



Circulair beton bij Rijkswaterstaat

Een analyse van de circulariteit van
materiaalgebruik binnen de betonketen



CE Delft

Committed to the Environment

Circulair beton bij Rijkswaterstaat

Een analyse van de circulariteit van materiaalgebruik binnen de betonketen

Dit rapport is geschreven door:

Maarten Bruinsma, Isabel Nieuwenhuijse, Amanda Bachaus, Sanne Nusselder

Delft, CE Delft, januari 2021 (redactionele revisie: december 2022)

Publicatienummer: 21.190460.005

Beton / Hergebruik / Productie / LCA / Meetmethoden / Indicatoren / Materialen / Verbruik / Economische factoren / Maatschappelijke factoren / Innovatie / Scenario's

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat

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

Meer informatie over dit onderzoek is te verkrijgen bij Maarten Bruinsma (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 materialen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al meer dan 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	4
	Verklarende woordenlijst	7
1	Introductie	8
2	Metten van circulariteit	11
	2.1 Circulariteit bij Rijkswaterstaat	11
	2.2 Definitie van circulariteit	13
	2.3 Onderzoek naar bestaande circulaire indicatoren	15
	2.4 Indicatoren voor circulariteit binnen dit onderzoek	16
3	Aanpak en Methodiek	20
	3.1 Aanpak	20
	3.2 Opdeling van beton bij RWS: objectcategorieën	20
	3.3 Stap 1: Definiëren basisscenario	21
	3.4 Stap 2: Opstellen innovatiescenario's en selectie betoninnovaties	22
	3.5 Stap 3: Doorrekenen en vergelijken	23
4	Basis- en Innovatiescenario's	24
	4.1 Geselecteerde betoninnovaties	24
	4.2 Basisscenario	25
	4.3 Innovatiescenario's per objectcategorie	27
5	Resultaten	33
	5.1 Resultaten Klimaatimpact en MKI-score	33
	5.2 Resultaten primair materiaalverbruik	35
	5.3 Resultaten economische waardebehoud materialen	36
	5.4 Verhouding circulariteitsindicatoren ten opzichte van elkaar	38
	5.5 Impact van de circulaire indicatoren op de keuze van betoninnovaties	39
	5.6 Omissies	41
6	Sturen op circulariteit	43
	6.1 Mogelijkheden voor circulair materiaalgebruik in 2030	43
	6.2 Mogelijkheden launching customer trajecten & koploperaanpak	43
7	Conclusie en aanbevelingen	46
	7.1 Hoe kan de circulariteit van materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS kwantitatief gemeten worden?	46
	7.2 Hoe circulair is het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS nu en welke mogelijkheden zijn er om de circulariteit van materialen te verhogen in Nu (hier: 2020), in 2025 en in 2030?	46



7.3	Hoe verhouden verschillende circulaire indicatoren zich ten opzichte van elkaar voor de betonketen van RWS?	47
7.4	Welke mogelijkheden heeft RWS om te sturen op circulair materiaalgebruik binnen de eigen betonketen?	48
7.5	Welke voorwaarden zijn er om te sturen op circulair materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS?	49
8	Bibliografie	52
A	Basisscenario	56
A.1	Referentiesamenstelling voor beton per objectcategorie en Totaal materiaalgebruik voor beton van RWS in 2020, in 2025 en 2030	56
A.2	Gebruikte gegevens voor het basisscenario	57
B	Innovatiescenario's betoninnovaties	60
B.1	Zichtjaar 2020	60
B.2	Zichtjaar 2025	64
B.3	Zichtjaar 2030	71
C	Kosten materialen voor productie beton	78
C.1	Zichtjaar 2020	78
C.2	Zichtjaren 2025 en 2030	79
C.3	Vraag- en aanbodfactoren betonmarkt	81
C.4	Vraag- en aanbodfactoren per materiaal	84
D	Kostenbeschouwing materialen betoninnovaties	91
D.1	Kosten per materiaal voor betoninnovaties - zichtjaar 2020	91
D.2	Kosten per materiaal voor betoninnovaties - zichtjaar 2025 en 2030	92
D.3	Vraag- en aanbodfactoren betonmarkt	93
D.4	Vraag- en aanbodfactoren per materiaal	94
E	Voorwaarden voor circulair materiaalgebruik in de betonketen	98
E.1	Duurzaamheidsambities prioriteren	98
E.2	Data-uitvraag inkoop aanscherpen	99
E.3	Materiaalbeschikbaarheid meenemen	102

Samenvatting

Onderwerp en doel

Rijkswaterstaat (RWS) heeft de ambitie om in 2030 100% circulair te opereren. Hiermee loopt RWS voor op de nationale ambitie, een volledig circulaire economie in 2050. Omdat de bouwsector verantwoordelijk is voor 50% van het materiaalgebruik in Nederland heeft RWS speciale aandacht voor circulariteit in deze sector. CE Delft is daarom gevraagd om de mogelijkheden voor circulair materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS in kaart te brengen en te adviseren hoe hier tot 2030 op gestuurd kan worden.

Uit dit onderzoek blijkt dat RWS de mogelijkheid heeft om de circulariteit van het materiaalgebruik binnen de eigen betonketen tot 2030 flink te verhogen¹. Om dit mogelijk te maken zal RWS diens inkoopstrategie en duurzaamheidsambities verder aan moeten scherpen, zodat circulariteit consistent en kwantitatief meegenomen kan worden binnen uitvragen van RWS.

Hoofdvraag

In dit onderzoek geven we antwoord op de vraag: ‘Hoe kan Rijkswaterstaat sturen op circulair materiaalgebruik binnen de betonketen?’. Voordat we deze vraag met het voorliggende onderzoeksrapport beantwoorden, willen we benadrukken dat het vertrekpunt van circulariteit van materiaalgebruik op projectniveau in algemene zin is, dat vooraf gekeken is naar de mogelijkheden voor levensduurverlenging, hergebruik van (delen van) betonobjecten en optimalisatie van het ontwerp van betonobjecten. Het voorkomen en verminderen van materiaalgebruik is immers vaak circulaarder dan het toepassen van circulaire materialen.

Vier indicatoren voor circulariteit

Uit dit onderzoek is gebleken dat RWS kan sturen op circulair materiaalgebruik binnen de eigen betonketen door circulaire innovaties toe te passen in projecten. Om tot deze conclusie te komen, hebben we gebruik gemaakt van vier circulaire indicatoren:

1. Klimaatimpact materiaalgebruik betonketen (in kton CO₂-eq. per jaar).
2. Milieukostenindicator (MKI-score) materiaalgebruik betonketen (in miljoen € MKI per jaar).
3. Primaire materiaalverbruik (in kton per jaar).
4. Economisch waardebehoud materialen (in factor waardebehoud = economische waarde materiaaloutput (€)/economische waarde materiaalinput (€)).

De voorgenoemde indicatoren geven kwantitatief inzicht in de circulariteit van materiaalgebruik van RWS, zowel voor de gehele betonketen van RWS als voor de objecten van deze betonketen. Hierdoor kan circulariteit van materiaalgebruik gemeten worden en kunnen verschillende innovaties en mogelijkheden die bijdragen tot deze circulariteit tegen elkaar afgezet worden.

¹ Hierbij moet worden opgemerkt dat er in dit onderzoek geen rekening is gehouden met beschikbaarheid van circulaire materialen/grondstoffen.

Potentieel voor circulariteit in 2030

Tot 2030 kan het primaire materiaalverbruik (primaire grondstoffen in beton (inclusief wapeningsstaal)) door recycling en hergebruik binnen de betonketen van RWS met zo'n 85% tot 90% worden verlaagd². Met de innovaties die worden toegepast om dit te bereiken, dalen tegelijkertijd de klimaatimpact en de MKI-score, door versterkt in te zetten op alternatief materiaalgebruik, van de betonketen met zo'n 20%. Daarbij neemt het Economisch waardebehoud van de betonketen van RWS met 3% toe ten opzichte van de huidige situatie.

Onze werkwijze voor het beoordelen van het potentieel voor circulariteit in 2030 was om eerst de huidige circulariteit van het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS te kwantificeren. Hierbij hebben we gebruik gemaakt van de vier voorgenoemde circulaire indicatoren. Vervolgens hebben we het betongebruik bij RWS opgedeeld in vier object-categorieën (OC's).

De vier objectcategorieën hebben ieder een eigen referentie voor de huidige betonsamenstelling. Vervolgens hebben we op basis van de vier indicatoren, vier innovatiescenario's gedefinieerd om het circulair betongebruik voor de betonketen van RWS te onderzoeken. Dit hebben we gedaan voor Nu (hier: het basisjaar 2020) en de zichtjaren 2025 en 2030. Verschillende maatregelenpakketten met betoninnovaties zijn vervolgens voor een OC onderzocht. Voor ieder van de vier innovatiescenario's volgde vervolgens per OC een beste maatregelenpakket met een innovatie.

Aanbevelingen

RWS kan sturen op circulair materiaalgebruik binnen de eigen betonketen door circulaire innovaties toe te passen in projecten. Om tot deze conclusie te komen, hebben we gebruik gemaakt van vier circulaire indicatoren die hiervoor beschreven zijn. Voor het uiteindelijk toepassen van deze circulaire innovaties in de betonketen van RWS zijn een aantal aanbevelingen uitgewerkt.

Aanbevelingen voor Launching Customer-trajecten en de Koplopersaanpak

- Launching Customer-trajecten initiëren met de innovaties: mechanisch gerecycled zand en grind, mechanisch/thermisch gerecycled cement, alternatieve binders zoals geopolymeren en CSA-beliet in de vier OC's.
- Koploperprojecten met de innovaties: Solidia en Carbstone in OC I realiseren.

Duurzaamheidsambities prioriteren

- Maak een beleidskeuze voor prioritering van de circulariteitsambitie en de klimaatambitie in de eigen opgave.
- Geef circulariteit van beton expliciet een plek binnen een RWS-inkoopstrategie van een circulaire betonketen. Circulariteit is momenteel alleen kwalitatief, nog niet kwantitatief als inkoopstrategie voor de RWS-betonketen met de markt gecommuniceerd.

² Een belangrijke opmerking hierbij is dat de beschikbaarheid van (innovatieve) materialen buiten beschouwing is gelaten.

- Breid het huidige inkoopcriterium met de circulaire indicatoren van dit onderzoek uit, te weten: de klimaatimpact, het primair materiaalverbruik en het economisch waardebehoud. Deze nieuwe criteria krijgen een plek naast de MKI-score bij nieuwe uitvragen voor inkoop van beton in de opgave van RWS.

Data-uitvraag inkoop aanscherpen

- Vraag voor het gebruik van de indicator primair materiaalverbruik als inkoopcriterium extra data uit in uitvragen van RWS. Het is zinvol dat hierbij zoveel mogelijk wordt aangesloten bij de data die toegepast wordt voor LCA-studies (MKI-score berekening).
- Zet marktconsultaties op om te onderzoeken hoe de kosten van materialen bij inkoop en sloop het beste vastgesteld kunnen worden om het economisch waardebehoud te bepalen.
- Leg de verantwoordelijkheid voor het verzamelen van data bij de markt en bespreek deze verantwoordelijkheid tijdens marktconsultaties.
- Weeg de circulaire indicatoren voor het primair materiaalverbruik en het economisch waardebehoud wanneer deze toegepast worden voor objecten, volgens de formule die ontwikkeld is door SGS Intron.
- Maak gebruik van materialenpaspoorten om de data en informatie voor alle circulaire indicatoren te verzamelen en bij te houden, en schrijf het gebruik ervan door uitvoerders voor in uitvragen van RWS.
- Werk bij het toepassen van circulaire indicatoren en materialenpaspoort in uitvragen van RWS ook samen met andere opdrachtgevers (Prorail, etc.), om uniformiteit te waarborgen voor de uitvoerders die data moeten aanleveren.
- Monitor het aan te leggen betonareaal van RWS door er jaarlijks een nulmeting van op te stellen/aan te vullen, bijvoorbeeld met het gebruik van de objectcategorieën die zijn toegepast in dit onderzoek.
- Betrek verschillende partijen en RWS medewerkers bij de ontwikkeling van circulaire uitvragen van RWS: inkopers, projectmanagers, uitvoerders/inschrijvers om uitdagingen zoals eenvoud, transparantie, verificatie en controle te behandelen. Zo is de kans van slagen in de praktijk het grootst.
- Vraag functioneel uit waar mogelijk, om uitvoerders de creatieve ruimte te geven om circulaire en duurzame oplossingen te bieden. Hierbij moet ook in acht genomen worden dat beton door andere materialen zoals hout zou kunnen worden vervangen.

Materiaalbeschikbaarheid

- laat bij toepassing van innovaties de aannemer rapporteren over de beschikbaarheid van de grondstoffen van de innovatie, door aantoonbaar te maken waar de grondstoffen vandaan komen en of deze grondstoffen duurzaam beschikbaar zijn als toepassing in het beoogde object;
- stem sloop- en bouwwerkzaamheden op elkaar af waar mogelijk, zodat secundaire materialen direct toegepast kunnen worden;
- blijf ook buiten de betonketen kijken naar toepassingen en bronnen van secundair materiaal;
- kijk bij objecten naar de specifieke sloop(mogelijkheden) in plaats van afvalscenario's uit de SBK-Bepalingsmethode en laat uitvoerders van projecten dit ook doen;
- houd zeggenschap over vrijkomende objecten en materialen na sloop, zodat RWS meer invloed kan uitoefenen op en inzicht kan krijgen in hoogwaardig hergebruik en recycling van materialen.

Verklarende woordenlijst

Term	Toelichting
Basisscenario	Totale materiaalgebruik van RWS voor beton in één jaar. Berekend op basis van de betonreferenties voor OC I, II, III en IV en vermenigvuldigd met het jaarlijkse areaal van RWS (areaal = de totale hoeveelheid beton die toegepast wordt)
Betonreferentie	Referentie van beton van een objectcategorie. Er zijn vier betonreferenties: voor OC I, OC II, OC III en OC IV.
CCU	Carbon Capture and Utilization, koolstofdioxideafvang en toepassing in het Nederlands.
CCS	Carbon Capture and Storage, koolstofdioxideafvang en opslag in het Nederlands.
CO ₂ -eq.	Een optelling van de klimaatimpact van alle broeikasgassen, uitgedrukt in de klimaatimpact van de emissie van CO ₂ . De klimaatimpact van de emissies van 1 kg N ₂ O is bijvoorbeeld 298 kg CO ₂ -eq.
Innovatie	Innovatieve techniek binnen de betonsector. Bijvoorbeeld een alternatieve binder, een alternatief voor grind/zand of CCS.
LCT	Launching Customer Traject: een programma van Rijkswaterstaat waarin innovaties verder kunnen worden ontwikkeld naar TRL 9. RWS stelt hiervoor bijvoorbeeld proefstroken ter beschikking. RWS stelt zich hiermee op als 'launching customer'.
Objectcategorie (OC)	Objectcategorieën van beton is een groepering van verschillende typen objecten die gebouwd kunnen worden op basis van beton. In dit onderzoek 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.
Primair materiaal	Materiaal dat geproduceerd is door de aarde en door mensen wordt gebruikt voor de productie van producten en andere materialen.
RWS	Rijkswaterstaat.
Secundair materiaal	Materiaal afkomstig uit eerder gebruik of uit reststromen dat primaire materialen vervangt. Omvat zowel recycling als hergebruik.
Referentiesamenstelling	Samenstelling van de betonreferentie binnen een objectcategorie.
TRL	Technology Readiness Level: hoe ver een innovatie/technologie is ontwikkeld; van idee op labschaal (TRL 1) naar marktrijp product (TRL 9).

1 Introductie

Circulariteitsbeleid Rijkswaterstaat

De rijksoverheid heeft een volledige circulaire economie in Nederland in 2050 als doel. Dit houdt in dat alle reststromen in 2050 hoogwaardig toegepast kunnen worden en afval niet meer bestaat. Als tussendoel is gesteld dat er in 2030 in Nederland 50% minder primair materiaalverbruik plaatsvindt. Om dit te bereiken moeten er een aantal verschillende dingen gebeuren (Rijksoverheid, 2019a):

1. Bestaande productieprocessen moeten efficiënter gebruik maken van materialen.
2. Er moet zoveel mogelijk gebruik worden gemaakt van duurzaam geproduceerde en hernieuwbare materialen.
3. De aandacht van de bouwsector moet versterkt uitgaan naar nieuwe productiemethodes om nog efficiënter gebruik te maken van primaire materialen en aan de andere kant om secundaire materialen terug te winnen en (zo vaak mogelijk) hoogwaardig (bijvoorbeeld 'beton blijft beton') te kunnen toepassen.

De bouwsector neemt 50% van het totale materiaalverbruik in Nederland voor zijn rekening: 540 miljard kilogram in 2018. Daarom is er vanuit de overheid speciale aandacht voor deze sector. Bijna 38% van het materiaal dat de sector inzette, was hergebruik (secundaire grondstoffen), blijkt uit cijfers van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS). Bijna 25% van alle productie (producten en afval) in de bouwsector bestond uit afval. Hierbij wordt sloopafval, afkomstig van bestaande gebouwen (ongeveer 11 miljard kilogram, 2% van het totale materiaalverbruik van de bouwsector), buiten beschouwing gelaten.

Een circulaire economie is gericht op het langer in de productieketen houden van grondstoffen, met als doel een optimaal gebruik en hergebruik van grondstoffen, dus met de hoogste waarde voor de economie en de minste schade voor het milieu. Kortom, minder grondstoffen gebruiken en beter omgaan met de materialen die we al hebben. Rijkswaterstaat (RWS) heeft zich een strengere ambitie gesteld dan het doel voor Nederland, namelijk 100% circulair werken in 2030 (Rijksoverheid, 2019a; Rijkswaterstaat, 2019a).

De betonketen (onder andere van RWS) neemt een belangrijke rol in met een aandeel van 11% het totale materiaalverbruik van de bouwsector. Binnen de betonketen vallen zowel betonmortel als betonproducten, zoals ook beschreven is door CE Delft (2020a). Specifiek voor beton is in 2018 in het Betonakkoord afgesproken om 100% hoogwaardig hergebruik van beton te realiseren in 2030. Dit houdt aan de ene kant in dat alle betonreststromen vanaf 2030 blijvend moeten kunnen worden toegepast in nieuw beton. Tegelijkertijd moeten alle vrijkomende betonreststromen vanaf 2030 terug (kunnen) worden genomen door de betonketen voor hoogwaardige nieuwe toepassing (hergebruik als eindproduct of recycling) (Rijksoverheid, et al., 2018). In dit onderzoek wordt gekeken naar circulair materiaalgebruik, specifiek voor de betonketen van RWS.

Doel

Het doel van dit onderzoek is om RWS een praktisch handzaam advies te geven hoe gestuurd kan worden op circulair materiaalgebruik binnen de eigen betonketen:

“Hoe kan Rijkswaterstaat sturen op circulair materiaalgebruik binnen de eigen betonketen?”

Om deze vraag te beantwoorden, hebben we een vijftal deelvragen voor dit onderzoek geformuleerd, namelijk:

1. Hoe kan het circulair materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS kwantitatief gemeten worden?
2. Hoe circulair is het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS nu en welke mogelijkheden zijn er om de circulariteit te verhogen met behulp van geselecteerde innovaties (nu, in 2025 en in 2030)?
3. Hoe verhouden verschillende circulariteitsindicatoren zich ten opzichte van elkaar voor de betonketen van RWS?
4. Welke mogelijkheden heeft RWS om te sturen op een toename in circulair materiaalgebruik binnen de eigen betonketen?
5. Welke voorwaarden zijn er om te sturen op circulair materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS?

Scope onderzoek

Voor dit onderzoek wordt de betonketen van RWS beschouwd. We richten ons hierbij enkel op het materiaalgebruik en niet op de individuele betonobjecten die uit betonmortel of -producten zijn samengesteld. Het onderzoek wordt gedaan op basis van het totale jaarlijkse materiaalgebruik voor de productie van beton voor de opgave van RWS.

We beschouwen voor de berekeningen aan verschillende circulaire indicatoren één levenscyclus van een materiaal in de betonketen van RWS, van materiaalproductie tot afvalverwerking. De modules zoals gedefinieerd volgens de SBK-Bepalingsmethode (Module A t/m D) worden toegepast. Recycling en hergebruik van materialen wordt daarmee binnen de context van één levenscyclus bekeken.

De levensduur van het beton wordt voor dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. Deze wordt voornamelijk bepaald door de toepassing van materialen in specifieke betonobjecten en door de voorwaarden die RWS aan deze objecten stelt. Dit valt daarmee buiten de scope van de materiaalgebruik voor beton, dat in dit onderzoek centraal staat.

De leveringszekerheid en materiaalbeschikbaarheid is tot dusver in geen enkel van de voor dit onderzoek onderzochte methodes en indicatoren beschouwd. Deze zijn daarom ook voor dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Dit onderzoek richt zich op de invloed van materiaalinkoop voor projecten van RWS, in lijn met het rapport *Kostencurve* van CE Delft (2020b). Voor de afvalverwerking van materialen wordt in alle gevallen uitgegaan van forfaitaire afvalscenario's voor beton en wapeningsstaal volgens de SBK-Bepalingsmethode:

- Beton: 99% recycling, 1% stort.
- Wapeningsstaal: 95% recycling, 5% stort.

Leeswijzer

Het onderzoek start met een beschouwing van bestaande circulaire rekenkundige indicatoren. Vervolgens presenteren we een selectie van indicatoren om circulariteit kwantitatief te kunnen meten (Hoofdstuk 2, Deelvraag 1). We onderzoeken hoe circulair het materiaalgebruik voor vier objectcategorieën (toepassingsgebieden) binnen de betonketen

van RWS nu (basisscenario) en in 2025 en in 2030 zonder wijzigingen. Ook kijken we welke mogelijkheden er zijn om aan de hand van geselecteerde betoninnovaties de circulariteit te verhogen nu (hier: 2020), in 2025 en in 2030. In de Hoofdstukken 3 en 4 wordt hiermee de circulariteit van het huidige materiaalverbruik binnen de betonketen van RWS in kaart gebracht: het basisscenario. Vervolgens worden vier innovatiescenario's uitgewerkt waarvan de uitkomsten met het basisscenario worden vergeleken.

De vier innovatiescenario's worden opgezet als maatregelenpakketten, op geselecteerde betoninnovaties die voor die jaren beschikbaar zijn. De geselecteerde betoninnovaties zijn afkomstig uit het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b). Van die maatregelenpakketten (combinatie innovatiescenario's en betoninnovaties) is zoals eerder aangegeven, bekend dat die de circulariteit van het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS positief kunnen beïnvloeden. Daardoor wordt onderzocht de wijze waarop de circulariteit voor materiaalgebruik kan worden verhoogd (Hoofdstuk 3 en 4, Deelvraag 2). Deze innovatiescenario's worden vervolgens uitgewerkt voor nu, in 2025 en in 2030, op basis van geselecteerde innovaties (Hoofdstuk 4).

Op basis van de resultaten van diverse berekeningen die zijn uitgevoerd, onderzoeken we vervolgens hoe de uitkomsten van de maatregelenpakketten (elk toegespitst op een specifieke circulariteitsindicator) zich per objectcategorie verhouden ten opzichte van de uitkomsten van elkaar (Hoofdstuk 5, Deelvraag 3).

Vervolgens worden de mogelijkheden die RWS heeft op basis van een maatregelenpakket per objectcategorie onderzocht, om gericht te sturen op een verhoging van circulair materiaalgebruik. Doel hierbij is toewerken naar een circulaire betonketen in 2030 (Hoofdstuk 6, Deelvragen 4 en 5). Dit kan met een advies voor het bewust stimuleren van een betoninnovatie. We sluiten af met een samenvatting waarin de voorgenoemde deelvragen expliciet worden beantwoord en gekoppeld aan de aanbevelingen uit Hoofdstuk 6 (Hoofdstuk 7).

2 Meten van circulariteit

Er zijn veel verschillende definities van circulariteit die in de literatuur gehanteerd worden en nog meer indicatoren om circulariteit te meten. In dit hoofdstuk bespreken we eerst hoe om wordt gegaan met circulariteit bij RWS in Paragraaf 2.1, waarna we de definitie van circulariteit voor dit onderzoek vaststellen in Paragraaf 2.2. Vervolgens bespreken we in Paragraaf 2.3 een aantal relevante onderzoeken die ingaan op circulaire indicatoren, op basis waarvan we in Paragraaf 2.4 vaststellen hoe de circulariteit van materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS kwantitatief voor dit onderzoek gemeten kan worden.

2.1 Circulariteit bij Rijkswaterstaat

RWS heeft als ambitie om 100% circulair te kunnen werken in 2030, waarbij binnen de visie van de Circulaire Materialenstrategie van RWS drie doelen centraal staan (Rijkswaterstaat, 2020a):

1. het beschermen van milieukwaliteit;
2. het beschermen van materiaalvoorraden;
3. het beschermen van waarde van materialen.

De visie van RWS is dat er gesproken kan worden van circulair materiaalgebruik als op alle drie voorgenoemde doelen sprake is van continue verbeteringen. Daarvoor is het op de eerste plaats van belang dat circulariteit meetbaar gemaakt wordt (Rijkswaterstaat, 2020a).

Huidige ontwikkeling stimuleren circulariteit bij RWS

Van de drie voorgenoemde doelen werkt RWS momenteel met een inkoopstrategie aan met name de eerste, de verduurzaming van materiaalverbruik, waarbij het duurzaamheids-criterium tot 2030 stapsgewijs wordt aangescherpt (de ‘peloton’-aanpak). Naarmate de milieubelasting (berekend met een milieugerichte levenscyclusanalyse en uitgedrukt in MKI-waarde) lager is, wordt de inschrijving hoger gewaardeerd. De ontwikkeling van de twee overige genoemde circulaire doelen, nl. een strategie op het beschermen van materiaalvoorraden en de waarde van materialen is nog in ontwikkeling. Naast het behalen van een minimumniveau en het stellen van concrete reductiedoelstellingen en daarmee het bereiken van een significante verbetering streeft RWS uiteindelijk ook naar het toevoegen van waarde. Niet alleen is de belasting op milieu, mens of waarde nihil, er wordt dus zelfs een positieve bijdrage geleverd.

Parallel aan deze peloton aanpak werkt RWS ook aan een koploeraanpak, waarbij ‘koplopers’ uit de markt de kans krijgen om de meest duurzame betoninnovaties (TRL>7) aan te bieden, zonder dat ze zichzelf hierbij uit de markt te hoeven prijzen. Bij projecten die onder deze koploeraanpak vallen, weegt duurzaamheid door te sturen op beschermen van milieukwaliteit per direct bij een aanbesteding al zwaar mee in de gunningscriteria. Deze koploper projecten worden niet toegepast op alle door RWS aan te besteden projecten, maar op een beperkte selectie. Voor een geselecteerde aanbesteding is de samenstelling van een koplopergroep anders, aangezien per aanbesteding samen met koplopers gekeken wordt naar wat voor dat specifieke project haalbaar is (Rijkswaterstaat, 2020e). Deze inkoopstrategie is reeds voor asfalt uitgewerkt, en wordt het momenteel door RWS ook voor beton.

Met de hiervoor beschreven inkoopstrategie verwacht RWS al een tastbaar circulair resultaat uiterlijk in 2030 voor haar opgave te bereiken. Daarnaast stelt RWS zich ook op als launching customer in pilots. Hierin ondersteunt RWS producenten van innovaties met pilots door marktvraag naar producten of productietechnieken die nog niet uitontwikkeld zijn (TRL>6) te genereren en testcapaciteit en opschalingsmogelijkheden in projecten van RWS aan te bieden. Voor beton gelden lange ontwikkeltrajecten, met name als het gaat om validatie van de kwaliteit (spreek: levensduur) van een nieuwe receptuur. RWS kan deze trajecten voor een deel versnellen en stimuleren door middel van het ‘innoveren-uniformeren-produceren’-principe. Dit uit zich voor innovaties in het Innovatieloket waar sinds 2018 marktpartijen aan de hand van de innovatiebehoefte van RWS voorstellen voor innovaties kan indienen, maar ook ongevraagd kan aandragen.

Ontwikkeling van circulaire indicatoren bij RWS

Naast het stimuleren van circulariteit bij RWS, het formuleren van een visie met doelen is het ook van belang om, in samenwerking met marktpartijen, na te denken over een beoordelingsmethodiek met bijbehorende indicatoren voor circulariteit, en de over manier waarop ze in de opgave binnen RWS als gunningscriterium bij aanbestedingen kunnen worden toegepast. Daarbij kan dus worden gedacht aan inkoop, maar ook aan de monitoring van relevante areaalgegevens en kennisverspreiding, resp. bewustwording in de organisatie. In deze studie is een beoordelingsmethodiek voor circulariteit ontwikkeld en uitgewerkt en specifiek op innovaties voor duurzaam beton toegepast.

Op dit moment werkt RWS al met kwalitatieve indicatoren die te maken hebben met circulariteit. Zo wordt er gewerkt met SLA's (Service Level Agreements), waarbinnen onder andere afspraken worden gemaakt om het beschermen van de milieukwaliteit van materialen (sustainability) verder te ontwikkelen. Zo kunnen er eisen worden gesteld met betrekking tot de (verlengde) levensduur, onderhoud en reparatie van materialen en objecten, waardoor deze langer mee gaan (Coenen, 2019).

Daarnaast is er binnen de voorschriften van de ROK (Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken) in algemene zin opgenomen dat bij het ontwerpen van objecten rekening moet worden gehouden met onderhoud, zodat de technische levensduur (durability) van objecten gemaximaliseerd kan worden (Coenen, 2019).

Ten slotte speelt de Milieukostenindicator (MKI-score) als kwantitatief duurzaamheids-criterium een centrale rol bij uitvragen van RWS (Coenen, 2019; Rijkswaterstaat, 2020c), waarin in feite ook het criterium circulariteit impliciet meegenomen wordt. Zo wordt volgens de SBK-Bepalingsmethode (de methodiek achter de MKI-score) hergebruik en recycling van materialen beloond, terwijl stort en verbranding van secundaire materialen wordt afgewaardeerd³. Relevante circulaire indicatoren als losmaakbaarheid of beschikbaarheid van materialen zijn nog niet met een MKI-score uitgedrukt.

Om een serieuze stap te zetten en indicatoren als losmaakbaarheid of beschikbaarheid van materialen voor circulariteit meetbaar te maken, heeft T. Coenen (UT, 2019) een praktische opzet gedaan specifiek voor bruggen en viaducten (individuele objecten) van de opgave van RWS. Voor zijn onderzoek heeft Coenen drie circulaire indicatoren geformuleerd en uitgewerkt:

1. de aanpasbaarheid van objecten en componenten;
2. de beschikbaarheid van gebruikte materialen;

³ <https://milieudatabase.nl/wp-content/uploads/2019/06/112539-19-009.235-rapd-Circulaire-Indicatoren.pdf>

3. de herbruikbaarheid van componenten.

Om voor dit onderzoek nu goed aan te sluiten bij de hierboven beschreven visie van de Circulaire Materialenstrategie van RWS, maken we van de drie doelen een doorvertaling naar het materiaalgebruik van de betonketen van RWS (zie Paragraaf 2.4).

2.2 Definitie van circulariteit

In een circulaire economie staat het efficiënter gebruiken van grondstoffen centraal (PBL 2018). Een circulaire economie is geen doel op zich, maar een middel om achterliggende doelen te realiseren, te weten het verminderen van de milieudruk en de leveringszekerheidsrisico's van grondstoffengebruik. Hierdoor kan een circulaire economie ook bijdragen leveren aan andere maatschappelijke opgaven, zoals die rondom klimaat en landbouw (2019a).

Een circulaire economie heeft betrekking op grondstoffengebruik. Het kan gezien worden als (2019a):

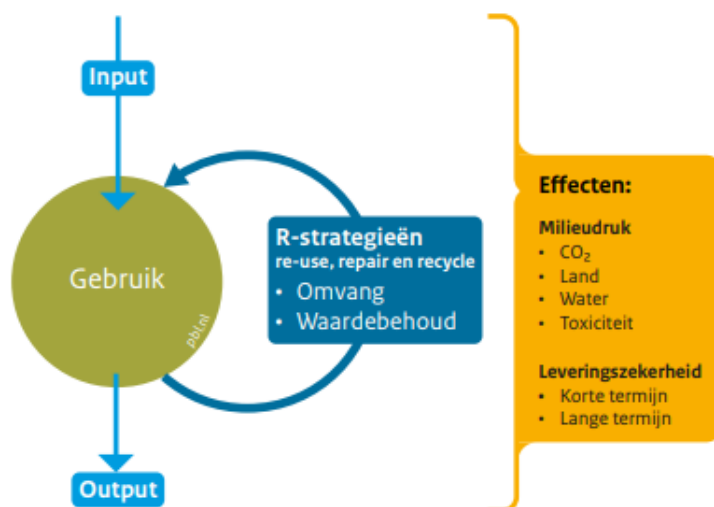
- het minimaliseren van hoeveelheid materiaalgebruik (input);
- het minimaliseren van hoeveelheid materiaalverlies (output);
- het maximaliseren van economische waarde van materialen;
- het minimaliseren van milieu-impact materialen;
- het vergroten van leveringszekerheid materialen.

Deze keuzes zijn weergegeven in Figuur 1 en sluiten aan op de drie circulaire doelen die RWS aanhoudt in de visie van haar Circulaire Materialenstrategie. Het zijn de keuzes die van belang zijn voor de concretisering en meetbaarheid van een circulaire economie.

De mate van circulariteit wordt vaak gerelateerd aan de zogenaamde R-ladder. Hoe hoger een strategie op deze lijst (ladder) van circulariteitsstrategieën staat, hoe circulaider de strategie is.

Figuur 1 - Aangrijpingspunten voor doelen circulaire economie

Aangrijpingspunten voor doelen circulaire economie



Bron: PBL (2019a).

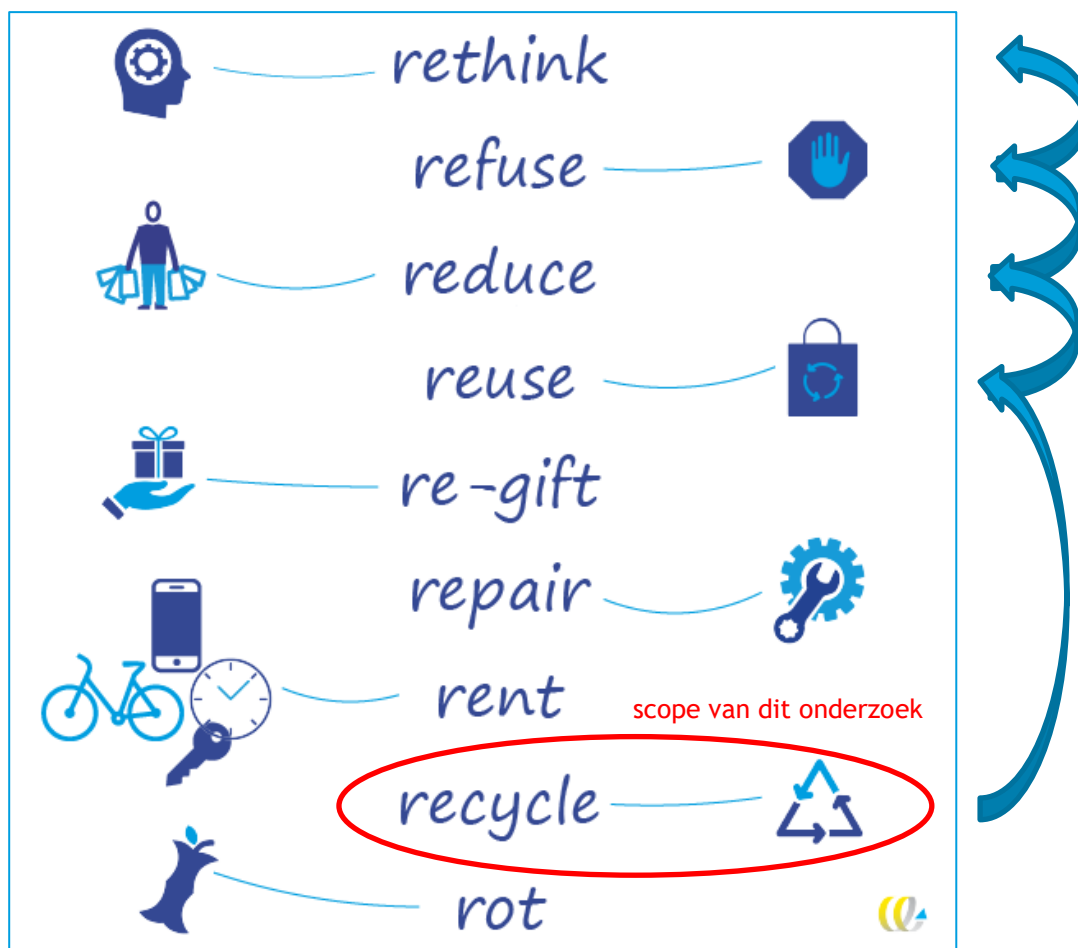
2.2.1 Circulariteit binnen dit onderzoek

Bij het materiaalverbruik van de betonketen zien we deze keten als een open systeem, in lijn met de SBK-Bepalingsmethode. Dat betekent dat secundaire materialen van andere sectoren dan de betonketen kunnen gebruikt worden in de betonketen (zoals hoogovenslakken uit de staalindustrie) en materiaal wat na gebruik in de betonketen gerecycled wordt, kan ook in een andere sector toegepast worden (zoals secundair wapeningsstaal in de auto-industrie).

Plek van dit onderzoek binnen de R-ladder

Zoals eerder genoemd wordt de mate van circulariteit wordt vaak gerelateerd aan de zogenaamde R-ladder. Met betrekking tot de 'R-ladder' van circulariteit in Figuur 2 (ook genoemd in Figuur 1) valt dit onderzoek onder 'recycle', het betreft de beschikbaarheid van *grondstoffen* en herbruikbaarheid van *materialen*.

Figuur 2 - R-ladder van circulariteit, 'recycle' scope van dit onderzoek.



De stappen die voorafgaan aan hergebruik: 'recycle' van materiaal voor de betonketen van RWS zijn: 'reuse', 'reduce', 'refuse en, 'rethink' (zie Figuur 2). Deze stappen hebben echter te maken met de ontwerp- en sloopfase van individuele objecten en niet met het

materiaalgebruik voor een betonketen. Zoals beschreven in Hoofdstuk 1 vallen de beschouwing van individuele objecten niet binnen de scope van dit onderzoek.

2.3 Onderzoek naar bestaande circulaire indicatoren

Om tot kwantitatieve indicatoren voor de circulariteit van materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS te komen, worden in de volgende paragrafen enkele recent uitgevoerde onderzoeken naar circulaire indicatoren besproken. Op basis hiervan zullen wij de circulaire indicatoren voor dit onderzoek definiëren in Paragraaf 2.4.

In Tabel 1 geven we een samenvattend overzicht van de onderzoeken en de aspecten van circulariteit waarop de indicatoren binnen deze onderzoeken zich richten. De aspecten in de tabel hebben we gebaseerd op de aangrijpingspunten voor de circulaire economie door PBL die in Paragraaf 2.2 benoemd zijn. Aanvullend op deze aangrijpingspunten wordt ook gekeken of de onderzoeken rekening houden met de levensduur van materialen en (deel)producten. Verder wordt het toepassingsgebied voor de verschillende indicatoren in deze tabel gegeven, om de relevantie voor het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS weer te geven.

Tabel 1 - Vergelijking verschillende onderzoeken over het meten van circulariteit

	CE Delft (2019)	CE Delft, RebelGroup (2016)	Ellen MacArthur Foundation , Granta Design (2015b)	European Commission (2018)	Platform CB'23 (2020)	SGS Intron (2019)	Sant Verde BV (2020)
Aantal indicatoren	2	1 ⁽¹⁾	7 ⁽²⁾	17 ⁽³⁾	4 ⁽⁴⁾	8 ^(5, 6)	4
Aspecten circulariteit opgenomen in indicator							
Minimaliseren materiaalverbruik	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Economisch waardebehoud materialen	Ja ⁽⁷⁾	Ja	Nee	Ja	Ja ⁽⁸⁾	Ja	Ja
Milieudruk	Ja ⁽⁷⁾	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee ⁽⁹⁾
Leveringszekerheid	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee
Levensduur	Nee	Nee	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja
Toepassingsgebied indicator							
Product/Project (hier: betonobject)	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Materiaalketen (hier: beton)	Ja	Ja	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja

- (1) CE Delft en RebelGroup hebben drie varianten van dezelfde indicator uitgewerkt.
- (2) De MCI weegt de zeven indicatoren tot één score.
- (3) De PEF weegt de zeventien indicatoren tot één score.
- (4) Het gaat hierbij alleen om de hoofd-impactindicatoren die helemaal uitgewerkt zijn.
- (5) Er is hierbij sprake van acht expliciete indicatoren. Milieukwaliteit wordt impliciet ook meegenomen.
- (6) De indicatoren van SGS Intron worden ook gewogen tot één score.
- (7) Het meenemen van waarde en milieudruk is optioneel bij de methode van CE Delft.
- (8) Economisch waardebehoud materialen is door Platform CB'23 nog in ontwikkeling.
- (9) Sant Verde stelt dat MKI-score en CO₂ eventueel ook meegenomen kunnen worden.

De meest onderzochte indicatoren zijn niet specifiek ontwikkeld voor het meten van de circulariteit van een materiaalketen zoals de betonketen, maar zijn ze hier wel op toepasbaar.

2.3.1 Verkenning circulaire prestatie-indicatoren voor materiaalverbruik RWS - CE Delft, 2019

CE Delft (2019) heeft een onderzoek uitgevoerd voor RWS naar de diverse mogelijkheden en praktische uitdagingen van het meten van de circulariteit van materiaalverbruik. Aanleiding van dit onderzoek was de wens van RWS om prestatie-indicatoren toe te passen voor:

1. Monitoring van de circulaire doelstellingen van RWS per jaar (via SLA-PIN).
2. Beoordeling van de circulariteit van afzonderlijke bouwprojecten.

Binnen dit onderzoek worden een aantal aanbevelingen gedaan over circulaire prestatie-indicatoren. Ook worden de benodigde stappen gegeven om deze indicatoren te gebruiken voor zowel monitoring als beoordeling. Hierbij spelen materialenpaspoorten een belangrijke rol om data te verzamelen en te bewaren.

Het onderzoek beveelt aan om twee basisindicatoren te hanteren. Het gaat hierbij om een indicator voor materiaaltoepassing en een indicator voor vrijkomend materiaal. Dit betekent dat er niet één circulariteitsscore bepaald kan worden.

De twee basisindicatoren zijn:

1. Circulariteit als materiaaltoepassing: secundair materiaal/totaal toegepast materiaal.
2. Circulariteit als vrijkomend materiaal: niet-finaal materiaal/totaal vrijgekomen materiaal.

Deze indicatoren kunnen nog uitgebreid worden met de hernieuwbaarheid van materiaal (materiaaltoepassing) evenals de type verwerking van materiaal (vrijkomend materiaal).

De circulariteit van materialen kan met elkaar vergeleken worden door de circulariteit te vermenigvuldigen met de waarde van de materialen in euro's en/of met de milieu-impact van de materialen. Hierdoor wordt het belang van duurdere en/of materialen met een hogere milieu-impact zwaarder meegewogen, zodat circulariteit niet alleen over materiaalstromen maar ook over het type materiaal gaat.

2.3.2 Economische hoogwaardigheid recycling - RebelGroup en CE Delft, 2016

Om de hoogwaardigheid van recycling en hergebruik te waarderen, hebben CE Delft en RebelGroup (2016) drie verschillende indicatoren ontwikkeld die ingaan op de economische hoogwaardigheid van materialen of producten. Hoogwaardige toepassing van secundaire materialen is binnen de circulaire economie een belangrijk concept, omdat het behouden van waardevolle materialen voorkomt dat nieuwe materialen moeten worden gewonnen en geproduceerd. Bij veel methodieken wordt het hergebruik en de recycling van grondstoffen wel gemeten, maar wordt de waarde van deze grondstoffen nog niet meegenomen.

CE Delft en RebelGroup hebben drie verschillende varianten ontwikkeld voor een indicator voor economisch waardebehoud:

1. Een indicator die de verhouding weergeeft tussen de marktwaaarde van het recyclaat en het primaire materiaal: $marktwaarde\ ratio = \frac{marktwaarde\ recyclaat}{marktwaarde\ virgin}$.
2. Een indicator die de verhouding weergeeft tussen de marktwaaarde van het recyclaat en de kosten om deze te produceren: $rentabiliteitsratio = \frac{marktwaarde\ recyclaat}{(factor)kosten\ recyclaat}$.

3. Een indicator die de verhouding weergeeft tussen de maatschappelijke kosten van het primaire materiaal en het recycalaat: *maatschappelijke waarde ratio* =
$$\frac{\text{maatschappelijke kosten virgin}}{\text{maatschappelijke kosten recycalaat}}$$
4. De gedachte achter de eerste indicator is dat het recycalaat hoogwaardiger wordt naarmate de marktprijs dichter in de buurt van het primaire materiaal komt. Hoe meer de kwaliteit van het recycalaat in de buurt komt van het primaire materiaal, hoe hoger de betalingsbereidheid ervoor en daarmee de marktprijs.
5. De tweede indicator zegt iets over de rentabiliteit van het recyclingproces. Een kwalitatief hoogwaardig recycalaat met een hoge marktprijs kan immers economisch toch niet rendabel zijn, vanwege de (energie)kosten om het recycalaat te produceren.
6. Dit derde indicator drukt alle welvaartseffecten (inclusief milieueffecten) van het recycalaat en het primaire materiaal in euro's uit en vergelijkt deze met elkaar. Deze indicator is daarmee strikt genomen geen economische indicator.

2.3.3 Circularity indicators: an approach to measuring circularity - Ellen MacArthur Foundation en Granta Design, 2015

Een circulariteitsdenktank onder leiding van de Ellen MacArthur Foundation en Granta Design (2015b) heeft geleid tot de ontwikkeling van de Material Circularity Indicator (MCI). Deze methodiek geeft de circulariteit van materialen en producten weer. Een MCI score van 0,0 betekent dat een product volledig lineair is, een MCI-score van 1,0 betekent dat een product volledig circulair is.

De MCI bestaat uit zeven indicatoren:

1. Hoeveelheid hergebruikt materiaal in product.
2. Hoeveelheid gerecycled materiaal in product.
3. Hoeveelheid materialen die herbruikbaar is na gebruik van het product.
4. Hoeveelheid materialen die recyclebaar is na gebruik van het product.
5. Efficiëntie van recycling.
6. Levensduur, ten opzichte van marktgemiddelde.
7. Hoeveelheid van materiaal nodig, ten opzichte van marktgemiddelde.

Er wordt gekeken naar de hoeveelheid primair- en secundair materiaal dat het systeem ingaat en verlaat. Hergebruik en recycling worden hierbij als even circulair gewaardeerd, al vindt bij recycling over het algemeen wel meer verlies plaats. Deze verliezen worden meegenomen in de MCI. Ook wordt rekening gehouden met de levensduur en de hoeveelheid materiaal die nodig is, ten opzichte van het marktgemiddelde. Circulaire producten met een kortere levensduur of waarvoor meer materiaal nodig is dan het marktgemiddelde worden daardoor lager gewaardeerd.

De MCI kijkt alleen naar de circulariteit van de materialen en neemt de milieu-impact, schaarste of economische waarde van deze materialen niet mee. Voor activiteiten waarbij materiaal verbruikt/geconsumeerd wordt of een groot aantal materialen aanwezig is, is de MCI daarnaast minder geschikt. Voor de MCI moeten namelijk voor alle materialen worden gedefinieerd of deze uiteindelijk worden gerecycled/hergebruikt of als afval worden weggegooid/verbrand.

2.3.4 PEF-richtlijn - Europese Commissie, 2018

In de Product Environmental Footprint (PEF) richtlijn is door de Europese Commissie (2018) een circulariteitsmethodiek opgenomen: de Circular Footprint Formula (CFF). Deze methodiek drukt de circulariteit van het materiaalverbruik binnen een systeem uit in milieu-impacts en omvat zeventien indicatoren. De formule is opgesteld voor één materiaal.

Om de circulariteit van het hele systeem te berekenen, moeten de individuele CFF's van alle materialen bij elkaar opgeteld worden.

Binnen de methodiek wordt zowel de hoeveelheid als de milieu-impact en de kwaliteit van alle in- en uitgaande materiaalstromen van het gehele productsysteem meegenomen. Hieronder valt ook de hoeveelheid en de milieu-impact van verbrand en gestort materiaal aan het einde van de levensduur en de vermeden impact door energierugwinning in een afval-energie-centrale (AEC).

De methodiek kijkt verder dan één levenscyclus en neemt ook allocatie naar voorgaande of toekomstige levenscycli van de materialen mee. Er wordt echter geen rekening gehouden met de levensduur van materialen.

Het kan uitdagend zijn om alle zeventien indicatoren in de CFF vast te stellen, omdat er in sommige gevallen sprake kan zijn van een kwalitatieve beoordeling. Zo kan de allocatie van de impacts naar verschillende levenscycli op verschillende manieren ingevuld worden, afhankelijk van hoe het belang van vraag en aanbod voor recycling van het materiaal wordt geïnterpreteerd. Voor een systeem met veel verschillende materialen is het gebruik van de CFF daarom tijdsintensief, omdat een groot aantal indicatoren per materiaal bepaald moet worden.

2.3.5 Kernmethode voor het meten van circulariteit in de bouw - Platform CB'23, 2020

Platform CB'23 (2020) heeft een kernmethode voor het meten van circulariteit in de bouw ontwikkeld. Binnen deze methode worden meerdere indicatoren beschreven waarmee de circulariteit van een product of een bouwproject kan worden bepaald.

Binnen de indicatoren wordt zowel de hoeveelheid als de impact van alle in- en uitgaande materiaalstromen van het systeem meegenomen. Uitsparing van primaire materialen en energie door recycling, hergebruik of energierugwinning worden niet expliciet meegenomen. De levensduur van het product of project en diens deelobjecten wordt wel expliciet meegenomen.

Binnen de methode worden zeven indicatoren meegenomen, die in meerdere aspecten zijn opgedeeld:

1. Hoeveelheid gebruikt materiaal (**input**):
 - a primair materiaal;
 - b secundair materiaal;
 - c materiaal met gevoeligheid voor uitputting.
2. Hoeveelheid beschikbaar materiaal voor volgende cyclus (**output**):
 - a materiaal voor hergebruik;
 - b materiaal voor recycling.
3. Hoeveelheid verloren materiaal (**output**):
 - materiaal naar energiewinning;
 - materiaal naar stort.
4. Invloed op milieukwaliteit: elf milieu-impacts, gewogen tot de Milieukosten Indicator (MKI-score).
5. Hoeveelheid gebruikte bestaande waarde (input).
6. Hoeveelheid beschikbare waarde voor volgende cyclus (output).
7. Hoeveelheid verloren bestaande waarde (output).

De laatste drie genoemde indicatoren, met een focus op economisch waardebehoud, gaan zowel om technisch-functionele waarde, als om economische waarde. Deze indicatoren zijn echter nog in ontwikkeling en daarom nog niet in detail uitgewerkt. Ook moet er nog een wegingsmethode worden ontwikkeld om de verschillende indicatoren tegen elkaar af te kunnen zetten.

2.3.6 Meetmethode circulariteit in klimaatenvelpe beton (SGS Intron, 2019)

Als aanvulling op de circulaire indicatoren van Platform CB'23 heeft SGS Intron (2019) in opdracht van RWS en ProRail de indicatoren voor materiaalvoorraden en de bestaande waarde van materialen verder ontwikkeld. Alle indicatoren die door Platform CB'23 gedefinieerd waren zijn hierbij meegenomen. Hiervoor heeft SGS Intron zich gebaseerd op de CFF van de PEF (zie Paragraaf 2.3.4) en op de MCI van de Ellen MacArthur Foundation en Granta Design (zie Paragraaf 2.3.3). Het doel van deze aanvulling was RWS en ProRail handvatten te geven om de circulariteit van verschillende betoninnovaties te kunnen beoordelen.

Bij de toepassing van de methode van SGS wordt uitgegaan van enkele referentieproducten of -materialen, waarmee innovaties vergeleken worden. Hierdoor hoeven alleen afwijkende onderdelen meegenomen te worden in de berekeningen. Er wordt ook onderscheid gemaakt tussen recycling en hergebruik, op basis van de economische waarde van de materialen ten opzichte van de referentie.

De methodiek bestaat uit negen indicatoren:

1. Hoeveelheid gebruikt primair materiaal.
2. Hoeveelheid gebruikt secundair materiaal.
3. Hoeveelheid materiaal voor hergebruik.
4. Hoeveelheid materiaal voor recycling.
5. Kwaliteitsfactor, ten opzichte van een referentie.
6. Levensduur van de materialen, ten opzichte van referentie.
7. Intensiteit van de materialen, ten opzichte van referentie.
8. Massa van de materialen, ten opzichte van referentie.
9. Invloed op milieukwaliteit.

De milieu-impact van materialen is impliciet wel meegenomen, maar is niet verder uitgewerkt. De focus van de methode ligt op de eerste vijf indicatoren. Hernieuwbaar materiaal is buiten beschouwing gelaten.

Naast deze indicatoren weegt SGS Intron de eerste vijf indicatoren ook tot één circulariteitsindex (CI), op basis van de MCI:

$$CI = \frac{(Sx + \frac{Qrl}{QrR} Rg + \frac{Qhl}{QhR} Hg)l}{(Sx + Rg + Hg)R} * \frac{LI}{LR}$$

Waarbij:

<i>Sx:</i>	<i>aandeel secundaire grondstoffen</i>	<i>Qrl/QrR:</i>	<i>kwaliteitsfactor recycling product</i>	<i>LI/LR:</i>	<i>levensduurfactor innovatief product</i>
<i>Rg:</i>	<i>aandeel realistische recycling</i>	<i>Qhl/QhR:</i>	<i>kwaliteitsfactor hergebruiksproduct</i>	<i>R:</i>	<i>referentie product</i>
<i>Hg:</i>	<i>aandeel hergebruik</i>				

2.3.7 Meten van circulariteit - Sant Verde, 2020

Parallel aan ons onderzoek heeft Sant Verde BV (2020) onderzocht hoe circulariteit gemeten kan worden bij RWS. Hun rapport is in oktober 2020 gepubliceerd. Hierbij heeft Sant Verde zich onder andere gebaseerd op de eerder genoemde onderzoeken van CE Delft (2019) en Platform CB'23 (2020).

Sant Verde definieert vier deelindicatoren voor circulariteit:

1. Input secundair materiaal.
2. Input hernieuwbaar materiaal (materiaal wat zichzelf aanvult, zowel primair als secundair).
3. Input herwinbaar materiaal (materiaal wat potentieel recyclebaar/herbruikbaar is na gebruik, zowel primair als secundair).
4. Output hoogwaardig recyclebaar materiaal.

De intentie van de circulaire indicatoren is om de materiaalkringlopen te sluiten. De indicatoren 'hernieuwbaar materiaal' en 'herwinbaar materiaal' overlappen met 'secundair materiaal', aangezien hernieuwbare en herwinbare materialen zowel van secundaire als primaire afkomst kunnen zijn. Voor 'hoogwaardig recyclebaar materiaal' wordt uitgegaan van materiaal dat maximaal drie levenscycli meegaat, maar een duidelijke definitie wordt nog onderzocht.

Om de indicatoren te berekenen wordt per materiaal bijgehouden hoeveel materiaal gebruikt wordt (totale massa), wat de herkomst van het materiaal is (percentage van het totaal) en hoe de afvalverwerking van het materiaal na gebruik opgebouwd is (percentage van het totaal). Deze informatie is volgens Sant Verde afkomstig van Dubocalc en LCA-rapporten over individuele componenten van kunstwerken. Hierdoor is het ook mogelijk om de MKI-score en CO₂-eq.-uitstoot te rapporteren, indien gewenst. De data wordt per product-onderdeel ingevoerd en bijgehouden in zogenaamde itemtabbladen (ITB), die door Sant Verde zijn ontwikkeld.

2.4 Indicatoren voor circulariteit binnen dit onderzoek

Om de circulariteit van materiaalverbruik binnen de betonketen van RWS kwantitatief te meten, stellen we voor dit onderzoek indicatoren voor circulariteit vast. Hierbij staat voorop dat de circulaire indicatoren zoveel mogelijk aansluiten bij bestaande methodieken en criteria voor uitvragen van RWS. Daarnaast moeten de indicatoren uiteraard aansluiten bij de circulariteitsdoelen van RWS (zie Paragraaf 2.1).

2.4.1 Gekozen indicatoren voor circulariteit

Om voor dit onderzoek nu goed aan te sluiten bij de hierboven beschreven visie van de Circulaire Materialenstrategie van RWS, is van de drie doelen, met inachtneming van de drie indicatoren van Coenen (2019) toegespitst op objecten van de RWS-opgave, een doorvertaling naar het materiaalverbruik van de betonketen van RWS gemaakt.

1. Het aandeel primaire/secundaire materialen.
2. De hernieuwbaarheid van materialen.
3. De kwaliteit van recycling van materialen.

De voorgenoemde drie doelen zijn voor dit onderzoek gebruikt om de circulariteit van materiaalverbruik voor een groot aantal betoninnovaties te kunnen meten. Als referentie

geldt daarbij het huidige materiaalverbruik voor beton van de RWS-opgave, daarbij is een doorberekening gemaakt voor een situatie in 2025 en in 2030.

De eerste vier aangrijpingspunten van PBL (zie Paragraaf 2.2) komen in het merendeel van de onderzochte methodes en indicatoren voor en sluiten aan op de drie circulariteitsdoelen in de Circulaire Materialenstrategie van RWS. Deze aangrijpingspunten zijn daarom binnen dit onderzoek vertaald naar vier indicatoren om de circulariteit van materiaalverbruik binnen de betonketen van RWS kwantitatief te meten:

1. Klimaatimpact materiaalverbruik betonketen (kton CO₂-eq. per jaar).
2. Milieukostenindicator (MKI-score) materiaalverbruik betonketen (miljoen € MKI per jaar).
3. Primair materiaalverbruik (kton per jaar):
 - a het aandeel primaire/secundaire materialen (= massa primair materiaalverbruik betonketen (input) (kton per jaar);
 - b massa afvalproductie betonketen (output) (kton per jaar).
4. Economisch waardebehoud materialen in de factoren (de kwaliteit van recycling van materialen):
 - a economische waarde materiaal (input) (miljoen € per jaar);
 - b economische waarde materiaal (output) (miljoen € per jaar).

De levensduur is binnen deze studie niet meegenomen als aparte indicator, aangezien de levensduur van materialen grotendeels afhankelijk is van de objecten waarin grondstoffen en materialen toegepast worden.

Hierna zijn de vier geïntroduceerde circulaire indicatoren verder toegelicht. Ook is beschreven bij welke van de hiervoor genoemde methoden de indicatoren aansluiten.

Indicator 1 & 2: Klimaatimpact en Milieukostenindicator

De eerste twee circulaire indicatoren gaan in op de milieu-impact van het materiaalverbruik binnen de betonketen van RWS. Circulariteit moet namelijk tot een duurzamere betonketen leiden, waarbij de klimaatimpact en de MKI-score niet hoger zouden moeten worden. Hierbij wordt de gehele levenscyclus van een betoninnovatie binnen de betonketen beschouwd, maar worden de milieu-impacts van de Modules A3 t/m D alleen expliciet meegenomen in de circulaire indicator als deze sterk afwijken van de referentie. Voor alle materialen wordt namelijk uitgegaan van de forfaitaire afvalscenario's volgens de SBK-Bepalingsmethode (Modules C1 t/m D) en zijn de overige modules behalve materiaalproductie (Module A1) en het transport (Module A2) veelal identiek. In gevallen waar andere modules wel grote invloed op de milieu-impact van specifieke innovaties hebben, wordt het verschil binnen deze modules ten opzichte van de referentiebeton meegenomen. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer een innovatie leidt tot slechtere recyclingmogelijkheden (Module D), of als een innovatie CO₂ opslaat tijdens de betonproductie (Module A3).

Hoe lager de MKI-score (milieu-impact) en de klimaatimpact van een innovatie zijn, hoe meer deze bijdragen aan de circulariteit van de innovatie en daarmee aan de betonketen. Het toepassen van innovaties met een lagere MKI-score heeft dus een positieve invloed op deze factoren.

Deze indicator sluit aan op de methodieken van CE Delft (2019), de Europese Commissie (2018), Platform CB'23 (2020) en SGS Introna (2019) die beschreven zijn in Paragraaf 2.3.

Indicator 3: Primair materiaalverbruik

De derde circulaire indicator gaat in op primair materiaalverbruik van de betonketen van RWS en bestaat uit twee onderdelen. Onder primair materiaalverbruik verstaan we namelijk het verbruik van primaire materialen over de gehele levenscyclus van beton. Dit houdt niet alleen in ingaand primair materiaal, maar ook uitgaand materiaal dat wel of niet gerecycled wordt. Ingaand hernieuwbaar materiaal wordt hierbij aangeduid als 'niet-primair', aangezien de winning van deze materialen in principe niet uitgeput wordt.

Al het materiaal dat niet gerecycled wordt, gaat verloren en wordt zodoende 'verbruikt'. Hierbij wordt zowel verloren primair als secundair materiaal als 'verbruik' aangemerkt. Dit sluit aan bij de wens van RWS om in te gaan op hernieuwbaarheid van materialen en op het aandeel primair/secundair materiaal. De indicator primair materiaalverbruik is daarmee een som van de ingaande primaire materialen (input) plus de uitgaande niet-hernieuwbare materialen die niet gerecycled of hergebruikt worden (afval, output):

$$\text{Primair materiaalverbruik} = \text{gebruik primair materiaal (input)} + \text{uitgaand afval (output)}$$

Hoe lager de indicator uitkomt, hoe meer deze bijdraagt aan de circulariteit van het materiaal. Meer gebruik van secundaire of hernieuwbare materialen (input) en meer recycling van materialen na gebruik (output) heeft dus beide een positieve invloed op de indicator voor primair materiaalverbruik.

Deze indicator sluit aan op alle methodieken die beschreven zijn in Paragraaf 2.3, behalve van CE Delft en RebelGroup (2016), en combineert in- en uitgaand materiaal in één indicator.

Indicator 4: Economisch waardebehoud

De vierde circulaire indicator is een kwaliteitsindicator die ingaat op het economisch waardebehoud van materialen in de betonketen. Hierbij wordt niet alleen naar de hoeveelheid materiaal gekeken, maar ook naar diens economische waarde. Deze indicator bestaat uit twee onderdelen, waarbij naar de gehele levenscyclus gekeken en daarmee naar zowel de in- als outputwaarde. Dit sluit aan bij de wens van RWS om de kwaliteit van recycling/hergebruik mee te nemen.

De indicator wordt berekend door de economische waarde van materialen na gebruik (output) te delen door de economische waarde van materialen voor gebruik (input), waarbij uit wordt gegaan van de huidige waarde (kosten) van materialen en afval, en een vaste inflatiefactor voor toekomstige waarde:

$$\text{Economisch waardebehoud} = \frac{\text{Economische waarde materialen na gebruik (output)}}{\text{Economische waarde materialen voor gebruik (input)}}$$

Hoe hoger deze factor is, hoe meer waarde van de materialen wordt behouden over de gehele levenscyclus van het beton, wat een positieve invloed heeft op de circulariteit van het . Een lagere waarde van inputmaterialen of een hogere waarde van outputmaterialen hebben dus een positieve invloed op de economische waardebehoud. Zo kan bijvoorbeeld hoogwaardige recycling of het recyclen van hernieuwbaar materiaal een positieve invloed hebben op deze indicator. Aangezien afvalmaterialen geen waarde hebben en gerecyclede materialen vaak minder waard zijn, kan er ook gesproken worden van het minimaliseren van waardeverlies.

Deze indicator is gebaseerd op de indicator van marktwaarde van CE Delft en RebelGroup (2016) en sluit daarnaast aan op economische kwaliteitsindicatoren van Platform CB'23 (2020) en SGS Intron (2019) die beschreven zijn in Paragraaf 2.3. Deze indicator heeft daarnaast raakvlak met de kwaliteitsindicatoren zoals beschreven door de Ellen MacArthur Foundation en Granta Design (2015b) en Sante Verde BV (2020). Het verschil met die kwaliteitsindicatoren is echter dat wij de kwaliteit van materialen uitdrukken als het economisch waardebehoud, waar de genoemde onderzoeken dit baseren op andere (objectievere) eigenschappen.

3 Aanpak en Methodiek

Om de vier circulaire indicatoren toe te passen en de circulariteit van het materiaalgebruik voor de betonketen van RWS nu (hier: 2020), in 2025 en in 2030 te analyseren, stellen we het basisscenario en vier innovatiescenario's op.

In dit hoofdstuk beschrijven we onze aanpak en gaan we in op hoe we het materiaalgebruik van de betonketen van RWS in vier objectcategorieën (toepassingsgebieden) opdelen (Paragraaf 3.2). Vervolgens lichten we stapsgewijs toe hoe de innovatiescenario's binnen dit onderzoek worden gebruikt (Paragraaf 3.3 en 3.4). De maatregelenpakketten (combinatie innovatiescenario's en betoninnovaties) worden per objectcategorie nu, in 2025 en 2030 doorgerekend. Door de uitkomsten ervan onderling te vergelijken, wordt vastgesteld welke van de geselecteerde betoninnovaties nu, in 2025 en in 2030 maximale impact op circulair materiaalgebruik van de betonketen van RWS kan hebben (Paragraaf 3.5).

3.1 Aanpak

We werken in dit onderzoek met het basisscenario en vier innovatiescenario's, om te onderzoeken hoe circulair het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS nu is en welke mogelijkheden voor verhoging ervan met het stimuleren van specifieke betoninnovaties er nu, in 2025 en in 2030 zijn.

Het basisscenario voor het referentiebeton geeft de huidige situatie en verwachte situatie in 2025 en in 2030 weer van materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS als er geen veranderingen plaatsvinden. De vier innovatiescenario's worden opgezet als maatregelenpakketten van geselecteerde betoninnovaties die de circulariteit van het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS positief kunnen beïnvloeden. De geselecteerde betoninnovaties zijn afkomstig uit de 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b).

We stellen het basisscenario en de vier innovatiescenario's op voor nu, in 2025 en in 2030. Bij het voorgenoemde kostencurveonderzoek was één van de voorwaarden voor het selecteren van een betoninnovatie dat deze nog in 2030 beschikbaar moet zijn. We hebben dat gegeven voor dit onderzoek doorgetrokken, door te kijken wat er mogelijk is op het gebied van circulariteit nu, in 2025 en in 2030 voor de geselecteerde betoninnovaties.

De aanpak en methode van het basisscenario en de vier innovatiescenario's zijn in de volgende paragrafen uitgewerkt, de uitwerkingen en resultaten ervan in Hoofdstuk 4.

3.2 Opdeling van beton bij RWS: objectcategorieën

Bij het samenstellen van de scenario's voor materiaalgebruik van beton, onderscheiden we vier objectcategorieën waarbinnen beton wordt gebruikt. De vier objectcategorieën zijn toegelicht in Figuur 3. Deze categorieën zijn overgenomen uit (CE Delft ; Delta Concrete Consult, 2019) en ook gebruikt in (CE Delft, 2020b).

Figuur 3 - Objectcategorieën (toepassing) van beton



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

3.3 Stap 1: Definiëren basisscenario

Door het basisscenario voor het referentiebeton van de vier objectcategorieën van de betonketen van RWS, op te zetten, brengen we in kaart hoe circulair het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS nu is en in 2025 en in 2030 zonder wijzigingen zou zijn.

Het basisscenario is dus gebaseerd op het referentiebeton van RWS voor ieder van de vier objectcategorieën zoals in het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b) beschreven. De basisscenario's per objectcategorie zijn uiteengezet in Bijlage A en samengevat in Paragraaf 4.2.

Het basisscenario berekenen we met behulp van de vier circulaire indicatoren die voor dit onderzoek zijn gedefinieerd, te weten:

1. Primair materiaalverbruik: het huidige jaarlijkse verbruik van primair en secundair materiaal in de betonketen van RWS.
2. Milieu-impact (MKI): de milieu-impact van de materialen per ton van het beton van de betonketen van RWS door het opsplitsen van de milieu-impact in de klimaatimpact en in de MKI-score.
3. Klimaatimpact.
4. Economische waarde materialen: de kosten van deze materialen per ton (productie- en transportkosten inclusief btw).

Toelichting: De totale jaarlijkse hoeveelheid primair materiaalverbruik en de milieu-impacts (MKI-score en klimaatimpact) bepalen we door respectievelijk het primaire materiaalverbruik per m³ beton en de milieu-impacts per m³ beton in de vier verschillende objectcategorieën te vermenigvuldigen met de jaarlijks toegepaste hoeveelheid beton (in m³). Dit is het 'areaal' van RWS. Deze gegevens komen uit het rapport Kostencurves beton 2020 (CE Delft, 2020b). De mate van recycling van de gebruikte materialen bepalen we in deze onderzoeken op basis van informatie verkregen van RWS, betonexperts en literatuurgegevens. Dat geldt ook voor de economische waarde materialen. De kosten voor de basisscenario's en verdere toelichting zijn weergegeven in Bijlage C voor nu (hier: 2020), voor 2025 en 2030.

Voor het bepalen van het basisscenario in 2025 en in 2030 (business-as-usual), hanteren we volgende uitgangspunten ten opzichte van het basisscenario voor nu (hier: 2020):

- de milieu-impact van transport op basis van het onderzoek ‘Kostencurve beton’ van CE Delft (2020b);
- primair materiaalverbruik blijft identiek voor de basisscenario’s;
- de kosten van de materialen, op basis van ingeschatte marktontwikkelingen.

De milieu-impact van transport en elektriciteit in 2025 wordt bepaald als gemiddelde tussen nu en 2030 (zie Hoofdstuk 4).

3.4 Stap 2: Opstellen innovatiescenario’s en selectie betoninnovaties

Innovatiescenario’s

De focus bij het samenstellen van de innovatiescenario’s voor de vier objectcategorieën ligt op materiaalgebruik (hier: beton) die door RWS in de eigen betonketen worden toegepast.

Hierbij ligt de focus op ingaande materialen voor de productie van beton (materiaal-productie: Module A1, transport naar de productielocatie: Module A2), aangezien het verschil tussen de geselecteerde betoninnovaties vrijwel geheel geassocieerd is met de gebruikte materialen en de toekomst voor toekomstige afvalverwerking ervan nog onbekend is. Om de onzekerheid van de innovatiescenario’s te beperken, gaan we voor toekomstige afvalverwerking van een geselecteerde betoninnovatie uit van het basisscenario, zoals ook gedaan is bij de kostencurves voor beton van CE Delft (2020b).

In de enkele gevallen dat een geselecteerde betoninnovatie veel invloed heeft op de milieu-impact van het beton buiten de materiaalproductie (Module A1) en het -transport (Module A2), nemen we dit verschil in milieu-impact ten opzichte van het referentiebeton van RWS ook mee. Zo kan de *relatieve* invloed van betonproductie (Module A3) en recycling-mogelijkheden (Module D) ten opzichte van het referentiebeton van RWS ook meegenomen worden.

Ten slotte nemen we de milieu-impact van water wel mee, maar nemen we water niet mee bij de massaberekeningen van in- en uitgaand materiaal. Deze keuze is gemaakt omdat er grote hoeveelheden water gebruikt worden en dit af kan leiden van het inzicht in alle overige materialen.

We combineren de beschikbare innovaties tot innovatiepakketten voor de vier innovatiescenario’s per objectcategorie in de richtjaren 2020, 2025 en 2030. Elk innovatiescenario focust zich hierbij volledig op de best mogelijke situatie voor één van de circulaire indicatoren:

1. Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact (kton CO₂-eq. per jaar).
2. Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score (€ 1.000 maatschappelijke kosten per jaar).
3. Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaalverbruik (kton materiaal per jaar).
4. Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies (miljoen € per jaar).

Het kan voorkomen dat innovatiescenario’s dezelfde maatregelenpakketten (combinatie innovatiescenario’s en betoninnovaties) omvatten voor enkele objectcategorieën. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk dat bij een objectcategorie het maatregelenpakket met de laagste

klimaatimpact identiek is aan het maatregelenpakket met de laagste MKI-score. Dit bekijken we in dit onderzoek per jaar en per objectcategorie.

Selectie betoninnovaties

Op basis van de Technology Readiness Levels (TRL) maken we een overzicht van de geselecteerde betoninnovaties die beschikbaar zijn voor nu, in 2030 en in 2050. Dit doen we op basis van de het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b), waar betoninnovaties beschreven zijn en het TRL ervan bepaald is. Voor meer toelichting over TRL, zie rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b). Een overzicht met de geselecteerde betoninnovaties en hun corresponderende TRL is gegeven in Tabel 2 in Hoofdstuk 4.

De kosten van materialen die toegepast worden voor de geselecteerde betoninnovaties zijn weergegeven in Bijlage D voor nu, in 2025 en in 2030. Ook deze kosten zijn verkregen van RWS, betonexperts en literatuurgegevens, wat verder toegelicht is in de bijlage.

3.5 Stap 3: Doorrekenen en vergelijken

Als de maatregelenpakketten voor de innovatiescenario's in 2020, 2025 en 2030 zijn opgezet, worden deze op elke indicator doorgerekend, waarbij alle objectcategorieën worden gecombineerd per scenario. Door de resultaten van de scenario's per indicator te vergelijken, kan worden onderzocht hoe de vier verschillende circulariteitsindicatoren zich ten opzichte van elkaar verhouden. Zo wordt bijvoorbeeld duidelijk wat de invloed van een focus op de klimaatimpact is op de indicator voor materiaalverbruik.

4 Basis- en Innovatiescenario's

Op basis van de aanpak van dit onderzoek, die in Hoofdstuk 3 beschreven is, geven we in dit hoofdstuk een toelichting op de geselecteerde betoninnovaties (Paragraaf 4.1). Vervolgens werken we het basisscenario uit (Paragraaf 4.2).

In Paragraaf 4.3 stellen we de innovatiescenario's samen voor de situatie nu (hier: 2020), in 2025 en 2030. De vier innovatiescenario's zijn opgezet als maatregelenpakketten van geselecteerde betoninnovaties die de circulariteit van het materiaalgebruik voor een objectcategorie (toepassingsgebied) positief kunnen beïnvloeden.

4.1 Geselecteerde betoninnovaties

Er zijn elf betoninnovaties beoordeeld. Dit zijn dezelfde betoninnovaties als die zijn geselecteerd in het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b). Deze betoninnovaties zijn weergegeven in Tabel 2 en voldoen aan vier criteria:

1. De innovatie kan uiterlijk in 2030 in minimaal één objectcategorie worden toegepast.
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.
3. De innovatie leidt (naar verwachting) **wel** tot een significante reductie voor de klimaatimpact en de MKI-score.
4. Er zijn afdoende gegevens beschikbaar om mee te rekenen.

De geselecteerde betoninnovaties hebben daarnaast voor zover bekend (op basis van expert judgement) geen nadelige invloed op de levensduur van objecten waarin deze toegepast kunnen worden.

In Tabel 2 is de Technology Readiness Level (TRL) voor iedere geselecteerde betoninnovatie voor elke objectcategorie vastgesteld. Hiermee wordt aangegeven hoe ver een innovatie op dit moment technisch specifiek voor een objectcategorie ontwikkeld is. Hoe verder een innovatie ontwikkeld is, hoe eerder deze op grote schaal toegepast kan worden.

Voor dit onderzoek nemen we voor de doorberekening van een maatregelenpakket nu alleen betoninnovaties met TRL 9 mee. Voor de doorberekening in 2025 betoninnovaties vanaf TRL 7 en voor de doorberekening in 2030 innovaties vanaf TRL 6. Dit is in lijn met het rapport "Kostencurve beton" van CE Delft (2020b).

Tabel 2 - TRL-niveaus geselecteerde betoninnovaties onderverdeeld naar objectcategorieën (OC I/IV)

Betonnnovatie	OC I. Klein niet-constructief	OC II. Klein gewapend	OC III. Groot voor- gespannen	OC IV. Complexe constructies
Alternatieve betonsamenstelling				
Carbstone	TRL 9	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
CSA-beliet <i>Bijvoorbeeld: Ternocem®</i>	TRL 9	TRL 6-7	TRL 6-7	TRL 4
Geopolymeer <i>Bijvoorbeeld: Geo-beton™, ASCEM® cement</i>	TRL 9	TRL 7	TRL 4	TRL 4
Solidia	TRL 9	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Circulair bouwen				
Carbon8 - vliegash	TRL 9	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Mechanisch grind/mechanische zandrecycling <i>Bijvoorbeeld: Circuton, Smart liberator</i>	TRL 8	TRL 7	TRL 7	TRL 7
Mechanische cementrecycling <i>Bijvoorbeeld: Smart liberator</i>	TRL 8	TRL 4	TRL 4	TRL 4
Mech./thermische cementrecycling <i>Bijvoorbeeld: Circuton</i>	TRL 6	TRL 4	TRL 4	TRL 4
Wapening				
Basaltvezelstaven	N.v.t.	TRL 8	TRL 4	TRL 4
Staalvezels	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

Bron: CE Delft (2020b) 'Kostencurve beton' 2020).

4.2 Basisscenario

Het basisscenario is gebaseerd op het referentiebeton voor de vier objectcategorieën van RWS, zoals in het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b) is beschreven. De gegevens zijn in meer detail beschreven in Bijlage A. Meer informatie over de kosten is te vinden in Bijlage C.

4.2.1 Nu - 2020

De gebruikte grondstoffen in beton voor het basisscenario nu (2020) zijn weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 - Gegevens basisscenario - Nu (2020)

Materiaal	Hoeveelheid ton/jaar	Kosten incl. btw €/ton	Klimaatimpact (Module A1 en A2) kg CO ₂ -eq./ton	MKI-score (Module A1 en A2) € MKI/ton
Betongranulaat 4/12	42.468	13-22	2,40	0,34
CEM I	60.554	143-179	872,70	57,11
CEM III/B	194.570	128-137	286,38	22,14
Kalksteenmeel	929	84-90	13,90	1,92
Poederkoolvliegias	1.548	76-94	12,00	1,70
Grind/steenslag	580.680	40-57	16,73	2,10
Zand	453.331	21-42	12,30	1,55
Wapeningsstaal	30.339	1.482-1.845	1.381,31	85,82
Water	104.432	0,79	0,35	0,04

4.2.2 In 2025

De gegevens voor het basisscenario in 2025 zijn weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4 - Gegevens basisscenario - in 2025

Materiaal	Hoeveelheid ton/jaar	Kosten incl. btw €/ton	Klimaatimpact (Module A1 en A2) kg CO ₂ -eq./ton	MKI-score (Module A1 en A2) € MKI/ton
Betongranulaat 4/12	42.468	14-24	2,37	0,33
CEM I	60.554	154-193	872,52	57,07
CEM III/B	194.570	138-147	286,19	22,11
Kalksteenmeel	929	91-97	13,85	1,91
Poederkoolvliegias	1.548	81-101	11,85	1,67
Grind/steenslag	580.680	43-61	16,72	2,10
Zand	453.331	22-46	12,30	1,55
Wapeningsstaal	30.339	1.597-1.988	1.381,16	85,79
Water	104.432	0,85	0,35	0,04

De gegevens van Tabel 4 zijn voor de klimaatimpact en MKI-score deels iets lager berekend dan de gegevens uit Tabel 3. Het verschil wordt verklaard aan minder transportuitstoot en een meer hernieuwbare elektriciteitsmix.

4.2.3 In 2030

De gegevens voor het basisscenario in 2030 zijn weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5 - Gegevens basisscenario - in 2030

Materiaal	Hoeveelheid ton/jaar	Kosten incl. btw €/ton	Klimaatimpact (Module A1 en A2) kg CO ₂ -eq./ton	MKI-score (Module A1 en A2) € MKI/ton
Betongranulaat 4/12	42.468	15-26	2,34	0,33
CEM I	60.554	166-208	872,33	57,03
CEM III/B	194.570	149-159	286,01	22,07
Kalksteenmeel	929	98-105	13,80	1,90
Poederkoolvliegias	1.548	88-109	11,70	1,64
Grind/steenslag	580.680	46-66	16,71	2,09

Materiaal	Hoeveelheid ton/jaar	Kosten incl. btw €/ton	Klimaatimpact (Module A1 en A2) kg CO ₂ -eq./ton	MKI-score (Module A1 en A2) € MKI/ton
Zand	453.331	24,49	12,29	1,55
Wapeningsstaal	30.339	1.720-2.141	1.381,01	85,76
Water	104.432	0,92	0,35	0,04

Verschillen in klimaatimpact en MKI-score met nu en in 2025 zijn wederom gerelateerd aan minder transportuitstoot en meer hernieuwbare elektriciteitsmix.

4.3 Innovatiescenario's per objectcategorie

De vier innovatiescenario's zijn opgezet als maatregelenpakketten van geselecteerde betoninnovaties die de circulariteit van het materiaalgebruik per objectcategorie positief kunnen beïnvloeden. De maatregelenpakketten worden in deze paragraaf per objectcategorie voor nu, in 2025 en 2030 beschreven.

Zoals benoemd in Hoofdstuk 3 ligt de focus voor ieder innovatiescenario op een specifieke circulariteitsindicator. In Bijlage B zijn de scenario's per jaar en per objectcategorie in detail beschreven en weergegeven. In de volgende paragrafen zijn de geaggregeerde innovatiescenario's per jaar weergegeven.

Bij de selectie van innovaties wordt ook gekeken naar combinatiemogelijkheden van maatregelenpakketten voor verschillende innovatiescenario's. Als een innovatie een positief effect heeft op één scenario en een neutraal (geen nadelig) effect heeft op een ander scenario, zal deze innovatie binnen beide scenario's meegenomen worden. Hierdoor kunnen scenario's elkaar ook versterken en zullen verschillen tussen scenario's alleen voortkomen uit onverenigbare innovaties.

4.3.1 Nu - 2020

In 2020 zijn enkel Carbstone (OC I), Solidia (OC I), Carbon8 (OC I), de geopolymeren (OC I) en staalvezels (OC II) als betoninnovaties beschikbaar, aangezien alle overige innovaties nog geen TRL 9 behaald hebben. Voor OC III en OC IV zijn er nog geen innovaties beschikbaar.

De vier innovatiescenario's die zijn opgezet als maatregelenpakket van geselecteerde betoninnovaties in 2020 zijn voor objectcategorieën I en II weergegeven in Tabel 6. In Bijlage B.1 is dit meer gedetailleerd beschreven.

Tabel 6 - Maatregelenpakketten onderverdeeld naar de objectcategorieën (OC I en II) voor geselecteerde betoninnovaties die de circulariteit van het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS positief kunnen beïnvloeden - nu in 2020

Materiaal/ product referentiebeton	Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primaair materiaalverbruik	Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies
Objectcategorie I (OC I)				
Betonsamenstelling ⁽¹⁾			Carbstone	Carbstone
CEM III/B	Solidia	Solidia	Carbstone	Carbstone
Grind	Carbon8	Carbon8	Carbon8	Carbon8

Objectcategorie II (OC II)				
Stalen wapening ⁽²⁾	Staalvezels	Stalen wapening	Stalen wapening	Stalen wapening
(1) Carbstone vervangt het referentiebeton voor OC I volledig. Alle overige innovaties vervangen alleen individuele materialen, waarbij de verhoudingen gelijk blijven aan het referentiebeton.				
(2) Grijze tekst geeft aan dat het scenario niet afwijkt van het referentiebeton.				

Hieronder zijn de maatregelenpakketten per objectcategorie uit Tabel 6 in het kort toegelicht. De maatregelenpakketten in 2020 zijn in detail beschreven in Bijlage B.1.

Toelichting op objectcategorie I (OC I)

Solidia wordt als alternatief op CEM III/B toegepast in Innovatiescenario's 1 en 2. Voor Innovatiescenario's 3 en 4 wordt het referentiebeton vervangen door Carbstone. Carbon8 vervangt in alle scenario's primair grind in het referentiebeton. Zonder Carbon8 zou Carbstone met meer primair materiaalverbruik geassocieerd zijn dan het referentiebeton, maar niet in combinatie met Carbon8. Het economisch waardeverlies is met of zonder Carbon8 het laagst bij de toepassing van Carbstone. Solidia zorgt ook voor minder primair materiaalverbruik en minder economisch waardeverlies, maar niet zoveel als Carbstone met Carbon8.

Geopolymeren zorgen ook voor een lagere klimaatimpact en lager primair materiaalverbruik, maar in mindere mate dan respectievelijk Solidia en Carbstone.

Toelichting op objectcategorie II (OC II)

Voor OC II worden staalvezels toegepast in plaats van stalen wapening binnen het maatregelenpakket van Innovatiescenario 1.

Voor objectcategorie II in 2020 naast staalvezels nog geen innovaties beschikbaar. Aangezien staalvezels voor een hogere MKI-score, hoger primair materiaalverbruik en een hoger economisch waardeverlies zorgen in vergelijking met reguliere stalen wapening, wordt deze maatregel in de andere scenario's ook niet meegenomen.

4.3.2 In 2025

In 2025 zijn naast de betoninnovaties in 2020 ook mechanische zand- en grindrecycling (OC I-OC IV), mechanische cementrecycling (OC I), geopolymeren (OC II) en basaltvezelstaven (OC II) beschikbaar.

De vier innovatiescenario's die zijn opgezet als maatregelenpakket van geselecteerde betoninnovaties in 2025 zijn per objectcategorie weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7 - Maatregelenpakketten onderverdeeld naar objectcategorieën (OC I t/m IV) voor geselecteerde betoninnovaties die de circulariteit van het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS positief kunnen beïnvloeden - in 2025

Materiaal/product referentiebeton	Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaalverbruik	Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies
Objectcategorie I				
Betonsamenstelling ⁽¹⁾			Carbstone	Carbstone
CEM III/B	Solidia	Solidia	Carbstone	Carbstone

Materiaal/product referentiebeton	Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaal-verbruik	Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies
Grind	Carbon8	Carbon8	Mechanisch gerecycled grind	Carbon8
Zand ⁽²⁾	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	N.v.t.	N.v.t.
Objectcategorie II				
CEM III/B ⁽³⁾	Geo-beton™	Geo-beton™	CEM III/B	CEM III/B
Grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind
Zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand
Stalen wapening	Basaltvezelstaven	Basaltvezelstaven	Basaltvezelstaven	Stalen wapening
Objectcategorie III				
Grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind
Zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand
Objectcategorie IV				
Grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind
Zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand

- (1) Carbstone vervangt het referentiebeton voor OC I volledig. Alle overige innovaties vervangen alleen individuele materialen, waarbij de verhoudingen gelijk blijven aan het referentiebeton.
- (2) Carbstone bevat geen zand.
- (3) Grijs tekst geeft aan dat het scenario niet afwijkt van het materiaal in het referentiebeton.

Hieronder zijn de maatregelenpakketten per objectcategorie uit Tabel 7 in het kort toegelicht. De maatregelenpakketten in 2025 zijn in detail beschreven in Bijlage B.2.

Toelichting op objectcategorie I (OC I)

De maatregelenpakketten van OC I in 2025 zijn een uitbreiding op de maatregelenpakketten in 2020, waarbij ook mechanische zand- en grindrecycling mee wordt genomen.

De uitkomsten van het vierde maatregelenpakket voor deze objectcategorie 'laagste economische waardeverlies' is identiek aan 2020.

Solidia wordt als alternatief op CEM III/B toegepast binnen Innovatiescenario's 1 en 2 en Carbstone vervangt het referentiebeton in Innovatiescenario's 3 en 4. Carbon8 vervangt daarnaast in alle scenario's primair grind, behalve in Innovatiescenario 3. Het gebruik van mechanisch gerecycled grind zorgt namelijk voor een lager primair materiaalverbruik en is daarom interessanter voor Innovatiescenario 3 ('laagste hoeveelheid primair materiaal-verbruik'). Voor Innovatiescenario 1 en 2 wordt mechanisch gerecycled zand toegepast.

Mechanische cementrecycling zorgt voor een verlaging van de klimaatimpact en de MKI-score, een lager primair materiaalverbruik en een lager economisch waardeverlies. De verlaging is echter minder dan voor de innovaties: Solidia en Carbstone. Ook geopolymeren zorgen voor een lagere klimaatimpact en lager primair materiaalgebruik, maar net als in 2020 in mindere mate dan Solidia en Carbstone beton.

Toelichting op objectcategorie II (OC II)

Voor de maatregelenpakketten van OC II zijn aanzienlijk meer betoninnovaties beschikbaar zijn in 2025. Voor alle innovatiescenario's is CEM III/B vervangen door geopolymere en primair grind en zand door mechanisch gerecycled grind en zand.

Basaltvezelstaven worden overal behalve in het vierde innovatiescenario toegepast, aangezien de economische restwaarde drastisch lager is en er daarmee over de levenscyclus van het beton meer waarde verloren gaat dan bij wapeningsstaal. Basaltvezelstaven presteren beter dan wapeningsstaal of staalvezels in alle drie de andere scenario's.

Voor het eerste en tweede innovatiescenario wordt de geopolymeer Geo-beton™ toegepast. Omdat niet met zekerheid is vast te stellen of geopolymeer voor het laagste economische waardeverlies zorgt door gebrek aan data, is voor Innovatiescenario 3 en 4 uitgegaan van het cement in het referentiebeton van RWS. De toepassing van mechanisch gerecycled zand en grind heeft geen invloed op het economisch waardebehoud (in negatieve óf positieve zin). Deze innovatie wordt door diens positieve effect op andere indicatoren ook meegenomen binnen Innovatiescenario 4.

Toelichting op objectcategorie III (OC III)

Voor OC III zijn in 2025 alleen de betoninnovaties mechanisch gerecycled grind en zand beschikbaar. De overige grondstoffen van het referentiebeton zijn daarom ongewijzigd gebleven.

Toelichting op objectcategorie IV (OC IV)

Net als bij OC III zijn voor OC IV in 2025 alleen de betoninnovaties mechanisch gerecycled grind en zand beschikbaar. De overige grondstoffen van het referentiebeton zijn daarom ongewijzigd gebleven.

4.3.3 Zichtjaar 2030

In 2030 zijn naast de genoemde betoninnovaties in 2020 en 2025 ook de betoninnovaties: CO₂-afvang bij cementklinkerproductie (CCS, OC I-OC IV), thermische cementrecycling (OC I) en CSA-beliet (OC III) beschikbaar voor de doorberekening van een maatregelenpakket voor een innovatiescenario.

De vier innovatiescenario's die zijn opgezet als maatregelenpakket van geselecteerde betoninnovaties in 2030 zijn per objectcategorie weergegeven in Tabel 8.

Tabel 8 - Maatregelenpakketten onderverdeeld naar objectcategorieën (OC I t/m IV) voor geselecteerde betoninnovaties die de circulariteit van het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS positief kunnen beïnvloeden - in 2030

Materiaal/ product referentiebeton	Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaal- verbruik	Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies
Objectcategorie I				
Betonsamenstelling ⁽¹⁾	Carbstone	Carbstone	Carbstone	Carbstone
Grind	Carbon8	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Carbon8
Objectcategorie II				
CEM III/B ⁽²⁾	CEM III/B met CCS	CEM III/B met CCS	CEM III/B met CCS	CEM III/B

Materiaal/ product referentiebeton	Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primaair materiaal- verbruik	Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies
Zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand
Grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind
Stalen wapening	Basaltvezelstaven	Basaltvezelstaven	Basaltvezelstaven	Stalen wapening
Objectcategorie III				
CEM III/B	CEM III/B met CCS	CEM III/B met CCS	CEM III/B met CCS	CSA-beliet
CEM I ⁽²⁾	CEM I met CCS	CEM I met CCS	CEM I met CCS	CEM I
Zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand
Grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind
Objectcategorie IV				
CEM III/B ⁽²⁾	CEM III/B met CCS	CEM III/B met CCS	CEM III/B met CCS	CEM III/B
Zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand	Mechanisch gerecycled zand
Grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind	Mechanisch gerecycled grind

- (1) Carbstone vervangt het referentiebeton voor OC I volledig. Alle overige innovaties vervangen alleen individuele materialen, waarbij de verhoudingen gelijk blijven aan het referentiebeton.
- (2) Grijs tekst geeft aan dat het scenario niet afwijkt van het materiaal in het referentiebeton.

Hieronder zijn de maatregelenpakketten per objectcategorie uit Tabel 8 in het kort toegelicht. De maatregelenpakketten in 2030 zijn in detail beschreven in Bijlage B.3.

Toelichting op objectcategorie I (OC I)

Binnen de maatregelenpakketten van OC I wordt bij alle innovatiescenario's het referentiebeton vervangen door Carbstone beton, wat in 2030 met lagere milieu-impacts is geassocieerd dan Solidia door een groenere elektriciteitsmix. Het grind in Carbstone beton wordt ook vervangen: in Scenario 1 en 4 door Carbon8 en in Innovatiescenario 2 en 3 door mechanisch gerecycled grind.

CCS, geopolymere en thermische cementrecycling zorgen ook voor een reductie in milieu-impacts en zowel geopolymere als thermische cementrecycling verlagen het primaire materiaalverbruik, maar niet in zo'n hoedanigheid als Carbstone beton in 2030.

Toelichting op objectcategorie II (OC II)

De maatregelenpakketten van OC II lijken sterk op de maatregelenpakketten in 2025, maar omvatten voor Innovatiescenario's 1, 2 en 3 de toepassing van CEM III/B met CCS ter vervanging van CEM III/B, in plaats van geopolymere. CEM III/B met CCS brengt hogere kosten met zich mee en past daarom niet in Innovatiescenario 4.

Toelichting op objectcategorie III (OC III)

De maatregelenpakketten van OC III omvatten in 2030 aanvullend op de maatregelenpakketten in 2025 ook de toepassing van CEM III/B en CEM I met CCS in Innovatiescenario 1 t/m 3 en CSA-beliet als vervanger van CEM III/B in Innovatiescenario 4. Voor deze objectcategorie zijn verder geen innovaties beschikbaar in 2030.

Toelichting op objectcategorie IV (OC IV)

De maatregelenpakketten van OC III omvatten in 2030 aanvullend op de maatregelenpakketten in 2025 ook de toepassing van CEM III/B in alle Innovatiescenario's. Voor deze objectcategorie zijn verder geen innovaties beschikbaar in 2030.

5 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de maatregelenpakketten kwantitatief besproken. Hiervoor zijn de uitkomsten van de berekening van de vier circulaire indicatoren voor de vier innovatiescenario's, beschreven voor Nu (hier: 2020), 2025 en 2030.

RWS kan alleen sturen op circulair materiaalgebruik binnen de eigen betonketen door circulaire innovaties toe te passen in projecten waarvan de circulariteit gemeten is. Hiervoor zijn de vier circulaire indicatoren voor dit onderzoek opgesteld. Voor een innovatiescenario wordt in dit hoofdstuk bijvoorbeeld de circulaire indicator klimaatimpact van de maatregelenpakketten berekend en van alle objectcategorieën opgeteld en voor Nu (hier: 2020), 2025 en 2030 weergegeven. Op deze wijze kan een verschil inzichtelijk worden door innovatiescenario's onderling en met een basisscenario te vergelijken. Het verschil is vooralsnog een opmaat voor een mogelijke verbetering van de circulariteit van de betonketen van RWS.

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het basisscenario en de innovatiescenario's per indicator gegeven in Paragraaf 5.1 (klimaatimpact en MKI-score), 5.2 (materiaalverbruik) en 5.3 (economisch waardebehoud materialen). Vervolgens zijn de resultaten onderling in Paragraaf 5.4 vergeleken en beoordeeld.

5.1 Resultaten Klimaatimpact en MKI-score

De resultaten van de circulaire indicatoren 'klimaatimpact' (ton CO₂-eq. per jaar) en 'MKI-score' (duizend euro MKI per jaar) zijn in Tabel 9 weergegeven voor het basisscenario en voor de vier innovatiescenario's, voor Nu (hier: 2020), 2025 en 2030.

Tabel 9 - Resultaten Klimaatimpact (ton CO₂-eq. per jaar) en MKI-score (duizend euro maatschappelijke kosten per jaar)

Scenario	Klimaatimpact ton CO ₂ -eq./jaar	MKI-score Duizend € MKI/jaar
Nu - 2020		
Basisscenario	165.938	12.313
Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	164.018	12.241
Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	164.497	12.208
Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaalverbruik	165.000	12.303
Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies	165.000	12.303
2025		
Basisscenario	165.876	12.301
Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	148.411	10.582
Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	148.411	10.582
Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaalverbruik	150.347	10.645
Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies	151.862	10.708
2030		
Basisscenario	165.815	12.289
Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	92.411	6.971

Scenario	Klimaatimpact ton CO ₂ -eq./jaar	MKI-score Duizend € MKI/jaar
Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	93.130	6.954
Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaalverbruik	93.130	6.954
Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies	133.528	9.869

Doordat er in 2025 en 2030 steeds meer innovaties beschikbaar komen, dalen de twee circulaire indicatoren ten opzichte van het basisscenario Nu. In 2020 (Nu) zijn de verschillen onderling voor het basisscenario en de vier innovatiescenario's voor de twee circulaire indicatoren nog klein. Zo is de maximale reductie van de klimaatimpact voor de innovatiescenario's ten opzichte van het basisscenario maar 1.920 ton CO₂-eq. (1%), terwijl de maximale reductie van de MKI-score maar 105.000 € MKI (0,5%) bedraagt. In 2025 worden deze verschillen al uitgesproken en bedraagt de reductie van de klimaatimpact ruim 17.000 ton CO₂-eq. (bijna 11%), terwijl de MKI-score 1,7 miljoen € MKI (14%) bedraagt. In 2030 zijn de verschillen voor de twee circulaire indicatoren groter en bedraagt de reductie van de klimaatimpact ruim 73.000 ton CO₂-eq. (44%), terwijl de reductie van de MKI-score 5,3 miljoen € MKI (43%) bedraagt.

Detailbeschouwing

De verschillen tussen het basisscenario en de innovatiescenario's voor de twee circulaire indicatoren Klimaatimpact en MKI-score zijn in 2020 nog klein, aangezien het kleine aantal innovaties dat beschikbaar is in 2020 met name toegepast kan worden in OC I. Deze objectcategorie maakt nog geen 5% van het areaal van RWS uit. Daarnaast worden in Innovatiescenario 1 ook staalvezels toegepast in OC II, maar het effect van deze innovatie op de klimaatimpact is beperkt. De verlaging van de circulaire indicatoren Klimaatimpact en MKI-score van OC I in 2020 is door de toepassing van de betoninnovaties Solidia en Carbon8 in OC I weliswaar groot ten opzichte van het referentiebeton van OC I in het basisscenario (65% reductie in klimaatimpact en 52% reductie in de MKI-score), maar het effect op het volledige areaal van RWS en daarmee voor de innovatiescenario's is beperkt. De totale impactreductie is daarom maar 1% op de klimaatimpact en 0,5% op de MKI-score. Door de lage invloed van OC I verschillen de circulaire indicatoren 'Klimaatimpact' en 'MKI-score' voor de innovatiescenario's in Tabel 9 onderling ook weinig.

In 2025 is de verlaging van de circulaire indicatoren klimaatimpact en MKI-score voor de innovatiescenario's ten opzichte van het basisscenario uitgesproken dan in 2020. Dat komt doordat mechanisch gerecycled zand en grind in alle objectcategorieën toegepast kan worden. Met name de toepassing van deze betoninnovatie in OC III heeft veel effect, aangezien deze objectcategorie 67% van het areaal van RWS beslaat. In 2025 is er ook sprake van een reductie in OC II in de impacts van de twee circulaire indicatoren door de toepassing van basaltvezelstaven en het geopolymeer Geo-beton™. Omdat OC II echter maar 10% van het areaal van RWS omslaat, zorgt dit voor het totale areaal slechts voor een reductie van iets meer dan 4% in zowel klimaatimpact als MKI-score. De verschillen tussen de innovatiescenario's onderling in 2025 is wel groter dan in 2020, doordat de helft van de reductie in OC II veroorzaakt wordt door de toepassing van Geo-beton™. Deze alternatieve binder wordt niet toegepast in de Innovatiescenario's 3 en 4. De betoninnovatie zorgt alleen voor een verlaging van de twee circulaire indicatoren (klimaatimpact en van de MKI-score) binnen Innovatiescenario's 1 en 2, maar niet voor een verlaging van de circulaire indicator primair materiaalverbruik of van economische waardebehoud materialen (Innovatiescenario's 3 en 4). Dit betekent dat een focus op de circulaire indicatoren 'Klimaatimpact'

en 'MKI-score' niet per definitie leidt tot een circulaire verbetering van primair materiaalverbruik of van economische waardebehoud materialen.

In 2030 kan CO₂ bij de klinkerproductie van CEM III/B en CEM I opgevangen en opgeslagen worden (CCS), wat voor flink hogere impactreducties van de twee circulaire indicatoren 'Klimaatimpact' en 'MKI-score' voor de innovatiescenario's zorgt ten opzichte van het basisscenario voor Nu (hier: 2020), en voor 2025, in geval van dat de betoninnovatie in 2030 geïmplementeerd wordt. Wederom is het grootste deel van de impactreductie voor de twee circulaire indicatoren geassocieerd met OC III, mede doordat deze objectcategorie het grootste deel van het areaal van RWS beslaat, maar ook omdat er binnen OC III CO₂ wordt afgevangen bij de productie van zowel CEM I als CEM III/B (in de andere objectcategorieën is alleen CEM I aanwezig, wat een lager klinkergehalte heeft).

Het verschil tussen Innovatiescenario's 1 t/m 3 en Innovatiescenario 4 is in 2030 groot voor de twee circulaire indicatoren (Klimaatimpact en MKI-score). Dit komt omdat de toepassing van CCS relatief duur is en daarom niet meegenomen is binnen het scenario voor economisch waardeverlies. Dit verschil wordt gedeeltelijk opgevangen door de toepassing van CSA-beliet in OC III in Innovatiescenario 4, maar de milieu-impact van dit innovatieve bindmiddel vervangt alleen CEM I en heeft zowel op CEM I alleen als in totaal minder effect dan de toepassing van CCS. Een focus op de twee circulaire indicatoren alleen, leidt zodoende voor het beoordelen van circulair betongebruik niet per definitie tot een verbetering van de andere circulaire indicatoren, bijvoorbeeld economische waardebehoud materialen aangezien CCS significant duurder is.

5.2 Resultaten primair materiaalverbruik

De resultaten van de circulaire indicator 'Totaal materiaalverbruik' (kton materiaal per jaar) van alle scenario's zijn weergegeven in Tabel 10. Deze scenario's zijn berekend door het primair materiaalgebruik (kton materiaal per jaar) en de afvalproductie (kton materiaal per jaar) bij elkaar op te tellen.

Er komen door de jaren heen meer betoninnovaties beschikbaar. Veel van de beschikbare innovaties maken gebruik van secundaire materialen, wat het primaire materiaalverbruik drastisch kan verlagen. In Nu, 2020 zijn de verschillen wederom nog klein, met een reductie in materiaalverbruik van 20 kton (bijna 2%). In 2025 en 2030 is dit verschil veel groter en vermindert het totale materiaalverbruik met ruim 1 miljoen ton (88%). Onder Tabel 10 gaan we hier verder op in.

Tabel 10 - Resultaten totale materiaalverbruik (kton materiaal per jaar), primair materiaalgebruik (kton materiaal per jaar) en afvalproductie (kton materiaal per jaar) voor het basisscenario en de innovatiescenario's

Scenario	Primair materiaalgebruik kton materiaal per jaar	Afvalproductie kton materiaal per jaar	Total materiaalverbruik kton materiaal per jaar
2020			
Basisscenario	1.169	14,9	1.184
Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	1.162	15,1	1.178
Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	1.163	14,9	1.178
Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaalverbruik	1.148	14,9	1.163
Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies	1.148	14,9	1.163

2025			
Basisscenario	1.169	14,9	1.184
Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	148	14,8	162
Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	148	14,8	162
Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaalverbruik	131	14,8	146
Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies	157	14,9	172
2030			
Basisscenario	1.169	14,9	1.184
Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	155	14,8	170
Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	131	14,8	146
Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaalverbruik	131	14,8	146
Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies	157	14,9	172

Net zoals bij de in de vorige paragraaf besproken circulaire indicatoren (klimaatimpact en MKI-score) zijn de verschillen voor de circulaire indicator Totaal materiaalverbruik in 2020 klein. De reden is dat de potentiële innovaties die impact hebben op deze indicator alleen toegepast kunnen worden in OC I. Het effect van het toepassen ervan op het totale areaal van RWS is hierdoor klein, het resulteert in hooguit 2% verlaging van het Totaal materiaalverbruik. Alle materialen behalve zand in de innovatie Carbstone met Carbon8 zijn van secundaire afkomst, waarbij met name Carbon8 een grote rol speelt. Het primaire materiaalverbruik van OC I daalt hierdoor met 45%. Door de lage invloed van OC I op de circulariteit van de totale opgave van RWS, verschillen de vier innovatiescenario's onderling weinig.

In 2025 is de verlaging van de circulaire indicator Totaal materiaalverbruik drastisch lager voor de innovatiescenario's ten opzichte van 2020. Deze verlaging is volledig toe te kennen aan het gebruik van mechanisch gerecycled zand en grind, in plaats van primair zand en grind in OC II, III en IV. Aangezien de gebruikte primaire materialen in het basisscenario grotendeels zand en grind zijn, zorgt dit voor een verlaging van het materiaalverbruik met 89% voor de innovatiescenario's. Onderling verschillen de innovatiescenario's niet veel meer, al valt op dat met name Innovatiescenario 4 een hoger materiaalverbruik heeft doordat hier gebruik wordt gemaakt van Carbon8 in plaats van mechanisch gerecycled grind. Omdat vrijwel alle primaire materialen al vervangen zijn door secundaire materialen, heeft een verhoogd verbruik van primaire materialen in OC I nu relatief gezien meer invloed op het resultaat. Het verschil in materiaalverbruik van de innovatiescenario's is in vergelijking met het basisscenario echter nog steeds heel klein.

De verlaging van de circulaire indicator Totaal materiaalverbruik in 2030 is identiek aan 2025, aangezien er geen nieuwe innovaties beschikbaar zijn die voor minder primair materiaalverbruik kunnen zorgen. Wel wordt ook bij materiaalverbruik CO₂ opgevangen bij de klinkerproductie van CEM I en CEM III/B, maar dit heeft geen nadelig effect op het materiaalverbruik.

5.3 Resultaten economische waardebehoud materialen

De resultaten voor de circulaire indicator 'economisch waardebehoud materialen' (miljoenen euro's per jaar) van alle scenario's zijn in Tabel 11 weergegeven. Het

economisch waardebehoud materialen wordt berekend door de economische waarde van materialen na gebruik (output) te delen door de economische waarde van materialen van gebruik (input). Hoe hoger deze factor is, hoe meer economische waarde behouden wordt. Doordat de verschillen tussen scenario's relatief klein zijn, is deze factor weergegeven met drie cijfers achter de komma.

De waarde van materialen stijgt met de tijd, zowel voor het referentiebeton als voor de betoninnovaties (zie Bijlage C en D voor meer informatie over de kosten per materiaal). Daarnaast komen er met de jaren meer betoninnovaties beschikbaar. Deze kunnen ook invloed op de kosten van materialen en beton hebben. De verschillen tussen het basis-scenario en de innovatiescenario's voor deze circulaire indicator zijn in 2020 klein, met 1,5% meer economisch waardebehoud materialen voor de innovatiescenario's ten opzichte van het basisscenario. In 2025 verandert er weinig, doordat veel innovaties weinig invloed hebben op de aanschafkosten. In 2030 is het economische waardebehoud materialen 2,5% hoger voor de innovatiescenario's dan het basisscenario, met name dankzij de toepassing van de betoninnovatie: CSA-beliet.

Tabel 11 - Resultaten economische waardebehoud materialen (miljoenen euro's per jaar) met bandbreedte (lage en hoge range)

Scenario	Economische waarde materialen (input) Miljoen €/jaar	Economische waarde materialen (output) Miljoen €/jaar	Factor economische waardebehoud materialen (lage range) Factor	Factor economische waardebehoud materialen (hoge range) Factor
2020				
Basisscenario	121	25	0,275	0,344
Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	91-119	25	0,275	0,344
Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	121	25	0,276	0,346
Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaalverbruik	120	25	0,278	0,348
Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies	120	25	0,278	0,348
2025				
Basisscenario	100-131	27-45	0,275	0,344
Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	97-128	27-44	0,275	0,344
Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	97-128	27-44	0,275	0,344
Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaalverbruik	98-128	27-44	0,272	0,341
Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies	99-129	27-45	0,278	0,348
2030				
Basisscenario	107-141	29-48	0,275	0,344
Innovatiescenario 1: Laagste klimaatimpact	110-139	29-47	0,261	0,340

Scenario	Economische waarde materialen (input) Miljoen €/jaar	Economische waarde materialen (output) Miljoen €/jaar	Factor economische waardebehoud materialen (lage range) Factor	Factor economische waardebehoud materialen (hoge range) Factor
Innovatiescenario 2: Laagste MKI-score	111-141	29-47	0,258	0,336
Innovatiescenario 3: Laagste hoeveelheid primair materiaalverbruik	111-141	29-47	0,258	0,336
Innovatiescenario 4: Laagste economisch waardeverlies	105-138	30-49	0,281	0,352

In 2020 is het verschil voor de circulaire indicator tussen het basisscenario en de innovatiescenario's klein, doordat er alleen innovaties voor OC I beschikbaar zijn. Zowel de betoninnovaties: Solidia als Carbstone en Carbon8 zorgen voor een lichte verlaging van de materiaalkosten, maar alleen Carbstone met Carbon8 heeft ook meer restwaarde, wat tot 1,5% meer economisch waardebehoud van de materialen leidt. De materiaalkosten zijn het laagst bij Innovatiescenario 1, waar staalvezels toegepast worden, maar doordat de restwaarde van Innovatiescenario 1 lager is, gaat er bij dit scenario uiteindelijk het meeste economische waarde verloren. Dit komt doordat staalvezelbeton minder goed gerecycled kan worden dan regulier beton, met als gevolg een relatief hoog verlies aan staal na gebruik.

In 2025 stijgt het economische waardebehoud van alle innovatiescenario's ten opzichte van 2020. De circulaire indicator blijft voor het basisscenario onveranderd.

Basaltvezelstaven zijn niet meegenomen in Innovatiescenario 4, wat voor minder waardeverlies zorgt. Basaltvezelstaven zijn drastisch goedkoper, maar doordat deze met beton laagwaardig gerecycled worden tot betongranulaat, gaat er relatief gezien meer waarde verloren dan bij wapeningsstaal dat hoogwaardig wordt gerecycled tot secundair staal.

In 2030 valt op dat het economisch waardebehoud van de Innovatiescenario's 1 t/m 3 is gedaald, behalve van Innovatiescenario 4. Dit komt door de toepassing van CCS bij CEM I en CEM III/B, wat extra kosten met zich meebrengt bij de materiaalproductie. Hierdoor gaat over de gehele levensduur van de betoninnovatie CCS meer waarde verloren dan bij de toepassing van regulier CEM I en CEM III/B, zoals het geval is bij Innovatiescenario 4. Het economisch waardebehoud van Innovatiescenario 4 is echter bijna verdubbeld ten opzichte van 2020 en komt zo'n 2,5% hoger uit dan het basisscenario. Dit komt met name door de toepassing van CSA-beliët in plaats van CEM III/B in OC III, wat 15% lagere kosten met zich meebrengt bij de toepassing van de binder en geen negatieve invloed heeft op de recyclewaarde.

5.4 Verhouding circulariteitsindicatoren ten opzichte van elkaar

De resultaten van alle scenario's zijn uitgedrukt in de vier circulariteitsindicatoren die we binnen deze studie aanhouden. Hierdoor is het mogelijk om de verhouding tussen de verschillende circulariteitsindicatoren ten opzichte van elkaar te onderzoeken.

Uit de resultaten van de innovatiescenario's komt duidelijk naar voren dat bijna elk scenario een positieve invloed heeft op elke indicator, in vergelijking met het basis-scenario. De vier innovatiescenario's geven echter lang niet altijd hetzelfde beeld. Sterker nog, een volledige focus op één van de indicatoren (door middel van een scenario) zorgt in veel gevallen voor een suboptimale verbetering van de overige indicatoren en in een enkel geval zelfs voor een verslechtering ten opzichte van het basisscenario. Hieronder bespreken we dit voor ieder innovatiescenario.

Innovatiescenario indicatoren 'klimaatimpact' en 'MKI-score'

Wanneer alleen naar klimaatimpact en de MKI-score wordt gekeken, zorgt dit in veel gevallen voor een minder grote verlaging van primair materialenverbruik dan maximaal mogelijk is. Zo zijn er innovaties die ondanks hun lagere milieu-impacts meer primair materiaal verbruiken over de levensduur van beton dan alternatieve innovaties. Ook kan een focus op alleen milieu-impacts een negatieve invloed op het economisch waardebehoud hebben, bijvoorbeeld omdat sommige innovaties die milieu-impacts verlagen meer kosten met zich meebrengen bij de inkoop van materialen.

Innovatiescenario indicator 'primair materialenverbruik'

Op dezelfde manier zorgt een focus op alleen primair materiaalverbruik ook voor een verlaging van de klimaatimpact en de MKI-score, maar in mindere mate dan binnen het innovatiescenario voor milieu-impacts. Secundaire materialen hebben namelijk veelal een lagere impact dan primaire materialen, maar deze impact kan nog steeds hoger zijn dan van innovaties met meer primair materiaal. Het effect van dit scenario op economisch waardebehoud van materialen is wisselend positief (meer waardebehoud dan het basisscenario), al is het waardebehoud over het algemeen niet zo hoog als het maximaal zou kunnen zijn. Alleen in 2030 is het economisch waardebehoud van dit scenario lager dan het basisscenario, aangezien in dat geval een neutrale innovatie voor primair materiaalverbruik (CCS) een negatieve invloed heeft op economisch waardebehoud.

Innovatiescenario 'economisch waardebehoud materialen'

Een focus op alleen economisch waardebehoud zorgt niet in alle gevallen voor een verlaging van milieu-impacts of van primair materiaalverbruik. In sommige gevallen kan een innovatie die voor grote milieubesparingen zorgt bijvoorbeeld hogere materiaalkosten met zich meebrengen. Daardoor gaat er over de gehele levensduur uiteindelijk meer waarde verloren. In andere gevallen kan een innovatie geen enkele invloed op het economisch waardebehoud van materialen hebben, terwijl de invloed op milieu-impacts en primair materiaalverbruik wel groot is. Hierdoor worden deze innovatie niet meegenomen binnen scenario's voor maximaal economisch waardebehoud.

5.5 Impact van de circulaire indicatoren op de keuze van betoninnovaties

Om de verschillen tussen de innovatiescenario's verder toe te lichten, bespreken we hier in meer detail vier innovaties waar deze verschillen het duidelijkst naar voren komen:

1. Carbstone (OC I)
2. Solidia (OC I).
3. Mechanisch gerecycled zand en grind (OC I-IV).
4. Cement met CCS (OC II-IV).

Carbstone en Solidia

In 2020 en 2025 is er een duidelijk verschil tussen de toegepaste alternatieve binders in de vier innovatiescenario's voor OC I. Zo wordt Solidia met een lagere klimaatimpact en MKI-

score geassocieerd, maar zorgt Carbstone voor een lager primair materiaalverbruik en een hoger economisch waardebehoud.

Het verschil tussen deze innovaties wordt verklaard door het feit dat Solidia meer primair materiaal bevat zoals Wollastoniet en zand, maar meer CO₂ opvangt. Het primair materiaalverbruik van Solidia is daardoor hoger, ondanks dat de milieu-impact ervan lager is. Bij de toepassing van Carbstone is daarnaast ook nog verschil te zien tussen de indicatoren primair materiaalverbruik en economisch waardebehoud. Zo zorgt Carbstone in combinatie met Carbon8 voor het minste waardeverlies, doordat bij deze combinatie gebruik gemaakt wordt van afvalmateriaal met lage tot geen economische waarde (onder andere LD-slakken en AEC-vliegas). In combinatie met gerecycled grind zorgt Carbstone echter voor het minste primaire materiaalverbruik, aangezien Carbon8 meer primaire materialen bevat (met name zand).

De optimale toepassing van deze innovaties in OC I is daarmee verschillend voor bijna elke circulaire indicator van dit onderzoek.

Mechanisch gerecycled zand en grind

Een andere innovatie die een uiteenlopend effect heeft op de indicatoren is mechanisch gerecycled zand en grind. Wat hierbij opvalt is dat deze innovatie een zeer grote invloed heeft op het verlagen van het primair materiaalverbruik, maar dat de invloed ervan op de twee circulaire indicatoren klimaatimpact en MKI-score marginaal is en neutraal op de circulaire indicator 'economisch waardebehoud' (geen effect).

De grote invloed van deze innovatie op de circulaire indicator 'primair materiaalverbruik' wordt veroorzaakt door de relatief hoge massa van grind en zand in beton. Primair zand en grind maken namelijk tot 82% van de totale massa van beton uit (exclusief water), waardoor het vervangen van dit materiaal van grote invloed is op het primaire materiaalverbruik. De milieu-impact van primair zand en grind in beton is echter laag in vergelijking met cement of wapeningsstaal, waardoor het effect op de twee circulaire indicatoren 'klimaatimpact' en 'MKI-score' gering is. Secundair zand en grind is daarnaast evenveel waard als primair zand en grind. Ondanks dat deze materialen relatief hoogwaardig zijn gerecycled in de vorige levenscyclus van beton, wordt er binnen de scope van dit onderzoek dus geen effect op het economisch waardebehoud van de materialen vastgesteld.

Cement met CCS

De toepassing van cement met CCS in OC II-IV zorgt ten slotte voor een sterke verlaging van de circulaire indicatoren 'klimaatimpact' en 'MKI-score' in 2030, maar heeft op de twee andere indicatoren primair materiaalverbruik en economisch waardebehoud een ander effect.

Op de indicator 'primaire materiaalverbruik' heeft CCS geen enkele invloed, aangezien de toegepaste materialen zelf niet veranderen ten opzichte van referentiebeton. Daarnaast is CCS met hogere kosten geassocieerd, waardoor er over de gehele levensduur van het beton uiteindelijk meer economische waarde verloren gaat. De toepassing van CCS heeft zodanig een nadelig effect op de circulaire indicator 'economisch waardebehoud', ondanks dat klimaatimpact en MKI-score afnemen.

5.6 Omissies

De vier indicatoren vullen elkaar goed aan. Er zijn echter nog zaken waar verder naar gekeken zou kunnen worden. In deze paragraaf bediscussiëren we enkele mogelijke aandachtspunten voor de indicatoren die uit de resultaten naar boven zijn gekomen.

Hernieuwbaar materiaal

Hernieuwbaar materiaal is binnen dit onderzoek gekarakteriseerd als ‘niet primair’, aangezien de winning van hernieuwbare materialen in principe niet uitgeput wordt. Het gevolg van deze karakterisering is in dit onderzoek echter niet duidelijk naar boven gekomen, aangezien er geen sprake was van hernieuwbaar materiaal in zowel het basisscenario als de innovatiescenario's. Geadviseerd wordt om in de toekomst ook te kijken naar de invloed van hernieuwbaar materiaal op de vier circulaire indicatoren van dit onderzoek.

Economische waarde van materialen

De kosten van secundair materiaal zijn sterk marktgedreven, mede doordat de toevoer van vrijkomend secundair materiaal niet constant is. De kosten zijn afhankelijk van enerzijds het aanbod uit sloop en de kosten van inname en verwerking, en anderzijds van de vraag naar secundaire materialen. De innamekosten zijn sterk afhankelijk van het aanbod (en daarmee de hoeveelheid die wordt gesloopt) en de vraag naar het materiaal. Het is dus een onzekere factor in het economisch waardebehoud. In dit onderzoek is hier rekening mee gehouden, door de kosten en opbrengsten van alle materialen in alle jaren te baseren op de huidige markt. De kosten en opbrengsten in de toekomst zijn hierbij gebaseerd op een vaste jaarlijkse inflatie van 1,5% voor alle materialen (zie Bijlage C en D). Dit maakt de resultaten nu (hier: 2020), in 2025 en in 2030 goed vergelijkbaar met elkaar, maar dit introduceert ook een onzekerheid in de resultaten. Het verlagen van deze onzekerheid zou nog verder onderzocht kunnen worden, bijvoorbeeld door jaarlijks te monitoren hoe de waarde van materialen zich ontwikkelt.

RWS kan daarnaast zelf ook een grote invloed uitoefenen op de kosten en opbrengsten van materialen. Als RWS inzet op het gebruik van een bepaalde innovatie, zal de vraag naar de materialen geassocieerd met die innovatie waarschijnlijk stijgen. De in dit onderzoek gebruikte kosten zijn daarom niet een-op-een over te nemen wanneer de marktvraag verandert. In Bijlage D zijn de factoren die deze kosten kunnen beïnvloeden, uitgewerkt. Het is aan te raden hier rekening mee te houden en onderzoek naar te blijven doen.

Interpretatie van economische waarde

Economisch waardebehoud is in deze studie uitgedrukt als een relatieve factor, die weergeeft hoeveel waarde er behouden blijft (factor > 1) of verloren gaat (factor < 1) over de gehele levensduur van een materiaal. Hiermee kan worden verzekerd dat de materialen per uitgegeven euro de meeste waarde behouden.

Economisch waardebehoud had echter ook als een absolute waarde uitgedrukt kunnen worden. Bij Innovatiescenario 2 (laagste MKI-score) in 2025 gaat bijvoorbeeld in absolute zin minder waarde verloren dan in Innovatiescenario 4 (laagste waardeverlies materiaal). Zo gaat er in Innovatiescenario 2; 70,71-84,05 miljoen euro verloren, waar er in Innovatie-

scenario 4; 71,12-84,34 miljoen euro verloren gaat. Relatief gezien gaat er in Innovatiescenario 4 echter minder waarde verloren, omdat de toegepaste materialen na gebruik hoogwaardiger gerecycled worden. Ondanks dat de waarde van de toegepaste materialen in Innovatiescenario 4 dus hoger is dan in Innovatiescenario 2, is het relatieve waardeverlies *per euro ingekochte waarde* minder groot. Dit brengt daarmee een discussiepunt voor RWS naar boven, namelijk waar wil RWS op sturen bij economische waarde: de laagste investering of het minste economisch waardeverlies. In dit onderzoek is voor het minste economisch waardeverlies gekozen, aangezien dit het meest objectieve beeld geeft per euro waarde.

Leveringszekerheid en materiaalbeschikbaarheid

Binnen dit onderzoek hebben we geen rekening gehouden met de beschikbaarheid van (secundair) materiaal. Het in kaart brengen van deze beschikbaarheid is van groot belang om te onderzoeken in hoeverre circulaire doelstellingen in de praktijk behaald kunnen worden.

6 Sturen op circulariteit

In dit hoofdstuk lichten we toe wat de mogelijkheden zijn voor RWS om te sturen op circulair materiaalgebruik binnen haar betonketen. Dit doen we door de resultaten van dit onderzoek op materiaalniveau te vertalen naar mogelijkheden voor uitvragen op object-niveau (Paragraaf 6.1). Vervolgens beschrijven we wat er nog nodig is om op circulariteit in projecten te kunnen sturen (Paragraaf 6.2).

6.1 Mogelijkheden voor circulair materiaalgebruik in 2030

De ambitie van RWS om 100% circulair te opereren in 2030 kan bijna behaald worden, wanneer specifiek gekeken wordt naar de indicator primair materiaalverbruik. Tot 90% reductie van primair materiaalverbruik lijkt namelijk mogelijk binnen de betonketen van RWS, op basis van de afbakening en aannames die zijn gebruikt in dit onderzoek.

Met de huidige selectie aan betoninnovaties daalt het primaire materiaalverbruik binnen de betonketen van RWS (in- en uitgaand) met 85-90% tot 2030. Deze reductie is met name te danken aan het gebruik van mechanisch gerecycled grind en zand. Hier moet worden opgemerkt dat er dit onderzoek van uit is gegaan dat 100% van het benodigde zand en grind kan worden ingevuld met gerecycled zand en grind (beschikbaarheid is niet meegenomen in dit onderzoek).

In het innovatiescenario met het minste primaire materiaalverbruik wordt 1.500 kton materiaal in 2030 gebruikt, waarvan 131 kton (8,7%) van primaire afkomst is. Het beton wordt na einde levensduur/na gebruik voor 99% gerecycled en het staal voor 95%. De berekening is in overeenstemming met de SBK-Bepalingsmethode gedaan. Dit leidt tot een materiaalverlies van 15 kton (1%). In totaal wordt er daarmee 146 kton (10%) materiaal (131 kton primaire afkomst + 15 kton materiaalverlies) 'verbruikt', terwijl het overige materiaal (90%) van secundaire afkomst is.

Wanneer wordt uitgegaan van het minimaliseren van primaire materiaalverbruik is er ook een verlaging van klimaatimpact en MKI-score en mogelijk sprake van een verhoogd economisch waardebehoud. Het sturen op primair materiaalverbruik resulteert dus ook in een verlaging van de andere drie circulaire indicatoren uit dit onderzoek.

Als primaire materiaalverbruik wordt geminimaliseerd, dalen klimaatimpact en MKI-score tot maximaal 45% tot 2030. Voorwaarde voor deze maximale daling, is dat CCS (Carbon Capture and Storage) wordt toegepast. CCS heeft een neutrale invloed op het primaire materiaalverbruik, maar laat voor de innovatiescenario's echter het economisch waardebehoud dalen ten opzichte van het basisscenario. Als CCS niet meegenomen wordt voor de berekening, dalen klimaatimpact en MKI-score met 20% en stijgt economisch waardebehoud met 3% voor de innovatiescenario's ten opzichte van het basisscenario.

6.2 Mogelijkheden launching customer trajecten & koploperaanpak

Op basis van de resultaten van dit onderzoek heeft RWS dus de mogelijkheid om het primaire materiaalverbruik met zo'n 90% te verminderen tot 2030, door bij het toepassen van betoninnovaties te sturen op de circulaire indicator primair materiaalverbruik.

In deze paragraaf werken we de mogelijkheden uit die RWS heeft om via haar innovatiebeleid, de koploperaanpak en het launching customertraject (LCT) versneld de ambities voor duurzaamheid en circulariteit in haar opgave te realiseren, met de geselecteerde innovaties.

De betoninnovaties zijn in Tabel 2 voor de vier objectcategorieën beoordeeld op het TRL-niveau. Door de innovaties binnen experimenteerruimte (koplopergroepen en LCT) in verschillende projecten van de RWS-opgave toe passen, kan RWS kennis en ervaring opdoen over de mogelijkheden en beperkingen van een innovatie. Binnen de LCT kan het TRL-niveau van de innovatie voor een objectcategorie verhoogd worden.

De meeste innovaties komen in aanmerking voor het LCT, aangezien TRL 9 bij deze innovaties nog niet gehaald is. Deze innovaties zijn nog niet uitontwikkeld en kunnen niet binnen de bestaande technische regelgeving in koploperprojecten worden toegepast. Meer informatie over de vereiste wijziging binnen de technische regelgeving staat in het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b) beschreven.

Alternatieve betoninnovaties

Circulariteit kan worden gestimuleerd in projecten van RWS, door de toepassing van alternatieve bindmiddelen binnen LCT voor de twee objectcategorieën OC III en IV. Met name de toepassing van geopolymere (zoals Geo-beton™ of ASCEM® cement) en CSA-beliët (bijvoorbeeld Ternocem®) zijn hierbij interessant. Daarmee worden de mogelijkheden voor vervanging van CEM I als CEM III/B door alternatieve bindmiddelen voor de twee objectcategorieën OC III en IV onderzocht.

Er is in dit onderzoek aangenomen dat de kosten van geopolymere gelijk zijn aan die van CEM III/B en dat CSA-beliët goedkoper is. Dit is niet met zekerheid te zeggen doordat er voor deze aanname geen rekening met opschaling is gehouden.

De toepassing van Carbstone (in combinatie met Carbon8) en Solidia is specifiek voor objectcategorie OC I zeer interessant voor RWS om de circulariteit van het materiaalgebruik binnen haar betonketen effectief te verhogen. Deze innovaties hebben al TRL 9 bereikt maar objectcategorie OC I omvat maar een fractie van het areaal van RWS (~4,5%). De innovaties zijn technisch uitontwikkeld en dus al toepasbaar in de RWS-opgave. Deze innovaties zouden daarom al toegepast kunnen worden in de koploperaanpak.

Circulair bouwen innovaties

Met de toepassing van mechanisch gerecycled grind en zand (bijvoorbeeld Circuton of Smart Liberator) binnen het LCT kan circulariteit in projecten van RWS sterk gestimuleerd worden. Dit is met name het geval als deze innovatie wordt gecombineerd met gerecycled cement en/of alternatieve bindmiddelen.

Uit dit onderzoek komt namelijk naar voren dat de toepassing van mechanisch gerecycled grind en zand binnen alle objectcategorieën de grootste mogelijkheid geeft om het primair materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS te verlagen. De toepassing binnen OC II t/m OC IV kan nog verder ontwikkeld worden, aangezien het TRL binnen deze objectcategorieën TRL 7 is.

Omdat bij mechanisch gerecycled grind en zand ook cement vrijkomt, ligt hier een extra lkans. Door deze innovaties verder te ontwikkelen, kan vrijgekomen cement ook hoogwaardig toegepast worden binnen de betonketen. Dit kan een positief effect hebben op alle circulaire indicatoren. Het primair materiaalverbruik en de milieu-impacts van gerecycled cement zijn namelijk per definitie laag ten opzichte van het basisscenario, aangezien dit een secundair materiaal is dat hoog-impact Portlandcement (gedeeltelijk) kan vervangen. De TRL van deze innovatie is nog laag voor OC II t/m OC IV (TRL 4). Daarom is met name toepassing binnen deze OC's interessant.

Wapeningsinnovaties

De toepassing van basaltvezelstaven kan de circulariteit in projecten van RWS ook stimuleren. Deze innovatie verlaagt het totaal benodigde gewicht aan materialen voor wapening met 90%, ten opzichte van staal. Zo is er ten opzichte van staal bijna 90% minder gewicht nodig. Hierdoor is basaltvezelwapening geassocieerd met aanzienlijk lagere impacts op de circulaire indicatoren 'klimaatimpact', 'MKI-score' en 'primair materiaalverbruik'. Doordat dit nog een relatief nieuwe innovatie is voor gewapend beton, is het effect op de circulaire indicator 'economisch waardebehoud' nog niet geheel bekend. Er wordt van uitgegaan dat met name basaltvezelstaven probleemloos met beton mee gerecycled kan worden tot betongranulaat - dit is echter wel in op een laagwaardiger manier dan betonrecycling. Wel is de betonregelgeving nog niet geheel afgestemd op het gebruik van niet-stalen wapening.

Staalvezels lijken een minder interessante innovatie, aangezien deze een negatief effect hebben op de recyclebaarheid van beton (voor meer toelichting, zie de kostencurves beton van CE Delft (2020b)). Hierdoor gaat potentieel meer staal verloren na gebruik en wordt het primaire materiaalverbruik dus verhoogd, ondanks dat er minder materiaal nodig is.

Overige innovaties

Met betrekking tot circulariteit is CO₂-afvang en opslag bij cementklinkerproductie (CCS) een minder aantrekkelijke innovatie. Deze techniek zorgt weliswaar voor grote reducties in de klimaatimpact van zowel CEM I als CEM III/B, maar zorgt ook voor een verminderd waardebehoud ten opzichte van het basisscenario doordat de kosten van het cement hoger zijn. Daarnaast heeft deze techniek geen enkele invloed op het primaire materiaalverbruik, aangezien het materiaal zelf onveranderd blijft. Omdat er geen verandering plaatsvindt in het materiaal, maar in het productieproces ervan, hoeft het materiaal niet te worden getest in een LCT.

7 Conclusie en aanbevelingen

Binnen dit onderzoek zijn de vijf deelvragen die zijn geïntroduceerd in Hoofdstuk 1 beantwoord. In dit hoofdstuk worden de antwoorden van deze deelvragen samengevat en aanbevelingen gedaan.

Kort samengevat is met dit onderzoek vastgesteld dat RWS de circulariteit van het materiaalgebruik binnen diens betonketen met vier circulaire indicatoren kan meten.

Om dit en verdere verbetering van deze circulariteit mogelijk te maken, is het wel nodig dat RWS circulariteit een plek geeft binnen diens inkoopstrategie en deze strategie ook specifiek voor beton opstelt. Ook moeten de circulaire indicatoren meegenomen worden bij inkoop. Dit heeft zowel betrekking op data die uitgevraagd wordt aan opdrachtnemers als op data die RWS zelf bijhoudt en verzamelt. Hierbij kunnen materialenpaspoorten een grote rol spelen. Daarnaast moet gelet worden op materiaalbeschikbaarheid van zowel primaire als secundaire materialen, bijvoorbeeld door sloop- en bouwprojecten op elkaar af te stemmen.

Ten slotte is het belangrijk dat RWS eerst naar mogelijkheden voor levensduurverlenging en het ontwerp van betonobjecten kijkt, voordat er specifiek naar materiaalgebruik gekeken wordt. De meest duurzame en circulaire optie is immers om sloop en nieuwbouw van objecten zoveel mogelijk te voorkomen, voordat materiaalrecycling en -hergebruik wordt overwogen. Hiervoor kan onder andere gekeken worden naar aanpasbaarheid en herbruikbaarheid van objecten (Coenen (2019)).

7.1 Hoe kan de circulariteit van materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS kwantitatief gemeten worden?

Binnen dit onderzoek zijn vier circulaire indicatoren vastgesteld waarmee de circulariteit van materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS kwantitatief gemeten kan worden, te weten:

1. Klimaatimpact materiaalgebruik betonketen (in kton CO₂-eq. per jaar).
2. Milieukostenindicator (MKI-score) materiaalgebruik betonketen (in miljoen € MKI per jaar).
3. Primair materiaalverbruik (in kton per jaar).
4. Economisch waardebehoud materialen (in factor economisch waardebehoud).
5. Deze circulaire indicatoren zijn vastgesteld op basis van de drie doelen die binnen de Circulaire Materialenstrategie van RWS centraal staan (zie Hoofdstuk 2).
6. De circulaire indicatoren gaan in op het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS en vallen daarmee binnen de 'R-ladder' van circulariteit met name onder 'recycle'.

7.2 Hoe circulair is het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS nu en welke mogelijkheden zijn er om de circulariteit van materialen te verhogen in Nu (hier: 2020), in 2025 en in 2030?

De circulariteit van de basisscenario's en de vier innovatiescenario's zijn in Hoofdstuk 5 voor de vier circulaire indicatoren uitgewerkt.

De circulariteit van het materiaalgebruik binnen de huidige betonketen van RWS is middels het basisscenario berekend. De mogelijkheden om de circulariteit van het materiaalgebruik voor de betonketen van RWS te verhogen is met vier innovatiescenario's in kaart gebracht. Deze vier innovatiescenario's zijn elk volledig afgestemd op de best mogelijke situatie voor één van de vier circulaire indicatoren.

Bij alle scenario's is het beton areaal van RWS opgedeeld in vier objectcategorieën. Hiervan zijn de composities en jaarlijkse volumes aangelegd beton binnen RWS vastgesteld op basis van de situatie in 2020. Bij het basisscenario is de situatie identiek in 2020, 2025 en 2030. Bij de innovatiescenario's omvat elk scenario per jaar een uniek maatregelenpakket met innovaties die aansluit bij het scenario.

Uit de berekeningen blijkt dat door het toepassen van geselecteerde innovaties, de circulariteit van het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS toe kan nemen in alle richt-jaren. Wanneer specifiek wordt gestuurd de indicator 'primair materiaalgebruik', is het mogelijk om het primair materiaalverbruik met 90% te verlagen⁴, terwijl tegelijkertijd de klimaatimpact en de MKI-score beide met 20% dalen en het economisch waardebehoud met 3% toeneemt. Wanneer op de indicator 'klimaatimpact' wordt gestuurd, zal ook de cement met CCS worden toegepast en kan de klimaatimpactreductie oplopen tot 45%. Dit heeft geen invloed op de indicator primair materiaalverbruik, maar zorgt wel voor een lager economisch waardebehoud.

7.3 Hoe verhouden verschillende circulaire indicatoren zich ten opzichte van elkaar voor de betonketen van RWS?

Circulariteit is niet in één indicator te vatten. Wanneer de focus op de circulariteit van materiaalgebruik ligt, zoals in dit onderzoek het geval is, dan is primair materiaalverbruik de belangrijkste indicator. De overige drie circulaire indicatoren vullen de eerstgenoemde aan, aangezien het ultieme doel van circulair materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS het verduurzamen van deze betonketen is. Minder primair materiaalverbruik als circulaire indicator moet zodanig niet voor een hogere klimaatimpact of MKI-score of meer economische waardebehoud zorgen.

Het maximaliseren van de derde circulaire indicator – primair materiaalverbruik – staat daarmee voorop, met als voorwaarde dat de overige circulaire indicatoren geen verslechterend beeld laten zien ten opzichte van het basisscenario. Deze circulaire indicatoren moeten ook zoveel mogelijk geoptimaliseerd worden, zo lang dit geen negatieve invloed heeft op het primaire materiaalverbruik.

Er moet daarnaast nog verder onderzocht worden wat de invloed van hernieuwbaar materiaal is op de circulaire indicator primair materiaalverbruik. Ook het bepalen van de kosten en opbrengsten (i.e. economische waarde) van materialen moet jaarlijks worden gemonitord. Deze kosten kunnen namelijk door invloed van de markt en van RWS flink kunnen veranderen door de jaren heen.

⁴ Hierbij is het belangrijk de kanttekening te plaatsen dat we niet naar beschikbaarheid van innovatieve materialen hebben gekeken.

7.4 Welke mogelijkheden heeft RWS om te sturen op circulair materiaalgebruik binnen de eigen betonketen?

Op basis van de circulaire indicator primair materiaalverbruik is Hoofdstuk 6 toegelicht dat het mogelijk lijkt om tot 2030 het primaire materiaalverbruik tot 90% te kunnen verlagen. Hierdoor wordt maximaal 10% van alle materialen in gebruik door RWS in 2030 ‘verbruikt’ (131 kton primaire materialen die ingekocht worden en 14-15 kton materiaal dat verloren gaat na gebruik in de betonketen van RWS). Hierbij wordt uitgegaan van afvalscenario’s voor beton en wapeningsstaal volgens de SBK-Bepalingsmethode, maar is nog geen rekening gehouden met de leveringszekerheid en materiaalbeschikbaarheid van secundaire materialen.

Met 90% circulair materiaalgebruik – uitgaande van de circulaire indicator primair materiaalverbruik – zit RWS dichtbij diens ambitie om in 2030 een 100% circulaire operatie te voeren. Binnen dit innovatiescenario dalen de klimaatimpact en MKI-score en van het primaire materiaalverbruik zo’n 20%. Het economisch waardebehoud stijgt dan met 3%.

Aanbevelingen voor Launching Customer-trajecten

RWS heeft de mogelijkheid om binnen launching-customer traject (LCT) te sturen op innovaties die bijdragen aan circulair materiaalgebruik van de betonketen van RWS.

We adviseren RWS om zichzelf in ieder geval op te stellen als launching customer voor de volgende innovaties:

- mechanisch gerecycled zand en grind;
- mechanisch en thermisch gerecycled cement;
- alternatieve binders, zoals geopolymere en CSA-beliet.

Deze innovaties kunnen sterk bijdragen aan circulair materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS. Ze vervangen namelijk materialen die nu nog grotendeels van primaire afkomst zijn. Met name voor OC III en OC IV is dit interessant voor RWS, aangezien binnen deze objectcategorieën de meeste winst te behalen valt op het gebied van circulariteit. RWS kan hier ook op het gebied van regelgeving een rol spelen. Dit is van belang omdat voor innovaties zoals geopolymere de normen aangepast moeten worden.

Door deze innovaties verder te laten ontwikkelen, kunnen deze zo snel mogelijk TRL 9 behalen voor alle objectcategorieën. Deze ontwikkeling kan ervoor zorgen dat het aanbod van deze innovaties groeit, waardoor deze op grote schaal toe te passen zijn binnen de betonketen van RWS. In paragraaf 6.1 wordt ook ingegaan op de mogelijkheden van alle andere innovaties binnen het LCT.

Aanbevelingen voor Koploperaanpak

Binnen de Koploperaanpak heeft RWS de mogelijkheid om pilots op te zetten waarbij gestuurd wordt op circulair materiaalgebruik met de vier circulaire indicatoren uit dit onderzoek.

We adviseren RWS om Koploperpilots voor circulariteit te starten met de volgende innovaties in OC I:

- Solidia;
- Carbstone.

Deze innovaties voor OC I hebben relatief weinig invloed op de circulariteit van het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS. Ze kunnen echter wel als testcase voor Koploperpilots dienen aangezien ze TRL 9 al bereikt hebben en toegepast kunnen worden binnen relatief simpele objecten in OC I.

7.5 Welke voorwaarden zijn er om te sturen op circulair materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS?

Om goed te kunnen sturen op circulair materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS, liggen er nog enkele uitdagingen. Door in te spelen op deze uitdagingen kunnen mogelijkheden beter worden opgepakt. Ook kan de circulariteit van het materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS nog verder verbeterd worden.

Geadviseerd wordt om de inkoopstrategie uit te breiden, de verschillende duurzaamheidsambities van RWS tegen elkaar af te wegen, data-uitvraag op een uniforme wijze aan te scherpen met kwantitatieve circulaire indicatoren, dataverzameling uit te breiden met materialenpaspoorten en rekening te houden met materiaalbeschikbaarheid. In Bijlage E zijn onderstaande aanbevelingen in meer detail toegelicht.

Duurzaamheidsambities prioriteren

RWS heeft duurzaamheidsambities op het gebied van circulariteit (100% circulaire operatie in 2030) en klimaat (klimaatneutrale operatie in 2030). Momenteel komt alleen diens klimaatambitie terug in de inkoopstrategie die wij hebben ingezien, uitgedrukt als de MKI-score. Deze inkoopstrategie is bovendien opgesteld voor asfalt, en nog niet specifiek gedefinieerd voor beton.

We adviseren RWS om:

- een beleidskeuze te maken over de prioritering van de circulariteitsambitie en de klimaatambitie, door één van deze ambities de prioriteit te geven;
- de inkoopstrategie ook voor beton te definiëren;
- het meenemen van kwantitatieve circulaire indicatoren expliciet op te nemen in de inkoopstrategie, naast de MKI-score.

Wanneer beide duurzaamheidsambities tegen elkaar afgewogen worden, kan ervoor gekozen worden om de klimaatambitie boven de circulariteitsambitie te prioriteren. Een circulaire betonketen heeft immers als ultieme doel het verduurzamen van deze betonketen. In dit geval worden de circulaire indicatoren voor het primair materiaalverbruik en het economisch waardebehoud ondergeschikt aan de circulaire indicator voor de klimaatimpact.

Data-uitvraag inkoop aanscherpen

Om circulariteit mee te kunnen nemen in uitvragen van RWS, moet data beschikbaar zijn en verzameld worden. Momenteel ligt de focus bij data-uitvraag voor duurzaamheid nog op de MKI-score.

We adviseren RWS om:

- Extra data uit te vragen bij uitvoerders voor primair materiaalverbruik en hierbij zoveel mogelijk aan te sluiten bij data die toegepast wordt voor LCA-studies (MKI-score berekening).

- Marktconsultatie op te zetten om te onderzoeken hoe de kosten van materialen het beste vastgesteld kunnen worden voor het economisch waardebehoud, aangezien deze informatie niet standaard meegenomen wordt in een LCA-studie.
- De verantwoordelijkheid voor het verzamelen van alle data bij de uitvoerders te leggen. Binnen koploperpilots kan dit getest en voorgelegd worden aan uitvoerders.
- Bij objecten de circulaire indicatoren voor primair materiaalverbruik en economisch waardebehoud te wegen, volgens de formule die ontwikkeld is door SGS Intron (zie Hoofdstuk 2).
- Materialenpaspoorten te gebruiken om de data en informatie voor alle circulaire indicatoren te verzamelen en bij te houden, en het gebruik van materialenpaspoorten door uitvoerders voor te schrijven bij uitvragen van RWS.
- Het gebruik van materialenpaspoorten en circulaire indicatoren te ontwikkelen in samenwerking met andere opdrachtgevers (Prorail, etc.) om uniformiteit te waarborgen voor de uitvoerders die data moeten aanleveren.
- Jaarlijks een nulmeting te maken van het betonareaal van RWS, bijvoorbeeld op basis van de objectcategorieën die zijn toegepast in dit onderzoek.
- Nieuwe betonobjecten bij te houden volgens een uniforme opdeling, bijvoorbeeld op basis van de objectcategorieën die zijn toegepast in dit onderzoek.
- Koploperpilots en LCT's op te zetten waarin circulaire indicatoren uit dit onderzoek meegenomen worden.
- Verschillende partijen en RWS medewerkers te betrekken bij de ontwikkeling van circulaire uitvragen van RWS: inkopers, projectmanagers, uitvoerders/inschrijvers. Door iedereen te betrekken kunnen uitdagingen zoals eenvoud, transparantie, verificatie en controle worden behandeld en is de kans van slagen in de praktijk het grootst.
- Steeds meer functioneel uit te vragen, om uitvoerders de creatieve ruimte te geven om circulaire en duurzame oplossingen te bieden. Hierbij moet ook in acht genomen worden dat beton door andere materialen zoals hout zou kunnen worden vervangen.

Materiaalbeschikbaarheid meenemen

Ten slotte moet ook rekening gehouden worden met de materiaalbeschikbaarheid van zowel primaire als secundaire materialen. In dit onderzoek is er vanuit gegaan dat er bij de toepassing van innovaties voldoende materiaal beschikbaar is. Dit is echter niet per definitie het geval. Materialen die benodigd zijn voor innovatie worden mogelijk immers ook (al) elders toegepast.

We adviseren RWS om:

- Bij het toepassen van innovaties binnen een object de uitvoerder te laten rapporteren op de beschikbaarheid van de toegepaste materialen, door aantoonbaar te maken waar materialen vandaan komen en dat deze materialen in voldoende mate beschikbaar zijn voor toepassing in het object.
- Sloop- en bouwwerkzaamheden op elkaar af te stemmen waar mogelijk, zodat secundaire materialen direct toegepast kunnen worden.
- Ook buiten de betonketen te (blijven) kijken voor toepassing voor en bron van secundair materiaal. Veel secundaire materialen die in beton toegepast worden zijn immers al afkomstig van buiten de betonketen.
- Bij objecten niet standaard uit te gaan van de afvalscenario's uit de SBK-Bepalingsmethode, maar om de sloop(mogelijkheden) op te laten geven door de uitvoerder voor het project in kwestie.
- Zeggenschap te houden over vrijkomende objecten en materialen na sloop, zodat RWS meer invloed op en inzicht in hoogwaardig hergebruik en recycling van materialen heeft. Dit kan bijvoorbeeld door de restwaarde van vrijkomende materialen mee te

nemen in de scope van een uitvraag van RWS en door expliciet te beschrijven hoe aannemers zich aan de hand van de vier circulaire indicatoren kunnen onderscheiden met hoogwaardige inzet van vrijkomend materiaal.

8 Bibliografie

- ABN-AMRO, 2020. *Blik op oneindig in staal en aluminium*. [Online]
Available at: <https://insights.abnamro.nl/2020/06/blik-op-oneindig-in-staal-en-aluminium/>
- Accenture, 2019. *Cementing growth in an oversupplied market*. [Online]
Available at: <https://www.accenture.com/us-en/blogs/chemicals-and-natural-resources-blog/cementing-growth-in-an-oversupplied-market>
[Geopend 10 April 2020].
- AD, 2019. *Dump overproductie : Europese staalindustrie in crisis*. [Online]
Available at: <https://www.ad.nl/economie/dump-overproductie-europese-staalindustrie-in-crisis-ab031dee/>
- Assi, L. N., Carter, K., Deaver, E. & Ziehl, P., 2020. Review of Availability of Source Materials for Geopolymer/Sustainable Concrete. *Journal of Cleaner Production*.
- CBS Statline, 2020a. *Bouwnijverheid; toegevoegde waarde in basisprijzen, volume-index 2015=100*. [Online]
Available at: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/84294NED/table>
[Geopend juni 2020].
- CBS Statline, 2020b. *Producentenprijzen (PPI); afzet-, invoer-, verbruiksprijzen, index 2015=100*. [Online]
Available at:
<https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83935NED/table?ts=1563280192558>
[Geopend juni 2020].
- CBS Statline, 2020c. *Investering in materiele vaste activa; bedrijfstak*. [Online]
Available at:
<https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/81352ned/table?ts=1591788034164>
[Geopend juni 2020].
- CE Delft ; Delta Concrete Consult, 2019. *Verduurzaming betongebruik bij RWS - Identificatie object-technologiecombinaties in de GWW*, Delft: CE Delft.
- CE Delft en TNO, 2019. *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, 2019. *Verkenning circulaire prestatie-indicatoren voor materiaalgebruik RWS*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2020a. *Klimaatimpact van betongebruik in de Nederlandse bouw*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2020b. *Kostencurve beton*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2020c. *Beton CO2-footprint van beton in NL*, Delft: CE Delft.
- Cobouw, 2009. *ENCI levert weer hoogovencement*. [Online]
Available at: https://www.cobouw.nl/innovatie/nieuws/2009/09/enci-levert-weer-hoogovencement-101137089?vakmedianet-approve-cookies=1&_ga=2.80630481.795810012.1607433733-1165240118.1590483387
- Coenen, T., 2019. *Circular bridges and viaducts*, Enschede: University of Twente.



- EC, 2014. *General Annexes to Horizon 2020 : Work Programme 2014-2015*, Brussels: European Commission (EC).
- EC, 2018. *PEFCR Guidance document : Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs). version 6.3.*, Brussel, België: European Commission (EC).
- Ecochain en TNO, 2018. *LCA-Achtergrondrapport voor Nederlandse Asfaltmengsels. Versie 2.1*, sl: Ecochain en TNO.
- EIB, 2009. *Toekomstverkenning bouwgrondstoffen : Structurele en conjuncturele ontwikkelingen in de bouwsector en de gevolgen voor de bouwgrondstoffenvoorziening tot 2040*, Amsterdam: Economische Instituut voor de Bouw (EIB).
- EIB, 2016. *Macro-economische verkenning betonakkoord*, Amsterdam: Economische Instituut voor de Bouw (EIB).
- EIB, 2020. *Vooruitzichten voor de bouw na de coronacrisis*, Amsterdam: EIB Economisch Instituut voor de Bouw.
- Ellen MacArthur Foundation & Granta Design, 2015a. *Circularity Indicators : an approach to Measuring Circularity. Non-Technical Case Studies*, Cowes (UK): Ellen MacArthur Foundation.
- Ellen MacArthur Foundation & Granta Design, 2015b. *Circularity Indicators. An approach to Measuring Circularity - Methodology*, Cowes(UK): Ellen MacArthur Foundation.
- Ellen MacArthur Foundation & Granta Design, 2015c. *Circulytics - measuring circularity : Dynamic modelling tool. MCI Product-Level*. [Online]
Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/circularity-indicators>
- Frenay, J., Palen, J. v., Poel, M. v. d. & Broere, P., 2015. *De betonkringloop gesloten*. [Online]
Available at: <https://www.cementonline.nl/artikel/de-betonkringloop-gesloten>
- FT, 2019. *Chinese group sparks oversupply fears in steel market*. [Online]
Available at: <https://www.ft.com/content/15a4a44c-6735-11e9-9adc-98bf1d35a056>
- Het Transitieteam, 2018. *Transitieagenda Circulaire Bouweconomie*. [Online]
Available at: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/documenten/rapporten/2018/01/15/bijlage-4-transitieagenda-bouw>
[Geopend 26 februari 2019].
- Min I&W, 2019. *CO₂-managementplan 2019-2020 : inclusief voortgangsrapportage S1 2019*, Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W).
- Min I&W, 2020. *Naar klimaatneutrale en circulaire rijksinfrastructuur projecten*, Den Haag: Ministerie van Infrastrutuur en Waterstaat (I&W).
- NIBE, 2018. *Advies voor MKI plafondwaarden voor betonmortel en betonproducten - Bijlage B*, Bussum: NIBE.
- NOS, 2020. *Kabinet neemt toch nu klimaatmaatregelen; productie kolencentrales omlaag*. [Online]
Available at: <https://nos.nl/artikel/2329160-kabinet-neemt-toch-nu-klimaatmaatregelen-productie-kolencentrales-omlaag.html>
[Geopend 19 Mei 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 Part D: Transport and Environment*, Volume 59, pp. 301-312.

Oosterveen, K., 2015. *Economisch voordeel in puin : De maatschappelijke kosten en baten van betongranulaat*. [Online]

Available at:

http://www.betonketen.nl/userfiles/file/6_Samenvatting_Economisch_voordeel_in_puin_12_jan_2015.pdf

Oppen, C. v., Croon, G. & Bijl de Vroe, D., 2018. *Circulair inkopen in 8 stappen*. E-book red. Amsterdam: Copper8.

PBL, 2017. *Fiscale vergroening : belastingverschuiving van arbeid naar grondstoffen, materialen en afval. Verkenning van belastingen voor het stimuleren van de circulaire economie.*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

PBL, 2019a. *Doelstelling circulaire economie 2030 : Operationalisering, concretisering en reflectie*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

PBL, 2019b. *Achtergrondrapport bij Circulaire Economie in Kaart*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

PIANOo, 2016. *Handreiking: Marktconsultatie*, sl: PIANOo.

PIANOo, 2019. *Checklist maatschappelijk verantwoord inkopen*. [Online]

Available at: <https://www.pianoo.nl/nl/themas/maatschappelijk-verantwoord-inkopen-mvi-duurzaam-inkopen/mvi-in-inkoopproces/checklist-maatschappelijk-verantwoord> [Geopend 27 Februari 2019].

Platform CB'23, 2020. *Leidraad Meten van circulariteit, versie 2.0*, sl: Platform CB'23.

RebelGroup; CE Delft, 2016. *Economische hoogwaardigheid recycling*, Delft: CE Delft .

Rijksoverheid, 2019a. *Nederland circulair in 2050*. [Online]

Available at: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/nederland-circulair-in-2050> [Geopend 26 februari 2019].

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

Rijksoverheid, 2019c. *Aanvullingsbesluit bodem artikelen en toelichting*, Den Haag: Rijksoverheid.

Rijksoverheid, 2020. *Richtlijn herstel en beheer (water)bodemkwaliteit. Transport en overslag, kosten transport over water*. [Online]

Available at: <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemsaneringstechnieken/c-grondverzet/c5-transport-en-overslag/transport-en-overslag-kosten-transport-over-water> [Geopend 8 6 2020].

Rijksoverheid, et al., 2018. *Betonakkoord voor Duurzame Groei*. [Online]

Available at:

https://www.betonakkoord.nl/publish/pages/152943/betonakkoord_10_juli_2018.pdf

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



- Rijkswaterstaat, 2020a. *Eerste aanzet tot een Circulaire Materialenstrategie versie 4.1*, Utrecht: RWS.
- Rijkswaterstaat, 2020b. *Afvalverwerking in Nederland, gegevens 2018 - Versie 1.0*, Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat, 2020c. *Koploperaanpak duurzaam asfalt*, sl: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat, 2020d. *Trenddossier - Zandtekort?. De Lichtkogel*, Issue 1.
- Rijkswaterstaat, 2020e. *Notitie Koploperaanpak versie 1.0*, Utrecht: RWS.
- Rijkswaterstaat, 2020f. *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].
- Rijkswaterstaat, 2020g. *De A58: een slimme en duurzame snelweg*. [Online]
Available at: <https://innova58.nl/default.aspx>
[Geopend 26 mei 2020].
- Sant Verde, 2020. *Meten van circulariteit*, Weesp: Sant Verde BV.
- SGS Intron, 2019. *Meetmethode circulariteit in klimaatvelop beton*, Sittard: SGS Intron.
- Stichting Bouwkwiteit, 2019. *Bepalingsmethode Milieupresetatie Gebouwen en GWW-werken*, Rijswijk: Stichting Bouwkwiteit (SBK).
- Sverdrup, H. U., Koca, D. & Schlyter, P., 2017. Simple System Dynamics Model for the Global Production Rate of Sand, Gravel, Crushed Rock and Stone, Market Prices and Long-Term Supply Embedded into the WORLD6 Model. *Biophysical Economics and Resource Quality*, 2(8), pp. 1-20.
- U.S. Geological Survey, 2020. Wallostanite. *Mineral Commodity Summaries*, January, pp. 184-185.
- USGS, 2015. *Basalt*. [Online]
Available at: <https://volcanoes.usgs.gov/vsc/glossary/basalt.html>
[Geopend 10 September 2020].
- Vermeulen, E., 2020. CO2-reductie: opties voor cement. *Cement*, Volume 1, pp. 15-21.
- World Cement, 2018. *The greatest problem*. [Online]
Available at: <https://www.worldcement.com/special-reports/07052018/the-greatest-problem/>
[Geopend 10 April 2020].



A Basisscenario

Het basisscenario is beschreven in Paragraaf 4.2. Het basisscenario is gebaseerd op het referentiebeton van RWS voor de vier objectcategorieën zoals in het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b) beschreven. Om het basisscenario met een referentiesamenstelling voor beton per objectcategorie in 2020, in 2025 en 2030 te berekenen, is gebruik gemaakt van (1) de referentiesamenstelling per objectcategorie, (2) het areaal van Rijkswaterstaat in 2020, in 2025 en 2030 en (3) de milieu-impact van de materiaalproductie (Module A1) en (4) transport naar de productielocatie (Module A2). In deze Bijlage A zijn de voorgenoemde gegevens uitgewerkt.

A.1 Referentiesamenstelling voor beton per objectcategorie en Totaal materiaalgebruik voor beton van RWS in 2020, in 2025 en 2030

De referentiesamenstelling voor beton van RWS per objectcategorie (materiaal/m³ beton van RWS per objectcategorie) is weergegeven in Tabel 12, afkomstig van Bijlage A in het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b). Deze samenstellingen zijn opgesteld op basis van expertinschattingen vanuit Rijkswaterstaat en CE Delft. Ze zijn een inschatting voor het beton dat momenteel wordt toegepast door Rijkswaterstaat. Het is **geen** gewogen gemiddelde op basis van de projecten die uitgevoerd zijn binnen Rijkswaterstaat. Zie Hoofdstuk 7 in het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b) voor een beschrijving van de onzekerheid in de resultaten die deze expertinschatting veroorzaakt.

Tabel 12 - Basisscenario - referentiesamenstelling per m³ beton per objectcategorie van RWS (kg/m³)

Materiaal	Objectcategorie I (kg/m ³)	Objectcategorie II (kg/m ³)	Objectcategorie III (kg/m ³)	Objectcategorie IV (kg/m ³)
Zand	863	808	731	796
Grind/steenslag	712	1.056	954	1.040
Betongranulaat	475	56	50	55
CEM I	0	0	150	0
CEM III/B	200	270	340	330
Poederkoolvliegias	0	25	0	0
Kalksteenmeel	0	15	0	0
Water	150	170	175	18
Wapeningsstaal	0	30	60	4
Totaalgewicht	2.400	2.430	2.460	2.24

Bron: CE Delft (2020b).

Om verbruik per materiaal in 2020, 2025 en 2030 vast te stellen is een inschatting gemaakt van de totale hoeveelheid kunstwerken die in één jaar worden gerealiseerd door Rijkswaterstaat (het 'areaal'). Tabel 13 geeft een overzicht van de ingeschatte hoeveelheid betongebruik per jaar per objectcategorie in m³ beton. Meer toelichting over deze inschatting is te vinden in Bijlage A van het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b).

Tabel 13 - Verdeling betongebruik bij RWS per objectcategorie voor een jaar (m³/jaar)

Type kunstwerk	Aanleg per jaar (m³)	OC I %	OC II %	OC III %	OC IV %
Vaste bruggen	312.800		10%	90%	
Beweegbare bruggen	66.800		10%	90%	
Viaducten	43.984		30%	70%	
Schutsluiskolken	10.480				100%
Uitwateringssluiskolken	7.360				100%
Dijken	7.310	100%			
Dammen	9.200	100%			
Waterkeringen kanalen	36.880				100%
Tunnels	62.100			33%	66%
Totaal vervanging	~557.000 m³	~16.510 m³	~51.115 m³	392.922 m³	95.706 m³
Onderhoud	43.086 m³	10.772 m³	10.772 m³	10.772 m³	10.772 m³
Totaal (m³/jaar)	600.000 m³	27.282 m³	61.927 m³	403.693 m³	106.478 m³

Bron: CE Delft (2020b).

Het totale primaire en secundaire materiaalgebruik van RWS wordt berekend door het betongebruik van het areaal per objectcategorie voor een jaar te vermenigvuldigen met een referentiemateriaal van beton voor een objectcategorie. Voorbeeld voor OC III: 403.693 m³ (Tabel 13) x 150 kg/m³ (Tabel 12) = 60.554 ton/jaar (Tabel 14). Dit is weergegeven in Tabel 14 voor 2020, 2025 en 2030. Zoals blijkt is voor elk jaar het materiaalgebruik gelijk gesteld omdat de verwachtingen zijn dat deze materiaalgegevens voor niet wezenlijk zullen veranderen.

Tabel 14 - Totaal materiaalgebruik voor productie beton van RWS (ton/jaar) in 2020, in 2025 en 2030.

	2020	2025	2030
Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Hoeveelheid (ton/jaar)	Hoeveelheid (ton/jaar)
CEM I	60.554	60.554	60.554
CEM III/B	194.570	194.570	194.570
Zand	453.331	453.331	453.331
Grind/steenslag	580.680	580.680	580.680
Betongranulaat	42.468	42.468	42.468
Poederkoolvliegias	1.548	1.548	1.548
Kalksteenmeel	929	929	929
Wapeningsstaal	30.339	30.339	30.339
Water	104.432	104.432	104.432

Bron: CE Delft (2020b).

A.2 Gebruikte gegevens voor het basisscenario

Om de MKI-score van het basisscenario te berekenen is gebruik gemaakt van proceskaarten uit de Nationale Milieudatabase (NMD) 3.1 en Ecoinvent 3.5 cut-off. De keuze van deze proceskaarten voor de gebruikte materialen is gebaseerd op een eerder onderzoek voor Rijkswaterstaat naar de CO₂-footprint van beton in Nederland (CE Delft, 2020a). Deze zijn weergegeven in Tabel 15 en in Bijlage B van het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b).

Tabel 15 - Proceskaarten materialen in beton,

Materiaal	Proceskaart	Toelichting
Zand	Sand {GLO} market for.	Ecoinvent-proceskaart komt overeen met de NMD 3.1 proceskaart 0168-fab&Zand, industriezand, ophoogzand, betonzand, drainagezand zand. Gemodelleerd zonder transport
Grind/steenslag	Gravel, round {RoW} market for gravel. round	Ecoinvent-proceskaart. Gemodelleerd zonder transport
Betongranulaat	0157-fab&Betongranulaat (= 0-waarden want 'vrij van milieulast')	Vrij van milieulast, conform de SBK-Bepalingsmethode 3.0 (2019)
CEM I	16,66% CEM I 52.5 R, Dyckerhoff, Geseke, c1 16,66% CEM I 52.5 R, Dyckerhoff, Lengerich, c1 33,33% CEM I 52.5 R, ENCI, c1 33,33% CEM I 52.5 R, HOLCIM, Beckum, c1	Gemiddelde van Categorie 1 proceskaarten van drie cementproducenten in de NMD 3.1. Kopie van NMD 3.1 proceskaart 0172-fab&Cement, CEM I, maar zonder 30% opslag
CEM III/B	50% CEM III/B 42.5 N, ENCI, c1 50% CEM III/B 42.5 N, HOLCIM, Schwelgern, c1	Gemiddelde van Categorie 1 proceskaarten van twee cementproducenten in de NMD 3.1. Kopie van NMD 3.1 proceskaart XXXX Cement, CEM III/B, maar zonder 30% opslag
Poederkoolvliegias	Poederkoolvliegias (1997) (= 0-waarden; onderbouwd niet gealloceerd)	Vrij van milieulast, conform de SBK-Bepalingsmethode 3.0 (2019)
Kalksteenmeel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for	Ecoinvent-proceskaart. Gemodelleerd zonder transport
Water	Tap water {RER} market group for	Ecoinvent-proceskaart
Wapeningsstaal	VWN Wapeningstaal (A1-3), c2 (30% primair, 70% secundair)	Wapeningsstaal op basis van een LCA van VWN met 70% secundair staal

Bron: CE Delft (2020b), waarbij de NMD 3.1 en Ecoinvent 3.5 cut-off databases gebruikt is.

De transportafstanden van alle materialen naar de productielocatie voor het basisscenario in 2020, in 2030 en 2050 zijn weergegeven in Tabel 16. Voor de milieu-impact van de transportafstanden is gebruik gemaakt van de klimaatimpact en de MKI-score zoals deze bepaald zijn voor het onderzoek kostencurves asfalt van CE Delft en TNO, die ook gebaseerd zijn op Ecoinvent 3.5 cut-off. De milieu-impact van transport in 2025 is berekend als gemiddelde tussen 2020 en 2030.

Tabel 16 - Transportafstanden van materialen naar de productielocatie voor het basisscenario.

Materiaal/fase	Zeetransport (km)	Binnenvaartschip (km)	Vrachtwagen (km)	Bron/toelichting
Zand	38	159	4	NIBE (2018)
Grind/steenslag	51	239	10	NIBE (2018)
Betongranulaat	0	0	30	NIBE (2018)
CEM I	0	0	186	NIBE (2018)
CEM III/B	0	0	186	NIBE (2018)
Poederkoolvliegias	0	0	150	NIBE (2018)
Kalksteenmeel	0	150	50	NIBE (2018)
Water	0	0	0	NIBE (2018)
Wapeningsstaal	0	0	150	CE Delft (2013)
Beton naar bouwplaats	0	0	150	Forfaitair transport producten en materialen volgens de SBK-Bepalingsmethode 3.0 (2019)

Bron: CE Delft (2020a).

Tabel 17 - Klimaatimpact en MKI-score transport per vrachtwagen in 2020 en 2030

	2020	2030
Milieu-impact per ton kilometer transport		
Kg CO ₂ -eq./tkm	0,080	0,078
€ MKI/tkm	0,011	0,011

Bron: CE Delft en TNO (2019), waarbij de Ecoinvent 3.5 cut-off database gebruikt is.

B Innovatiescenario's betoninnovaties

Door het beoordelen van betoninnovaties binnen de innovatiescenario's brengen we in kaart hoe circulair het materiaalgebruik binnen de keten van RWS voor een objectcategorie voor een zichtjaar kan zijn. Met het toepassen van betoninnovaties kan een belangrijke stap door RWS gemaakt kunnen worden, aangezien het vasthouden aan referentiebeton voor een objectcategorie onvoldoende is. De beoordeling op circulariteit gebeurt op basis van de vier circulaire indicatoren.

De betoninnovaties die voor dit onderzoek zijn beschouwd, zijn in detail beschreven in Bijlage C van het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b). Deze data gebruiken we binnen dit onderzoek ook. Net als bij de basisscenario's, nemen we bij de beoordeling van de innovatiescenario's de samenstelling van het beton per objectcategorie, het areaal van Rijkswaterstaat en de milieu-impact van de materiaalproductie (Module A1) en transport naar de productielocatie (Module A2) mee. Indien relevant, nemen we bij de beton-innovaties ook de productie (Module A3) of vermeden emissies (Module D) in de beoordeling mee.

Betoninnovaties worden voor dit onderzoek meegenomen als ze voordelig zijn voor een innovatiescenario. Er wordt echter ook gezocht naar maatregelenpakketten die elkaar versterken. Als daarom blijkt dat een betoninnovatie binnen het maatregelenpakket van één scenario zonder nadelig effect (neutraal) toegepast kan worden in het maatregelenpakket een ander innovatiescenario, zal deze innovatie meegenomen worden (voorbeeld: CCS heeft positieve invloed op de klimaatimpact en de MKI-score en geen invloed op het primaire materiaalverbruik. Deze zal daarom ook meegenomen worden in het scenario voor het primaire materiaalverbruik).

Alleen als een betoninnovatie een nadelige invloed heeft op een innovatiescenario, wordt deze niet meegenomen. Hiervoor is gekozen omdat de verschillende innovatiescenario's elkaar niet per definitie uitsluiten, maar elkaar juist zouden kunnen versterken. Door het weglaten van betoninnovaties die een neutrale invloed hebben zouden maatregelenpakketten meer verschillen, waardoor dergelijke versterkende effecten niet zichtbaar zouden worden.

B.1 Zichtjaar 2020

In 2020 is maar een beperkt aantal betoninnovaties beschikbaar, doordat de overige betoninnovaties nog geen TRL 9 bereikt hebben. Voor Objectcategorie (OC) I zijn dit Solidia, Carbon8, Carbstone, en geopolymeren-beton beschikbaar (TRL 9). Voor OC II zijn dit staalvezels. Voor OC III en OC IV zijn nog geen betoninnovaties beschikbaar die gebruikt kunnen worden.

B.1.1 Objectcategorie I

Voor OC I zijn in 2020 alleen Solidia, Carbon8, Carbstone en geopolymeren-beton als betoninnovaties beschikbaar voor toepassing.

Samenvatting maatregelenpakket voor OC I

Het maatregelenpakket voor de vier innovatiescenario's voor OC I is in Tabel 18 en Tabel 19 weergegeven aan het eind van deze paragraaf, en omvatten:

- Voor het Innovatiescenario 1 (Reductie van de klimaatimpact) het maatregelenpakket: Solidia en Carbon8.
- Voor het Innovatiescenario 2 (Reductie van de MKI-score) het maatregelenpakket: Solidia en Carbon8.
- Voor het Innovatiescenario 3 (Minste primair materiaalverbruik) het maatregelenpakket: Carbstone en Carbon8.
- Voor het Innovatiescenario 4 (Laagste economisch waardeverlies) het maatregelenpakket: Carbstone en Carbon8.

Toelichting op Solidia als maatregel

De vier innovatiescenario's zijn voor het alternatieve bindmiddel Solidia in het referentiebeton onderzocht. De toepassing van het alternatieve bindmiddel Solidia als vervanger voor hoogovencement (CEM III/B) kan in 2020 voor de hoogste reductie in de klimaatimpact en in de MKI-score zorgen, doordat het CO₂ opslaat en hoogovencement volledig vervangt. Deze betoninnovatie is daarmee interessant voor de reductie van de klimaatimpact en de MKI-score reductie in OC I. Het primaire materiaalverbruik van Solidia is wel hoger dan CEM III/B in het referentiebeton, aangezien het gebruik maakt van primair wollastoniet in plaats van hoogovenslakken.

Toelichting op Carbon8 als maatregel

Carbon8 als vervanging van grind heeft ook veel potentie om de klimaatimpact van beton te reduceren, aangezien het net als Solidia CO₂ opslaat. Daarnaast is de economische waarde gelijk aan normaal grind en vermindert het de vraag naar primaire materialen. Deze innovatie kan dus binnen elk scenario worden toegepast in OC I.

Toelichting op Carbstone als maatregel

Het alternatieve bindmiddel van de innovatie Carbstone is ten opzichte van de innovatie Solidia geassocieerd met minder reductie van de milieu-impact met het referentiebeton. Carbstone maakt gebruik van aanzienlijk minder primair materiaal wanneer deze wordt gecombineerd met de innovatie Carbon8. Daarnaast is de economische waarde van materialen gebruikt door Carbstone lager en wordt er in totaal minder materiaal gebruikt (dus er komt minder materiaal vrij na gebruik), waardoor deze innovatie ook met minder economisch waardeverlies van de materialen is geassocieerd dan Solidia. Carbstone is daarmee interessant voor de scenario's met het minste primaire materiaalverbruik (in combinatie met Carbon8) en het laagste economisch waardeverlies. Het primaire materiaalverbruik van Carbstone zou hoger zijn als er gebruik zou worden gemaakt van primair grind, aangezien de grindbehoefte aanzienlijk hoger is dan van de referentiesamenstelling. In combinatie met Carbon8 wordt dit effect echter teniet gedaan.

De CO₂-opslag van Solidia en Carbstone vindt plaats tijdens de productie van het beton (Module A3). Het voordeel van Module A3 ten opzichte van het referentiebeton is daarom voor deze innovaties ook meegenomen. Voor Solidia is de impact van het productieproces identiek aan het basisscenario, maar voor Carbstone is er sprake van een verhoogd energieverbruik. De milieu-impact van deze verhoging ten opzichte van de basisscenario's is daarom ook meegenomen bij Carbstone.

Toelichting op geopolymeren-beton

De toepassing van geopolymeren-beton is ook mogelijk in 2020. Deze alternatieve binders zijn echter geassocieerd met een iets lagere reductie van de klimaatimpact en een aanzienlijk lagere reductie van de MKI-score dan Solidia. Daarnaast maken geopolymeren-

beton gebruik van meer primaire materialen dan zowel Carbstone als Solidia en is de economische waarde van de materialen initieel hoger dan bij Carbstone, waardoor meer waarde verloren gaat. Dit alternatieve bindmiddel is daarom in 2020 voor OC I minder interessant dan Solidia en Carbstone.

Tabel 18 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van de klimaatimpact en MKI-score voor OC I - 2020 (Solidia + Carbon8)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ -eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
Solidiaklinker: Wollastoniet	1.801	564,88	29,60	300	320
Solidiaklinker: Afgevangen CO ₂ ⁽¹⁾	1.140	-337,07	-15,96	0	0
Solidiacement: Overige materialen ⁽²⁾	3.656	14,88	2,10	Onbekend	Onbekend
Zand	23.544	12,30	1,55	41,51	41,51
Betongranulaat	12.959	2,40	0,34	14,5	14,5
Carbon8: AEC-vliegas	9.712	-	-	0	0
Carbon8: Afgevangen CO ₂ ⁽³⁾	1.554	-346,27	-17,26	57	57
Carbon8: Zand	9.712	12,30	1,55	41,51	41,51
Carbon8 zelf ⁽⁴⁾	19.425	9,20	1,30	Onbekend	Onbekend
Water	4.092	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

- (1) Solidia vangt tijdens de productie (Module A3) CO₂ op, maar er is geen sprake van afwijking van emissies in Module A3.
- (2) De impact van de overige materialen omvat alleen het transport, aangezien de productie van overige materialen al is meegenomen in de Wollastoniet impact.
- (3) De afgevangen CO₂ in Carbon8 heeft een andere klimaatimpact en MKI-score dan afgevangen CO₂ bij andere innovaties omdat ervan wordt uitgegaan dat Carbon8 wordt geproduceerd naast een afvalenergiecentrale met CO₂-afvang, en er dus geen transport van CO₂ plaatsvindt.
- (4) Carbon8 is een grindervanger, maar bestaat zelf ook uit verschillende materialen (in tegenstelling tot grind). De gegevens voor de materialen van Carbon8 zijn verwerkt in deze tabel (afgevangen CO₂, zand en AEC-vliegas). Daarnaast is onder het kopje 'Carbon8 zelf' de impact van het transport van Carbon8 naar de betonproductie uitgewerkt.

Tabel 19 - Maatregelenpakket innovatiescenario: Minste primair materiaalverbruik en laagst economische waardeverlies voor OC I - 2020 (Carbstone + Carbon8)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ -eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
Carbstone: LD-slakken	12.932	8,00	1,13	14,5	14,5
Carbstone: Afgevangen CO ₂	576	-337,07	-15,96	57	57
Carbstone A3 ⁽¹⁾	64.658	30,34	2,37	0	0
Carbon8: AEC-vliegas	24.247	-	-	0	0
Carbon8: Afgevangen CO ₂ ⁽²⁾	3.880	-346,27	-17,26	57	57
Carbon8: Zand	24.247	12,30	1,55	41,51	41,51
Carbon8 zelf ⁽³⁾	48.494	9,20	1,30	Onbekend	Onbekend

- (1) Carbstone vangt tijdens de productie (Module A3) CO₂ op. Voor deze innovatie is daarom het verschil in impacts in Module A3 ten opzichte van het referentiebeton meegenomen per ton beton.

- (2) De afgevangen CO₂ in Carbon8 heeft een andere klimaatimpact en MKI-score dan afgevangen CO₂ bij andere innovaties omdat ervan is uitgegaan dat Carbon8 wordt geproduceerd naast een afvalenergiecentrale met CO₂-afvang, en er dus geen transport van CO₂ plaatsvindt.
- (3) Carbon8 is een grindvervanger, maar bestaat zelf ook uit verschillende materialen (in tegenstelling tot grind). De gegevens voor de materialen van Carbon8 zijn verwerkt in deze tabel (afgevangen CO₂, zand en AEC-vliegashuis). Daarnaast is onder het kopje 'Carbon8 zelf' de impact van het transport van Carbon8 naar de betonproductie uitgewerkt.

B.1.2 Objectcategorie II

Voor OC II zijn in 2020 alleen staalvezels als ('beton')innovatie mogelijk, doordat alle andere relevante innovaties nog geen TRL 9 bereikt hebben voor toepassing binnen deze objectcategorie.

Samenvatting maatregelenpakket voor OC II

De maatregelenpakketten voor OC II zijn in Tabel 20 en Tabel 21, weergegeven aan het eind van deze paragraaf, en omvatten:

- Voor het Innovatiescenario 1 (reductie van de klimaatimpact) het maatregelenpakket: staalvezels.
- Voor het Innovatiescenario 2 (reductie van de MKI-score): gelijk aan het basisscenario met het referentiebeton.
- Voor het Innovatiescenario 3 (minste primair materiaalverbruik): gelijk aan het basisscenario met het referentiebeton.
- Voor het Innovatiescenario 4 (laagste economisch waardeverlies): gelijk aan het basisscenario met het referentiebeton.

Toelichting op staalvezels als maatregel

Staalvezels zorgen voor een halvering van de staalbehoefte, wat een significante reductie van de milieu-impact in beton met zich meebrengt. De invloed op de vermeden emissies na recycling (Module D) is echter ook groot. Het verschil in impact van staalvezels in Module D ten opzichte van het referentiebeton is daarom ook meegenomen.

Doordat de staalbehoefte is gehalveerd, wordt ook maar de helft van het staal gerecycled (Module D). Daarbij komt ook dat staalvezels minder goed gerecycled worden met regulier breken dan reguliere wapening, waardoor al het primaire materiaal en zelfs een deel van het secundaire materiaal verloren gaat. Dit leidt over de gehele levenscyclus van staalvezelbeton tot meer primaire materiaalverbruik, een hogere MKI-score, een hogere klimaatimpact en meer economisch waardeverlies van de innovatie. Deze innovatie is daarom alleen interessant voor de reductie van de klimaatimpact.

Toelichting op het basisscenario met het referentiebeton als maatregel

De maatregelenpakketten voor de reductie van de klimaatimpact, de MKI-score, het minste primaire materiaalverbruik en het laagste economisch waardeverlies zijn in 2020 nog identiek aan het basisscenario met het referentiebeton.

Tabel 20 - Maatregelenpakket innovatiescenario: Reductie van de klimaatimpact voor OC II - 2020 (Staalvezels)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ - eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
CEM III/B	16.720	286,38	22,14	109,5	109,5
Zand	50.037	12,30	1,55	41,51	41,51
Grind/steenslag	65.395	16,73	2,10	61,63	61,63
Betongranulaat	3.468	2,40	0,34	14,5	14,5
Poederkoolvliegias	1.548	12,00	1,70	70	70
Kalksteenmeel	929	13,90	1,92	72	72
Staalvezels ⁽¹⁾	929	2.246,53	207,70	1.375	1.375
Water	10.528	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

(1) Het gebruik van staalvezels heeft een grote invloed op de milieu-impact van Module D. In de klimaatimpact en de MKI-score is daarom het *verschil* in impact van Module D ten opzichte van het referentiebeton ook meegenomen, omgerekend per 1 ton staalvezels

Tabel 21 - Maatregelenpakket innovatiescenario: Reductie van de MKI-score, minste primair materiaalverbruik en laagst economische waardeverlies voor OC II - 2020 (Staalvezels)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ - eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
CEM III/B	16.720	286,38	22,14	109,5	109,5
Zand	50.037	12,30	1,55	41,51	41,51
Grind/steenslag	65.395	16,73	2,10	61,63	61,63
Betongranulaat	3.468	2,40	0,34	14,5	14,5
Poederkoolvliegias	1.548	12,00	1,70	70	70
Kalksteenmeel	929	13,90	1,92	72	72
Wapeningsstaal	1.858	1.381,31	85,82	1.375	1.375
Water	10.528	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

B.1.3 Objectcategorieën III en IV

Samenvatting maatregelenpakket voor OC III en IV

Voor de objectcategorieën III en IV zijn in 2020 nog geen betoninnovaties beschikbaar. De TRL van alle innovaties is voor deze objectcategorieën namelijk lager dan 9. Deze objectcategorieën zijn daarom in 2020 nog identiek aan het basisscenario met het referentiebeton van RWS en zijn niet verder uitgewerkt.

B.2 Zichtjaar 2025

In 2025 worden alle betoninnovaties met TRL 7 of hoger beschouwd. Hierdoor zijn naast de innovaties: Solidia, Carbon8, Carbstone en geopolymeren-beton in 2020 voor alle objectcategorieën OC I, II, III en IV: mechanische zand- *en/of* grindrecycling beschikbaar. Daarnaast ook mechanische cementrecycling voor OC I als betoninnovatie beschikbaar, naast staalvezels in 2020 ook geopolymeren-beton en basaltvezelstaven voor OC II.

B.2.1 Objectcategorie I

In 2025 worden alle betoninnovaties met TRL 7 of hoger beschouwd. Hierdoor zijn naast de innovaties Solidia, Carbon8, Carbstone en geopolymeren-beton in 2020 ook mechanische

cementrecycling en mechanische zand- *en/of* grindrecycling voor OC I als betoninnovatie beschikbaar.

Samenvatting maatregelenpakket voor OC I

De maatregelenpakketten voor OC I zijn in Tabel 22, Tabel 23 en Tabel 24 weergegeven aan het eind van deze paragraaf, en omvatten:

- Voor het Innovatiescenario 1 (reductie van de klimaatimpact) het maatregelenpakket: Solidia en Carbon8 en mechanische zandrecycling.
- Voor het Innovatiescenario 2 (reductie van de MKI-score) het maatregelenpakket: Solidia en Carbon8 en mechanische zandrecycling.
- Voor het Innovatiescenario 3 (minste primair materiaalverbruik) het maatregelenpakket: Carbstone en mechanische grindrecycling.
- Voor het Innovatiescenario 4 (laagste economisch waardeverlies) het maatregelenpakket: Carbstone + Carbon8.

Toelichting op Solidia en Carbstone als maatregel

Net als in 2020 heeft de alternatieve binder Solidia in het referentiebeton in 2025 de hoogste potentie voor de reductie van de klimaatimpact en de reductie van de MKI-score, terwijl Carbstone voor het laagste primaire materiaalverbruik en het laagste economisch waardeverlies zorgt bij OC I.

Toelichting op Mechanische zand- en/of grindrecycling als maatregel

In tegenstelling tot 2020 speelt mechanische zand- *en/of* grindrecycling in 2025 echter ook een rol, doordat het als aanvulling op Solidia en Carbon8 ook primair zand kan vervangen door gerecycled zand. Hierdoor wordt ook de klimaatimpact, de MKI-score en het primaire materiaalverbruik van de innovatie verlaagd.

Toelichting op Carbon8 als maatregel

Het scenario met het laagste economisch waardeverlies omvat Carbstone en Carbon8, aangezien Carbstone geen zand behoeft. Met name het gebruik van de afvalstof AEC-vliegas zorgt ervoor dat de initiële waarde van de materialen van Carbon8 relatief laag zijn ten opzichte van gerecycled grind, wat voor minder economisch waardeverlies zorgt over de gehele levenscyclus van het beton.

Toelichting op mechanische cementrecycling en geopolymeren-beton

Mechanische cementrecycling en geopolymeren-beton zorgen ook voor een reductie van de klimaatimpact en reductie van de MKI-score, maar niet zo groot als bij Solidia. Mechanische cementrecycling en geopolymeren-beton hebben beiden daarnaast de potentie om het primaire materiaalverbruik te verlagen, maar wederom niet zoveel als Carbstone in combinatie met Carbon8. Beton met deze combinatie van Carbstone en Carbon8 omvat immers vrijwel alleen maar secundaire materialen, op het zand in Carbon8 na, waar cementrecycling maar 15% van het primaire cement vervangt en geopolymeren-beton ook primaire materialen zoals natronloog en waterglas bevatten. Hierdoor zijn de materialen ook inherent met minder aanschaffkosten verbonden dan de andere innovaties, onder andere

omdat AEC-vliegas een afvalproduct is, waardoor er minder economisch waardeverlies optreedt over de gehele levenscyclus van het beton.

Tabel 22 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van de klimaatimpact en MKI-score voor OC I - 2025 (Solidia en Carbon8 + mechanische zandrecycling)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ - eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
Solidiaklinker: Wollastoniet	1.801	564,69	29,56	323	345
Solidiaklinker: Afgevangen CO ₂ ⁽¹⁾	1.140	-337,18	-15,99	61	61
Solidiacement: Overige materialen ⁽²⁾	3.656	14,69	2,06	Onbekend	Onbekend
Gerecycled zand	23.544	2,26	0,31	18	38
Betongranulaat	12.959	2,37	0,33	11	20
Carbon8: AEC- vliegas	9.712	-	-	0	0
Carbon8: Afgevangen CO ₂ ⁽³⁾	1.554	-346,27	-17,26	61	61
Carbon8: zand	9.712	12,30	1,55	18	38
Carbon8 zelf ⁽⁴⁾	19.425	9,09	1,28	Onbekend	Onbekend

- (1) Solidia vangt tijdens de productie (Module A3) CO₂ op, maar er is geen sprake van afwijking van emissies in Module A3.
- (2) De impact van de overige materialen omvat alleen het transport, aangezien de productie van overige materialen al is meegenomen in de Wollastoniet impact.
- (3) De afgevangen CO₂ in Carbon8 heeft een andere klimaatimpact en MKI-score dan afgevangen CO₂ bij andere innovaties omdat ervan is uitgegaan dat Carbon8 wordt geproduceerd naast een afvalenergiecentrale met CO₂-afvang, en er dus geen transport van CO₂ plaatsvindt.
- (4) Carbon8 is een grindervanger, maar bestaat zelf ook uit verschillende materialen (in tegenstelling tot grind). De gegevens voor de materialen van Carbon8 zijn in deze tabel verwerkt.

Tabel 23 - Maatregelenpakket innovatiescenario: Minste primair materiaalverbruik voor OC I - 2025 (Carbstone en mechanische grindrecycling)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ - eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
Carbstone: LD- slakken	12.932	7,90	1,11	11	20
Carbstone: Afgevangen CO ₂	576	-337,18	-15,99	61	61
Carbstone A3 ⁽¹⁾	64.658	20,49	1,71	0	0
Gerecycled grind	48.494	2,26	0,31	36	51

- (1) Carbstone vangt tijdens de productie (Module A3) CO₂ op. Voor deze innovatie is daarom het verschil in impacts in Module A3 ten opzichte van het referentiebeton meegenomen per ton beton.

Tabel 24 - Maatregelenpakket innovatiescenario: Laagst economische waardeverlies voor OC I - 2025 (Carbstone en Carbon8)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ - eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
Carbstone: LD- slakken	12.932	7,90	1,11	11	20
Carbstone: Afgevangen CO ₂	576	-337,18	-15,99	61	61
Carbstone A3 ⁽¹⁾	64.658	20,49	1,71	0	0
Carbon8: AEC- vliegglas	24.247	-	-	0	0
Carbon8: Afgevangen CO ₂ ⁽²⁾	3.880	-346,27	-17,26	61	61
Carbon8: zand	24.247	12,30	1,55	18	38
Carbon8 zelf ⁽³⁾	48.494	9,09	1,28	Onbekend	Onbekend

- (1) Carbstone vangt tijdens de productie (Module A3) CO₂ op. Voor deze innovatie is daarom het verschil in impacts in Module A3 ten opzichte van het referentiebeton meegenomen per ton beton.
- (2) De afgevangen CO₂ in Carbon8 heeft een andere klimaatimpact en MKI-score dan afgevangen CO₂ bij andere innovaties omdat is ervan uitgegaan dat Carbon8 wordt geproduceerd naast een afvalenergiecentrale met CO₂-afvang, en er dus geen transport van CO₂ plaatsvindt.
- (3) Carbon8 is een grindvervanger, maar bestaat zelf ook uit verschillende materialen (in tegenstelling tot grind). De gegevens voor de materialen van Carbon8 zijn in deze tabel verwerkt.

B.2.2 Objectcategorie II

In 2025 worden alle betoninnovaties met TRL 7 of hoger beschouwd. Hierdoor zijn naast staalvezels in 2020 ook geopolymere-beton en basaltvezelstaven en mechanische zand- en/of grindrecycling voor OC II als betoninnovatie beschikbaar.

De maatregelenpakketten voor OC II zijn in Tabel 25 weergegeven aan het eind van deze paragraaf, en omvatten:

- Voor het Innovatiescenario 1 (reductie van de klimaatimpact) het maatregelenpakket: geopolymere-beton (Geo-beton™) en mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven.
- Voor het Innovatiescenario 2 (reductie van de MKI-score) het maatregelenpakket: geopolymere-beton (Geo-beton™) en mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven.
- Voor het Innovatiescenario 3 (minste primair materiaalverbruik) het maatregelenpakket: mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven.
- Voor het Innovatiescenario 4 (laagste economisch waardeverlies) het maatregelenpakket: mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven.

Toelichting op geopolymere-beton (Geo-beton™) als maatregel

Voor OC II is het geopolymer-beton Geo-beton™ voor de reductie van de klimaatimpact en het laagste economisch waardeverlies interessant. Met name de potentie voor de reductie van de klimaatimpact is groot. De binder (er is immers geen sprake van een cement) in Geo-beton™ scoort op de twee circulaire indicatoren beter dan bijvoorbeeld een alternatief als het geopolymer-beton met ASCEM®-cement, al zorgt ASCEM®-cement ook voor een aanzienlijke reductie van de klimaatimpact.

Het effect van geopolymeer-beton op het primaire materiaalverbruik en het economisch waardeverlies van de materialen in beton is niet met zekerheid vast te stellen, doordat niet alle informatie om redenen van geheimhouding beschikbaar was. Daarom wordt er binnen de innovatiescenario's voor het primaire materiaalverbruik en het economisch waardeverlies uitgegaan van het cement in het referentiebeton.

De milieu-impact van de binder in Geo-beton™ is conservatief ingeschat, omdat de exacte hoeveelheid van deze binder en diens samenstelling niet openbaar zijn. De hoeveelheid ton per jaar is gebaseerd op de hoeveelheid regulier cement dat vervangen wordt + 30%, aangezien meer binder nodig is. Er is voor 30% gekozen, aangezien dit aansluit bij de ophoogfactor van Dubocalc. De kosten zijn gelijk gesteld aan Portlandcement (CEM I), aangezien er niet uit wordt gegaan van een kostendaling of stijging ten opzichte van regulier cement (CE Delft, 2020b).

Op basis van de milieu-impact van Geo-beton™ in Bijlage C.3.1 van het rapport 'Kosten-curve beton' van CE Delft (2020b) is bij de klimaatimpact uitgegaan van een impact die gelijk staat aan 50% van de impact van hoogovencement (CEM III/B). De MKI-score van de binder in Geo-beton™ is gelijk gesteld aan de MKI-score van hoogovencement (CEM III/B). Voor het circulaire scenario wordt er vanuit gegaan dat het aandeel secundair materiaal gelijk is aan dat van hoogovencement (CEM III/B), namelijk 67%. Hierdoor is de MKI-score van Geo-beton™ identiek aan de het referentiebeton, ondanks dat deze marginaal lager ligt binnen het rapport 'Kosten-curve beton' van CE Delft (2020b). Vanwege de onzekerheid in de data is voor deze conservatieve benadering gekozen.

Toelichting op mechanische zand- en/of grindrecycling als maatregel

Het vervangen van primair zand en grind door mechanisch gerecycled zand **en/of** grind zorgt voor een lagere milieu-impact, een lagere MKI-score en minder primair materiaalverbruik van de innovatie. Aangezien primair en mechanisch gerecycled zand **en/of** grind dezelfde waarde heeft, heeft deze innovatie geen positieve of negatieve invloed op het economisch waardeverlies. Deze innovatie is zodanig neutraal voor het innovatiescenario van minst materiaalverbruik, en wordt daarom ook meegenomen beschouwd.

Toelichting op basaltvezelstaven als maatregel

Ten slotte zijn basaltvezelstaven toegepast in plaats van wapeningsstaal. Deze wapening is voor alle scenario's superieur aan wapeningsstaal en staalvezels. Hiermee wordt de milieu-impact van wapening in beton drastisch verlaagd, met name de klimaatimpact, en is er 26% minder cement nodig (zie Bijlage C.3.1 van het rapport 'Kosten-curve beton' van CE Delft (2020b) voor meer toelichting). Doordat er ook geen staal gerecycled wordt zijn de vermeden emissies na recycling (Module D) ook aanzienlijk lager, zoals bij staalvezels ook het geval was. Het verschil in impact van basaltvezelstaven in Module D ten opzichte van het referentiebeton is daarom ook meegenomen.

Tabel 25 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van de klimaatimpact en MKI-score, minste primair materiaalverbruik en laagst economische waardeverlies voor OC II - 2025 (Geo-beton™ en mechanische zand- en/of grindrecycling en basaltvezelstaven)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ -eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
Binder in Geo-beton™ ⁽¹⁾⁽²⁾	16.101	150	17,0	88	94
Gerecycled zand	51.861	2,26	0,31	18	38
Gerecycled grind	67.779	2,26	0,31	36	51
Betongranulaat	3.594	2,37	0,33	11	20
Poederkoolvliegias	1.548	11,85	1,67	67	83
Kalksteenmeel	929	13,85	1,91	75	80
Basaltvezelstaven ⁽³⁾	194	8.103	1.082	65	65
Water	10.528	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

- (1) De milieu-impact van Geo-beton™ is ingeschat op basis van Bijlage C.3.1 van het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b). Hierbij is uitgegaan van 30% meer massa dan CEM III/B, 50% reductie van klimaat-emissies t.o.v. CEM III/B en een identieke MKI-score als beton met CEM III/B. De hoeveelheid andere materialen in het beton per m³ is verder identiek aan het referentiebeton voor OC II.
- (2) Het exacte verschil in primair materiaalverbruik en economisch waardeverlies tussen Geo-beton™ en ASCEM®-cement is niet bekend. De resultaten voor deze scenario's zijn weergegeven voor Geo-beton™, maar zijn binnen dit onderzoek gelijk voor beide geopolymeren.
- (3) Het gebruik van basaltvezelstaven heeft een grote invloed op de milieu-impact van Module D. In de klimaat-impact en de MKI-score is daarom het *verschil* in impact van Module D ten opzichte van het referentiebeton ook meegenomen, omgerekend per 1 ton basaltvezelstaven.

Tabel 26 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van de klimaatimpact en MKI-score, minste primair materiaalverbruik en laagst economische waardeverlies voor OC II - 2025 (mechanische zand- en/of grindrecycling en basaltvezelstaven)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ -eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
CEM III/B	12.385	286	22,1	114	122
Gerecycled zand	51.861	2,26	0,31	18	38
Gerecycled grind	67.779	2,26	0,31	36	51
Betongranulaat	3.594	2,37	0,33	11	20
Poederkoolvliegias	1.548	11,85	1,67	67	83
Kalksteenmeel	929	13,85	1,91	75	80
Basaltvezelstaven ⁽¹⁾	194	8.103	1.082	65	65
Water	10.528	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

- (1) Het gebruik van basaltvezelstaven heeft een grote invloed op de milieu-impact van Module D. In de klimaatimpact en de MKI-score is daarom het *verschil* in impact van Module D ten opzichte van het referentiebeton ook meegenomen, omgerekend per 1 ton basaltvezelstaven.

B.2.3 Objectcategorie III

In 2025 worden alle betoninnovaties met TRL 7 of hoger beschouwd. Hierdoor is mechanische zand- *en/of* grindrecycling voor OC III als betoninnovatie beschikbaar.

De maatregelenpakketten voor OC III zijn in Tabel 27 weergegeven aan het eind van deze paragraaf, en omvatten:

- Voor het Innovatiescenario 1 (reductie van de klimaatimpact) het maatregelenpakket: Mechanische zand- **en/of** grindrecycling.
- Voor het Innovatiescenario 2 (reductie van de MKI-score) het maatregelenpakket: Mechanische zand- **en/of** grindrecycling.
- Voor het Innovatiescenario 3 (minste primair materiaalverbruik) het maatregelenpakket: Mechanische zand- **en/of** grindrecycling.
- Voor het Innovatiescenario 4 (laagste economisch waardeverlies) het maatregelenpakket: Mechanische zand- **en/of** grindrecycling.

Toelichting op mechanische zand- en/of grindrecycling als maatregel

Voor OC III is in 2025 alleen de innovatie mechanische zand- **en/of** grindrecycling beschikbaar. Zoals in Paragraaf B.2.2 is toegelicht kan deze betoninnovatie in de vier innovatiescenario's worden meegenomen.

Tabel 27 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van de klimaatimpact en MKI-score, minste primair materiaalverbruik en laagst economische waardeverlies voor OC III - 2025 (Mechanische zand- **en/of** grindrecycling)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ -eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
CEM I	60.554	872,5	57,07	127	159
CEM III/B	137.256	286,2	22,11	114	122
Gerecycled zand	295.100	2,26	0,31	18	38
Gerecycled grind	385.123	2,26	0,31	36	51
Betongranulaat	20.185	2,37	0,33	11	20
Wapeningsstaal	24.222	1.381	85,79	1.320	1.650
Water	70.646	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

B.2.4 Objectcategorie IV

1. In 2025 worden alle betoninnovaties met TRL 7 of hoger beschouwd. Hierdoor is mechanische zand- **en/of** grindrecycling voor OC IV als betoninnovatie beschikbaar.
2. De maatregelenpakketten voor OC IV zijn in Tabel 28 weergegeven aan het eind van deze paragraaf, en omvatten:
 - Voor het Innovatiescenario 1 (reductie van de klimaatimpact) het maatregelenpakket: Mechanische zand- **en/of** grindrecycling.
 - Voor het Innovatiescenario 2 (reductie van de MKI-score) het maatregelenpakket: Mechanische zand- **en/of** grindrecycling.
 - Voor het Innovatiescenario 3 (minste primair materiaalverbruik) het maatregelenpakket: Mechanische zand- **en/of** grindrecycling.
 - Voor het Innovatiescenario 4 (laagste economisch waardeverlies) het maatregelenpakket: Mechanische zand- **en/of** grindrecycling.

Toelichting op mechanische zand- en/of grindrecycling als maatregel

Net als voor OC III is in 2025 voor OC IV alleen de betoninnovatie mechanische zand- **en/of** grindrecycling beschikbaar. In Paragraaf B.2.2 is toegelicht waarom deze betoninnovatie voor de vier innovatiescenario's kan worden beschouwd.

Tabel 28 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van de klimaatimpact en MKI-score, minste primair materiaalverbruik en laagst economische waardeverlies voor OC IV - 2025 (Mechanische zand- en/of grindrecycling)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ -eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
CEM III/B	35.138	286,2	22,11	114	122
Gerecycled zand	84.650	2,26	0,31	18	38
Gerecycled grind	110.737	2,26	0,31	36	51
Betongranulaat	5.856	2,37	0,33	11	20
Wapeningsstaal	4.259	1.381	85,79	1.320	1.650
Water	19.166	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

B.3 Zichtjaar 2030

In 2030 worden alle innovaties met TRL 6 of hoger beschouwd. Hierdoor zijn naast de innovaties: Solidia, Carbon8, Carbstone, geopolymere-beton en staalvezels in 2020, mechanische zand- *en/of* grindrecycling, mechanische cementrecycling en basaltvezelstaven en een uitbreiding van geopolymere-beton als betoninnovatie in 2025, ook CO₂-afvang bij cementklinkerproductie (CCS) in 2030 voor alle objectcategorieën beschikbaar. Specifiek zijn thermische cementrecycling voor OC I en CSA Beliet voor OC III in 2025 als betoninnovatie beschikbaar.

B.3.1 Objectcategorie I

1. In 2030 worden alle innovaties met TRL 6 of hoger beschouwd. Hierdoor zijn naast de innovaties in 2020 (Solidia, Carbon8, Carbstone en geopolymere-beton en staalvezels) en in 2025 (mechanische zand- *en/of* grindrecycling, mechanische cementrecycling en basaltvezelstaven en een uitbreiding van geopolymere-beton als betoninnovatie) ook CO₂-afvang bij cementklinkerproductie (CCS) en thermische cementrecycling voor OC I beschikbaar in 2030.
2. De maatregelenpakketten voor OC I zijn in Tabel 29 en Tabel 30 weergegeven aan het eind van deze paragraaf, en omvatten:
 - Voor het innovatiescenario: reductie van de klimaatimpact, het maatregelenpakket: Carbstone en Carbon8.
 - Voor het innovatiescenario: reductie van de MKI-score (milieu-impact), het maatregelenpakket: Carbstone en mechanische grindrecycling.
 - Voor het Innovatiescenario 3 (minste primair materiaalverbruik) het maatregelenpakket: Carbstone en mechanische grindrecycling.
 - Voor het Innovatiescenario 4 (laagste economisch waardeverlies) het maatregelenpakket: Carbstone en Carbon8.

Toelichting op Carbstone als maatregel

Carbstone bevat geen zand, dus alleen het grind kan vervangen worden door een duurzamer alternatief. Carbstone heeft in 2030 naast 2020 ook de hoogste potentie om de klimaat-impact en de MKI-score van OC I te verlagen. De klimaatimpact en de MKI-score van Carbstone zijn lager dan van Solidia, doordat de elektriciteitsimpact geassocieerd met de productie van Carbstone lager is in 2030. Dit is ook het geval voor Carbon8 en mechanische grindrecycling, waar met name mechanische grindrecycling van profiteert door de hogere elektriciteitsbehoefte.

Net als het gebruik van Carbstone in combinatie met Solidia in 2020 leidt Carbstone tot het laagste primaire materiaalverbruik in 2030, maar nu in combinatie met mechanische grindrecycling bij OC I. Daarnaast leidt het tot Carbonstone tot het laagste economisch waardeverlies in combinatie met Carbon8.

Toelichting op Carbone8 en mechanische grindrecycling als maatregelen

In 2030 zorgt Carbon8 voor een iets hogere reductie van de klimaatimpact (door een lagere impact van elektriciteit en transport) en mechanische grindrecycling voor een iets hogere reductie van de MKI-score (door een lagere elektriciteitsimpact). De verschillen tussen beide grindvervangers zijn echter miniem.

Toelichting op Cementklinkerproductie en thermische cementrecycling

CO₂-afvang bij cementklinkerproductie (CCS) en thermische cementrecycling zorgen ook voor minder klimaatimpact en een lagere MKI-score van OC I, maar in mindere mate dan de gekozen betoninnovaties. Daarnaast zorgt thermische cementrecycling ook voor een lager primair materiaalverbruik en minder economisch waardeverlies, maar presteert deze betoninnovatie wederom niet zo goed. CCS heeft geen invloed op primair materiaalverbruik en economisch waardeverlies, aangezien deze technologie alleen CO₂ tijdens klinkerproductie afvangt en opslaat.

Tabel 29 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van de klimaatimpact en laagst economische waardeverlies voor OC I - 2030 (Carbstone en Carbon8)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ - eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
Carbstone: LD-slakken	12.932	7,80	1,09	12	21
Carbstone: Afgevangen CO ₂	576	-337,30	-16,01	66	66
Carbstone A3 ⁽¹⁾	64.658	10,64	1,04	0	0
Carbon8: AEC-vliegas	24.247	-	-	0	0
Carbon8: Afgevangen CO ₂ ⁽²⁾	3.880	-346,27	-17,26	66	66
Carbon8: zand	24.247	12,30	1,55	18	38
Carbon8 zelf ⁽³⁾	48.494	8,97	1,25	Onbekend	Onbekend

- (1) Carbstone vangt tijdens de productie (Module A3) CO₂ op. Voor deze innovatie is daarom het verschil in impacts in Module A3 ten opzichte van het referentiebeton meegenomen per ton beton.
- (2) De afgevangen CO₂ in Carbon8 heeft een andere klimaatimpact en MKI-score dan afgevangen CO₂ bij andere innovaties omdat ervan is uitgegaan dat Carbon8 wordt geproduceerd naast een afvalenergiecentrale met CO₂-afvang, en er dus geen transport van CO₂ plaatsvindt.
- (3) Carbon8 is een grindvervanger, maar bestaat zelf ook uit verschillende materialen (in tegenstelling tot grind). De gegevens voor de materialen van Carbon8 zijn in deze tabel verwerkt.

Tabel 30 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van de MKI-score en minste primair materiaalverbruik voor OC I - 2030 (Carbstone en mechanische grindrecycling)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ -eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw(€/ton)	Max. kosten incl. btw(€/ton)
Carbstone: LD-slakken	12.932	7,80	1,09	12	21
Carbstone: Afgevangen CO ₂	576	-337,30	-16,01	66	66
Carbstone A3 ⁽¹⁾	64.658	10,64	1,04	0	0
Gerecycled grind	48.494	2,23	0,30	38	55

(1) Carbstone vangt tijdens de productie (Module A3) CO₂ op. Voor deze innovatie is daarom het verschil in impacts in Module A3 ten opzichte van het referentiebeton meegenomen per ton beton.

B.3.2 Objectcategorie II

- In 2030 worden alle innovaties met TRL 6 of hoger beschouwd. Hierdoor zijn naast de innovaties in 2020 (Solidia, Carbon8, Carbstone en geopolymeren-beton en staalvezels) en in 2025 (mechanische zand- en/of grindrecycling, mechanische cementrecycling en basaltvezelstaven en een uitbreiding van geopolymeren-beton als betoninnovatie) ook CO₂-afvang bij cementklinkerproductie (CCS) voor OC II beschikbaar in 2030.
- De maatregelenpakketten voor OC II zijn in Tabel 31 en Tabel 32 weergegeven aan het eind van deze paragraaf, en omvatten:
 - Voor het Innovatiescenario 1 (reductie van de klimaatimpact) het maatregelenpakket: CCS en mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven.
 - Voor het Innovatiescenario 2 (reductie van de MKI-score) het maatregelenpakket: CCS en mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven.
 - Voor het Innovatiescenario 3 (minste primair materiaalverbruik) het maatregelenpakket: CCS + mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven.
 - Voor het Innovatiescenario 4 (laagste economisch waardeverlies) het maatregelenpakket: mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven.

Toelichting op mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven als maatregelen

Net als bij OC II in 2025 zijn mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven voor elk innovatiescenario de beste maatregelen voor OC II. Hierbij is voor de maatregel basaltvezelstaven ook het verschil in impacts van emissies na recycling (Module D) ten opzichte van het referentiebeton van RWS meegenomen.

Toelichting op CCS als maatregel

De CO₂-afvang bij cementklinkerproductie (CCS) heeft grote potentie om de klimaatimpact en daarmee de MKI-score te verlagen, doordat 90% van de CO₂-uitstoot van het meest CO₂-intensieve onderdeel van betonproductie wordt afgevangen. Deze technologie is daarom voor zowel het innovatiescenario voor de reductie van de klimaatimpact als de reductie van de MKI-score het meest interessant. Deze innovatie heeft geen positieve of negatieve invloed op het materiaalverbruik, en wordt daarom voor het innovatiescenario van minst primair materiaalverbruik ook meegenomen.

CCS is echter wel met hogere kosten geassocieerd, waardoor de kosten van klinkers en daarmee het cement stijgen. Het economisch waardeverlies van cement is groter bij de toepassing van CCS, waardoor de toepassing van CEM III/B het meest voor de hand ligt.

Toelichting op geopolymere-beton

Zoals toegelicht in Paragraaf B.2.2 is het effect van geopolymere-beton op het primaire materiaalverbruik van het basisscenario en het bijbehorende economisch waardeverlies niet vastgesteld. Er wordt voor de beoordeling op de innovatiescenario's voor primaire materiaalverbruik en voor economisch waardeverlies uitgegaan van het cement in het referentiebeton van RWS.

Tabel 31 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van de klimaatimpact en MKI-score en minste primair materiaalverbruik voor OC I voor OC II - 2030 (CCS beton en mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ -eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
CEM III/B met CO ₂ -afvang	12.385	124,5	11,69	139	139
Gerecycled zand	51.861	2,23	0,30	20	41
Gerecycled grind	67.779	2,23	0,30	38	55
Betongranulaat	3.594	2,34	0,33	12	21
Poederkoolvliegias	1.548	11,70	1,64	73	90
Kalksteenmeel	929	13,80	1,90	81	85
Basaltvezelstaven ⁽¹⁾	194	8.099	1.082	70	70
Water	10.528	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

(1) Het gebruik van basaltvezelstaven heeft een grote invloed op de milieu-impact van Module D. In de klimaat-impact en de MKI-score is daarom het verschil in impact van Module D ten opzichte van de referentie ook meegenomen, omgerekend per 1 ton basaltvezelstaven.

Tabel 32 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van laagst economische waardeverlies voor OC II - 2030 (mechanische zand- en grindrecycling en basaltvezelstaven).

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ -eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
CEM III/B	12.385	286	22,1	123	131
Gerecycled zand	51.861	2,23	0,30	20	41
Gerecycled grind	67.779	2,23	0,30	38	55
Betongranulaat	3.594	2,34	0,33	12	21
Poederkoolvliegias	1.548	11,70	1,64	73	90
Kalksteenmeel	929	13,80	1,90	81	85
Basaltvezelstaven ⁽¹⁾	194	8.099	1.082	70	70
Water	10.528	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

(1) Het gebruik van basaltvezelstaven heeft een grote invloed op de milieu-impact van Module D. In de klimaat-impact en de MKI-score is daarom het verschil in impact van Module D ten opzichte van het referentiebeton ook meegenomen, omgerekend per 1 ton basaltvezelstaven.

B.3.3 Objectcategorie III

1. In 2030 worden alle innovaties met TRL 6 of hoger beschouwd. Hierdoor zijn naast de innovaties in 2020 (Solidia, Carbon8, Carbstone en geopolymere-beton en staalvezels)

en in 2030 (mechanische zand- en/of grindrecycling, mechanische cementrecycling en basaltvezelstaven en een uitbreiding van geopolymeren-beton als betoninnovatie) ook CO₂-afvang bij cementklinkerproductie (CCS) en CSA Beliet voor OC III beschikbaar in 2030.

2. De maatregelenpakketten voor OC III zijn in Tabel 33 en Tabel 34 weergegeven aan het eind van deze paragraaf, en omvatten:
 - Voor het innovatiescenario: reductie van de klimaatimpact, het maatregelenpakket: CCS (CEM I & CEM III/B) en mechanische zand- en grindrecycling.
 - Voor het innovatiescenario: reductie van de MKI-score, het maatregelenpakket: CCS (CEM I & CEM III/B) en mechanische zand- en grindrecycling.
 - Voor het innovatiescenario: minste primair materiaalverbruik, het maatregelenpakket: CCS (CEM I & CEM III/B) en mechanische zand- en grindrecycling.
 - Voor het innovatiescenario: laagste economisch waardeverlies, het maatregelenpakket: CSA-beliet en mechanische zand- en grindrecycling.

Toelichting op CCS als maatregel

Net als bij OC II heeft CCS (CEM I & CEM III/B) voor OC III in 2030 grote potentie om de klimaatimpact en daarmee de MKI-score te verlagen en kan het toegepast worden binnen het innovatiescenario voor minst materiaalverbruik. Voor OC III kan daarnaast ook CO₂ worden opgevangen als maatregel bij de klinkerproductie voor CEM I. Wel zorgt CCS voor meer economisch waardeverlies van het te produceren beton, zoals toegelicht in Paragraaf B.3.1.

Toelichting op CSA-beliet als maatregel

Specifiek voor OC III is CSA-beliet ook beschikbaar als vervanging van Portlandcement (CEM I). Deze betoninnovatie verlaagt de klimaatimpact en de MKI-score van het beton in OC III aanzienlijk, maar niet zo sterk als de betoninnovatie CCS (CEM I & CEM III/B). Het is wel de meest geschikte betoninnovatie voor het innovatiescenario met het laagste economisch waardeverlies, aangezien CSA-beliet goedkoper is dan CEM I en daarmee minder waarde verliest gedurende de levensduur als beton.

Tabel 33 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van de klimaatimpact en MKI-score en minste primair materiaalverbruik voor OC III - 2030 (CCS (CEM I & CEM III/B) en mechanische zand- en grindrecycling)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ - eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
CEM I met CO ₂ - afvang	60.554	432,0	28,72	186	186
CEM III/B met CO ₂ - afvang	137.256	124,5	11,69	139	139
Gerecycled zand	295.100	2,23	0,30	20	41
Gerecycled grind	385.123	2,23	0,30	38	55
Betongranulaat	20.185	2,34	0,33	12	21
Wapeningsstaal	24.222	1.381	85,76	1.420	1.780
Water	70.646	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

Tabel 34 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van laagst economische waardeverlies voor OC III - 2030 (CSA-beliet en mechanische zand- en grindrecycling)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ - eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
CSA-beliet	60.554	615,0	44,16	116,45	146,2
CEM III/B	137.256	286,0	22,07	123	131
Gerecycled zand	295.100	2,23	0,30	20	41
Gerecycled grind	385.123	2,23	0,30	38	55
Betongranulaat	20.185	2,34	0,33	12	21
Wapeningsstaal	24.222	1.381	85,76	1.420	1.780
Water	70.646	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

B.3.4 Objectcategorie IV

1. In 2030 worden alle innovaties met TRL 6 of hoger beschouwd. Hierdoor zijn naast de innovaties in 2020 (Solidia, Carbon8, Carbstone en geopolymere-beton en staalvezels) en in 2025 (mechanische zand- en/of grindrecycling, mechanische cementrecycling en basaltvezelstaven en een uitbreiding van geopolymere-beton als betoninnovatie), ook CO₂-afvang bij cementklinkerproductie (CCS) in 2030 voor OC IV beschikbaar.
2. De maatregelenpakketten voor OC IV zijn in Tabel 35 en Tabel 36 weergegeven aan het eind van deze paragraaf, en omvatten:
 - Voor het Innovatiescenario 1 (reductie van de klimaatimpact) het maatregelenpakket: CCS (CEM III/B) en mechanische zand- en grindrecycling.
 - Voor het Innovatiescenario 2 (reductie van de MKI-score) het maatregelenpakket: CCS (CEM III/B) en mechanische zand- en grindrecycling.
 - Voor het Innovatiescenario 3 (minste primair materiaalverbruik) het maatregelenpakket: CS (CEM III/B) en mechanische zand- en grindrecycling.
 - Voor het Innovatiescenario 4 (laagste economisch waardeverlies) het maatregelenpakket: mechanische zand- en grindrecycling.

De maatregelenpakketten voor de innovatiescenario's voor OC IV zijn bijna identiek aan die binnen OC III. Voor OC IV wordt geen Portlandcement (CEM I) toegepast, waardoor CCS alleen toegepast wordt op CEM III/B. Daarnaast wordt CSA-beliet niet voor OC IV toegepast en wel voor OC III. Hierdoor omvat het innovatiescenario voor het laagste economisch waardeverlies alleen mechanische zand- en grindrecycling en niet ook CSA-beliet.

Tabel 35 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van de klimaatimpact en MKI-score en minste primair materiaalverbruik voor OC IV - 2030 (CCS (CEM III/B) en mechanische zand- en grindrecycling)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ - eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
CEM III/B met CO ₂ -afvang	35.138	124,5	11,69	139	139
Gerecycled zand	84.650	2,23	0,30	20	41
Gerecycled grind	110.737	2,23	0,30	38	55
Betongranulaat	5.856	2,34	0,33	12	21
Wapeningsstaal	4.259	1.381	85,76	1.420	1.780
Water	19.166	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

Tabel 36 - Maatregelenpakket innovatiescenario's: Reductie van laagst economische waardeverlies voor OC IV - 2030 (mechanische zand- en grindrecycling)

Materiaal	Hoeveelheid (ton/jaar)	Klimaatimpact (kg CO ₂ - eq./ton)	MKI-score (€ MKI/ton)	Min. kosten incl. btw (€/ton)	Max. kosten incl. btw (€/ton)
CEM III/B	35.138	286,0	22,07	123	131
Gerecycled zand	84.650	2,23	0,30	20	41
Gerecycled grind	110.737	2,23	0,30	38	55
Betongranulaat	5.856	2,34	0,33	12	21
Wapeningsstaal	4.259	1.381	85,76	1.420	1.780
Water	19.166	0,35	0,04	Onbekend	Onbekend

C Kosten materialen voor productie beton

C.1 Zichtjaar 2020

De kosten van de materialen per ton voor het beton zoals deze gebruikt worden voor de opgave van RWS in 2020, zijn weergegeven in Tabel 37. De gegevens zijn door CE Delft vertaald naar kosten per ton geleverd materiaal op de betonproductielocatie. De onderliggende gegevens over de kosten zijn verkregen van RWS en een aantal betonexperts uit de markt. Het gaat hierbij om vertrouwelijke informatie.

De kosten van de materialen zijn relevant voor de beoordeling op Innovatiescenario 4 (laagste economische waardeverlies) voor een betoninnovatie.

Tabel 37 - Kosten materialen voor productie beton toepast in de opgave van RWS (2019/2020)

Materiaal beton	Kostenrange excl. transport (€/ton excl. btw)	Kosten exclusief transport (€/ton excl. btw)	Kosten inclusief transport (€/ton excl. btw)
Betongranulaat 4/12	6-14	10,00	14,50
CEM I	90-120	105,00	133,00
CEM III/B	78-85	81,50	109,50
Kalksteenmeel (hoge kwaliteit)	50-55	52,50	72,00
Poederkoolvliegias	40-55	47,50	70,00
Grind/steenslag	13-27	20,00	61,63
Zand	4-22	12,50	41,51
Wapeningsstaal	1.200-1.500	1.350	1.375
Secundair staal*	400-600	N.B.	500
Water	0,79	N.B.	0,79

Bron: RWS en betonexperts.

* Voor secundair staal zijn alleen kosten inclusief transport bekend.

Voor het bepalen van de kosten inclusief transport is gebruik gemaakt van de transport-afstanden zoals weergegeven in Bijlage A van het rapport 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b).

De volgende kosten (exclusief btw) voor transport per ton getransporteerd materiaal voor de productie van beton over een kilometer (ton*km) zijn voor dit onderzoek gehanteerd:

- Vrachtwagen: € 0,15/ton*km (exclusief btw) (Rijksoverheid, 2020)⁵.
- Binnenvaart: € 0,08/ton*km (exclusief btw) (Rijksoverheid, 2020)⁶.
- Zeevaart: € 0,42/ton*km (exclusief btw) (Rijksoverheid, 2020).

⁵ Dit is een gemiddelde van de aangegeven waarden van tussen de € 0,10 en € 0,20 per ton*km transport.

⁶ Dit is een combinatie van € 0,03 per ton*km kosten vaste transport, € 0,04 per ton*km voor- en natransport, en een expertinschatting van € 0,01 voor variabele kosten.

C.2 Zichtjaren 2025 en 2030

De kosten van de materialen in 2025 en 2030 zijn zowel inclusief als exclusief transportkosten weergegeven in Tabel 38. Deze kosten zijn berekend op basis van een jaarlijkse inflatie van 1,5% voor de materialen. De keuze voor deze inflatie is hieronder toegelicht.

Tabel 38 - prijzen materialen beton (2025/2030)

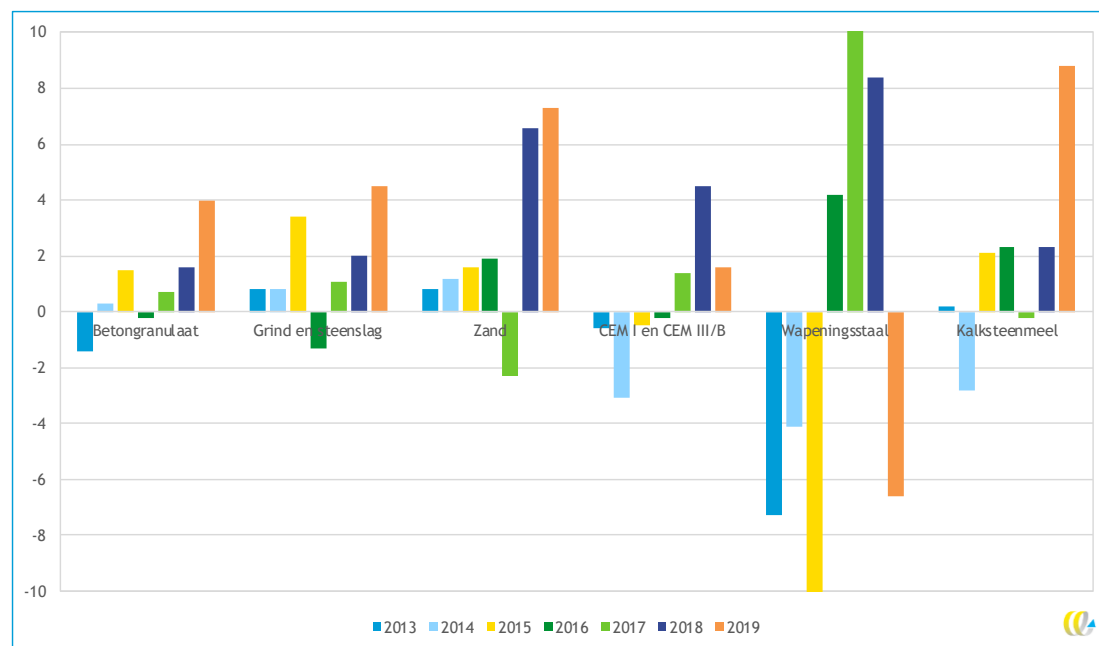
Materiaal beton	2025		2030	
	Kosten excl. transport (€/ton excl. btw)	Kosten incl. transport (€/ton excl. btw)	Kosten excl. transport (€/ton excl. btw)	Kosten incl. transport (€/ton excl. btw)
Betongranulaat 4/12	6-15	11-20	7-16	12-21
CEM I	97-129	127-159	104-139	137-172
CEM III/B	84-92	114-122	91-99	123-131
Hoogovenslak	16-78	40-102	14-84	44-110
Kalksteenmeel (hoge kwaliteit)	54-59	75-80	58-64	81-85
Poederkoolvliegias	43-59	67-83	46-64	73-90
Grind/steenslag	14-29	36-51	15-31	38-55
Zand	4-24	18-38	5-26	20-41
Wapeningsstaal	1.290-1.620	1.320-1.650	1.390-1.750	1.420-1.780
Secundair staal*	N.B.	431-646	N.B.	464-696
Water*	N.B.	0,85	N.B.	0,92

* Voor secundair staal en water zijn alleen kosten inclusief transport bekend.

In Figuur 4 zijn aan de hand van de consumentprijsindex (CPI) de prijsstijgingen/dalingen (%) voor de materialen: betongranulaat, grind en steenslag, zand, cement, wapeningsstaal en kalksteenmeel voor de periode 2013 t/m 2019 weergegeven (bron: (CBS Statline, 2020b)). Deze tabel geeft de inflatie (die wordt gemeten als de procentuele verandering van de ConsumentenPrijsIndex (CPI) ten opzichte van dezelfde periode het jaar daarvoor) weer voor het afgelopen jaar.

We stellen met Figuur 4 vast dat de prijzen voor de materialen erg veranderlijk/volatiel zijn. Opvallend is de veranderlijkheid voor de prijs van wapeningsstaal, die flinke uitschieters naar zowel boven als beneden heeft. De prijzen voor de toeslagstoffen van beton: van betongranulaat, grind en steenslag, zand en kalksteenmeel nemen over de voorgenoemde periode toe.

Figuur 4 - Jaarmutaties Constumenteprijsindex (%).



Bron: (CBS Statline, 2020b).

De gemiddelde jaarlijkse prijsstijging van alle materialen bedraagt 1,2%. Over de periode 2013-2019 is er sprake van een gemiddelde inflatie van 1,4%. Uit andere cijfers van het CBS blijkt dat in de iets langere periode 2000-2019 de gemiddelde inflatie 1,9% bedraagt. In de periode tot 2030 wordt er voor dit onderzoek daarom van een jaarlijkse inflatie van 1,5% uitgegaan.⁷ Dit percentage wordt ook bij de doorrekening van de materialen gebruikt waar geen prijsindexcijfers van bekend zijn. Ook in de berekening van de transportkosten is de inflatie over de jaren meegenomen.

De kosten van de materialen voor de productie van beton zullen voor dit onderzoek tot 2030 stijgen.

Effecten van corona

COVID-19 en de genomen maatregelen om de verspreiding ervan te beperken, hebben economische gevolgen en daarmee op de prijsontwikkeling van materialen in 2025 en in 2030. Het CPB heeft vier verschillende scenario's opgesteld die voor Nederland een beeld geven. In alle scenario's resulteert een economische recessie. In het lichtste scenario veert de economie al in het vierde kwartaal van 2020 weer op, in het zwaarste scenario ontstaan er ook problemen in de financiële sector en verslechtert het buitenland beeld verder. Het BBP zal in 2020 krimpen met 1,2 tot 7,7%.

COVID-19 heeft daarmee ook invloed op de bouwsector. Veel nieuwe opdrachten worden uitgesteld en opdrachten vallen weg. Het Economisch Instituut voor de Bouw schat dat de komende twee jaar de bouwproductie met 15% zal afnemen (EIB, 2020). De vraaguitval leidt tevens tot een afname van de vraag naar materialen. Dit zal ook een invloed hebben op de prijzen. Bij een lagere vraag en een gelijkblijvend aanbod zullen de prijzen dalen. Het is

⁷ Dit is een inschatting en daardoor is er sprake van een hoog onzekerheidsmarge.

nog onduidelijk wat de exacte effecten van COVID-19 zijn en hoe lang deze effecten invloed hebben. Voor dit onderzoek is er daarom geen rekening mee gehouden voor de beoordeling van de prijsontwikkeling van de materialen voor de productie van beton.

C.3 Vraag- en aanbodfactoren betonmarkt

Een prijsindexcijfer wordt bepaald op basis van de prijsontwikkelingen van de verschillende componenten voor de kosten waaruit het te realiseren product - in dit geval beton - is opgebouwd. Deze paragraaf laat zien welke factoren daarop invloed hebben. Deze factoren vormen een onzekerheid voor het inschatten van de prijsontwikkeling in 2025 en 2030. De samenkomst van de vraag naar en aanbod van beton bepalen gezamenlijk de actuele prijzen van beton. Tabel 39 geeft een overzicht van de factoren die van invloed zijn op de vraag en het aanbod.

Daarnaast bevat Tabel 39 het nummer van de PRODCOM-lijst voor de prijsindex en het prijsindexcijfer. De prijsindex geeft inzicht in de ontwikkeling van de daadwerkelijk kosten van materialen, producten en diensten voor werken van beton voor de bouw. De prijsindex die het meest relevant is voor kunstwerken, is voor het grootste gedeelte opgetrokken uit beton.

Tabel 39 - Prijsindexcijfer beton - overzicht factoren vraag- en aanbod die invloed op het prijsindexcijfer hebben

Materiaal	Factoren vraag	Factoren aanbod	Prijsindex - Nr. 2361 Werken van beton voor de bouw (PRODCOM-lijst)
Beton	Bruto binnenlands product (BBP). Bouwinvesteringen; woning - en utiliteitsbouw en GWW.	Beschikbaarheid materialen.	Prijsindexcijfer excl. accijns 134,7 (2005=100). Jaar op jaar ontwikkeling 1,2%.

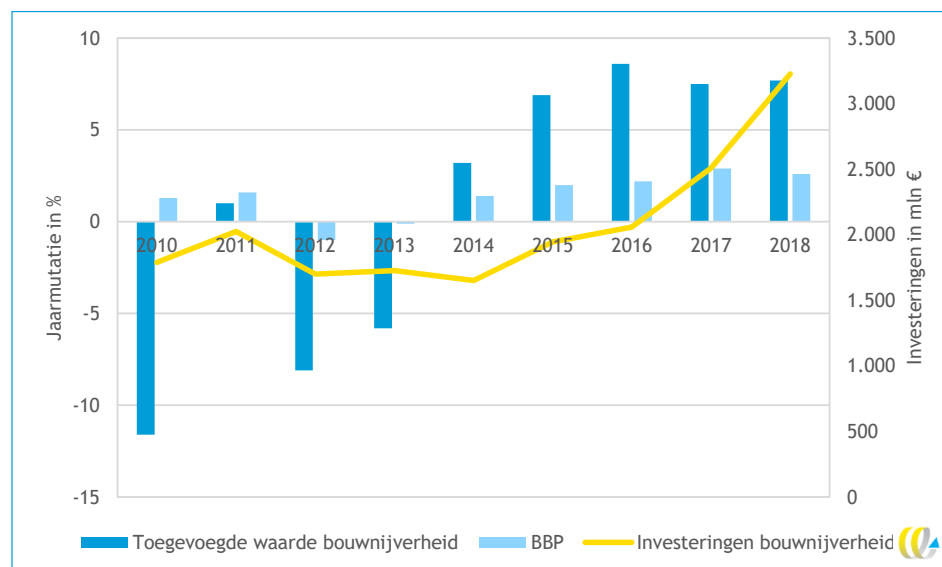
Vraag

De vraag naar beton komt met name voort uit de Woningbouw, Utiliteitsbouw en GWW. De te verwachten ontwikkeling in de komende jaren binnen deze sectoren bepalen dus indirect de totale vraag naar beton en zijn daarmee vanuit de vraagzijde van de betonmarkt van invloed op de prijzen.

Hierbij is het BBP de belangrijkste factor voor de hoogte van de investeringen. Uit onderzoek van EIB blijkt dat bouwinvesteringen een sterk cyclisch karakter hebben en de ontwikkelingen van het BBP volgen (EIB, 2009). De pieken en dalen in bouwinvesteringen zijn daarbij sterker dan die voor het BBP zelf.

Figuur 5 geeft weer hoe investeringen in bouwnijverheid in Nederland zich verhouden tot het BBP voor de periode 2010-2018. Vastgesteld wordt dat de investeringen toenemen met het BBP en inderdaad de ontwikkelingen van het BBP volgen.

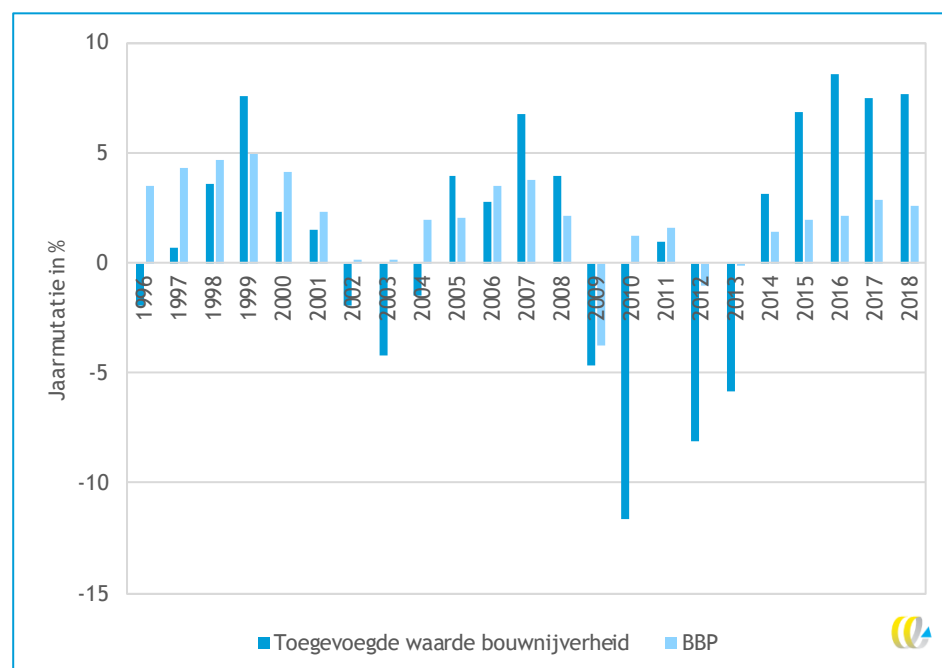
Figuur 5 - Bouwinvesteringen in vergelijking met BBP



Bron: CBS Statline, bewerking CE Delft (CBS Statline, 2020a; 2020b; 2020c).

Omdat gegevens over de investeringen in de bouwnijverheid niet beschikbaar zijn van voor 2010, in Figuur 6 is de relatie tussen het BBP en de toegevoegde waarde van de bouwnijverheid weergegeven voor de periode 1996-2017. Hieruit blijkt dat de pieken en dalen in de toegevoegde waarde zijn ook in Nederland sterker dan voor het BBP, maar wel dezelfde ontwikkeling volgt als het BBP.

Figuur 6 - Ontwikkeling toegevoegde waarde bouwnijverheid in vergelijking met BBP



Bron: CBS Statline (CBS Statline, 2020a; 2020c).

De vraag naar materialen die gebruikt worden in beton zijn uiteraard afhankelijk van de totale vraag naar beton. Uit onderzoek van EIB blijkt dan ook dat het verbruik van beton- en metselzand en grind en steenslag in gebonden toepassingen een sterk conjunctureel verloop heeft (EIB, 2009). Dit onderzoek laat zien dat het verbruik van deze materialen meebeweegt met de bouwinvesteringen en dus met het BBP.

Naast het BBP zijn er nog een aantal andere aspecten die invloed hebben op de bouw-investeringen:

- Woningbouw: bevolkingsgroei en grootte per huishouden (groei aantal huishoudens).
- Utiliteitsbouw: ontwikkelingen in werkgelegenheid en de omvang van de beroepsbevolking.
- GWW: mobiliteitsontwikkelingen. Dit is weer in sterke mate afhankelijk van factoren als BBP, werkgelegenheid en bevolkingsomvang maar ook van overheidsbeleid (investeringen in infrastructuur, en verdeling hiervan over modaliteiten).

Aanbod

Vanuit de markt is schaarste of overvloed in het aanbod van beton van invloed op de prijzen voor beton. Een toename in de productie van beton zorgt voor een groter aanbod en lagere prijzen. Andersom zal een afname in het aanbod van beton leiden tot hogere prijzen als gevolg van schaarste. Door de variatie in ingrediënten die gebruikt kunnen worden voor betonproductie is schaarste van beton an sich niet zo snel het geval. Wel heeft het aanbod van de verschillende materialen die gebruikt worden voor beton invloed op de aangeboden betonsamenstellingen en daarmee op de prijzen van beton.

Prijzen

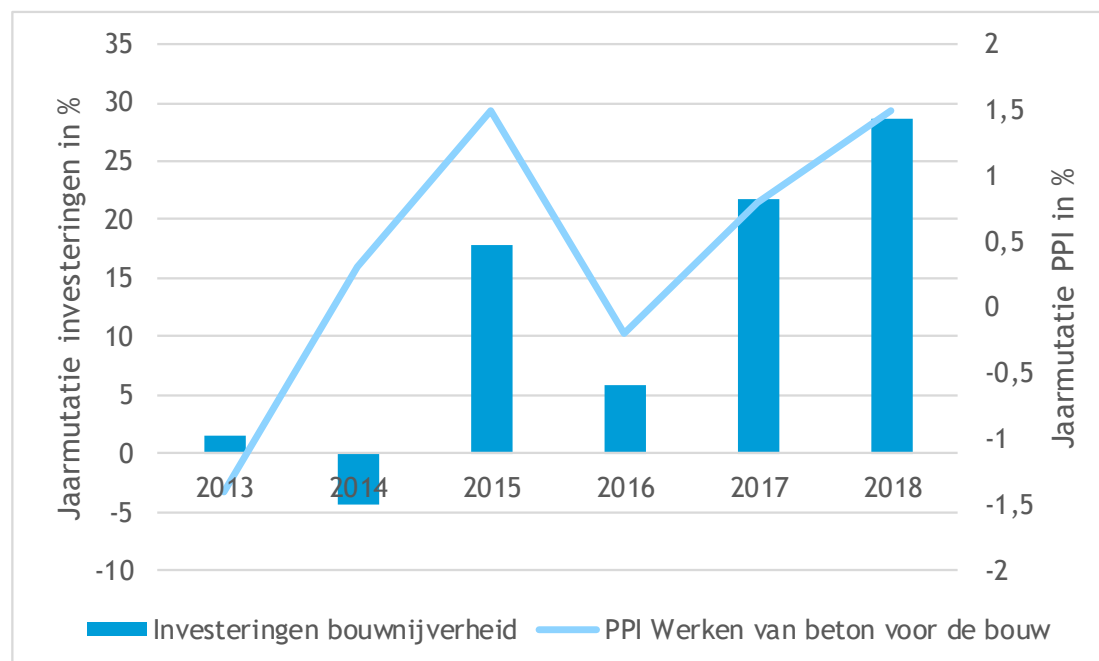
Om een beeld te krijgen van de ontwikkeling van de prijzen van beton is de producenten-prijsindex (PPI) gebruikt. Een PPI is een indexcijfer dat de gemiddelde kostenontwikkeling weergeeft van Nederlandse industrieproducten. Er is hierbij gebruik gemaakt van de PPI-statistiek van het CBS⁸ voor 'werken van beton voor de bouw'.

Figuur 7 geeft de ontwikkeling van deze prijsindex weer in de periode 2013 en 2018. Daarbij wordt ook de ontwikkeling in investeringen in de bouwnijverheid gepresenteerd. Vastgesteld is dat de prijzen van beton en de investeringen in bouwnijverheid een vergelijkbare ontwikkeling volgen, al is er een opmerkelijk verschil in 2014. Dat deze ontwikkelingen zo aan elkaar gelinkt zijn toont aan dat met name de vraagfactoren een invloed hebben op de prijzen terwijl de aanbodfactoren een stuk minder van belang zijn.

⁸ De CBS-statistiek 'Producentenprijzen (PPI); afzet-, invoer-, verbruiksprijzen, index 2015=100' bevat producentenprijzen van producten ingedeeld op basis van goederenclassificatie PRODCOM.



Figuur 7 - Ontwikkeling PPI beton in vergelijking met investeringen in bouwnijverheid



Bron: [Productenprijzen \(PPI\); afzet-, invoer-, verbruiksprijzen, index 2015=100](#)

C.4 Vraag- en aanbodfactoren per materiaal

Voor de kosten van materialen geldt dat deze afhankelijk zijn van vraag- en aanbodfactoren.

Over het algemeen geldt dat de vraag naar een materiaal een samengestelde is van de vraag naar deze materiaal vanuit zijn verschillende toepassingen. Indien een materiaal voor een groot deel wordt gebruikt in één toepassing (bijvoorbeeld in beton) dan zal de vraag naar deze materiaal met name worden bepaald door de vraag vanuit deze toepassing. De conjunctuur is van invloed op de vraag vanuit de verschillende toepassingen, doordat investeringen (bijvoorbeeld in bouw en GWW) een sterk cyclisch karakter hebben en de ontwikkelingen in het BBP volgen.

Het aanbod van de materialen kan van verschillende factoren afhangen, te weten:

- **Winningsniveau primaire materialen:** Het aanbod van primaire materialen hangt over het algemeen af van het winningsniveau van deze materialen. In Nederland zelf worden slechts een beperkt aantal primaire materialen gewonnen (PBL, 2017). De mineralen die in Nederland worden gewonnen zijn zout, kalksteen⁹, gips, grind, zand¹⁰ en klei. De materialen voor bouwmaterialen die in Nederland worden gewonnen, worden met name verwerkt in bouwmaterialen in Nederland. Materialen voor bouwmaterialen worden door Nederland ook ingevoerd. Het gaat dan om grind en zand, sier- en bouwsteen, krijt en dolomiet, leisteen, kalksteen, gips en klei (PBL, 2017). De invoer

⁹ De winning van kalksteen in Nederland zal in de toekomst naar verwachting afnemen omdat de winning in Limburg wordt afgebouwd (PBL, 2017).

¹⁰ De winning van ophoogzand kent veel fluctuaties doordat het afhangt van de uitvoering van bouwwerkzaamheden (zoals Maasvlakte II) en kustversterkingen (PBL, 2017).

hiervan is in de periode 2007-2017, mede vanwege de economische crisis, wel afgenomen. Het totale aanbod van de primaire materialen in Nederland is dus afhankelijk van de winning in Nederland en de invoer uit het buitenland.

- Productie primair materiaal bij secundaire materialen: Voor andere materialen van beton zijn nog andere aanbodfactoren van belang. Voor een aantal restproducten en/of bijproducten (zoals hoogovenslak, poederkoolvliegias en AEC-granulaat) geldt dat het aanbod ervan afhankelijk is van het productniveau van het primaire proces.
- Regelgeving en normering: Ook regelgeving en beleidskeuzes kunnen van invloed zijn op de vraag naar en het aanbod van materialen.

Tabel 40 geeft een overzicht van de vraag en aanbodfactoren die de kosten van materialen voor beton beïnvloeden en geeft per materiaal aan welke prijsindex wordt aangehouden. Als vraagfactor geldt uiteraard ook de invloed van de vraag naar beton in het algemeen. Deze wordt niet weergegeven in de tabel. Voor dit onderzoek is van een specifieke prijsindex gebruik gemaakt waar dat mogelijk is. Indien deze voor een materiaal niet beschikbaar is, is er gebruikt gemaakt van een algemene prijsindex of van literatuurgegevens.

Tabel 40 - Overzicht vraag en aanbodfactoren materialen in huidige betontypen gebruikt door Rijkswaterstaat

Materiaal beton	Specifieke vraagfactoren	Aanbodfactoren	Prijsindex CBS ¹¹
Betongranulaat	1. De kosten van grind/steenslag. • Maximaal aandeel betongranulaat: NEN-EN 206+NEN 8005:2017.	Hoeveelheid vrijgekomen bouw- en sloopafval.	2361 Werken van beton voor de bouw.
CEM I		Capaciteitsniveau productie (onder of overcapaciteit).	2351 Cement.
CEM III/B		Idem.	2351 Cement.
Hoogovenslak	Vraag vanuit wegenbouw, asfaltindustrie, glas-industrie.	Productieniveau ruwijzer hoogovens in Nederland en in Europa.	241 IJzer en staal en ferrolegeringen.
Kalksteenmeel	Vraag vanuit de bouw-industrie.	Productieniveau in kalksteen-groeves.	081 Steen, zand en klei.
Poederkoolvliegias	Vraag vanuit straatklinker-productie, als asfaltvulstof en in grofkeramiek.	Productieniveau kolengestookte elektriciteitscentrales in Nederland en in Europa. Sluiting kolencentrales beperkt dus het aanbod.	Onbekend.
Grind en steenslag		Voorraad natuurlijk grind.	0812123 Steenslag voor de vervaardiging van beton, voor de wegenbouw en voor ander gebruik in de bouw.
Zand		Voorraad natuurlijk zand.	0812119 Zand voor de bouw.
Wapeningsstaal	Vraag vanuit de bouw.	Capaciteitsniveau productie (onder of overcapaciteit).	2410621 Warmgewalste staven voor het wapenen van beton.

¹¹ [Producentenprijzen \(PPI\); afzet-, invoer-, verbruiksprijzen, index 2015=100](#)

C.4.1 Bevindingen per materiaal

Voor een aantal specifieke materialen is hier nog nader, op de specifieke factoren die van invloed zijn, op de kosten ingegaan. De prijsindex is gebaseerd op de producentenkosten (PPI) gegevens van CBS, onderverdeeld in de PRODCOM-categorieën. De PRODCOM-lijst is een lijst van industriële producten en diensten op het gebied van delfstoffen en industrie. Deze lijst komt overeen met de Paragrafen B en C van de Standaard Bedrijfsindeling (SBI) 2008.

Betongranulaat

Betongranulaat is een mengsel van steenslag/grind, zand, vulstof en cement als bindmiddel. Nederland heeft als doel om in 2050 volledig circulair te zijn. Om dit te realiseren worden alleen nog duurzaam geproduceerde, hernieuwbare of algemeen beschikbare materialen gebruikt en zo weinig mogelijk afval achterlaten. Het gebruik van betongranulaat sluit de betonkringloop.

De vraag naar betongranulaat wordt mede bepaald door de kosten van grind/steenslag, omdat betongranulaat gebruikt wordt als vervangend bestanddeel van grind en steenslag in beton. Momenteel lijkt de vraag naar betongranulaat echter vooral buiten de betonsector aanwezig te zijn. Zo schat BRBS in dat van de 12 Mton steenachtig afval die vrijkomt uit beton, slechts 0,8 tot 1 Mton secundaire materialen uit beton weer toegepast worden binnen de betonindustrie. Hieronder valt betongranulaat (zo'n 400 kton), menggranulaat, ecogranulaat en oud ballastmateriaal. Het overgrote deel van vrijkomend betonafval komt terecht in funderingslagen in de wegenbouw¹².

Op termijn is de verwachting echter dat de vraag naar secundaire toeslagmaterialen (zoals betongranulaat) vanuit de betonsector en andere sectoren zal groeien (Frenay, et al., 2015),¹³. De toenemende schaarste aan grind heeft een kostenopdrijvend effect tot gevolg, waardoor de concurrentiepositie voor betongranulaat wordt verbeterd (Frenay, et al., 2015). Daarnaast wordt de vraag bepaald door de normering van het aandeel betongranulaat in constructief beton, NEN-EN 206+NEN 8005:2017 geven aan dat maximaal 30% van het volume van grof toeslagmateriaal mag bestaan uit type A1 betongranulaat of 20% in het geval van A2 betongranulaat. Naar verwachting zal de vraag naar betongranulaat in de toekomst toenemen, omdat het een bijdrage levert aan de circulaire economie en een sterkere concurrentiepositie krijgt ten opzichte van grind (Oosterveen, 2015).

Het aanbod van betongranulaat wordt bepaald door de hoeveelheid vrijgekomen bouw- en sloopafval. Het aanbod hangt tevens af van de sortering- en scheidingsmanier van het puin. De factoren ruimte, tijd, budget en stoffen bepalen of er gesorteerd wordt of niet. Het hangt daarom per project af of sorteren loont om betongranulaat te sorteren (Oosterveen, 2015). Er wordt de komende jaren een overschot van puin verwacht. Dit is te verklaren doordat het Nederlandse bouwprogramma verschuift van renovatie en herbesteding naar meer sloop en nieuwbouw.

¹² E-mailconversatie met BRBS.

¹³ E-mailconversatie met BRBS.

Cement

Volgens Sverdrup, et al. (2017) hangt de mondiale cement productie samen met de mondiale bouwactiviteit en onderhoud van infrastructuur. De vraag naar cement volgt zodanig een patroon, waarbij de vraag toeneemt bij de transitie naar een industriële samenleving en vervolgens afneemt naar het onderhoudsniveau voor deze standaard.

De cementindustrie heeft momenteel te maken met een overcapaciteit aan productie, waardoor het mondiale aanbod groter is dan de mondiale vraag (Accenture, 2019). Met name de overcapaciteit in China heeft tot internationale kostendalingen geleid, doordat daar is geïnvesteerd in een hogere productiecapaciteit terwijl de vraag naar cement is gedaald. Daarnaast kan cement door deze investeringen in China voor 30-40% van de kosten bij Europese bedrijven geproduceerd worden, wat de mondiale kosten van cement verder doet dalen (EIB, 2016). De verwachting is dat deze overcapaciteit op de lange termijn zal afnemen door het sluiten van productielocaties (World Cement, 2018). Er wordt echter ook ingeschat dat de huidige overcapaciteit de wereld de komende 20 jaar van cement kan voorzien (Accenture, 2019). Onze inschatting is dat de overcapaciteit in ieder geval tot en met 2030 blijft aanhouden.

Kalksteenmeel

Kalksteenmeel is een tot poeder gemalen kalksteen. Het is een inerte vulstof die de structuur en dichtheid van het beton verbeterd en meer samenhang en stabiliteit geeft aan het beton. Kalksteenmeel wordt ook toegepast voor industriële doeleinden, zoals kalkmeststof, mengvoederindustrie, papierindustrie, rookgasontzwaveling en als vulstof in diverse toepassingen. Kalksteen komt veel voor in de ondergrond, het is sedimentair gesteente dat is ontstaan door opeenhoping van kalkhoudende stoffelijke overblijfselen van in zee levende organismen. Kalksteen is daarom vooral in tropische gebieden gevormd, maar ook in Noordwest-Europa. Er is wereldwijd dus veel kalksteen(meel) tot beschikking. Het aanbod van kalksteenmeel hangt echter af van het productieniveau in kalksteengroeves. De winning van kalksteen in Nederland nam tot 2000 toe, maar daarna af. Dit is te verklaren doordat de winning van kalksteen in Limburg wordt afgebouwd en in 2019 de ENCI groeve is gesloten, hiermee daalt het aanbod van kalksteenmeel.

De vraag naar kalksteenmeel hangt af van de vraag van de bouwindustrie. Dit hangt tevens samen met de vraag naar beton en cement.

Hoogovenslakken: huidige toepassing

Wereldwijd wordt ongeveer 90% van de hoogovenslak toegepast in cement en beton (Vermeulen, 2020). Ondanks dat dit materiaal ook wordt toegepast binnen de glasindustrie en wegenbouw¹⁴, zal de vraag naar dit materiaal daarom met name bepaald worden door de vraag naar cement en beton.

Hoogovenslak is een bijproduct dat ontstaat bij de productie van ruwijzer in hoogovens en het aanbod van hoogovenslak is daarom afhankelijk van de productie van ruwijzer. De ruwijzerproductie is afhankelijk van de ontwikkeling van de mondiale economie. Tijdens een recessie of crisis zal er minder staal worden geproduceerd en is het aanbod van hoogovenslak dus ook lager. In 2009 ontstond er bijvoorbeeld een tekort aan hoogovenslak doordat veel staalproducenten als gevolg van de economische crisis de hoogovens plat

¹⁴ [Catalogus van secundaire en gerecycleerde granulateen : Hoogovenslakken/](#)

legden (Cobouw, 2009). Er is een kans dat de huidige coronacrisis een vergelijkbaar effect kan hebben.

Op basis van de huidige vraag en aanbod is er in veel landen lokaal al sprake van een ondercapaciteit van hoogovenslak. Dit wordt momenteel hoofdzakelijk opgelost door de overcapaciteit van het aanbod in de Verenigde Staten, China, Japan en Rusland, die hoogovenslakken exporteren (Assi, et al., 2020). De verwachting is dat het aanbod van hoogovenslak op termijn echter verder zal afnemen, ook in de landen waar nu nog sprake van overproductie is (Vermeulen, 2020). Deze afname van aanbod is te verklaren doordat de Verenigde Staten, China, Japan en Rusland al jaren meer staal maken dan lokaal afgenomen kan worden (ABN-AMRO, 2020), waardoor de kosten van staal zijn gedaald terwijl de kosten opgelopen zijn (FT, 2019; AD, 2019). Deze situatie lijkt op de lange termijn voor deze landen onhoudbaar, waardoor een lager aanbod in de nabije toekomst niet onwaarschijnlijk lijkt te zijn.

Poederkoolvliegias

Poederkoolvliegias is een restproduct van kolengestookte elektriciteitscentrales die afgevangen wordt uit de verbrandingsgassen. Dit restmateriaal wordt toegepast in cement of rechtstreeks in beton. Ook kan poederkoolvliegias worden toegepast bij straatklinkerproductie, als asfaltvulstof en in grofkeramiek¹⁵. De totale vraag naar poederkoolvliegias is een samengestelde van de vraag uit de verschillende toepassingen.

Mondiaal wordt nog maar 53% van de totale poederkoolvliegias gebruikt en er wordt gekeken naar hoe en of de overige 47% voor gebruik beschikbaar kan worden gesteld (Assi, et al., 2020). De verwachting is dat het aanbod van poederkoolvliegias echter op termijn zal afnemen (Vermeulen, 2020). Het aanbod van poederkoolvliegias is namelijk afhankelijk van de productie van kolengestookte elektriciteitscentrales. Afname van deze productie of sluiting van elektriciteitscentrales leidt tot een daling of verdwijning van het aanbod van poederkoolvliegias. Dit is relevant voor Nederland, aangezien hier sinds 2015 zes kolencentrales zijn gesloten en in april is besloten dat de productie van drie van de overgebleven kolencentrales wordt verlaagd¹⁶.

Zand, grind en steen

Sverdrup et al. (2017) hebben een model ontwikkeld voor de wereldwijde vraag en aanbod van zand, grind en gesneden steen. Dit model simuleert de productie, aanbod, vraag en kosten van natuurlijk zand, natuurlijk grind, zand en grind van gebroken steen en gesneden steen. In dit model is de vraag afhankelijk van bevolkingsomvang, consumptie, onderhoudsinvesteringen en kosten. De simulatie laat zien (onder business-as-usual aannames) dat de productie van gesneden steen zijn maximum bereikt rond 2020-2030 en daarna zal afvlakken, doordat de vraag groter zal zijn dan de extractie en doordat de voorraad van hoogwaardig natuurlijk steen uitgeput raakt. Voor natuurlijk zand en grind is de productie stabiel en wordt het maximum bereikt rond 2060-2070.

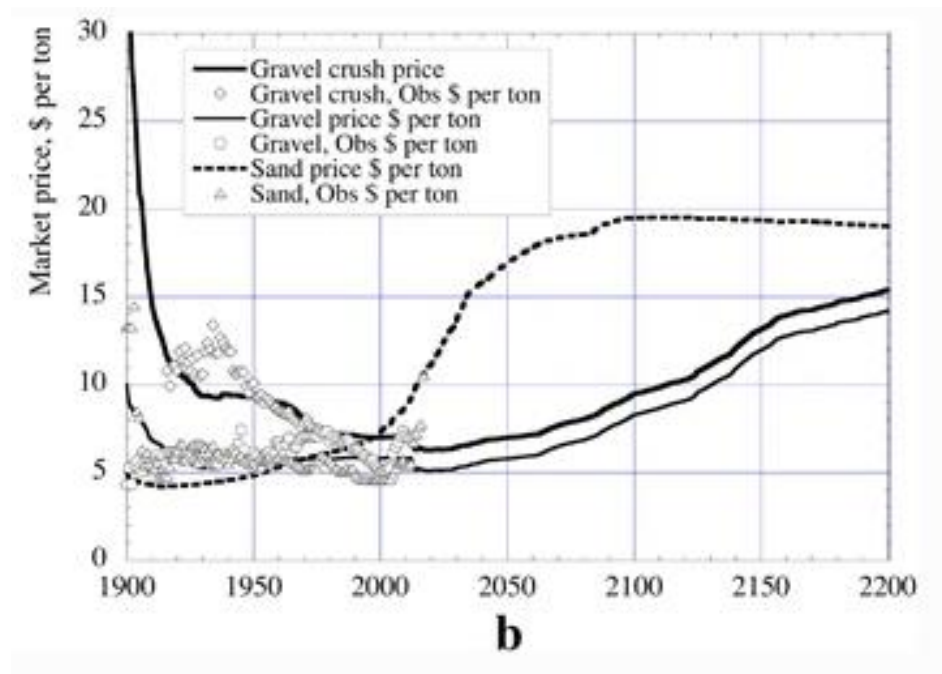
¹⁵ [Vliegiasunie : Poederkoolvliegias](#)

¹⁶ [NOS nieuws: Kabinet neemt toch nu klimaatmaatregelen; productie kolencentrales omlaag](#)



De marktsimulatie, die uitgaat van een globale markt¹⁷, laat toekomstige kostenstijgingen zien voor zand, grind, gebroken aggregaten en gesneden steen (Sverdrup, et al., 2017). De resultaten van de marktsimulatie voor grind en zand is weergegeven in Figuur 8.

Figuur 8 - Kostensimulatie zand en grind



Bron: Sverdrup, et al. (2017).

Nederland is afhankelijk van de import van steenslag, hierbij is uitgegaan van een wereldwijde markt daarom een redelijk inschatting. In het geval van natuurlijk riviergrind en natuurlijk rivierzand beschikt Nederland over een eigen voorraad, en zal de Nederlandse markt verschillende van de wereldwijde markt.

Grind

Het grindaanbod in Nederland komt vanuit vier verschillende aanvoerrichtingen: de Maas, de Rijn, oostelijke rivieren en de Eridanos (voormalig riviersysteem) en landijs en smeltwaterstromen afkomstig uit Scandinavië en het Oostzeegebied. Hierdoor is er nog veel grind in de ondergrond aanwezig. In Nederland wordt jaarlijks 5 miljoen ton grind gewonnen. Daarnaast wordt nog 20 miljoen ton geïmporteerd uit Duitsland, België en het Engelse deel van de Noordzee. Het wordt in Nederland steeds moeilijker om grind te winnen. Er moet namelijk rekening worden gehouden met maatschappelijke factoren, zoals milieu en ruimtelijke ordening. De grindputten verstoren namelijk het landschap, het ecologisch evenwicht en de infrastructuur¹⁸.

¹⁷ Hoewel er sprake is van een globale markt, is er wel sprake van grote variaties in prijzen op lokaal niveau als gevolg van transportkosten en overige kostenverschillen.

¹⁸ [Geologie van Nederland : een tijdreis van 500 miljoen jaar. Ondergrond, Grind](#)

Zand

Zand wordt samen met grind uit rivieren gewonnen. De winning van rivierzand is niet altijd primair bedoeld om zand te winnen, maar kan ook gedaan worden om plaats te maken voor rivierwater. Het aanbod vervult daarmee de vraag. In principe is er nog lang genoeg zand in Nederland te winnen om hierin zelfvoorzienend te blijven maar wereldwijd wordt zand (met name geschikt zand om te bouwen) steeds schaarser (Rijkswaterstaat, 2020d). Het is goed om de ontwikkelingen op dit gebied in de gaten te houden.

Wapeningsstaal

Wapeningsstaal is staal dat wordt toegepast in betonconstructies om trek- en schuifspanningen op te nemen. Wapeningsstaal bestaat voor 30% uit primair en 70% uit secundair staal (Nationale Database 3.1). De wapening zorgt voor een versterking van het beton, zodat het wel drukkrachten maar geen trekkrachten op zich kan nemen. Wapening is vrijwel altijd nodig bij een bouwwerk of andere constructies. In veruit de meeste gevallen wordt er gebruik gemaakt van stalen staven, kabels of netten. De vraag naar wapeningsstaal hangt daarmee samen met de ontwikkelingen in de bouwsector. De vraag neemt toe bij een transitie naar een industriële samenleving.

Het aanbod hangt samen met het productieniveau. Het aanbod hangt samen met het aanbod van primair staal. Door de verhouding 30-70% hangt het aanbod vooral af van secundair staal. Het inzamelen en sorteren van oude metalen, zoals oude auto's, koelkasten of hekwerk, vormen de basis. De meeste metalen worden opgehaald uit de milieustraat of bij oudijzer handelaren.

D Kostenbeschouwing materialen betoninnovaties

D.1 Kosten per materiaal voor betoninnovaties - zichtjaar 2020

De kosten voor de materialen per ton die gebruikt worden voor de productie van beton-innovaties, staan weergegeven in Tabel 41. De gegevens zijn door CE Delft vertaald naar kosten per ton geleverd materiaal op de prefab productielocatie/betonmortelcentrale. De onderliggende informatie voor het vaststellen van de kosten zijn verkregen via Rijkswaterstaat en een aantal betonexperts uit de markt. Het gaat hierbij om vertrouwelijke informatie.

De kosten van de materialen zijn relevant voor de beoordeling op het innovatiescenario laagste economische waardeverlies ('waardebehoud') voor een betoninnovatie.

Tabel 41 - Kosten materialen per ton voor betoninnovaties (2019/2020)

Materiaal beton	Kostenrange excl. transport (€/ton excl. btw)	Kosten exclusief transport (€/ton excl. btw)	Kosten inclusief transport (€/ton excl. btw)
AEC-vliegas (1) ¹⁹	0	0	0
Poederkoolvliegas	40-55	47,50	70,00
Hoogovenslak	15-72	43,50	66,00
LD-staalslak (2)	6-14	10,00	14,50
Wollastoniet (3)	Nb	Nb	300-320
Natronloog (33% oplossing) (3)	Nb	Nb	27 (CE Delft, 2016)
Waterglas (3)	Nb	Nb	30 (CE Delft, 2016)
Bauxiet (3)	Nb	Nb	200-300
CO ₂ (3)	Nb	Nb	57 (CE Delft, 2017)
Betongranulaat	6-14	10	14,50
Staal	1.200-1.500	1.350	1.375
Basalt (3)	Nb	Nb	60
CEM I met CCS (4)	Nb	Nb	160
CEM III/B met CCS (4)	Nb	Nb	120
Binder in Geo-beton™ (5)	78-85	81,50	109,50
CSA-beliët (6)	Nb	Nb	113
Gerecycled zand	4-12	12,50	41,51
Gerecycled grind	13-27	20,00	61,63

- (1) AEC-vliegas wordt deels gestort (die kost geldt voor de afvalbelasting), en deels afgezet als vulstof in verschillende toepassingen. Onze inschatting is dat de gemiddelde kosten € 0 zijn in 2020.
- (2) Aangenomen dezelfde kosten als betongranulaat, omdat deze slakken voor dezelfde toepassing gebruikt worden.

¹⁹ Er is te weinig kennis over de ontwikkelingen van vliegas voor de toekomst om hier een kosten aan te koppelen. In 2020 zijn de kosten € 0, we nemen aan dat dit in de periode tot 2030 zo zal blijven.

- (3) Deze kosten zijn aangenomen uit eerdere onderzoeken (CE Delft, 2016); (CE Delft, 2017)). Hierbij is uitgegaan van de marktkosten inclusief transportkosten.
- (4) Deze kosten zijn gebaseerd op de verdeling van de verschillende betontypes.
- (5) De kosten voor de binder in Geo-beton™ zijn identiek gesteld aan de kosten van CEM III/B, bij gebrek aan informatie. Geo-beton™ wordt volgens de producent voor vergelijkbare kosten op de markt gezet (CE Delft, 2020b).
- (6) De kosten van CSA-beliët liggen 15% lager dan van CEM I, volgens de producent (CE Delft, 2020b).

D.2 Kosten per materiaal voor betoninnovaties - zichtjaar 2025 en 2030

De kosten van de materialen voor de betoninnovaties in 2025 en 2030 zijn weergegeven in Tabel 42. Net als bij de reguliere betonmaterialen voor het referentiebeton van RWS in Bijlage C zijn deze kosten berekend op basis van een jaarlijkse inflatie van 1,5% voor alle materialen.

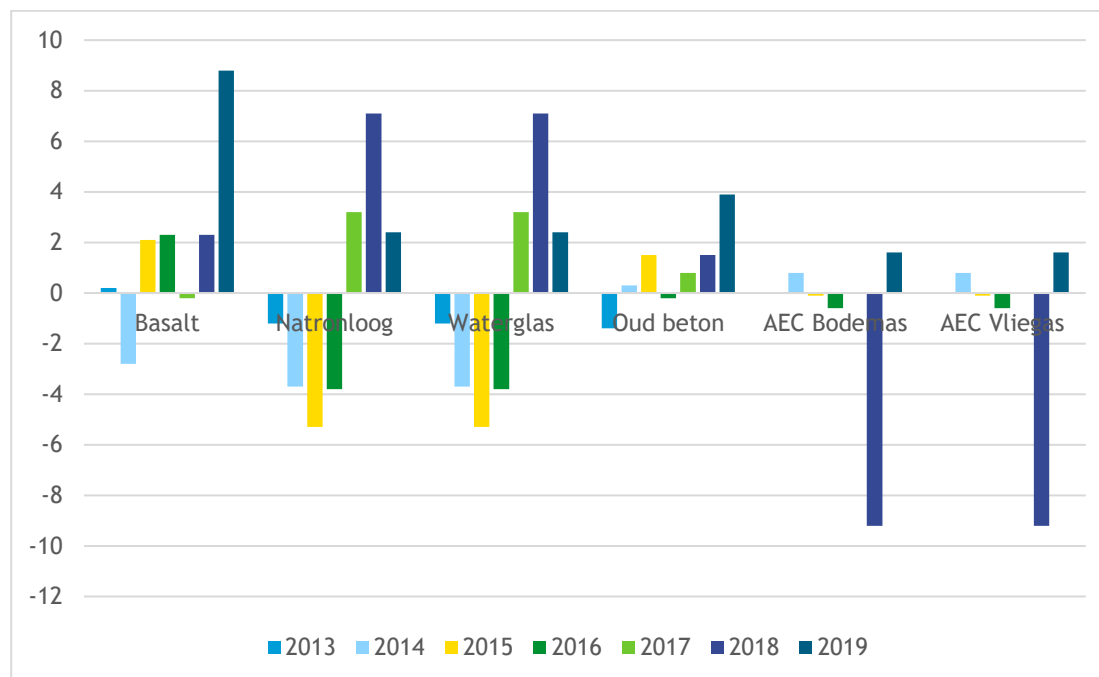
Tabel 42 - Kosten materialen per ton voor betoninnovaties (2025 en 2030)

Materiaal beton	2025		2030	
	Kosten excl. transport (€/ton excl. btw)	Kosten incl. transport (€/ton excl. btw)	Kosten excl. transport (€/ton excl. btw)	Kosten incl. transport (€/ton excl. btw)
AEC-vliegas	0	0	0	0
Poederkoolvliegas	43-59	67-83	46-64	73-90
Hoogovenslak	16-78	40-102	14-84	44-110
LD-staalslak	7-15	11-20	7-16	12-21
Wollastoniet	Nb	323-345	Nb	348-371
Natronloog	Nb	29	Nb	31
Waterglas	Nb	32	Nb	35
Bauxiet	Nb	215-323	Nb	232-348
Kalksteen	54-59	75-80	58-64	81-85
CO ₂	Nb	61	Nb	66
Betongranulaat	6-15	11-20	7-16	12-21
Staal	1.290-1.620	1.320-1.650	1.390-1.750	1.420-1.780
Basalt	Nb	65	Nb	70
CEM I met CCS	Nb	172	Nb	186
CEM III/B met CCS	Nb	129	Nb	139
Binder in Geo-beton™ (1)	84-92	114-122	91-99	123-131
CSA-beliët (2)	Nb	108-135	Nb	116-146
Gerecycled zand	4-24	18-38	5-26	20-41
Gerecycled grind	14-29	36-51	15-31	38-55

- (1) De kosten voor de binder in Geo-beton™ zijn identiek gesteld aan de kosten van CEM III/B, bij gebrek aan informatie. Geo-beton™ wordt volgens de producent voor vergelijkbare kosten op de markt gezet (CE Delft, 2020b).
- (2) De kosten van CSA-beliët liggen 15% lager dan van CEM I, volgens de producent (CE Delft, 2020b).

In Figuur 9 zijn de jaarmutaties van enkele materialen voor innovaties weergegeven. Net als bij de reguliere materialen in Bijlage C is ook hier veel variatie te zien in de jaarmutaties van de verschillende categorieën. Opvallend zijn met name AEC-bodemas en AEC-vliegas, die in 2018 en 2019 respectievelijk drastische dalingen en stijgingen laten zien.

Figuur 9 - jaarmutaties PPI (%)



Bron: [Producentenprijzen \(PPI\); afzet-, invoer-, verbruiksprijzen, index 2015=100](#)

Zoals in Bijlage C toegelicht, is de data te beperkt om een voorspelling voor alle materialen specifiek te doen. Daarom is de inflatie van 1,5%²⁰ zoals berekend voor reguliere betonmaterialen ook overgenomen voor alle materialen van innovaties. Ook voor deze materialen is het onzeker wat de kosten van materialen in 2025 en 2030 exact zullen zijn door de huidige COVID-19-crisis.

D.3 Vraag- en aanbodfactoren betonmarkt

Tabel 43 geeft een overzicht van de vraag- en aanbodfactoren van materialen die zijn gebruikt voor de geselecteerde betoninnovaties. De tabel geeft enkel specifieke vraagfactoren weer, daarnaast wordt de vraag naar de materialen uiteraard bepaald door de mate van inzet van de betoninnovatie op termijn.

Tabel 43 - Overzicht factoren vraag en aanbod voor de materialen gebruikt voor betoninnovaties

Materiaal beton	Betoninnovatie(s)	Vraagfactoren	Aanbodfactoren	Prijsindex CBS
AEC-bodemas	Geopolymeren: ASCEM.	Vraag naar AEC-bodemas voor toepassing als IBC bouwstof (afhankelijk van investeringen in infrastructuur).	Volume van huishoudelijk en bedrijfsafval verbrand in AEC.	E. Distributie van water, afval- en afvalwaterbeheer, sanering.
AEC-vliegas	Carbon8.		Volume van huishoudelijk en	E. Distributie van water, afval- en

²⁰ Dit is een inschatting en daardoor is er sprake van een hoog onzekerheidsmarge.

Materiaal beton	Betoninnovatie(s)	Vraagfactoren	Aanbodfactoren	Prijsindex CBS
			bedrijfsafval verbrand in AEC.	afvalwaterbeheer, sanering.
Poederkoolvliegias	Geopolymeren CSA-beliet (voor CSA).	Zie Tabel 40.	Zie Tabel 40.	Zie Tabel 40*.
Hoogovenslak	Geopolymeren.	Zie Tabel 40.	Zie Tabel 40.	Zie Tabel 40*.
LD-staalslak	Geopolymeren: ASCEM Carbstone.	Vraag naar ophogingsmateriaal en aanvullingen in de grond-, weg- en waterbouw.	Volume staalproductie.	241 IJzer en staal en ferrolegeringen, in primaire vormen*.
Natronloog	Geopolymeren.			20136 Andere anorganische chemische basisproducten.
Waterglas	Geopolymeren.			20136 Andere anorganische chemische basisproducten.
Bauxiet	CSA-beliet (voor CSA).			Onbekend.
Kalksteen	CSA-beliet (voor beliet).			235 Cement, kalk en gips*.
Wollastoniet	Solidia (wollastoniet).			
CO ₂ (min 99%)	Carbstone. Solidia. Carbon8.			
Oud beton	Zand-/grindrecycling Mechanische cement-recycling. Thermische en mechanische cementrecycling.	Zie Tabel 40.	Zie Tabel 40.	Zie Tabel 40.
Staal	Staalvezels.			241 IJzer en staal en ferrolegeringen, in primaire vormen*.
Basalt	Basaltvezelstaven.			081 Steen, zand en klei.

* Geen cijfers voor prijsindex beschikbaar.

D.4 Vraag- en aanbodfactoren per materiaal

AEC-vliegias

AEC-vliegias is een restproduct van afvalenergiecentrales. AEC-vliegias wordt afgevangen uit de verbrandingsgassen.

In Nederland werd in 2018 48 kton droge stof AEC-vliegias gestort en 51 kton nuttig toegepast (Rijkswaterstaat, 2020b). Nuttige toepassing betekent meestal dat het vliegias wordt gebruikt voor de afdichting van mijnen of groeves. AEC-vliegias kan daarnaast worden gebruikt bij het storten na koude immobilisatie, hydro stabilisatie, gebruik als vulstof in asfalt en in mijnbouw. AEC-vliegias kan ook gebruikt worden als grondstof voor Carbon8

aggregaat en in omgesmolten vorm als reactieve precursor in de geopolymer ASCEM. De totale vraag naar AEC-vliegas is een samengestelde van de vraag uit de verschillende toepassingen.

Als al het grind in niet-constructief beton wordt vervangen door Carbon8, kan er maximaal 220.000 m³ 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 m³ beton in objectcategorie I per jaar worden geproduceerd. Ook dit is meer dan het niet-constructieve areaal van RWS.

Het aanbod van AEC-vliegas is afhankelijk van het volume van huishoudelijk en bedrijfsafval dat wordt verbrandt in energie-afvalcentrales (verbrandingsovens) en het verbrandingsproces. Afvalverbranding hangt af van afvalproductie en deels ook van beleid en regelgeving rondom afvalverwerking, en het aandeel van afval dat wordt gerecycled en het aandeel dat wordt verbrand. De productie van afval is afhankelijk van bevolkingsomvang en BBP.

Poederkoolvliegas

Poederkoolvliegas wordt al veelvuldig toegepast binnen de betonindustrie, zoals toegelicht in Paragraaf C.4. De vraag naar poederkoolvliegas kan stijgen door de toepassing van dit materiaal in enkele typen geopolymerbeton. Er zijn echter ook geopolymeren beschikbaar zoals ASCEM die geen gebruik hoeven te maken van poederkoolvliegas en daarmee geen invloed zouden hebben op de vraag naar dit restmateriaal.

De vraag naar poederkoolvliegas kan verder stijgen door toepassing in het CSA (calcium-sulfoaluminaat) onderdeel van CSA-betel. Zeker gezien de hoge kosten van bauxiet, is het aannemelijk dat poederkoolvliegas de meest realistische bron van aluminium is voor CSA. De vraag naar poederkoolvliegas kan ten slotte verder stijgen door de toepassing in de productie van Carbon8 aggregaat. Het aanbod van poederkoolvliegas zal echter mogelijk afnemen, zoals aangegeven in Paragraaf C.4. Deze verhoogde vraag en het verlaagde aanbod zal een flinke kostenstijging tot gevolg kunnen hebben in de toekomst.

Hoogovenslak

Net als poederkoolvliegas wordt hoogovenslak al veelvuldig toegepast binnen de betonindustrie, zoals toegelicht in Paragraaf C.4. Bij vervanging van beton op basis van hoogovencement (CEM III/B) door geopolymeren op basis van hoogovencement zal de vraag licht stijgen ten opzichte van de geschetste situatie in Bijlage C.4, aangezien er meer hoogovenslak nodig is voor dit type geopolymer dan voor CEM III/B. Bij vervanging van CEM I zal deze stijging sterker zijn, aangezien CEM I geen hoogovenslak bevat.

Bij toepassing van geopolymeren die geen gebruik maken van hoogovenslak ter vervanging van CEM I of CEM III/B zal de vraag dalen. Het aanbod van hoogovenslak zal echter mogelijk afnemen, zoals aangegeven in Paragraaf C.4.

LD-staalslak

LD-staalslak is afkomstig uit de productie van staal. Het ontstaat door verontreinigingen in gesmolten ruwizer te binden met kalksteen, dolomiet en chemicaliën, waarbij ingeblazen

zuurstof de verontreinigingen gedeeltelijk oxideert. Deze slak wijkt hiermee af van hoogovenslak, wat vrijkomt bij de productie van ruwijzer voorafgaand aan staalproductie (zie Paragraaf C.4). LD-staalslak wordt momenteel vooral toegepast als ophoging en aanvulling in de grond-, weg- en waterbouw, maar afhankelijk van de legeringen zijn niet alle LD-staalslakken hier geschikt voor²¹.

Het aanbod kan stijgen door toepassing in de geopolymeer ASCEM en Carbstone. Tata Steel produceert 650 kt/jaar aan LD-slak (CE Delft, 2016). Arcelor Mittal in Gent is de enige Vlaamse producent van LD-slakken. Jaarlijks gaat het om ongeveer 400 Kton aan LD-slak als bijproduct. Dit wordt geproduceerd op een staalproductie van 5,1 Mton (in 2016)²². De fijnere fractie wordt gebruikt als meststof of bodemverbeterend middel, de grove fractie als bouwstof, respectievelijk 110 en 90 Kton. Daarnaast wordt ongeveer 90 Kton ingezet als hulpgesteende tijdens het ruwijzerproces in hoogovens en 34 Kton bij de toepassing in waterbouw of bodembestortingen.

Natronloog en 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 geopolymere die geproduceerd worden met hoogovenslak en/of poederkoolvliegias. Het aanbod aan natronloog in Europa is wel hoger dan in de rest van de wereld, waardoor in Europa en Nederland mogelijk meer Portlandcement vervangen zou kunnen worden door geopolymere (Assi, et al., 2020). Alternatieve geopolymere zoals ASCEM passen een reactievere precursor toe, waardoor minder natronloog nodig is.

Natriumhydroxide is daarnaast het duurste component in geopolymere en het enige component waar momenteel nog geen realistisch alternatief voor is (Assi, et al., 2020). Bij een verhoogde vraag naar natronloog en/of natriumhydroxide door toepassing van geopolymere, zal de prijs van deze materialen waarschijnlijk stijgen.

Bauxiet

De vraag naar bauxiet kan stijgen door het gebruik van CSA-beliët. Het CSA-onderdeel van dit bindmiddel heeft een bron van aluminium nodig, dat onder andere te vinden is in poederkoolvliegias. Bij grootschalige toepassing van CSA-beliët is er echter mogelijk additioneel bauxiet nodig als grondstof, wat tot een verhoogde vraag en mogelijk een tekort in het aanbod van bauxiet zou kunnen leiden (Vermeulen, 2020). Door de hoge kosten van bauxiet schatten wij echter in dat het onwaarschijnlijk is dat dit materiaal grootschalig toegepast zal worden in CSA-beliët.

Wollastoniet

Wollastoniet is een mineraal dat gebruikt wordt voor Solidia. Het komt voor in verscheidene stollingsgesteende, kalksteen en dolomiet. Wollastoniet wordt gebruikt bij kunststoffen,

²¹ [Richtlijn herstel en beheer \(water\)bodemkwaliteit : Bouwstoffase staalslak](#)

²² [Catalogus van secundaire en gerecycleerde granulaten : LD Slakken](#)
[Catalogus van secundaire en gerecycleerde granulaten : rvs-slakken](#)

keramiek, metallurgie, verf en wrijvingsproducten en als asbestvervanger. De vraag naar wollastoniet hangt daarom erg af van de verkoop van deze producten.

Grote hoeveelheden wollastoniet zijn gevonden in China, Finland, India, Mexico en de Verenigde Staten. Daarnaast is het ook te vinden in Canada, Chili, Kenia, Namibië, Zuid-Afrika, Spanje, Sudan, Tajikistan, Turkije en Oezbekistan. Deze landen hebben, met uitzondering van de Verenigde Staten, in 2019 een mijnproductie van 1,2 miljoen ton wollastoniet. Het aanbod is de afgelopen jaren flink gestegen. In 2010 was de jaarlijkse productie, inclusief VS, nog maar 540.000 ton. De wereldwijde reserves worden geschat op meer dan 100 miljoen ton. De wereldwijde kosten in 2019 zijn geschat tussen de 300 en 320 dollar per ton wollastoniet (U.S. Geological Survey, 2020).

CO₂ (99%)

De kosten voor de afvang van CO₂ hangen af van de puurheid van de bron, de afvang-technologie en of de installatie op een nieuwe of bestaande fabriek wordt geïnstalleerd. Momenteel wordt er nog niet veel CO₂ als grondstof gebruikt. Er is echter veel onderzoek gaande hiervoor, zowel voor de productie van bouwmaterialen, als voor andere producten zoals brandstoffen, gebruik in de glastuinbouw of als grondstof voor chemicaliën. Een grotere vraag naar CO₂ kan de prijs ervan opdrijven in de (nabije) toekomst. Tegelijkertijd zal een grotere vraag ernaar, gecombineerd met een hogere CO₂-prijs die bedrijven moeten afstaan voor het uitstoten van CO₂, er ook voor kunnen zorgen dat het aanbod van CO₂ groter wordt. Hoe de prijs van CO₂ zich in de (nabije) toekomst ontwikkelt, is daarom onzeker.

Staal

De vraag naar staal kan mogelijk afnemen ten opzichte van de geschetste situatie in Bijlage C.4 wanneer staalvezels in plaats van stalen wapening toegepast wordt. Momenteel is er een overcapaciteit van staal aanwezig, maar het wordt verwacht dat deze overcapaciteit in de komende jaren zal afnemen, zoals beschreven in Bijlage C.4.

Basalt

Basalt is het meest voorkomende vulkanische gesteente op aarde (USGS, 2015). Basalt wordt in de bouw gebruikt, bijvoorbeeld als fundering, wegverharding (straatkeien) en als grondstof voor steenwol. Door de grote hoeveelheid basalt die aanwezig is op aarde, worden geen problemen verwacht met het aanbod als de vraag stijgt.

E Voorwaarden voor circulair materiaalgebruik in de betonketen

Naast het verder ontwikkelen van innovaties zoals besproken in Paragraaf 6.1, liggen er momenteel nog uitdagingen binnen de werkwijze van RWS om circulariteit consequent mee te kunnen nemen in aanbestedingen en projecten. In deze paragraaf doen we enkele aanbevelingen om de ambities van RWS te behalen en de mogelijkheden voor circulair materiaalgebruik binnen diens betonketen te benutten. Deze aanbevelingen gaan in op het prioriteren van de duurzaamheidsambities van RWS, de wijze waarop de data-uitvraag kan worden ingericht om circulariteit mee te nemen bij aanbestedingen en projecten en de manier waarop moet om worden gegaan met materiaalbeschikbaarheid.

E.1 Duurzaamheidsambities prioriteren

Voordat circulariteit op de gewenste manier meegenomen kan worden binnen de betonketen van RWS, moet eerst een keuze worden gemaakt tussen de ambities van RWS op het gebied van circulariteit en klimaatimpacts. Daar gaan we in deze paragraaf verder op in.

E.1.1 Inkoopstrategie voor circulariteit

In deze studie zijn we ingegaan op de ambitie van RWS om in 2030 100% circulair te opereren. RWS heeft echter ook een andere duurzaamheidsambitie, namelijk klimaatneutraal werken in 2030. Deze ambitie is behandeld in de 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b).

Op dit moment ligt er een duurzame inkoopstrategie van RWS voor asfalt: de koploperstrategie. In deze strategie wordt uitgegaan van MKI als kwantitatieve meetmethode voor de duurzaamheidsambities van RWS. Zoals beschreven in Paragraaf 5.4 zorgt een volledige focus op circulariteit (met een focus op primair materiaalverbruik) in veel gevallen voor een suboptimale verbetering van klimaat-/milieu-impact en vice versa. Het is daarom van belang dat er door RWS een afweging wordt gemaakt tussen diens ambities voor circulariteit en klimaat. We raden in ieder geval aan om circulariteit expliciet mee te nemen in de inkoopstrategie van RWS en deze ook specifiek te definiëren voor betoninkoop.

E.1.2 Mogelijke prioritering

Het ultieme doel van circulair materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS is het verduurzamen van deze betonketen. Daarom kan de afweging gemaakt worden om de verlaging van klimaatimpact te prioriteren boven het verlagen van primair materiaalgebruik. Dit staat haaks op de discussie in Paragraaf 5.4 en 6.1, waar het minimaliseren van primair materiaalgebruik de hoogste prioriteit krijgt. Paragraaf 5.4 en 6.1 zijn namelijk specifiek vanuit het perspectief van circulariteit geschreven.

Als RWS inderdaad besluit om de klimaatambitie te prioriteren boven diens circulariteitsambitie, dan worden de indicatoren voor primair materiaalverbruik en economisch waardebehoud ondergeschikt aan de indicator voor de klimaatimpact. Hiermee zijn de

indicatoren nog steeds complementair op elkaar, alleen ligt de prioriteit anders. Het is aan RWS om deze afweging te maken.

Wat hierbij ook moet worden meegenomen is dat RWS wel klimaatdoelstellingen heeft, maar geen MKI-doelstellingen, zoals ook benoemd in de 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b). Binnen de MKI worden naast klimaatimpact ook negen andere milieu-impacts gewogen meegenomen. Deze milieu-indicator staat binnen de inkoopstrategie centraal bij zowel de 'peleton'-aanpak als de 'koplopers'-aanpak. Het lijkt er daarmee op dat RWS momenteel de MKI prioriteert boven klimaatimpact. We raden aan dit expliciet te vermelden in de inkoopstrategieën.

E.2 Data-uitvraag inkoop aanscherpen

Om de indicatoren toe te kunnen passen, moet ook gekeken worden naar de manier waarop data wordt uitgevraagd en waarop het binnen RWS verzameld en bijgehouden wordt. Hoe meer dit aan kan sluiten bij bestaande praktijken, hoe sneller dit mogelijk is.

E.2.1 Dataverzameling voor indicatoren

Voor alle circulariteitsindicatoren is extra informatie benodigd tijdens het inkopen van beton door RWS. We bespreken hier voor iedere indicator welke data benodigd is om deze mee te nemen in een aanbesteding en hoe dit zou kunnen worden gedaan binnen de bestaande inkoopstrategie. De verantwoordelijkheid voor het verzamelen van de data moet bij de uitvoerder komen te liggen.

MKI en klimaatimpact

De indicatoren MKI en klimaatimpact kunnen beide goed worden uitgevraagd tijdens een aanbesteding. De klimaatimpact wordt altijd berekend om de MKI-score te bepalen, en kan daarom ook gemakkelijk apart uitgevraagd worden naast de MKI-score. Omdat de MKI-score in groeiende mate al onderdeel is van aanbestedingen bij RWS en centraal staat binnen de 'peloton'- en 'koploper'-aanpak van de duurzame inkoopstrategie, sluiten deze indicatoren goed aan op de huidige manier van werken.

Primair materiaalverbruik

Om de data die benodigd zijn voor het bepalen van de indicator *primair materiaalverbruik* te verzamelen, kan worden aangesloten bij informatie die moet worden verzameld bij het bepalen van de MKI-score. Er zijn dan wel enkele aanpassingen ten opzichte van de huidige methodiek nodig. De informatie voor LCA-studies conform de SBK-Bepalingsmethode bevat per materiaal het primaire materiaalverbruik al en, in het geval van een cradle-to-grave studie, ook de mate waarin het materiaal wordt gerecycled en hergebruikt na gebruik. Deze informatie wordt binnen een LCA-studie toegepast. Momenteel wordt deze informatie in de resultaten echter alleen nog geaggregeerd weergegeven voor het gehele product, niet per materiaal. De informatie moet voor deze indicator daarom aanvullend op de SBK-Bepalingsmethode ook per materiaal worden weergegeven in de resultaten.

Economische waardebehoud

Voor de indicator *economisch waardebehoud* zijn per materiaal de economische waarde van de ingekochte materialen (kosten) en de waarde van de materialen na gebruik (opbrengst

recycling/hergebruik) benodigd. Aangezien kosten een belangrijk onderdeel van inkoop zijn, is hier informatie over beschikbaar. Deze moet echter wel apart per materiaal bijgehouden worden, waar dit nu vaak geaggregeerd weergegeven wordt. De opbrengsten van recycling/hergebruik zijn uitdagender om te verzamelen, en zullen veelal op basis van inschattingen moeten worden bepaald. Hiervoor kan bijvoorbeeld per jaar een lijst worden opgesteld met een aantal standaardmaterialen, die per innovatie aangevuld kan worden. Dit kan door RWS worden gedaan of eventueel door middel van marktconsultaties of door het inschakelen van een onafhankelijke partij.

E.2.2 Weging van indicatoren

Om circulariteit op een voor RWS gewenste manier mee te nemen bij inkoop van beton, helpt het als de indicatoren gewogen worden. Zoals beschreven in Hoofdstuk 5 geven de verschillende indicatoren immers niet altijd een eenduidig resultaat. Op objectniveau is een weging mogelijk, aangezien de materiaalstromen binnen één object aanzienlijk minder uitgebreid zijn dan de materiaalstromen binnen de gehele betonketen van RWS.

Wij raden aan om hiervoor gebruik te maken van de formule die opgesteld is door SGS Intron, zoals toegelicht in Paragraaf 2.4. In deze formule wordt gebruik gemaakt van een kwaliteitsfactor die vastgesteld kan worden op basis van economische waardebehoud. Hierbij kan ook de levensduur van het object meegenomen worden, indien relevant. Deze formule wordt al gebruikt en kan met SGS Intron verder ontwikkeld worden voor toepassing binnen LCT's en koploperpilots.

Milieu-impacts worden niet meegenomen in deze formule. Deze zullen dus nog naast deze formule moeten worden gerapporteerd om aan te sluiten bij alle ambities van RWS. Dit onderstreept nogmaals het belang van prioritering van de ambities van RWS. Als deze prioritering plaatsgevonden heeft kan ook de weging van indicatoren verder aangescherpt worden.

E.2.3 Uniforme data-uitvraag

Als met data gewerkt gaat worden om de milieu-impacts, het primaire materiaalverbruik en het economisch waardebehoud binnen aanbestedingen van betonobjecten op te vragen, is het van belang dat data op termijn door verschillende opdrachtgevers (RWS, Prorail, etc.) uniform uitgevraagd wordt.

We raden aan om materialenpaspoorten te gebruiken bij het verzamelen en bijhouden van informatie over het primaire materiaalverbruik, de economische waarde en de milieu-impacts van materialen in een object. Het is daarbij van belang om te onderzoeken wat de huidige mogelijkheden zijn. Daarnaast is het aan te raden te investeren in de integratie van deze paspoorten in bestaande en toekomstige processen en assetmanagementsystemen.

Bij voorkeur wordt het gebruik van materiaalpaspoorten ontwikkeld samen met andere opdrachtgevers. Hierdoor kan duurzaamheid uniform uitgevraagd worden, zodat opdrachtnemers zich hierop aan kunnen passen zonder buitensporige (tijd)investeringen. Dit is ook één van de doelen binnen het Betonakkoord (zie 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b) voor meer toelichting).

E.2.4 Interne dataverzameling bij RWS

Zoals beschreven in Paragraaf 3.2 hebben we in deze studie het betonareaal van RWS opgedeeld in verschillende objectcategorieën. Dit is in lijn met de 'Kostencurve beton' van CE Delft (2020b) en gebaseerd op CE Delft & Delta Concrete Consult (2019). Zo kunnen we

onderscheid maken tussen het TRL van innovaties op verschillende onderdelen van het beton van RWS. Daarnaast maakt deze verdeling het mogelijk een realistische referentie voor ieder type beton in de verschillende OC's te definiëren.

RWS zelf houdt z'n areaal niet op deze manier bij. De beschreven objectcategorieën zijn aangehouden, omdat er momenteel bij RWS nog onvoldoende bekend is over de compositie van het beton in diens beheer om in deze studie mee te kunnen rekenen. Om een betere inschatting te kunnen geven van het circulariteitspotentieel is het van belang een goede nulmeting en business-as-usual-scenario te hebben. We raden daarom aan om deze areaalgegevens intern te verzamelen en op een gestructureerde manier bij te (gaan) houden. Bij voorkeur wordt hierbij van een versimpelde methode gebruik gemaakt om onderscheid te maken tussen verschillende typen beton, bijvoorbeeld met de objectcategorieën die in deze studie zijn toegepast. In het rapport 'Kostencurve beton' wordt hier verder op ingegaan (CE Delft, 2020b).

E.2.5 Circulariteit meenemen bij aanbestedingen

Zoals in Paragraaf 6.1 beschreven raden we aan om LCT's en koploperpilots op te zetten waarin alle indicatoren uit deze studie meegenomen worden. De exacte invulling hiervan is aan experts bij RWS, waarvoor wij hieronder een eerste aanzet doen.

Er zou met drempelwaarden voor elke indicator gewerkt kunnen worden. Het is bijvoorbeeld mogelijk om te stellen dat maximaal 20% van alle materialen van primaire afkomst mag zijn, de milieu-impacts minstens 10% lager moeten zijn dan een referentie-ontwerp en het economisch waardebehoud minstens gelijk moet blijven ten opzichte van een referentie-ontwerp. Deze drempelwaarden kunnen voor specifieke projecten vastgesteld worden naar aanleiding van marktconsultaties. Voor asfalt worden dergelijke drempelwaarden voor MKI al onderzocht door RWS.

Voor het verder meenemen van de circulariteitsindicatoren in aanbestedingen is praktijk-informatie nodig van de verschillende betrokkenen bij aanbestedingen. De ambities moeten worden gesteld door beton- en duurzaamheidsexperts binnen en buiten RWS ('wat is wanneer mogelijk op het gebied van onze doelstellingen'). Het zijn echter inkopers, projectmanagers en inschrijvers/uitvoerders die deze ambities uiteindelijk in de praktijk moeten brengen. Zij moeten dus kunnen werken met de methodiek om de data benodigd voor de indicatoren op te halen.

Het is aan te raden om hen te betrekken in het ontwikkelen van deze methodieken. Op die manier kan ook zoveel mogelijk worden aangesloten bij de huidige praktijk. Interne betrokkenen kunnen worden meegenomen in LCT- en koploperpilots om daarin hun expertise te laten horen. Voor extern betrokkenen zou een marktconsultatie kunnen worden gehouden om te kijken welke ideeën en mogelijkheden zij zien voor het meenemen van de circulariteitsindicatoren in aanbestedingen.

Uitdagingen waarmee rekening moet worden gehouden bij het opstellen van een methodiek om deze indicatoren in aanbestedingen mee te nemen zijn onder andere:

- **transparantie** van de data naar RWS toe en tussen partijen;
- het bepalen van kosten van (uitgaande) materialen;
- **verificatie** van de aangeleverde data;
- **controle** van de aangeboden prestaties in de praktijk.

E.2.6 Functioneel uitvragen

We raden aan om objecten en projecten in groeiende mate functioneel uit te vragen, zoals nu al meer gebeurt bij RWS. Bij deze manier van uitvragen wordt gefocust op de functie die een object moet vervullen, met een aantal gedefinieerde eigenschappen waaraan de oplossing voor de functie moet voldoen. Een gesimplificeerd voorbeeld hiervan is: er is een overgang over een weg nodig [functie], de levensduur van deze overgang moet minstens X jaar zijn en de sterkte moet minimaal Y zijn [vereiste eigenschappen]. Op deze manier staat het inschrijvers vrij om ieder type object en materiaal te kiezen en daarin duurzaamheid te prioriteren. Bij functioneel uitvragen zijn er nog wel enkele uitdagingen met betrekking tot normen en regelgeving, zie voor meer informatie *Kostencurves beton van CE Delft (2020b)*.

Het vooraf definiëren van een minimale levensduur maakt het makkelijker om de duurzaamheidsindicatoren van de aangeboden objecten op de juiste manier met elkaar te vergelijken. Als een object immers twee keer gebouwd/gerepareerd moet worden tijdens de opgevraagde levensduur, heeft dit invloed op het primaire materiaalgebruik, het economisch waardebehoud en de milieu-impacts van het project. Dit is al zeer gebruikelijk bij de ontwikkeling en aanbesteding van objecten bij RWS.

E.3 Materiaalbeschikbaarheid meenemen

Bij het toepassen van materialendata, moet ten slotte ook gekeken worden naar de materiaalbeschikbaarheid. Als de vraag naar een materiaal vanuit een aanbesteding of project niet overeenkomt met het aanbod in de praktijk, kan dit invloed hebben op de uiteindelijke circulariteit en duurzaamheid.

E.3.1 Materiaalbeschikbaarheid

Bij de berekeningen in deze studie is ervan uitgegaan dat alle materialen in voldoende hoeveelheid beschikbaar zijn voor toepassing door RWS. In realiteit is dit echter lang niet altijd het geval. Met name secundaire materialen zijn vaak beperkt beschikbaar. We raden daarom aan om bij aanbestedingen op te nemen dat aangetoond kan worden waar materiaal vandaan komt en dat er genoeg voorraad is. Daarnaast raden we aan om bij het ontwikkelen van innovaties in LCT's al onderzoek te doen naar de beschikbaarheid van de benodigde materialen. Op deze manier kan hiermee rekening worden gehouden bij het bepalen van het reductiepotentieel van innovaties.

Met name bij materialen zoals poederkoolvliegashoudend beton en hoogovenslakken (in gebruik door enkele geopolymeren) moet rekening gehouden worden met de voorraad, aangezien deze materialen al grootschalig toegepast worden binnen hoogovenscement. De vraag naar deze materialen kan mogelijk boven het aanbod uitstijgen, waardoor het toepassen van innovaties zou kunnen zorgen voor een afname van hoogovenscement. Dit kan mogelijk een toename van Portlandcementproductie tot gevolg hebben. Dit zou een negatief effect kunnen hebben op de circulariteit en duurzaamheid van de gehele betonketen van RWS (en/of Nederland).

Ook voor gerecycled zand en grind is het zaak om bij toepassing mee te nemen dat er genoeg aanbod moet zijn. Door sloop- en bouwwerkzaamheden op elkaar af te stemmen, kan beter gegarandeerd worden dat het aanbod van secundaire materialen kan voldoen aan de vraag. Er moet echter voorkomen worden dat objecten die hergebruikt of gerepareerd kunnen worden, gesloopt worden puur om aan de vraag voor secundair grind en zand te voldoen. Zoals in Hoofdstuk 2 en het begin van dit hoofdstuk genoemd is, moet eerst

gekeken worden of reparatie of hergebruik mogelijk is, voordat gesloopt wordt. Hierbij raden we bovendien aan om ook buiten de betonketen te kijken. Veel secundaire materialen die in beton toegepast worden zijn immers al afkomstig van buiten de betonketen.

Voor meer toelichting over de materiaalbeschikbaarheid van alle materialen, zie Bijlage C voor reguliere betonmaterialen en Bijlage D voor materialen van betoninnovaties.

E.3.2 Sloop

Sloop heeft een grote invloed op alle circulariteitsindicatoren: het bepaalt het primair grondstoffengebruik, de restwaarde en de milieu-impact van uitstromende materialen. Binnen deze studie zijn we uitgegaan van sloop volgens de forfaitaire waarden van de SBK-Bepalingsmethode (99% recycling en 1% stort voor beton en 95% recycling en 5% stort voor wapeningsstaal). De afvalscenario's van de SBK-Bepalingsmethode houden echter geen rekening met de kwaliteit en toepassing van gerecycled betongranulaat. Zo schat BRBS in dat van de 12 Mton steenachtig afval die vrijkomt uit beton, slechts 0,8 tot 1 Mton secundaire materialen uit beton weer toegepast worden binnen de betonindustrie. Die toepassing is veelal in de vorm van betongranulaat. Het overgrote deel van vrijkomend betonafval komt terecht in funderingslagen in de wegenbouw²³. Daarnaast is het momenteel niet verplicht om van al het vrijkomende materiaal bij slopen melding te maken. Om een goede nulmeting te hebben over wat er in het basisscenario met al het vrijkomende materiaal gebeurt, zou het goed zijn dat wel (weer) te gaan doen.

Voor aanbestedingen van specifieke objecten raden we daarom ook aan om de sloop(mogelijkheden) op te laten geven door de uitvoerder voor het project in kwestie. Op dat niveau kan de sloop namelijk in meer detail worden meegenomen dan voor het totale materiaalgebruik binnen de betonketen van RWS. Door specifiek per object naar de (toekomstige) sloopmogelijkheden te kijken is het ook voor uitvoerders van projecten mogelijk om te scoren op hoogwaardige recycling van materialen. Zo kunnen zij bijvoorbeeld inzetten op recycling van beton tot zand, grind en cement, in plaats van tot betongranulaat. In die situatie is het recyclepercentage mogelijk hetzelfde als forfaitair binnen de SBK-Bepalingsmethode, maar kan het economisch waardebehoud van recycling aanzienlijk hoger zijn. Dit heeft daarmee een positieve invloed op de circulariteit. Het meenemen van sloopmogelijkheden voorkomt daarnaast dat uitvoerders uitgaan van de forfaitaire sloopscenario's van de SBK-Bepalingsmethode, terwijl in realiteit iets anders gebeurt.

Naast het laten rapporteren van de sloop(mogelijkheden) raden we RWS aan om de zeggenschap over sloopmaterialen te houden bij projecten waar dit mogelijk is. 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 RWS. Ook is het dan beter mogelijk om sloop- en bouwwerkzaamheden op elkaar af te stemmen.

Hierbij moet ook gelet worden op de recyclebaarheid van toegepaste materialen, aangezien innovatieve materialen niet moeten leiden tot verminderde recyclingmogelijkheden bij de sloop. Zeggenschap kan bijvoorbeeld worden behouden door de restwaarde van vrijkomende

²³ Informatie afkomstig uit e-mailconversatie met BRBS.

materialen mee te nemen in de scope van de MKI-berekening en door expliciet te beschrijven hoe aannemers zich aan de hand van de MKI kunnen onderscheiden met hoogwaardige inzet van vrijkomend materiaal