



Verduurzaming betongebruik bij RWS

Identificatie object-technologie
combinaties in de GWW



CE Delft

Committed to the Environment

Verduurzaming betongebruik bij RWS

Identificatie object-technologie combinaties in de GWW

Dit rapport is geschreven door:
Marit van Lieshout (CE Delft)



Jos Kronemeijer (Delta Concrete Consult)



Illustraties:
Yulia Kryasheva (Yulia Ink)



Delft, CE Delft, 12 april 2019
Publicatienummer: 19.180011.057

Overheid / Bouwplannen / Openbare werken / Duurzaam / Bouwmaterialen / Beton / Technologie / Productie
VT: Circulair bouwen

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat

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

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Marit van Lieshout (CE Delft)

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	3
1	Inleiding	5
2	Technologie categorieën ter verduurzaming van beton	6
	2.1 TRL-niveaus	7
	2.2 Alternatieve betonsoorten	7
	2.3 Alternatieve wapeningsconcepten	9
	2.4 Circulair bouwen	10
	2.5 Bouwplanning/productiemethode	12
3	Kansenmatrix	15
	3.1 Vier objectcategorieën	15
	3.2 Kansenmatrix	15
	3.3 Alternatieve betonsoorten	17
	3.4 Alternatieve wapeningen	17
	3.5 Circulair bouwen	18
	3.6 Bouwplanning/-methode	18
4	Resultaten workshop	19
5	Functionele prestatiespecificaties	21
6	Conclusies en aanbevelingen	23
7	Referenties	25



Samenvatting

Rijkswaterstaat heeft een politieke/maatschappelijke opdracht om haar materiaalgebruik intensiever te verduurzamen. In dit kader heeft Rijkswaterstaat, CE Delft en Delta Concrete Consult benaderd om in kaart te brengen van welke combinaties van betonnen objecten en verduurzamingstechnologieën van beton, de zogenoemde object-technologiecombinaties, verwacht mag worden dat ze technisch voldoende uitontwikkeld zijn om in de praktijk toe te passen en een significante bijdrage kunnen leveren aan de reductie van de emissies van het betongebruik in Nederland.

De opdracht was om dit in zeer korte tijd te doen, door gebruik te maken van eigen kennis en ervaring en het organiseren van een workshop van één uur tijdens ‘de week van de circulaire economie’ (17 januari 2019) bij Rijkswaterstaat. In dit rapport doen we verslag van onze bevindingen en doen we aanbevelingen voor het vervolg.

Er is veel onduidelijkheid over de stand van de technologie van betoninnovaties. Dit komt enerzijds omdat er veel verschillende technologieën ontwikkeld worden die soms slechts een variatie zijn op hetzelfde principe en anderzijds zijn er veel verschillende soorten toepassingen van beton, ieder met zijn eigen technische eisen. Om dit te ondervangen hebben we vier technologiecategorieën geïdentificeerd, die voldoende potentieel hebben om de CO₂-footprint van beton sterk te verlagen:

1. Alternatieve betonsoorten, met focus op reductie of vervangen van OPC-cementfractie.
2. Alternatieve wapeningsorten, met focus op reductie of vervangen van staal.
3. Circulair bouwen, met focus op recycling van cement en toeslagmateriaal.
4. Bouwplanning/bouwmethode, met focus op reductie van gebruik van wapening en/of OPC-cementfractie door aanpassingen in het bouwproces.

Daarnaast hebben we vier typen objecten geïdentificeerd om onderscheid te maken in de zwaarte van de eisen die aan het beton gesteld worden in de gebruikssituatie, de risico's die optreden als het beton niet de technische prestatie-eisen haalt in de praktijk en de complexiteit bij het toepassen van ervaringen in vervolgprojecten. Deze soorten objecten zijn van eenvoudig tot complex:

1. Kleine niet constructieve betonwaren, van fietspaden tot dijkbekleding.
2. Klein gewapend beton, van L-keerwanden tot tussenwanden van woningen.
3. Grote voorgespannen elementen, van vloeren tot brugliggers.
4. Complexe zwaarbelaste unieke constructies, van tunnels tot sluizen.

Op basis van deze informatie hebben we een kansenmatrix opgesteld, zie Figuur 1. De groene vinkjes geven aan welke technologieën al toegepast worden in de praktijk. De oranje vraagtekens geven weer welke technologieën kansrijk zijn, maar wel wat verdere uitwerking behoeven. De object-technologie combinaties met een oranje vraagteken zijn zeer geschikt voor demonstratieprojecten bij Rijkswaterstaat. De rode kruisjes geven aan welke technologieën in een experimentele fase zitten.

Vervolgens hebben we gekeken welke normen op het moment het meest bruikbaar zijn voor het toepassen van deze technologieën. Voor de categorie ‘alternatieve betonsoorten’ zien we de Britse PAS 8820 voorlopig als de meest bruikbare leidraad. Voor de categorie ‘alternatieve wapening’ lijkt het ‘Equivalent Concrete Performance Concept (ECPC)’ en invulling middels ‘Initial Type Testing’ bestaand uit onder ander calibratie tussen ontwerpmodel en veldwaarnemingen voorlopig de enige direct beschikbare route. In het geval van aan staalvezels of basaltstaven toerekenbaar juist modelleren van mechanisch vervormingsgedrag zullen Eurocode 1 en 2 met de achterliggende CEP/FIB Model Code 2010

gelijkwaardigheid opleggen. Voor de categorie ‘circulair bouwen’ en de bij mechanisch recycleren vrijkomende grondstoffen bestaat de nodige ervaring met CUR-aanbevelingen zoals de CUR-A48 en de CUR-A112 en daar waar men Nationale BRL's in de toekomst wil inzetten als basis voor Certificatiesystemen, vormen de Europese Assessment Documents (zogenaamde EAD's) een aanzet.

Figuur 1 - Kansenmatrix verduurzaming beton

		I.	II.	III.	IV.
1. ALTERNATIEVE BETONSOORTEN					
a	OPC-BASED BINDERS	✓	?	?	✗
b	NON OPC-BASED BINDERS	✓	?	?	✗
c	RECEPTUUR OPTIMALISATIE	✓	?	?	✗
2. ALTERNATIEVE WAPENINGENSOORTEN					
a	NON FERRO WAPENING	next	✓	?	? ✗
b	VEZELS EN HYBRIDEWAPENING	next	✓ ?	?	? ✗
3. CIRCULAIR BOUWEN:					
a	CIRCULAIR BOUWEN EN ONTWERPEN	✓	?	?	✗
b	MECHANISCH RECYCLEN	✓	?	?	✗
c	CCU IN MINERAAL CO ₂	✓	?	?	✗
4. BOUWPLANNING/ METHODE:					
a	MODULEREND KOELEN EN VERWARMEN	✓	next	✓	✓
b	LICHTGEWICHT ONTWERPEN EN BOUWEN	✓	?	?	✗
c	ZELFHELEND BETON	✓	?	?	✗
d	ON-SITE PRECASTING	✓	✓	✓	✓

Ontwerp: yulia-ink.com

De kansenmatrix, zie Figuur 1, doet suggesties voor kansrijke object-technologie-combinaties. Tijdens de workshop zijn elf van deze kansen geconcretiseerd door combinaties te maken tussen projecten en technologieën. Het gaat hierbij om twee projecten op het gebied van mechanische recycling; vier op het gebied van wapeningsreductie en vijf op het gebied van alternatieve binders en allen voor het gehele ROK-bereik.

Als er behoefte is om het aantal projecten te beperken adviseren we om de volgende projecten te combineren:

- Smartliberator™ en in-situ gestort Geobeton™: Gebruik van de drie verschillende korrelfracties die met de Smartliberator™ teruggewonnen worden in combinatie met de productie van ter plaatse gestort gewapende geopolymeerbeton.
- Circuton™ en Ternocem™: Gebruik van de korrelfractie-recyclestromen uit de Circuton™ als grondstof voor nieuw Ternocem™ beton.
- Basaltvezels en Ramac™: Gebruik van basaltvezels voor elementenverharding van geprefabriceerd ongewapende geopolymeerbeton.

1 Inleiding

Rijkswaterstaat heeft een politiek/maatschappelijk opdracht om haar materiaalgebruik intensiever te verduurzamen. In dit kader heeft Rijkswaterstaat CE Delft en Delta Concrete Consult benaderd om voor het materiaal (ongewapend-, gewapend- en voorgespannen) beton in kaart te brengen welke combinaties van betonnen objecten en verduurzamingstechnologieën van beton, de zogenoemde object-technologiecombinaties, momenteel verwacht mag worden dat ze technisch voldoende uitontwikkeld zijn om in praktijk op bescheiden schaal en gecontroleerde wijze toe te passen en die op termijn een significante bijdrage kunnen leveren aan de reductie van de CO₂-emissies van het betongebruik van Nederland in het algemeen en Rijkswaterstaat in het bijzonder.

Om deze opdracht uit te voeren is de volgende aanpak gevolgd:
Eerst is vastgesteld welke categorieën technologieën een groot CO₂-reductiepotentieel of op een andere manier 'milieusparend' kunnen bijdragen aan het verduurzamen van beton. Deze indeling in categorieën en de resultaten worden besproken in Hoofdstuk 2.
De volwassenheid van de technologie wordt gekarakteriseerd aan de hand van de TRL-niveaus zoals in '89 gedefinieerd door het Amerikaanse NASA.

Vervolgens is een verdeling gemaakt in object typen. Na beschrijving van de objecttypen combineren we technologiecategorieën en objecttypen tot een kansenmatrix, zie Hoofdstuk 3.

In Hoofdstuk 4 concretiseren we de kansenmatrix met uitkomsten van de workshop en state-of-the-art inzichten uit het veld.

Blijft de vraag hoe de performance van nieuwe technologie beoordeeld moet worden, daarom geven we een korte uiteenzetting hoe dat aangepakt kan worden op basis van functionele prestatiespecificaties in Hoofdstuk 5. Hier stippen we ook kort het belang van functionele prestatiespecificaties in de reguliere bouwpraktijk aan.

In Hoofdstuk 6 ronden we af met de conclusies en aanbevelingen voor het vervolg.

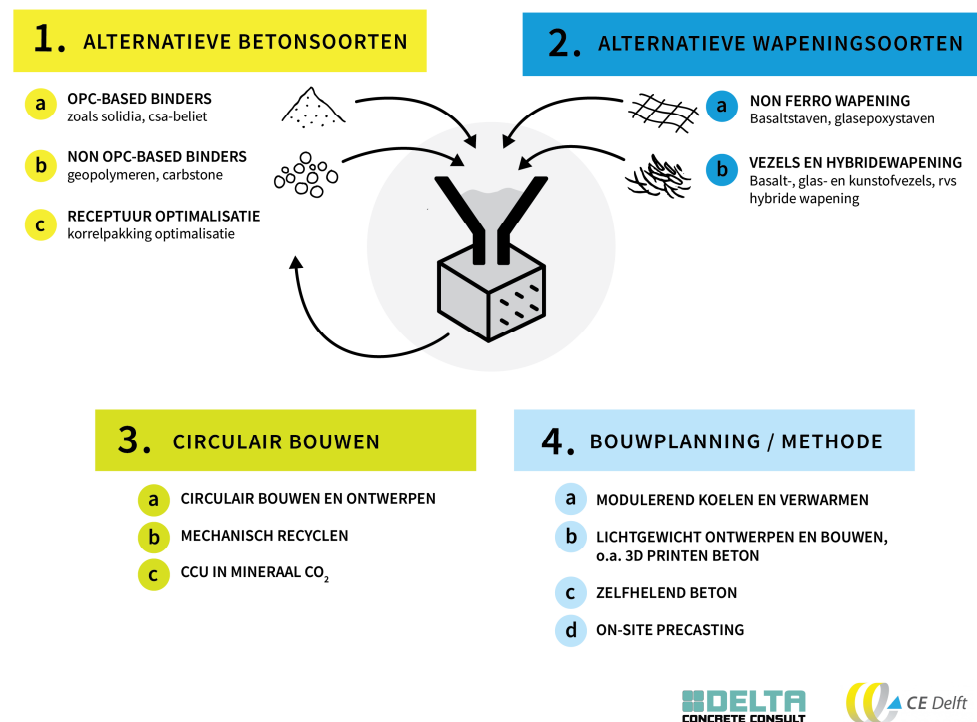
2 Technologie categorieën ter verduurzaming van beton

In het kader van het MVO-netwerk beton is al eerder de milieu-impact van beton in kaart gebracht (CE Delft, 2013), (CE Delft, 2016).

Uit de analyse 'Milieu-impact van betonegebruik in de Nederlandse bouw' (CE Delft, 2013), blijkt dat de belangrijkste milieu-effecten rechtstreeks veroorzaakt worden door broeikasgasemissies of sterk samenhangen met het gebruik van brandstoffen. Er is een sterke relatie tussen de CO₂-emissie en de brede milieu-impact van beton. Daarom richten we ons in deze studie op het verminderen van de broeikasgasemissie over de levensduur van het beton.

Verder is gebleken dat de broeikasgasemissie van beton zeer sterk samenhangt met het aandeel Portlandklinker in *elk* (al-dan-niet fabrieksmatig bereide) cement dat gebruikt wordt in beton. Andere factoren zijn de hoeveelheid wapening (van staal) en het transport van het beton *zelf* en de grondstoffen voor *in* het beton. Hierbij moet opgemerkt worden dat de mate van staalrecycling aan het eind van de levensduur van het beton een groot effect heeft op de CO₂-emissie en de algemene milieu-impact van het beton.

Figuur 2 - vier technologie categorieën om beton te verduurzamen



Op basis van deze inzichten en de berekeningen van het CO₂-reductiepotentieel van zeventien verschillende methodes om beton te verduurzamen (CE Delft, 2016) en recentere ontwikkelingen in de markt die deze mogelijkheden verder vergroten hebben we een indeling in vier technologiecategorieën gemaakt, zoals geïllustreerd in Figuur 2.

Deze vier technologiecategorieën zijn:

1. Alternatieve betonsoorten.
2. Alternatieve wapeningssoorten.
3. Circulair bouwen.
4. Bouwplanning/-productiemethode.

2.1 TRL-niveaus

Binnen de vier technologiecategorieën vallen een groot aantal technologieën. Niet iedere technologie is even ver ontwikkeld om snel commercieel te kunnen worden toegepast. Om inzicht te geven in hoever technologieën zijn in hun ontwikkeling is de TRL-schaal gebruikt. De NASA heeft deze schaal in '89 (her-)ontwikkeld voor hun ruimtevaartprogramma's, maar hij is breed toepasbaar¹.

De schaal loopt van TRL 1, ideevorming tot TRL 9 ready for take-off (vertaald als commercieel beschikbaar), TRL 1-4 beschrijft de hele ontwikkeling in het lab van idee tot eerste prototype op zeer kleine schaal (past op een bureau).

TRL 5-7 beschrijft de ontwikkeling van eerste prototype op zeer kleine schaal tot demonstratie van de technologie.

TRL 8-9 grootschalige productie onder industriële omstandigheden.

We maken in dit rapport onderscheid tussen het produceren van cement en het toepassen van het cement in een betonnen product of object. Het is dus mogelijk dat het TRL-niveau van de cementproductie al op Niveau 8 is, maar toepassing in een object op TRL 5-6. Als er maar één TRL-niveau genoemd wordt verwijst dat naar het toepassen van een technologie in een object. Er wordt altijd het soort object genoemd. Als het TRL-niveau van toepassing is op een eenvoudig soort object is het niet automatisch van toepassing op meer complexe objectsoorten.

2.2 Alternatieve betonsoorten

In deze categorie vallen technologieën die betonsoorten produceren die minder of geen Portlandklinker (OPC²) in de cementsamenstelling bevatten, zonder significant afbreuk te doen aan de technische performance.

We hebben in deze categorie onderscheid gemaakt naar zogenoemde OPC-based binders, non-OPC-based binders en receptuuroptimalisatie.

OPC-based binders

Onder OPC-based binders verstaan we in de context van dit rapport gemakshalve óók de minder conventionele 'alternatieve cementen' die geproduceerd worden op basis van vergelijkbare grondstoffen als de traditionele OPC-based binders en die in veel gevallen óók geproduceerd kunnen worden in bestaande cementfabrieken.

¹ Een toegankelijke uitleg over wat TRL-niveaus zijn staat in wikipedia:

https://en.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level

² OPC staat voor Ordinary Portland Cement wat voor circa 95% uit Portlandklinker bestaat.



Voorbeelden van alternatieve cementen die in deze categorie vallen zijn: Beliet-CSA-Ternesietcement dat onder de naam Ternocem™ ontwikkeld wordt en Solidia™-cement dat geproduceerd wordt op basis van laag kalkhoudend gesteenten zoals wollastoniet/pseudo-wollastoniet (CaO·SiO₂), en rankiniet. Voor Ternocem™-productie is het TRL-niveau 8, voor Solidia 9. Voor toepassing in objecten is de TRL van Ternocem™ 6. Voor Solidia is dat ook 9. In beide gevallen momenteel alleen nog voor kleine ongewapende betonwaren.

Beide alternatieve cementen claimen circa 30% minder CO₂-emissie ten opzichte van traditionele OPC. Daar komt bij dat het Solidia-cement deels geactiveerd wordt door reactie met CO₂ in plaats van met water. Daardoor is de totale reductie van de CO₂-footprint van het Solidia-cement circa 60-70% lager vergeleken met traditionele 100% OPC.

Van beide cementen is aangetoond dat het geproduceerd kan worden in een reguliere cementfabriek, met minimale aanpassingen aan de apparatuur (CSA-Beliet-Ternesietcement zoals Ternocem™ heeft een licht aangepaste maalinstallatie nodig). Verder zijn er veel openbare wetenschappelijke rapporten over de performance van producten geproduceerd met Solidia™-cement.

Doordat Solidia™ geactiveerd wordt door toevoeging van geconcentreerd CO₂ is daarvoor ook aanpassing van het betonproductieproces nodig. Solidia™ heeft inmiddels in een groot aantal landen test-runs gedaan met het CO₂ activeren bij commerciële partijen en 10% van de commerciële productiecapaciteit van drie aanbieders van betonproducten in de VS, UK en Canada is aangepast voor de productie van beton met Solidia-cement.

Non-OPC-based binders

Onder non-OPC-based binders verstaan we in de context van dit rapport alternatieve 'cementeuze bindmiddelen' waar de manier van verharden van het 'cement' enigszins afwijkt van de manier van verharden van traditionele Portlandklinker gebaseerd beton. Bekendste voorbeelden hiervan zijn betonsoorten die in de volksmond 'geopolymeren' worden genoemd.

In plaats van 'hydrateren' (vorming van cementshydraat³) is er sprake van 'polymeriseren', maar in beide gevallen ontstaat een steenachtig reactieproduct met een vergaand vergelijkbare technische performance.

Deze groep omvat een wijde range aan 'alkalisch-activeerbare cementeuze materialen' (AACM's) en bijbehorende activeringswijzen. Met name de concentratie en de soort alkaliën die per type AACM nodig is om dit type materiaal te activeren is bij deze bindmiddel-variant bepalend voor de milieu-impact van het beton. De activators zijn zo belangrijk voor de milieu-impact omdat de CO₂-footprint van de overige grondstoffen van de meeste AACM's vaak zeer laag is. Bij de juiste keuze van grondstoffen en activator is de reductie van de CO₂-footprint nog steeds aanzienlijk in vergelijking met Portlandklinkerrijke OPC en soms ook in vergelijking met hoogovencementen.

Een heel specifieke toepassing van geopolymeer-technologie is het Geosta™-product. Het gaat hier om een 'hybride cement' van portlandklinkerrijke cement en synthetische zeoliet (een additief in combinatie met OPC) dat gebruikt wordt door vermenging met aanwezig bodemmateriaal (ongeroerde grond) wat hiermee na 'in-place mixing kan worden

³ Als Portlandklinkercement mengt met water ontstaat er een cementshydraat volgens: $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
 $\rightarrow (\text{CaO})_3\text{SiO}_2(\text{H}_2\text{O})_3$ in de verkorte notatie van betontechnologen wordt dat CSH. Cementshydraten zijn netwerken van CSH die het beton bij elkaar houden. Polymerisatie leidt tot een ander soort netwerk verbindingen die het beton ook bij elkaar kunnen houden.



omgevormd tot gebouwfundaties, terreinverhardingen en werkwegen. Deze aanpak is omarmt door het werkveld omdat ze gebruik maakt van aanwezig bodemmateriaal en zo veel grondverzet uitspaart. Zowel door de inzet van geopolymer als het beperken van grondverzet zorgt dat deze technologie een hoog CO₂-reductiepotentieel heeft.

Een andere niche in de groep non-opc -based binders is Carbstone™ een betonsoort die geproduceerd kan worden op basis van calciumrijke staalslakken die niet geschikt zijn voor de productie van regulier (gegranuleerde) hoogovenslak. Deze slakken worden nu middels autoclaaf-bewerking onder CO₂-toevoeging gebruikt worden voor ongewapende betonwaren zoals bouwstenen.

Alle non-OPC-binders die hierboven genoemd worden vallen in TRL-categorie 9 bij toepassing in kleine ongewapende betonwaren.

Receptuuroptimalisatie

Onder receptuur optimalisatie verstaan we technologieën die nog steeds gebruik kunnen maken van reguliere Portlandklinker cement en/of andere bindmiddelsystemen voor beton, maar die de hoeveelheid bindmiddel reduceren door inzichten uit de natuurkunde over korrelpakkingsoptimalisatie toepassen (reductie van holle ruimte/‘inter-particle voids’) om daarmee (bij normatief opgelegde water/cement-factoren) de cementbehoefte te reduceren. Er zijn twee proefschriften over het onderwerp uitgebracht (Hunger, 2010) (Fennis-Huijben, 2011).

Op basis van deze theorie is beperkte, maar zeer indrukwekkende, praktijkervaring opgedaan met name op het gebied van hogesterktebeton. Hiermee valt de technologie in TRL-categorie 6-7 voor alle soorten toepassingen van beton. Belangrijkste reden voor geringe belangstelling tot dusver, is relatieve onderbelichting voor korrelpakkingstechnieken in betonopleidingen, waardoor zelfs de normatief recent verruimde korrelgraderingsbereiken niet aangegrepen worden om deze kennis toe te passen.

2.3 Alternatieve wapeningsconcepten

In deze categorie vallen technologieën om beton te wapenen met minder of helemaal geen staal, zonder afbreuk te doen aan de technische performance of de milieu-impact van de wapening over de hele levensduur te verhogen.

We hebben hierbij verder onderscheid gemaakt naar non-ferro wapening zoals basalt- en glasepoxystaven en allerlei soorten vezels: staal, basalt, glas, kunststof, al dan niet in combinatie met een vereenvoudigde stalen wapening waardoor hybride wapening ontstaat.

Non-ferro wapening

Twee varianten op staal zijn basalt- en glas epoxystaven. Met name met basaltstaven is in het voormalige Oostblok al jarenlange ervaring opgedaan onder zeer zware klimatologische omstandigheden.

De milieu-impact van deze materialen is lager dan die van staal indien de significant verhoogde trekcapaciteit en daarmee diameterreductie in vergelijking met staal wordt beschouwd. Daar staat tegenover dat basaltstaven bij sloop van beton niet per definitie hergebruikt kunnen worden als grondstof voor nieuwe wapening zoals het geval is bij staal. Er is geen reden om aan te nemen dat dit de recycling van beton negatief beïnvloed. Als bijkomend voordeel hebben deze materialen het voordeel dat ze ongevoelig zijn voor corrosie en zwerfstromen.

In Oost-Europa en Rusland schijnt het gebruik van basaltstaven als wapening een bewezen praktijk te zijn (TRL-niveau 9). In Duitsland is al veel ervaring opgedaan met glasepoxy-staven (TRL-niveau 9) voor alle soorten betontoepassingen. In Nederland is alleen ervaring met lichte toepassingen (elastisch ondersteunde vloervelden) opgedaan (TRL 8).

Vezels en hybride wapening

Behalve via traditionele wapening kan beton ook versterkt worden door het aanbrengen van vezels in het beton, deze vezels zorgen door hun lengte en willekeurige 3D-ordering ten opzichte van elkaar in het beton voor het verhogen van de treksterkte van het beton. Dit versterkende effect is in beginsel slechts voldoende voor bijvoorbeeld keldervloeren maar onvoldoende voor grote overspanningen. Daarnaast heeft het gebruik van veel vezels per m³ beton (meer dan 65 kg staalvezels/m³) het nadeel dat dat het beton zo goed als onverpompbaar en erg moeilijk sloopbaar maakt.

Niettemin kunnen overspanningen tot 4-4,5 m in milde gebruikscondities zoals woningen en kantoren gerealiseerd worden met significant lagere gehalten vezels, dan momenteel nog uit Eurocode rekenregels volgt. Voor deze toepassingen zijn staalvezels TRL 9.

Naast staal- worden er ook basalt-, glas- en kunststofvezels gebruikt. Buiten Nederland zijn glas- en basaltvezels ook TRL 7-8 in deze toepassingen (wordt wel toegepast, maar buiten de Baltische staten nog geen breedgedragen rekenregels). In Nederland is echter weinig ervaring opgedaan met deze technologie.

Om het toepassingsbereik te verbreden wordt er ook veel onderzoek gedaan naar de combinatie van vezels en reguliere wapening. Op deze manier lijkt middels scheurwijdtebeperkende werking en spanningreducerende krachtleiding ook in grote voorgespannen elementen en complexe zwaarbelaste constructies bespaard te kunnen worden op de hoeveelheid wapening door het combineren van vezels en traditionele wapening tot wat wordt aangeduid als hybride wapening. Hoeveel wapening bespaart kan worden loopt sterk uiteen met aard van het constructiedeel en belastingmodel en varieert daardoor tussen de (5 en 10% besparing op traditionele wapening) waarbij de besparing op arbeid en maakbaarheid van complexe doorsneden wellicht de grootste economische winst biedt. Gebruik van hybride wapening op grote voorgespannen elementen is momenteel nog TRL 5.

Hybride wapening wordt in FE-software rekenmodellen die hier en daar nog nadere calibratie met onder ander deflectiemetingen verlangen, als ontwerpservice door gespecialiseerde ingenieursbureau's aangeboden. De werkwijze en validatie daarvan is nog in ontwikkeling en wordt gedemonstreerd door gebruik in steeds grotere en complexere projecten.

Biobased vezels zijn helemaal buiten beschouwing gelaten omdat het nog onduidelijk is op welke termijn deze vezels een versterkend effect hebben en wat het effect van de vezels na deze termijn op de functionele eigenschappen van het beton is.

2.4 Circulair bouwen

In deze categorie vallen technologieën om oude betonconstructies te recyclen die leiden tot minder Portlandklinker gebruik, zonder afbreuk te doen aan de technische performance van de nieuw te bouwen betonconstructie. We hebben hierbij verder onderscheid gemaakt naar circulair bouwen en ontwerpen, mechanisch recyclen-route en CCU in mineraal CO₂.

Circulair bouwen en ontwerpen

Circulair bouwen en ontwerpen - ook wel adaptief en modulair bouwen genoemd - heeft de potentie materiaalgebruik in de toekomst uit te sparen. Er zijn een aantal complicaties als het gaat om het inschatten van het effect van circulair bouwen en ontwerpen op de milieupact van beton:

- Het is vooraf zeer moeilijk om te zeggen welke constructies passen in werkwijzes van over 50-150 jaar (de levensduur van betonnen objecten die nu gebouwd worden). Gaan ze daadwerkelijk hergebruikt worden?
- Over 50-150 jaar is alle energie en materiaalgebruik klimaatneutraal. Dus de winst die geboekt wordt kan niet uitgedrukt worden in uitgespaarde broeikasgasemissies, maar moet uitgedrukt worden in uitgespaarde energievraag. Waarschijnlijk is in een klimaatneutrale toekomst uitsparen van hoogwaardige energie veel waard, maar er bestaat geen methode hoe je bepaald hoe zich dat verhoudt tot de waarde van nu.
- Er zijn nog geen praktijkcijfers van circulair gebouwde of ontworpen constructies.

Circulaire stoeptegels, etc. bestaan, die zijn TRL 9. Circulaire complexe betonnen constructies bestaan niet en hebben een TRL van 1-3.

Mechanisch Recyclen

Onder mechanisch recyclen verstaan we het terugbrengen van beton naar de fracties: zand, grind en cementsteen. Recyclen van zand en grind bespaart winning van de primaire grondstof zelf en scheelt broeikasgasemissies met name bij zo lokaal mogelijk hergebruik. Daarnaast wordt aanvullende emissiereductie voorzien door gebruik van half-gehydrateerde oude cementsteen als hetzij 'precursor' in productie van geopolymeer of anderszins als grondstof voor cement of cementvervanging onderzocht. Hergebruik van het cementsteen biedt mogelijk significante CO₂-besparing, maar is nog onvoldoende in de praktijk bewezen.

Bij het terugwinnen van grind is het belangrijk dat het grind bij bewerkingsprocessen zo min mogelijk beschadigt. Dit betekent dat tijdens het voorbreken van het beton (om het betonpuin uit de constructie vrij te maken) het beton zo groot mogelijk gehouden wordt bijvoorbeeld niet kleiner dan 150 mm gebroken wordt. Als er wel kleiner wordt vorgebroken bijvoorbeeld tot 32 mm zoals gebruikelijk bij de productie van betongranulaat dan beschadigt het grind. Grind met een hoog cementsteenaandeel en/of grillige vorm-variaties zorgen ervoor dat het granulaat een ongewenst verhoogde 'waterbehoefte' genereert, hetgeen bij normatief vastgelegde watercementfactoren ogenschijnlijk paradoxaal juist tot verhoogde cementgehalten kan leiden.

In Nederland zijn er verschillende consortia die mechanisch recyclen aanbieden. Het doelbewust vergaand beperken van beschadiging van grind is met name bij het Smartliberator™-concept sterk doorgevoerd. Dat is voorlopig nog even minder duidelijk bij de andere aanbieders die voorlopig een sterke focus zetten op volume (want toereikende beschikbaarheid in de markt is een probleem), op reinheid (vrij zijn van storende contaminaties) en op specifieke graderingsbereiken. Het vrijmaken van de zand- en grindfractie en toepassen in nieuw beton is TRL-niveau 9 voor alle type betonsoorten. Het gebruik van de cementsteenfractie als vervanger van OPC-cement of grondstof van de vervanger van OPC-cement is TRL 5-6.



CCU in mineraal CO₂

Mineraal CO₂ (magnesiumcarbonaat en amorfe siliciumoxide) is een reactieproduct dat ontstaat door fijngemalen olivijn (magnesiumsilicaat) onder hoge druk en verhoogde temperatuur in contact te brengen met CO₂ uit bijvoorbeeld de rookgassen van een fabriek. Op deze manier kunnen vrij grote hoeveelheden CO₂ vastgelegd worden in een mineraal dat gebruikt kan worden als grondstof voor onder ander bindmiddelen in beton. Het is inmiddels duidelijk dat dit mineraal als reactief puzzolaan de behoefte aan Portlandklinkercement kan helpen reduceren, echter met name in Portlandrijke cementsoorten. Mineraal CO₂ is een Nederlandse innovatie.

Deze technologie is alleen nog op zeer beperkte schaal beschikbaar, er wordt nu gewerkt aan opschaling. De verwachting is dat deze technologie in 2020 gedemonstreerd kan worden op voldoende grote schaal voor praktijkdemonstraties (TRL 6). Het huidige TRL-niveau is TRL 4.

2.5 Bouwplanning/productiemethode

In deze categorie vallen manieren om beton en betonconstructies te maken die maken dat er minder cement, wapening of beton wordt gebruikt dan strikt noodzakelijk voor de toepassing. We hebben hierbij verder onderscheid gemaakt naar modulerend koelen en verwarmen, licht ontwerpen en bouwen (onder ander 3D-printen van beton), zelfhelend beton en on-site precasting.

Modulerend verwarmen en koelen

De werking van de technologie modulerend verwarmen en koelen is gebaseerd op het feit dat verwarming van het beton kort na het storten, het uithardingsproces versneld. Als het uithardingsproces goed op gang komt moet er soms gekoeld worden om teveel aan warmteontwikkeling en daarmee de mogelijkheid op sterk krimpen van het beton dat tot scheurvorming kan leiden tegen te gaan. De verlaging van de CO₂-impact van de technologie van proactief modulerend verwarmen en koelen kan vrij groot zijn en dat is contra-intuïtief. Dat komt door twee aspecten:

- Om het beton snel uit te laten harden wordt er vaak meer cement toegevoegd aan het beton dan nodig is voor de lange termijn sterkte van het object. Door modulerend naar behoefte vanuit reeds aanwezige omgevingswarmte te verwarmen, kan dezelfde snelle uitharding gerealiseerd worden zonder extra cement toe te voegen. Als aanvullend in het afkoeltraject het desgewenst tijdelijk opgeslagen 'warmte-overschot' wordt teruggevoerd door de constructie, kan ondanks een lagere omgevingstemperatuur toch een hoog verhardingstempo worden geborgd.
- Om te voorkomen dat beton te veel krimpt tijdens snelle afkoeling tijdens de uitharding wordt vaak extra wapening toegevoegd, enkel en alleen om de krimp van het beton te beperken. Door tijdens de uitharding te koelen kan ook excessieve uitzetting voorkomen worden zonder extra wapening aan te brengen. Dit is voor het eerst zelfsturend toegepast in 2014 bij de aanleg van de Westelijke Randweg te Amsterdam door Volker Wessels.

Deze bouwmethode is in de praktijk bewezen. Het is TRL-niveau 8 op alle soorten objecten.



Licht ontwerpen en bouwen

Alle beton die uitgespaard kan worden zorgt ook niet voor emissies. Slank ontwerpen vergt meer aandacht voor detail tijdens de ontwerpfasen en andere manieren van bouwen tijdens de realisatiefase.

Dat kan van heel simpel door bij het maken van mallen voor betonnen dijkbekleding ruimtes uit te sparen zodat het blok minder beton bevat, of heel hip via 3D-printen. Behalve dat 3D-printen van beton heel hip is kan het ook daadwerkelijk bijdragen aan CO₂-besparing als het gebruikt wordt als een technologie om slanke/gedematerialiseerde ontwerpen te realiseren die met traditionele bekistingssystemen maar beperkt mogelijk zijn.

Er zijn nog verdere optimaliseringen van 3D-printen mogelijk:

- Verbeteren van de component wapening (waarbij toereikende staafomhulling vooralsnog bij bepaalde systemen een te verbeteren prestatie-aspect vormt).
- Besparing op bijvoorbeeld transportwapening zodra er in-situ geprint wordt.
- Besparing op de hoeveelheid en aard van de traditionele cement en verhardings versnellende hulpstoffen die vanwege noodzakelijk hoge aanvangsterkte noodzakelijk zijn. Dit laatste lijkt door steeds meer print-mortelproducenten te worden beseft waardoor populariteit van hybridecementen en/of geopolymeer een logische keus lijkt om de tamelijk extreme prestatie-specificaties van extrusiemortels te kunnen invullen.

Verandering van de vorm van betonnen dijkbekleding en daardoor beton uitsparen is inmiddels een bewezen technologie, die naast CO₂-emissiereductie nog andere voordelen heeft (TRL 9). Voor objecten met een lage belasting zoals kleine constructieve elementen en fietsbruggen wordt 3D-printen van beton gedemonstreerd in de praktijk (TRL 8).

Zelfhelend beton

Zelfhelend beton door gebruik van bacteriën is een technologie die aangeboden wordt door de TU Delft. De werking is gebaseerd op de eigenschap van een specifiek soort bacteriën om zo gauw ze aan water en lucht blootgesteld worden een afscheidingsproduct te gaan produceren waarmee ze de scheurtjes opvullen, die vervolgens het toetreden van water en lucht nabij het wapeningsstaal succesvol helpen verhinderen. Dit verhoogt tevens de waterdichtheid van het beton en verlaagt de noodzaak tot reparatie en onderhoud bij kleine scheurtjes. De ontwikkelaars aan de TU Delft verwachten dat deze technologie de levensduur van het beton met 20% verlengt (CE Delft, 2016).

De vraag is of deze technologie ook reductie van krimpwapening mogelijk kan maken doordat scheurtjes van 0,2-0,3 mm, die optreden als 30 kg/m³ aan (krimp)wapening wordt verminderd, opgevuld worden door de bacteriën waardoor de scheurgrootte onder de 0,1 mm blijft.

Provincie Noord-Holland en TU Delft bereiden een demonstratie van deze technologie voor deze zomer. Als dit demonstratie project gerealiseerd wordt de TRL 8 voor grote voorgespannen objecten, wateropslagtanks, etc.

On-site precasting

Het effect van on-site precasting zit mogelijk in het efficiënter gebruik van mensen, transportmiddelen en productiecapaciteit van (veld-)betoncentrales. On site wordt vaak enkel 's ochtends en in de voormiddag veel stortwerk gedaan waarna 's middags productiecapaciteit van betonmortelproducenten even hoog maar bezettingsgraad extreem laag is en ook de aanwezige stortploegen een hogere bezettingsgraad kunnen halen. Door on-site te precasteren is minder tot geen transport van zware betonnen objecten over de openbare weg nodig en kan optimaal gebruik gemaakt worden van de beschikbare wegcapaciteit naar



nieuwbouwlocaties en ontstaat minder schade aan wegen. De technologie is TRL 9, de daadwerkelijk gerealiseerde uitsparing is nog onduidelijk.



3 Kansenmatrix

De kansenmatrix bestaat uit de combinatie van de eerdergenoemde technologiecategorieën met verschillende soorten objecten.

3.1 Vier objectcategorieën

Om overzicht te krijgen in eindeloze combinatiemogelijkheden van verschillende objecten die van beton kunnen worden gefabriceerd zijn er vier objectcategorieën gedefinieerd:

1. Kleine niet-constructieve betonwaren, zoals: stoeptegels, trottoirbanden, dijkbekleding, parkbankjes, fietspaden, rotondes.
2. Klein gewapend beton, zoals: L-keerwanden, tussenwanden van woningen.
3. Grote voorgespannen elementen, zoals: (kanaalplaat)vloeren, brugliggers.
4. Complexe zwaarbelaste constructies, zoals: (zee)sluizen en tunnels onder wegen, gebouwen of waterwegen.

Figuur 3 - 4 objectcategorieën van beton



De objecten nemen met iedere categorie toe in mate van complexiteit en fysieke belasting die ze moeten kunnen weerstaan, zie Figuur 3. Verder neemt het risico (faalkans * faalkosten) bij falen exponentieel toe tussen de stoeptegel uit Categorie 1 en de zeesluis uit Categorie 4. Ook worden de objecten in Categorie 1 seriematige in grote oplagen geproduceerd terwijl de objecten in Categorie 4 over het algemeen een maatoplossing voor een specifieke oplossing zijn die typisch één keer in de 50 jaar voorkomt, of zelfs nooit eerder vertoond is in de benodigde schaal of uitvoeringsvorm (zo zijn de zeesluizen die nu gebouwd worden groter dan ooit tevoren en is de tunnel onder de Westerschelde uniek in zijn soort).

3.2 Kansenmatrix

Door de vier technologiecategorieën te koppelen aan de vier objectcategorieën kun je per object-technologiecombinatie in kaart brengen wat de huidige stand van zaken is.

We onderscheiden hierbij drie verschillende niveaus van compatibiliteit met de huidige werkwijzes, zie Figuur 4:

- probleemloos in de praktijk toe te passen (de groene rondjes met vinkjes);
- aanpassingen nodig aan de huidige manier van kwaliteit bepaling om tot verantwoorde en veilig gebruik van deze technologie bij deze objecten te komen (de oranje rondjes met vraagtekentjes);
- nog niet voldoende bewezen om op dit type object toegepast te worden (de rode rondjes met kruisjes).

Figuur 4 - Kansenmatrix verduurzaming beton

	I.	II.	III.	IV.
1. ALTERNATIEVE BETONSOORTEN				
a OPC-BASED BINDERS	✓	?	?	✗
b NON OPC-BASED BINDERS	✓	?	?	✗
c RECEPTUUR OPTIMALISATIE	✓	?	?	✗
2. ALTERNATIEVE WAPENINGENSOORTEN				
a NON FERRO WAPENING	nvt	✓	?	? ✗
b VEZELS EN HYBRIDEWAPENING	nvt	✓ ?	?	? ✗
3. CIRCULAIR BOUWEN:				
a CIRCULAIR BOUWEN EN ONTWERPEN	✓	?	?	✗
b MECHANISCH RECYCLEN	✓	?	?	✗
c CCU IN MINERAAL CO ₂	✓	?	?	✗
4. BOUWPLANNING/ METHODE:				
a MODULEREND KOELEN EN VERWARMEN	✓	nvt	✓	✓
b LICHTGEWICHT ONTWERPEN EN BOUWEN	✓	?	?	✗
c ZELFHELEND BETON	✓	?	?	✗
d ON-SITE PRECASTING	✓	✓	✓	✓

Ontwerp: yulia-ink.com



Als we de verbinding maken met de beschrijving van de technologieën in het vorige hoofdstuk kunnen we deze indicaties verder concretiseren.

3.3 Alternatieve betonsoorten

We zien dat alle alternatieve betonsoorten als toepasbaar beschouwd worden op object Type 1. De belangrijkste reden hiervoor is dat bij de productie van kleine betonwaren er al langere tijd ervaring is opgedaan met 'niet-prescriptief genormeerd' waarden van het resultaat.

De sector is dus prima in staat om vooraf te bepalen wat de functionele prestatie-eisen zijn waar het object aan moet voldoen en te bepalen hoe dat aangetoond moet worden.

Daar komt bij dat mocht onverhoopt in de praktijk blijken dat het gevolgde testprotocol niet de gewenste zekerheid geeft over prestaties in de praktijk dat de risico's bij falen beperkt zijn. Hierbij moet opgemerkt worden dat deze prestatie gestuurde aanpak voor de aanleg van fietspaden en rotondes een risico-perceptie opschaling betreft en dus minder makkelijk bij deze typen objecten toegepast kan worden.

Deze onbekendheid met prestatie gestuurd specificeren en verifiëren is ook de reden dat toepassing bij Categorie 2 en 3-objecten een vraagteken heeft gekregen in Figuur 4.

In de gevallen dat er een kruisje staat is er gewoon te weinig praktijkervaring om deze toepassing de testresultaten verkregen op eenvoudigere objecten als voldoende te zien voor de objecten in Categorie 4 (en Categorie 3 in het geval van korreelpakking optimalisering).

In de categorie OPC-based binders mikken zowel Solidia™ als Ternocem™ op toepassing in de objectsoorten 1-3: kleine niet constructieve betonwaren, klein gewapend beton en voor- gespannen kanaalplaatvloer.

Ternocem™ is nog alleen toegepast op kleine ongewapende proefstukken, zover de test-resultaten vrijgegeven zijn lijken die te wijzen op geschiktheid voor deze objecttypes. Solidia™ wordt in de VS door verschillende betonproducenten op commerciële schaal toegepast op de productie van dit type producten.

In de categorie non-OPC-based wordt Ramac™ (geoplymeertechnologie) en Compensatiesteen™ (variant op Carbstone) aangeboden voor Objecttype 1.

Receptuuroptimalisatie vindt zover bekend alleen plaats binnen de toepassingsgrenzen van prefabproducten met extreme prestatieprofielen zoals bijvoorbeeld explosiebestendige geldautomaatkluizen en uitkragende superslanke balkons in ultrahoge-sterktebeton of extreem slijtvaste brugdecoverlagen, het is nog weinig toegepast om de CO₂-footprint te verlagen.

3.4 Alternatieve wapeningen

Alternatieve wapeningen zijn alleen relevant voor gewapende objecten en daarmee object Categorie 1 niet van toepassing voor dit type technologie.

Bij de objecten van Categorie 2 en 3 en zelfs 4 staan nog veel vraagtekens omdat er in Nederland weinig ervaring is met prestatie gestuurd specificeren, verifiëren en certificeren, maar er buiten Nederland bijvoorbeeld wel degelijk veel ervaring is opgedaan met basalt als wapeningsmateriaal en hybride wapening. Er staat ook een paar vinkjes bij Categorie 2 objecten omdat er dusdanig veel ervaring is opgedaan met basaltstaven en er voor hybride wapening wel rekenmodellen beschikbaar zijn met een wetenschappelijk basis, dat ook toepassing in Nederland (onder ander vervanging van dwarskrachtwapening bij voegovergangen is in Duitsland reeds onder voorwaarden toegestaan) met gecontroleerde risico's mogelijk is in deze categorie.

De rode kruizen in object Categorie 4 slaan op de toepassing van glas- en kunststofvezels in deze categorieobjecten, dat is nog niet breed gedragen op grond van vraagtekens rond lange termijn deflectie met name kruip).

3.5 Circulair bouwen

Rijkswaterstaat werkt aan het ontwerp van een circulaire brug. Het idee achter het ontwerp is dat de brug modulair opgebouwd is zodat bij defecten alleen modules vervangen hoeven te worden en dat er bij einde van de levensduur voor einde van de technische levensduur de modules uit elkaar gehaald kunnen worden en elders op een andere manier opgebouwd kunnen worden.

Op dit moment is dit ontwerp nog dusdanig over-gedimensioneerd dat er nog geen sprake is van CO₂-emissie-reductie. Technisch is het natuurlijk wel haalbaar om een brug of een eenvoudiger object modulair en herbruikbaar op te bouwen.

Het sloopbeton van alle type objecten kun je via mechanisch recycelen verwerken. In welk type object je het weer kunt hergebruiken hangt samen met de manier waarop je deze materiaalstromen weer tot grondstof verwerkt. Het zand en het grind kun je weer in alle typen objecten gebruiken. Als je de gebruikte cement-fractie hoogwaardig wil hergebruiken kun je het inzetten als grondstof voor OPC-based binder zoals Ternocem™ of non-OPC-based binder zoals geopolymeer, danwel als puzzolaanmateriaal door toekenning van een k-factor. De toepassing van deze binders bepaald vervolgens in welke type object je deze fractie kunt hergebruiken.

3.6 Bouwplanning/-methode

Modulerend koelen en verwarmen sluit aan bij de reguliere betontechnologie en is al aangetoond in de praktijk maar wordt nog weinig toegepast. Modulerend koelen en verwarmen is vanwege economisch redenen vooral voor de wat grotere objecten (vanaf circa 400 mm doorsnede/dikte).

On-site-precasting gebeurt nu al vanwege financiële redenen bij verschillende type objecten in Nederland.

Lichtgewicht bouwen krijgt steeds meer aandacht en met name 3D-printen van beton wordt langzamerhand uitgebreid.

Zelfhelend beton is al toegepast op object Type 3 en 4 maar zonder de vermindering van wapening toe te passen. Een prototype waarin dat wel is gebeurd is in voorbereiding bij provincie Noord-Holland.

Voor alle inschattingen zal deze geschiktheid aan de hand van een goed voorbereid functionele prestatie gestuurde specificatie en verificatie dossier inclusief meetprogramma (methoden en criteria) inzichtelijk gemaakt moeten worden, voordat hier verdere uitspraken over gedaan kunnen worden.

We komen hierop terug in Hoofdstuk 5.

4 Resultaten workshop

Tijdens de workshop is de kansenmatrix gepresenteerd en toegelicht. Vervolgens hebben een aantal technologieaanbieders een korte pitch over hun technologie gehouden. Daarna zijn projectaanbieders uitgenodigd om met de technologieaanbieders de kansen op samenwerking te verkennen.

Hier zijn de volgende technologie-object combinaties uit voortgekomen:

Mechanische recycling en gehele ROK-bereik

Mechanische recycling om te komen tot reductie van primaire grondstoffen en aanvullend verbeterde gradering en verhoogde reinheid van granulaten en herwinning residueel cementeus bindmiddel waardoor significante CO₂-emissiereductie mogelijk is. Deze technologie is toe te passen in de hoofddraagconstructie van civiele kunstwerken (gehele ROK-bereik).

Onderzoeksvragen voor de klimaatvelop: welke vervangingspercentages van natuurlijke toeslagmaterialen zijn mogelijk en wat is de reductie van de CO₂-emissie met deze maatregel?

Wapeningsreductie en gehele ROK-bereik

Deze technologie-object combinatie is voorgesteld in verschillende uitvoeringsvormen:

1. Wapeningsreductie door op bacteriën gebaseerde zelfhelend beton toe te passen in waterkerende constructies zoals tunnels en onderdoorgangen.
2. Wapeningsreductie door aanvullende staalvezelversterking (hybride wapening) op traditioneel & geopolymeerbeton toe te passen in de hoofddraagconstructie van civiele kunstwerken (gehele ROK-bereik).
3. Toepassen van basaltvezelversterking in ongewapende elementenverharding op basis van geopolymeer (onder ander berm- en taludbekleding).
4. Vervanging van stalen wapening door gebruik van basaltstaven in hoofddraagconstructie van civiele kunstwerken (gehele ROK-bereik).

Onderzoeksvraag voor de klimaatvelop: Welke CO₂-emissiereductie is mogelijk door deze maatregelen?

Alternatieve cementen en object Type 1-3

Deze technologie-object combinatie is voorgesteld in verschillende uitvoeringsvormen:

1. Ongewapend geopolymeerbeton toe te passen in elementenverharding (onder ander berm- en taludbekleding).
2. Ongewapend Solida™-cementbeton toe te passen in elementenverharding (onder ander berm- en taludbekleding).
3. Gewapend geopolymeerbeton toe te passen in hoofddraagconstructie van civiele kunstwerken (gehele ROK-bereik).
4. Gewapend/voorgespannen Ternocem™-beton toe te passen in het circulair viaduct; voorgespannen liggers.
5. Stabilisatie van grond met hybride cement op basis van Geosta™ additief toe te passen in spoorwegballastbed en wegfundatie.

Onderzoeksvragen voor de klimaatvelop: Wat is de technische duurzaamheid van het beton op basis van het aangeboden bindmiddel? Welke CO₂-emissiereductie is mogelijk door deze maatregelen?

Tijdens de workshop waren relatief weinig projectaanbieders aanwezig. Dus een aantal van de bovenstaande combinaties zoeken nog naar een project. Daarnaast hadden een aantal partijen al projecten aangemeld bij Rijkswaterstaat voorafgaand aan deze workshop. Deze projecten zijn niet beschreven tijdens de workshop.

Naast de matches die gemaakt zijn tijdens de workshop viel ons, tijdens het verwerken van de resultaten, nog een paar matches op die niet gemaakt zijn, maar wel interessant zouden kunnen zijn. Het gaat dan om samenwerking tussen projecten:

- Smartliberator™ en in-situ gestort Geobeton™:
Gebruik van de drie verschillende korrelfracties die met de Smartliberator™ teruggewonnen worden in combinatie met de productie van ter plaatse gestort gewapende geopolymeerbeton.
- Circuton™ en Ternocem™:
Gebruik van de korrelfractie-recyclestromen uit de Circuton™ als grondstof voor nieuw Ternocem™-beton.
- Basaltvezels en Ramac™:
Gebruik van basaltvezels voor elementenverharding van geprefabriceerd ongewapende geopolymeerbeton.

Onderzoeksvragen voor de klimaatvelop: Wat is de technische duurzaamheid van het beton dat op deze manier geproduceerd wordt? Welke CO₂-emissiereductie is mogelijk door deze maatregelen?

5 Functionele prestatiespecificaties

De huidige praktijk van normen is vrijwel volledig prescriptief van aard en sterk receptuur/grondstof gebaseerd en daardoor zijn de kansen voor de technologie Categorie 1-3 al snel gelimiteerd. Daarom zijn er methodes in kaart gebracht om op basis van performance gebaseerde normen de toepassing van deze technologieën in goede banen te leiden. Hierbij hebben we ons beperkt tot functionele prestatiespecificaties die in lijn zijn met het bouwstoffenbesluit (BSB), besluit bodemkwaliteit (BBK) en de Euronormen 1 en 2 met daaronder materiaalnormen: EN-206 voor beton en daarin de materiaalspecificatienorm EN-197 voor cement.

De EN-206 schrijft in constructief beton *in beginsel* enkel cement conform EN-197 voor en in bepaalde gevallen minimum cementgehalten en soorten waarvan op basis van decennia-lange meerjarige ervaring bekend is dat ze worden geacht de benodigde prestatie 'intrinsiek' (in de Eurocode aangeduid als 'deemed to satisfy') te realiseren.

Echter in deze normen staat óók in specifieke sub-paragrafen (zoals Paragraaf 5.1.1. van de EN-206) dat als gelijke geschiktheid ('equivalent performance') van een andere samenstelling aangetoond kan worden dat dit ook toegestaan is. De vraag is dan hoe je aantoont dat een bepaald type grondstof of beton gelijke geschiktheid bezit.

Hiervoor zijn om te beginnen handvaten voor functionele prestatiespecificaties nodig. Prestatiegestuurd specificatie, verificatie en certificatie vraagt aanbieders om op wetenschappelijke basis vooraf hard te maken dat individuele uitvoeringsvormen van een technologicategorie geschikt is om toe te passen in een specifiek objecttype in een echt project. Vervolgens worden tijdens de levensduurtesten gedaan om de verwachtingen vooraf door monitoring achteraf realistisch te kunnen valideren in de praktijk. Zodat als er een onverwachte afwijking van de voorspellingen optreedt op tijd in gegrepen kan worden (feedback loops zodat kalibratie van het ontwerpmodel kan plaatsvinden).

In Nederland is voor 'hybride cementen' (een combinatie van 5-15% OPC + SCM's + alkalische activering zodat een 'tussenvorm ontstaat tussen traditionele cementen en geopolymeren) een oplossing door de CUR-48 als certificeringsgrondslag te nemen. Dit traject mondt uit in een Attest met Certificaat. Deze benadering is onderdeel van de huidige normstelling.

Bij gebruik van alternatieve bindmiddelsystemen (eerste technologicategorie) is de Britse PAS 8820 een goede leidraad, deze specificatie aanbeveling is volledig in lijn met de Eurocode en de EN-206 nomenclatuur ontwikkeld.

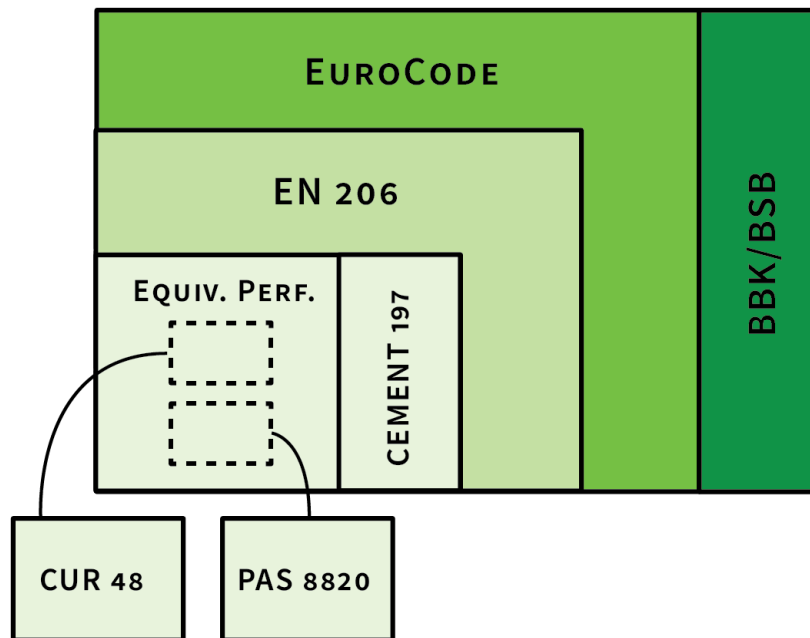
Voor de categorie 'alternatieve betonsoorten' lijkt de Britse BS-PAS 8820 voorlopig (bij ontbreken van EAD's en nationale BRL's) de meest bruikbare leidraad omdat dit document helpt invulling te geven aan het aantonen van tenminste gelijkwaardigheid (benchmarking) aan traditionele keuzes en prescriptieve prestaties.

Voor de categorie 'alternatieve wapeningen' lijkt het 'Equivalent Concrete Performance Concept (ECPC)' en invulling middels 'Initial Type Testing' bestaat uit onder ander calibratie tussen ontwerpmodel en veldwaarnemingen voorlopig de enige route. In het geval van aan staalvezels of basaltstaven toerekenbaar juist modelleren van mechanisch vervormingsgedrag zullen Eurocode 1 en 2 met de achterliggende CEP/FIB Model Code 2010



tenminste gelijkwaardigheid (benchmarking) met traditionele keuzes en prescriptieve prestaties opleggen.

Figuur 5 - De normen die van *direct* belang zijn bij bouwen in constructief beton en de manier waarop Equivalent Performance based compliance regulations daarin passen



Voor de categorie ‘circulair bouwen’ en de bij mechanisch recyclen vrijkomende grondstoffen bestaat de nodige ervaring met CUR-aanbevelingen zoals de CUR-A48 en de CUR-A112 en daar waar men Nationale BRL’s in de toekomst wil inzetten als basis voor Certificatiesystemen, daar zullen voorlopig Europese Assessment Documents (zogenaamde EAD’s) een bruikbare aanzet vormen.

Aan de hand van bovengenoemde richtlijnen kunnen functionele prestaties en daarmee equivalent performance aangetoond worden en is de toepassing in principe tenminste net zo veilig, robuust en functioneel als de ‘deemed-to-satisfy’ verwachting verbonden aan regulier beton. Performance based Certification verbindt daar middels een verificatie aan het gereede object nog een aanvullende zekerheid aan die de bestaande ‘prescription based route’ niet afdekt.

Echter, omdat er in Nederland nog relatief weinig ervaring is opgedaan met deze manier van werken, raden we aan om bij al deze technologieën zorgvuldig te overwegen waar deze worden toegepast in het object en daarbij in eerste instantie de omvang van inzet te beperken door bijvoorbeeld enkel specifieke delen van constructies te verkiezen boven gehele constructies in één keer, zodat bij onvoorzien tegenvallend resultaat herstel hiervan ook budgettair te overzien is. Indien dit bijvoorbeeld gewapende- of voorgespannen T-liggers betreft, zou het verstandig kunnen zijn dit in *hetzij* minder kritische posities binnen liggervelden te doen *danwel* buiten de hoofd draagconstructie te houden (bijvoorbeeld schampkanten en/of randelementen).

6 Conclusies en aanbevelingen

Rijkswaterstaat heeft een politieke/maatschappelijke opdracht om haar materiaalgebruik intensiever te verduurzamen. Om te kunnen bepalen welke projecten het meeste potentieel hebben voor emissiereductie bij betongebruik in Nederland in het algemeen en het betongebruik door Rijkswaterstaat in het bijzonder is er door CE Delft en Delta Concrete Consult een kansenmatrix opgesteld.

Deze kansenmatrix is afgebeeld in Figuur 4 en heeft de vorm van een tabel. De bovenste rij van deze tabel geeft de verschillende type objecten weer. De objecten zijn onderverdeeld in vier categorieën. Van links naar rechts neemt per categorie de complexiteit van de betonnen structuur, de maximale belasting en het risico bij falen toe. In de linker kolom staan alle technologieën samengevat die beschikbaar zijn en naar verwachting de milieu-impact van beton sterk kunnen verlagen. De meest kansrijke technologieën zijn te verdelen over vier categorieën:

1. Alternatieve betonsoorten, vervangen van OPC-cement.
2. Alternatieve wapeningsorten, vervangen van stalenwapening.
3. Circulair bouwen, recycling van cement.
4. Bouwplanning/bouwmethode, voorkomen van gebruik van wapening, OPC door aanpassingen in het bouwproces.

Daarnaast zijn vier typen betonobjecten gedefinieerd verschillend in mate van functionele belasting, complexiteit van de constructie en mate van seriematige productie.

De kans op succes per 'technologie-object combinaties' is weergegeven in de kansenmatrix. De technologie-object combinaties die op basis van de huidige werkwijzen moeten werken zijn aangegeven met een groen bolletje met een vinkje. Hierbij blijkt dat dit in principe voor alle technologieën in combinatie met object Type 1 geldt. Hierbij geldt wel de randvoorwaarde dat vooraf Equivalent Performance geverifieerd wordt op basis van prestatie-eisen en dat ook in de praktijk daarop getest blijft worden. Dit is in ieder geval in de prefab industrie voor Type 1-object inmiddels de norm.

Wat verder opvalt is dat nog afgeraden wordt om technologieën te koppelen met object Categorie 4, de meest complexe categorie met het hoogste faalrisico, zoals tunnels en sluizen. Met als uitzondering modulerend koelen en verwarmen en on site precasten uit technologie Categorie 4 die ook met dit type objecten al bewezen zijn in Nederland.

Bij de overige technologie-object categorieën staat een oranje bolletje met een vraagtekentje. Dat betekent dat deze technologie-object categorieën potentieel hebben, maar om zeker te zijn of ze efficiënt toegepast kunnen worden en dan ook daadwerkelijk tot CO₂-reductie leiden het volgende in kaart gebracht moeten worden:

- Het CO₂-reductiepotentieel per eenheid beton en de mate waarin deze technologie ook voor andere typen objecten geschikt is (om een indicatie van het reductiepotentieel op Nederlandse schaal te krijgen).
- De mate waarin het beton de gewenste performance kan waarmaken als er afgeweken wordt van de reguliere invulling van de normen voor beton en wapening. Hiervoor zijn richtlijnen voor functionele prestatiespecificaties geïnventariseerd.

Wij adviseren Rijkswaterstaat om zich te richten op de object-technologie combinaties die in Figuur 4 aangeduid zijn met een oranje vraagteken. Dit rapport richt zich op het verminderen van broeikasgasemissies bij de productie van nieuw beton. We adviseren

daarom Rijkswaterstaat om te onderzoeken welke maatregelen bij betononderhoud kunnen leiden tot het verminderen van broeikasgasemissies in het onderhoud van bestaand beton en door levensduurverlenging van bestaand beton.



7 Referenties

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.

Fennis-Huijben, S., 2011. *Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization, doctoral thesis*. Delft: Technische Universiteit Delft.

Hunger, M., 2010. *An integral design concept for ecological Self-Compacting Concrete, Ph.D. Thesis*. Bouwstenen 146, NUR 955 red. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.