

› NPOV

RUIM BAAN VOOR DUURZAMER BETON

RESOURCE BASED ENGINEERING MAAKT
DUURZAMERE BETONCONSTRUCTIES
MOGELIJK DIE VEILIG EN BETAALBAAR ZIJN

TNO innovation
for life

› **Auteurs:**
Siska Valcke
Wouter Moorlag
Marianne Aalbersberg

› Mei 2022

› ZIE JE HET VOOR JE...

... dat je al vroeg in het ontwerpproces inzicht hebt in optimale scenario's voor milieu-impact, constructieve veiligheid én kosten?

... dat je gebruikte betonelementen als uitgangspunt neemt voor je ontwerpoptimalisatie?

... dat je gezamenlijk transparante afwegingen maakt tussen ontwerp mogelijkheden en daar later in het proces naar terug kunt verwijzen?

In dit paper laten we zien hoe dat kan als je informatie over lokaal beschikbare, meer milieuvriendelijke grondstoffen centraal zet in het ontwerpproces: *resource based engineering*. Het doel van dit paper is om te laten zien dat er een nieuwe aanpak voorhanden is voor een duurzamere betonsector, een samenspel tussen data, materiaalmodellen en optimalisatie-software. We noemen dat samenspel Materiaalgedreven Multi-criteria Ontwerpoptimalisatie, MIMO.

De MIMO-aanpak kan initiatieven gaan ondersteunen die nu al door de sector worden ontwikkeld, zoals hergebruik van beton, nieuwe betonsoorten met minder cement, slanker construeren en demontabel bouwen.

De basis is gelegd en van hieruit kunnen we met de sector samen aan de slag om de transitie te maken naar grootschalige *resource based engineering*. Zo geven we ruim baan aan duurzamer beton.

› INHOUD

Samenvatting	4
Inleiding	8
1 Duurzamer beton: constructief ontwerp nog complexer	10
1.1 Van vaste naar veranderlijke materiaalstromen	10
1.2 Nieuwe ontwerp vragen niet altijd op te lossen met standaard rekenregels	12
1.3 Complexiteit prestatiecriteria leidt tot suboptimaal ontwerp	15
1.4 Nieuwe benadering nodig voor ontwerpen met duurzamer beton	16
2 Resource based engineering maakt werken met veranderlijke materiaalstromen mogelijk	17
2.1 Materiaaleigenschappen centraal in nieuwe aanpak	17
2.2 Optimale ontwerp oplossingen: duurzamer, constructief veilig en betaalbaar	26
2.3 MIMO faciliteert samenwerking in de keten	28
3 Resource based engineering met MIMO brengt duurzaamheidsdoelen dichterbij	30
3.1 Besparing primaire grondstoffen door groter toepassingsgebied voor secundaire materialen	30
3.2 Resource based engineering met MIMO leidt tot meer hergebruik en significante CO ₂ -reductie	31
4 Aan de slag met MIMO	36

› SAMENVATTING

DUURZAMER BETON HARD NODIG OM KLIMAAT- EN CIRCULARITEITSDOELEN TE HALEN

Klimaatneutraal, fossielvrij en circulair. Zo ziet de toekomst eruit. Deze ambitie zien we terug in de Nederlandse duurzaamheidsdoelen: 49% reductie van broeikasgassen en 50% minder gebruik van primaire grondstoffen in 2030.¹ En volledig circulair en 95% CO₂-reductie in 2050.

De bouw speelt een belangrijke rol bij het halen van die doelen. De sector neemt circa 50% van het Nederlandse grondstoffenverbruik voor zijn rekening, zo'n 40% van het energieverbruik en ongeveer 35% van de totale Nederlandse CO₂-uitstoot. Daarom is verduurzaming van de bouw zo'n urgent thema. En als je vervolgens kijkt op welke manieren dat kan, dan komt beton snel in beeld. De helft van al het bouw materiaal is beton. Bij sloop van constructies komt dat beton ook weer in grote hoeveelheden vrij: bijna een vijfde van al het Nederlandse afval is beton. Het productieproces is verantwoordelijk voor 3% van de Nederlandse CO₂-uitstoot en legt een groot beslag op steeds schaarser wordende primaire grondstoffen. Niet voor niets zijn er aparte doelen voor CO₂-reductie en hergebruik in de betonsector, onder meer in het Betonakkoord: 100% CO₂-reductie in 2050 (5 miljoen ton) en 100% hoogwaardig hergebruik van het vrijkomende beton in 2030.² De huidige materiaal- en energiecrisis maakt hergebruik en gebruik van lokale grondstoffen nog urgenter.³

VERDUURZAMEN BETON: STEL MATERIAALEIGENSCHAPPEN CENTRAAL BIJ CONSTRUCTIEF ONTWERPEN

TNO beschrijft in dit paper een nieuwe aanpak voor de transitie naar duurzamer beton als ondersteuning van de huidige initiatieven in de sector.⁴ Want het realiseren van de doelen is complex en voortgang niet vanzelfsprekend. De betonsector, die gewend is te werken met standaard grondstoffen en betonmengsels, moet verschillende andere materiaalstromen gaan verwerken. We gaan meer werken met wat er lokaal beschikbaar komt aan zogenaamde secundaire materiaalstromen. Denk aan het benutten van bouw- en sloopafval als granulaten of als elementen in nieuwe betonconstructies. Dit zijn materiaalstromen die in vergelijking tot de standaard materialen een grotere variatie hebben aan materiaaleigenschappen zoals dichtheid of chemische samenstelling.

Het ontwerpproces⁵ wordt zeer complex: aan de ene kant de lokale, duurzame materiaalstromen en aan de andere kant een toenemend aantal eisen rond bijvoorbeeld constructieve veiligheid, milieu en kosten. Nieuwe, nog weinig bekende grondstoffen en betonsoorten leveren onzekerheden en vragen op: hoe ontwerpen we duurzamere constructies die ook veilig en betaalbaar zijn? De standaard ontwerpnormen en rekenregels kunnen niet zonder meer gebruikt worden.⁶ Er is niet altijd een snelle shortcut om dat probleem op te lossen.

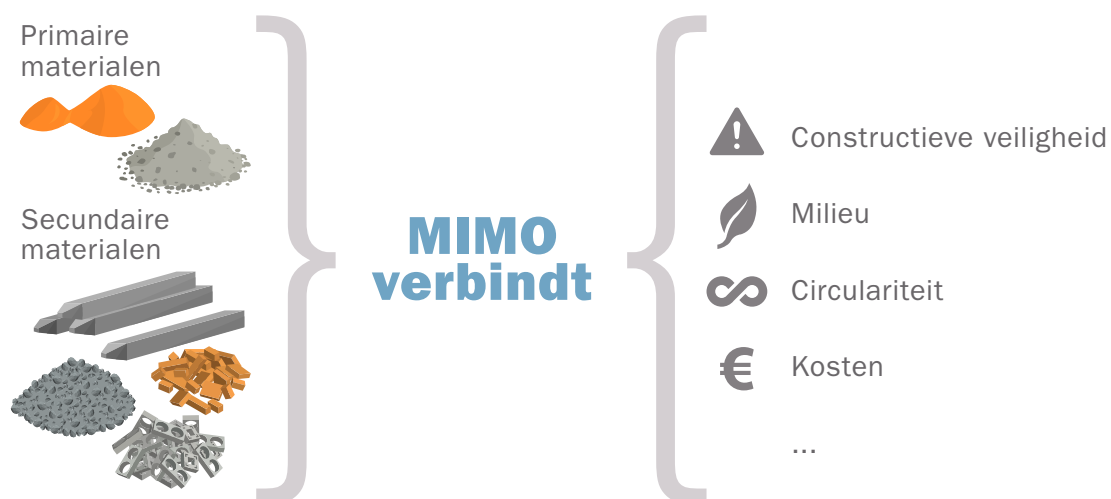
In de nieuwe aanpak stellen we de eigenschappen van de nieuwe materiaalstromen en beton centraal. Daar stemmen we het ontwerp optimaal op af om aan alle eisen te voldoen: *resource based engineering*. Ontwerpen van betonconstructies vindt niet meer plaats op basis van separate modellen voor bijvoorbeeld constructieve veiligheid, milieu-impact en kosten, maar op basis van een koppeling tussen die vakgebieden. Recente technologische ontwikkelingen stellen de betonsector in staat deze stap te zetten. Drie elementen zijn daarbij belangrijk:

- specifieke en meetbare **data** over de eigenschappen van het beschikbare materiaal;
- gevalideerde en goedgekeurde **materiaalmodellen en (constructieve) rekenregels** die samen voorspellen welk effect het gebruikte materiaal heeft op een betonconstructie;
- **slimme optimalisatie-software** om snel duurzame en integrale ontwerp oplossingen te genereren die voldoen aan meerdere eisen en criteria tegelijk: constructief veilig, milieuvriendelijk én betaalbaar.

Dit samenspel tussen data, modellen en optimalisatie-software noemen we Materiaalgedreven Multi-criteria Ontwerptimalisatie, MIMO.

Er komen steeds meer
verschillende materiaalstromen

Er komen steeds
meer prestatiecriteria



Figuur 1: MiMO aanpak

OPTIMAAL GEBRUIK VAN MEER MILIEUVRIENDELIJKE MATERIAALSTROMEN

MIMO maakt het complexe afwegingsproces bij het ontwerpen van constructies weer behapbaar. Het wordt mogelijk om te rekenen voor niet-standaard beton zodra hiervoor geaccepteerde modellen en rekenregels beschikbaar zijn. Dankzij de gekoppelde modellen en de rekenkracht van de software kunnen milieu- en circulariteitsdoelen gelijktijdig worden meegewogen bij de optimalisatie van het ontwerp. Constructief ontwerpers krijgen meerdere geoptimaliseerde oplossingen, met inzicht in het effect van materiaaleigenschappen en data op de prestaties van het ontwerp. Daarmee kunnen zij goed onderbouwde en geobjectiveerde afwegingen maken, samen met opdrachtgevers.

Met *resource based engineering* kunnen meer milieuvriendelijke materiaalstromen optimaal worden ingezet. TNO rekende een voorbeeld door waarbij betongranulaat beschikbaar is om te gebruiken in een betonnen vloer.⁷ Betongranulaat is een zogenaamde secundaire materiaalstroom; de inzet ervan bespaart gebruik van primaire grondstoffen. De optimalisatie met MIMO illustreert dat je meer betongranulaat kunt inzetten als je de specifieke materiaaleigenschappen van de lokale stroom gerecycled materiaal als uitgangspunt neemt, terwijl tegelijkertijd de kosten en veiligheidsniveaus acceptabel zijn.

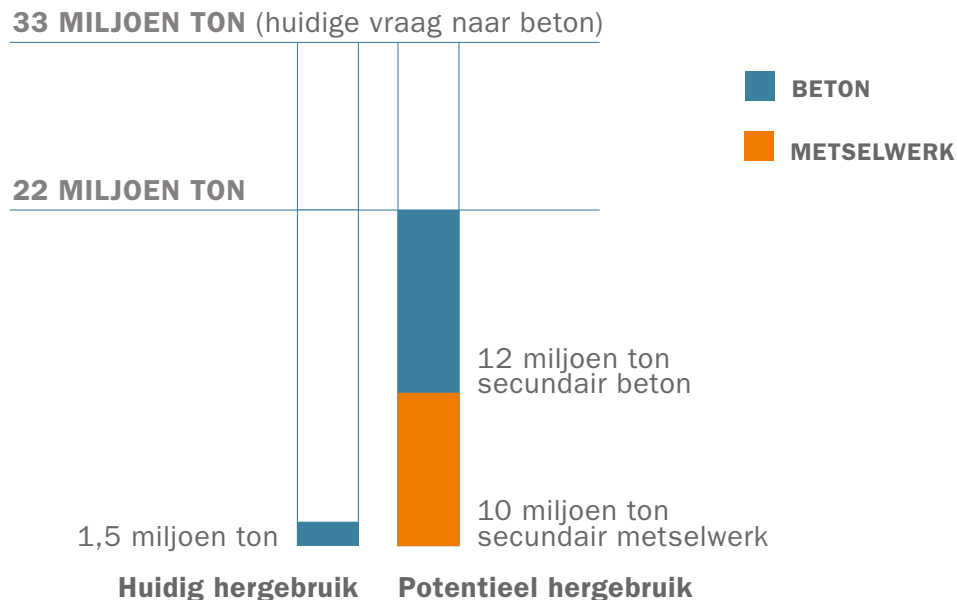
Naast de voordelen in het ontwerpproces voorziet TNO dat de MIMO-aanpak de samenwerking tussen alle spelers in de betonsector kan bevorderen. Constructeurs kunnen data over beschikbare materialen nadrukkelijker verwerken in het ontwerp-proces. Daarmee kunnen ze een spilfunctie vervullen in het matchen van vraag en aanbod. Opdrachtgevers krijgen al in een vroeg stadium ontwerpvoorstellen die meetbaar voldoen aan de verschillende eisen en die ze transparant met elkaar kunnen vergelijken. Aannemers, sloopbedrijven en recyclers krijgen sneller inzicht in de kosten én baten van slim demonteren, recyclen en de opslag van materialen.

MEER HERGEBRUIK EN AANZIENLIJKE POTENTIE VOOR CO₂-REDUCTIE

Wat levert dit allemaal op? De MIMO-aanpak kan initiatieven ondersteunen die nu al door de sector worden ontwikkeld, zoals nieuwe betonsoorten met minder cement, slanker construeren en demontabel bouwen. Het wordt mogelijk om verschillende circulaire strategieën en verduurzamingsopties tegen elkaar af te wegen en optimaal te combineren.

Met de MIMO-aanpak komen ook meer materiaalstromen in aanmerking voor hergebruik, ook in constructieve toepassingen. In dit paper kijken we specifiek naar hoge percentages betongranulaten, complete betonelementen en de fijnste fracties uit metselwerk. Deze materiaalstromen worden nu nog weinig hergebruikt in constructies vanwege onzekerheden op het vlak van constructieve veiligheid. Ook is meestal niet bekend of de baten van hergebruik zullen opwegen tegen de kosten van demonteren of recyclen. TNO-berekeningen laten zien hoe MIMO kan ondersteunen door data van deze materiaalstromen te gebruiken om het ontwerp te optimaliseren voor eisen op het vlak van constructieve veiligheid, milieu-impact én kosten.⁸

Grootschaliger inzet van secundaire materiaalstromen voor nieuwe betontoepassingen zal helpen om de klimaat- en circulariteitsdoelen dichterbij te brengen, want het gaat over veel materiaal. Secundair beton en metselwerk vormen nu samen een derde van het jaarlijkse Nederlandse afval.⁹ Als we dit volledig kunnen inzetten zou dit in potentie leiden tot minstens tien keer zoveel hergebruik in beton als nu en minstens 50% minder gebruik van primaire grondstoffen in beton. Hergebruik van betonelementen en metselwerkpoeders levert bovendien aanzienlijke CO₂-reductie op omdat het cementgebruik uitspaart. Volledig gebruik van deze twee materiaalstromen bespaart naar schatting 0,75 tot wel 1,25 miljoen ton CO₂ per jaar. Dat is een derde van de doelstelling van het Betonakkoord in 2030.¹⁰



Figuur 2: Potentie hergebruik materialen

AAN DE SLAG MET MIMO

Resource based engineering met de MIMO-aanpak wordt op dit moment al op kleine schaal ontwikkeld en getoetst. Een eerste generatie optimalisatie-software is beschikbaar en er zijn al flink wat materiaalmodellen die gekoppeld kunnen worden. MIMO kan stap voor stap breder worden ingezet. MIMO is zo opgezet dat nieuwe ontwerpvariabelen, eisen, data en modellen kunnen worden toegevoegd en gekoppeld. Als we vol inzetten op het verder ontwikkelen en valideren van materiaalmodellen en de inbedding daarvan in rekenregels en regelgeving opent dat de weg voor impactvolle verduurzamingsopties. De ontwikkeling van tools en dashboards zal gebruik van MIMO steeds gebruiksvriendelijker maken.

MIMO levert de meeste waarde als de samenwerking in de betonsector gaat groeien: bedrijven, overheden en kennisinstellingen. Dan kan de MIMO-aanpak een *enabler* zijn in de ketenbrede transitie naar duurzamer beton. Er kunnen nieuwe businessmodellen ontstaan en partijen kunnen gezamenlijke afwegingen maken over het toepassen van de meest impactvolle verduurzamingsopties.

De basis is gelegd en van hieruit kunnen we samen met de sector aan de slag om de transitie te maken naar grootschalige *resource based engineering*. Zo geven we ruim baan aan duurzamer beton.

- 1 Primaire grondstoffen: grondstoffen die voor een productieproces voor het eerst worden gewonnen (ontgonnen) en in gebruik worden genomen. Een secundaire grondstof is een (grond-)stof die is herwonnen uit eerder toegepaste grondstoffen en/of een (grond) stof die door een behandeling of proces als grondstof kan worden gebruikt na te zijn beschouwd als afvalstof (bron: [Betonlexicon](#)).
- 2 Doelen Betonakkoord: in 2030 een vermindering van de CO₂-uitstoot in de betonketen met minimaal 30% ten opzichte van 1990, en een inspanning om 49% reductie te behalen in 2030 (2,5 miljoen ton CO₂); 100% CO₂-reductie (5 miljoen ton CO₂) in 2050; 100% hoogwaardig hergebruik van het vrijkomende beton (grondstoffen, elementen, componenten).
Bron: Betonakkoord en de Road Map CO₂ (Uitvoeringsteam Road Map CO₂-reductie, 20 januari 2021)
- 3 Zie bijvoorbeeld Betonfabrikanten verder onder druk door sterk stijgende prijzen, Betonhuis, 23 maart 2022 en Bouwmaterialen steeds duurder: 'Ik durf geen prijs meer af te spreken', NOS, 26 maart 2022.
- 4 Zie bijvoorbeeld het commentaar van de hoofdredactie van Cobouw van 16 maart 2022 en Duurzaam beton vanaf 2023 verplicht in aanbestedingen, Cobouw, 14 maart 2022.
- 5 In dit paper spreken we veel over 'ontwerp'. We hebben de beschreven aanpak vooral uitgewerkt voor constructief ontwerp. Maar je zou de aanpak ook kunnen gebruiken voor ontwerpoptimalisatie op meerdere criteria waar constructieve veiligheid wat minder op de voorgrond staat.
- 6 Lehne, J. & Preston, F. 2018. Making Concrete Change. Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. Chatham House Report. 138p; en referenties daarin.
- 7 Het uitgewerkte voorbeeld staat in tekstkader 6.
- 8 Uitgewerkte voorbeelden staan in tekstkader 6 en 8.
- 9 Nederland produceert jaarlijks bijna 70 miljard kg afval (bron: CBS). Het jaarlijkse bouw- en sloopafval beslaat 25 miljard kg (Bouw- en sloopafval: vrijkomen en verwerking, 1985-2018, Compendium voor de Leefomgeving (clo.nl)). Samen is dat 35 miljard kg afval. Jaarlijks komt 22 miljard kg beton en metselwerk vrij (Betonakkoord, BRBS).
- 10 Betonakkoord en de Road Map CO₂ (Uitvoeringsteam Road Map CO₂-reductie, 20 januari 2021).

INLEIDING

DUURZAMER BETON NODIG VOOR KLIMAAT EN CIRCULARITEIT

“We maken Nederland klaar voor de toekomst – klimaatneutraal, fossielvrij en circulair – met een schone energievoorziening en groene industriepolitiek.”

Het regeerakkoord van kabinet Rutte IV is duidelijk over de ambitie.¹¹ Het kabinet stelt zich ten doel om bij de kopgroep in Europa te behoren in de transitie naar een groene economie. Nederland heeft dan ook verschillende doelen op het gebied van duurzaamheid (zie tekstkader 1 voor de doelen rond klimaat en circulariteit).

De bouw speelt een belangrijke rol bij het bereiken van deze doelen. De sector neemt circa 50% van het Nederlandse grondstoffenverbruik voor zijn rekening, zo'n 40% van het energieverbruik en ongeveer 35% van de totale Nederlandse CO₂-uitstoot. Verduurzaming van de bouw is dus een urgent thema. Als we vervolgens kijken op welke manieren dat kan, dan komt beton snel in beeld. Dat komt vooral door de enorme volumes. De helft van het gebruikte bouw materiaal is beton.¹² De productie ervan legt een groot beslag op schaarser wordende primaire grondstoffen die van steeds verder weg moeten komen. Bovendien is het productieproces van met name het onderdeel cement zeer belastend voor het milieu. De productie van beton leidt tot zo'n 4 miljoen ton CO₂-uitstoot per jaar: één enkel materiaal is verantwoordelijk voor 3% van de totale Nederlandse CO₂-uitstoot.¹³

Een conclusie hieruit kan zijn dat de bouw 'gewoon' over moet schakelen op andere bouwmaterialen. Maar alleen al vanwege de enorme volumes en bewezen lange termijn veiligheid in constructies is het niet realistisch om op korte termijn te stoppen met beton en alleen nog te bouwen met andere materialen. Bovendien vraagt de transitie naar een circulaire economie een verschuiving van primaire naar secundaire grondstoffen.¹⁴ Juist beton is een materiaal dat in principe goed te hergebruiken is in nieuwe constructies. Jaarlijks komt 12 miljoen ton beton vrij door sloop van constructies:¹⁵ dat is 20% van al het Nederlandse afval.¹⁶ Slechts 5% van het beton en metselwerk dat vrijkomt bij de sloop van constructies wordt momenteel hergebruikt in nieuwe betontoepassingen.¹⁵ De rest wordt onder andere gebruikt als wegfundering.

Het is dus zeer urgent de betonsector te verduurzamen om de klimaat- en circulariteitsdoelen te halen. Zeker de korte termijn doelen komen in het gedrang, terwijl deze juist zo belangrijk zijn om de verdere opwarming van de aarde tegen te gaan. Deze urgentie zien we terug in milieudoelen voor CO₂-reductie en hergebruik van beton, onder meer in het Betonakkoord (zie tekstkader 1). De huidige materiaal- en energiecrisis maakt hergebruik en gebruik van lokale grondstoffen nog urgenter. Prijzen van energie, cement en bewapeningsstaal schieten de lucht in en een tekort aan grondstoffen dreigt.¹⁷

11 Regeerakkoord 'Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst'.

12 Oorschot, J. van, Voet, E. van der, Straalen, V. van, Tunn, V., Delahaye, R. 2020. Voorraden in de maatschappij: de grondstoffenbasis voor een circulaire economie. CBS/CML Rapport. 80p.

13 Betonakkoord en de Road Map CO₂ (Uitvoeringsteam Road Map CO₂-reductie, 20 januari 2021).

14 Voor een definitie zie tekstkader 2.

15 Zie de Road Map Hergebruik betonreststromen van het Betonakkoord.

16 Transitieagenda circulaire bouweconomie, 2018.

17 Zie bijvoorbeeld 'Betonfabrikanten verder onder druk door sterk stijgende prijzen', Betonhuis, 23 maart 2022 en 'Bouwmaterialen steeds duurder: 'Ik durf geen prijs meer af te spreken', NOS, 26 maart 2022.

Maar het verduurzamen van beton is complex. We zien verduurzamingsoplossingen ontstaan in de betonsector,¹⁸ maar die zijn momenteel nog gefragmenteerd en suboptimaal. En voortgang in het bereiken van de milieudoelen is nog beperkt.¹⁹ Om de klimaat- en circulariteitsdoelen te halen is een versnelling nodig in de transitie van traditioneel beton naar duurzamer beton, ook in veeleisende constructies. In dit paper stelt TNO een aanpak voor waarmee dat kan: *resource based engineering*. Daarmee willen we de fundamentele knelpunten wegnemen die de toepassing van duurzamer beton momenteel belemmeren.

In dit paper gaan we in hoofdstuk 1 eerst in op die fundamentele knelpunten. Cruciaal is hier de steeds grotere variatie in (secundaire) materialen die worden gebruikt voor betonconstructies en het toenemend aantal eisen. Vervolgens introduceren we in hoofdstuk 2 onze visie: de sector kan op een flexibelere manier gaan ontwerpen door materiaaleigenschappen centraal te stellen. Data, materiaalmodellen en slimme optimalisatie-software leiden naar optimale ontwerp oplossingen: duurzamer, constructief veilig en betaalbaar. Hoofdstuk 3 gaat over de impact hiervan. Klimaat- en circulariteitsdoelen komen dichterbij omdat secundaire materiaalstromen een breder toepassingsgebied krijgen en omdat secundaire betonelementen en metselwerk meer kans krijgen voor hergebruik. Dat levert aanzienlijke CO₂-reductie op. In hoofdstuk 4 schetsen we hoe de sector aan de slag kan met de nieuwe aanpak om ruim baan te geven aan duurzamer beton.

TEKSTKADER 1

KLIMAAT- EN CIRCULARITEITSDOELEN

Algemene doelen overheid:

- 55% reductie van broeikasgassen in 2030 en 95% reductie in 2050²⁰
- een volledig circulaire economie in 2050 met als tussendoel 50% minder gebruik van primaire grondstoffen in 2030²¹
- uiterlijk in 2030 volledig klimaatneutrale en circulaire infrastructuurprojecten, en in 2030 aanleg, beheer en onderhoud van infrastructuur objecten met 50% minder primaire grondstoffen²²

Doelen Betonakkoord:²³

- in 2030 een vermindering van de CO₂-uitstoot in de betonketen met minimaal 30% ten opzichte van 1990, en een inspanning om 49% reductie te behalen in 2030 (2,5 miljoen ton CO₂)
- 100% CO₂-reductie (5 miljoen ton CO₂) in 2050
- 100% hoogwaardig hergebruik van het vrijkomende beton (grondstoffen, elementen, componenten) in 2030

18 Zie bijvoorbeeld het commentaar van de hoofdredactie van Cobouw van 16 maart 2022 en 'Duurzaam beton vanaf 2023 verplicht in aanbestedingen', Cobouw, 14 maart 2022.

19 Zie bijvoorbeeld de Road Map CO₂-reductie (20 januari 2021) van het Betonakkoord. Het behalen van de CO₂-reductiedoelen is sterk afhankelijk van het opschalen en combineren van verschillende verduurzamingsopties.

20 Klimaatakkoord, 2019, Regeerakkoord 2022.

21 Rijksbreed Programma Circulaire Economie: Nederland Circulair in 2050.

22 Klimaatneutraal en Circulair - Rijkswaterstaat innoveert (rwsinnoveert.nl).

23 Betonakkoord en de Road Map CO₂ (Uitvoeringsteam Road Map CO₂-reductie, 20 januari 2021).

1. DUURZAMER BETON: CONSTRUCTIEF ONTWERP NOG COMPLEXER

- De betonsector is een complex systeem waarin veel spelers samenwerken. Normen en standaardregels zorgen al decennia voor een werkbaar ontwerpproces van betonconstructies.
- Bij het verduurzamen van beton staat gebruik van meer verschillende, veelal secundaire materialen centraal. Dat werpt nieuwe ontwerp vragen op die niet altijd op te lossen zijn met de standaard ontwerpregels.
- Verder worden berekeningen door het toenemend aantal eisen zo complex dat het tot suboptimale ontwerpkeuzes leidt.
- Er is een nieuwe, flexibelere aanpak nodig om in het complexe systeem van de betonsector daadwerkelijk duurzaam en integraal te ontwerpen.

1.1 VAN STABIELE NAAR VERANDERLIJKE MATERIAALSTROMEN

Beton wordt gevormd door uitharding van een nat mengsel van grove en fijne toeslagmaterialen en een bindmiddel. Traditionele grondstoffen voor beton zijn in Nederland grind, zand en cement. Cement kan nog een deel secundaire stromen bevatten zoals hoogovenslak en vliegas. Producenten werken tot nu toe met grondstoffen waarvan de eigenschappen binnen een bekende en nauwe bandbreedte liggen.

In de transitie naar duurzamer beton staat hergebruik van bestaande en gebruik van nieuwe, alternatieve materialen centraal. In de toekomst zal gewerkt worden met een groter aantal verschillende lokaal beschikbare, secundaire grondstoffen, onder meer afkomstig van recyclingbedrijven. We zien – bijvoorbeeld bij de uitvoering van het Betonakkoord – dat spelers in de betonketen een groeiend aantal (secundaire) materialen overwegen als grondstof voor beton.²⁴ Een belangrijke mogelijkheid is de ontwikkeling van duurzamere bindmiddelen, zoals geopolymeren, als alternatief voor cement. Een andere verduurzamingsstrategie is het beter benutten van de secundaire grondstoffen die vrijkomen bij sloop van constructies en alleen primaire grondstoffen te gebruiken als het echt niet anders kan.²⁵

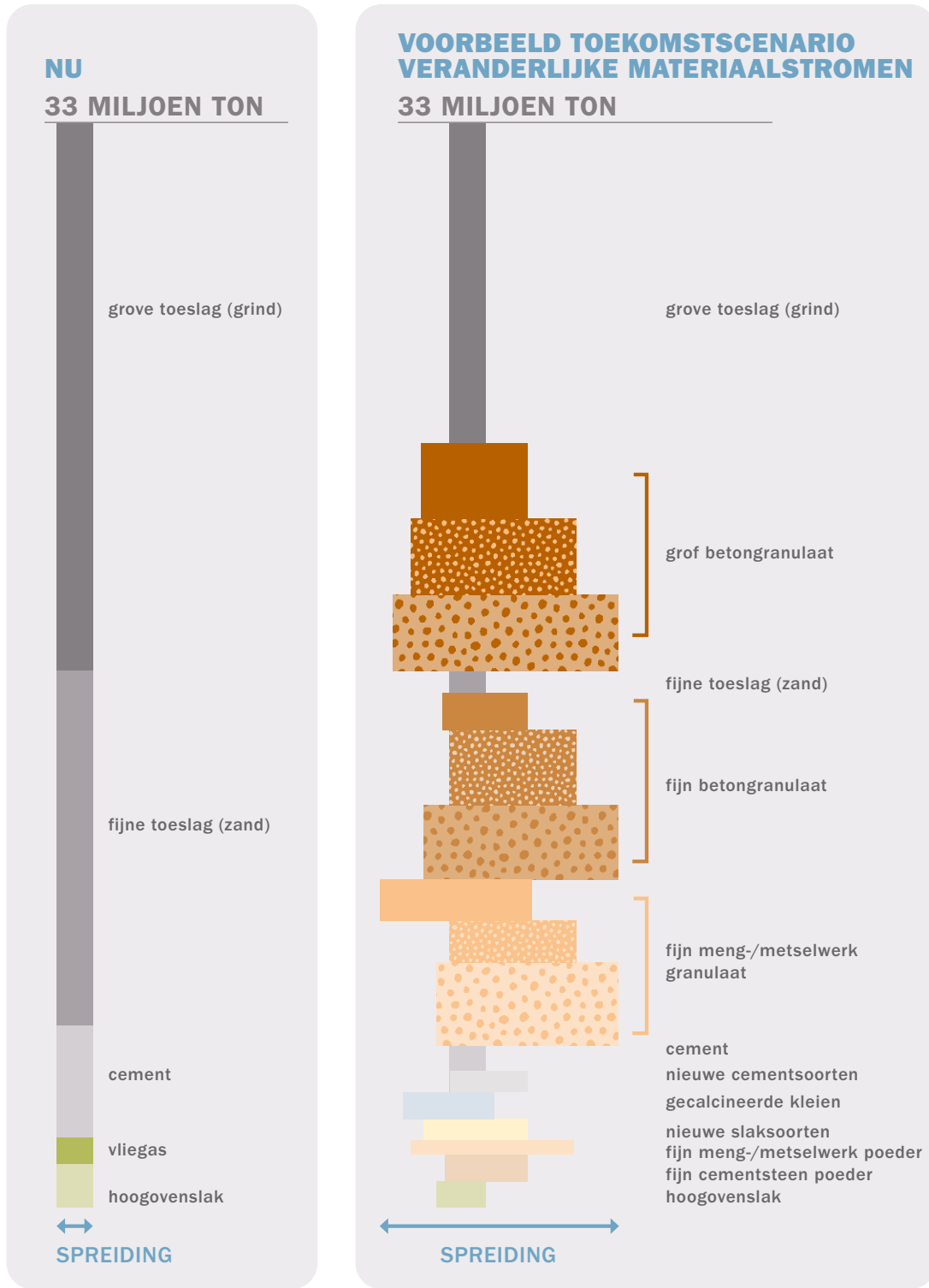
In vergelijking met de grondstoffen voor ‘standaard beton’²⁶ kennen deze nieuwe materiaalstromen een grotere variatie in materiaaleigenschappen zoals dichtheid, korrelgrootte of chemische samenstelling. Deze variatie heeft bijvoorbeeld te maken met verschillende bronnen van het moedermateriaal, de manier van verwerken en verschillen in belasting tijdens de gebruiksfase.²⁷ Figuur 3 geeft een impressie hoe dit eruit kan zien. In de loop van de tijd zullen er wisselingen zijn in wat er lokaal beschikbaar is aan secundair materiaal. We spreken daarom over ‘veranderlijke materiaalstromen’.

²⁴ Zie bijvoorbeeld de Road Map CO₂-reductie van het Betonakkoord.

²⁵ Een andere verduurzamingsstrategie is het ontwikkelen van productieprocessen die minder energie vragen; deze strategie is minder materiaal georiënteerd en valt buiten de scope van dit stuk.

²⁶ Voor een definitie zie tekstkader 2.

²⁷ Binnen één secundaire materiaalstroom kunnen variaties optreden, zelfs als het materiaal op dezelfde manier is verwerkt of geproduceerd. Dat heeft in het geval van hergebruik te maken met verschillende bronnen van het oorspronkelijke materiaal dat gemaakt kan zijn uit verschillende grondstoffen. In het geval van hergebruik van beton en metselwerk kunnen er ook variaties ontstaan tijdens de gebruiksfase door verschillende belasting en contaminaties. Denk aan beton waar chlorides ingedrongen zijn of metselwerk dat zouten bevat. Wat verder nog meespeelt is dat een secundaire materiaalstroom op verschillende manieren en in verschillende hoedanigheden kan worden verwerkt en hergebruikt. Sloop- en recyclingtechnieken worden steeds geavanceerder: elementen slim demonteren, beton van metselwerk scheiden (bijvoorbeeld op kleur), grove fracties en toeslagkorrels scheiden van de fijne fracties en cementsteen.



Figuur 3: Schets ter illustratie van grondstoffenstromen nu en in de toekomst. Hoe breder de kolom, hoe groter de spreiding in materiaaleigenschappen. Hoe hoger het kolom-deel, hoe groter het (verwachte) volume van de stroom. De grijze onderdelen zijn primaire grondstoffen, de gekleurde onderdelen zijn mogelijke secundaire grondstoffen. Getrapte kolomdelen illustreren dat binnen bepaalde soorten materiaalstromen verschillende segmenten te verwachten zijn met meer of minder spreiding in materiaaleigenschappen. De relatieve verhoudingen van hoeveelheden zijn gebaseerd op eigen inschattingen van verschillende verduurzamingsstrategieën, waarvan de meeste zijn beschreven als Handlingsperspectieven in de Road Map CO₂-reductie van het Betonakkoord. Daaraan toegevoegd is het hergebruik van metselwerk in de fijne fracties. Dit materiaal is momenteel niet in beeld als verduurzamingsstrategie, maar in hoofdstuk 3 laten we zien hoe dit mogelijk wordt als informatie over materiaaleigenschappen centraal komt te staan bij de ontwerptimalisatie. Het hergebruik van hele betonelementen (zonder breken en malen) is in deze illustratie niet opgenomen. Deze impactvolle verduurzamingsstrategie komt wel aan de orde in hoofdstuk 3.

TEKSTKADER 2

GEBRUIKTE TERMEN

Met *verduurzamen* bedoelen we het optimaliseren van meerdere maatschappelijke doelen tegelijk, zoals in het Engels ‘*sustainability*’ veelal verwijst naar *People, Planet, Profit*. Zie ook de *Sustainable Development Goals* van de VN.²⁸ In dit paper leggen we de nadruk op drie belangrijke doelstellingen: constructieve veiligheid, milieu en kosten. Zoals we in paragraaf 1.3 uiteenzetten gelden bij het constructief ontwerp verschillende prestatiecriteria voor elk van die doelen. Denk bij *milieudoelstellingen* bijvoorbeeld aan CO₂-reductie en circulariteit.

Met *onzekerheden* bedoelen we in deze context de situatie waarbij onvoldoende of ontoereikende informatie aanwezig is over eigenschappen of gedrag van beton en constructies.

Materiaaleigenschap is een intrinsieke eigenschap van het materiaal die al dan niet gemeten of voorspeld kan worden, zoals dichtheid.

Met *spreiding* bedoelen we dat de materiaaleigenschappen zoals dichtheid variëren binnen een bepaalde bandbreedte. Deze spreiding kan bekend of onbekend zijn.

Met *gedrag* van materialen duiden we op de manier waarop een materiaal zich gedraagt onder een of meer belastingen, bijvoorbeeld druk of vocht.

Primaire grondstoffen zijn grondstoffen die voor het eerst gewonnen (ontgonnen) en in gebruik genomen zijn.

Secundaire grondstoffen zijn (grond-)stoffen die herwonnen zijn uit eerder toegepaste grondstoffen dan wel (grond)stoffen die door een behandeling of proces als grondstof zijn te gebruiken na te zijn beschouwd als afvalstof.

Standaard beton: beton waarvan de samenstelling beschreven is in standaarden en normen en bestaat uit gekende, grotendeels primaire grondstoffen.

1.2 NIEUWE ONTWERPVRAGEN NIET ALTIJD OP TE LOSSEN MET STANDAARD REKENREGELS

Bij het gebruik van traditionele grondstoffen met bekende eigenschappen zijn ook de eigenschappen van standaard beton, zoals sterkte en dichtheid, grotendeels te voorspellen, ook onder langdurige belasting in constructies. Door de jarenlange ervaring met beton kan de betonsector een aantal rekenregels met materiaal-factoren hanteren om de constructie te kunnen toetsen op constructieve veiligheid. Ook kan het gedrag in constructies voorspeld worden onder verschillende (langdurige) belastingen, bijvoorbeeld doorbuiging of chemische aantasting door indringing van stoffen zoals sulfaten of CO₂.

²⁸ Zie www.sdgnederland.nl

Standaard ontwerpregels op basis van standaard beton vormen een vitaal onderdeel van de werkwijze in de betonsector. Ze helpen bij het beantwoorden van ontwerpvragestukken en bieden zekerheid en vertrouwen door jarenlange ervaring met de prestatie van materialen in constructies in de praktijk.

Veranderlijke materiaalstromen plaatsen spelers in de betonsector voor nieuwe ontwerp vragen.²⁹ Welk duurzaam materiaal is lokaal beschikbaar en wat zijn de eigenschappen? Hoeveel van dat materiaal kan ik toevoegen om de constructie duurzamer te maken maar ook constructief veilig en betaalbaar? Hoe kan ik een ontwerp, gezien de lokale context, het best verduurzamen en welke optie heeft het meeste impact? Beton op basis van secundaire grondstoffen kan echter andere eigenschappen hebben dan standaard beton, met een andere spreiding. Ook de relaties tussen verschillende materiaaleigenschappen kunnen anders zijn. Deze veranderingen kunnen niet altijd worden meegenomen in standaard ontwerpregels; deze zijn dan niet langer bruikbaar.

Dit is bekend in de sector en we zien een tendens om nieuwe betonsoorten te beoordelen op basis van eigenschappen en het eisen van prestaties in toepassingen in plaats van het eisen van een specifiek gevolgde receptuur. Ook worden commissies opgericht die kijken naar mogelijke ontwerproutes en aanpassingen van rekenregels voor bijvoorbeeld hergebruik van betonelementen.³⁰ Als – door testen of door modellen – de eigenschappen van het (her) te gebruiken beton bekend zijn, is het van belang te analyseren hoe deze eigenschappen zich verhouden tot die van standaard beton. Afhankelijk daarvan zien we drie mogelijke ‘ontwerproutes’ voor een constructie om te voldoen aan de in wet- en regelgeving vastgelegde kaders voor constructieve veiligheid (zie tekstkader 3).

Route I en II zijn op het eerste gezicht de snelste weg richting duurzamer beton mits er consensus is over de ‘gelijkwaardigheid’. De sector zet ook al handvatten op voor deze routes.³¹ Er zijn echter veelbelovende verduurzamingsstrategieën waarbij er nog onvoldoende gegevens zijn om te besluiten welke ontwerproute kan gevolgd worden, of waarbij de eigenschappen dusdanig afwijken dat route III de enige weg is. Voor route III zijn momenteel nog weinig handvatten beschikbaar. Bij gebruik van deze route zal consensus moeten worden bereikt om de rekenregels aan te kunnen passen al dan niet op basis van aanvullend onderzoek. Route III is niet de snelste weg, maar moet reeds nu veel nadrukkelijker beschouwd worden omdat deze ruimte biedt aan (combinaties van) verduurzamingsopties die veel impact hebben maar waarvoor ontwerproutes via (gedeeltelijke) gelijkwaardigheid niet geschikt zijn.

29 In dit paper spreken we veel over ‘ontwerp’. We hebben de beschreven aanpak vooral uitgewerkt voor constructief ontwerp. Maar je zou de aanpak ook kunnen gebruiken voor ontwerpoptimalisatie op meerdere criteria waarbij constructieve veiligheid wat minder op de voorgrond staat.

30 Bijvoorbeeld NEN-commissie 342086 Hergebruik constructieve elementen.

31 Bijvoorbeeld RTD 1034 Leidraad voor de beoordeling van nieuwe betonmengsels, Rijkswaterstaat Technisch Document, 2021, Versie 1.0.

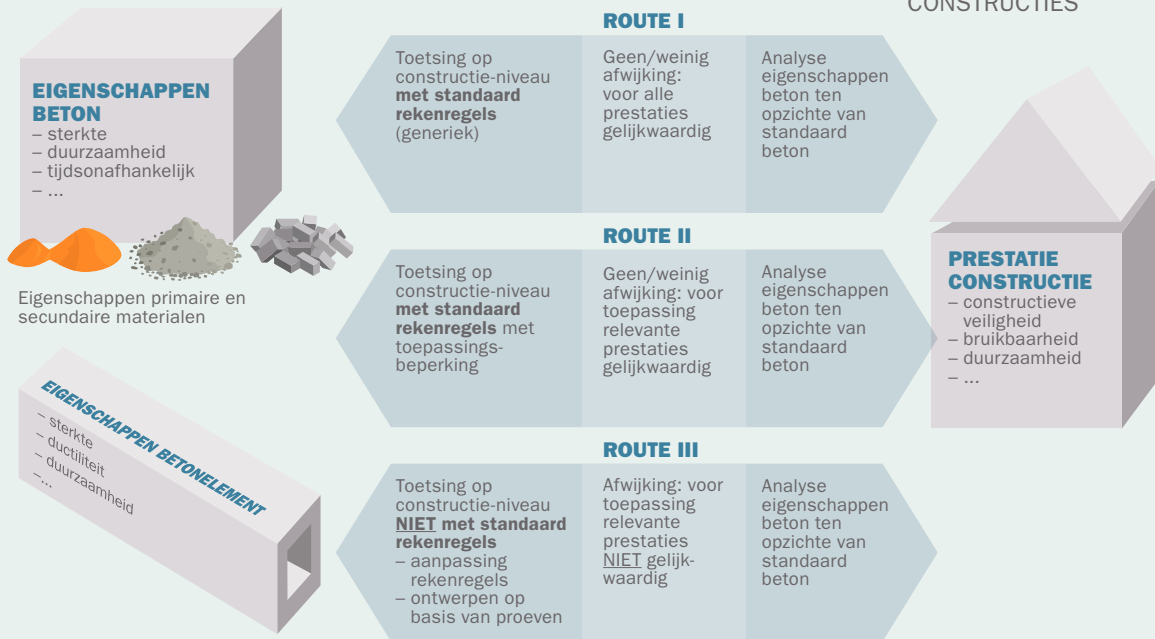
TEKSTKADER 3

DRIE ONTWERPROUTES

KENNIS EN ERVARING BETON

WORDT VERBONDEN MET

KENNIS EN ERVARING CONSTRUCTIES



Figuur 4: Drie Ontwerproutes

Bij eigenschappen die niet of weinig afwijken van standaard beton kan de zogenaamde gelijkwaardigheidsroute gevolgd worden: ontwerpen op constructie-niveau met standaard rekenregels (route I). Er zijn ook situaties denkbaar waarbij de eigenschappen niet afwijken van standaardbeton, maar waarbij dit enkel (bekend) is voor bepaalde specifieke toepassingsrelevante prestaties. Dan kan ook de gelijkwaardigheidsroute gevolgd worden met toepassing van standaard rekenregels, maar dan met beperkingen ten aanzien van het gebruik of het toepassingsgebied (route II).³² Als eigenschappen afwijken van standaard beton of nog onbekend zijn kan de toetsing van prestaties op constructieniveau niet worden gedaan met standaard rekenregels. Hier is verruiming of aanpassing van rekenregels nodig door onderzoek en consensusvorming (route III).

32 Voor hergebruik van sommige soorten betongranulaat gelden bijvoorbeeld maximale percentages of beperkingen van toepassingsgebied. Bijvoorbeeld NEN 8005, Eurocode 1, MC2020 en CROW Aanbeveling 127. Deze beperking is niet ontstaan omdat betongranulaat bij voorbaat niet veilig zou kunnen worden toegepast in hogere percentages, maar omdat onzekerheden niet kunnen worden weggenomen of verkleind, zonder kennis en gebruik van data over de daadwerkelijke eigenschappen van het betongranulaat dat voorhanden is. Dit zorgt op dit moment vaak voor nodeloze extra risicomarges, meer materiaalverbruik en daardoor hogere CO₂-uitstoot en hogere kosten.

1.3 COMPLEXITEIT PRESTATIECRITERIA LEIDT TOT SUBOPTIMAAL ONTWERP

Naast de gevolgen van veranderlijke materiaalstromen verdient ook de complexiteit van het ontwerpproces aandacht. Constructieve veiligheid en betaalbaarheid zijn belangrijke prestatiecriteria in het constructief ontwerp. Door maatschappelijke doelen zoals circulariteit en reductie van CO₂-uitstoot neemt het aantal en de complexiteit van de prestatiecriteria toe. Het gebruik van nieuwe materiaalstromen en mengsels maakt het ontwerpproces nóg complexer. Vergeleken met standaard beton zijn er nu tal van extra afwegingen te maken voor het ontwerp, afhankelijk van de beschikbare materialen en de prestatiecriteria.

Idealiter komen de betrokken partijen tot een gezamenlijke en integrale optimalisatie op alle prestatiecriteria; gezamenlijk objectiveren en afwegen. Het maken van ontwerpoptimalisaties voor al die prestatiecriteria vergt echter veel kennis en wordt steeds specialistischer. In elke ontwerpfase werken specialisten als constructeurs en duurzaamheidsspecialisten een optimale oplossing uit. Besluitvorming over het complexe en multi-dimensionele ontwerpvoorbeeld wordt zo in stukjes geknipt. Zo kan het voorkomen dat een duurzame oplossing die in de eerste ontwerpfase werd gekozen in een tweede of derde fase niet constructief veilig of betaalbaar blijkt te zijn, waarna de oorspronkelijke ambities voor de milieu-impact moeten worden bijgesteld.

Daarnaast ontbreekt het vaak nog aan een uitgebalanceerd afweegkader. Zo kunnen criteria voor constructieve veiligheid of CO₂-reductie nog moeilijk integraal worden afgewogen ten aanzien van de stappen in de zogenaamde R-ladder van circulariteit³³ of het Bouwwaarde model.³⁴ In tekstkader 4 staat een voorbeeld waarbij optimaliseren op circulariteit ongewild leidde tot een ontwerp met een hoge uitstoot van CO₂.



³³ Kishna, M., Rood, T., Gerdien Prins, A. 2019. PBL Achtergrondrapport bij Circulaire Economie in Kaart.

³⁴ Uitvoeringsteam Circulair Ontwerpen van het Betonakkoord, 2020, Bouwwaardemodel.

TEKSTKADER 4

OPTIMALISEREN OP CIRCULARITEIT: CIRCULAIR VIADUCT 1.0 EN 2.0

In 2019 werd Circulair Viaduct 1.0 gerealiseerd bij de Reevesluis nabij Kampen. Een revolutionair project met vele uitdagingen. In deze pilot is alleen geoptimaliseerd op circulariteit – en dan met name het deelaspect demonteerbaarheid – en niet op andere prestatiecriteria voor milieubelasting zoals de CO₂-footprint. Dit had te maken met de complexiteit, de kosten, het ontbreken van informatie over uitgangsmaterialen en toepassing, en het leerproces. Om demonteerbaarheid te realiseren was extra voorspanning nodig om de losse elementen te laten samenwerken en er was meer beton nodig door de extra hoogte. Uiteindelijk kwam uit dit leerproces dat de milieu-impact (gerelateerd aan CO₂-emissies) 2,5 keer zo hoog was als bij een traditioneel viaduct.³⁵

Vanuit deze ervaring lanceerde Rijkswaterstaat Circulair Viaduct 2.0, een open leeromgeving die een vervolg kreeg in de vorm van een competitie: een haalbaarheidstraject en uitvoering (2022-2023) door verschillende consortia.³⁶ Hierin wordt meer integraal gekeken naar circulair ontwerpen en milieu-impact. Hierbij hoort de zoektocht naar handvatten om al in de haalbaarheidsfase op verschillende prestatiecriteria af te wegen en varianten objectief met elkaar te vergelijken. De visie die we in dit paper neerleggen kan hierbij behulpzaam zijn.

1.4 NIEUWE BENADERING NODIG VOOR ONTWERPEN MET DUURZAMER BETON

Al met al zien we dat ontwerpen in de betonsector steeds complexer wordt: nieuwe en veranderlijke materiaalstromen, nieuwe vragen en meer integrale afwegingen, meer prestatiecriteria... Het systeem dat decennia lang soepel liep dankzij jarenlange ervaring met standaard beton kraakt in zijn voegen en dat staat verduurzaming in de weg. Er is een nieuwe benadering nodig om in het complexe systeem van de betonsector wél te kunnen ontwerpen met veranderlijke materiaalstromen en een veelheid aan prestatiecriteria. In het volgende hoofdstuk geven we onze visie hoe we deze uitdaging kunnen aanpakken.

³⁵ Een Learning History. Wat leert het eerste circulaire viaduct ons? 2019. Rijkswaterstaat. 92 p.

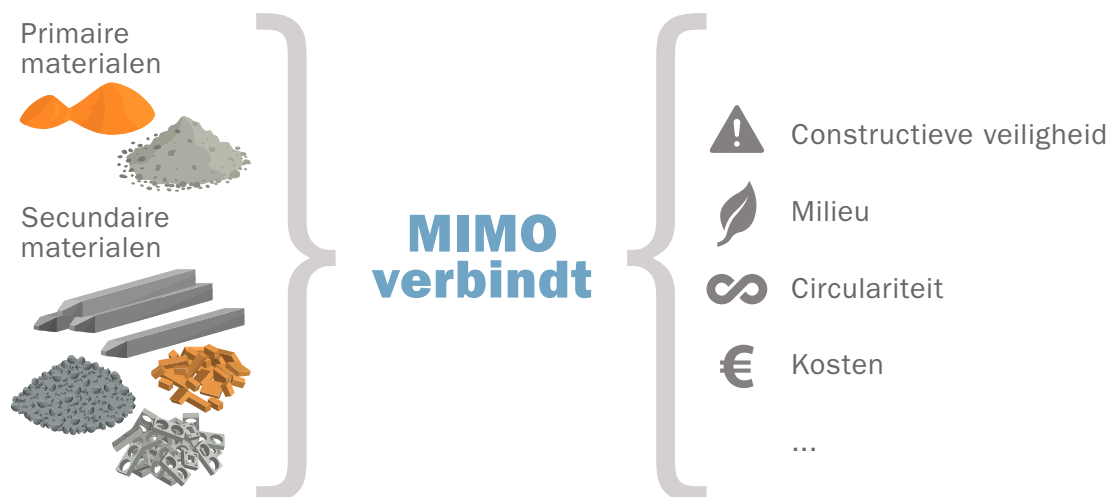
³⁶ Zie ook: <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/duurzame-leefomgeving/circulaire-economie/circulaire-viaducten>.

2. RESOURCE BASED ENGINEERING MAAKT WERKEN MET VERANDER- LIJKE MATERIAALSTROMEN MOGELIJK

- In dit hoofdstuk laten we zien hoe de transitie naar duurzamer beton ondersteund kan worden. Veel meer dan nu nemen we de daadwerkelijke eigenschappen van de veranderlijke materiaalstromen als uitgangspunt, waarbij constructieve veiligheid van meet af aan geborgd is.
- Een samenspel van data, modellen en optimalisatie-software vormt een nieuwe aanpak bij het ontwerpen van duurzamere betonconstructies: Materiaalgedreven Multi-criteria Ontwerptimalisatie (MIMO).
- We koppelen de eigenschappen van lokaal beschikbaar materiaal aan de vele prestatiecriteria die gelden voor de constructie. Een voorbeeld laat zien hoe dat werkt.
- De MIMO-aanpak kan waardevol zijn voor opdrachtgevers, ingenieursbureaus, recyclers, betonproducenten en regelgevende instanties en kan de samenwerking in de betonketen vergemakkelijken.

Er komen steeds meer
verschillende materiaalstromen

Er komen steeds
meer prestatiecriteria



Figuur 5: MiMO aanpak

2.1 MATERIAALEIGENSCHAPPEN CENTRAAL IN NIEUWE MULTI-CRITERIA AANPAK

Er is een nieuwe aanpak nodig voor constructief ontwerpen met duurzamer beton. De kern van de verandering die we voor ons zien is uitgaan van de daadwerkelijke eigenschappen van de lokaal beschikbare materiaalstromen: *resource based engineering*. Met deze nieuwe aanpak kan de sector gaan werken met ontwerproutes die flexibel gebruik maken van data naast de huidige ontwerproutes waarin rekenregels uitgaan van standaard beton. Ontwerpen worden geoptimaliseerd op basis van kennis van de eigenschappen van het beschikbare materiaal in relatie tot de

constructie: een veilige constructie zonder dat het nieuwe beton zich exact zo hoeft te gedragen als standaard beton. En dat voor meerdere prestatiecriteria. Dit wordt mogelijk dankzij een samenspel van data, modellen en software voor ontwerp-optimalisatie. We noemen deze nieuwe aanpak Materiaalgedreven Multi-criteria Ontwerptimalisatie, MIMO.

De MIMO-aanpak ontsluit kennis en stelt de sector in staat om veilige constructies te ontwerpen op basis van veranderlijke materiaalstromen. Hieronder gaan we dieper in op de drie elementen uit de MIMO-aanpak. Ook illustreren we hoe de aanpak werkt aan de hand van eerste voorbeelden.

Data gebruiken: uitgangspunt bij elk ontwerp is meetbare, locatie- en project-specifieke data over (secundaire) materialen voor het beton. Onze zienswijze is dat data over materiaaleigenschappen maximaal moeten worden ontsloten en benut door data te verzamelen, te delen en te koppelen. Denk aan data over het vrijkomen van beton(elementen),³⁷ de restcapaciteit van betonelementen (zoals liggers), de dichtheid van betongranulaten en de chemische samenstelling van ultrafijne beton- of metselwerkpoeders. Dit kan het volgen van ontwerproute III zoals geschetst in hoofdstuk 1 ondersteunen en versnellen. Zo kunnen zekerheden als gemeten materiaaleigenschappen helpen om ‘nauwer’ te ontwerpen en is het niet nodig om risico’s te verkleinen door meer materiaal te gebruiken (overdimensionering).

Modellen verbinden: met de beschikbare data kunnen materiaalmodellen worden gevoed die eigenschappen van beton voorspellen op basis van de eigenschappen van de materialen waaruit het is opgebouwd.³⁸ Denk aan de samenwerking en interactie van eigenschappen van betongranulaat in combinatie met die van andere componenten, zoals het bindmiddel. Ook zijn er modellen, ook wel rekenregels genoemd, die eigenschappen van beton verbinden aan gedrag en ‘weerstand’ in een constructie onder bepaalde belastingen om te komen tot de prestatie van een constructie. Deze geavanceerde modellen kan je bij de ontwerptimalisatie met elkaar verbinden tot een keten van modellen: van materiaaleigenschappen van grondstoffen en beton tot prestatie in een constructie.³⁹ Zo kan je modellen op materiaalniveau die bijvoorbeeld de sterkte of elasticiteit van beton voorspellen, koppelen aan ontwerp-berekeningen op constructieniveau. En tegelijk kan je daar een model aan koppelen dat milieu-impact of circulariteit voorspelt op basis van de gebruikte materialen in de ontwerptimalisatie. Zo kan je tijdens het ontwerp meerdere prestaties in een constructie toetsen en optimaliseren, rechtstreeks gekoppeld aan je materiaaleigenschappen. Voor uiteindelijke opschaling en praktijk-toepassing kan dit alleen met gevalideerde modellen waarover consensus bestaat. Sommige van dergelijke modellen bestaan nu al en zijn onderdeel van normen of pre-normatieve aanbevelingen.⁴⁰ Zulke modellen bestaan niet alleen voor technische eigenschappen,⁴¹ maar ook voor milieuprestatie of circulariteit.⁴²

37 Eerste initiatieven om dit soort gegevens bij te houden, zijn te vinden als de ‘Nationale Bruggenbank’ en ‘Materialenpaspoort’.

38 Tošić, N. & Torrenti, J. “New Eurocode 2 provisions for recycled aggregate concrete and their implications for the design of one-way slabs,” *Gradjevinski Mater. i Konstr.*, vol. 64, no. 2, pp. 119–125, 2021.

39 Niet voor alle relaties is een fundamenteel fysisch-chemisch model beschikbaar. Wel zijn er combinaties mogelijk van numerieke modellen en (gemodelleerde) data van daadwerkelijk getest gedrag in het laboratorium of gemonitorde gedrag in de praktijk.

40 Bijvoorbeeld: CROW-CUR Aanbevelingen geven breed gedragen technische regels ten aanzien van nieuwe materialen en technieken en geven het beste advies over een bepaald onderwerp op het betreffende tijdstip. Door hun actualiteit sluiten zij nauw aan op de praktijk. CROW-CUR Aanbevelingen hebben een pré-normatief karakter en kunnen mede als basis dienen voor het afgeven van kwaliteitsverklaringen of certificaten.

41 CROW-CUR Aanbeveling 127:2021. Beton met betongranulaat als fijn en/of grof toeslagmateriaal. Toelaatbare vervangingspercentages zonder aanpassing van de constructieve rekenregels.

42 Platform CB’23. Leidraad Meten van circulariteit. Werkafspraken voor een circulaire bouw. Versie 2.8 - 16 maart 2022.

In andere gevallen zijn ze nog voldoende gevalideerd en nog niet neergeslagen in regelgeving. En voor een aantal materialen zullen modellen nog ontwikkeld moeten worden. Het samenspel van gekoppelde modellen verbindt aspecten uit verschillende vakgebieden als constructieve veiligheid, milieu-impact en kosten en dat is de basis voor het derde element in de MIMO-aanpak: optimalisatie van het ontwerp op meerdere prestatiecriteria.

Slimme en flexibele optimalisatie-software inzetten: dit is een onmisbare ondersteuning om alle data en modellen te koppelen en samen te laten werken in één taal. Zo wordt het mogelijk om in elke ontwerpfase te optimaliseren voor meerdere prestatiecriteria tegelijk: multi-criteria optimalisatie. Deze stap in de aanpak betekent dat je het constructief ontwerp kan optimaliseren op kosten en tegelijk ook op milieuprestatie en een onderbouwde constructieve veiligheid. Multi-criteria optimalisatie is een methode die bijvoorbeeld in de olie- en gas-industrie wordt gehanteerd om meerdere criteria tegelijk te optimaliseren en de gegenereerde oplossingen af te wegen. Met de MIMO-aanpak komt deze methode ook beschikbaar voor de betonsector. De software ondersteunt met rekenkracht waardoor de complexiteit en de hoeveelheid gekoppelde modellen geen beperking vormen. Die rekenkracht is nuttig bij gestandaardiseerde ontwerproutes (route I) en wordt onontbeerlijk bij ontwerproutes waarin het aantal modellen en koppelingen uitgebreider wordt door gebruik van data, zoals in route III.



Figuur 6: MIMO in drie stappen

Multi-criteria optimalisatie begint met het ontwerpvoorbeeld (welke variabelen of keuzes heb ik ter beschikking in deze ontwerpfase?) en het afweegkader (op welke prestatiecriteria wil ik optimaliseren?). De benodigde data over de beschikbare (secundaire) materialen en de keten van modellen worden in de optimalisatie-software gekoppeld. Het resultaat bestaat uit meerdere optimale ontwerp-oplossingen met inzicht in de bijhorende prestaties. De stappen in de multi-criteria optimalisatie lichten we toe in tekstkader 5. Ze komen ook terug in een uitgewerkt voorbeeld over betongranulaat – tekstkader 6 – waarin we laten zien hoe *resource based engineering* kan gaan werken. In hoofdstuk 3 lichten we nog een ander voorbeeld toe, over hergebruik van betonnen balken in een nieuwe constructie.

TEKSTKADER 5

Stappen in de materiaalgedreven multi-criteria optimalisatie ter ondersteuning van ontwerp en besluitvorming:**1. Meerdere stakeholders in overleg, waaronder opdrachtgever, constructeur en producent**

Het formuleren van het optimalisatieprobleem (de **ontwerpvraag**) en het afweegkader om keuzes te maken en besluiten te nemen. Alle mogelijke inbreng wordt daarbij verzameld, zoals

- de doelen, prestatiecriteria, minimale eisen waarop geoptimaliseerd moet worden;
- afweegcriteria en de waardering: voorkeuren in termen van bandbreedte voor bepaalde prestatiecriteria en eventuele weging of prioritering ervan;
- de lokale uitgangspunten en randvoorwaarden (bijvoorbeeld lokaal beschikbaar materiaal en de eigenschappen daarvan, minimale en maximale dimensies van een constructie);
- variabele parameters: materiaalvariabelen (bijvoorbeeld twee mogelijke materiaalbronnen voor hergebruik) en ontwerpvariabelen (bijvoorbeeld mogelijke afmetingen) om op te optimaliseren.

2. Constructief ontwerper/constructeur

Het vertalen van het optimalisatieprobleem en het afweegkader in de optimalisatie-software en selectie van de benodigde **materiaalmodellen**.

3. MIMO-tool

De multi-criteria optimalisatie zelf, gebruik makend van de optimalisatie-software. De uitkomst is een **puntenwolk** (een zogenaamd Pareto front) van alle uitkomsten met een optimale combinatie van materiaal en ontwerp op de gekozen prestatiecriteria.

4. Meerdere stakeholders in overleg, waaronder opdrachtgever, constructeur en producent

Het **afwegen** van de uitkomsten en **keuzes maken** tussen de geoptimaliseerde uitkomsten. In het voorbeeld over betongranulaat in tekstkader 6 laten we zien dat in deze fase het afweegkader nader verfijnd kan worden na het zien van de oplossingen, bijvoorbeeld door een extra bandbreedte toe te voegen voor de gewenste milieu-impact.

TEKSTKADER 6

MULTI-CRITERIA OPTIMALISATIE VAN EEN VLOER OP BASIS VAN EIGENSCHAPPEN VAN BETONGRANULAAT EN MATERIAALMODELLEN

De MIMO-aanpak ondersteunt vorm-optimalisatie en maakt meer hergebruik van betongranulaat in een vloer mogelijk. Uit de geoptimaliseerde oplossingen, die allemaal onderbouwd veilig zijn, kan je het ontwerp kiezen met een zo hoog mogelijk percentage betongranulaat tegen minimale kosten en met minimale milieu-impact.

Bij ontwerpen en dimensioneren van betonvloeren kan de constructeur verschillende parameters gebruiken, zoals de betondruksterkte, afmetingen, overspanning en belastingen. Enkele parameters volgen uit de geometrie van het gebouw en andere worden bepaald door berekeningen van de constructeur, zoals de betondruksterkte en vloerdikte. De betondruksterkte en vloerdikte staan in verband met onder andere de hoeveelheid wapening, het gewicht van de constructie en de afmeting van de fundering. Een optimalisatie op basis van de betondruksterkte en vloerdikte is in de huidige praktijk reeds mogelijk, gebruik makend van bestaande rekenregels uit de Eurocode (referentie-oplossingen 2A en 2B in figuur 8, 9 en 10). Dergelijke praktijk-optimalisaties resulteren in een dunnere vloer dan wanneer alleen vuistregels uit de Eurocode gebruikt zouden worden (referentie-oplossing 1 in figuur 8, 9 en 10).

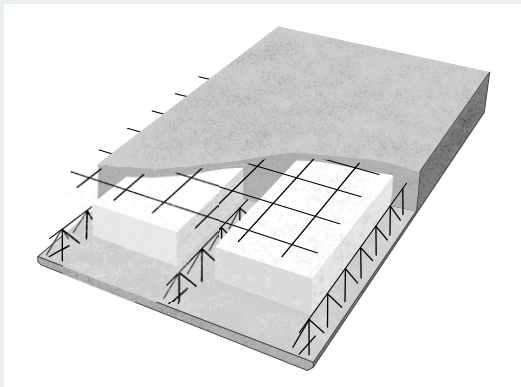
Het optimalisatieproces wordt complexer met extra parameters zoals gewichtsbesparende elementen in de vloer en het criterium kosten. Ervaring, kennis en tools (software) helpen bij deze optimalisatie. Door de verwerking van secundaire grondstoffen in beton, zoals betongranulaat, en nieuwe eisen zoals minimale milieu-impact, neemt de complexiteit nog *meer* toe. Ervaring, kennis en tools op dit gebied ontbreken nog. MIMO ondersteunt deze complexe ontwerpoptimalisatie en brengt oplossingen helder in kaart.

In het voorbeeld staan eigenschappen van het betongranulaat, afmetingen van de gewichtsbesparende elementen, vloerdikte, hoeveelheid wapening en de hoeveelheid betongranulaat in direct verband met constructieve veiligheid, kosten en milieu-impact voor elke ontwerpoptimalisatie. De materiaalmodellen die in dit illustratieve voorbeeld gebruikt worden, zijn state-of-the-art modellen, onder andere uit aanbevelingen en pre-normen. Er wordt een koppeling gemaakt met rekenregels uit de Eurocode. In wezen creëren we hier ruimte voor het volgen van route III in een prestatiegerichte aanpak zoals geïllustreerd in hoofdstuk 1 (tekstkader 3).

Dit resulteert in reeks geoptimaliseerde ontwerpoptimalisaties waar een keuze tussen gemaakt kan worden. Dat kan door aanvullende afwegcriteria in te voeren om de oplossingen te filteren, zoals een minimale hoeveelheid betongranulaat, maximale kosten en maximale milieu-impact. We zien dat de referentie-ontwerpen niet meer voldoen aan deze aangescherpte criteria. Voor betongranulaat met hoge dichtheid zijn er meerdere ontwerpoptimalisaties die nog voldoen aan aanvullende afwegcriteria, terwijl er nog één ontwerpoptimalisatie over blijft voor granulaat met lagere dichtheid. Deze is bovendien duurder dan de andere oplossingen met granulaten met hogere dichtheid.

Details en uitwerking van de vier MIMO-stappen:

In dit voorbeeld nemen we het detail-ontwerp onder de loop van een vloer met materiaal-besparende elementen⁴³ in een kantoorpand.



Figuur 7

De huidige regelgeving beperkt de toepasbaarheid van standaard rekenregels voor betongranulaat in constructieve toepassingen, waaronder ook betonvloeren vallen. Voor maximaal 30% vervanging van primair grind door betongranulaat met gemiddelde dichtheden hoger dan 2200 kg/m^3 kan je de rekenregels voor standaard beton toepassen. Voor betongranulaat met dichtheden lager dan 2200 kg/m^3 is dit maximum slechts 20%.⁴⁴ Deze begrenzingsen gaan ervan uit dat de dichtheden van betongranulaat een zekere spreiding vertonen.

Referentie-oplossing 1 met $h = 390 \text{ mm}$ geldt wanneer de grenswaarden uit de Eurocode worden gebruikt voor de vloerdikte, om de doorbuiging te beperken. In de referentie-oplossingen 2A en 2B is conform de huidige normen het percentage betongranulaat gekozen $\leq 30\%$ zonder het effect hiervan op de constructieve eigenschappen mee te wegen in het ontwerp. Het gekozen percentage betongranulaat heeft in de doorrekening alleen invloed op de gekozen water-cement ratio van het betonmengsel, maar het effect van het percentage betongranulaat op de eigenschappen van het beton zoals krimp, kruip, E-modulus blijft buiten beschouwing.

De **ontwerp vraag (stap 1)** is tweeledig: a) hoe kan het detail-ontwerp (vloer-afmetingen, betonmengsel, hoeveelheid wapening et cetera) uitpakken als daarin meteen ook milieucriteria in worden meegenomen en b) hoeveel betongranulaat kan worden toegepast als exacte data over de dichtheid van het lokaal beschikbare betongranulaat het uitgangspunt zijn bij de optimalisatie. Daarbij werken we twee voorbeelden uit: één met een dichtheid van 2100 kg/m^3 (lager dan gemiddeld voor betongranulaat) en één met een dichtheid van 2400 kg/m^3 (hoger dan gemiddeld voor betongranulaat).

43 Dit vloerontwerp is niet gebruikelijk in Nederland. Het is in dit voorbeeld ter illustratie gekozen omwille van de mogelijkheid om eenvoudig te variëren met materiaal-besparende elementen.

44 NEN 8005 legt een beperking op van 30% vervanging van primair grind door betongranulaat met een dichtheid van minimaal 2200 kg/m^3 voor gewapend beton in binnenmilieu, en van 20% vervanging door betongranulaat met een dichtheid tussen $2000\text{-}2200 \text{ kg/m}^3$. Zoals in hoofdstuk 1 beschreven wordt een dergelijke beperking opgelegd uitgaande van een gemiddelde dichtheid van het betongranulaat en een te verwachten spreiding (route II). Maar er zijn steeds meer recyclingtechnieken die betongranulaat produceren dat een hogere dichtheid heeft (door minder aanhangende cementsteen). Daar worden inmiddels nieuwe aanbevelingen voor opgesteld, bijvoorbeeld CROW-CUR Aanbeveling 127:2021.

In dit voorbeeld zijn ontwerpvariabelen van het betonmengsel-ontwerp, waaronder de hoeveelheid betongranulaat, tegelijk geoptimaliseerd met geometrische ontwerpparameters van de vloer (liggend op twee balken) voor **een afweegkader van drie prestatiecriteria**: behalen van veiligheid (met minimaal niveau van betrouwbaarheid), minimaliseren milieu-impact (MKI-reductie⁴⁵) en minimaliseren van kosten.⁴⁶

Hierin zijn **materiaalprestatie-modellen (stap 2)** gebruikt die wetenschappelijk onderbouwd zijn, waaronder modellen uit recent uitgegeven Nederlandse aanbevelingen en op handen zijnde Europese aanbevelingen.^{47, 48} Die modellen verbinden eigenschappen van het beschikbare betongranulaat (zoals dichtheid en waterabsorptie) aan eigenschappen van beton, zoals krimp, kruip en elasticiteit. Die eigenschappen worden op hun beurt weer in verband gebracht met gedrag van de gehele vloer, zoals doorbuiging. Deze materiaalmodellen zijn in de optimalisatie-software gekoppeld aan constructieve modellen met daarin ingebed de te optimaliseren ontwerpvariabelen van zowel het betonmengsel als de vloer.

Het resultaat van deze optimalisatie is een **puntenwolk (stap 3)** zie figuur 8. Die representeert een oplossingsruimte. Alle uitkomsten op de puntenwolk zijn optimale combinaties van de gebruikte prestatiecriteria (veiligheid, milieu, kosten), in de zin dat je niet van het punt weg kan bewegen zonder dat één van de prestatiecriteria minder wordt, bij gelijk blijven van de andere criteria.

In figuur 9 is te zien dat het gebruik van data over de eigenschap ‘dichtheid’ van het beschikbare betongranulaat rechtstreeks van invloed is op het vervangingspercentage: betongranulaat met dichtheid (ρ_{RCA}) 2400 kg/m³ resulteert in ontwerpvarianten (punten) met hogere vervangingspercentages dan betongranulaat met een dichtheid (ρ_{RCA}) van 2100 kg/m³. Maar ook voor deze lagere dichtheid is er nog een aantal ontwerpvarianten met percentages die hoger liggen dan de huidige beperking in de regelgeving. Dit is mogelijk omdat tegelijk ook het ontwerp van de vloer zelf wordt aangepast voor de effecten van het betongranulaat, bijvoorbeeld door deze iets dikker te maken.

45 MKI: Milieu Kosten Indicator.

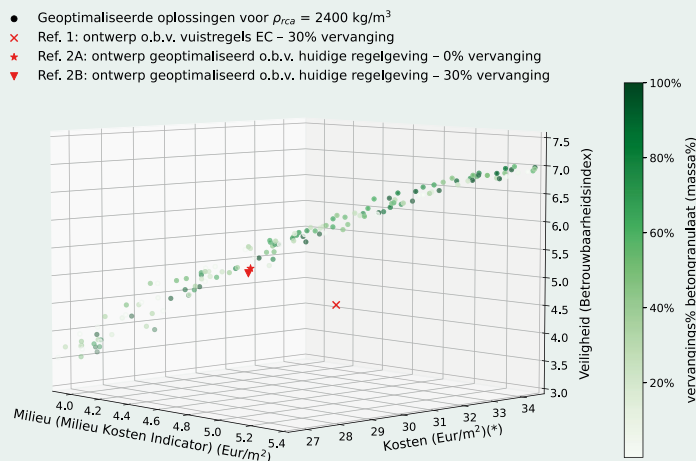
46 Op basis van nu beschikbare expertise koos TNO in eerste instantie voor prestatiecriteria voor maximalisatie van constructieve veiligheid en minimalisatie van milieu-impact en kosten, maar ook andere criteria kunnen in een later stadium worden toegevoegd (zoals mate van hergebruik of circulariteit).

47 fib, First complete draft fib Model Code 2020 for Structural Concrete, (2022). International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne.

48 CROW-CUR Aanbeveling 127:2021. Beton met betongranulaat als fijn en/of grof toeslagmateriaal. Toelaatbare vervangingspercentages zonder aanpassing van de constructieve rekenregels.

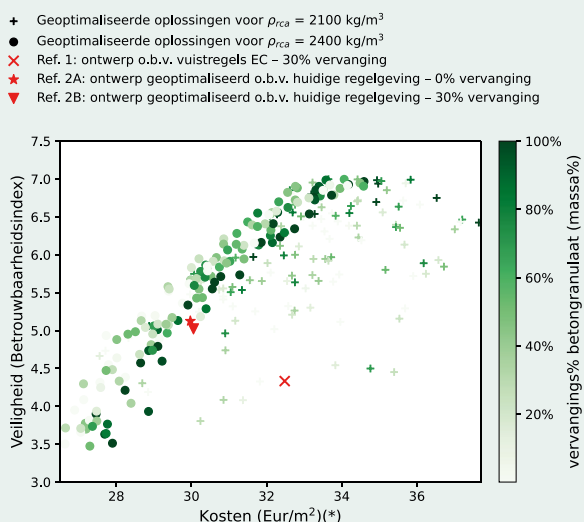
Als resultaat zien we:

1. Gebruik van dichtheid van betongranulaat en koppeling van materiaalmodellen aan rekenregels geeft ontwerp oplossingen met hogere percentages betongranulaat dan wanneer standaard beperkingen worden aangehouden. Er is inzicht in de kosten en de milieu-impact.



Figuur 8: Optimalisatie voor drie prestatiecriteria (minimalisatie milieu-impact, minimalisatie kosten, maximalisatie constructieve veiligheid) van ontwerpvariabelen (vloerdikte, hoeveelheid wapening, hoeveelheid betongranulaat, water/cement ratio) leidt tot een puntenwolk met optimale oplossingen voor betongranulaat met een dichtheid (ρ_{RCA}) van 2400 kg/m^3 .

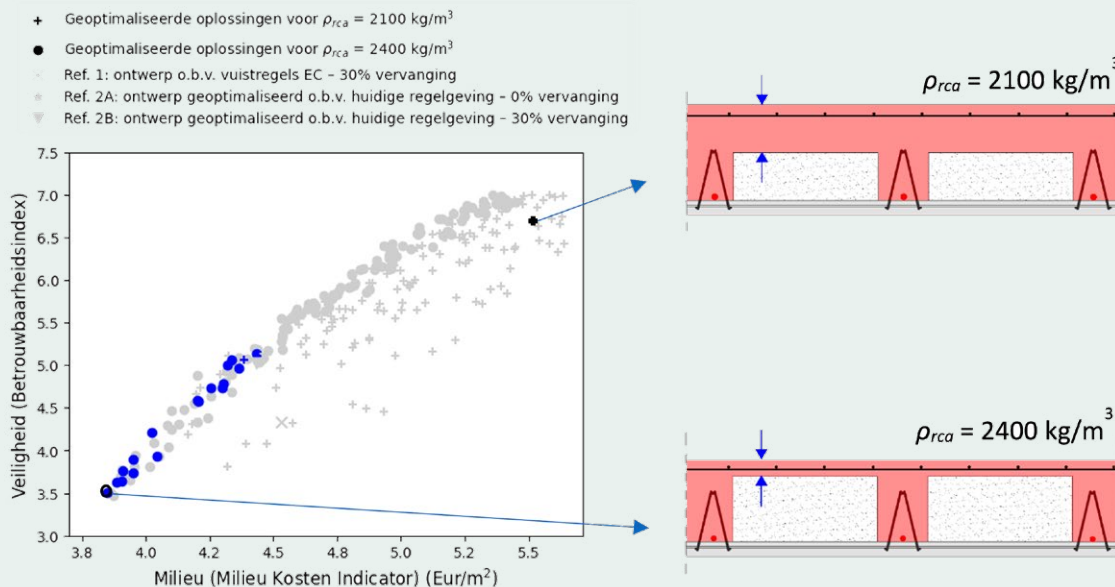
2. Voor hogere dichtheid van betongranulaat resulteert dit in een optimaal ontwerp met minder materiaalgebruik en dus lagere milieu-impact en kosten dan voor lagere dichtheid van betongranulaat, ook al liggen de materiaalkosten van betongranulaat met lage dichtheid zelf iets lager. Bij betongranulaat met lagere dichtheden zijn namelijk grotere hoeveelheden beton (cement) en wapening nodig in het daarop afgestemde ontwerp om toch het benodigde betrouwbaarheidsniveau te halen.



Figuur 9: Doorsnede van de twee puntenwolken van geoptimaliseerde oplossingen geplott voor kosten ten opzichte van betrouwbaarheidsindex (voldoen aan minimum niveau uit regelgeving), één voor betongranulaat met dichtheid 2400 kg/m^3 en één voor betongranulaat met dichtheid (ρ_{RCA}) 2400 kg/m^3 .

* Kosten zijn voorlopig met name materiaalkosten. Voor de keuze en beschrijving van de referentieoplossingen, zie tekst.

We kunnen een transparante **afweging maken en ontwerpen selecteren (stap 4)** door een filter toe te passen. In figuur 10 blijven de blauwe oplossingen over na het stellen van maximale (materiaal)kosten van 30 euro/m², een maximale milieu-impact van 4,5 euro/m² en vervangingspercentages van betongranulaat hoger dan 60. Ook zien we dat voor betongranulaat met lage dichtheid nog maar één ontwerp voldoet aan de aanvullende criteria (het blauwe kruisje), terwijl er voor granulaat met hogere dichtheid meer oplossingen zijn die aan de criteria voldoen. De referentie-oplossingen voldoen niet aan de in de filter gestelde afwegingscriteria.



Figuur 10: Zelfde figuur als figuur 9, maar nu met een filter met daarin extra prestatiecriteria: (materiaal)kosten <30 euro/m², milieu-impact <4,5 euro/m² en vervangingspercentages van betongranulaat >60.

Het resultaat in dit voorbeeld is dus een reeks ontwerp oplossingen die beter in balans zijn voor de verschillende criteria dan de oplossingen op basis van standaardpercentages betongranulaat en zonder koppeling tussen verschillende prestatiecriteria. Daarmee laten we zien dat het centraal stellen van materiaaleigenschappen én het ondersteunende gebruik van data, modellen en slimme optimalisatie-software helpt om constructief veilige, betaalbare en duurzamere betonconstructies te ontwerpen.

Details van het onderzoek, met een beschrijving van het constructief ontwerp en de randvoorwaarden, staan in een TNO-congresbijdrage.⁴⁹

⁴⁹ Valcke, Bigaj-van Vliet, Allaix, Braendstrup, Visser, Amórtegui, Wang, Godoi Bizarro, Szklarz, Barros. Multi-criteria optimisation for sustainable concrete structures. Ingediend bij fib International Congress 2022 Oslo.

2.2 OPTIMALE ONTWERPOPLOSSINGEN: DUURZAMER, CONSTRUCTIEF VEILIG EN BETAALBAAR

De MIMO-aanpak die data en modellen samenbrengt in slimme optimalisatie-software, kan partijen in iedere fase van het ontwerpproces ondersteunen in hun besluitvorming. Het ontwerpproces zelf blijft daarbij grotendeels hetzelfde. MIMO werkt op basis van modellen en rekenregels waarover bij implementatie consensus moet bestaan aansluitend bij wet- en regelgeving. Daarom zijn uiteindelijk op basis van deze aanpak transparante en geobjectiveerde afwegingen en onderbouwde keuzes te maken.

De vereenvoudigde casus over een vloer met betongranulaat illustreert hoe MIMO het ontwerpproces in de praktijk kan ondersteunen, ook voor het volgen van route III in de prestatiegerichte aanpak (zie tekstkader 3). In dit voorbeeld is de ontwerp-vraag geformuleerd rondom het optimaliseren van vloerafmetingen, betonmengsel, hoeveelheid betongranulaat en hoeveelheid wapening. Eigenschappen van betongranulaat vormen input voor materiaalmodellen⁵⁰ die weer zijn verbonden met constructieve rekenregels. Dankzij MIMO kunnen data in de fase van detailontwerp helpen bij het identificeren van optimale uitkomsten ten aanzien van constructieve veiligheid, milieu en kosten. Ook bij meer conceptuele ontwerp-vraagstukken en keuzes tussen duurzame oplossingen kunnen data en multi-criteria optimalisatie helpen. Hoewel het ontwerpproces dus in basis gelijk blijft, kunnen adviseurs nu rekening houden met lokaal beschikbare materialen en de effecten daarvan op de te ontwerpen constructie. En er ontstaat al vroeg in het proces een kwantitatief en transparant inzicht in optimale ontwerp-oplossingen. Afwegingen die anders pas laat in het ontwerpproces worden gemaakt, kunnen zo naar voren worden gehaald.

Het voorbeeld illustreert ook hoe meerdere optimale ontwerp-oplossingen worden gegenereerd bij het meewegen van meer criteria in de optimalisatie-software. Op dit moment wordt in de praktijk ook al geoptimaliseerd door bijvoorbeeld de constructeur, al dan niet ondersteund door software. Bijvoorbeeld wapening optimaal afstemmen op de afmetingen van een vloer, gericht op veiligheid en kostenreductie van de constructie. Milieumodellen worden daarbij nog niet gelijk meegenomen en milieu-impact wordt voor een aantal ontwerpvarianten achteraf berekend en vergeleken. Wanneer in MIMO direct ook milieumodellen worden meegenomen in de optimalisatie, worden meer ontwerpvarianten gegenereerd die een optimale balans hebben: constructief veilig, duurzamer en betaalbaar. Op deze manier kan MIMO huidige initiatieven en pilots in de sector gaan ondersteunen.⁵¹

⁵⁰ Voor referenties zie het voorbeeld in tekstkader 6.

⁵¹ Een goed voorbeeld hiervan is het artikel van Wenting et al. met handvatten voor constructeurs om inzicht te krijgen in de reductie van de milieu-impact door hergebruik van de draagconstructie (Wenting, Loonen, Gootzen, Van Haalen en Van Wolfswinkel, Op weg naar CO₂-neutrale betonconstructies. Concrete handvatten voor de constructeur, CementOnline, 3 mei 2021). "Extra rekeninspanningen, geavanceerder rekenwerk, parametrisering en slimme vormgeving helpen de constructeur bij het minimaliseren van de hoeveelheid materialen", aldus het artikel. De MIMO-aanpak kan dit gaan ondersteunen door data en materiaalmodellen in te brengen en software te ontwikkelen waarmee de constructeur nog meer data van materiaaleigenschappen en prestatiecriteria toe kan voegen aan de ontwerptimalisatie. Een nog recenter voorbeeld is de afspraak van partijen bij het Betonakkoord dat duurzaam beton vanaf 2023 verplicht moet zijn in aanbestedingen. De in dit paper beschreven aanpak kan de sector helpen hier concreet handen en voeten aan te geven, omdat het opdrachtgevers, producenten en constructeurs in staat stelt om prestatiegerichte eisen te formuleren, te objectiveren en af te wegen.



De betrokken partijen kunnen op basis van een transparant overzicht aan ontwerp-oplossingen gezamenlijk kiezen door een afweging te maken tussen de uitkomsten voor verschillende prestatiecriteria. Tegelijkertijd is er meer flexibiliteit. Zo kan de gebruiker op ieder moment nieuwe data toevoegen of onderdelen van het afweegkader wijzigen als daar in de loop van het ontwerpproces aanleiding voor is. De rekenkracht van de optimalisatie-software is dusdanig dat daar nog meer optimalisatie-criteria bij kunnen, zoals circulariteit. Daar zijn inmiddels ook rekenmodellen⁵² voor die kunnen worden ingevoerd.

Ook kunnen in de loop van het proces extra data toegevoegd worden, bijvoorbeeld over grondstoffen. Zo verkrijgen de adviseurs bijna real-time inzicht in de effecten op het constructief ontwerp. Adviseurs kunnen als het ware ‘terugkijken’ op de genomen beslissingen en die meenemen naar de volgende fasen of waar nodig heroverwegen. Er zijn zelfs dashboards denkbaar waarop de gebruiker niet alleen data en afweegcriteria kan invoeren, maar ook ziet of gebruik van extra data of (voor)bewerking van de materialen tot betere resultaten kan leiden. Zo kunnen afmetingen van een gebruikt betonelement of een sterktemeting al in de schets-ontwerpfase veel onzekerheden wegnemen, waardoor meer hergebruik mogelijk wordt. In hoofdstuk 3 gaan we hier dieper op in en laten we zien hoeveel impact het ondersteunen van meer hergebruik kan hebben in termen van CO₂-reductie.

⁵² Platform CB'23. Leidraad Meten van circulariteit. Werkafspraken voor een circulaire bouw. Versie 2.8 - 16 maart 2022.

2.3 MIMO FACILITEERT SAMENWERKING IN DE KETEN

Duurzaam modelleren en ontwerpen omvat meer dan het optimaliseren van een constructief ontwerp. De keten beweegt al geruime tijd naar meer samenwerking. Het Betonakkoord en initiatieven zoals Platform CB'23⁵³ zijn daar voorbeelden van. Het ontbreekt alleen nog aan handvatten en methodieken om die samenwerking goed te verankeren. MIMO kan de interactie tussen opdrachtgever, ontwerper en uitvoerder faciliteren. Partijen kunnen transparant onderbouwen dat een constructief ontwerp gelijktijdig voldoet aan verschillende prestatiecriteria als ze volgens deze aanpak optimaliseren. Daarmee verkleinen ze onzekerheden en impact wordt inzichtelijk. Tijdens alle ontwerpfasen. Samenwerken en samen afwegingen maken wordt makkelijker, ondanks de toegenomen complexiteit. Omdat deze aanpak aansluit op het huidige ontwerpproces kan het op korte termijn al vruchten afwerpen.

De spelers in de betonketen kunnen stapsgewijs de waarde van (onderdelen van) de nieuwe aanpak ervaren. In tekstkader 7 geven wij een eerste beeld hoe dat er voor verschillende spelers uit kan zien. Het vergaren van data en het softwarematig optimaliseren vergt mogelijk langere doorloop- of rekestijden. Maar onder de streep rollen er optimale oplossingen uit, met kwantitatief inzicht in kosten en baten, die de langere doorlooptijd de moeite waard maken. In het totale ontwerpproces wordt bovendien voorkomen dat oplossingen in latere stadia niet haalbaar blijken. Dat kan weer positief uitwerken op de voortgang, zeker omdat er vertrouwen komt in het daadwerkelijk behalen van de gewenste prestaties en transparantie over gemaakte afwegingen en uitgangspunten.

TEKSTKADER 7

HOE KAN MIMO GAAN WERKEN VOOR PARTIJEN IN DE BETONSECTOR?

MIMO ondersteunt **opdrachtgevers** bij de omslag van gespecificeerd naar prestatiegericht uitvragen. Zij kunnen prestatiecriteria meegeven in een afwegekader dat door constructeurs kan worden ingevoerd in de methodiek voor multicriteria ontwerptimalisatie. Opdrachtgevers hoeven niet meer vooraf keuzes te maken voor een specifieke verduurzamingsoptie, met het risico dat later in het ontwerpproces blijkt dat die niet in balans zijn met andere prestatiecriteria, zoals constructieve veiligheid. Als opdrachtgevers sturen op het gebruik van de methodiek, krijgen zij geoptimaliseerde oplossingen aangeboden met onderbouwing van verschillende prestaties. Die kunnen ze transparant vergelijken, beoordelen en selecteren in overleg met constructeurs en andere betrokkenen. Daarbij kunnen afwegingscriteria verfijnd worden bij het evalueren van de geoptimaliseerde oplossingen, zoals we laten zien in het voorbeeld over betongranulaat in tekstkader 6.

MIMO ondersteunt **bouwbedrijven en ingenieursbureaus** met modellen, software en rekenkracht. Dit verruimt de mogelijkheden om het ontwerp te optimaliseren binnen de kaders van de regelgeving. **Constructeurs** kunnen in de reeds gebruikte of verder te ontwikkelen optimalisatie-routines nu gelijktijdig criteria toevoegen om, naast constructieve veiligheid en kosten, de milieu-impact te verlagen en de circulariteit van het constructief ontwerp te verhogen.

53 CB'23 staat voor Platform Circulair Bouwen in 2023.

Dankzij de materiaalmodellen en de ingebedde veiligheidskaders kunnen zij het ontwerp optimaliseren aan de hand van eigenschappen van beschikbare secundaire materialen en de randvoorwaarden ingegeven door betonproducenten.

Het is denkbaar dat constructeurs een soort spilfunctie gaan vervullen in het integrale ontwerpproces: een centrale rol om lokaal aanbod van (secundair) materiaal te koppelen aan toepassingen en het ontwerp daarop te optimaliseren. De uitdaging hierbij is om vraag en aanbod ook te koppelen in de tijd. We zien eerste initiatieven ontstaan om dit mogelijk te maken, zoals de Nationale Bruggenbank waarin bruggen die beschikbaar zullen komen worden aangeboden en waarin data kunnen worden opgenomen die bruikbaar zijn voor ontwerpoptimalisatie.

Aannemers, sloopbedrijven en recyclers kunnen informatie aanleveren aan constructeurs over de materialen die zij beschikbaar hebben en over de materiaaleigenschappen van bijvoorbeeld bestaande betonelementen. In interactie met de constructeurs krijgen ze een beter beeld van kosten en baten van slim demonteren en opslag van materialen. Dit maakt meer hergebruik mogelijk en zal leiden tot groeiende vraag naar secundaire materialen: van betonelementen tot de allerfijnste fracties van beton- en metselwerkpuin.

Betonproducenten kunnen in samenwerking met constructeurs hun (prefab) betonproducten optimaliseren waarbij prestaties van beton verbonden worden met prestaties op constructieniveau. Informatie over de eigenschappen van beschikbare materiaalstromen en materiaalmodellen helpen hen om betonmengselontwerpen verder te optimaliseren, met voorspelbare prestaties die meegenomen kunnen worden in het multi-criteria ontwerp.

Tot slot sluit het denken en werken vanuit materiaaleigenschappen en het optimaliseren op meerdere prestatiecriteria aan op de visie van meerdere partijen, waaronder ook **regelgevende instanties**, zodat een prestatiegerichte aanpak het gebruik van duurzame materialen kan stimuleren. Niet eisen dat een brug voldoet aan een reeks specifieke voorschriften, maar eisen dat een brug veilig is. Prestatiegericht werken, ontwerpen, toetsen en beoordelen is geen eenvoudige opgave, zoals we zagen in tekstkader 3 met de drie ontwerproutes. De MIMO-aanpak helpt om een prestatiegerichte aanpak verder te ontwikkelen en toe te passen: modellen voeden en valideren met data en de koppeling leggen tussen materiaal en constructie. Dat maakt de weg vrij voor een prestatiegerichte, integrale aanpak.

3. RESOURCE BASED ENGINEERING MET MIMO BRENGT DUURZAAMHEIDSDOELEN DICHTERBIJ

- In dit hoofdstuk laten we aan de hand van voorbeelden zien dat secundaire materiaalstromen een groter toepassingsgebied krijgen en meer mogelijkheden tot opschalen ontwikkelen als we data en modellen inzetten om materiaaleigenschappen te koppelen aan optimalisatie op constructieve veiligheid, milieu en kosten.
- Naast het uitgewerkte voorbeeld over betongranulaat gaan we in dit hoofdstuk specifiek in op hele betonelementen en de fijnste fracties uit metselwerk.
- Resource based engineering met MIMO levert aantoonbaar winst op voor milieu en klimaat. Secundair beton en metselwerk vormen nu samen ongeveer een derde van het jaarlijkse Nederlandse afval. Uitgaande van wat jaarlijks naar verwachting vrijkomt aan secundair beton en metselwerk kunnen we in potentie tien keer zoveel hergebruiken in nieuwe betontoepassingen als nu.
- Hergebruik van betonelementen en de inzet van metselwerkpoeders spaart bovendien cementgebruik uit. Volledig gebruik van deze twee materiaalstromen bespaart naar schatting 0,75 tot 1,25 miljoen ton CO₂ per jaar, een derde van de doelstelling van het Betonakkoord in 2030.⁵⁴

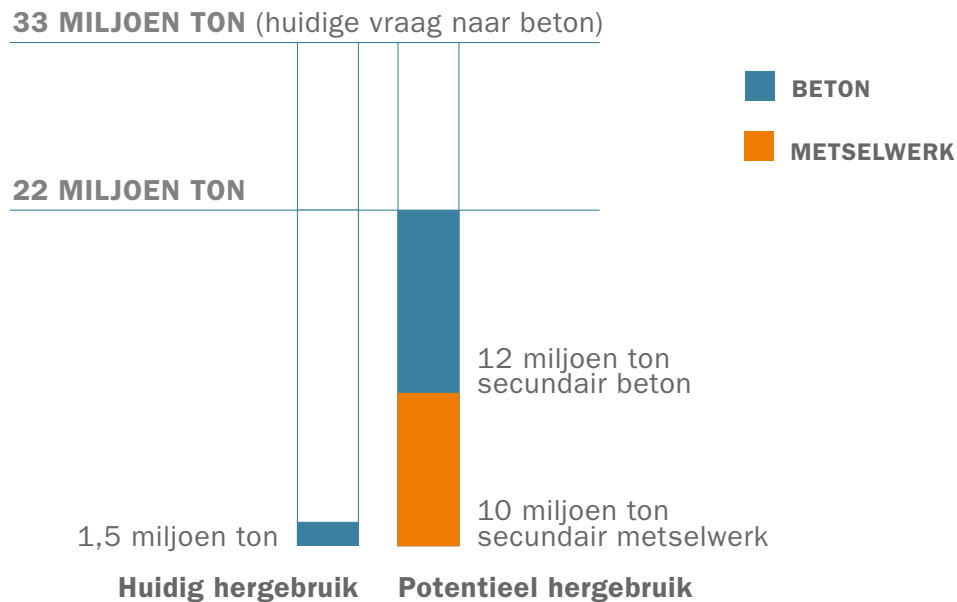
3.1 BESPARING PRIMAIRE GRONDSTOFFEN DOOR GROTER TOEPASSINGSGBIED VOOR SECUNDAIRE MATERIALEN

We zagen in hoofdstuk 2 dat het ontwerp van constructieve toepassingen kan worden afgestemd op beschikbare secundaire materiaalstromen als we de eigenschappen daarvan als uitgangspunt nemen. Dankzij de verregaande koppeling van materiaalmodellen en rekenmodellen kunnen de effecten van materiaaleigenschappen en de spreiding ervan worden meegenomen. Zo kunnen vroeg in het ontwerpproces de betrouwbaarheid van constructies en hun constructieve veiligheid beter worden aangetoond. Dit ondersteunt opschaling van hergebruik en het reduceren van primair grondstoffengebruik in constructieve toepassingen.

Het doorgerekende voorbeeld over betongranulaat in tekstkader 6 laat zien dat de constructieve veiligheid kan worden onderbouwd, terwijl milieu-impact en kosten worden geoptimaliseerd dankzij het verbinden van verschillende modellen en rekenregels in een keten. In dit geval worden state-of-the-art materiaalmodellen, die eigenschappen en percentages van betongranulaten linken aan krimp, verbonden met modellen die de impact van krimp betrekken bij het berekenen van (veiligheids)limieten in een constructief ontwerp. Ook een ander doorgerekend voorbeeld illustreert de vergroting van het toepassingsgebied voor secundair materiaal. In dat voorbeeld, in tekstkader 8, laten we zien dat betonnen balken in hun geheel kunnen worden hergebruikt in nieuwe betonconstructies dankzij het rekenen met data over de eigenschappen van die balken.

⁵⁴ Betonakkoord, Road Map CO₂ (Uitvoeringsteam Road Map CO₂-reductie, 20 januari 2021).

Hergebruik in constructieve toepassingen vergroot dus het toepassingsgebied van secundaire materiaalstromen. Dit is een aanzienlijke stap, omdat meer dan de helft van alle betontoepassingen een constructieve toepassing is. Meer hergebruik betekent minder inzet van primaire grondstoffen. Het optimaliseren van constructieve toepassingen, ook voor CO₂-reductie, brengt het behalen klimaat- en circulariteitsdoelen dichterbij.



Figuur 11: Potentie van hergebruik dat MIMO kan ondersteunen op basis van ingeschatte aanbod en vraag in de nabije toekomst.⁵⁵

3.2 RESOURCE BASED ENGINEERING MET MIMO LEIDT TOT MEER HERGEBRUIK EN CO₂-REDUCTIE

Resource based engineering maakt daarnaast verduurzamingsstrategieën mogelijk die nu als moeilijk haalbaar worden gezien. Dat komt vooral door het gebruik van data voor het voeden van modellen en rekenregels. Grootschaliger inzet van secundaire materiaalstromen voor nieuwe betontoepassingen zal helpen om de klimaat- en circulariteitsdoelen te behalen, want het gaat over veel materiaal. Secundair beton en metselwerk vormen nu samen een derde van het jaarlijkse Nederlandse afval.⁵⁶ Als we dit volledig kunnen inzetten zou dit in potentie leiden tot minstens tien keer zoveel hergebruik in beton als nu en minstens 50% minder gebruik van primaire grondstoffen in beton.

We lichten hier twee materiaalstromen uit die bij hergebruik ook een extra besparing van cement kunnen opleveren: complete betonelementen en de fijnste fracties uit metselwerk. Volledig gebruik van deze twee materiaalstromen bespaart naar schatting 0,75 tot 1,25 miljoen ton CO₂ per jaar. Dat is een derde van de doelstelling van het Betonakkoord in 2030.⁵⁷ Deze materiaalstromen zijn nog onderbelicht door de onzekerheid op het vlak van constructieve veiligheid en kosten. Zo zijn ze niet nadrukkelijk meegenomen als significante verduurzamingsstrategie ('Handelingsperspectief') in het Betonakkoord.

⁵⁵ Gegevens uit Betonakkoord, Roadmap Hergebruik Betonreststromen, 2021.

⁵⁶ Nederland produceert jaarlijks bijna 70 miljard kg afval (bron: CBS). Het jaarlijkse bouw- en sloopafval beslaat 25 miljard kg (Bouw- en sloopafval: vrijkomen en verwerking, 1985-2018, Compendium voor de Leefomgeving (clo.nl)). Samen is dat 35 miljard kg afval. Jaarlijks komt 22 miljard kg beton en metselwerk vrij (Betonakkoord, BRBS).

⁵⁷ Betonakkoord en de Road Map CO₂ (Uitvoeringsteam Road Map CO₂-reductie, 20 januari 2021)

3.2.1 Betonelementen

Bestaande betonelementen worden nog nauwelijks hergebruikt in nieuwe betonconstructies, omdat constructieve veiligheid, duurzaamheid en betaalbaarheid nog niet voldoende kunnen worden aangetoond in relatie tot elkaar.⁵⁸ Sinds kort staat dit hergebruik hoog op de agenda dankzij initiatieven vanuit de markt.⁵⁹ Ook regelgevende instanties zoeken naar manieren om het aantonen van de constructieve veiligheid van gebruikte elementen in te bedden in de regelgeving.⁶⁰

Een eenvoudig voorbeeld over hergebruik van betonnen balken als draagconstructie onder een vloer laat zien wat het oplevert als de materiaaleigenschappen centraal komen te staan in het ontwerpproces. Met bestaande data én nieuwe data uit metingen als input voor modellen die betrouwbaarheid berekenen, bleek het mogelijk om de constructieve veiligheid te onderbouwen. Dat maakt hergebruik mogelijk, waar dat met een traditionele ontwerpmethodede zonder aanvullende informatie niet was gelukt. Zie het uitgewerkte voorbeeld in tekstkader 8.

De milieuwinst hiervan is aanzienlijk, omdat er een grote hoeveelheid betonelementen beschikbaar is voor hergebruik. Alleen al bij Rijkswaterstaat gaat het om meer dan duizend liggers vanwege de vervanging en renovatie van betonnen kunstwerken.⁶¹ Ook door renovatie in de woningbouw komen er steeds meer vloeren en balken vrij. In combinatie met verwachte verbeteringen rond slim demonteren, schatten we in dat in eerste instantie 10% van al het huidige secundaire beton als element kan worden hergebruikt, ondersteund met de MIMO-aanpak.⁶⁰ Naarmate de *resource based engineering* met MIMO verder wordt verfijnd kan het ontwerp nauwkeuriger worden aangepast op basis van steeds beter inzicht in de (spreiding van de) materiaaleigenschappen van de elementen. Dat voorkomt toevoeging van extra materiaal om onzekerheden op te vangen, en voorkomt dus ook extra CO₂-uitstoot en kosten.

Eén-op-één hergebruik van een element zonder toevoeging van nieuwe beton-toepassingen bespaart in theorie bijna 100% cement en dus ook 100% CO₂.⁶² Als we daarvan CO₂-emissies aftrekken gerelateerd aan demontage, transport en eventuele delen nieuw beton, dan nemen we aan dat per element een ingeschatte 75% CO₂ is te besparen vergeleken met een nieuw element. Dan zou 10% hergebruik van elementen resulteren in bijna 0,25 miljoen ton CO₂-reductie. Afgezet tegen het doel van 5 miljoen ton reductie uit het Betonakkoord is dat 5%. Op de langere termijn kan het hergebruik van betonelementen nog veel verder toenemen dankzij de initiatieven in remonteerbaar bouwen⁶³ waardoor kosten van demonteren verder afnemen. Als hergebruik van betonelementen dan zou kunnen stijgen tot wel 50% van het secundaire beton dan loopt de CO₂-reductie op tot 0,75 miljoen ton, 15% van het doel uit het Betonakkoord.

58 Lieshout, M., Nusselder, S. 2016. Update Prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen 2016. CE Delft.

59 Voorbeelden: SBIR Circulair Viaduct (RWS en marktpartijen), 'tijdelijke rechtbank Amsterdam' (Rijksvastgoedbedrijf en marktpartijen)

60 Bijvoorbeeld NEN-commissie 342086 Hergebruik constructieve elementen

61 Bijvoorbeeld online artikel RHDHV: Vergoossen, R. 2021. Hergebruik prefab liggers maakt viaducten circulair

62 Onder de aanname dat de CO₂-uitstoot van beton grotendeels afkomstig is van cement en wapening, wat je nu niet meer hoeft toe te voegen: de productie van 1 kg cement (CEM I, OPC) resulteert in grofweg 1 kg CO₂ (Eco-Invent database).

63 Bijvoorbeeld online artikel: Rijksvastgoedbedrijf. 2021. Demontabele tijdelijke rechtbank verhuist naar Enschede. Zie ook bijvoorbeeld, Circulair en Remontabel Bouwen, visiedocument Consolis VBI. Versie 1.0 en: Pilot project proves that the dismount and reuse of concrete elements is realistic and economical, Jaakko Yrjölä, Peikko Group, February, 21, 2022 (www.peikko.com).

Tekstkader 8

HERGEBRUIK VAN BETONNEN BALKEN: MATERIAALBESPARING EN AANTOONBAAR VEILIG

In dit fictieve voorbeeld zijn er tien balken beschikbaar, afkomstig uit een bestaande betonconstructie zoals op deze foto. Het doel is om deze balken opnieuw te gebruiken als deel van een nieuwe constructie om een vloer te ondersteunen. We nemen als uitgangspunt in het voorbeeld dat de beschikbare gegevens over het oorspronkelijke ontwerp van deze balken onvoldoende blijken om te voldoen aan de eisen rond constructieve veiligheid van de vloer. Dit komt door de onzekerheden over de huidige status van de balken na veroudering en belasting tijdens de gebruiksfase.



TNO onderzocht hoe aanvullende data over de eigenschappen van de balken meegenomen kunnen worden in berekeningen. Uit dit onderzoek blijkt dat de constructieve veiligheid wél met voldoende betrouwbaarheid is te onderbouwen met een beperkt aantal (niet-destructieve) druksterktemetingen aan de balken, bijvoorbeeld met een Schmidthamer. Ook blijkt dat aanvullende proefbelasting bruikbaar is voor die onderbouwing, in gevallen waarin de uitkomst van de druksterktemetingen nog onvoldoende is. Dit geeft een nog betrouwbaarder beeld van de (dwarskracht)capaciteit van de balken. Zo'n proefbelasting hoeft maar op één balk toegepast te worden als voldoende gelijkennis tussen de balken is aan te tonen, bijvoorbeeld door middel van niet-destructieve sterktemetingen met een Schmidthamer of een ultrasone pulssnelheid test.

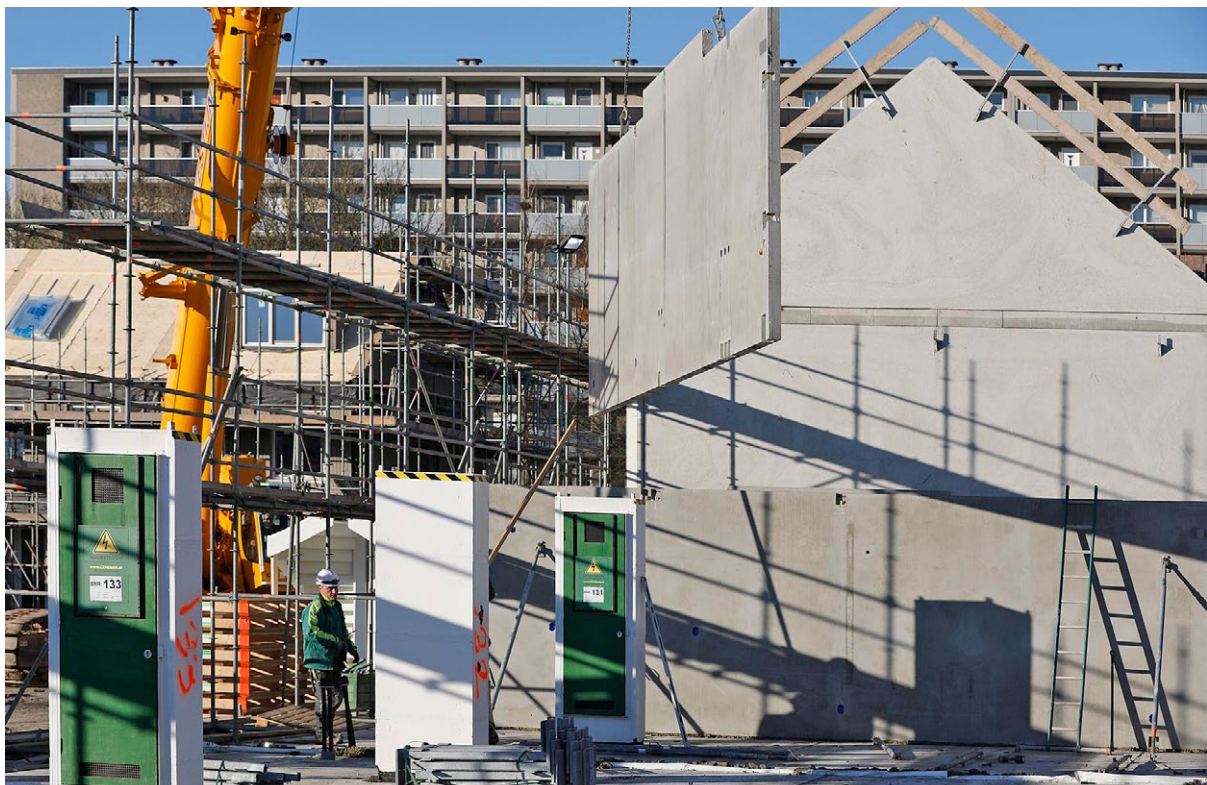
Samengevat, we brengen aanvullende data over de eigenschappen van de balken met behulp van probabilistische modellen in verband met de zogeheten betrouwbaarheidsindex. Hiermee kunnen we route II volgen, zoals beschreven in tekstkader 3 in hoofdstuk 1. Constructieve veiligheid kan worden aangetoond en de balken kunnen worden ingezet in een nieuwe constructie. In de traditionele aanpak zonder extra informatie zouden de balken onbenut blijven, of zou aanvullend (primair) materiaal in de constructie nodig zijn, waardoor het ontwerp duurder en minder duurzaam uitpakt.

Details van de berekeningen zijn te vinden in een TNO congresbijdrage.⁶⁴

⁶⁴ Valcke, Bigaj-van Vliet, Allaix, Braendstrup, Visser, Amórtegui, Wang, Godoi Bizarro, Szklarz, Barros. Multi-criteria optimisation for sustainable concrete structures. Ingediend bij fib International Congress 2022 Oslo.

3.2.2 Fijnste fracties uit metselwerk

De verwachting is dat in 2030 jaarlijks 22 miljoen ton beton en metselwerk vrijkomt,⁶⁵ voornamelijk grotendeels in een gemengde stroom (mengpuin). Ruwweg 12 miljoen ton daarvan is beton en 10 miljoen ton is afkomstig van metselwerk. Op dit moment wordt mengpuin grotendeels als granulaat ingezet in wegfundering. Dit gebruik zal naar verwachting afnemen omdat er minder wegen worden aangelegd. Ook worden funderingen vaker behouden, rechtstreeks hergebruikt of opgebouwd uit alternatieve secundaire stromen. Dit geeft ruimte om mengpuin verder te scheiden. Het zuivere beton kan worden hergebruikt in beton. Daarmee blijft een metselwerkstroom achter die door de mortel-resten niet bruikbaar is in nieuwe bakstenen. Hergebruik van deze stroom in beton wordt momenteel niet gezien als waardevolle optie voor verduurzaming. Dit komt met name doordat hergebruik als grof granulaat voor het vervangen van toeslag in constructief beton voor infrastructuur niet zonder meer is toegestaan, onder andere vanwege van de lage dichtheid.⁶⁶ Gebruik in niet-constructieve toepassingen wordt vervolgens ook afgeraden omdat het risico bestaat dat deze granulaten bij recycling alsnog tussen de betongranulaten voor constructieve toepassingen terecht komen.⁶⁷



65 Gegevens uit Betonakkoord, Roadmap Hergebruik Betonreststromen, 2021.

66 RTD 1001 Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken, Rijkswaterstaat Technisch Document, 2021, versie 2.0.

67 Overigens zijn metselwerkgranulaten in het verleden, met name via normen in situaties van materiaalschaarste in Duitsland, ook in constructieve toepassingen gebruikt die nog steeds goed presteren. Duitse norm: DIN 4163:1951. Ziegelsplittbeton; Bestimmungen für Herstellung und Verwendung.

Als we materiaaleigenschappen als uitgangspunt gaan nemen in het ontwerpproces, opent zich een ander perspectief. Het effect van eigenschappen van metselwerkgranulaten op constructies kan je nadrukkelijker meenemen door ze via materiaalmodellen te verbinden met constructieve rekenregels. Ook kunnen we met *resource based engineering* de fijne fracties beter beschouwen. Bij het fijnmalen van het metselwerk ontstaan fijne fracties en poeder die heel goed inzetbaar zijn als fijne toeslag, vulstof en zelfs bijdragen aan het bindmiddel.⁶⁸

Dergelijk gebruik is niet nieuw: de Romeinen pasten dit al toe als onderdeel van mortels.⁶⁹ En TNO gebruikt metselwerkpoeders bijvoorbeeld bij onderzoek naar cementloze bindmiddelen zoals geopolymeren. Oplosbare bestanddelen van de fijne metselwerkpoeders bepalen hoeveel kan worden ingezet als vulstof en hoeveel als cement-reducerend bindmiddel. De technologische uitdaging ligt in de grote variatie in metselwerk als gevolg van gebruikte kleien, baksteentemperaturen en hoeveelheden aanhangende mortel. De MIMO-aanpak kan ondersteunen in deze uitdaging door de eigenschappen van het metselwerk via modellen te verbinden met de eigenschappen van het beton dat er mee gemaakt wordt in de context van de (constructieve) toepassing.

De recyclingtechnieken om metselwerk zuiverder te scheiden en de benodigde materiaalmodellen zijn volop in ontwikkeling. Hergebruik van het zuivere beton daaruit én het metselwerk levert een grote bijdrage aan de circulariteitsdoelen. Daarnaast levert hergebruik van metselwerkpoeders een flinke CO₂-reductie op. Er is in potentie 10 miljoen ton metselwerk beschikbaar. Onze voorzichtige aanname is dat 5% van het metselwerkpoeder (0,5 miljoen ton)⁷⁰ in aanmerking komt om in gelijke hoeveelheden (één op één) cement⁷¹ te vervangen in cement-gebaseerde bindmiddelen of in alternatieve bindmiddelen zoals geopolymeren. Dit resulteert in een CO₂-reductie van circa 0,5 miljoen ton.⁷² Afgezet tegen 5 miljoen ton CO₂-reductie die het Betonakkoord tot doel stelt in 2050 is dat 10%.

Metselwerkpuin dat niet kan worden ingezet om cement te reduceren kan worden gebruikt als vulstof of fijne toeslag. Dat draagt weliswaar niet bij aan CO₂-reductie, maar kan wel het aandeel primaire grondstoffen in beton aanzienlijk reduceren: 10 miljoen ton metselwerk is al een derde van de vraag naar nieuw beton.

68 Bijvoorbeeld Baronio, G. en Binda, L. 1997 "Study of the Pozzolanicity of Some Bricks and Clays." *Construction and Building Materials*, Vol. 11 No. 1, pp. 41- 46, of 2007. R. D. Toledo Filho, J. P. Gonçalves, B. B. Americano, and E. M. R. Fairbairn, "Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil," *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 9, pp. 1357-1365.

69 Bijvoorbeeld Bugini, R. and A. Salvatori. 1993. "Investigation of the Characteristics and Properties of Cocciopesto from the Ancient Roman Period." *Conservation of Stone and Other Materials. Proceedings of the International RILEM/UNESCO Conference*, Paris, 1993, pp. 386-393.

70 Ter referentie: de jaarlijkse cementvraag in Nederland is ongeveer 5 miljoen ton.

71 Meer expliciet: in een gemengd cement kan bijvoorbeeld 20% van een specifieke soort fijngemalen baksteen 20% klinker vervangen (zie referenties puzzolane werking gemalen baksteen in voetnoot 65).

72 1 kg cement (CEM I, OPC) stoot grofweg 1 kg CO₂ uit bij productie (Eco-Invent database).

› 4. AAN DE SLAG MET MIMO

De doorgerekende voorbeelden laten zien dat de MIMO-aanpak werkt en wat dat op projectniveau kan betekenen. De aanpak wordt op dit moment ook al op kleine schaal beproefd. Een eerste generatie optimalisatie-software is beschikbaar en er zijn al flink wat materiaalmodellen die gekoppeld kunnen worden. De basis ligt er en samen met de sector kunnen we dus aan de slag met *resource based engineering* en de MIMO-aanpak.

Als de sector de aanpak stap voor stap breder gaat inzetten kan MIMO nog waardevoller worden. MIMO is namelijk zo opgezet dat nieuwe ontwerpvariabelen, eisen, data en bijhorende modellen kunnen worden toegevoegd en gekoppeld. De rekenkracht van de optimalisatie-software maakt dit mogelijk. Als we vol inzetten op het verder ontwikkelen en valideren van materiaalmodellen en de inbedding daarvan in rekenregels en regelgeving (route III in tekstkader 3) opent dat de weg voor impactvolle verduurzamingsopties die niet langs de route van gelijkwaardigheid kunnen worden toegepast. Belangrijk is daarnaast het ontwikkelen van gebruiksvriendelijke tools en dashboards die ondersteunen bij de invoer van data en afwegekaders. Als resultaat krijgen gebruikers een overzicht van de ontwerp oplossingen waarbij visueel inzichtelijk is wat de uitkomsten zijn voor de verschillende eisen.

In hoofdstuk twee beschreven we hoe MIMO de samenwerking in de sector kan ondersteunen. We halen de meeste waarde uit de MIMO-aanpak als die samenwerking gaat groeien: bedrijven, overheden en kennisinstellingen. Dan kan de MIMO-aanpak een *enabler* zijn in de ketenbrede transitie naar duurzamer beton. Partijen kunnen gezamenlijke afwegingen maken over het toepassen van de meest impactvolle verduurzamingsopties. Opdrachtgevers kunnen explicietere eisen ten aanzien van milieu en circulariteit meegeven in het inkooptraject. MIMO biedt ook de flexibiliteit om afwegingen en besluitvorming te ondersteunen als criteria hiervoor verder veranderen ten gevolge van de transitie naar duurzamer beton. Omdat risico's, kosten en baten van geoptimaliseerde ontwerpvarianten transparant en kwantitatief in beeld komen, kunnen er nieuwe businessmodellen ontstaan. Deze manier van samenwerking en het delen van verantwoordelijkheden, *collaborative business*, wordt vaak genoemd als noodzakelijke stap in de transitie naar een duurzame bouwketen.

Kortom, de basis is gelegd en van hieruit kunnen we samen met de sector aan de slag om de transitie te maken naar grootschalige *resource based engineering*. Zo geven we ruim baan aan duurzamer beton.

› CONTACT

Wilt u hierover meer weten neem contact met me op:

Jeroen Kruithof

jeroen.kruithof@tno.nl

Deze paper is tot stand gekomen in samenwerking met:

Agnieszka Bigaj-van Vliet, Marcel Vullings, Jeroen Kruithof, Jeanette Visser, Diego Allaix, Cécilia Braendstrup, Juan Garzón Amórtegui, Shang Jen Wang, Timo Nijland, Ron Oorschot, IJsbrand van Straalen, Arjen Adriaanse, Machteld de Kroon, Adri Vervuurt, Willy Peelen en Peter Rasker.