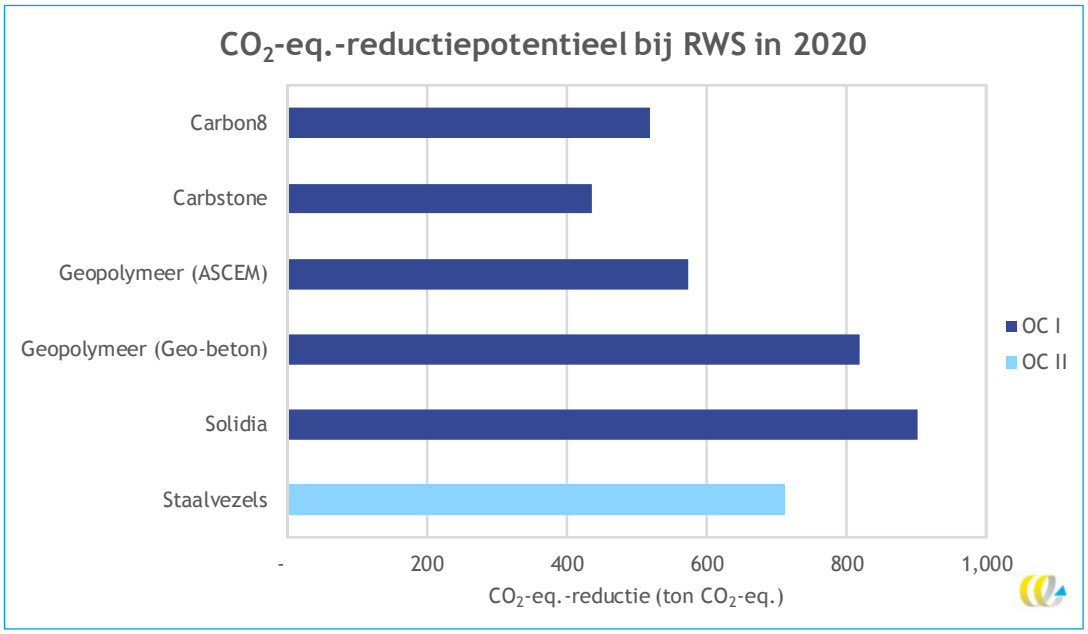
Alle innovaties lijken tot zichtbare klimaatimpactreducties te kunnen leiden, al leidt alleen de toepassing van Geo-beton™, Carbon8 en Solidia ook tot een reductie in MKI.

Figuur 13 geeft voor iedere innovatie die TRL 9 heeft bereikt in 2020 het CO_2-eq.-reductiepotentieel weer voor het areaal van Rijkswaterstaat in datzelfde jaar. Het hoogste CO_2-eq.-reductiepotentieel kan behaald worden met de toepassing van Solidia voor Objectcategorie I, op de voet gevolgd door Geo-beton™. Voor Objectcategorie II is staalvezels de enige maatregel die mogelijk is in 2020.

We hebben geen onafhankelijke kostencurves toegevoegd voor 2020, omdat van alle in dat jaar beschikbare innovaties de kosteneffectiviteit € 0/ton CO_2-eq. of €/€ MKI is. Een onafhankelijk kostencurve geeft in dit geval geen extra informatie bovenop de reductie-potentieelfiguren.

De belangrijkste maatregel-specifieke onzekerheden worden genoemd in de toelichting bij de figuur. Daarnaast moet worden genoemd dat het areaal dat per objectcategorie voor 2020 in ingeschat, een inschatting in samenspraak met Rijkswaterstaat is. We gaan overal uit van 100% beschikbaarheid van de grondstoffen voor de innovaties, ook wanneer die onzeker zijn. Voor meer informatie over de onzekerheden, zie Hoofdstuk 7 en de innovatiebeschrijvingen in Bijlage C.

Figuur 13 - Onafhankelijk CO_2-eq.-reductiepotentieel van betoninnovaties bij Rijkswaterstaat - op areaal in 2020



Toelichting: Alleen de innovaties met TRL 9 in 2020 zijn getoond in deze figuur.

Let op!

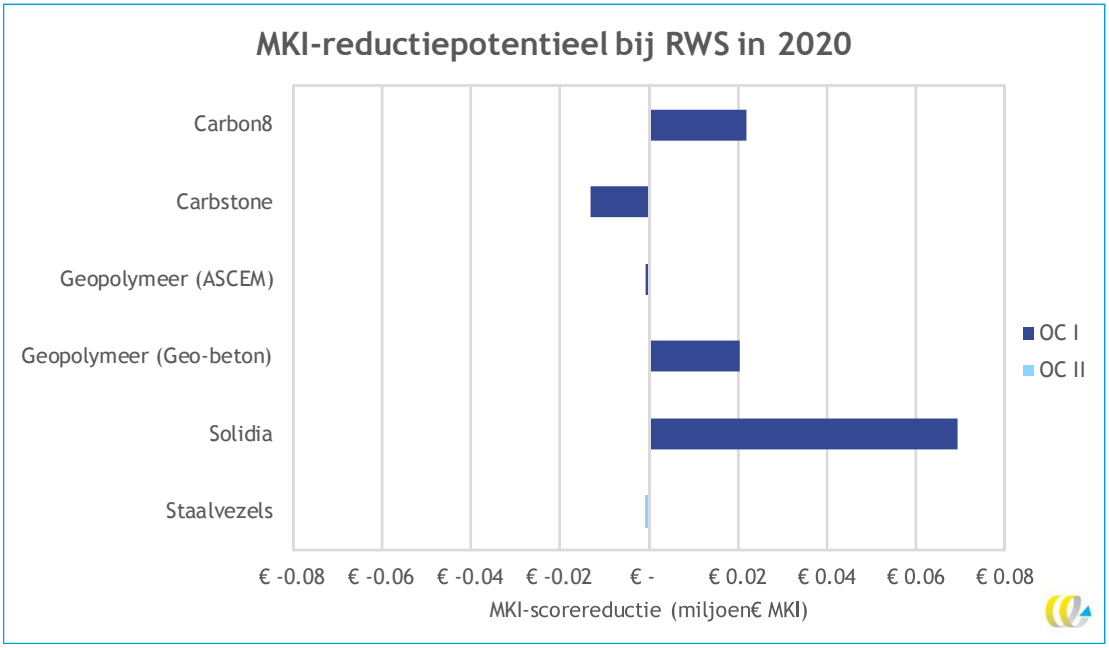
— Carbon8, Solidia en Carbstone™ slaan alle drie CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100%

toerekening aan de producten zou de CO_2-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.

- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit.

Figuur 14 geeft voor iedere innovatie die TRL 9 heeft bereikt in 2020 het MKI-reductie-potentieel voor het areaal van Rijkswaterstaat in datzelfde jaar weer. Net als het geval is bij de klimaatimpactreductie kan het hoogste MKI-reductiepotentieel behaald worden met de toepassing van Solidia voor Objectcategorie I. Dit kan worden gecombineerd met toepassing van Carbon8 als grindvervanger.

Figuur 14 - Onafhankelijk MKI-reductiepotentieel van betoninnovaties bij Rijkswaterstaat - op areaal in 2020



Toelichting: Alleen de innovaties met TRL 9 in 2020 zijn getoond in deze figuur.
Let op!

- Carbon8, Solidia en Carbstone™ slaan alle drie CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de MKI-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit.

Voor ASCEM®-cement en staalvezels is het MKI-score-reductiepotentieel licht negatief. Dit houdt in dat de MKI stijgt bij de toepassing van deze innovaties. Voor ASCEM®-cement heeft dit met name te maken met het feit dat de impact op humane toxiciteit van ASCEM®-cement hoger is dan van hoogovencement, wat relatief zwaar mee weegt in de uiteindelijke MKI-score. Voor staalvezels komt dit doordat staalvezelbeton minder goed gerecycled kan worden met regulier breken, waardoor bij afvalverwerking primair staal verloren gaat. Met mechanisch recyclen zou het staalvezelbeton even goed gerecycled kunnen worden als beton met reguliere wapening. Doordat mechanisch recyclen momenteel nog TRL 8 heeft, kan deze technologie echter nog niet meegenomen kan worden in 2020.

Het MKI-reductiepotentieel voor Carbstone™ komt ook negatief uit. Dit heeft met name te maken met de hoge inschatting van het elektriciteitsgebruik bij de productie van Carbstone™-beton. Deze inschatting is echter vrij onzeker: er worden verschillende hoeveelheden elektriciteit in verschillende bronnen gegeven en dit is de worstcase. Mocht dit elektriciteitsgebruik lager uit blijken te vallen, dan leidt deze innovatie mogelijk wel tot een MKI-scorereductie.

5.3 Reductiepotentieel per m³ 2030

In de figuren in deze Paragraaf worden de klimaatimpactreductie en de MKI-reductie van iedere betoninnovatie die door ons is geselecteerd in deze studie. Deze resultaten staan los van het betongebruik bij Rijkswaterstaat en geven dus weer wat de milieu-impactreductie van de innovaties is, ten opzichte van het gebruik van een kuub beton in dezelfde objectcategorie, zoals door ons gedefinieerd in Tabel 17. Daarnaast zijn ze onafhankelijk: het is bijvoorbeeld niet mogelijk om een hele kuub beton in een Object uit Categorie I te vervangen met zowel Carbstone™ als Solidia, omdat ze precies hetzelfde vervangen.

In de figuren in deze Paragraaf laten we de onzekerheid op basis van TRL en gegevens van gebruikte bronnen zien. Om die onzekerheid te bepalen in de methodiek zoals beschreven in Paragraaf 3.3 gebruikt. De genoemde percentages zijn niet kwantitatief te gebruiken op de gepresenteerde resultaten, ze geven slechts een mate van onzekerheid aan op een schaal van 0-100%. Daarnaast zijn de belangrijkste maatregel-specifieke onzekerheden in de toelichting bij de figuur beschreven. We gaan overal uit van 100% beschikbaarheid van de grondstoffen voor de innovaties, ook wanneer die onzeker zijn. Voor meer informatie over de onzekerheden, zie Hoofdstuk 7 en de innovatiebeschrijvingen in Bijlage C.

Figuur 15 geeft het CO_2-eq.-reductiepotentieel per m³ beton weer voor innovaties die beschikbaar zijn in 2030. Uit de figuur blijkt dat voor Objectcategorie I-beton Carbstone™ het hoogste klimaatimpactreductiepotentieel heeft. Ook Solidia, CCS en de door ons meegenomen geopolymeren geven een goed resultaat om de impact van cement te verlagen voor deze categorie. Mechanische/ mechanisch- en thermische cementsteenrecycling is ook interessant, we zijn hier uitgegaan van vervangen van respectievelijk 15 en 20% van regulier cement, dus door een relatief kleine verandering kan met recycling al veel impactreductie worden behaald. Carbon8 en zand- en grindrecycling toepassen verlaagd de impact van het grind en zand in beton. We schatten in dat deze innovaties ook kunnen worden toegepast in combinatie met de beton- en cementinnovaties.

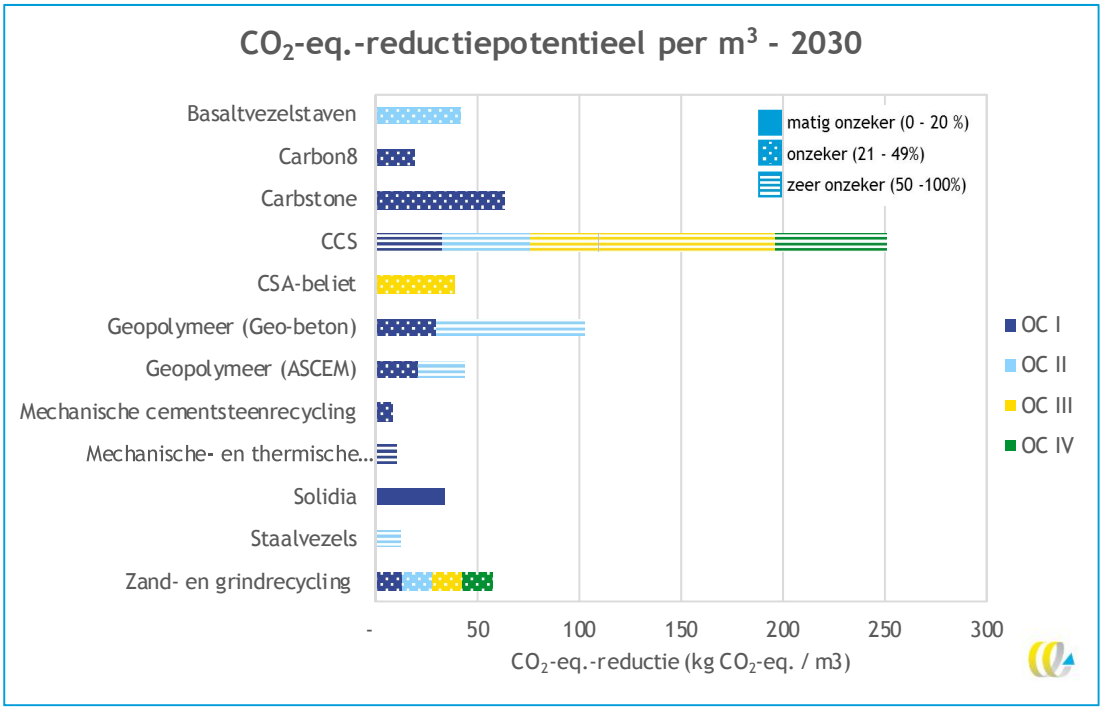
Voor Objectcategorie II-beton heeft het geopolymeer Geo-beton™ het hoogste klimaat-impactreductiepotentieel. Ook CCS geeft een goed resultaat om de impact van cement te verlagen voor deze categorie. Zand- en grindrecycling toepassen verlaagd de impact van het grind en zand in dit beton. We schatten in dat deze innovaties ook kunnen worden toegepast in combinatie met de beton- en cementinnovaties. Ook blijkt uit de resultaten

van OC II dat basaltvezelstaven en — in mindere mate — staalvezels interessante alternatieve wapening is wanneer het gaat om klimaatimpactreductie.

Voor OC III en OC IV zijn nog niet veel innovaties geschikt in 2030. CCS (CO_2-afvang en -opslag) bij Portlandcementklinkerproductie geeft een grote klimaatimpactreductie voor beide categorieën. Dat het voornamelijk is OC III sterk naar voren komt, is omdat het aandeel Portlandklinker in CEM I is veel hoger dan in CEM III/B en volgens de in onze studie meegenomen betonsamenstellingen, is OC III-beton het enige beton waarin CEM I zit (zie Tabel 17). Zand- en grindrecycling geeft ook in deze categorieën een impactreductie. Voor OC III is CSA-beliet ook een interessante cementvervanger.

Meer informatie over het tot stand komen van deze resultaten, staat voor iedere innovatie in Bijlage C.

Figuur 15 - Onafhankelijk CO_2-eq.-reductiepotentieel per m^3 - 2030



Toelichting: Alleen de innovaties met TRL 9 in 2030 zijn getoond in deze figuur. De weergegeven onzekerheid gaat over de bron van de gebruikte gegevens en het TRL van de innovatie.

Let op!

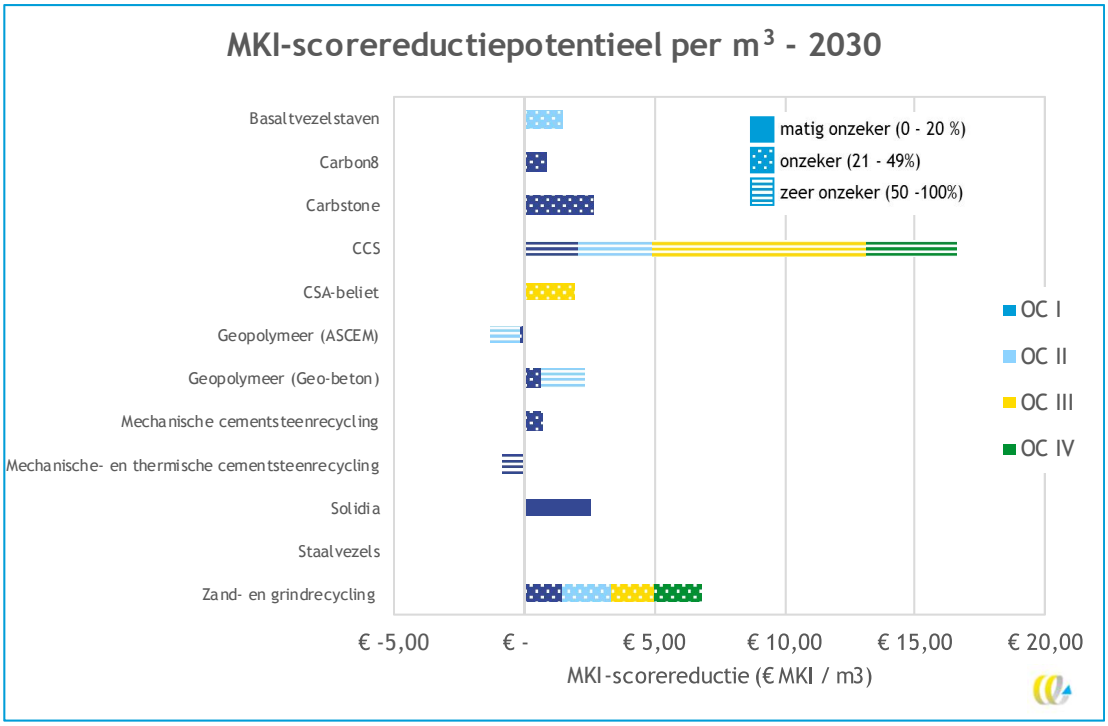
- Carbon8, Solidia en Carbstone™ slaan alle drie CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de CO_2-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit.
- Het gaat bij mechanische cementsteenrecyling om 15% gerecycled cement, en bij mechanische- en thermische cementsteenrecycling om 20% gerecycled cement.

Figuur 16 geeft het MKI-reductiepotentieel per m^3 beton weer voor innovaties die beschikbaar zijn in 2030. De resultaten zijn vergelijkbaar met die voor CO_2-impactreductie. Met name CCS (alle OC's), mechanische cementsteenrecycling (OC I), mechanische zand- en grindrecycling (alle OC's), Solidia (OC I), Carbstone™ (OC I) en CSA-beliet (OC II) geven een hoge reductie van MKI-score.

Opvallend is dat beide geopolymeren minder goed scoren wanneer naar MKI-score wordt gekeken: ASCEM®-cement heeft zelfs een negatieve MKI-impactreductie (en dus een hogere MKI-score dan OC I- en OC II-beton met regulier cement). Dit komt met name door de hogere impact op humane toxiciteit van ASCEM®-cement.
Ook staalvezels scoren niet goed op MKI, aangezien er bij de onafhankelijke kostencurve uit wordt gegaan van regulier breken in 2030. Hierdoor kan staalvezelbeton minder goed gerecycled worden, waardoor er primair staal verloren gaat bij de afvalverwerking van dit beton. Als er mechanisch recyclen toegepast zou worden, zou staalvezelbeton even goed gerecycled kunnen worden als beton met conventionele wapening.
Tot slot scoort mechanische- en thermische cementrecycling slechter op MKI, wat te wijten is aan dieselgebruik. Dit zou anders kunnen zijn wanneer er biodiesel wordt gebruikt, wat in de huidige pilotschaal het geval is.

Meer informatie over het tot stand komen van deze resultaten, staat voor iedere innovatie in Bijlage C.

Figuur 16 - Onafhankelijk MKI-reductiepotentieel per m^3 - 2030



Toelichting: Alleen de innovaties met TRL 9 in 2030 zijn getoond in deze figuur. De weergegeven onzekerheid gaat over de bron van de gebruikte gegevens en het TRL van de innovatie.
Let op!

- Carbon8, Solidia en Carbstone™ slaan alle drie CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de MKI-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.

- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit.
- Het gaat bij mechanische cementsteenrecyling om 15% gerecycled cement, en bij mechanische- en thermische cementsteenrecycling om 20% gerecycled cement (de rest is regulier cement).

5.4 Reductiepotentieel per innovatie bij Rijkswaterstaat in 2030

Het CO_2-eq.-reductiepotentieel en het MKI-reductiepotentieel van de innovaties die beschikbaar zijn in 2030 voor toepassing op het areaal van Rijkswaterstaat in datzelfde jaar zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 17 en Figuur 18.

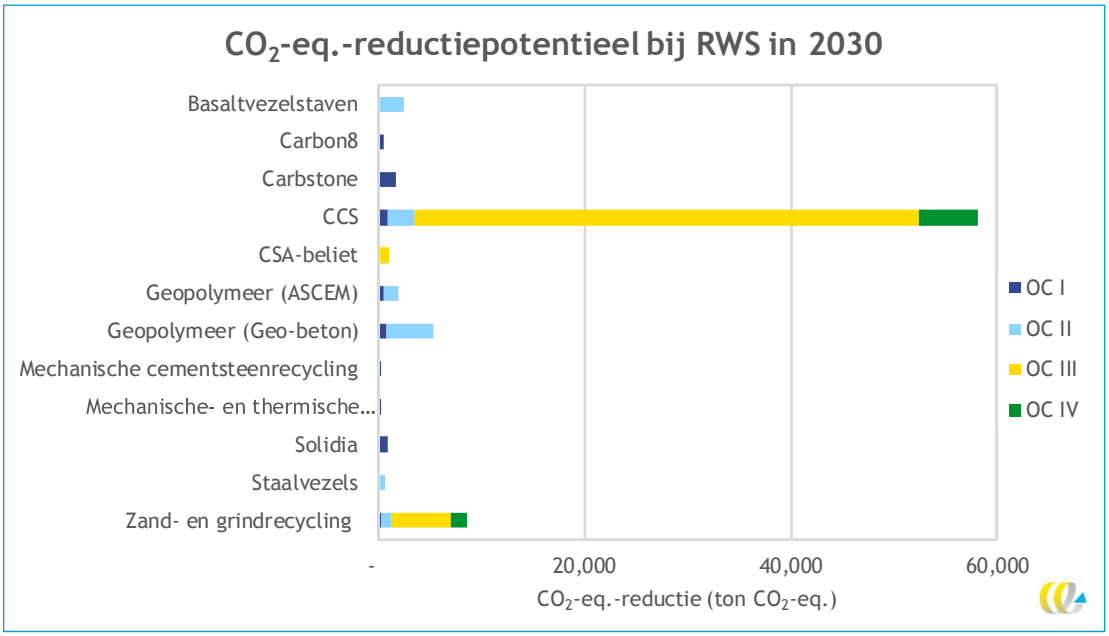
Uit beide figuren is op te maken dat met name de toepassing van CCS (CO_2-afvang en opslag) bij cementklinkerproductie een groot klimaatimpactreductiepotentieel heeft. Dit is niet onverwachts, aangezien hierbij een groot gedeelte van de CO_2-emissies van cementklinkerproductie afgevangen wordt. Dat het reductiepotentieel van CCS vooral bij OC III erg groot is, heeft te maken met de inschatting van de areaalhoeveelheid van RWS voor toepassing van dit type beton. Dit is veel hoger dan het OC I-, OC II- of OC IV-betongebruik. Daarnaast is ook de Portlandcementklinkerhoeveelheid in OC III-beton het hoogst: het aandeel Portlandklinker in CEM I is veel hoger dan in CEM III/B en volgens de in onze studie meegenomen betonsamenstellingen, is OC III-beton het enige beton waarin CEM I zit. CO_2-afvang vindt plaats bij productie van Portlandklinker.

Alleen voor OC II heeft de toepassing van geopolymeer Geo-beton™ het hoogste reductie voor zowel CO_2-eq. als MKI. Zand- en grindrecycling, basaltvezelstaven, Solidia, CSA-beliet en Carbstone™ komen ook naar boven als relevante innovaties, maar door het hoge potentieel van CCS bij cementklinkerproductie vallen deze binnen de figuren naar de achtergrond.

Bij Rijkswaterstaat wordt relatief weinig OC I- en OC II-beton toegepast. Dit verklaart waarom de impactreductie van innovaties in die objectcategorieën in de figuren voor reductie op het areaal van RWS minder goed naar voren komen dan in de figuren over impactreductie per kuub beton.

De belangrijkste maatregel-specifieke onzekerheden worden genoemd in de toelichting bij de figuur. Daarnaast moet worden genoemd dat het areaal per objectcategorie een inschatting in samenspraak met Rijkswaterstaat is. We gaan overal uit van 100% beschikbaarheid van de grondstoffen voor de innovaties, ook wanneer die onzeker zijn. Voor meer informatie over de onzekerheden, zie Hoofdstuk 7 en de innovatiebeschrijvingen in Bijlage C.

Figuur 17 - CO_2-eq.-reductiepotentieel van betoninnovaties bij Rijkswaterstaat - op areaal in 2030

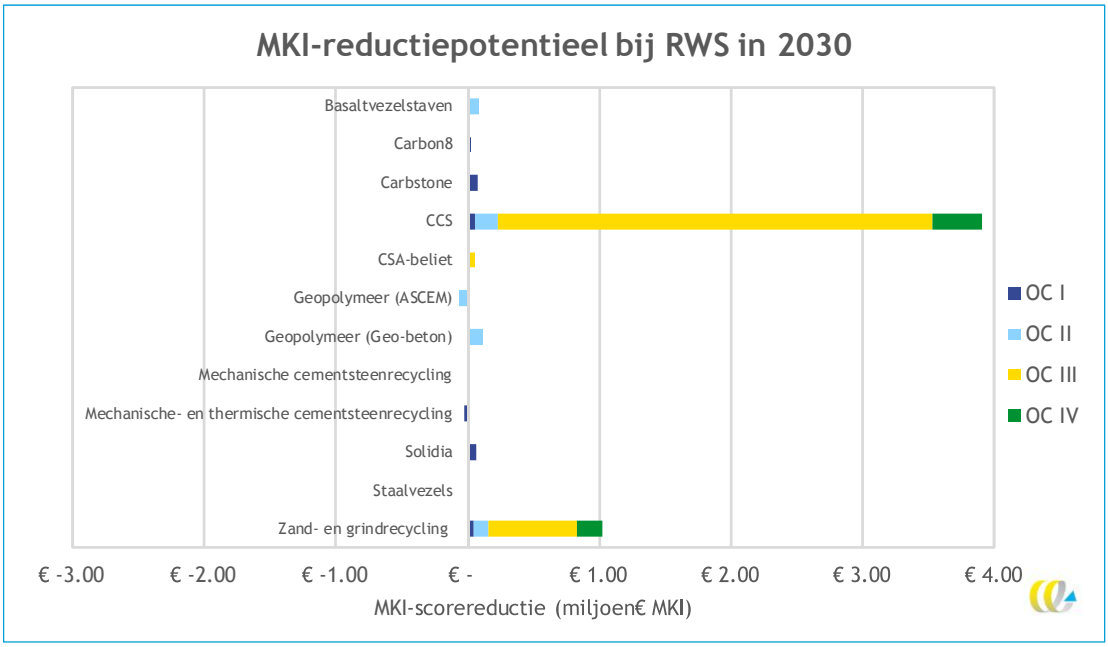


Toelichting: Alleen de innovaties met TRL 9 in 2030 zijn getoond in deze figuur.
Let op!

- Carbon8, Solidia en Carbstone™ slaan alle drie CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de CO_2-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit.
- Het gaat bij mechanische cementsteenrecycling om 15% gerecycled cement, en bij mechanische- en thermische cementsteenrecycling om 20% gerecycled cement (de rest is regulier cement).

In Figuur 18 is de verdeling van het MKI-reductiepotentieel ongeveer gelijk aan het CO_2-reductiepotentieel. Uitzondering hierop zijn de geopolymeer ASCEM, mechanische- en thermische cementrecycling en staalvezels, aangezien de toepassing van deze innovaties geassocieerd is met een negatief MKI-scorereductiepotentieel. Dit houdt in dat de MKI stijgt, ondanks dat de klimaatimpact lager is.

Figuur 18 - MKI-reductiepotentieel van betoninnovaties bij Rijkswaterstaat - op areaal in 2030



Toelichting: Alleen de innovaties met TRL 9 in 2030 zijn getoond in deze figuur.

Let op!

- Carbon8, Solidia en Carbstone™ slaan alle drie CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de MKI-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit
- Het gaat bij mechanische cementsteenrecyling om 15% gerecycled cement, en bij mechanische- en thermische cementsteenrecycling om 20% gerecycled cement (de rest is regulier cement).

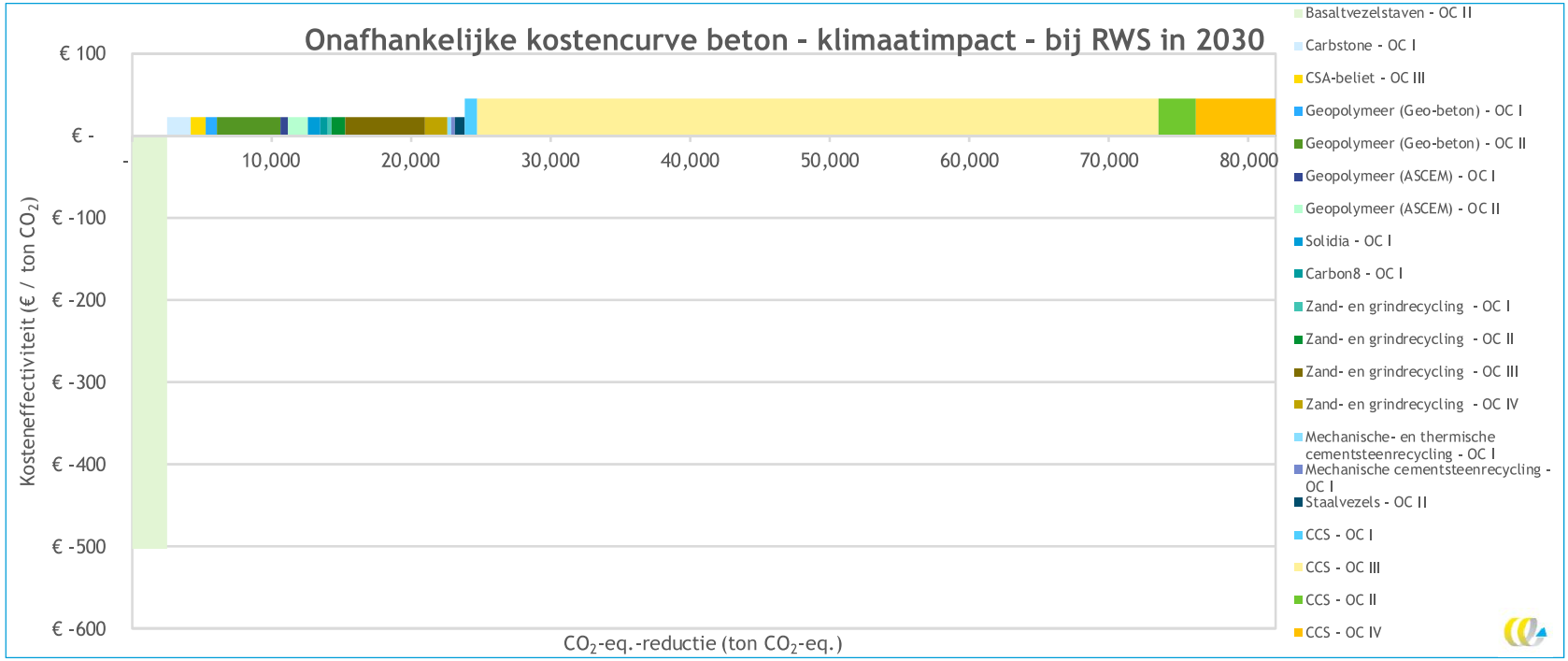
5.5 Onafhankelijke kostencurve Rijkswaterstaat 2030

De onafhankelijke kostencurves voor CO_2-eq. en MKI van de innovaties in 2030 zijn weergegeven in Figuur 19 en Figuur 20.

Uit de grafiek is op te maken dat er twee innovaties zijn waarvan we inschatten dat de kosten voor Rijkswaterstaat zouden veranderen. De kosten bij het gebruik van basaltvezelstaven in constructief beton zullen hoogstwaarschijnlijk afnemen ten opzichte van reguliere wapening in het referentiebeton, terwijl de kosten van beton bij het gebruik van CCS bij cementklinkerproductie waarschijnlijk toe zullen nemen. CCS bij cement-klinkerproductie heeft duidelijk wel een hoog reductiepotentieel, zowel op klimaatimpact als op MKI. We verwachten dat de rest van de maatregelen tegen marktprijs op de markt te brengen zijn. De kosteneffectiviteit van deze maatregelen is handmatig op een waarde boven € 0/m^3 gezet, omdat ander het reductiepotentieel niet zichtbaar is in de figuur. Zoals al benoemd in de introductie van dit hoofdstuk, is het niet mogelijk om het reductiepotentieel van de maatregelen in de onafhankelijke kostencurve op te tellen tot een totaalpotentieel voor Rijkswaterstaat, omdat er mogelijk overlap tussen de

maatregelen zit. De belangrijkste maatregel-specifieke onzekerheden worden genoemd in de toelichting bij de figuur. Daarnaast moet worden genoemd dat het areaal per object-categorie een inschatting in samenspraak met Rijkswaterstaat is. We gaan overal uit van 100% beschikbaarheid van de grondstoffen voor de innovaties, ook wanneer die onzeker zijn. Voor meer informatie over de onzekerheden, zie Hoofdstuk 7 en de innovatie-beschrijvingen in Bijlage C.

Figuur 19 - Onafhankelijke kostencurve betoninnovaties klimaatimpact - 2030



Let op!

- De kosteneffectiviteit van alle maatregel behalve basaltvezelstaven en CCS bij cementklinkerproductie zijn handmatig op een waarde rond de nul gezet om deze zichtbaar te maken in de grafiek. De kosteneffectiviteit is daadwerkelijk € 0/ton CO_2-eq.
- Carbon8, Solidia en Carbstone™ slaan alle drie CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit.
- Het gaat bij mechanische cementsteenrecyling om 15% gerecycled cement, en bij mechanische- en thermische cementsteenrecycling om 20% gerecycled cement.

Figuur 20 - Onafhankelijke kostencurve betoninnovaties milieu-impact (MKI) - 2030

Let op!

- De kosteneffectiviteit van alle maatregel behalve basaltvezelstaven en CCS bij cementklinkerproductie zijn handmatig op een waarde rond de nul gezet om deze zichtbaar te maken in de grafiek. De kosteneffectiviteit is daadwerkelijk € 0/€ MKI.
- Carbon8, Solidia en Carbstone™ slaan alle drie CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit.
- Het gaat bij mechanische cementsteenrecyling om 15% gerecycled cement.

6 Afhankelijke kostencurves

In Hoofdstuk 5 zijn alle innovaties apart van elkaar bekeken, in dit hoofdstuk bepalen we het totaal reductiepotentieel dat behaald kan worden als innovaties gecombineerd worden. Dit totale reductiepotentieel is kleiner dan de som van het reductiepotentieel van individuele maatregelen. Sommige innovaties zijn immers van toepassing op dezelfde m^3 beton. Het is bijvoorbeeld onmogelijk om CEM I te vervangen door zówel CSA-belietcement als door Solidiacement. Hier zal dus een keuze gemaakt moeten worden.

In Paragraaf 6.1 geven we de combinatiematrices weer voor 2020 en 2030. Hieruit is af te lezen welke innovaties wél en welke innovaties niet samen toegepast kunnen worden in dezelfde m^3 beton. In Paragraaf 6.2 beschrijven we het pakket van innovaties dat tot het hoogste reductiepotentieel zou leiden voor zowel 2020 als voor 2030. In Paragraaf 6.3 beschrijven we vervolgens het reductiepotentieel en de afhankelijke kostencurve voor 2020 en in Paragraaf 6.4 doen we dit voor 2030.

6.1 Combinatiematrix

In de tabellen hierna geven we weer:
- welke innovaties er samen uitgevoerd kunnen worden zonder onderlinge beïnvloeding (+);
- welke innovaties samen uitgevoerd kunnen worden maar wél elkaars reductiepotentieel beïnvloeden (!) (wanneer relevant wordt in Paragraaf 6.2 beschreven hoe);
- welke innovaties elkaar uitsluiten(-).

Tabel 8 geeft de combinatiematrix weer voor 2020, en Tabel 9 die voor 2030.

Tabel 8 - Combinatiematrix 2020

		Alternatieve betonsamenstelling				Circulair bouwen
		Carbstone™	Geopoly-meren: ASCEM®-cement	Geopoly-meren: Geobeton™	Solidia	Carbon8
Alternatieve beton-samenstelling	Carbstone™	-	-	-	-	!
	Geopolymeren: ASCEM®-cement	-	-	-	-	+
	Geopolymeren: Geo-beton™	-	-	-	-	+
	Solidia	-	-	-	-	+
Circulair bouwen	Carbon8	!	+	+	+	-
Alt. Wapening	Staalvezels	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.

Let op!
- Staalvezels kunnen in 2020 niet samen met andere innovaties, omdat deze andere innovaties alleen beschikbaar zijn voor OC I en staalvezels alleen voor OC II (er zit geen wapening in OC I).

Tabel 9 - Combinatiematrix 2030

		Alternatieve betonsamenstelling				Circulair bouwen				Alt. wapening		Overig	
		Carbstone™	CSA-Beliet	Geopolymeren: ASCEM® cement	Geopolymeren: Geo-beton™	Solidia	Carbon8	Mech. grind-/zandrecycling	Mech. cementrecycling	Mech./therm. cementrecycling	Basaltvezelstaven	Staalvezels	CO_2-afvang cementklinker
Alternatieve beton-samenstelling	Carbstone™	-	-	-	-	-	!	! (2)	-	-	N.v.t.	N.v.t.	-
	CSA-beliet	-	-	-	-	-	+	+	-	-	!	+	-
	Geopolymeren: ASCEM®-cement	-	-	-	-	-	+	+	-	-	!	+	-
	Geopolymeren: Geo-beton™	-	-	-	-	-	+	+	-	-	!	+	-
	Solidia	-	-	-	-	-	+	+	-	-	N.v.t.	-	-
Circulair bouwen	Carbon8	!	+	+	+	+	-	+ (1)	+	+	N.v.t.	N.v.t.	+
	Mech. grind-/zandrecycling	! (2)	+	+	+	+	+ (1)	-	+	+	+	!	+
	Mech. cementrecycling	-	-	-	-	-	+	+	-	-	N.v.t.	N.v.t.	+
	Mech./therm. cementrecycling	-	-	-	-	-	+	+	-	-	N.v.t.	N.v.t.	+
Alt. wapening	Basaltvezelstaven	N.v.t.	+	+	+	N.v.t.	N.v.t.	+	N.v.t.	N.v.t.	-	-	+
	Staalvezels	N.v.t.	+	+	+	-	N.v.t.	!	N.v.t.	N.v.t.	-	-	+
Overig	CO_2-afvang cementklinker	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-

(1) Alleen de zandfractie.

(2) alleen de grindfractie.

6.2 Innovatiepakketten

Voor iedere objectcategorie is een innovatiepakket (ook *maatregelpakket* genoemd) opgesteld voor 2020 en 2030. Deze pakketten zijn gebaseerd op de combinatie van innovaties die in dat jaar beschikbaar zijn, leiden tot de hoogste klimaatimpactreductie en gecombineerd kunnen worden. In sommige gevallen leidt het combineren van innovaties tot een verandering in impactreductie, omdat er overlap tussen de innovaties is. Wanneer hier sprake van is, wordt hieronder uitgelegd hoe hiermee om is gegaan. We hebben ook afhankelijke MKI-kostencurves opgesteld, waarin de MKI van de innovatiepakketten voor dat jaar met de laagste **klimaat**impactreductie wordt getoond. Er zijn in deze studie dus geen innovatiepakketten opgesteld speciaal voor de MKI-kostencurve, waarbij uit wordt gegaan van de laagste MKI-score — de focus is op klimaat. Het doel van de MKI-kostencurves is om te laten zien of er ook een MKI-reductie plaatsvindt bij het inzetten op de laagste klimaat-impact en hoe groot die reductie dan is. Voor 2020 is niet voor iedere objectcategorie een pakket opgesteld, omdat er niet voor iedere categorie innovaties beschikbaar zijn in dat jaar.

2020

Van de alternatieve betonsamenstellingen leidt Solidia tot de hoogste klimaatimpact-reductie en de hoogste MKI-scorereductie, daarnaast leidt deze innovatie niet tot een kostentoename voor Rijkswaterstaat. In 2020 kan Carbon8 (grindvervanger) toegepast worden in combinatie met alle alternatieve betonsamenstellingen voor Objectcategorie I, dus ook met Solidia. We kiezen voor OC I daarom voor een combinatie van Solidia en Carbon8 als maatregelenpakket.

In 2020 kan staalvezels toegepast worden voor Objectcategorie II. Dit is de enige innovatie die mogelijk is voor deze objectcategorie en deze leidt daarmee tot de hoogste klimaat-impactreductie. Deze innovatie leidt niet tot een kostentoename voor Rijkswaterstaat. Een belangrijke opmerking hier is dat deze innovatie wel leidt tot een hogere MKI-score.

Voor de Objectcategorieën III en IV zijn in 2020 nog geen innovaties beschikbaar.

2030

Voor Objectcategorie I zijn er in 2030, naast de innovaties die in 2020 beschikbaar waren, additioneel de volgende innovaties mogelijk; Geopolymeren ASCEM®-cement, Geo-beton™, mechanische grind- zandrecycling, mechanische cementrecycling, CO_2-afvang bij klinker-productie. De grootste klimaatimpactreductie wordt behaald door Carbstone™ in combinatie met Carbon8, dus dat is het pakket dat we voor OC I kiezen. Deze twee innovaties kunnen niet zomaar bij elkaar worden opgeteld, omdat de hoeveelheid grind in Carbstone™ anders is dan de hoeveelheid grind in regulier OC I-beton. Dit wordt opgelost door van Carbon8 de hoeveelheid die is benodigd voor 1 m^3 aan te passen op de hoeveelheid grind in Carbstone™-beton.

Voor Objectcategorie II zijn er in 2030 beschikbaar: Geopolymeren ASCEM®-cement, Geo-beton™, mechanische grind- zand recycling, basaltvezelstaven, staalvezels, CO_2-afvang. Geo-beton™ geeft de hoogste CO_2-impactreductie, wel geeft deze innovatie een lagere reductie op MKI. De combinatie met zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven zorgt voor de grootste reductie in CO_2-eq. en MKI. Een combinatie met staalvezelwapening en zand-

grind recycling is ook interessant, aangezien mechanisch recyclen de impactreductie van staalvezelwapening positief beïnvloed. Dit zorgt voor een sterkere klimaatimpactreductie en een lichte MKI-scorereductie, doordat staalvezelbeton met mechanisch recyclen even goed gerecycled kan worden als beton met conventionele wapening. De combinatie met staalvezelwapening zorgt echter voor een lagere impactreductie dan de combinatie met basaltvezelstaven, waardoor staalvezels toch niet meegenomen worden in de afhankelijke kostencurve. We kiezen voor OC II in 2030 voor het pakket Geo-beton™, zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven.

Voor Objectcategorie III zijn in 2030 alleen de innovaties grind-/zandrecycling, CSA-beliet en CO_2-afvang en -opslag (CCS) beschikbaar. Hierbij moet een keuze gemaakt worden tussen CCS en CSA-beliet, omdat de innovatie CCS alleen bekeken is voor Portlandklinker en niet voor CSA-belietklinker. Bij de productie van CSA-belietklinker komt weliswaar CO_2 vrij (in totaal 30% minder dan Portlandcementklinker), maar de exacte hoeveelheid CO_2 die afgevangen kan worden is niet bekend. Omdat de klimaatimpactreductie van CCS vele malen hoger is, wordt deze innovatie meegenomen in het maatregelenpakket voor Objectcategorie III, in combinatie met zand- en grindrecycling. De kosten voor CO_2-afvang zijn overigens wél veel hoger dan voor het toepassen van CSA-beliet.

Voor Objectcategorie IV zijn in 2030 hoogstwaarschijnlijk alleen de innovaties zand- en grindrecycling en CCS beschikbaar. Deze kunnen ook samen toegepast worden, dit is dus het maatregelpakket voor OC IV.

6.3 Afhankelijke kostencurve 2020

De afhankelijke kostencurves voor CO_2-eq. en MKI van het voor 2020 geselecteerde maatregelenpakket zijn weergegeven in Figuur 21 en Figuur 22.

Ook al hebben alle bekeken innovaties in de maatregelenpakketten voor 2020 een kosten-effectiviteit van € 0 en is een kostencurve daarom minder logisch, voor het CO_2- en MKI-reductiepotentieel is deze vorm van weergave in dit geval wel logischer omdat het om het potentieel van een pakket aan maatregelen gaat, niet om een potentieel van individuele maatregelen. Met andere woorden, de maatregelen zijn op te tellen en laten bij elkaar het totale reductiepotentieel voor Rijkswaterstaat in 2020 en 2030 zien, op basis van de in deze studie meegenomen innovaties.

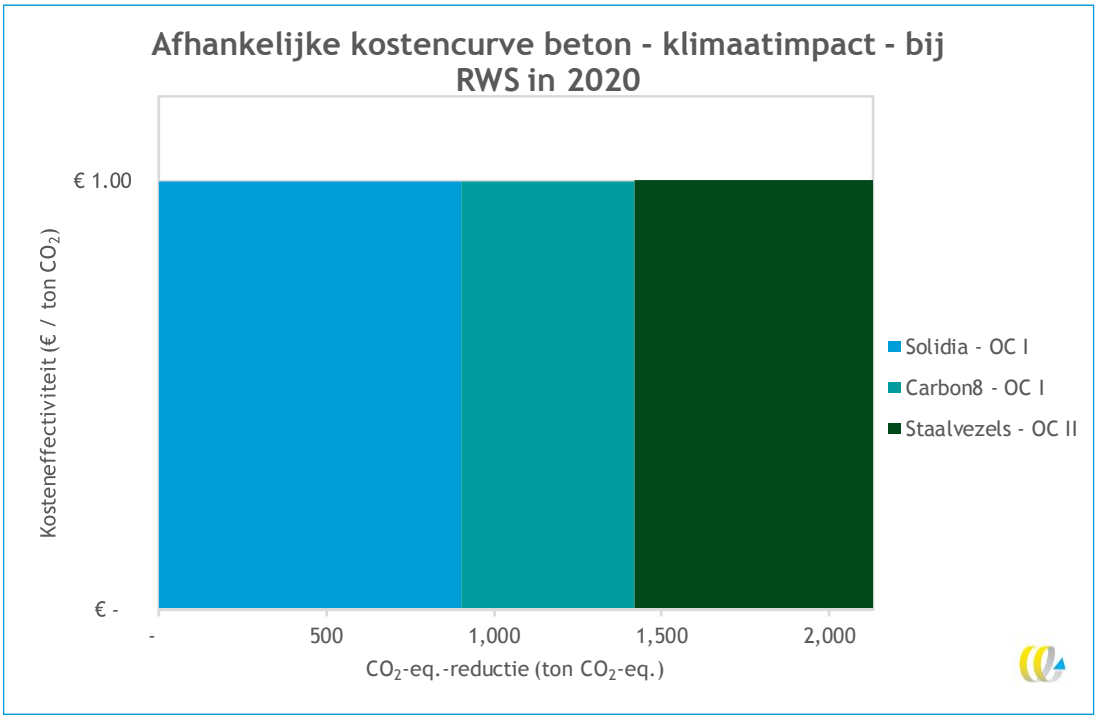
Figuur 21 en Figuur 22 laten de afhankelijke kostencurves voor CO_2-eq. en MKI voor het maatregelenpakket met de hoogste CO_2-impactreductie in 2020 zien. De innovatie staalvezels heeft een negatief MKI-reductiepotentieel doordat er minder staal gerecycled kan worden dan met conventionele wapening. Deze innovatie is daarom niet zichtbaar in de afhankelijke MKI-kostencurve. Voor Objectcategorie II is er daarom geen maatregel die leidt tot een lagere MKI-score dan regulier beton (de enige beschikbare innovatie voor OC II in 2020 is immers staalvezels).

De belangrijkste maatregel-specifieke onzekerheden worden genoemd in de toelichting bij de figuur. Daarnaast moet worden genoemd dat het areaal per objectcategorie een inschatting in samenspraak met Rijkswaterstaat is. We gaan overal uit van 100% beschikbaarheid van de grondstoffen voor de innovaties, ook wanneer die onzeker zijn. Voor meer informatie over de onzekerheden, zie Hoofdstuk 7 en de innovatiebeschrijvingen in Bijlage C.

In 2020 is het totale, maximale CO_2-eq.-reductiepotentieel dat door Rijkswaterstaat kan worden behaald met de in deze studie meegenomen innovaties, 2.131 ton CO_2-eq..

In 2020 is het totale, maximale MKI-reductiepotentieel dat door Rijkswaterstaat kan worden behaald met de in deze studie meegenomen combinatie van CO_2-reducerende innovaties, 91.050 € MKI. In Paragraaf 6.5 kijken we hoe deze resultaten zich verhouden tot de doelstellingen van RWS.

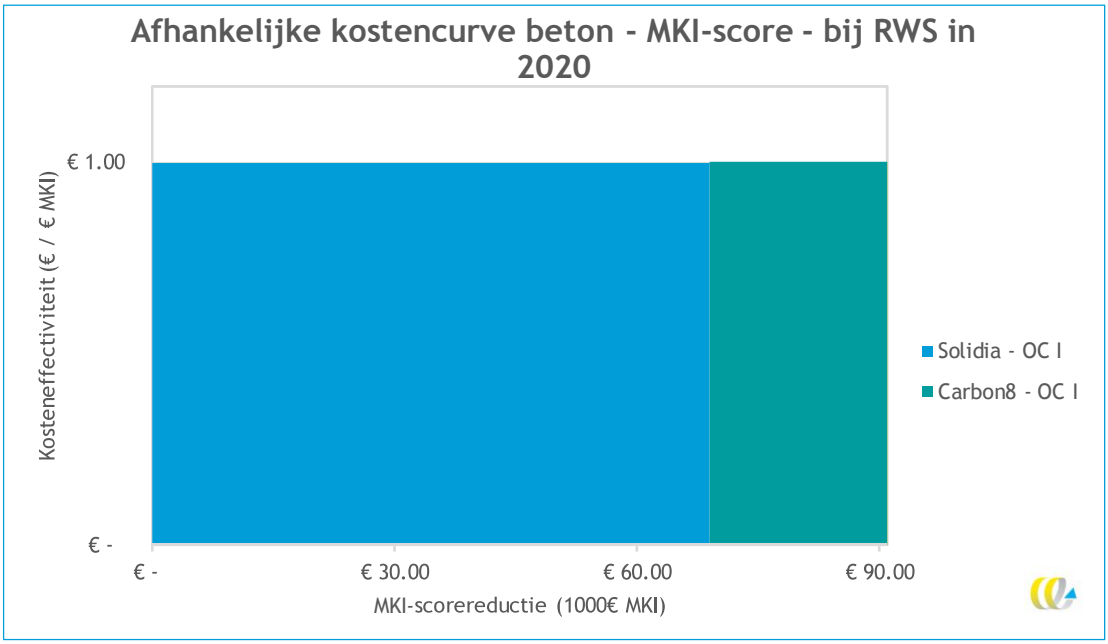
Figuur 21 - Afhankelijke kostencurve betoninnovaties klimaatimpact voor maatregelenpakket 2020



Let op!

- De kosteneffectiviteit van de maatregelen Solidia, Carbon8 en staalvezels zijn handmatig op een waarde rond de nul gezet om deze zichtbaar te maken in de grafiek. De kosteneffectiviteit is daadwerkelijk € 0/ton CO_2-eq.
- Carbon8 en Solidia slaan CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de CO_2-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.

Figuur 22 - Afhankelijke kostencurve betoninnovaties milieu-impact (MKI) voor maatregelenpakket 2020



Let op!

- De kosteneffectiviteit van de maatregelen Solidia en Carbon8 zijn handmatig op een waarde rond de nul gezet om deze zichtbaar te maken in de grafiek. De kosteneffectiviteit is daadwerkelijk € 0/€ MKI.
- Omdat de MKI-scorereductie van staalvezels kleiner dan 0€ MKI is (oftewel, er is geen reductie), is deze innovatie niet zichtbaar in de figuur.
- Carbon8 en Solidia slaan CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de MKI-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.

6.4 Afhankelijke kostencurve 2030

De afhankelijke kostencurves voor CO_2-eq. en MKI van het voor 2030 geselecteerde maatregelenpakket zijn weergegeven in Figuur 23 en Figuur 24.

In beide figuren is te zien dat het gebruik van basaltvezelstaven Rijkswaterstaat kosten bespaard ten opzichte van de huidige situatie. De CCS-maatregelen hebben hogere kosten Rijkswaterstaat. Van de overige maatregelen schatten we in dat de kosten gelijk blijven, maar is de kosteneffectiviteit in de figuren handmatig boven 0 gezet, om ze zichtbaar te maken.

Het reductiepotentieel van sommige van de innovaties in deze figuren wijkt af van dat weergegeven in Hoofdstuk 5. De reden hiervoor is dat er voor Objectcategorie I en II in de maatregelenpakketten die tot het hoogste reductiepotentieel leiden een overlap tussen de maatregelen zit, waarvoor de berekeningen iets zijn aangepast.

Voor Objectcategorie I is Carbstone™ gecombineerd met Carbon8 (deze laatste vervangt het grind in de Carbstone™). Het reductiepotentieel van Carbon8 is hierop aangepast, door de hoeveelheid grind in Carbstone™ als referentie te nemen, en het vervangen van die hoeveelheid grind met Carbon8 als maatregel.

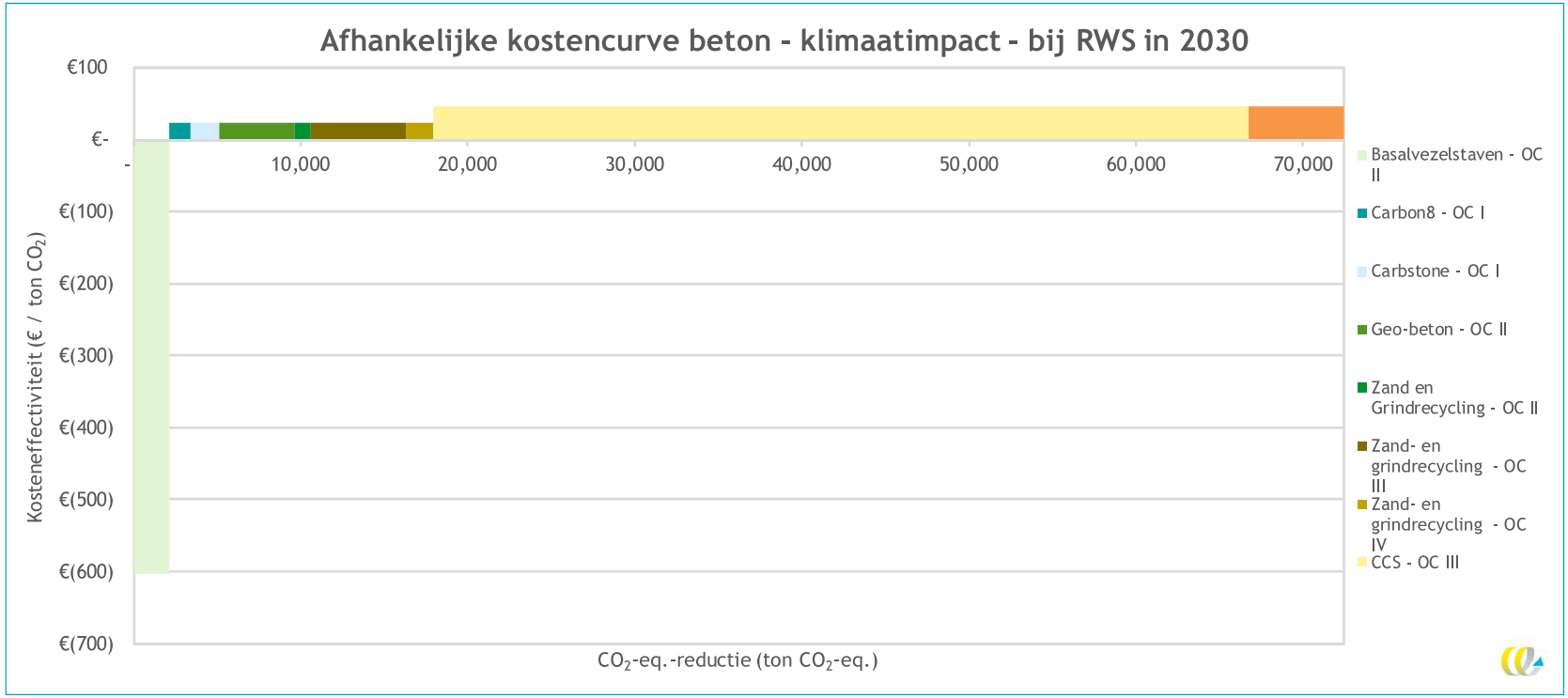
Voor Objectcategorie II is basaltvezelstaven gecombineerd met Geo-beton™ en mechanische grind-/zandrecycling. Het reductiepotentieel van basaltvezelstaven is hierop aangepast, aangezien basaltvezelstaven ook voor een 26% reductie in binder (Geo-beton™) zorgen, wat wordt vervangen door grind en zand (uit mechanische recycling).

Voor 2030 blijkt ook weer dat CCS bij cementklinkerproductie een groot gedeelte van het totale reductiepotentieel op zich neemt voor OC III en OC IV. Dit is logisch, omdat hierin het meeste Portlandcementklinker aanwezig is en daarom de CO_2-afvang en -opslag van die klinkerproductie een grote invloed heeft. Daarnaast gebruikt Rijkswaterstaat van alle betonsoorten die in deze studie zijn bekeken, het meeste OC III-beton. Tot slot zijn er voor OC III en OC IV niet zoveel andere mogelijke innovaties beschikbaar voor cementvervanging in 2030.

In 2030 is het totale, maximale CO_2-eq.-reductiepotentieel dat door Rijkswaterstaat kan worden behaald met de in deze studie meegenomen innovaties, 72.490 ton CO_2-eq.
In 2030 is het totale, maximale MKI-reductiepotentieel dat door Rijkswaterstaat kan worden behaald met de in deze studie meegenomen combinatie van CO_2-reducerende innovaties, 4.992.860 € MKI. In Paragraaf 6.5 kijken we hoe deze resultaten zich verhouden tot de doelstellingen van RWS.

De belangrijkste maatregel-specifieke onzekerheden worden genoemd in de toelichting bij de figuur. Daarnaast moet worden genoemd dat het areaal per objectcategorie een inschatting in samenspraak met Rijkswaterstaat is. We gaan overal uit van 100% beschikbaarheid van de grondstoffen voor de innovaties, ook wanneer die onzeker zijn. Voor meer informatie over de onzekerheden, zie Hoofdstuk 7 en de innovatiebeschrijvingen in Bijlage C.

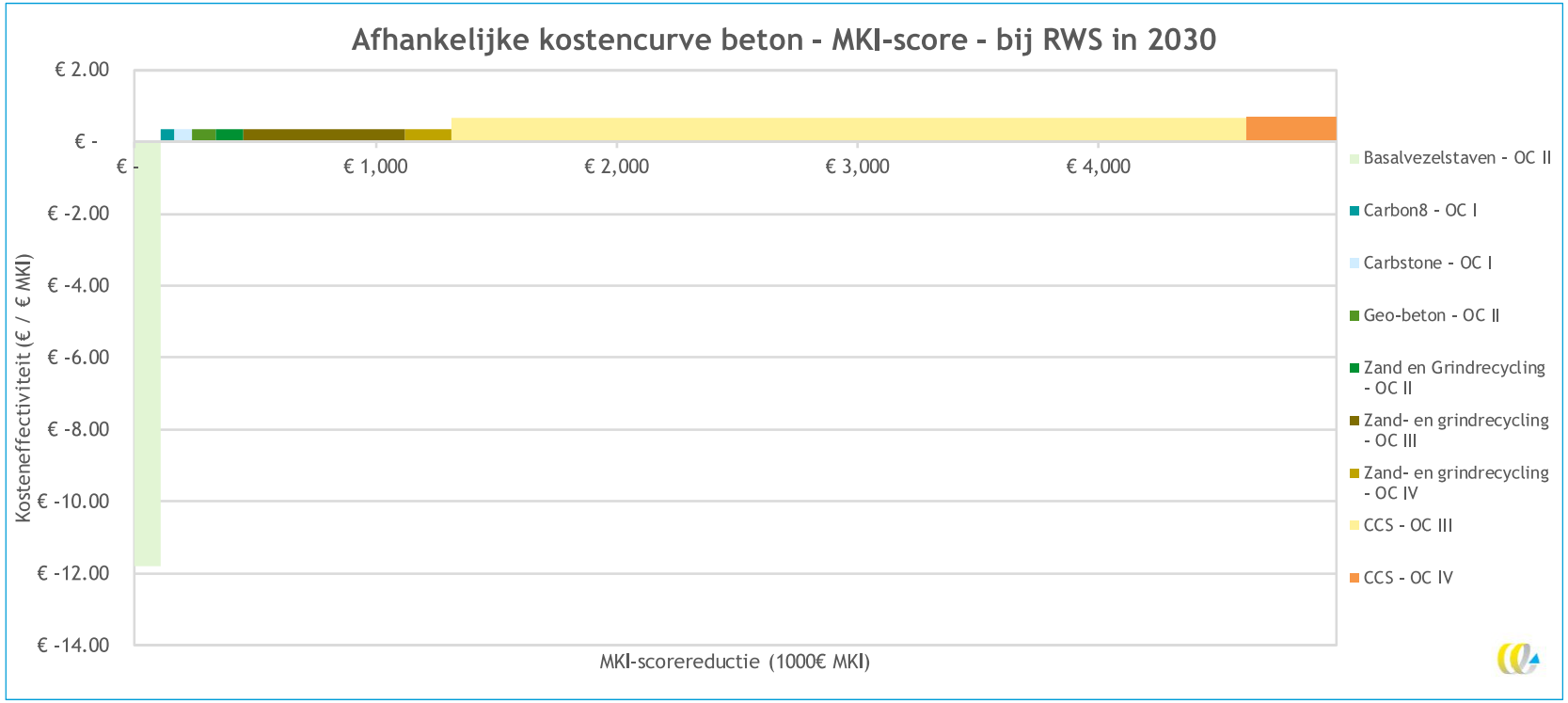
Figuur 23 – Afhankelijke kostencurve betoninnovaties klimaatimpact voor maatregelenpakket 2030



Let op!

- De kosteneffectiviteit van de maatregelen Carbon8, Carbstone™, Geo-beton™ en zand- en grindrecycling zijn handmatig op een waarde rond de nul gezet om deze zichtbaar te maken in de grafiek. De kosteneffectiviteit is daadwerkelijk € 0/ton CO_2-eq.
- Carbon8 en Carbstone™ slaan CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de CO_2-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in
- Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.

Figuur 24 - Afhankelijke kostencurve betoninnovaties milieu-impact (MKI) voor maatregelenpakket 2030



Let op!

- De kosteneffectiviteit van de maatregelen Carbon8, Carbstone™, Geo-beton™ en zand- en grindrecycling zijn handmatig op een waarde rond de nul gezet om deze zichtbaar te maken in de grafiek. De kosteneffectiviteit is daadwerkelijk € 0/€ MKI.
- Carbon8 en Carbstone™ slaan CO_2 op. In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat 50% van die opgeslagen CO_2 wordt toegerekend aan deze producten (en 50% aan de CO_2-afvanglocatie). Bij 100% toerekening aan de producten zou de MKI-reductie hoger zijn dan hier weergegeven, bij 0% toerekening lager. Meer informatie hierover in Bijlage C bij de genoemde innovaties.
- De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.

6.5 Doelstellingen Rijkswaterstaat

Zoals in Hoofstuk 1 van dit rapport al is genoemd, is in 2018 het Betonakkoord voor Duurzame Groei ondertekend door de Rijksoverheid, diverse gemeenten en provincies, ProRail en verschillende partijen uit de betonsector. Binnen dit akkoord is de ambitie uitgesproken om in 2030 over de gehele keten 49% minder broeikasgassen uit te stoten dan in 1990, met als ondergrens minimaal 30% minder uitstoot. Ook de Rijksoverheid heeft — als tussendoel tot 2050 — 49% minder broeikasgassen (in CO_2-eq.) uit te stoten dan in 1990. Eind 2020 moet al een reductie van 25% behaald zijn (Rijksoverheid, 2019a). Het ministerie van IenW en Rijkswaterstaat stellen zichzelf daarom ten doel dat alle projecten in 2030 klimaatneutraal moeten zijn (Ministerie van IenW, 2019).

Dit houdt in dat alle aanleg, onderhoud en sloop van de infrastructuur in beheer van Rijkswaterstaat in 2030 klimaatneutraal moet zijn. Ook de aanleg, het onderhoud en de sloop van objecten waarin beton toegepast wordt.

Als Rijkswaterstaat geen betoninnovaties toepast in betonprojecten (business-as-usual), dan is de klimaatimpact van betongebruik 188.300 ton CO_2-eq. in 2020, wanneer wordt uitgegaan van het door ons ingeschatte areaal en samenstelling van referentiebeton in iedere objectcategorie. Uit de afhankelijke kostencurve voor 2020 in Paragraaf 6.3 blijkt dat er in dat jaar een reductie van 2.131 ton CO_2-eq. mogelijk is door het toepassen van de in dat jaar beschikbare en meest veelbelovende innovaties. Dit is een reductie van ongeveer 1% ten opzichte van de business-as-usual-situatie. Hierbij moet worden opgemerkt dat innovaties in bijvoorbeeld het wegtransport naar de bouwplaats, waar Rijkswaterstaat ook direct invloed op kan uitoefenen, niet zijn meegenomen in deze studie.

Als Rijkswaterstaat geen betoninnovaties toepast in betonprojecten (business-as-usual), dan is de klimaatimpact van betongebruik 186.820 ton CO_2-eq. in 2030, wanneer wordt uitgegaan van het door ons ingeschatte areaal en samenstelling van referentiebeton in iedere objectcategorie. Uit de afhankelijke kostencurve voor 2030 in Paragraaf 6.4 blijkt dat er in dat jaar een reductie van 72.490 ton CO_2-eq. mogelijk is door het toepassen van de in dat jaar beschikbare en meest veelbelovende innovaties. Dit is een reductie van ongeveer 39% ten opzichte van de business-as-usual-situatie. Hierbij moet worden opgemerkt dat innovaties in bijvoorbeeld het wegtransport naar de bouwplaats, waar Rijkswaterstaat ook direct invloed op kan uitoefenen, niet zijn meegenomen in deze studie.

Uit deze resultaten blijkt dat op basis van de door ons meegenomen innovaties (die voornamelijk zijn geselecteerd vanwege hun beschikbaarheid in 2030), de doelstelling voor 2030 *klimaatneutraal werken* niet kan worden gehaald. Het is onbekend wat de klimaat-impact van betongebruik door Rijkswaterstaat in 1990 was, waardoor we de potentiele reductie niet kunnen afzetten tegen dat jaar. De verwachting is dat de impact in 1990 hoger was dan de impact van het business-as-usual-scenario voor 2030. Daarmee kunnen we wel stellen dat het reductie die met het door ons voorgestelde innovatiepakket voor 2030 te behalen is ten opzichte van 1990 groter is dan 39%.

7 Onzekerheden

In dit Hoofdstuk bespreken we de vier typen onzekerheden, zoals beschreven in Paragraaf 3.3, voor alle maatregelen gezamenlijk. Het gaat hierbij om de volgende typen onzekerheden:

- Onzekerheid in het **achtergrondscenario.**
- Onzekerheid in het areaal waarop de maatregel van toepassing is (**toepasbaarheid**) door marktontwikkelingen (bijvoorbeeld de beschikbaarheid van materialen).
- Onzekerheid door (1) het **TRL** van de maatregelen en (2) de **gebruikte bronnen** voor het bepalen van de milieu-impactreductie en kosten van de verschillende maatregelen.
- De invloed van deze onzekerheden verschilt per maatregel. De onzekerheden in de resultaten per maatregel zijn terug te vinden in de beschrijving per maatregel in Bijlage C.

7.1 Achtergrondscenario

Areaal: Hoeveelheid betongebruik per jaar

Om het totale reductiepotentieel per jaar te kunnen bepalen is een hoeveelheid beton-gebruik per jaar benodigd voor de objecten in beheer van Rijkswaterstaat. In Bijlage A is beschreven met welk areaal gerekend is. Omdat deze gegevens niet gemakkelijk te verzamelen waren binnen Rijkswaterstaat, heeft CE Delft in samenspraak met Eize Drenth van Rijkswaterstaat een expertinschatting gedaan van de hoeveelheid betongebruik per jaar.

Het totale betongebruik ligt hoogstwaarschijnlijk tussen de ~67.000 m^3 en ~610.000 m^3 per jaar, een afwijking van 89% lager of 2% hoger dan het gehanteerde betongebruik van 600.000 m^3 per jaar. Dit betekent dat het totale reductiepotentieel onzeker is over het hele areaal van Rijkswaterstaat. Het reductiepotentieel is dus enkel een inschatting. Om een uitspraak te kunnen doen over het welk aandeel van de klimaatimpactreductie-opgave van Rijkswaterstaat dat behaald kan worden door de bekeken innovaties in 2030, is in Hoofdstuk 6 ook een percentuele reductie van klimaatimpact weergegeven.

Areaal: Verdeling betongebruik over objectcategorieën

Het toepassingsgebied van betoninnovaties verschilt per objectcategorie en is afhankelijk van de samenstelling van en de gestelde eisen aan het referentiebeton. Daarom is in Bijlage A een inschatting gemaakt van de verdeling van het betongebruik over vier verschillende objectcategorieën. Omdat gegevens over de verdeling van betongebruik over de object-categorieën niet gemakkelijk te verzamelen waren binnen Rijkswaterstaat, heeft CE Delft een expertinschatting gedaan op basis van literatuur.

De verdeling van betongebruik over de objectcategorieën kan afwijken van de expertinschatting. Dit betekent dat het totale reductiepotentieel per objectcategorie onzeker is. Om een uitspraak te kunnen doen over de klimaatimpactreductie per objectcategorie dat behaald kan worden door de bekeken innovaties in 2030, is in Hoofdstuk 6 ook een percentuele reductie van klimaatimpact weergegeven per objectcategorie.

Areaal: Samenstelling beton per objectcategorie

Om het reductiepotentieel van een innovatie per m^3 beton te kunnen bepalen is de samenstelling van beton per objectcategorie benodigd. In Bijlage A is beschreven met welke betonsamenstellingen er gerekend is. Omdat deze gegevens niet gemakkelijk te verzamelen waren binnen Rijkswaterstaat, heeft CE Delft in samenspraak met Sonja Fennis van Rijkswaterstaat een expertinschatting gedaan. Het doel hierbij was om een gemiddelde samenstelling van beton binnen een objectcategorie te bepalen.

Verdere onzekerheden in het achtergrondscenario van de analyse voor 2020

De onzekerheden in het achtergrondscenario voor 2020 zijn klein, behalve de eerder beschreven onzekerheden over het areaal.

Verdere onzekerheden in het achtergrondscenario van de analyse voor 2030

De onzekerheden in het achtergrondscenario voor 2030 zijn een stuk groter dan de onzekerheden in 2020. Hoe verder er immers in de toekomst gekeken wordt, hoe groter de onzekerheden worden. De belangrijkste onzekerheden zijn daarbij de milieu-impact en de kosten van elektriciteit en het afgevangen van CO_2 en de hoogte van de CO_2-heffing. Niet alle onzekerheden zijn van toepassing op alle innovaties, Tabel 10 geeft de onzekerheden in het achtergrondscenario voor 2030 per innovatie weer. Onder de tabel beschrijven we de onzekerheden in meer detail (de onzekerheden over de samenstelling van beton zijn hierboven al beschreven en gelden voor zowel 2030 als 2020).

Tabel 10 - Onzekerheden in het achtergrondscenario voor 2030 per maatregel

Innovatie	Samenstelling beton	Elektriciteit	Afgevangen CO_2	CO_2-heffing	Transport vrachtwagen
Carbstone™	X	X	X	X	X
CSA-beliet	X				
Geopolymeren: ASCEM®-cement	X	X*			
Geopolymeren: Geo-beton™	X**	X**			
Solidia	X		X	X	
Carbon8 op basis van vliegas	X		X	X	
Mechanische grind-/zandrecycling	X	X			
Mechanische cementrecycling	X	X			
Mechanische/thermische cementrecycling	X	X			
Basaltvezelstaven	X				X
Staalvezels	X				X
CO_2-afvang en opslag bij cementklinkerproductie (CCS)	X			X	

*. De onzekerheid bij ASCEM®-cement betreft niet ons achtergrondscenario, maar de gebruikte data. De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van ASCEM®-cement zijn gebaseerd op toekomstige productie met groene elektriciteit.

**. De onzekerheid bij Geo-beton™ betreft niet ons achtergrondscenario, maar de gebruikte data. De impacts geassocieerd met de productie (Module A1-A3) van Geo-beton™ zijn overgenomen uit een geverifieerde LCA-rapportage. Wij hebben geen inzicht in de samenstelling, de gebruikte proceskaarten en de aannames die gebruikt zijn bij het berekenen van deze impact.

Milieu-impact en kosten elektriciteit

Voor 2030 hebben we een inschatting gemaakt van de milieu-impact en de kosten van elektriciteit op basis van al voorgenomen beleid, zoals beschreven en doorgerekend in de meest recente klimaat- en energieverkenning (PBL, 2019a) en vastgestelde energie-belastingen. Omdat we over 2030 spreken is deze inschatting uiteraard onzeker, beleid pakt lang niet altijd uit als van te voren bepaald en kan veranderen door de jaren heen.

Zoals genoemd bij Tabel 10 zit de onzekerheid over de milieu-impact van sommige innovaties niet in ons achtergrondscenario, maar in de data die beschikbaar was voor de analyse. In die gevallen is door een externe partij een milieu-impact voor elektriciteit aangenomen en is die bepaald als 100% hernieuwbaar of hebben wij er geen inzicht in. Het gaat hierbij om de geopolymeren: ASCEM®-cement en Geo-beton™.

Milieu-impact en kosten afgevangen CO_2

We hebben een inschatting gemaakt van de gemiddelde milieu-impact van een ton afgevangen CO_2 in 2020. We gebruiken dezelfde milieu-impact per ton afgevangen CO_2 in 2030, omdat de ontwikkeling van deze milieu-impact onzeker is. De daadwerkelijke milieu-impact en kosten verschillen ook per locatie, zo zijn de kosten van geleverde CO_2 via het OCAP-netwerk anders dan de kosten van geleverde CO_2 per as. Door een verbetering van de afvangtechnologie en een verandering van de gebruikte energiebronnen in 2030 is de verwachting is dat de milieu-impact nog kan dalen richting 2030. Ook de kosten zullen hoogstwaarschijnlijk nog veranderen. Enerzijds zal het aanbod waarschijnlijk groeien door meer afvang, maar tegelijkertijd zijn er ook meer toepassingen en groeit daarmee ook de vraag. Daarnaast zal ook een CO_2-heffing invloed hebben op de CO_2-prijs; het maakt afvangst rendabeler. Ook de hoogste van de heffing verandert door de jaren heen en in onzeker.

Hoogte CO_2-heffing

De hoogte van de CO_2-heffing voor 2020 is bekend, maar het is onzeker hoe deze zich naar 2030 toe gaat ontwikkelen. Wij hebben een CO_2-heffing van € 31,90 aangenomen voor 2030, gebaseerd op de CO_2-minimumprijs voor elektriciteit die is genoemd in het Klimaatakkoord. Voor de industrie wordt ook een CO_2-heffing verwacht, maar hoe die eruit gaat zien is nog te onzeker en wordt medebepaald door Europese ontwikkelingen op dit gebied.

Milieu-impact en kosten transport per vrachtwagen

Voor 2030 hebben we een inschatting gemaakt van de milieu-impact en kosten voor transport per vrachtwagen. Deze inschatting is onzeker en leidt met name tot onzekerheden in de resultaten als er veel materiaal over een verre afstand getransporteerd wordt, zoals bijvoorbeeld het geval is bij basaltvezelstaven.

7.2 Toepasbaarheid

De belangrijkste onzekerheden rond toepasbaarheid zijn:
- beschikbaarheid hoogovenslak;
- beschikbaarheid poederkoolvliegas;
- beschikbaarheid natriumhydroxide;
- beschikbaarheid LD-staalslakken;

- beschikbaarheid AEC-vliegas;
- beschikbaarheid CO_2-opslagcapaciteit;
- beschikbaarheid vrijkomend beton.

We bespreken elk van deze onzekerheden apart in deze paragraaf.

Beschikbaarheid hoogovenslak

Het wereldwijde aanbod van hoogovenslak wordt nu al voor circa 90% gegranuleerd en toegepast in cement (Vermeulen, 2020). Er is mede daardoor niet genoeg hoogovenslak aanwezig in Europa om al het Portlandcement te vervangen met geopolymeren van 100% hoogovenslak (Assi, et al., 2020). Als hoogovenslak voor hoogovencement gebruikt wordt voor geopolymeercement kan er niet gesproken worden van een CO_2-reductie van beton in het algemeen, aangezien er in dat geval alleen sprake is van een verschuiving van grondstoffen van hoogovencement naar geopolymeren (Vermeulen, 2020).

Beschikbaarheid poederkoolvliegas

Voor de productie van zowel de geopolymeer Geo-beton™ als CSA-beliet wordt poederkool-vliegas toegepast. Dit materiaal wordt echter al in veel andere (bouw)materialen en producten gebruikt, waaronder bijvoorbeeld hoogovencement. Er moet daarom voorkomen worden dat poederkoolvliegas bestemt voor andere toepassingen in (bouw)materialen wordt gebruikt. Net als bij hoogovenslak is er dus het risico dat gebruik van poederkoolvliegas voor geopolymeren en CSA-beliet niet of in mindere mate tot een CO_2-reductie van beton in het algemeen leidt, omdat het gebruik van deze grondstoffen verschoven wordt (Vermeulen, 2020).

In Europa is theoretisch genoeg poederkoolvliegas aanwezig om een tekort te voorkomen, en wereldwijd wordt nog zo'n 47% van de aanwezige vliegas gestort in plaats van toegepast (Assi, et al., 2020). Specifiek voor Nederland zal vliegas daarentegen waarschijnlijk minder beschikbaar worden, doordat kolencentrales op lagere capaciteit draaien en op termijn gaan sluiten[10]. ENCI en Heidelberg hebben daarnaast al grote claims gelegd op vliegas in Europa[11]. Bij de toepassing van geopolymeren en CSA-beliet moet dus kritisch gekeken worden naar de afkomst van het gebruikte poederkoolvliegas, of moet voor alternatieven zonder poederkoolvliegas gekozen worden zoals bijvoorbeeld de geopolymeer ASCEM®-cement.

Beschikbaarheid natriumhydroxide

Voor de toepassing van geopolymeren wordt natriumhydroxide gebruikt als activator, in de vorm van droog natronloog en/of vloeibaar waterglas. Er is wereldwijd een beperkt aanbod aan natriumhydroxide in de vorm van natronloog en waterglas. Daardoor kan momenteel theoretisch maar iets meer dan 7% van het Portlandcement in de wereld vervangen worden met geopolymeren (Assi, et al., 2020). De toepassing van geopolymeren op grote schaal is daardoor afhankelijk van een hoger productievolume van natronloog en waterglas.

Beschikbaarheid LD-staalslakken

Voor de toepassing van de innovaties ASCEM®-cement en Carbstone™ zijn LD-staalslakken nodig. In zowel Nederland als België worden ongeveer 650 kiloton LD-staalslakken per jaar geproduceerd (CE Delft, 2016; Grondstoffencatalogus, 2018a; Grondstoffencatalogus,

10 Interview Herman van den Noort, Mobilis.

11 Interview Herman van den Noort, Mobilis.

2018b). Voor ASCEM®-cement is niet bekend hoeveel LD-staalslakken gebruikt worden per ton.

Als we uitgaan van de beschikbaarheid in Nederland (650 kiloton/jaar) en een gebruik van 0,2 ton LD-slak per ton Carbstone™, kan er maximaal 1,3 miljoen m^3 Carbstone™-beton per jaar worden geproduceerd. Dit is meer dan de hoeveelheid beton die Rijkswaterstaat jaarlijks gebruikt voor de productie van betonobjecten in Objectcategorie I. Wanneer er meer LD-staalslakken in de betonobjecten nodig is (dit kan tot maximaal 75% van de mix zijn), kan er maximaal 360.000 m^3 Carbstone™-beton/jaar worden geproduceerd. Ook in dat geval is er veel meer Carbstone™-beton beschikbaar dan dat Rijkswaterstaat vraag heeft naar beton voor objecten in Categorie I. We gaan er daarom van uit dat al het beton in Objectcategorie I voor Rijkswaterstaat vervangen kan worden door Carbstone™-beton. Het is wel belangrijk om op te merken dat de maximale hoeveelheid Carbstone™ die geproduceerd kan worden (1,3 miljoen m^3) ***niet*** genoeg is om al het niet-constructieve beton in Nederland te vervangen; dit is namelijk ongeveer 2,1 miljoen m^3 beton. Wanneer de hele markt zou willen overstappen op Carbstone™, is dat niet mogelijk op basis van LD-slak uit Nederland en zal dus maximaal 62% van de betonproducten in Objectcategorie I van Rijkswaterstaat vervangen kunnen worden door Carbstone™.

Beschikbaarheid AEC-vliegas

Voor de productie van Carbon8 wordt gebruik gemaakt van AEC-vliegas. In Nederland werd in 2018 48 kton droge stof AEC-vliegas gestort en 51 kton nuttig toegepast (Rijkswaterstaat, 2020b). Nuttige toepassing betekent meestal dat het vliegas wordt gebruikt voor de afdichting van mijnen of groeves. Als al het grind in niet-constructief beton wordt vervangen door Carbon8, kan er maximaal 220.000 m^3 beton in Objectcategorie I worden geproduceerd per jaar. Dit is als alle beschikbare AEC-vliegas in Carbon8 wordt toegepast. Dit is meer dan het de vraag naar beton in deze objectcategorie per jaar door Rijkswaterstaat. Wanneer alleen wordt gekeken naar het gestorte aandeel AEC-vliegas in 2018 (48 kton), kan er 106.700 m^3 beton in Objectcategorie I per jaar worden geproduceerd. Ook dit is meer dan het niet-constructieve areaal van Rijkswaterstaat. In onze berekeningen zijn we daarom uitgegaan van toepassing van Carbon8 in al het beton in Objectcategorie I. Een kanttekening hierbij is dat er in Nederland jaarlijks 2,1 miljoen m^3 niet-constructief beton wordt gebruikt. Het is daarom ***niet*** mogelijk om grind in al het Nederlandse niet-constructieve beton te vervangen met Carbon8. Als de hele markt overstapt op Carbon8 in plaats van grind, kan maximaal 10% van het Objectcategorie I beton van Rijkswaterstaat worden geproduceerd met Carbon8.

Beschikbaarheid CO_2-opslag capaciteit

In principe kan bij iedere cementklinkerproducent in Europa CO_2 worden afgevangen. Wij zijn er bij deze maatregel vanuit gegaan dat de CO_2 kan worden opgeslagen onder de grond. In dat geval is de gehele CO_2-reductie die kan worden behaald toe te rekenen aan de cementklinkerproducent. In praktijk is het nog maar de vraag of genoeg opslagcapaciteit tijdig beschikbaar zal komen en zal blijven. Daarnaast is er sprake van concurrentie uit andere industrieën als het gaat om de beschikbare CO_2-opslagcapaciteit.

Beschikbaarheid vrijkomend beton

Voor de zand- en grindrecycling zijn we er van uitgegaan dat 100% primair zand en grind vervangen kan worden door 100% gerecycled zand en grind. De verwachting is dat dit technisch mogelijk zal zijn in 2030, maar er zal waarschijnlijk niet genoeg beton vrijkomen om alle nieuw geproduceerde beton te produceren met 100% gerecycled zand en grind.

7.3 TRL en betrouwbaarheid van de gebruikte gegevens

Tabel 11 laat de ingeschatte onzekerheid van de analyse van alle maatregelen zien. De onzekerheid is ingeschat op basis van de TRL van de maatregel en de betrouwbaarheid van de gebruikte bronnen, zoals beschreven in Paragraaf 3.3. De onderbouwing van het onzekerheidspercentage van een specifieke maatregel is te vinden in de beschrijving van die maatregel in Bijlage C.

In de tabel is onderscheid gemaakt tussen innovaties die al toepasbaar zijn in 2020 en innovaties die dat nog niet zijn en daarom in onze analyse toepasbaar zijn vanaf 2030. Dit onderscheid is gemaakt op basis van TRL; alleen maatregelen met TRL 9 zijn in 2020 al toepasbaar. Dit is terug te zien in de onzekerheidspercentages: innovaties die vanaf 2020 toepasbaar zijn, hebben een lagere onzekerheid dan de innovaties die vanaf 2030 toepasbaar zijn. Ook de beschikbaarheid van betrouwbare gegevens is een belangrijke factor in de onzekerheid. Het is logisch dat er voor innovaties met een hoge TRL meer betrouwbare data beschikbaar is dan voor innovaties die nog op een laag TRL zijn: ze zijn uitgebreider en op grotere schaal op milieuprestaties getest en omdat ze al marktrijp zijn/al op de markt zijn, is ook duidelijker wat de kosten van de maatregel zijn.

Tabel 11 - Onzekerheid van alle innovaties op basis van TRL en de betrouwbaarheid van de gebruikte bronnen

Innovatie	Onzekerheid			
	Objectcategorie I	Objectcategorie II	Objectcategorie III	Objectcategorie IV
Toepasbaar vanaf 2020				
Carbstone™	35%	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
CSA-beliet	N.v.t.	N.v.t.	35%	N.v.t.
Geopolymeren: Geo-beton™	35%	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Geopolymeren: ASCEM®-cement	35%	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Solidia	10%	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Carbon8	25%	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Mechanische grind-/zandrecycling	25%	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Staalvezels	N.v.t.	55%	N.v.t.	N.v.t.
Toepasbaar vanaf 2030				
Geopolymeren: Geo-beton™	35%	55%	N.v.t.	N.v.t.
Geopolymeren: ASCEM®-cement	35%	55%	N.v.t.	N.v.t.
Mechanische grind-/zandrecycling	25%	45%	45%	45%
Mechanische cementrecycling	40%	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Mechanische/thermische cementrecycling	55%	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Basaltvezelstaven	N.v.t.	40%	N.v.t.	N.v.t.
CO_2-afvang cementklinker	55%	55%	55%	55%

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Innovaties en regelgeving

Uit Hoofdstuk 5 en 6 is gebleken dat er een groot aantal innovaties toegepast kan worden voor niet-constructief beton (Objectcategorie I, OC I), zowel in 2020 als in 2030. Aan dit type beton worden minder (hoge) eisen gesteld dan aan constructief beton, omdat de risico's bij toepassing lager zijn. Onze inschatting is dat er voor de innovaties Carbstone™, Carbon8, Solidia geen aanpassing benodigd is in bestaande normering voor toepassing in niet-constructief beton (OC I).

De mogelijkheden voor constructief beton zijn daarentegen, zeker op de korte termijn, slechts beperkt. Maar een klein deel van de innovaties kan al in 2020 worden toegepast in constructief beton. Daarnaast is ook het TRL van veel van de innovaties nog niet zodanig dat deze in 2030 al ingezet kunnen worden in complexer constructief beton (Objectcategorie III en IV). Een van de redenen hiervoor is de strenge normering en regelgeving waar aan voldaan dient te worden.

Beschrijving regelgeving en normen

Constructieve betonconstructies moeten ten eerste worden ontworpen aan de hand van de NEN-EN 1992-1-1. Hierin wordt beschreven hoe een constructie moet worden ontworpen en berekend om te voldoen aan (veiligheids)eisen bijvoorbeeld via het bouwbesluit worden gesteld. Een betoninnovatie die bedoeld is voor gebruik in constructieve werken moet ten eerste gelijkwaardigheid aantonen met regulier constructief beton, binnen deze ontwerpnorm. Van de in deze studie meegenomen innovaties is cementklinkerproductie met CO_2-afvang en -opslag de enige die deze gelijkwaardigheid niet zal hoeven aantonen, omdat het product precies hetzelfde is als regulier beton.

Aanvullend op het constructieve ontwerp hebben betonconstructies te maken met de NEN-EN 206+NEN 8005:2017 NL, NEN-EN 13670 en 'subnormen' zoals de NEN-EN 197-1 en NEN-EN 12620. Deze normen betreffen voornamelijk het maken (samenstellen) van beton, de uitvoering en de geschiktheid van grondstoffen. Het gebruik van de verschillende materialen bij elkaar (in welke verhouding cement, vulstoffen, water en toeslagmateriaal worden gebruikt) bepaald namelijk uiteindelijk de materiaaleigenschappen van het beton. Deze normen zijn er dan ook op gericht om het beton aan de eisen voor constructieve betonconstructies te laten voldoen voor eigenschappen zoals druksterkte, treksterkte, elasticiteitsmodulus, krimp en kruip. Dit gebeurd meestal op basis van voorgeschreven samenstelling gebaseerd op ervaringen vanuit het verleden (bekende grondstoffen en materialen). Omdat in de meeste van de in deze rapportage meegenomen betoninnovaties alternatieve bindmiddelen worden gebruikt of dit zelfs een compleet alternatief beton betreft, zullen de meeste van deze innovaties niet zomaar aan de normen kunnen voldoen. Al deze normen kunnen voor veel van de bekeken innovaties barrières voor de toepassing ervan opleveren, met name omdat ze zijn gericht op toepassing van reguliere materialen in beton(constructies) die zich hebben bewezen in het verleden. Voor iedere norm zal moeten worden gekeken waarom deze er is, wat de doelen ervan zijn. Op die manier kan worden gekeken wat de grenzen van zo'n norm zijn en of een innovatie binnen deze grenzen valt. Tabel 12 geeft hier een overzicht van. Onder de tabel lichten we de barrières in de normering/regelgeving toe.

Tabel 12 - Potentieel belemmerende normering/regelgeving voor innovaties voor constructief beton (Objectcategorie II, III en IV)

Innovatie	NEN-EN 197-1	NEN-EN 206+NEN 8005:2017 NL	NEN-EN 1992-1-1
CSA-beliet	X	X	X
Geopolymeren	N.v.t.	X	X
Mechanische cementrecycling	X	✓*	✓*
Mechanische thermische/cementrecycling	X	✓*	✓*
Basaltvezelstaven	N.v.t.	N.v.t.	X
Staalvezels	N.v.t.	N.v.t.	X
CO_2-afvang en - opslag bij cementklinkerproductie	▫	▫	▫

X Past niet binnen de norm en gelijkwaardigheid moet aangetoond worden.

✓ Past binnen de norm.

* Aantonen van gelijkwaardigheid waarschijnlijk niet nodig, indien dit op het niveau van de NEN-EN 197-1 gedaan kan worden.

NEN-EN 1992-1-1: Ontwerp en berekening van betonconstructies

Deze norm schrijft voor hoe een constructie (kunstwerk of gebouw) van beton moet worden ontworpen, zodat deze aan bepaalde (veiligheids)eisen voldoet. Omdat in deze norm wordt uitgegaan van het gebruik van bekende betonsoorten, kunnen de rekenregels niet 1-op-1 worden overgenomen bij het toepassen van betoninnovaties. Van elk van de innovaties moet worden bekeken in pilots in en buiten het laboratorium, hoe deze kunnen worden toegepast om tot gelijkwaardige eigenschappen te komen, zodat gelijke geschiktheid uiteindelijk aangetoond kan worden.

NEN-EN 197-1 — Cement — Deel 1: Samenstelling, specificaties en conformiteitscriteria voor gewone cementsoorten

Deze norm beschrijft de typen gewoon cement die toegepast mogen worden in beton, zonder extra bewijslast te overleggen. De typen cement die hieronder vallen zijn:

- CEM I: Portlandcement, met minimaal 95% portlandcementklinker.
- CEM II: Hybride portlandcementen, minimaal 65% portlandcementklinker in combinatie met hoogovenslak, silica fume, puzzolanen, poederkoolvliegassen, gebrand schalie of kalksteenmeel.
- CEM III: Hoogovencementen met minimaal 5% portlandcementklinker.
- CEM IV: Puzzolane cementen die bestaan uit een silica- of aluminiumrijk materiaal dat bij de aanwezigheid van water reageert met calciumhydroxide. Daarnaast wordt hierbij minimaal 45% portlandcementklinker gebruikt.
- CEM V: Composietcementen waarbij minimaal 20% portlandcementklinker gecombineerd wordt met hoogovenslak én puzzolanen of poederkoolvliegas.

Zoals duidelijk wordt uit deze beschrijving, schrijft de norm voor dat er altijd portland-cementklinker gebruikt dient te worden in cement. Dit betekent dat alternatieve bindmiddelen zoals CSA-beliet of geopolymeren niet onder de norm vallen en dus ook niet toegepast mogen worden in constructief beton (onder EN-206) behalve als gelijke geschiktheid wordt aangetoond onder EN-206.

In 2019 werd de nieuwe bijgestelde NEN-EN 197-1 verwacht. Deze is echter tot op heden niet gepubliceerd.

NEN-EN 206:2014 + A1:2016 en NEN 8005:2014 + C1:2017: Beton - specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit

Deze normen beschrijven onder anderen de te gebruiken grondstoffen, samenstelling en productiemethode van constructief beton. Het gaat hier met name om de juiste combinatie van grondstoffen/materialen in een kunstwerk, zodat het werk aan de eisen voldoet.

Deze normen schrijven voor dat er enkel cementen toegepast mogen worden die voldoen aan NEN-EN 197-1. Zoals beschreven door CE Delft en Delta Concrete Consult (2019) is er een mogelijkheid om alternatieve bindmiddelen (zoals CSA-beliet en geopolymeren) die niet voldoen aan NEN-EN 197-1 toe te passen in constructief beton. Hiervoor moet gelijke geschiktheid worden bewezen, zowel wetenschappelijk vooraf als tijdens de levensduur van het beton in de praktijk. Door CE Delft en Delta Concrete Consult (2019) is een aanbeveling gedaan over de daarvoor te bewandelen route.

Daarnaast wordt er een hoeveelheid te gebruiken cement voor verschillende milieuklassen voorgeschreven die zich richt op het beschermen van stalen wapening tegen corrosie. Deze norm richt zich daarmee impliciet op het gebruiken van stalen betonwapening. In het geval van het gebruiken van alternatieve wapening (zoals basaltvezelstaven) vindt aantasting van wapening op een andere manier plaats dan het geval is voor stalen wapening. Zolang de norm niet aangepast is aan de mogelijkheid voor verschillende typen wapening, zal wijdverspreide toepassing van alternatieve wapening hoogstwaarschijnlijk uitblijven. Ook hiervoor hebben CE Delft en Delta Concrete Consult (2019) een aanbeveling gedaan over de te bewandelen route voor het bewijzen van gelijke geschiktheid.

Aanbevelingen belemmering normen

Het aantonen van gelijke geschiktheid is een route die bewandeld kan worden om op de korte termijn alternatieve bindmiddelen en alternatieve wapening te kunnen testen in pilotprojecten voor constructief beton. Dit is echter geen lange termijnoplossing. Immers is het bewijzen van gelijke geschiktheid tijds- en kostenintensief en zal dit voor elke nieuwe toepassing opnieuw gedaan moeten worden. Dit zal zeker voor nieuwkomers in de betonmarkt, wat voor een deel van de innovaties geldt, de ontwikkeling in het meest positieve geval ernstig afremmen en in het meeste negatieve geval tot halt roepen.

Om deze belemmering te voorkomen zou de ROK van Rijkswaterstaat in ieder geval moeten faciliteren in het beschrijven van de methode voor het aantonen van gelijk geschiktheid voor alternatieve betonsamenstellingen (met name bindmiddelen) en alternatieve wapening voor constructief beton. Hiervoor is door CE Delft en Delta Concrete Consult (2019) een aanbeveling gedaan over de te hanteren buitenlandse normering. Een dergelijke methode zou nog effectiever zijn wanneer deze door de hele markt wordt gedragen. Daarnaast zou inpassing van de toekomstige plafondwaarde voor MKI van beton in de ROK kunnen worden geïntegreerd, zodat de ROK ook steeds meer duurzaamheidseisen stelt.

Op de middellange termijn is een aanvulling op de NEN-EN 197-1 benodigd om beton op basis van CSA-beliet en alternatieve bindmiddelen mogelijk te maken. Daarnaast is een aanvulling op de NEN-EN 206/NEN-EN 1992 benodigd om de toepassing van geopolymeren en alternatieve wapening voor constructief beton mogelijk te maken. Tot slot zal er in de

toekomst ook moeten worden gekeken naar toepassing van combinaties van innovaties (bijvoorbeeld een beton met een alternatief bindmiddel en een alternatieve wapening).

Belemmeringen bij overige maatregelen

Voor de innovatie mechanische grind-/zandrecycling vormt de huidige normering voor beton (al is het in mindere mate) een belemmering omdat het teruggewonnen grind en zand op dit moment al ingezet kan worden als betongranulaat (Type A1 volgens NEN-EN 8005). Op dit moment door CROW, in samenwerking met SGS Intron en TNO, onderzoek gedaan naar het toepassen van het teruggewonnen grind en zand ter vervanging van conventioneel grind en zand. Hierbij wordt de werking van het teruggewonnen materiaal in verhouding met normaal en zwaar toeslagmateriaal onder EN 12620 en NEN 5903 onderzocht.

Voor de innovatie CO_2-afvang en opslag bij cementklinkerproductie (CCS) vormt de regelgeving/normering voor beton geen belemmering. Een mogelijke belemmering die hier wel geldt zijn de EU ETS-richtlijnen, waarbij geen CO_2-rechten nodig zijn voor broeikasgas-emissies die afgevangen en opgeslagen worden (CCS) maar wél voor broeikasgasemissies die toegepast worden in een toepassing die anders is dan mineralisatie (of ondergrondse opslag). Zo moeten er bijvoorbeeld voor afgevangen CO_2 die toegepast wordt voor de productie van gerecyclede brandstoffen onder de huidige EU ETS-richtlijnen wél CO_2-rechten ingediend worden voor de (uitgestelde) CO_2-emissies.

8.2 Handelingsperspectieven innovatiebeleid

8.2.1 Huidig innovatiebeleid

Algemeen

Het kabinet-Rutte III heeft in het Regeerakkoord (2017) aangegeven dat het via uitvoeringsorganen zoals Rijkswaterstaat op gaat treden als launching customer om innovaties te stimuleren. Ook in eerdere kabinetten van de afgelopen jaren werd het (verder) ontwikkelen van innovaties via (het inkoopbeleid van) overheidsorganen gestimuleerd. Deze innovaties kunnen bijdragen aan het behalen van de doelstellingen van de Rijksoverheid. In het geval van beton gaat het specifiek om het behalen van klimaat- en circulariteitsdoelstellingen.

In 2014 is het Beleidskader Innovatiegericht Inkopen opgesteld door Rijkswaterstaat (2014). Dat document is bedoeld als handreiking: '*een richtinggevend kader met bruikbare instrumenten voor uiteenlopende situaties*' (voor innovatiegericht inkopen). In dit Beleids-kader zijn de volgende fases van een innovatieproces geïdentificeerd:

1. Langetermijnverkenning, innovatieagenda.
2. Selectie van urgente of kansrijke onderwerpen.
3. Programmering.
4. inkoopplan/marktbenadering.
5. pre-commerciële fase, prototypes, pilots.
6. testen en validering.
7. Toepassing.
8. Monitoring, evaluatie en eventuele bijstelling van het programma.

In het kader van Fase 1 en 2 heeft Rijkswaterstaat in 2013 een Innovatieagenda opgesteld. Hierin wordt de innovatiebehoefte van Rijkswaterstaat vastgesteld. Hiernaast kan facultatief een jaarlijkse Uitvoeringsagenda worden gemaakt (Rijkswaterstaat , 2014). Momenteel wordt er gewerkt aan een update van de Innovatieagenda voor 2020-2030 (Rijkswaterstaat, 2020d). De innovatiebehoefte is de basis van waaruit kan worden gewerkt: wanneer bekend is wat er nodig is, kan worden bepaald wat er al in de markt is aan innovaties om aan deze vraag de beantwoorden en wat Rijkswaterstaat kan doen om bij te dragen aan de verdere fases die moeten worden doorlopen.

In 2020 is het beleidsdocument 'Naar klimaatneutrale en circulaire Rijksinfrastructuur-projecten' van het ministerie van IenW verschenen (Ministerie van IenW, 2020). Hierin wordt beschreven hoe het ministerie en de uitvoeringsorganisaties (Rijkswaterstaat en ProRail) haar klimaat- en circulariteitsdoelstellingen voor 2030 gaan halen op het gebied van infrastructuur. Innovatiebeleid is een belangrijke pijler in het behalen van de doelstellingen. Daarnaast worden marktsamenwerking, duurzaam opdrachtgeverschap en inkoopstrategie genoemd als bestaande beleidsinstrumenten die (in combinatie met innovatiebeleid) moeten leiden tot het behalen van de klimaat- en circulariteitsdoel-stellingen. De gebieden waarop deze strategie van toepassing is, zijn aangeduid als acht transitiepaden, waarvan Transitiepad 2: 'kunstwerken (Rijkswaterstaat)' het meest relevant is voor betoninnovaties.

Tot slot werkt Rijkswaterstaat ook marktbreed aan innovatie mee, bijvoorbeeld vanuit haar rol in het Betonakkoord.

Launching customer

Innovatiebeleid is in grote mate verbonden met marktsamenwerking. Rijkswaterstaat stelt zich daarin op als launching customer. Zij bedenkt innovaties niet zelf, maar kan helpen met de ontwikkeling ervan door marktvraag naar nieuwe producten of productietechnieken te genereren. Zoals eerder in deze paragraaf al is besproken gelden voor beton lange ontwikkeltrajecten, met name als het gaat om validatie van de kwaliteit van een nieuw materiaal. Rijkswaterstaat kan deze trajecten versnellen en stimuleren door middel van het 'innoveren-uniformeren-produceren'-principe. Dit uit zich in o.a. het Innovatieloket en Innovatie TestCentrum, waar sinds 2018 marktpartijen aan de hand van de innovatie-behoefte van Rijkswaterstaat voorstellen voor innovaties kan indienen. Geschikt bevonden voorstellen krijgen hulp van Rijkswaterstaat om verder te ontwikkelen en op de markt gebracht te worden. Specifiek voor beton is er budget beschikbaar uit een Klimaatenvelop van het ministerie van IenW het transitiepad Duurzaam Beton sneller uit te rollen, wat onder andere kan worden besteed aan het versneld op door ontwikkelen van beton-innovaties. Onderdeel hiervan is het doen van pilots met innovaties.

Naast het doen van pilots is het in de rol van launching customer ook van belang om, in samenwerking met marktpartijen, na te denken over een beoordelingsmethodiek van innovaties, en de over manier waarop ze in de processen binnen Rijkswaterstaat in kunnen worden gepast. Daarbij kan worden gedacht aan inkoop, maar ook aan de monitoring van relevante gegevens en kennisverspreiding in de organisatie. Hiervoor geeft IenW/ Rijkswaterstaat aan een innovatieprogramma op te zetten, waarin nieuwe kaders, contract-vormen en werkwijzen worden ontwikkeld.

Stakeholder Readiness Level

Rijkswaterstaat heeft in aanvulling op het Technology Readiness Level (TRL) het Stakeholder Readiness Level (SRL) ontwikkeld. De SRL geeft aan of de organisatie klaar is voor de innovatie. Hierin komen aspecten aan bod als: waarde, draagvlak, kosten, inpasbaarheid en risico. Uit het testen van de toepassing hiervan in innovatieve projecten de afgelopen jaren blijkt dat in veel innovatietrajecten tegen dezelfde uitdagingen wordt aangelopen.

8.2.2 Aanbevelingen innovatiebeleid

Er zijn de afgelopen jaren zoals hierboven beschreven al veel stappen gezet in het uitrollen van innovatiebeleid binnen Rijkswaterstaat. Een groot deel hiervan is nog in de eerste fases: het vaststellen van de innovatiebehoefte per transitiegebied, starten van uitvragen innovaties bij de markt via het Innovatieloket, nulmetingen huidige inkoop en verkenning van kansrijkheid en marktrijpheid van al bestaande innovaties (waarvan deze kostencurve-update een onderdeel is). Zowel in dit onderzoek (vanuit eigen ervaring en interviews) als in andere onderzoeken zijn er uitdagingen van deze en andere innovatiefases geïdentificeerd. Hieruit komen voor het innovatiebeleid aanbevelingen naar boven die we gegroepeerd hebben in drie thema's:

1. Innovatie ondersteunen.
2. Data beschikbaar maken.
3. Kennis vasthouden en toepassen.

Innovatie ondersteunen

- Launching customer-trajecten met enkele innovaties opstarten/voortzetten: op basis van de uitkomsten van dit onderzoek wordt aangeraden om CSA-beliet, verschillende soorten geopolymeren (zowel ASCEM®-cement en Geo-beton™ als andere geopolymeren) mechanische/thermische recycling en alternatieve wapening zoals basaltvezelstaven te (blijven) ondersteunen via het launching customer-traject. Daarnaast is demontabel bouwen een interessante innovatie voor de kunstwerken van Rijkswaterstaat. Dit zijn innovaties met veel potentie, maar waar nog wel een ontwikkeltraject voor nodig is om tot opschaling te komen. CCS bij cementklinkerproductie heeft ook veel potentie, maar lijkt niet heel geschikt voor het launching customer-traject, aangezien het beton niet verandert door deze innovatie en zijn daarom geen testen nodig zijn om de functionaliteit ervan vast te stellen. Verder onderzoek naar deze en andere relevante innovaties wordt in meer detail besproken in Paragraaf 8.4.
- Innovaties in de praktijk toepassen: als een innovatie succesvol binnen een pilot is toegepast en perspectief biedt voor de milieudoelen van Rijkswaterstaat, is het aan te raden om voor de toepassing van deze innovatie in de praktijk consequent tijd en budget vrij te maken. Hiermee kan de ontwikkeling van theorie naar praktijk beter worden ondersteund.
- Vroeg inspelen op mogelijke aanpassingen binnen normen en regelgeving: sommige innovaties wijken af van/passen niet binnen bestaande normen en regelgeving. Om belemmeringen weg te nemen bij toekomstige toepassing, wordt aangeraden om in een vroeg stadium in kaart te brengen waar en welke aanpassingen eventueel nodig zullen zijn. Indien in een later stadium duidelijk wordt dat een innovatie waardevol kan zijn voor toepassing bij Rijkswaterstaat, kan er op dat moment sneller ingespeeld worden op het wegnemen van belemmeringen binnen de huidige normen en regelgeving.
- Protocol versnelde innovatie-acceptatie voor marktpartijen ontwikkelen: Zoals genoemd door Rijkswaterstaat (2019a) is een goede pilot/prototype nog geen succesvol nieuw concept. Zoals hierboven genoemd is met name kunnen voldoen aan normen en

regelgeving is hierbij van belang. Voor marktpartijen is het daarom waardevol om te beschikken over een stappenplan of protocol om van pilot tot regulier gebruik van hun innovatie te kunnen komen. Een dergelijk protocol zou bijvoorbeeld vanuit het Innovatie TestCentrum kunnen worden ontwikkeld en verstrekt.
- Marktperspectief bieden: Transparantie van Rijkswaterstaat over de potentiële toekomstige toepassing van een innovatie bij Rijkswaterstaat is belangrijk voor marktpartijen. Innovatietrajecten zijn immers voor marktpartijen tijdsintensief en kostbaar. Zicht op garantie van toepassing bij goed functioneren zou bijvoorbeeld een belangrijke motivatie kunnen zijn voor marktpartijen om tijd en geld in dergelijke trajecten te stoppen, zoals ook benoemd wordt door Rijkswaterstaat (2019a).
- Een breed (systemisch) perspectief behouden: Let op de beperkte beschikbaarheid van materialen en het risico van impactverschuiving. Een belangrijk voorbeeld hierbij is de beschikbaarheid van restproducten. Innovaties die op het eerste gezicht voor impactreducties kunnen zorgen, zorgen mogelijk elders voor een verhoging van impact, bijvoorbeeld doordat beperkte materialen elders weggenomen worden. Het is aan te raden deze onderwerpen op verschillende momenten in het innovatietraject te toetsen, ook om eventueel benodigde verbeterpunten al tijdens het traject te kunnen aanwijzen en behandelen.
- Potentiële combinaties van innovaties in de gaten houden: zet niet alleen in op individuele innovaties, maar let op mogelijke combinatiemogelijkheden. Dit kan onder andere door marktpartijen te wijzen op bekende andere innovaties en door hen expliciet te laten nadenken over samenwerkingskansen binnen de markt.

Data beschikbaar maken

- Onderscheid tussen verschillende typen beton maken: het wordt aangeraden om binnen de organisatie te kijken hoe het areaal van Rijkswaterstaat onderverdeeld kan worden, zowel voor bestaande als voor nieuwe objecten en projecten. Om te onderzoeken wat de potentiële emissie-besparingen van verschillende innovaties zijn voor Rijkswaterstaat, is het namelijk belangrijk om een differentiatie in typen beton te maken (niet-constructief, kleine constructieve elementen, etc.). Niet iedere innovatie is beschikbaar of relevant voor ieder object en de ontwikkelingstrajecten kunnen ook verschillen per type. In deze studie hebben we gedifferentieerd door vier object-categorieën beton te definiëren, op basis van de methodiek die CE Delft en Delta Concrete Consult (2019) hebben ontwikkeld. Met dit onderscheid is helder in kaart te brengen wat de potentiële emissiereductie van een innovatie is per objectcategorie, zodat de totale reductie in detail geanalyseerd kan worden. Een dergelijk onderscheid wordt door Rijkswaterstaat nog niet gemaakt, wat dataverzameling en -analyse uitdagender maakt en onzekerheden met zich meebrengt.
- Het areaal van Rijkswaterstaat in kaart brengen: een goede nulmeting is de start van goed innovatiebeleid, zoals ook opgemerkt wordt in ‘Naar klimaatneutrale en circulaire Rijksinfrastructuurprojecten’ (Ministerie van IenW, 2020). Bij het uitvoeren van de huidige studie is gebleken dat het momenteel nog uitdagend is om de hoeveelheden en samenstellingen per objectcategorie bij Rijkswaterstaat te bepalen. Dit geldt zowel voor wat in beheer is, als voor de geplande onderhoudsopgave. Het ontwikkelen van een methodiek om bij bestaande en nieuwe projecten te monitoren hoeveel beton en welk type beton (welke objectcategorie) aanwezig is, zou waardevol zijn voor toekomstige nulmetingen en analyses. Dit sluit ook aan bij de bovenstaande aanbeveling.

Kennis vasthouden en toepassen

- Bevindingen uit pilots gebruiken: het wordt aangeraden om een heldere en simpele procedure te ontwikkelingen waarmee bevindingen uit pilots kunnen worden gedeeld. Hiermee wordt kennisoverdracht gefaciliteerd, waarmee kan worden voorkomen dat kennis verloren gaat. Dit is met name relevant voor vergelijkbare innovaties en projecten, aangezien verschillende ervaringen gezamenlijk tot nieuwe inzichten en mogelijk standaardisatie van innovatie-implementatie kunnen leiden.
- Ideeën en ervaring van medewerkers gebruiken: Laat medewerkers hun bevindingen uit de praktijk met betrekking tot de uitrol van innovaties delen. Dergelijke praktijk-ervaringen bieden een kans om potentiële barrières weg te nemen en innovatiebeleid sterker in de organisatie te verankeren. Hiervoor kan een centrale plek om dergelijke ervaring en ideeën laagdrempelig te kunnen delen behulpzaam zijn.
- Klankboordgroepen voor innovatiebeleid organiseren: het wordt aangeraden om medewerkers van inkoop, projectleiders en andere afdelingen die niet direct met innovatie en/of duurzaamheid te maken hebben te betrekken bij innovatietrajecten. Door ideeën voor te leggen aan medewerkers die beleid uiteindelijk moeten uitvoeren, kan worden gewaarborgd dat dit beleid aansluit bij bestaande processen en breder geaccepteerd wordt.

8.3 Handelingsperspectieven duurzaam inkopen

8.3.1 Huidig inkoopproces beton

De mate waarin duurzaamheid een rol speelt bij inkoop verschilt in de praktijk van project tot project. Dit heeft te maken met de aard van het project, de scope en het budget, de grootte, de tijdsdruk en het team dat er aan werkt. Daarnaast kunnen marktpartijen aangeven dat de eisen die worden gesteld te scherp zijn.

Er zijn verschillende inkoopprocessen binnen Rijkswaterstaat. Op het gebied van duurzaamheid wordt de MKI in groeiende mate meegenomen in de gunningscriteria van aanbestedingen. Hierbij wordt de MKI meegenomen als fictieve korting (hoe lager de MKI, hoe hoger de korting), veelal met een onder- en bovengrens.

In de gunningscriteria wordt duurzaamheid voor een bepaald percentage meegenomen in de afweging. GPO-projecten (ruwweg nieuwe aanleg) kennen een doelstelling van 35% aandeel van de MKI in de gunningscriteria. Bij PPO (ruwweg onderhoud) is dat 25%. Er zijn ook projecten die een kleiner deel van de gunning toebedelen aan de MKI, omdat er gegund wordt op andere (duurzaamheids)criteria of omdat er andere prioriteiten zijn.

Conform het Actieplan Milieubeprijzing wordt gewerkt aan een alternatieve manier van gunnen op MKI, namelijk door de MKI op te tellen bij de inschrijfprijs, waarbij de MKI met een factor wordt vermenigvuldigd. Ook hier geldt dan hoe lager de MKI, hoe lager de inschrijfprijs. Deze manier van gunnen op MKI is vooral ondersteunend bij onderhouds-projecten (PPO) waar Rijkswaterstaat te weinig inzicht heeft in inzet van materieel en materiaal om een goede MKI referentie op te stellen voor het bepalen van de onder- en bovengrens van de MKI. Per project dient dan wel bepaalt te worden wat de vermenig-vuldigingsfactor is om voldoende gewicht voor de MKI te krijgen ten opzichte van de inschrijfprijs.

Naast gunning wordt MKI ook ingezet om eisen te stellen. Op dit moment wordt gewerkt aan een MKI-plafondwaarde voor verschillende producten (met asfalt als voorloper). Deze kan

dan als gunningseis worden opgenomen. De plafondwaarden zullen de komende jaren steeds verder worden aangescherpt, conform de ambitie om circulair en klimaatneutraal te worden. Deze aanscherping houdt ook rekening met het tempo waarop de markt innovaties aanbiedt of zou kunnen aanbieden. Voor beton wordt op dit moment gekeken wat een realistische eerste plafondwaarde zou moeten zijn, in nauwe samenwerking met de partijen die betrokken zijn bij het betonakkoord.

Voor PPO-projecten zijn de innovaties die in dit onderzoek zijn bekeken minder van belang. Innovaties van bouwtransport en op de bouwplaats (zoals innovatieve werktuigen), zijn hier wel interessant voor.

8.3.2 Aanbevelingen inkoopproces

Het inkoopproces van Rijkswaterstaat is volop in ontwikkeling. In dit onderzoek is met stakeholders binnen en buiten Rijkswaterstaat gesproken over het inkoopproces van kunstwerken. Hieruit zijn meerdere aanbevelingen naar boven gekomen, die we gegroepeerd hebben per projectfase:
- uitvraag/inkoop project;
- ontwerpfase;
- bouwfase;
- materiaalgebruik/einde levensduur.

Uitvraag/inkoop project

- Op MKI gunnen, op klimaatimpact rapporteren: Met de MKI kan niet direct gerapporteerd worden op de duurzaamheidsdoelstellingen van Rijkswaterstaat. Deze doelstellingen zijn met betrekking tot uitstoot van emissies namelijk specifiek gedefinieerd voor klimaatimpact. De MKI is echter een gewogen indicator die breder is dan alleen klimaatimpact, en ook negen andere milieu-impacts categorieën behelst zoals uitputting van grondstoffen, toxiciteit, verzuring en vermesting (stikstof).
  We raden daarom aan om bij alle projecten ook de klimaatimpact als aparte waarde uit te vragen. De MKI is nog steeds waardevol als leidend duurzaamheidsgunningscriterium, aangezien deze breder is dan alleen klimaatimpact en zodanig impactverschuiving naar andere categorieën kan voorkomen. Het schrappen van de MKI wordt daarom afgeraden. Aanvullend op de aanbeveling om ook klimaatimpact apart te laten rapporteren, kan de overweging worden gemaakt of de klimaatimpact ook expliciet een rol moet krijgen als gunningscriterium. Hierbij moet worden nagedacht over hoe met de MKI en andere criteria gestuurd kan worden op de duurzaamheidsdoelstellingen van Rijkswaterstaat.
- Op functionaliteit uitvragen: we raden aan om nog meer nadruk leggen op uitvragen op functie, in plaats van op materiaal in de beschrijving van een kunstwerk. Met functioneel uitvragen is meer innovatie mogelijk. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om viaducten van hout te maken, in plaats van bij beton, zoals in een pilotproject vanuit Rijkswaterstaat in Sneek is gedaan. Van groot belang hierbij is dat er ruim voor de gunning na moet worden gedacht over innovatie en duurzaamheid, zodat van reguliere uitvraag afgeweken kan worden. Hier ligt ook een belangrijk link met regelgeving en normen: ook hierin moeten alternatieve materialen naast beton(soorten) worden erkend om een bepaalde functionaliteit te kunnen vervullen.
- Duurzaamheid in projectontwikkeling integreren: we raden aan om duurzaamheid binnen de scope van elk project mee te laten nemen. Dit kan door middel van verplichtingen en handreikingen, maar ook kennisverspreiding en communicatie is belangrijk. Het moet voor iedereen duidelijk zijn dat duurzaamheid een belangrijke factor is in projecten en dat moet dus ook blijken uit de middelen en tijd die er beschikbaar zijn om hier aandacht aan te geven. Hiervoor is standaardisatie en

informatieverstrekking van groot belang, zowel op het gebied van projectmanagement als op het gebied van regelgeving. Hier dient blijvend aan gewerkt te worden door middel van trainingen.
- De gehele levensduur van kunstwerken meenemen: In de inkoopfase kan voor alle onderdelen van de levensfase van een kunstwerk al worden nagedacht over de mogelijkheden op het gebied van duurzaamheid en hoe deze mee te nemen in de uitvraag. Denk hierbij aan de ontwerpfase, de bouwfase en de sloopfase. Voor de circulariteit van beton is het bijvoorbeeld belangrijk om schoon te slopen, waarbij verschillende typen beton niet mengen. Daar moet bij het ontwerp al op worden ingespeeld.

Ontwerpfase

- Innovatie tijdens de ontwerpfase de ruimte geven en ondersteunen: de ontwerpfase kan veel invloed hebben op de mate van materiaalgebruik, kansen voor hergebruik/recycling en de bouwfase. We raden aan om hiervoor voldoende tijd te reserveren, zodat er goed kan worden onderzocht wat mogelijk is en wat potentiële maatregelen op kunnen leveren. Omdat elk project anders is, zal hiervoor waarschijnlijk meer tijd moeten worden genomen dan nu het geval is. Innovatie kan daarbij worden ondersteund met een instrumentarium waarmee de impact van ontwerpvarianten op het klimaat (en circulariteit) inzichtelijk wordt gemaakt. Aanvullend hierop zou het verplicht kunnen worden om innovaties waarvan onderzoek is ondersteunt vanuit de klimaatenveloppe mee te nemen in de ontwerpfase.
  Duurzaamheid uniform uitvragen: we raden sterk aan om samen te (blijven) werken met andere opdrachtgevers, zodat uitvraag van duurzaamheid consequent verloopt. Dit is ook één van de doelen binnen het Betonakkoord.

Bouwfase

Een toetsingsmethode op de bouwplaats ontwikkelen: voor maatregelen op de bouwplaats, zoals beschreven in Bijlage C.13 is toetsing nog uitdagend. Door een toetsingsmethode te ontwikkelen in samenwerking met andere opdrachtgevers, kunnen maatregelen op de bouwplaats worden aangeboden en kan Rijkswaterstaat toetsen of ze daadwerkelijk worden uitgevoerd. Dit kan er voor zorgen dat er op korte termijn al milieu-impactreductie mogelijk is, omdat die maatregelen van toepassing zijn op reguliere betonsoorten.

Materiaalgebruik/einde levensduur

- Op het gebruik van Materialenpaspoorten inzetten: Het geplande materialenpaspoort biedt veel kansen op het gebied van circulariteit en daarmee samenhangend milieu, doordat het nulmetingen mogelijk maakt en direct inzicht geeft in de aanwezige materialen voor potentiële recycling en hergebruik. Het is aan te raden om in te zetten op het gebruik van materialenpaspoorten, door te onderzoeken wat de huidige mogelijkheden zijn en te investeren in de integratie van deze paspoorten in bestaande en toekomstige processen en assetmanagementsystemen, het liefst samen met andere opdrachtgevers.
- Zeggenschap over sloopmaterialen behouden: momenteel worden vrijkomende materialen vervallen aan de aannemer. Door zeggenschap over sloopmaterialen uit eigen objecten te houden, kan hoogwaardige toepassing (hergebruik en recycling) van deze materialen in de toekomst beter worden gewaarborgd en gestimuleerd door Rijkswaterstaat. Zeggenschap kan bijvoorbeeld worden behouden door de restwaarde

van vrijkomende materialen mee te nemen in de scope van de MKI berekening (Rijkswaterstaat, 2019a) en door expliciet te beschrijven hoe aannemers zich aan de hand van de MKI kunnen onderscheiden met hoogwaardige inzet van vrijkomend materiaal.

8.4 Verder onderzoek innovaties

In deze paragraaf gaan we dieper in op innovaties die interessant zijn voor het launching customer-traject en benoemen we de aandachtpunten per innovatie. Daarnaast bespreken we ook innovaties en maatregelen die voor het launching customer-traject minder geschikt zijn, maar die voor Rijkswaterstaat wel degelijk interessant kunnen zijn en waar ook handelingsperspectieven voor Rijkswaterstaat liggen om toepassing daarvan verder te ontwikkelen. Tot slot benoemen we kort maatregelen die wel in het selectieproces in Hoofdstuk 4 voorbij zijn gekomen, maar die op dit moment een te laag TRL of een te klein toepassingsgebied hebben om te worden meegenomen in de huidige studie.

Hierbij geldt in het algemeen dat deze innovaties nog in ontwikkeling zijn, wat betekent dat opschaling mogelijk tot andere resultaten kan leiden in de praktijk in vergelijking met de resultaten uit ons onderzoek, zowel in positieve als in negatieve zin.

8.4.1 Launching customer projecten

Zoals benoemt in Paragraaf 8.2.2 wordt aangeraden om de ontwikkeling van CSA-beliet, de geopolymeren ASCEM®-cement en Geo-beton™, mechanische/thermische recycling en alternatieve wapening zoals basaltvezelstaven te (blijven) ondersteunen via het launching customer-traject. Deze innovaties lenen zich goed voor dit traject, omdat het gaat om alternatieve materialen/betonmengsels waarvan de techniek al redelijke ver is ontwikkeld. De toepassing in verschillende typen beton moet nog verder onderzocht worden en ook zijn voor de reguliere toepassing van enkele innovaties nog aanpassingen aan regelgeving en normen benodigd.

CSA-beliet

CSA-beliet is al beschikbaar voor toepassing in OC I, maar het is interessant om deze innovatie verder te ontwikkelen voor toepassing in met name OC III en IV. CSA-beliet is binnen dit rapport niet naar boven gekomen in de afhankelijke kostencurve, maar dit ligt voornamelijk aan het feit dat de reductie van Geo-beton™ hoger lijkt te zijn. CSA-beliet kan echter parallel aan of als (potentieel goedkoper) alternatief op geopolymeren ontwikkeld worden. Dit is interessant, omdat bij de productie van geopolymeren veel materialen gebruikt worden die momenteel beperkt voorradig zijn, zoals natronloog en hoogovenslakken.

Praktijkproeven met toepassing van CSA-beliet in constructief beton zijn nog nodig om te onderzoeken hoe en of deze alternatieve binder geschikt is voor OC II en met name III en IV. Bij positief resultaat moet dit type cement vervolgens worden opgenomen in de Europese Norm voor betonconstructies EN 1992-1-1. Daarnaast kan het interessant zijn om te onderzoeken of CSA-beliet ook Portlandklinker kan vervangen in hoogovencement, zodat het breder toegepast kan worden. Ten slotte moet ook kritisch gekeken worden naar de mogelijkheid om een alternatieve grondstof te gebruiken voor de aluminiumbehoefte van CSA-beliet, zoals bijvoorbeeld bauxiet. Hier moet naar gekeken worden aangezien de huidige bron van aluminium, poederkoolvliegas, in beperkte mate beschikbaar is en al breed toegepast wordt binnen de betonindustrie. Het is daarom belangrijk om bij toepassing te

voorkomen dat het gebruik van poederkoolvliegas verschuift, wat voor een verhoging van milieu-impacts van beton elders in de betonketen kan zorgen.

Geopolymeren

Geopolymeren worden al bekeken in launching customer-projecten en zijn beschikbaar voor toepassing in OC I. Voor verdere toepassing zijn echter praktijkproeven nodig om aan te tonen dat geopolymeren geschikt zijn voor OC II en met name voor OC III en IV. Binnen de huidige normen zoals EN 197 en EN 206 is reguliere toepassing van alternatieve binders daarnaast nog niet mogelijk, waardoor uitbreiding van deze normen noodzakelijk is. Hier zou Rijkswaterstaat een rol in kunnen spelen.

Overige aandachtspunten bij geopolymeren zijn de recyclebaarheid van verschillende typen geopolymeren en de zeer beperkte beschikbaarheid van natriumhydroxide en waterglas. Specifiek voor Geo-beton™ moet er daarnaast op gelet worden dat het gebruik van hoogovenslakken en poederkoolvliegas, die beiden beperkt beschikbaar zijn en al breed toegepast worden binnen de betonindustrie, niet tot een verschuiving van milieu-impacts zorgt. Een alternatief zonder hoogovenslakken en poederkoolvliegas is ASCEM®-cement. Bij dit geopolymeer moet met name gelet worden op het energieverbruik tijdens de productie en de toxiciteit van de precursor, aangezien deze binnen onze studie grotendeels ex-ante bepaald zijn. Een laatste aandachtspunt is dat er naast Geo-beton™ en ASCEM®-cement ook andere geopolymeren op de markt zijn, die ook waardevol kunnen zijn voor toepassing door Rijkswaterstaat.

Mechanisch/thermisch recycling

Mechanische/thermische recycling wordt ook al veel bekeken in onderzoekstrajecten en blijft interessant voor het behalen van de verschillende duurzaamheidsdoelstellingen van Rijkswaterstaat. Hierbij zijn aandachtspunten voor onderzoek vooral de toepasbaarheid van de teruggewonnen materialen (grind, zand en cement) in nieuw beton voor verschillende sterkteklassen. Hiervoor moeten praktijkproeven uitgevoerd worden. Daarnaast is het goed om de invloed van andere innovaties op recycling te onderzoeken, net als de mogelijke invloed van mechanisch recyclen op deze innovaties. Zo wordt bijvoorbeeld gesteld dat beton met staalvezelwapening met mechanisch recyclen even effectief kan worden gerecycled als beton met reguliere stalen wapening.

Alternatieve wapening

Alternatieve wapening wordt al onderzocht bij Rijkswaterstaat, met name basaltvezel-staven. Meer onderzoek en praktijkproeven zijn nodig om aan te tonen dat basaltvezel-staven succesvol kunnen worden toegepast in alle objectcategorieën waarin constructief beton wordt toegepast. Met name voor OC III en IV moeten praktijkproeven uitgevoerd worden, aangezien over de toepassing van alternatieve wapening in deze objectcategorieën nog weinig bekend is.

Net als bij alternatieve binders het geval is, is reguliere toepassing van alternatieve wapening niet mogelijk binnen de huidige normen. Hierdoor is uitbreiding van deze normen noodzakelijk. Verdere aandachtspunten bij alternatieve wapening zijn de recyclebaarheid van beton met basaltvezelstaven of staalvezels (of nog andere alternatieven), de benodigde hoeveelheid alternatieve wapening ten opzichte van reguliere wapening en, in het geval van basaltvezelstaven, de productielocaties en daaraan gekoppelde transportafstanden.

8.4.2 Andere interessante innovaties

We hebben in deze rapportage alleen innovaties onderzocht die invloed hebben op de betonsamenstelling of het productieproces van regulier beton, met een TRL van minimaal zes. Naast deze innovaties zijn er ook verduurzamingsmogelijkheden die te maken hebben met transport (Module A2, A4 en C2), en met de verduurzaming van bouw- en sloop-processen (Module A3, A5 en C1 en C3). Het is aan te bevelen om in een vervolgonderzoek deze typen maatregelen ook mee te nemen. Immers moet voor het behalen van de gestelde klimaatdoelen de gehele levensduur van de infrastructuur van Rijkswaterstaat klimaat-neutraal worden.

Hieronder gaan we verder in op de innovaties die behandeld zijn in deze rapportage en interessant kunnen zijn voor toepassing bij Rijkswaterstaat, maar die momenteel minder geschikt lijken te zijn voor het launching customer-traject. Hieronder vallen zowel innovaties die meegenomen zijn in de kostencurves als innovaties die alleen geïntroduceerd zijn in Hoofdstuk 4. De innovaties die we niet meegenomen hebben in de kostencurves zijn nog niet ver genoeg ontwikkeld (te lage TRL), zijn niet breed toepasbaar en/of zijn nog niet voldoende te kwantificeren.

Carbstone™, Solidia & Carbon8

Carbstone™, Solidia, Carbon8 hebben al TRL 9 bereikt voor toepassing in Objectcategorie I. Deze innovaties zijn niet van toepassing op constructies beton, waardoor ze alleen op een relatief kleine hoeveelheid beton bij Rijkswaterstaat invloed hebben. Hierdoor zijn deze innovaties minder geschikt als launching customer-projecten. Wel moet nog verder onderzocht worden deze innovaties kunnen worden aangeboden en ingekocht en voor welke betonobjecten **binnen** Objectcategorie I ze voor Rijkswaterstaat toepasbaar zijn.
De toepassing van deze innovaties bij Rijkswaterstaat zou door hun verre ontwikkeling goed als voorbeeld kunnen dienen hoe andere innovaties binnen Rijkswaterstaat in te gaan zetten nadat ze technisch zijn uitontwikkeld.

CO_2-afvang en opslag bij cementklinkerproductie (CCS)

CCS bij Portlandcementklinkerproductie is vooral op korte/middellange termijn interessant voor Objectcategorie III en IV, omdat er nog weinig alternatieven zijn voor beton in deze categorieën, ook in 2030. Bij deze maatregel is waarschijnlijk weinig invloed mogelijk vanuit Rijkswaterstaat, doordat de producenten van cementklinker buiten Nederland zijn gevestigd. Samenwerken met andere opdrachtgevers zou hierbij kunnen helpen, zodat gezamenlijk bij reguliere producenten van cement kan worden gevraagd om het gebruik van cementklinker met een lage CO_2-impact. Daarnaast kan het interessant zijn om te onderzoeken of afgevangen CO_2 ook gebruikt kan worden (Carbon Capture & Utilisation, CCU), bijvoorbeeld in combinatie met Carbstone™, Solidia & Carbon8.

Deze maatregel maakt cement en daarmee beton echter wel duurder en concurreert daarnaast met andere innovaties die op de lange termijn voor meer reducties zouden kunnen zorgen, zoals alternatieve binders zonder Portlandcementklinker. Daarnaast concurreert de cementklinkerindustrie voor de opslag van CO_2 met andere industrieën. Ondanks dat het potentieel op korte termijn groot is, moet daarom goed de afweging worden gemaakt of Rijkswaterstaat hierin wilt investeren, of dat geld wilt gebruiken om innovaties met meer langetermijnperspectief te ondersteunen.

Demontabel bouwen

Demontabel bouwen potentieel erg interessant zowel voor milieu-impactreductie als voor circulair bouwen. De impactreductie die behaald kan worden is erg projectafhankelijk en daarom is deze innovatie niet verder meegenomen in deze studie. Met demontabel bouwen worden door Rijkswaterstaat momenteel al pilots uitgevoerd. Uit dergelijke pilots is gebleken dat standaardisatie van (onderdelen van) kunstwerken moet worden overwogen om deze manier van bouwen breed inzetbaar te maken bij Rijkswaterstaat. Dit zou een interessante onderzoeksrichting zijn om deze innovatie verder te brengen.

Bouwplanningsmaatregelen

Op dit moment kunnen enkele bouwplanningsmaatregelen ook al worden ingezet voor alle objectcategorieën. Denk hierbij aan maatregelen zoals korrelpakking, licht ontwerpen, modulerend koelen en verwarmen en on-site precasting. Hierbij ligt de uitdaging vooral in de wijze waarop deze maatregelen kunnen worden aangeboden en hoe kan worden gecontroleerd of ze in de praktijk correct uitgevoerd worden.

Overige innovaties

Het gebruik van andere bouwmaterialen en -processen is tot slot ook interessant om verder onderzoek naar te doen. Met name verder onderzoek naar de toepassing van innovatieve materialen en processen in kunstwerken uit Objectcategorie III is interessant voor Rijkswaterstaat, aangezien deze objectcategorie het grootste areaal heeft.

Een alternatief voor beton waar ook in de praktijk al ervaring mee is, is hout. Het is hierbij van belang om verder te onderzoeken waar hout een goede vervanging is voor beton en welke milieuwinst daarmee gepaard gaat. Dit is onder andere afhankelijk van de levensduur van het object, de herkomst en benodigde behandeling van het hout. Hybride vormen van zowel beton als hout zijn ook mogelijk.

Uit de in Tabel 6 gepresenteerde maatregelen zijn met name zelfhelend beton en mineraal CO_2 interessant om nog in de gaten te houden. Zelfhelend beton is in deze studie niet meegenomen omdat het met name op plekken waar moeilijk onderhoud kan worden gepleegd interessant is en daarom een nichetoepassing heeft, maar tegelijkertijd is het op iedere objectcategorie van toepassing en beheerd Rijkswaterstaat kunstwerken waar dit interessant voor zou kunnen zijn. Het TRL van mineraal CO_2 was nog niet hoog genoeg om in deze studie mee te nemen en daarnaast is het ons niet bekend of deze innovatie toe te passen is op alle objectcategorieën, maar het is goed om de ontwikkelingen van deze innovatie in de gaten te houden en te kijken of dit mogelijk is. Tot slot is het aan te raden om ook andere innovaties in de gaten te houden, naast de innovaties die in dit rapport benoemt zijn. De markt is constant in ontwikkeling, wat betekent dat innovaties worden verbeterd en nieuwe innovaties op de markt komen.

9 Bibliografie

ArcelorMittal, 2020. *Steel Fibres Products.* [Online]
Available at:
https://barsandrods.arcelormittal.com/wiresolutions/steelfibres/products/products/EN
[Geopend 15 Juni 2020].

ArcelorMittal, 2020. *The hidden strength of steel fibres.* [Online]
Available at: https://corporate.arcelormittal.com/media/case-studies/steel-fibre-story
[Geopend 15 Juni 2020].

Assi, L. N., Carter, K., Deaver, E. & Ziehl, P., 2020. Review of Availability of Source Materials for Geopolymer/Sustainable Concrete. *Journal of Cleaner Production,* 263(August), pp. E-pub.

Basaltwapening, 2020. *Wat is basaltcomposiet?.* [Online]
Available at: https://basaltwapening.nl/wat_is_basaltcomposiet
[Geopend 25 Mei 2020].

Bastech, 2020. *Product Specifications.* [Online]
Available at: http://www.basalt.tech/products.html
[Geopend 8 Juni 2020].

Bekaert, 2020b. *Steel Fiber Reinforced Concrete FAQ.* [Online]
Available at: https://www.bekaert.com/en/product-catalog/content/building-products-pages/steel-fiber-reinforced-concrete-faq#21
[Geopend 15 Juni 2020].

Bekaerts, 2020a. *Concrete applications.* [Online]
Available at: https://www.bekaert.com/en/product-catalog/construction/concrete-reinforcement/concrete-applications
[Geopend 15 Juni 2020].

Belastingdienst, 2020. *Tabellen tarieven milieubelastingen.* [Online]
Available at:
https://www.belastingdienst.nl/wps/wcm/connect/bldcontentnl/belastingdienst/zakelijk/overige_belastingen/belastingen_op_milieugrondslag/tarieven_milieubelastingen/tabellen_tarieven_milieubelastingen?projectid=6750bae7-383b-4c97-bc7a-802790bd1110
[Geopend 2020].

Bestfiberglassrebar, 2020a. *GFRP rebar.* [Online]
Available at: https://bestfiberglassrebar.com/products/gfrp-rebar/
[Geopend 25 Mei 2020].

Bestfiberglassrebar, 2020b. *World experience of GFRP rebar use.* [Online]
Available at: https://bestfiberglassrebar.com/blog/experience-of-gfrp-rebar-use/
[Geopend 25 Mei 2020].

Bestfiberglassrebar, 2020c. *Projects.* [Online]
Available at: https://bestfiberglassrebar.com/projects/
[Geopend 25 Mei 2020].

Betonhuis, 2020a. *Betonmarkt in Nederland.* [Online]
Available at: https://betonhuis.nl/cement/betonmarkt-nederland
[Geopend 19 6 2020].

Betonhuis, 2020b. *Vezelversterkt beton.* [Online]
Available at: https://betonhuis.nl/betonhuis/vezelversterkt-beton
[Geopend 11 Juni 2020].

Betonlexicon, 2018. *Staalvezelbeton.* [Online]
Available at: https://www.betonlexicon.nl/S/Staalvezelbeton
[Geopend 11 Juni 2020].

Bouw Totaal, 2019. *Beton wapenen met vezels.* [Online]
Available at: https://www.bouwtotaal.nl/2019/10/beton-wapenen-met-vezels/
[Geopend 11 Juni 2020].

Bruin, M., 2015. *Alternatieve Bindmiddelen, What's New?.* sl:ENCI.

Business wire, 2019. *EP Henry Introduces World's First Precast Products Manufactured with CO2-Cured Solidia Concrete.* [Online]
Available at: https://www.businesswire.com/news/home/20190917005888/en/EP-Henry-Introduces-World%E2%80%99s-Precast-Products-Manufactured
[Geopend 3 juni 2020].

Canzac, 2020. *Steel fibred - advantages and disadvantages.* [Online]
Available at: http://www.canzac.com/knowledge-centre/steel-fibres-advantages-and-disadvantages/#:~:text=Steel%20fibre%20reinforced%20concrete%20is,concrete%20by%20resisting%20tensile%20cracking.
[Geopend 11 Juni 2020].

Carbon8, 2018. *Carbon8 Systems,* Chatham Maritime: Carbon8.

CE Delft ; Delta Concrete Consult, 2019. *Verduurzaming betongebruik bij RWS - Identificatie object-technologiecombinaties in de GWW,* Delft: CE Delft.

CE Delft en TNO, 2019a. *Kostencurves asfalt 2019,* Delft en Den Haag: CE Delft en TNO.

CE Delft en TNO, 2019b. *Aanvullende kostencurves 'Asfalt' en Plan van Aanpak 2019,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2013. *Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2016. *Update prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen 2016,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2017. *Handboek Milieuprijzen,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2018. *Kostencurves scope 3 upstream Rijkswaterstaat,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2019a. *LCA CCU Twence,* 2019: CE Delft.

CE Delft, 2020a. *Klimaatimpact van betongebruik in de Nederlandse bouw,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2020c. *Circulair beton 2020,* Delft: CE Delft.

Celitement, 2020. *Applications.* [Online]
Available at: http://www.celitement.de/en/applications/

Cembureau, 2017. *Innovation in the cement industry.* [Online]
Available at: https://cembureau.eu/media/1225/10819_cembureau_innovationbooklet_eu-ets_2017-02-01.pdf
[Geopend June 2020].

CEMCAP, 2020. *About.* [Online]
Available at: https://www.sintef.no/projectweb/cemcap/about/
[Geopend 30 6 2020].

Cement en Beton, 2020. *Vezelbeton.* [Online]
Available at: http://www.cementenbeton.nl/materiaal/innovaties/vezelbeton
[Geopend 11 Juni 2020].

Cobouw, 2009. Wapeningsstaven van basaltvezel. *Cobouw*, 29 September.

Cobouw, 2017. *Scheidingswand Amsterdams wooncomplex bespaart CO2.* [Online]
Available at: https://www.cobouw.nl/woningbouw/nieuws/2017/07/co2-sla-je-op-de-berging-101250951?_
[Geopend juni 2020].

Cobouw, 2020. *Duikerbrug gewapend met basalt.* [Online]
Available at: https://www.cobouw.nl/infra/nieuws/2015/05/duikerbrug-gewapend-met-basalt-10194239
[Geopend 8 Juni 2020].

Cobouw, 2020. *Staalvezelbeton laat zich goed recyclen.* [Online]
Available at: https://www.cobouw.nl/bouwbreed/nieuws/2010/09/staalvezelbeton-laat-zich-goed-recyclen-101169622
[Geopend 11 Juni 2020].

Concrete.org, 2020. *Steel fibres.* [Online]
Available at: http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=376
[Geopend 11 Juni 2020].

Construction Climate Challenge, 2019. *Concrete reinforced with bamboo can replace steel in developing countries.* [Online]
Available at: https://constructionclimatechallenge.com/2016/04/08/concrete-reinforced-with-bamboo-can-replace-steel-in-developing-countries/
[Geopend 2020].

Convez, 2020. *Staal waar het moet : Kunststofvezel waar het kan.* [Online]
Available at: https://www.convez.eu/
[Geopend 1 Juli 2020].

de Leeuw, M., 2020. Het nieuwe gewapende beton kan nog veel exotischer. *Cobouw*, 26 April, pp. 8-9.

De Lek Beton, 2020. *Vezelversterkt beton.* [Online]
Available at: https://www.delekbeton.nl/producten/betonmortel/vezelversterkt-beton
[Geopend 11 Juni 2020].

Delta Concrete Consult, 2020. *Quick-scan verduurzamingsopties voor beton; actualisering van TRL-niveau's en identificatie van evt. implementatie-remmende regelgeving voor pilot-toepassingen,* Vianen: Delta Concrete Consult.

Department Leefmilieu, Energie, N. &. & VITO, 2016. *Onderzoek naar mogelijk ondersteuningsbeleid m.b.t. nieuwe toepassingsmogelijkheden van CO2 als grondstof/feedstock,* Brussel: Department Leefmilieu, Natuur & Energie.

Deutsche Basalt Faser, 2020. *Basalt Rebar for reinforcement.* [Online]
Available at: https://www.deutsche-basalt-faser.de/en/products/basalt-rebar-for-reinforcement/
[Geopend 8 Juni 2020].

Dienemann, W. & Ben HaHa, M., 2018. *Progress in the development of Ternocem - a belite ye'elimite ferrite cement.* sl, HeidelbergCement.

Dienemann, W. et al., 2013. BCT Technology – a new alternative binder concept. *ZKG,* Issue 5, pp. 25-27.

EC, 2014. *General Annexes to Horizon 2020 Work Programme 2014-2015,* Brussels: European Commission (EC).

ECO-Binder, 2020. *ECO-Binder.* [Online]
Available at: http://www.ecobinder-project.eu/en/project-description-3
[Geopend 12 Mei 2020].

EIB, 2011. *De civiele betonbouw tot 2016 : Onwtikkelingen op de markt en in de rolverdeling in het bouwproces,* Amsterdam: Economisch Instituut voor de Bouw (EIB).

ENCI B.V., 2020. *Vragenlijst voor PvA Innovatieprogramma Circulair Beton.* sl:ENCI B.V..

Faber, 2020. *Mega: 25.000 en 40.000 m3 beton.* [Online]
Available at: https://www.faberbetonpompen.nl/nieuws/megaklussen-25-000-en-40-000-m3/
[Geopend 25 6 2020].

Gardarsdottir, S. et al., 2019. Comparison of Technologies for CO2 Capture from Cement Production—Part 2: Cost Analysis. *Energies,* Volume 12, pp. E-pub 542.

Global Cement, 2020. *Schwenk Zement acquires Celitement.* [Online]
Available at: https://www.globalcement.com/news/item/10707-schwenk-zement-acquires-celitement

Grondstoffencatalogus, 2018a. *LD-staalslakken.* [Online]
Available at: https://bouw.grondstoffencatalogus.be/grondstoffen/LD-staalslakken
[Geopend 9 juni 2020].

Grondstoffencatalogus, 2018b. *RVS-slakken.* [Online]
Available at: https://bouw.grondstoffencatalogus.be/grondstoffen/rvs-slakken
[Geopend 9 juni 2020].

Habert, G., De Lacaillerie, J. D. E. & Roussel, N., 2011. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of cleaner production,* 19(11), pp. 1229-1238.

Harisson, T., Jones, M. R. & Lawrence, D., 2019a. Geopolymers and Other Alkali-Activates Materials. In: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete.* Oxford: Butterworth-Heinemann, pp. 779-806.

Harisson, T., Jones, M. R. & Lawrence, D., 2019b. The Production of low Energy Cements. In: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete.* Oxford: Butterworth-Heinemann, pp. 341-362.

HeidelbergCement Benelux, 2017. *Alternatieve bindmiddelen met een lagere CO2-voetafdruk: de Calciumsulfoaluminaat cementen.* Rotterdam: sn

Heidelbergcement Benelux, 2018. *EPD ALI PRE GREEN ALI & CEM GREEN,* sl: Heidelbergcement Benelux.

Hermans, M., 2011. *Staalvezelbeton toegepast in woningbouwcasco, masterthesis,* Eindhoven: TU Eindhoven.

Inman, M., Thorhallsson, E. R. & Azrague, K., 2017. A mechanical and environmental assessment and comparison of basalt fibre reinforced polymer (BFRP) rebar and steel rebar in concrete beams. *Energy Procedia,* Volume 111, pp. 31-30.

IXAS, 2016. *Bouwbericht A9 Gaasperdammerweg,* Amsterdam: IXAS.

Joost de Vree, 2020. *Vezelbeton.* [Online]
Available at: https://www.joostdevree.nl/shtmls/vezelbeton.shtml
[Geopend 11 Juni 2020].

Lafarge, 2020. *Developing a new generation of lower-carbon cements.* [Online]
Available at: http://www.aether-cement.eu/about-project-aether.html

Lotfi, S. & Rem, P., 2016. Recycling of End of Life Concrete Fines into Hardened Cement and Clean Sand. *Journal of Environmental Protection,* Issue 7, pp. 934-950.

Lutz Consulting, 2018. *Inventarisatie materiaalketen beton,* sl: Lutz Consulting.

Ministerie van IenW, 2019. *Goed op weg met CO2 reductie : het CO2 managementplan 2018-2019 in het kort,* Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW).

Ministerie van IenW, 2020. *Naar klimaatneutrale en circulaire rijksinfrastructuur projecten,* Den Haag: Ministerie van Infrastrutuur en Waterstaat (IenW).

NIBE, 2018. *Advies voor MKI plafondwaarden voor betonmortel en betonproducten - Bijlage B,* Bussum: NIBE.

O.C.O Technology, 2019. *IBAA - M-LS Comparison.* [Online]
Available at: https://oco.co.uk/wp-content/themes/crush-theme/assets/pdf/IBAA.pdf
[Geopend 9 juni 2020].

O'Born, R., 2018. Life cycle assessment of large scale timber bridges: A case study of the world's longest timber bridge design in Norway. *Transportation Research Pard D: Transport and Environment,* Volume 59, pp. 301-312.

Ólafsson, H. & Þórhallsson, E., 2009. *Basalt fiber bar Reinforcement of concrete structures: paper presented at the Conference: Basalt fiber Seminar, Reykjavik University.* Reykjavik, Reykjavik University.

PBL, 2019a. *Achtergronddocument "het Klimaatakkoord: Effecten en Aandachtspunten",* Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

PBL, 2019b. *Klimaat- en Energieverkenning 2019,* Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

Quaghebeur, M., Nielsen, P., Horckmans, L. & Van Mechelen, D., 2015. Accelerated Carbonation of Steel Slag Compacts: Developent of High-Strength Construction Materials. *Frontiers in Energy Research,* Issue 3.

Ramirez, A. C., 2015. *Evaluating Corrosion Resistance of Reinforcing Steel in a Novel Green Concrete,* Tampa (USA): University of South Florida.

Rijksoverheid, 2019a. *Klimaatakkoord,* Den Haag: Rijksoverheid.

Rijksoverheid, 2019b. *Nederland circulair in 2050.* [Online]
Available at: https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/nederland-circulair-in-2050
[Geopend 26 februari 2019].

Rijksoverheid, 2019c. *Besluit tot wijziging van het Besluit activiteiten leefomgeving, het Besluit kwaliteit [...]beschermen van de bodem, met inbegrip van het grondwater en het duurzaam en doelmatig gebruik van de bodem (Aanvullingsbesluit bodem Omgevingswet).* Den Haag: Rijksoverheid.

Rijksoverheid, et al., 2018. *Betonakkoord voor Duurzame Groei.* [Online]
Available at:
https://www.betonakkoord.nl/publish/pages/152943/betonakkoord_10_juli_2018.pdf

Rijkswaterstaat , 2014. *Beleidskader innovatiegericht inkopen,* Den Haag: Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en milieu.

Rijkswaterstaat, 2012. *Jaarbericht Rijkswaterstaat 2011,* Utrecht: Rijkswaterstaat.

Rijkswaterstaat, 2015. *Beheer- en ontwikkelplan voor de rijskwateren 2016-2021,* Utrecht: Rijkswaterstaat.

Rijkswaterstaat, 2017. *Richtlijn Ontwerp Kunstwerken 1.4.* sl:sn

Rijkswaterstaat, 2018b. *Alles over beton in nieuwe sluiskolk Eefde.* [Online]
Available at: https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/2018/09/alles-over-beton-in-nieuwe-sluiskolk-eefde.aspx
[Geopend 24 6 2020].

Rijkswaterstaat, 2018c. *Betonakkoord ondertekend, nu aan de slag.* [Online]
Available at: https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/2018/07/betonakkoord-ondertekend-nu-aan-de-slag.aspx
[Geopend 25 6 2020].

Rijkswaterstaat, 2019a. *Prototype circulair viaduct. Belangrijkste inzichten en lessen na ,* sl: Rijkswaterstaat.

Rijkswaterstaat, 2019. *Circulaire economie.* [Online]
Available at: https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/innovatie-en-duurzame-leefomgeving/duurzame-leefomgeving/circulaire-economie/index.aspx
[Geopend 26 februari 2019].

Rijkswaterstaat, 2020a. *Bruggen. Veelgestelde vragen..* [Online]
Available at: https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegbeheer/bruggen/veelgestelde-vragen.aspx
[Geopend 19 6 2020].

Rijkswaterstaat, 2020a. *De A58: een slimme en duurzame snelweg.* [Online]
Available at: https://innova58.nl/default.aspx
[Geopend 26 mei 2020].

Rijkswaterstaat, 2020b. *Afvalverwerking in Nederland, gegevens 2018 - Versie 1.0,* Utrecht: Rijkswaterstaat.

Rijkswaterstaat, 2020c. *Jaarbericht 2019,* Utrecht: Rijkswaterstaat.

Rijkswaterstaat, 2020d. *De Innovatieagenda.* [Online]
Available at: https://rwsinnoveert.nl/innovaties/@216893/innovatieagenda/
[Geopend September 2020].

Rijkswaterstaat, 2020. *In welke gevallen mag ik een afvalstof als grondstof gebruiken in een nieuwe bouwstof?.* [Online]
Available at: https://www.bodemplus.nl/onderwerpen/wet-regelgeving/bbk/vragen/bouwstoffen-algemeen/faq/welke-gevallen-mag-0/
[Geopend 12 maart 2020].

RMS, 2020. *Staalvezel vloeren.* [Online]
Available at: https://www.rmsbetonvloeren.nl/staalvezel-beton.html
[Geopend 11 Juni 2020].

Roemaat, J. & Severus, H., 2013. *Recycling staalvezelbeton,* Eindhoven: TU Eindhoven.

Schöck, 2013. *Schöck ComBAR Referenties,* Apeldoorn: Schöck.

Schöck, 2020. *Wanneer staal zijn grenzen bereikt.* [Online]
Available at: https://www.schock.nl/nl/combar
[Geopend 11 Juni 2020].

SGS Intron B.V., 2020. *LCA en Circulariteit Geopolymeerbeton Tussenwand Onderdoorgang Heiloo,* Sittard: SGS Intron B.V..

Singh, A. & Stéphenne, K., 2014. Shell Cansolv CO2 capture technology: Achievement from Forst Commercial Plant. *Energy Procedia,* Volume 63, pp. 1678-1685.

SINTEF, 2018. *CO2 Capture - CEMCAP in cement world.* [Online]
Available at: https://www.sintef.no/globalassets/project/cemcap/cemcap-in-cement-world.pdf
[Geopend 21 April 2020].

Solidia, 2013. *Presentation: Turning Problems into Solutions for the Construction and Building Materials Markets,* sl: Solidia.

SQAPE BV, 2020. *RAMAC Ready Mix Concrete.* [Online]
Available at: https://ramacreadymix.nl/
[Geopend 7 April 2020].

SQAPE, 2020. *SQAPE: De groene belofte door extraam lage CO2 footprint.* [Online]
Available at: http://www.sqape.nl/duurzaamheid.htm

Stichting Bouwkwaliteit, 2020. *Bepalingsmethode.* [Online]
Available at: https://milieudatabase.nl/milieuprestatie/bepalingsmethode/
[Geopend 21 September 2020].

Stichting Bouwkwaliteit, januari 2019. *Bepalingsmethode Milieupresetatie Gebouwen en GWW-werken,* Rijswijk: Stichting Bouwkwaliteit (SBK).

Struyk Verwo Infra, 2020. *Cementvrij beton met geopolymeertechnologie.* [Online]
Available at: https://www.struykverwoinfra.nl/voordelen-cementvrij-beton.html
[Geopend 7 April 2020].

Sudaglass, 2020. *A Superior Alternative To Conventional Steel Rebar.* [Online]
Available at: http://www.sudaglass.com/rods.html
[Geopend 25 Mei 2020].

Tierens, M., 2007. *Verkennend onderzoek naar het gebruik van basaltvezels voor de versterking van betonconstructies, scriptie,* Gent: Universiteit Gent.

v.d. Bosch Beton bv, 2020. *Reduton.* [Online]
Available at: https://www.vdboschbeton.nl/reduton
[Geopend 7 April 2020].

Van de Haterd, 2020. *Master Beton.* [Online]
Available at: http://www.vandehaterd.com/nl/van-de-haterd-2/master-beton/

Van Mechelen, D., Bouillot, F. & Mayelle, N., 2017. *Method for producing a carbonate bonded, press-moulded article.* Belgium, Patentnr. BR112017003494 (A2).

Vastmans Frank, 2020. *Wat is het verschil tussen staalvezel en wapeningsnetten?.* [Online]
Available at: https://www.vastmansfrank.com/2019/11/verschil-staalvezel-wapeningsnetten.html
[Geopend 11 Juni 2020].

Verhoeven-Leenders, 2020. *Nieuwe Wapeningstechnieken.* [Online]
Available at: https://www.verhoeven-leenders.nl/innovaties/nieuwe-wapeningstechnieken/
[Geopend 11 Juni 2020].

Vermeulen, E., 2020. CO_2-reductie: opties voor cement : Verlaging van CO2-emissie van beton is nog niet zo eenvoudig. *Cement,* pp. 15-21.

Voldsund, M. et al., 2019. Comparison of Technologies for CO2 Capture from Cement Production—Part 1: Technical Evaluation. *Energies,* 12(3), pp. E-pub 559.

VVD; CDA; D66; ChristenUnie, 2017. *Vertrouwen in de toekomst: Regeerakkoord 2017 – 2021,* Den Haag: VVD; CDA; D66; ChristenUnie.

Winnefeld, F. & Kaufmann, J. P., 2011. Concrete produced with calcium sulfoaluminate cement : a potential system for energy and heat storage. In: M. Motavalli, B. Havranek & E. Saqan, red. *Proceedings of SMAR 2011 the 1st Middle East conference on smart monitoring, assessment and rehabilitation of civil structures* . Dübendorf ; Dubai: EMPA : UAE, pp. 1-8.