1

Positief toekomstbeeld dankzij nieuwe recylingmethoden beton

Ambities reductie primaire grondstoffen alleen kansrijk met innovaties

Kansen in de circulaire economie zijn er voor beton volop. Hoewel de winst het grootste is door hergebruik van gebouwen of constructies is het bekendste voorbeeld nog altijd het hergebruik van betonpuin als granulaat in nieuw beton. Maar dat laatste levert lang niet altijd een reductie op van de CO_2-uitstoot. Door nieuwe recyclingmethoden kunnen de kwaliteit en vervangingspercentage van het granulaat echter flink worden verhoogd en ontstaan meer kansen met betrekking tot CO_2-reductie.

In het Rijksbrede programma Nederland Circulair in 2050 [1] is uiteengezet hoe we de economie kunnen ombuigen naar een duurzame, volledig circulaire economie in 2050. Het programma, gelanceerd in 2016, omschrijft wat nodig is om zuiniger en slimmer met grondstoffen, producten en diensten om te gaan. In 2018 is een Betonakkoord [2] opgesteld, een nationaal ketenakkoord voor duurzame groei van de betonsector, dat is ondertekend door overheid en bedrijfsleven (opdrachtgevers, aannemingsbedrijven, ingenieursbureaus, recyclingbedrijven, grondstoffenleveranciers, betonleveranciers). In dit akkoord zijn onder andere afspraken gemaakt over welke ketenpartner welke doelen en ambities gaat realiseren. Om een concrete aanpak te formuleren zijn er binnen het Betonakkoord op een aantal onderwerpen uitvoeringsteams opgesteld: CO_2-reductie, circulair ontwerpen, hergebruik betonreststromen, impact op natuurlijk kapitaal, MKI, kennis en innovatie, en onderwijs en kennisdeling. Deze teams zijn inmiddels klaar met hun werk en zijn opgeheven.

Hergebruik beton

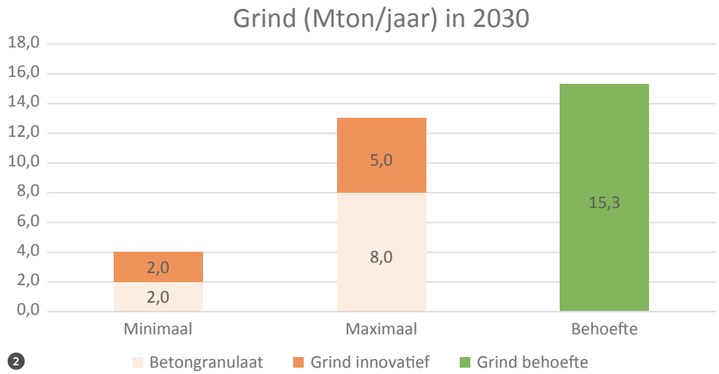
Betonpuin kan, mist aan bepaalde voorwaarden wordt voldaan, uitstekend in nieuw beton worden hergebruikt. Belangrijk daarbij is dat de verduurzaming van de betonketen in ieder geval niet ten koste mag gaan van de kwaliteit van het beton. Immers, een kortere levensduur komt de duurzaamheid van het beton ook niet ten goede. Het doel is dus een zo hoogwaardig mogelijk hergebruik.

Daarom moeten net als aan primaire grondstoffen, ook aan hergebruikte grondstoffen kwaliteitseisen worden gesteld. Daarbij geldt dat de mate waarin materialen kunnen worden hergebruikt samenhangt met de kwaliteit en zuiverheid van het bronmateriaal. Zo geldt voor alle stromen recyclinggranulaat conform beoordelingsrichtlijn BRL 2506 dat er maximaal 1% m/m. niet steenachtig materiaal (zoals hout en/of plastic) aanwezig mag zijn. Ondanks dit ogenschijnlijk lage percentage wordt het voor de praktijk in sommige toepassingen als te veel ervaren en/of als risico beschouwd (bijv. drijvende bestanddelen). Er zijn echter ook producenten die een lager percentage kunnen realiseren en daarmee zondermeer vergelijkbaar zijn met ‘verontreinigingen’ (waaronder oerhout) die ook in natuurlijk primair materiaal kunnen voorkomen.

Door het uitvoeringsteam ‘Hergebruik betonreststromen’ van het Betonakkoord is in de ‘Roadmap Hergebruik Betonreststromen’ [3] omschreven hoe moet worden omgegaan met het hergebruik van →

1 Recycling van vrijgekomen beton(puin) voor de toepassing in nieuw beton, foto: Remko Kerkhoven / Betonhuis

Dankzij de nieuwe recyclingtechnieken zijn er nieuwe routes beschikbaar gekomen om te onderzoeken hoe 'oud' bindmiddel een tweede leven gegeven kan worden als (nieuw) bindmiddel



2

Tabel 1 Beschikbare hoeveelheid betonpuin 2018-2030 [3]

	2018	2020	2025	2030
vrijkomend puin in NL (totaal) [Mton]	19	20	22	25
betonpuin [Mton]	11,4	12	13,2	15

Tabel 2 Ambitiepercentage van de beschikbare fractie van het aanbod van betonreststromen in welk jaar toegepast wordt in nieuw beton [2]

percentage van het gerecyclede aanbod	2020	2025	2030
grind	50%	75%	100% [1]
zand	10%	50%	100%
bindmiddel/vulstof	1%	25%	100%

[1] 100% komt overeen met het vervangen van circa 15 – 20% primaire grondstoffen

3a

3b

auteur

DR.IR. MARC OTTELÉ

Universitair Docent / Onderzoeker
TU Delft, Faculty of Civil Engineering & Geosciences, Department 3MD, Materials & Environment Section, Sustainability Research Group

grondstoffen. Zo wordt benoemd dat toeleveranciers in 2030 een kwaliteit leveren van betongranulaat die 100% hergebruik in nieuw beton mogelijk maakt, waarbij het groeipad zoals gesteld in tabel 2 het uitgangspunt vormt (zie ook kader 'Betonrestromen in het Betonakkoord'). In diezelfde 'Roadmap Hergebruik Betonreststromen' wordt verder expliciet aangegeven dat er meer aandacht gegeven moet worden aan de toepassing van de fijne fractie betongranulaat, omdat anders de hergebruikdoelstellingen niet kunnen worden behaald.

In dit artikel wordt nader ingegaan op het thema hergebruik en dan met name het (hoogwaardig) hergebruik van vrijgekomen beton(puin) voor de toepassing in nieuw beton.

Moderne recyclingmethoden

Het hergebruik van beton is aan bepaalde grenzen gebonden. Dat komt onder meer doordat toepassing invloed kan hebben op mechanische en fysische eigenschappen alsmede de beoogde levensduur. De grenzen hangen af van de kwaliteit van het granulaat. Bepalend is bijvoorbeeld de hoeveelheid cementsteen die aan de korrels hecht. Dit cementsteen zorgt er namelijk voor dat het granulaat poreuzer is dan primair toeslagmateriaal. Daarnaast leidt het tot een lagere volumieke massa. Momenteel zijn nieuwe betonrecyclingmethoden (scheidingstechnieken) beschikbaar, die zich richten op het zo schoon mogelijk terugwinnen van de oorspronkelijke basisgrondstoffen voor beton: zand, grind en bindmiddel, met als doel deze materialen, al dan niet geüpcycled, zo hoogwaardig mogelijk te kunnen toepassen in de bouwsector (verderop meer over deze methoden).

Enerzijds hebben deze methoden de potentie om materialen zodanig te scheiden dat (volledige) hoogwaardige herinzet (grotere vervangingspercentages) in beton(mengsels) mogelijk is, met behoud van kwaliteit. Anderzijds zijn er ook nieuwe routes beschikbaar gekomen om te onderzoeken hoe 'oud' bindmiddel een tweede leven gegeven kan worden, als (nieuw) bindmiddel (al dan niet gedeeltelijk opgewerkt) in nieuwe betonmengsels (zie hiervoor ook *Betoniek Vakblad* 2020/3 'Terugwinnen van cement uit beton' [4]). Zo is er een lopend promotieonderzoek gaande bij de faculteit Civiele Techniek (afdeling 3MD, sectie M&E, Sustainability research group), dat zich met name richt op deze zeer fijne teruggewonnen fractie met als doelstelling om hier weer een geschikt bindmiddel van te maken. Maar ook andere niet eerder gestelde onderzoeksvragen worden relevant in het kader van het bepalen van de kwaliteit (gebruikte bindmiddel/vulstoffen/toeslagmateriaal) vooraf in de constructie, om zo tot een efficiënte waardebepaling te komen van het gerecyclede materiaal (zie *Cement* 2021/8 'Selectief slopen van betonconstructies' [5]).

Met bijvoorbeeld windshiftingtechnieken kan gehydrateerd cement gescheiden worden van ongehydrateerd cement. Juist het hergebruiken van cement/bindmiddel kan leiden tot een grote reductie van CO_2, omdat dat het gebruik van primair cement kan beperken. Implementatieroutes om het (oude) teruggewonnen bindmiddel (zo hoogwaardig) mogelijk toe te passen zijn:

1 Als een inerte vulstof (type I addition) direct in het nieuwe beton;
2 Als een reactieve vulstof (type II addition) direct in het beton, waar het gebruikt kan worden als vervanger van primair cement;
3 Als een ruwe grondstof voor klinkerproductie, waardoor minder primaire kalksteen nodig is, wat resulteert in lagere initiële CO_2-reductie;
4 Als een ruwe grondstof voor samengestelde cementen (bijvoorbeeld als vervanger van vliegas/tras etc.);
5 In combinatie met (alkalische) activator als een type geopolymeer.

Nieuwe regelgeving

De innovatieve scheidingstechnologieën hebben een kansrijke route geopend om een onderdeel te vormen in het (hoogwaardig) sluiten van kringlopen in de betonsector. Het ontbreken van regelgeving voor de (algemene) toepassing van deze moderne scheidingsmaterialen vormt op dit moment echter (nog) een belemmering. In diverse gremia staat het thema wel geagendeerd zoals in de uitvoeringsteams 'Kennis en innovatie' en 'Hergebruik betonreststromen'. In november 2021 is er een nieuwe CROW-CUR Aanbeveling verschenen voor het gebruik van de fijne en grove fractie recyclinggranulaten verkregen uit (met name) moderne scheidingstechnologieën (CROW-CUR Aanbeveling 127 Beton met betongranulaat als fijn en/of grof toeslagmateriaal [6], zie artikel 'Hogere percentages hergebruik dankzij innovatieve recyclingmethoden' elders in dit nummer). Het daarin toegestane vervangingspercentage wordt direct gekoppeld aan de waterabsorptie en daarmee aan de kwaliteit van het fijne en grove betongranulaat. Dit is een nieuwe aanpak ten opzichte van de regels in de CUR-Aanbevelingen 106 [7] en 112 [8] (tabel 3).

Op dit moment ontbreekt het nog aan een concreet toekomstig ontwikkelpad voor hergebruik van het teruggewonnen bindmiddel (bijvoorbeeld op het niveau van een aanbeveling), al zijn er Europese ontwikkelingen (CEN-TC51) waarbij er gewerkt wordt aan de mogelijkheid om 20% cementsteenrecyclaat als grondstof (main constituent) toe te →

BETONRESTROMEN IN HET BETONAKKOORD

In het Betonakkoord zijn de volgende ambities geformuleerd over het hergebruik van betonreststromen:
- 100% van al de betonreststromen is in 2030 op een kwaliteitsniveau dat het toegepast kan worden in nieuw beton, waarbij er transparantie is over de herkomst en samenstelling van de reststromen, en aansluiting op erkende keurmerken en transparante meetmethodes.
- 100% van al de betonreststromen wordt in 2030 toegepast op een wijze dat het blijvend toegepast kan worden in nieuw beton, met andere woorden dat door toepassing geen vervuiling en dergelijke optreedt, die toekomstig hergebruik in de weg staat.
- 100% terugname door de betonketen van al de vrijkomende betonreststromen per 2030.

2 Vergelijking vraag en aanbod grof toeslagmateriaal [3]
3 Traditioneel breken van beton levert twee deelstromen; te noemen grof betongranulaat (a) en (b) de fijne betongranulaatfractie

Tabel 3 Maximaal hergebruikpercentage; relatief beschouwd bij toepassing van bestaande CUR-Aanbevelingen [7,8] en de recent uitgekomen CROW-CUR Aanbeveling 127:2021 [6] voor moderne recyclinggranulaten, uitgedrukt per m^3 beton (enkel toeslagmateriaal fijn (zand) en grof (grind))

	reductie primaire materialen		**ambitie 2030 (50% circulair)**	**ambitie 2050 (100% circulair)**
CUR 106 opties fijn recyclinggranulaat	max. 50% fijn	max. 50% fijn + max. 20% grof	niet realiseerbaar	niet realiseerbaar
hergebruikpercentage (per m^3)	**ca. 17%**	**ca. 26%**		
CUR 112 opties grof betongranulaat	≥30% grof	max.100% grof	niet realiseerbaar	
hergebruikpercentage (per m^3)	**ca. 13%**	**ca. 43%**		
CROW-CUR 127 Beton met betongranulaat als fijn en/of grof toeslagmateriaal	max. 60% fijn + max. 100% grof		realiseerbaar	
hergebruikpercentage (per m^3)	**ca. 64%**			
toekomstige noodzakelijke ontwikkelingen				
ontwikkelpotentieel hergebruik en/of activatie (reactieve) vulstof	bijdrage aan bestaande mogelijke hergebruik-percentage (per m^3) ca. 15%		realiseerbaar	kansrijk
hergebruikpercentage (per m^3)	**ca. 79% tot 100%**			
doorontwikkeling van fijn recyclinggranulaat verkregen uit moderne scheidingstechnologieën (vervanging van max. 60% naar 100%)	bijdrage aan bestaande mogelijke hergebruik-percentage (per m^3) ca. 15%		realiseerbaar	kansrijk
hergebruikpercentage (per m^3)	**ca. 79% tot 100%**			

TOEPASSING BETON EN GRANULAAT

Het is de verwachting dat in 2030 het totale verbruik van beton per jaar zal toenemen tot ongeveer 15 miljoen m^3 beton. Hiervoor is circa 27,8 miljoen ton toeslagmaterialen nodig (75 vol%), waarvan 12,5 miljoen ton zand (45%) en 15,3 miljoen ton grind (55%). Daarnaast is voor de productie van beton naar schatting 4,8 miljoen ton cement nodig [3].
In het meest gunstige geval kunnen we ervan uitgaan dat in 2030 circa 15 miljoen ton betonpuin beschikbaar is voor de toepassing in nieuw beton (tabel 1). De massaverdeling over de verkregen grove (4-32 mm) en de fijne (0-4 mm) fractie granulaat is ongeveer gelijk (50/50).
Momenteel vindt hergebruik van bewerkt (schoon) betonpuin als toeslagmateriaal voor beton, zelfs in het toch wel vooruitstrevende Nederland, nog maar beperkt plaats. Dit ondanks het feit dat het al sinds de jaren 80 onderwerp van studie is. Gerecycled beton wordt grotendeels (fijne en grove fractie samen), vermengd met <50% vreemd materiaal (steenachtig zoals kalkzandsteen, metselwerk en keramiek), gebruikt als funderingsmateriaal voor wegen.
Als betonpuin wordt hergebruikt in beton dan betreft het voornamelijk de grove fractie (bestaande uit minimaal 90% beton), ter gedeeltelijke vervanging van primair toeslagmateriaal (met name grind). De fijne fractie (ook wel brekerzand genoemd) kan niet volwaardig worden ingezet in beton omdat korrelopbouw en samenstelling vaak niet voldoen aan de in de toeslagmateriaalnormen gestelde eisen. Dit laatste betekent concreet dat wanneer de gebroken fijne en grove fractie worden gescheiden, een overschot aan fijn recyclinggranulaat (brekerzand) overblijft waar geen nuttige toepassing (zelfs niet voor funderingsmateriaal) voor kan worden gevonden.

Dit alles leidt ertoe dat er een gat gaapt tussen het aanbod aan secundair toeslagmateriaal en de behoefte (fig. 2), maar ook dat er een niet-herbruikbaar aandeel overblijft in het geval van traditionele recycling, waardoor de uiteindelijke beoogde circulariteit niet haalbaar is.

voegen aan de cementproductie. Uiteraard moet deze ontwikkeling in perspectief worden geplaatst met overige verduurzamingsmogelijkheden (handelingsperspectieven) zoals benoemd in het Betonakkoord, maar het geeft duidelijk weer dat het veld op dit moment in ontwikkeling is, met een diversiteit aan verduurzamingsopties met bijbehorende nieuwe, zowel wetenschappelijke als praktische, vraagstukken.

Recyclingmethoden

Zoals eerder aangegeven zijn er op dit moment innovatieve mechanische recyclingmethoden in ontwikkeling en/of maken deze de stap naar verdere implementatie in de markt. De vier voornaamste technieken zijn:
- Smart Liberator
- C2CA
- Circulair Mineraal
- Mangeler

De drie eerstgenoemde methoden hebben al installaties die op praktijkschaal kunnen produceren. De Mangelertechniek verkeert in een opschaalfase, maar zal naar verwachting binnenkort de stap naar praktijkschaal zetten. Hieronder worden deze vier technieken nader toegelicht.

Smart Liberator De in Nederland inmiddels verst ontwikkelde techniek is de Smart Liberator, bij het Nederlandse bedrijf Smart Circular Products/Urban Mine (*Betoniek Vakblad* 2020/1 'Een overzicht van innovatieve recyclingmethoden' [9]). Met deze scheidingstechniek, waaruit vijf productstromen ontstaan, kan de aangehechte cementsteen door afschuifkrachten van het oorspronkelijke zand en grind worden verwijderd. De verpoederde cementsteen komt hierbij als een aparte productiestroom vrij en kan bijvoorbeeld als vulstof direct in beton worden ingezet.

De hoogwaardige deelstromen zijn verkrijgbaar onder de productnamen:
- Freegravel – Grindfractie (> 4 mm)
- Freesand – Zandfractie (0,25 mm/4 mm)
- Freefiller C – Fijne fractie (0,08/0,25 mm), geschikt als vulstof
- Freement – Superfijne reactieve fractie (0,04/0,08 mm), geschikt als cement/bindmiddel
- Freefiller F – Ultrafijne fractie (0/0,04 mm), geschikt als bindmiddel/activator

4

5

C2CA De C2CA-methode (Concrete to Cement & Aggregates) is ontstaan uit een spin-off tussen een samenwerkingsverband van GBN Groep (onderdeel van Strukton) en TU Delft. Met behulp van het ADR-systeem (Advanced Dry Recovery) wordt het verzamelde betonpuin direct vanaf de breker droog gescheiden en bewerkt. Op basis van soortelijk gewicht en afmetingen wordt het betonpuin tijdens het proces zorgvuldig, automatisch gescheiden in minimaal drie productstromen met de volgende benaming:
- Circugrind – Grove fractie (> 4 mm)
- Circuzand – Fijne fractie (< 4 mm)
- Circument – Ultrafijne fractie (< 0,2 mm), geschikt als cement/bindmiddel

Circulair Mineraal Circulair Mineraal (CM) is een initiatief van zes Nederlandse sloop- en recyclingbedrijven. In de zogenoemde CM-breker wordt het betongranulaat bewerkt tot zand, grind en cementsteenpoeder. →

Juist het hergebruiken van cement kan leiden tot een grote reductie van CO_2, omdat dat het gebruik van primair cement kan beperken

4 Smart Liberator, foto: New Horizon
5 Resultaat van het breek-/vermaal- en scheidingsproces Smart Liberator, foto: Urban Mine B.V., 2021

Enkel streven naar circulariteit zonder rekening te houden met duurzaamheid in bredere zin kan tegenstrijdig zijn met het doel om de uiteindelijke milieubelasting te reduceren

6

7

Het zand en grind hebben een 80% schoon oppervlak. De inschatting is dat hiermee hogere vervangingspercentages mogelijk zijn dan op basis van traditionele materialen, maar lager dan de twee eerder genoemde methoden. Het cementsteenpoeder kan ook hier worden ingezet als vulstof.

Mangeler Een vierde methode, die naar verwachting op korte termijn operationeel wordt op praktijkschaal, is de Mangeler-methode. Deze is ontwikkeld door de Twee “R” Recycling Groep. Deze methode maakt het mogelijk om, naast grind en zand, ook een bindmiddel te onttrekken aan gebroken betonpuin. In het proces wordt onder andere gebruikgemaakt van een hiervoor ontwikkelde CEM-shifter (cycloon principe) die het mogelijk maakt om de zeer waardevolle fijne delen te scheiden van het zand en grind.

Deze laatste stap bij deze methode zorgt ervoor dat er minimaal drie deelstromen ontstaan.

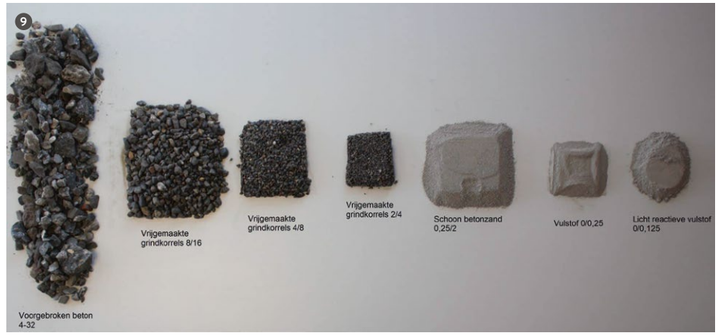
Verantwoord circulair beton mogelijk maken

Om de toepasbaarheid van het gerecycleerde toeslagmateriaal en bindmiddel in een nieuwe betonconstructie of betonproduct te beoordelen, is het noodzakelijk om materiaaleigenschappen en invloeden vóór de toepassing eenduidig en verifieerbaar vast te leggen, zoals we ook gewend zijn bij de toepassing van primaire grondstoffen. Dit gedachtengoed haakt aan bij de doelstellingen uit het Betonakkoord, waarin gesteld wordt dat ‘*hergebruikte materialen of producten aan dezelfde kwaliteitseisen moeten voldoen als primaire materialen en producten*’. In feite kan dit worden vertaald naar dat elke betonconstructie die wordt gesloopt en hergebruikt een nieuwe winplaats (Urban Mine) vormt, waarvan de eigenschappen van de te winnen materialen moeten worden vastgesteld, overeenkomstig voor primaire materialen (zie *Betoniek Vakblad* 2020/2, ‘Verantwoord circulair beton’ [10]). Een oogstprotocol, ofwel een methodiek ter bepaling van eigenschappen en kwaliteit, zou hierin van grote betekenis kunnen zijn om met name vooraf de beschikbare kwaliteit vast te stellen (zie *Cement* 2021/8 ‘Selectief slopen van betonconstructies’ [5]).

In *Betoniek Vakblad* 2020/3 ‘Recyclinggranulaat: een betrouwbare grondstof’ [11] wordt onder andere aangegeven dat de kwaliteit en gestelde eisen van recyclinggranulaat voor de toepassing in beton afdoende is geborgd in de beoordelingsrichtlijn BRL 2506-1 Recyclinggranulaten. In deze BRL wordt echter een keuringsregime gehanteerd per batch van minimaal 500 ton betonpuin, zonder hierbij rekening te houden met eenduidige vaststelling van welke basisgrondstoffen of hergebruikwaarde het puin bezit.

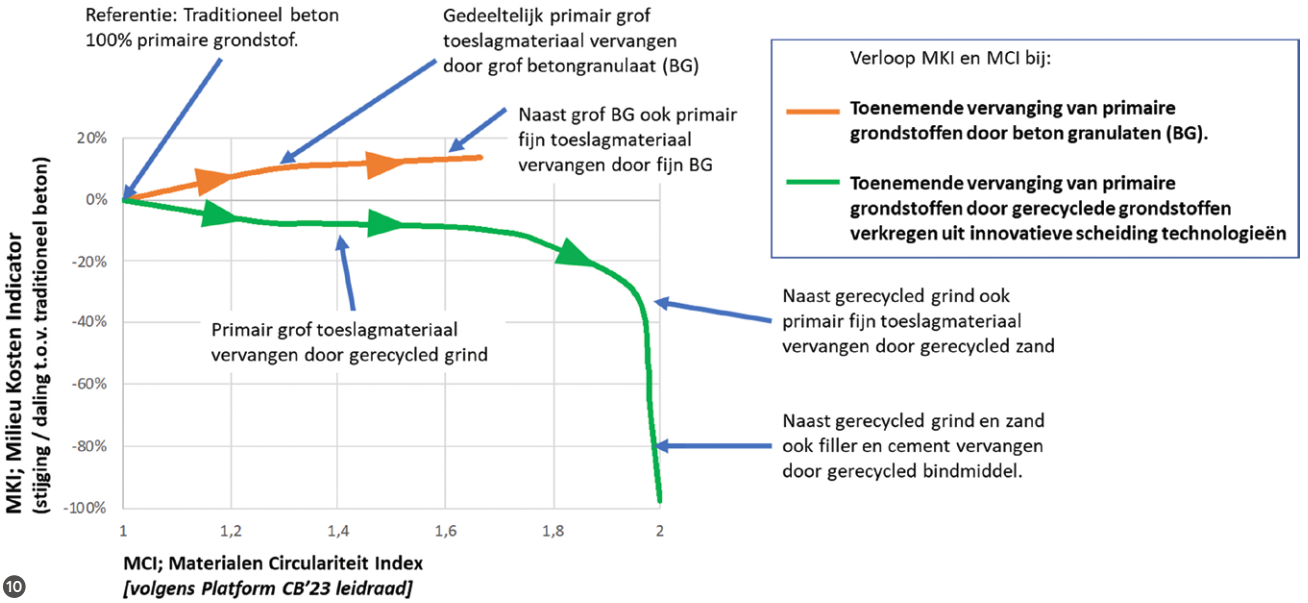
Voordeel hiervan is dat het praktisch is en voorziet in de behoefte die paste bij het gedachtengoed zoals ontwikkeld in het verleden voor het recyclen van bouw- en sloopafval. Een groot nadeel is echter, dat deze batch betonpuin uit verschillende (deel)stromen kan bestaan, dus met verschillende kwaliteiten, vervuilingen en/of opgebouwd uit verschillende grondstoffen (te denken →

8



9

6 ADR-installatie, foto: GBN
7 Resultaat van het breek- en scheidingsproces C2CA, foto: Cees Steendijk
8 Mangeler-methode, foto: Twee “R” Recycling Groep
9 Resultaat van het breek- en scheidingsproces Mangeler, foto: puinrecycling.nl



10

aan riviergrind, graniet of kalksteen, maar ook qua gebruikte bindmiddelen zoals portlandcement en/of hoogovencement). Dit bemoeilijkt het hoogwaardig hergebruik ervan in relatie tot prestatie-eigenschappen.

Samengevat is de essentie dat hoogwaardig hergebruik – met gelijkwaardige eigenschappen zoals verondersteld mag worden aan primaire grondstoffen – valt of staat met een goede determinatie van eigenschappen, bronscheiding en de keuring ervan aan het begin van het proces. Een logisch gevolg hiervan is dat op termijn de huidige normering en certificering moet worden herzien om aan deze nieuwe kwaliteitsvraag te voorzien.

Wat levert het op?

Het gebruik van traditioneel betongranulaat, zowel grof als fijn, is een beproefde methode om primaire grondstoffen (gedeeltelijk) te vervangen door secundaire stromen. Echter het behoud van prestaties (kwaliteit/technische levensduur) is hierbij een kritisch aandachtpunt en bovendien is de verlaging van de milieukosten (MKI) (zeer) beperkt.

Hoge vervangingspercentages kunnen leiden tot een omgekeerd effect: de CO_2-uitstoot en daarmee de MKI-waarde zal zelfs stijgen doordat meer cement benodigd is. En er moet rekening worden gehouden met aanpassing van constructieve rekenregels. Enkel streven naar circulariteit zonder rekening te houden met de effecten op MKI en gevraagde prestaties in bredere zin kan daardoor tegenstrijdig zijn met het doel om de uiteindelijke milieubelasting te reduceren.

In het geval van materiaalstromen verkregen uit innovatieve recycingsmethoden, blijkt dat hogere vervangingspercentages (60% fijn en 100% grof) nu al mogelijk zijn, zonder aanpassing van constructieve rekenregels en zonder dat (extra) cement nodig is om gelijkblijvende prestatie-eigenschappen te borgen. De MKI-waarde kan daarmee wel sterk dalen, met als bijkomend voordeel dat met toekomstige ontwikkelingen (het verder opwerken van het teruggewonnen bindmiddel) dit nog zal toenemen en in potentie kan leiden tot een volledig circulair beton mengsel (zie fig. 10).

Vanuit het perspectief om 100% van de beschikbare fracties van het aanbod betonreststromen in 2030 in nieuw beton te verwerken, zijn eigenlijk alleen innovatieve recyclingmethoden kansrijk om hier mede invulling aan te geven. ●

GERAADPLEEGDE BRONNEN

1 Rijksbrede programma Nederland Circulair in 2050.
2 Betonakkoord voor duurzame groei, juli 2018.
3 Roadmap Hergebruik betonreststromen, 2020.
4 Verweij, M., Terugwinnen van cement uit beton. *Betoniek Vakblad* 2020/3.
5 Nedeljkovic, M., Schlangen, E., Fennis, S., Selectief slopen van betonconstructies. *Cement* 2021/8.
6 CROW-CUR Aanbeveling 127:2021 Beton met betongranulaat als fijn en/of grof toeslagmateriaal.
7 CUR-Aanbeveling 106:2014 Beton met fijne fracties uit recyclinggranulaten als fijn toeslagmateriaal.
8 CUR-Aanbeveling 112:2014 Beton met betongranulaat als grof toeslagmateriaal.
9 Wegen, G.van der, Een overzicht van innovatieve recyclingmethoden. *Betoniek Vakblad* 2020/1.
10 Wolf, M. van der, Verantwoord circulair beton. *Betoniek Vakblad* 2020/2.
11 Broere, P., Verweij, M., Kloetstra, S., Recyclinggranulaat: een betrouwbare grondstof. *Betoniek Vakblad* 2020/3.
12 Betongranulaat in kwaliteitsbeton, Betoniek Standaard 17/09.
13 www.puinrecycling.nl.
14 https://www.c2ca-technology.nl.
15 https://freement.nl/smart-liberator/.
16 https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/documenten/rapporten/2016/09/14/bijlage-1-nederland-circulair-in-2050.

10 Impact recycling op zowel MKI (verticale as) als circulariteit (horizontale as) bij toenemende hoeveelheid herwonnen grondstoffen. Hergebruik van beton in de vorm van betongranulaat (oranje lijn) draagt bij aan de circulariteit, maar geeft een stijging op de MKI bij hoge vervangingspercentages. Wanneer beton wordt verwerkt naar van cementsteen vrijgemaakte, secundaire grondstoffen en deze toegepast worden in een nieuw betonmengsel (groene lijn), zal met een hogere circulariteitswaarde tevens een lagere MKI worden bereikt. Aangezien moderne scheidingtechnologieën sterk in ontwikkeling zijn kan dit in potentie zelfs leiden tot 100% herwonnen materiaal