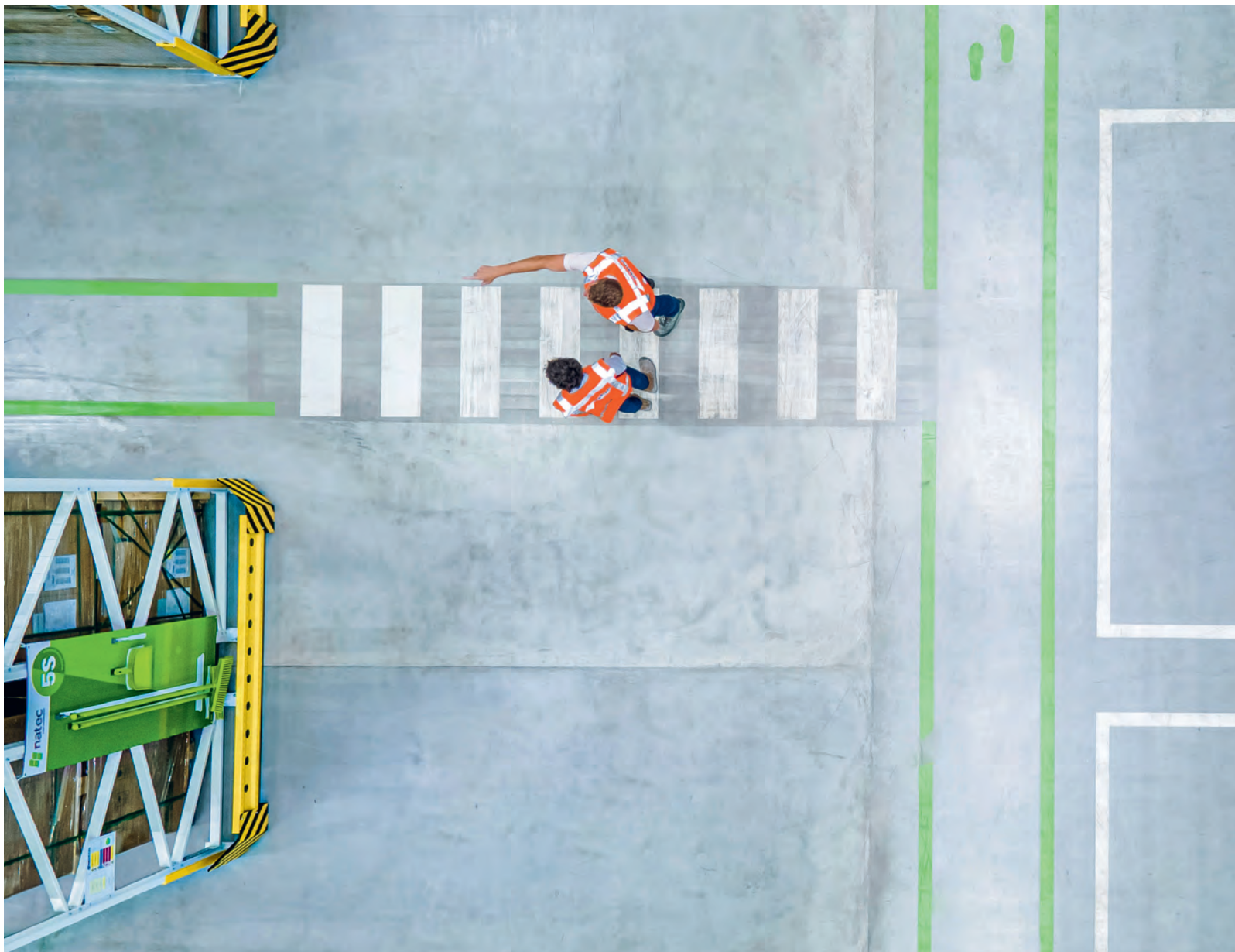


# Optimale korreelpakking VOOR CO<sub>2</sub>-ARME monolietvloeren



**Bedrijfsvloeren zijn een belangrijk toepassingsgebied van beton. Er is dus ook veel ervaring mee. Toch treden regelmatig schades op of zijn opdrachtgevers niet tevreden over het resultaat. Krimp is daarvan een belangrijke oorzaak. Beter gezegd: verhinderde krimp. Door meer aandacht te besteden aan het betonmengsel kan die krimp worden beperkt en kan ook nog eens op CO<sub>2</sub> worden bespaard.**

**M**et een relatief groot gebruiksooppervlak ten opzichte van het betonvolume (circa 6 m<sup>2</sup> voor elke m<sup>3</sup>) is een monolithisch afgewerkte betonvloer – kortweg ook wel monolietvloer genoemd – een van de moeilijkste en meest foutgevoelige constructies

in de betonwereld. Waar betonspecie qua eigenschappen doorgaans een vergevingsgezinde bandbreedte heeft, wordt bij betonvloeren elke onvolkomenheid aan het oppervlak vrijwel direct zichtbaar. Een ander probleem is scheurvorming door uitdrogingskrimp. In de

praktijk wordt de krimp in belangrijke mate verhinderd door de ondergrond, zelfs wanneer de vloer op een folie wordt gestort. Door deze verandering ontstaan trekspanningen in het beton. Als de treksterkte van het beton wordt overschreden, ontstaan er scheuren. Hoewel die scheurvorming kan worden beheerst door wapening in de vloer, kan ongewenste scheurvorming in de praktijk vaak niet volledig worden voorkomen.

#### ONDERZOEK

Maar wat als er in het beton vrijwel geen scheuren ontstaan door uitdrogingskrimp? Ofwel, wat als het betonmengsel zodanig wordt ontworpen dat er vrijwel geen krimp optreedt? Om hier antwoord op te krijgen is zeven jaar geleden, in opdracht van Van Berlo, op de TU/e een vijfjarig promotieonderzoek gestart.

Tegelijkertijd heeft de R&D-afdeling van Van Berlo gekeken naar de mogelijkheden voor het verduurzamen van betonvloeren. Die vloeren zorgen voor een groot deel van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van de bouw van bijvoorbeeld een distributiecentrum. Dit heeft geleid tot een nieuwe technologie, de zogenoemde Greymatter-technologie, die inmiddels in meerdere grote projecten is toegepast. Basis van deze technologie – waarmee eind 2023 de *Cobouw* Innovatie Award 2023 werd gewonnen – is een speciaal betonmengsel met een optimale korrelpakking.

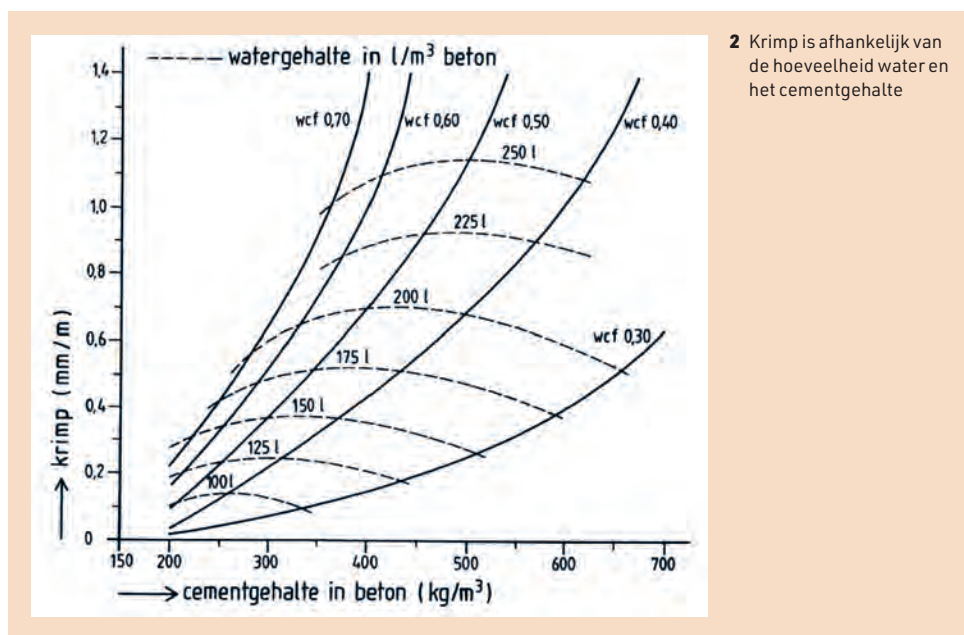
#### KRIMP

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van beton en krimp hebben indirect een relatie met elkaar. Daarom eerst terug naar het krimpprobleem. Er bestaan verschillende vormen van krimp. In monolietvloeren is het vaak uitdrogingskrimp die de grootste problemen veroorzaakt. In dit artikel gaat het om die specifieke vorm van krimp. Uitdrogingskrimp is het gevolg van het verdampen van het niet-gebonden water in het beton via de capillaire poriën. Door dit waterverlies trekken de poriën samen. Over het algemeen kan worden gesteld dat toeslagmaterialen zand en grind niet krimpen en dat het overgrote deel van de krimp optreedt in de aanwezige cementsteen. Meer over uitdrogingskrimp staat in *Betoniek Standaard 17/06 – Uitdrogingskrimp*.

De mate waarin beton krimpt, is sterk afhankelijk van de samenstelling, meer specifiek van

1 Bovenaanzicht monolietvloer. Foto Van Berlo

De mate waarin beton krimpt, is sterk afhankelijk van het water- en cementgehalte



## Een van de oplossingen voor het reduceren van het cementgehalte is een optimale korrelpakking

het water- en cementgehalte. Zoals uit figuur 2 blijkt, geldt hoe lager het watergehalte bij gelijkblijvend cementgehalte, hoe minder de krimp. Ook geldt: hoe lager het cementgehalte bij gelijkblijvende water-cementfactor, hoe lager de krimp.

Voor de verwerkbaarheid van de betonspecie is een minimumhoeveelheid water nodig. Uitgaande van een bepaalde water-cementfactor, nodig voor onder meer de sterkte, is daarmee ook een minimum cementgehalte nodig. Er zijn verschillende andere factoren die het cement-

gehalte in het beton bepalen, zoals de milieuklasse. Volgens NEN-EN 206 en NEN 8005 hoort bij een bepaalde milieuklasse een minimumhoeveelheid cement. Betonvloeren moeten in de meeste gevallen voldoen aan milieuklasse XC1 (binnenmilieu). Daarbij hoort een minimumcementgehalte van 260 kg/m<sup>3</sup> en een maximale water-cementfactor van 0,65.

Het cementgehalte in betonspecie voor monolietvloeren ligt over het algemeen rond 350 kg/m<sup>3</sup>. Als dit wordt teruggebracht naar 260 kg/m<sup>3</sup>

kun je flinke winst boeken. Minder cement zorgt niet alleen voor een lager risico op scheurvorming, maar leidt ook nog tot een gunstiger CO<sub>2</sub>-profiel. Maar hoe realiseer je een reductie van het cementgehalte van bijna 100 kg/m<sup>3</sup>?

### OPTIMALE PAKKING

Een van de oplossingen voor het reduceren van het cementgehalte is een optimale korrelpakking, ofwel een optimale opbouw van het toeslagmateriaal in het beton. Het toeslagmateriaal neemt zo'n 70% van de betonsamenstelling in. Zoals op foto 3 is te zien, bevinden zich holle ruimten tussen het toeslagmateriaal. De maatbeker aan de linker kant (foto 3) is gevuld met grindkorrels met een diameter tussen de 4 mm en 31,5 mm. Tussen de grindkorrels passen weer zandkorrels, die een maximale diameter hebben van 4 mm. Ook tussen de zandkorrels (maatbeker aan de rechterkant foto 3) zitten weer holle ruimten (foto 4). Als je deze holle ruimten vult met korrels kleiner dan zandkorrels, zoals kalksteenmeel of vliegas, dan beperk je het gehalte holle ruimten verder (fig. 5).

De korrelpakking is van invloed op veel relevante eigenschappen van zowel betonspecie als van het verharde beton. Dat geldt bijvoorbeeld voor de waterbehoefte en de verwerkbaarheid van betonspecie, maar ook voor de dichtheid en de sterkte van het verharde beton. Simpel gezegd geldt hoe minder holle ruimten in het korrelpakket, hoe minder cement je nodig hebt. Meer over korrelpakking staat in *Betoniek Standaard 16/21*.

### Pakkingsmodellen

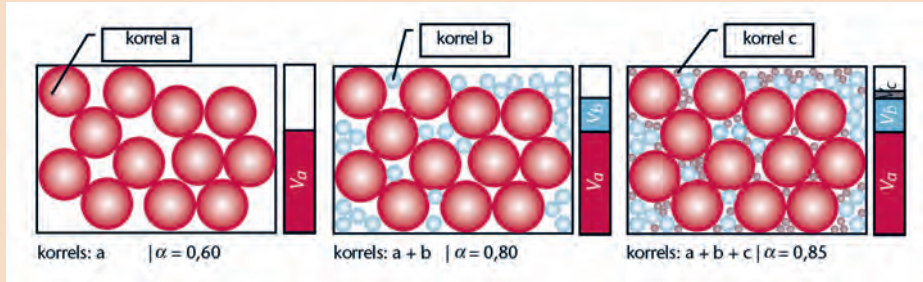
Wat de optimale korrelpakking is, is niet eenvoudig vast te stellen. Dit kan op basis van testen in het laboratorium, maar dat vraagt een grote inspanning. Het is efficiënter hiervoor een model te gebruiken. In de eerdergenoemde promotiestudie heeft de TU/e een korrelpakkingmodel specifiek voor monolietvloeren opgesteld. Het gebruik van pakkingsmodellen is niet nieuw in de betonwereld. In *Betoniek* zijn er verschillende artikelen over geschreven (zie ook *Betoniek Standaard 16/21*). Voor de kenners zijn ook de ontwerpgebieden voor toeslagmateriaal gesneden koek. Die weten dat een korrelverdeling in ontwerpgebied I minder water vraagt dan een korrelverdeling in ontwerpgebied II. Deze ontwerpgebieden gaan echter terug tot een minimale korreldiameter van 0,063 mm.



3 Maatbekers met grind- en zandkorrels



4 Zandkorrels onder een microscoop



5 Drie mengsels met verschillende korrelopbouw

### DE PRAKTIJK MET MONOLIETVLOEREN

Na het afronden van het genoemde promotieonderzoek heeft de R&D-afdeling van Van Berlo de kennis verder ontwikkeld naar de Greymatter-technologie voor monolietvloeren. Deze technologie gaat uit van een optimale korrelpakking. Om een optimale korrel-

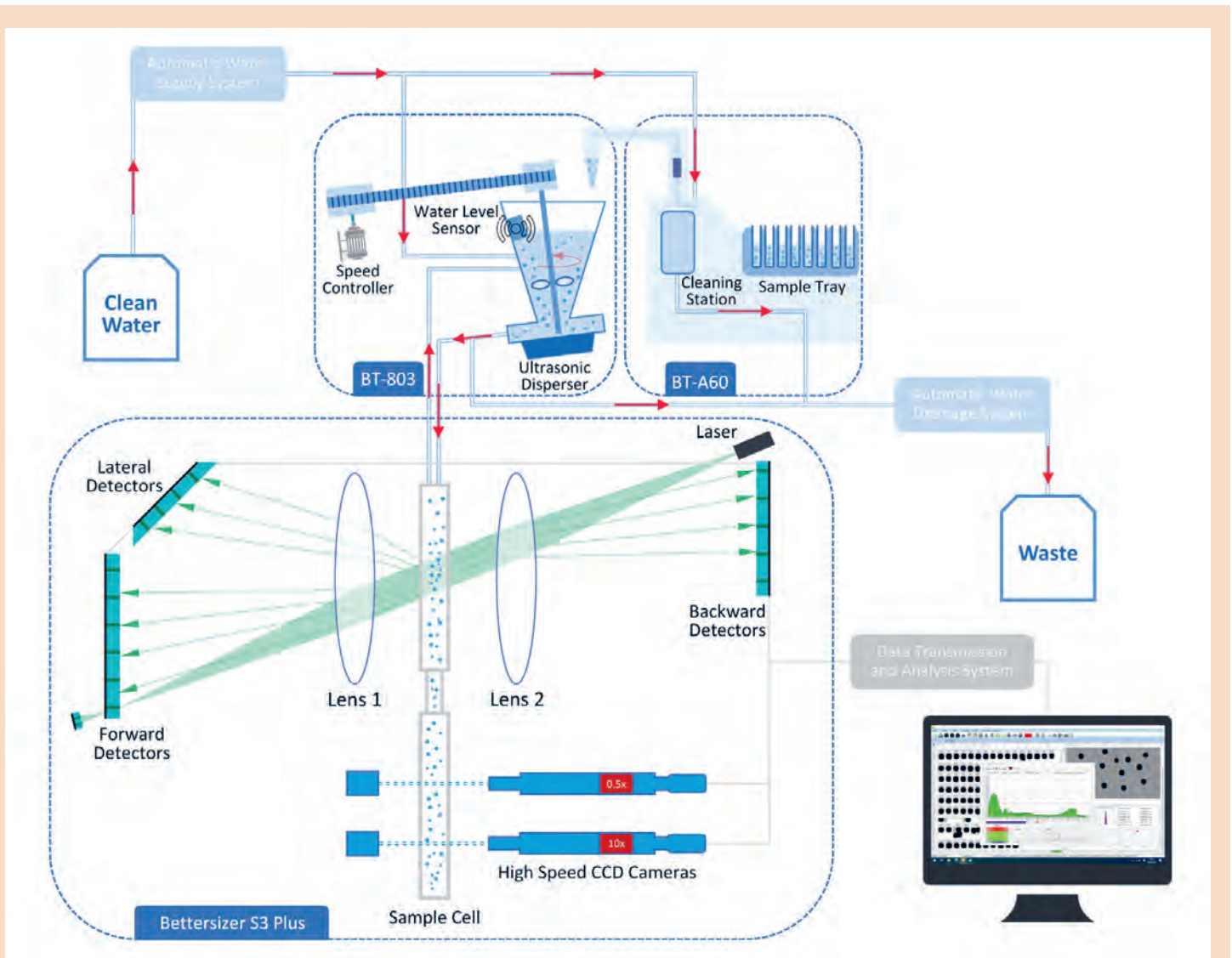
pakking te kunnen realiseren, worden per project de beschikbare grondstoffen uitgebreid geanalyseerd. Dit betekent voor het toetslagmateriaal dat naast de standaard zeven-set, ook de tussenzeven worden gebruikt. Ook de korrels kleiner dan 0,063 mm van de poeders worden meegenomen. Hiertoe wordt

gebruikgemaakt van een apparaat dat door middel van statische lichtverstrooiing de diameters van de korrels met een diameter van 0,01 µm tot en met 2 mm vastlegt (fig. 6).

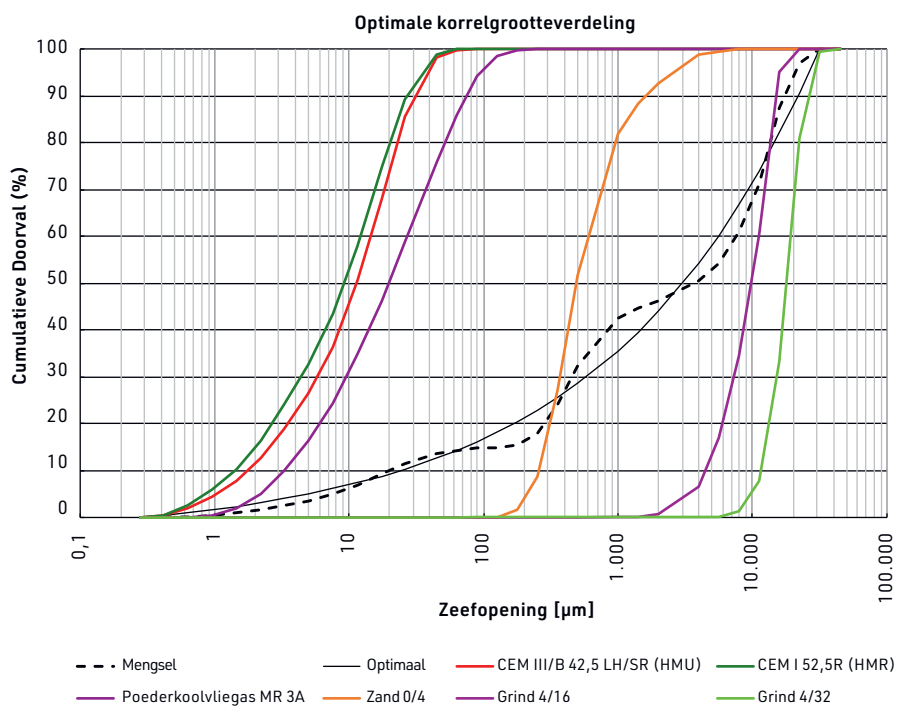
De optimale korrelpakking in de technologie wordt bepaald met behulp van het Andreasen & Andersen pakkingsmodel. Hierbij wordt de volgende formule gebruikt, die bekendstaat als de gemodificeerde Andreasen & Andersen formule:

$$P_{\text{Target}}(D_i) = \frac{D_i^q - D_{\text{min}}^q}{D_{\text{max}}^q - D_{\text{min}}^q}$$

Een voorbeeld van een optimale korrelverdeling is te zien in de grafiek van figuur 7. De gekleurde lijnen zijn de verschillende korrelverdelingen van de verschillende grondstoffen. De zwarte lijn is de theoretisch optimale korrelverdeling. Door middel van het toepas-



6 Grafische weergave laserdiffractie korrelverdeling poeders (bron: 3P Instruments)



7 Weergave korrelgrootteverdeling grondstoffen en optimale korrelgrootteverdeling

sen van het pakkingsmodel kan worden bepaald hoeveel van elke grondstof nodig is om deze optimale korrelverdeling zo veel mogelijk te benaderen. De gestreepte zwarte lijn is de meest optimaal haalbare korrelverdeling van de verschillende grondstoffen. In de grafiek is duidelijk te zien dat de gestreepte lijn de optimale lijn niet helemaal volgt. De afwijking van de gestreepte lijn ten opzichte van de optimale lijn kan vervolgens worden berekend door middel van de kleinste kwadratenmethode. Het berekende getal zegt iets over deze afwijking: hoe groter het getal, hoe groter de afwijking. De mate van afwijking bepaalt de waterbehoefte van het korrelpakket. Een grotere waterbehoefte zal automatisch leiden tot meer krimp. Een alternatief is het verhogen van de hoeveelheid plastificeerder. Nadeel hiervan is dat de 'taaiheid' (ofwel: viscositeit) van het betonmengsel toeneemt en daarmee het verwerkingsproces wordt benadeeld. Bij een te grote afwijking kan besloten worden om met andere grondstoffen te gaan werken. Op deze manier wordt de geschiktheid van de grondstoffen van de verschillende betoncentrales in kaart gebracht.

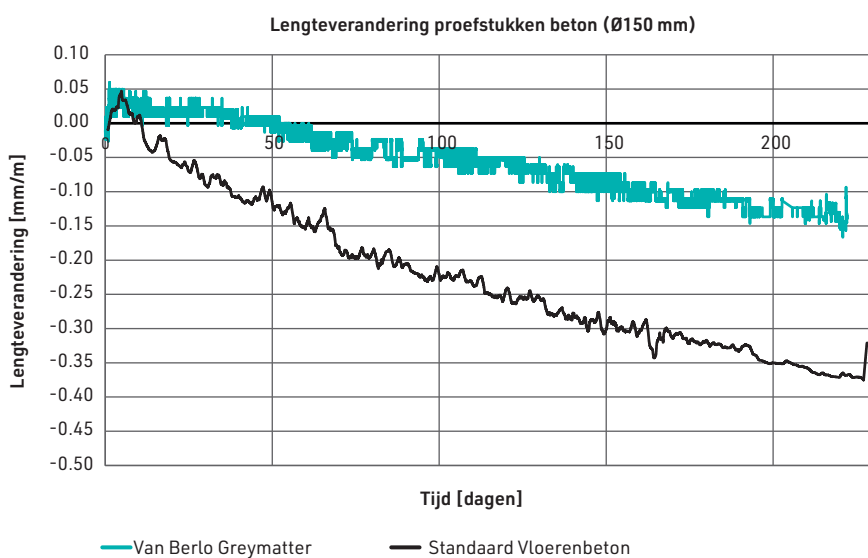
## RESULTAAT

Door middel van het toepassen van het pakkingsmodel wordt een basisbetonmengsel verkregen. Door gebruik te maken van een optimale korrelpakking kan een recept worden gemaakt met  $260 \text{ kg/m}^3$  cement, een kwart minder dan gebruikelijk. Zoals eerder toegevoegd, wordt door de hoeveelheid cement te reduceren de gevoeligheid voor uitdrogingskrimp beperkt. Dit wordt bevestigd door het jarenlang uitvoeren van krimpmetingen op prisma's en cilinders (foto 8). Om een duidelijk beeld te geven van het verschil in lengteverandering tussen een standaard vloerenbeton en een vloerenbeton volgens de Greymatter-technologie, zijn de krimpresultaten van deze twee verschillende samenstellingen uitgezet in de grafiek van figuur 9. Niet alleen worden langdurig-krimpmetingen onder laboratoriumomstandigheden uitgevoerd, maar worden ook op projectbasis sensoren in de vloer gestort om in-situ-krimpmetingen te monitoren (foto 10).

Door het beperken van de krimp wordt ook het risico op scheurvorming gereduceerd en hoeft er minder of zelfs geen krimpwapening te worden aangebracht. Wapeningsconfiguraties kunnen



8 Jarenlang onderzoek naar lengteverandering van verschillende recepturen



9 Verschil in lengteverandering tussen vloerenbeton volgens de Greymatter-technologie en standaard vloerenbeton

10 In-situ-krimpmetingen



daarom effectiever worden gekozen. Bij elkaar opgeteld zorgt het reduceren van de hoeveelheid cement en het beperken van de hoeveelheid wapening voor een aanzienlijke CO<sub>2</sub>-reductie. Op dit moment wordt de reductie van de hoeveelheid cement beperkt tot 260 kg/m<sup>3</sup>, het volgens de norm minimum cementgehalte voor milieuklasse XC1 (binnenvloeren). De hoeveelheid cement zou nog verder naar beneden kunnen, als de regelgeving dit zou toelaten. Daarvoor is op dit moment een apart testtraject nodig.

#### HULPSTOFFEN

Door het beperken van het cementgehalte, moet voor een goed resultaat ook het watergehalte naar beneden. Dat heeft echter invloed op de verwerkbaarheid. Door gebruik van speciaal voor Van Berlo ontwikkelde hulpstoffen, is ook hier een oplossing voor gevonden (hierin schuilt onder andere het geheim van de smid). Het basisbetonmengsel wordt door een geselecteerde betoncentrale geleverd op de bouwplaats. Hieraan wordt door Van Berlo de hulpstof op maat toegevoegd. Elke betonmixer wordt vooraf door betonspecialisten van Van Berlo gekeurd, voordat de hulpstof wordt toegevoegd. Om dit proces te automatiseren, wordt er op dit moment gewerkt aan een doseerinstallatie die aan de hand van sensormetingen de benodigde hulpstoffen zelfstandig kan toevoegen.

#### CIRCULAIR BETON

Als naast het verlagen van het cementgehalte door de nieuwe technologie ook nog een gedeelte van de primaire grondstoffen wordt vervangen door secundaire grondstoffen, wordt de CO<sub>2</sub>-footprint van de betonvloer verder verlaagd. Een mooi voorbeeld hiervan is het project Houtlab in Nieuwkuijk (foto 11). Hier is 50% van het riviergrind vervangen door secundair grof materiaal (Freegravel van New Horizon & Rutte



11 Storten van de CO<sub>2</sub>-arme, scheurvrije en circulaire staalvezelbetonvloer Houtlab in Nieuwkuijk

#### NATIONALE MILIEUDATABASE

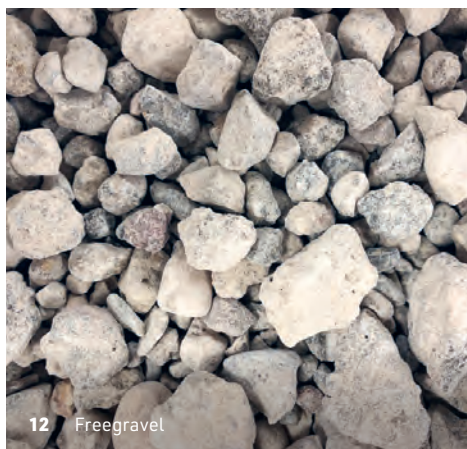
In de Nationale Milieudatabase (NMD), beheerd door de Stichting Nationale Milieudatabase, staan milieuprofielen (EPD's) van bouwproducten. Op dit moment wordt gewerkt aan een traject om de betonvloeren op te nemen in de NMD.

Groep) (foto 12). Dit type betongranulaat is dankzij een speciaal breekproces ronder en schoner dan regulier betongranulaat. Dit betekent niet alleen een lagere waterabsorptie, maar ook dat de korrels beter in elkaar passen en het dus mogelijk is een hogere pakkingsgraad te krijgen. In de betonsamenstelling is naast dit betongranulaat ook gemalen hoogovenslak en poederkoolvlieggas gebruikt. Het aandeel secundair materiaal is daarmee in totaal bijna 32%. Doordat het mengsel is ontworpen met een lagere krimpverwachting, kon ook van een hybride wapening (traditionele wapening + staalvezels) de overstap worden gemaakt naar alleen staalvezels. Door de Grey-matter-technologie te combineren met secundaire grondstoffen is in dit project een CO<sub>2</sub>-besparing van grofweg 40% behaald op basis van verbruikte materialen ten opzichte van een standaardoplossing. Het grootste deel van deze besparing, ongeveer 85%, is te danken aan

cement- en staalreductie. De overige 15% is te danken aan het gebruik van circulair materiaal.

#### KWALITEIT

De betonwereld, van ingenieursbureau tot cementindustrie, staat niet stil als het gaat om verduurzaming. Met diverse ontwikkelingen vanuit verschillende invalshoeken worden stappen gezet in verduurzaming. Dat moet uiteraard niet ten koste gaan van kwaliteit en levensduur. Daar moet te allen tijde voldoende oog voor zijn. Dat geldt zeker ook voor monolietvloeren, zoals eerder aangegeven misschien wel de moeilijkste en meest foutgevoelige betonconstructie om te maken. Elke nieuwe ontwikkeling moet daarom uitvoerig worden onderzocht op geschiktheid. Mede door het relatief grote gebruiksoppervlak per m<sup>3</sup> beton kunnen onverwachte effecten enorme schades tot gevolg hebben, met in eerste instantie verlies aan functionaliteit van de vloer en in tweede instantie financiële schadeposten. ■



12 Freegravel

#### DISTRIBUTIECENTRUM HELMOND

Voor het project Distributiecentrum Rietbeemdweg in Helmond is in september 2022 een zeer vlakke bedrijfsvloer (DIN 15.185) van 11.000 m<sup>2</sup> met een lage CO<sub>2</sub>-footprint gerealiseerd. In dit project is voor het betonmengsel de in dit artikel beschreven technologie toegepast, gecombineerd met een duurzamer wapeningsontwerp.

Dit heeft geleid tot een CO<sub>2</sub>-besparing van grofweg 32% op basis van verbruikte materialen ten opzichte van een standaardoplossing.