

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.

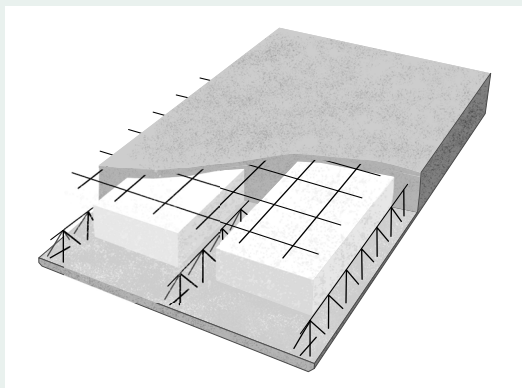
In het voorbeeld staan eigenschappen van het betongranulaat, afmetingen van de gewichtsbesparende elementen, vloerdikte, hoeveelheid wapening en de hoeveelheid betongranulaat in direct verband met constructieve veiligheid, kosten en milieu-impact voor elke ontwerpoptlossing. De materiaalmodellen die 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 ontwerpoptlossingen waar een keuze tussen gemaakt kan worden. Dat kan door aanvullende afweegcriteria in te voeren om de oplossingen te filteren, zoals een minimale hoeveelheid beton-

granulaat, 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 ontwerp oplossingen die nog voldoen aan aanvullende afweegcriteria, terwijl er nog één ontwerp oplossing 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 elementen¹ 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%.² 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

- 1 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.
- 2 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.

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 **ontwerpvraag (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/m³ (lager dan gemiddeld voor betongranulaat) en één met een dichtheid van 2400 kg/m³ (hoger dan gemiddeld voor betongranulaat).

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-reductie³) en minimaliseren van kosten.⁴

Hierin zijn **materiaalprestatie-modellen (stap 2)** gebruikt die wetenschappelijk onderbouwd zijn, waaronder modellen uit recent uitgegeven Nederlandse aanbevelingen en op handen zijnde Europese aanbevelingen.^{5, 6} 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.

3 MKI: Milieu Kosten Indicator.

4 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).

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

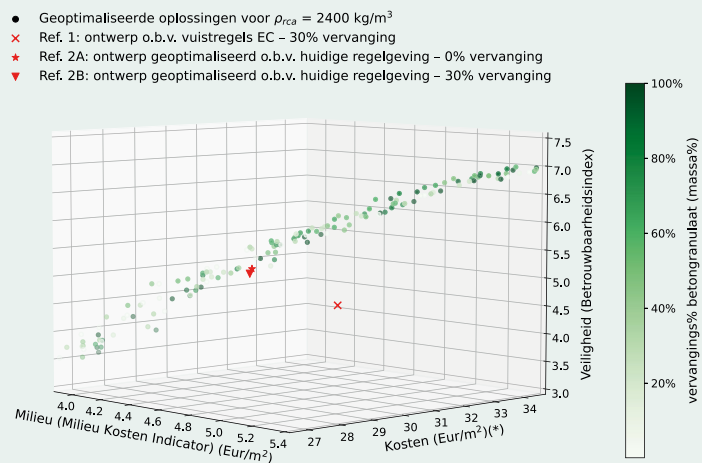
6 CROW-CUR Aanbeveling 127:2021. Beton met betongranulaat als fijn en/of grof toeslagmateriaal. Toelaatbare vervangingspercentages zonder aanpassing van de constructieve rekenregels.

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.

Als resultaat zien we:

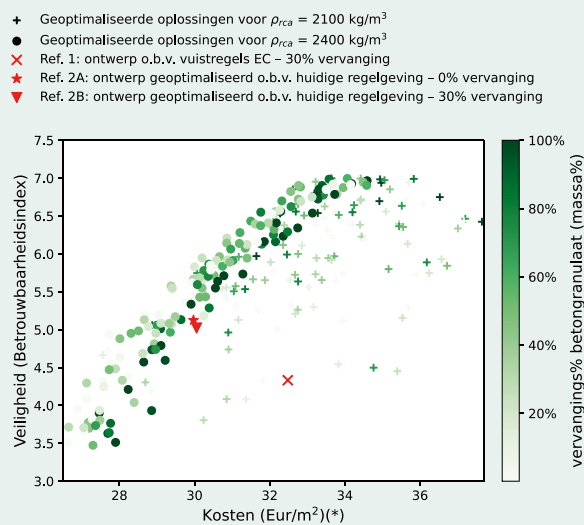
1. Gebruik van dichtheid van betongranulaat en koppeling van materiaalmodellen aan rekenregels geeft ontwerp oplossingen met hogere percentages betongranulaat dan wanneer standaard beperkingen worden aangehouden.

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/m³.

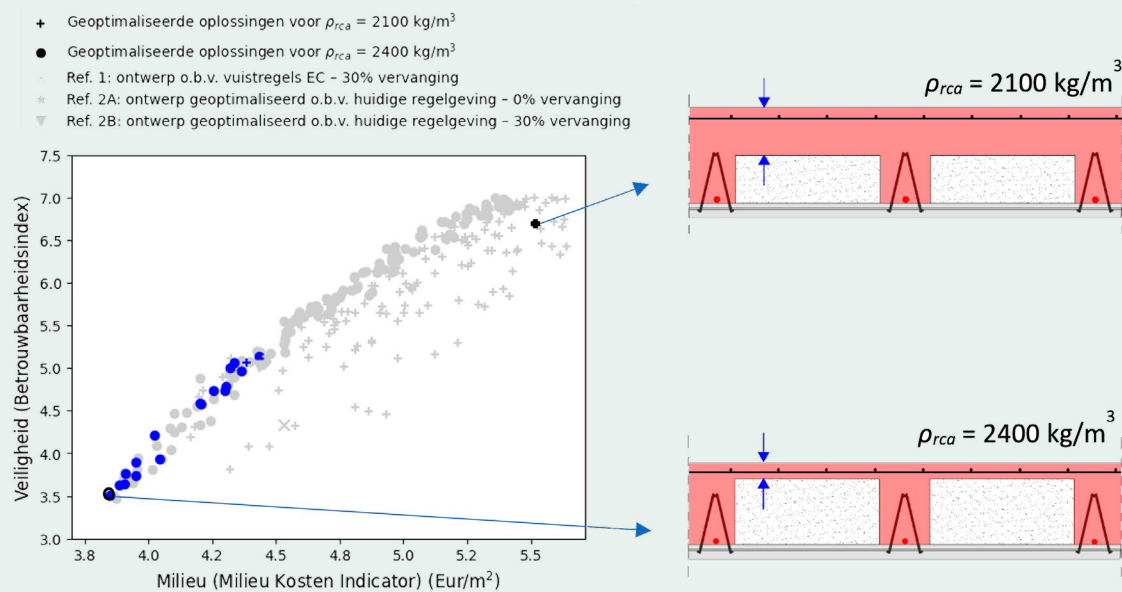
2. Voor hogere dichtheid van betongranulaat resulteert dit in een optimaal ontwerp met minder materiaalgebruik en dus lagere milieu-impact en kosten dan voor lagere dichtheid van betongranulaat, ook al liggen de materiaal-kosten van betongranulaat met lage dichtheid zelf iets lager. Bij betongranulaat 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 geplot 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}) 2100 kg/m^3 .

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.

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



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.⁷

Ben je naar aanleiding van het voorbeeld benieuwd naar meer informatie over MIMO?

[Download het paper hier](#)

⁷ Valcke, Bigaj-van Vliet, Allaix, Braendstrup, Visser, Amórtegui, Wang, Godoi Bizarro, Szklarz, Barros. Multi-criteria optimisation for sustainable concrete structures. Ingediend bij fib International Congres 2022 Oslo.