

Circulair beton met grof én fijn betongranulaat: nieuwe regelgeving om hoogwaardiger hergebruik toe te staan

Gert van der Wegen, rapporteur CROW-werkgroep
SGS INTRON

Mark Verbaten, voorzitter CROW-werkgroep
ABT

Ad van Leest, begeleider CROW-werkgroep
CROW

Hergebruik van bewerkt betonpuin als toeslagmateriaal in beton vindt nog maar beperkt plaats, ook in Nederland. De gezamenlijke ambitie om de betonketen verder te verduurzamen, is vastgelegd in het Betonakkoord. Een van de daarin gestelde doelen is 100% hoogwaardig hergebruik van vrijkomend beton.

De verduurzaming van de betonketen mag echter niet ten koste gaan van de kwaliteit van het beton. Immers, een kortere levensduur komt de duurzaamheid van het beton niet ten goede. Cementsteen in betongranulaat heeft een nadelige invloed op een aantal betoneigenschappen dat daarmee gemaakt wordt. Met de opkomst van innovatieve recyclingmethoden kunnen fijne en grove betongranulaten worden geproduceerd met een lager gehalte aan cementsteen. Hierdoor kunnen de eigenschappen van beton vervaardigd met deze innovatieve betongranulaten beter zijn dan die van beton vervaardigd met traditionele betongranulaten.

Om de toepassingsmogelijkheden van deze betongranulaten verkregen met innovatieve recyclingmethoden optimaal te benutten in beton, is CROW-CUR Aanbeveling 127 opgesteld. Hierin is afhankelijk van de kwaliteit van het geproduceerde fijne en grove betongranulaat een maximaal toelaatbaar gehalte aan deze betongranulaten in het beton aangegeven, waarbij de constructieve rekenregels ongewijzigd gehanteerd kunnen worden (geen correctiefactoren) en de technische duurzaamheid (weerstand tegen aantastingsmechanismen) is gewaarborgd. Deze maximale gehalten zijn hoger dan beton geproduceerd met traditionele betongranulaten.

Deze CROW-CUR Aanbeveling is inhoudelijk gebaseerd op de resultaten verkregen in een uitgebreid onderzoek aan beton vervaardigd met fijne en grove betongranulaten geproduceerd met twee innovatieve recyclingmethoden, waarvan de resultaten zijn vastgelegd in een achtergrondrapport.

Het uitgevoerde onderzoek is op hoofdlijnen beschreven evenals de opgestelde CROW-CUR Aanbeveling 127 en de relatie met bestaande CUR-Aanbevelingen 106 (fijne fractie betongranulaat) en 112 (grove fractie betongranulaat).

Beton vervaardigd met nog meer fijn én grof betongranulaat: nieuwe regelgeving om hoogwaardiger hergebruik toe te staan

Inleiding

Hergebruik van bewerkt betonpuin als toeslagmateriaal in beton vindt nog maar beperkt plaats, ook in Nederland. De gezamenlijke ambitie om de betonketen verder te verduurzamen, is vastgelegd in het Betonakkoord. Eén van de daarin gestelde doelen is 100% hoogwaardig hergebruik van vrijkomend beton als toeslagmateriaal in nieuw beton.

De verduurzaming van de betonketen mag echter niet ten koste gaan van de kwaliteit van het beton. Immers, een kortere levensduur komt de duurzaamheid van het beton niet ten goede. Cementsteen in betongranulaat heeft een nadelige invloed op een aantal betoneigenschappen dat daarmee gemaakt wordt. Met de opkomst van innovatieve recyclingmethoden kunnen fijne en grove betongranulaten worden geproduceerd met een lager gehalte aan cementsteen. Hierdoor kunnen de eigenschappen van beton vervaardigd met betongranulaten verkregen met innovatieve recyclingmethoden beter zijn dan die van beton vervaardigd met betongranulaten verkregen met traditionele recyclingmethoden. Dit is onderzocht door CROW-werkgroep N1482 'Nieuwe recyclingmethoden voor toeslagmaterialen' en heeft geleid tot nieuwe regelgeving: CROW-CUR Aanbeveling 127 'Beton met betongranulaat als fijn en/of grof toeslagmateriaal'. Doelstelling van het door de werkgroep uitgevoerde onderzoek was het bepalen van de maximaal mogelijke vervangingspercentages waarbij nog geen aanpassingen van constructieve rekenregels nodig zijn. Er is een aanpak gekozen waarbij aan de hand van de waterabsorptie, onafhankelijk van de specifieke recyclingmethode en nog in de toekomst te ontwikkelen recyclingmethoden, een maximaal vervangingspercentage is vast te stellen.

Nieuwe recyclingmethoden

Het zou ideaal zijn als we uit betonpuin weer het oorspronkelijke zand en grind kunnen terugwinnen en van de verwijderde cementsteen een nieuwe vulstof of bindmiddel kunnen maken, waardoor het beton een gesloten kringloop krijgt en de grondstoffen hoogwaardig worden hergebruikt. Met de in ontwikkeling zijnde innovatieve recyclingmethoden zetten we goede stappen op weg naar dit ideale beeld.

In Betoniek Vakblad is een overzicht van innovatieve recyclingmethoden gegeven [1]. In Nederland worden twee van deze innovatieve recyclingmethoden reeds op praktijkschaal toegepast bij het recyclen van betonpuin: de Smart Liberator (door Smart Circular Products) en de C2CA Technology (door GBN en TU Delft). Beide innovatieve recyclingmethoden zijn nader beschreven in [1].

Opzet CROW-onderzoek

In het CROW-onderzoek is de invloed van de kwaliteit van het fijne en grove betongranulaat op de constructieve eigenschappen en de duurzaamheid (levensduur) van beton nagegaan. Daarbij zijn fijn en grof betongranulaat vervaardigd met de Smart Liberator en met de C2CA Technology in het onderzoek betrokken. Deze betongranulaten, evenals het toegepaste zand en grind, zijn gekarakteriseerd op de relevante eigenschappen genoemd in NEN-EN 12620 / NEN 5905. De verkregen resultaten zijn terug te vinden in het achtergrondrapport bij CROW-CUR Aanbeveling 127 [2].

Met deze toeslagmaterialen zijn 19 betonmengsels vervaardigd, waarbij het zand oplopend tot 60%V/V is vervangen door fijn betongranulaat en het grind oplopend tot 100%V/V is vervangen door grof betongranulaat. In alle betonmengsels is 340 kg/m³ CEM I 42,5 N toegepast en bedroeg de effectieve wcf steeds 0,50. Met een superplastificeerder (Creto-plast SL-01) is de verwerkbaarheid van de verse betonspecie ingesteld op een zetmaat van

ca. 150 mm. De samenstellingen van de onderzochte betonmengsels zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1. Mengselsamenstellingen

Mengselcode		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
		REF	SCP	SCP	SCP	SCP	SCP	SCP	SCP	SCP	SCP
Component		0-0	20-0	40-0	60-0	20-25	40-50	20-100	40-100	0-50	0-75
CEM I 42,5 N	(kg/m ³)	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340
water effectief	(kg/m ³)	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170
water absorptie	(kg/m ³)	8,8	14,5	20,3	26,0	18,4	28,1	30,2	35,9	16,6	20,5
ref 16-22 (M11)	(%V/V)	16,8	16,8	16,8	16,8	12,6	8,4	0	0	8,4	4,2
ref 8-16 (M10)	(%V/V)	25,8	25,8	25,8	25,8	19,35	12,9	0	0	12,9	6,45
ref 4-8 (M9)	(%V/V)	17,4	17,4	17,4	17,4	13,05	8,7	0	0	8,7	4,35
ref 0-5 (M8)	(%V/V)	40	32	24	16	32	24	32	24	40	40
SCP 4-22 (M1)	(%V/V)	0	0	0	0	15	30	60	60	30	45
SCP 0-4 (M12)	(%V/V)	0	8	16	24	8	16	8	16	0	0
GBN 4-22 (M6)	(%V/V)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GBN 0-4 (M7)	(%V/V)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Superplast.	(kg/m ³)	0,48	0,76	1,1	1,2	0,41	2,5	4,0	2,2	0,71	1,2

Mengselcode		M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19
		SCP	GBN	GBN	GBN	GBN	GBN	GBN	GBN	GBN
Component		0-100	20-0	40-0	60-0	20-25	40-50	0-25	0-50	0-75
CEM I 42,5 N	(kg/m ³)	340	340	340	340	340	340	340	340	340
water effectief	(kg/m ³)	170	170	170	170	170	170	170	170	170
water absorptie	(kg/m ³)	24,4	17,1	25,5	33,8	25,1	41,5	16,8	24,8	32,9
ref 16-22 (M11)	(%V/V)	0	16,8	16,8	16,8	12,6	8,4	12,6	8,4	4,2
ref 8-16 (M10)	(%V/V)	0	25,8	25,8	25,8	19,35	12,9	19,35	12,9	6,45
ref 4-8 (M9)	(%V/V)	0	17,4	17,4	17,4	13,05	8,7	13,05	8,7	4,35
ref 0-5 (M8)	(%V/V)	40	32	24	16	32	24	40	40	40
SCP 4-22 (M1)	(%V/V)	60	0	0	0	0	0	0	0	0
SCP 0-4 (M12)	(%V/V)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GBN 4-22 (M6)	(%V/V)	0	0	0	0	15	30	15	30	45
GBN 0-4 (M7)	(%V/V)	0	8	16	24	8	16	0	0	0
Superplast.	(kg/m ³)	1,8	0,57	0,00	0,00	0,57	1,7	1,3	1,5	4,2

* REF=referentie (geen betongranulaten); SCP=Smart Liberator; GBN=C2CA Technology betongranulaten

Van elk beton zijn de volgende eigenschappen onderzocht:

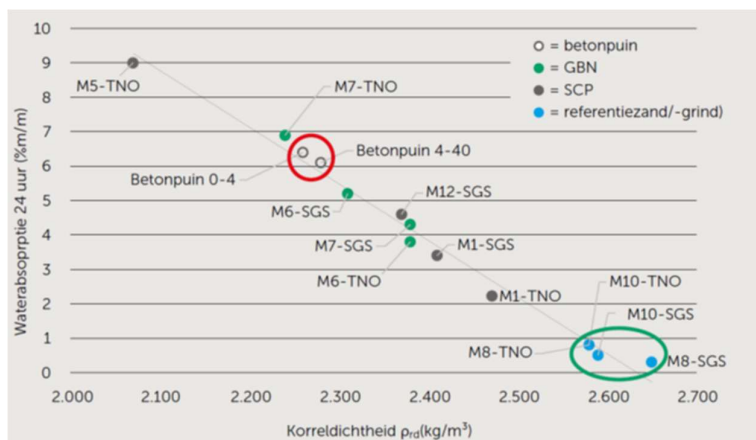
- Betonspecie: zetmaat, schudmaat, volumieke massa en luchtgehalte (NEN-EN 12350-serie)
- Druksterkte na 2, 7, 28 en 91 dagen verharden (NEN-EN 12390-3)
- Splijttreksterkte na 28 en 91 dagen verharden (NEN-EN 12390-6)
- E-modulus (conform CUR-rapport 94-12) na 28 dagen verharden
- Krimp en kruip (conform CUR-rapport 94-12)
- Chloridemigratiecoëfficiënt na 28 dagen verharden (conform NT build 492)
- Carbonatatatie na 28, 90, 180 en 365 dagen (conform NEN-EN 12390-10)
- Waterindringing onder druk (conform NEN-EN 12390-8)

Resultaten onderzoek

Het CROW-onderzoek is te uitgebreid om alle resultaten in dit artikel weer te geven en te bespreken. Daarom wordt hier volstaan met de beschouwing van de bevindingen die belangrijk zijn voor de inhoud van de opgestelde CROW-CUR Aanbeveling 127. Alle verkregen onderzoeksresultaten zijn in detail weergegeven in het achtergrondrapport [2].

Relatie waterabsorptie en volumieke massa toeslagmaterialen

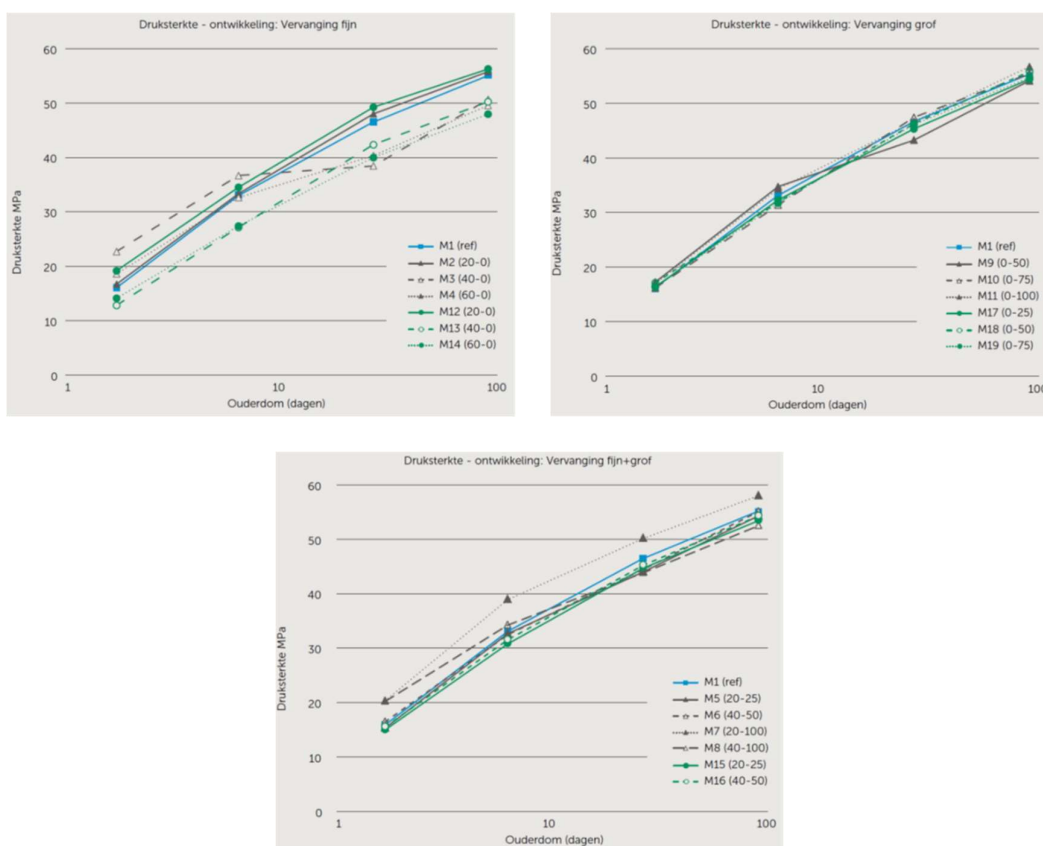
Er blijkt een duidelijke relatie te bestaan tussen de waterabsorptie en de volumieke massa van de gebruikte toeslagmaterialen zoals weergegeven in figuur 1. De waterabsorptie is een maat voor de hoeveelheid en porositeit van het aanwezige cementsteen in het betongranulaat.



Figuur 1. Relatie waterabsorptie en volumieke massa onderzochte toeslagmaterialen

Sterkteontwikkeling en E-modulus

De ontwikkeling van de druksterkte is weergegeven in figuur 2 voor respectievelijk vervanging van enkel fijn, enkel grof en fijn + grof.



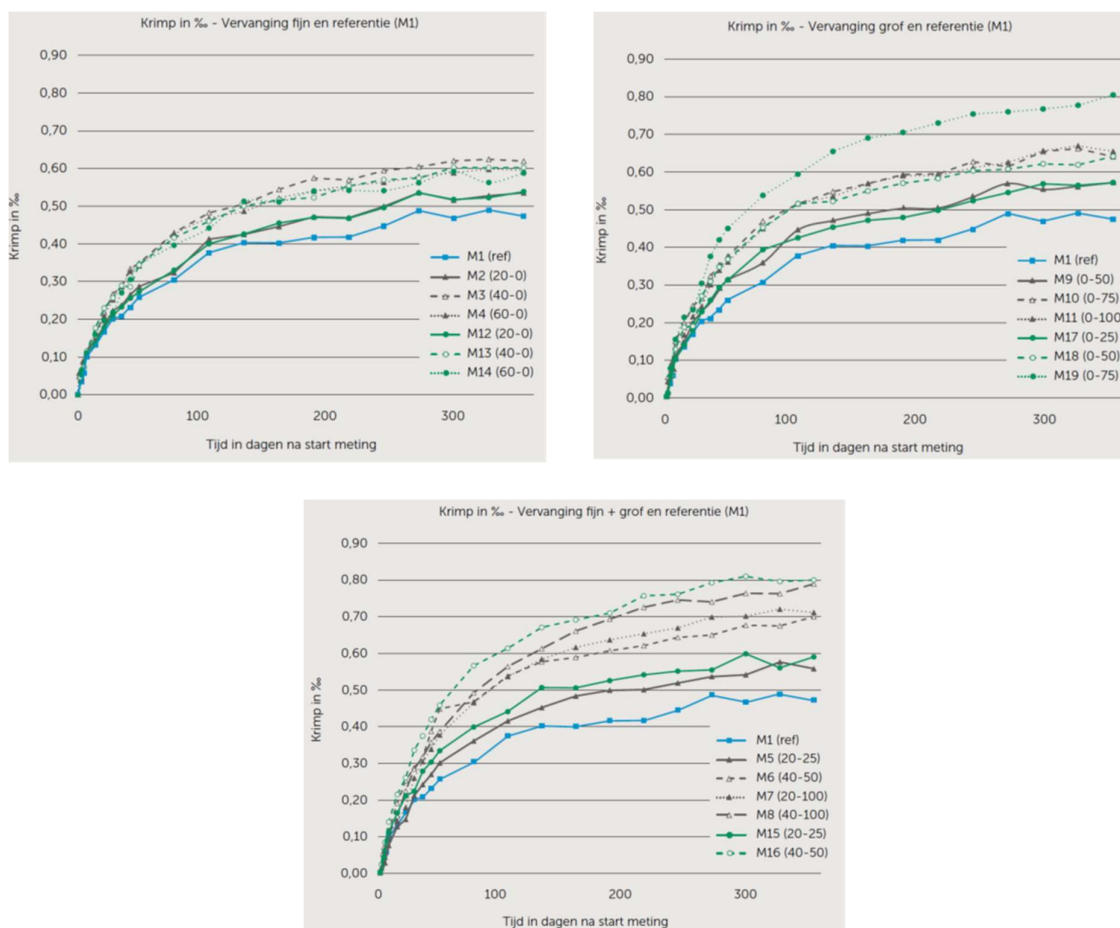
Figuur 2. Druksterkteontwikkeling

Over het algemeen ligt de druksterkte van de mengsels met betongranulaten op hetzelfde niveau als het referentiebeton, behalve bij 40%V/V en 60%V/V vervanging van zand door fijn betongranulaat. Bij deze mengsels is een afwijkend sterkteniveau gemeten van circa 15% lager.

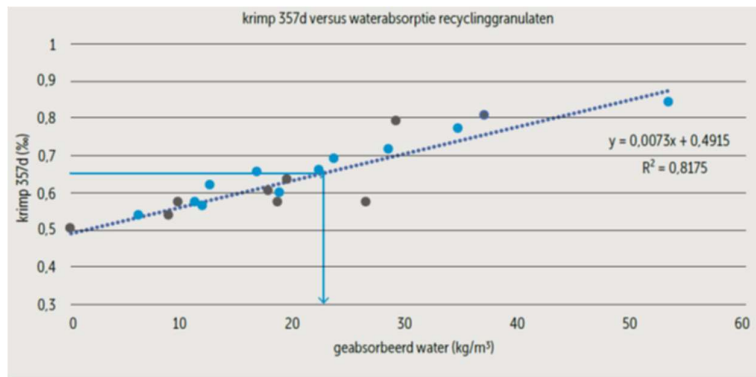
Krimp en kruip

De invloed van het toepassen van betongranulaten op de eigenschappen van beton blijkt het grootst te zijn voor uitdrogingskrimp. De invloed op het kruipgedrag is beduidend minder (zie [2]). De krimp van de betonmengsels als functie van de uitdrogingstijd is weergegeven in figuur 3 voor respectievelijk vervanging van enkel fijn, enkel grof en fijn + grof.

Er blijkt een duidelijke correlatie te zijn tussen de gemeten krimp na 1 jaar en de totale hoeveelheid geabsorbeerd water (in kg per m³ beton) door de betongranulaten die in dat beton zijn toegepast. Dit is getoond in figuur 4. Deze goede correlatie mag worden verwacht, omdat de hoeveelheid geabsorbeerd water een maat is voor de hoeveelheid en porositeit van de cementsteen in het betongranulaat en de extra krimp van het beton met betongranulaat ten opzichte van het referentiebeton wordt bepaald door die cementsteen in het betongranulaat.



Figuur 3. Uitdrogingskrimp als functie van de tijd

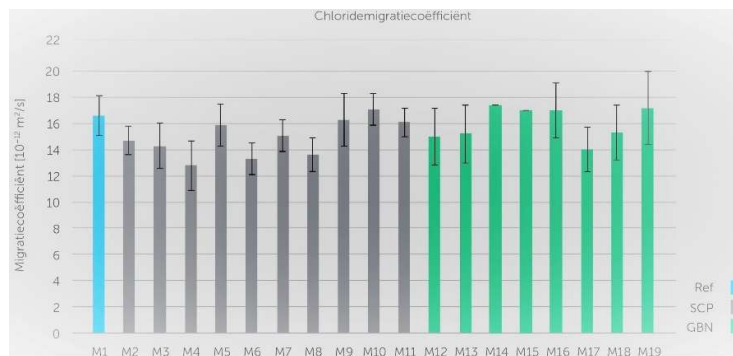


Figuur 4. Correlatie krimp beton en totale hoeveelheid geabsorbeerd water door daarin aanwezige betongranulaten

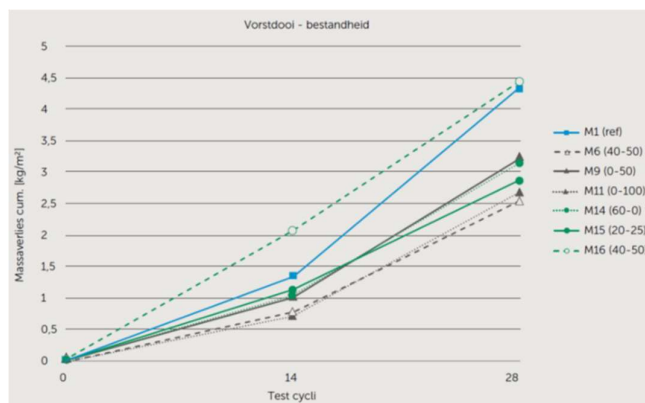
Duurzaamheid (levensduur)

Uit de verkregen resultaten van de onderzochte eigenschappen blijkt dat mag worden gesteld dat de prestaties van het beton met fijn en/of grof betongranulaat vergelijkbaar is met die van het referentiebeton. Dit is ter illustratie getoond voor de chloridemigratiecoëfficiënt en de vorstdooizoutbestandheid in respectievelijk figuur 5 en 6.

De toepassing van betongranulaten conform CROW-CUR Aanbeveling 127 heeft dus geen nadelige invloed op de levensduur van de betonconstructie.



Figuur 5. Chloridemigratiecoëfficiënt onderzochte betonmengsels



Figuur 6. Cumulatief massaverlies vorstdooizoutproef

CROW-CUR Aanbeveling 127

De goede correlatie tussen de waterabsorptie en het gehalte aan cementsteen in het granulaat maakt het mogelijk om een kwalitatieve beoordeling van het gebroken granulaat uit te voeren zonder dat de specifieke breekmethode bekend is. Deze correlatie is daarmee de basis van de CROW-CUR Aanbeveling 127. Hiermee is het dus ook mogelijk om betongranulaat gebroken met traditionele methoden toe te passen conform deze CROW-CUR Aanbeveling 127. Door het hogere gehalte aan cementsteen in dat granulaat zullen de vervangingspercentages evenwel lager uit vallen. Met eventueel nieuwe, meer effectievere, breekmethoden kunnen in de toekomst met de kwalitatieve beoordeling op basis van de waterabsorptie juist een hoger vervangingspercentage worden bereikt.

Met de volgens deze CROW-CUR Aanbeveling berekende maximale hoeveelheid toe te passen specifieke fijne en/of grove betongranulaat, veranderen de eigenschappen van het daarmee vervaardigd beton zo weinig dat deze binnen de spreidingsband van overeenkomstig beton met harde, dichte toeslagmaterialen vallen en waardoor NEN-EN 1992-1-1 ongewijzigd van toepassing is en de technische duurzaamheid (weerstand tegen aantastingsmechanismen) gewaarborgd is.

Er is in het uitgevoerde onderzoek niet specifiek rekening gehouden met het effect van cementsteen op de vermoeiingseigenschappen. Betonconstructies waarvoor een vermoeiingstoets uitgevoerd moet worden vallen daarmee buiten het kader van deze aanbeveling.

Verder is ook de invloed van hogere vervangingspercentages fijn en/of grof betongranulaat op de dwarskrachtcapaciteit niet onderzocht. Beton geproduceerd volgens de richtlijnen van deze aanbeveling verschilt op voor dwarskrachtcapaciteit belangrijke parameters zoals druksterkte, treksterkte en korrelgradering, niet wezenlijk van beton geproduceerd met regulier toeslagmateriaal. Er is dan ook geen reden om aan te nemen dat de dwarskrachtcapaciteit significant nadelig wordt beïnvloed. Dit kon echter bij het opstellen van deze aanbeveling niet met onderzoeksresultaten worden onderbouwd.

Als de dwarskrachtweerstand ontleend wordt aan de dwarskrachtwapening is er echter geen bijdrage van het beton en zijn de rekenregels in deze aanbeveling wel toepasbaar.

Maximale hoeveelheid toe te passen fijn en/of grof betongranulaat

De maximaal toegestane hoeveelheid van een specifiek fijn en/of grof betongranulaat die mag worden toegepast in beton, moet worden berekend uit het criterium voor de totale hoeveelheid geabsorbeerd water door het in het beton aanwezige specifieke fijne en grove betongranulaat. Deze totale hoeveelheid geabsorbeerd water door het fijne en grove betongranulaat in het beton (T in kg/m^3) wordt berekend met de volgende formule:

$$T = M_{fBG} \times A_{fBG} + M_{gBG} \times A_{gBG}$$

Waarin:

M_{fBG} = droge massa van fijne betongranulaat per kuub beton (kg/m^3);

M_{gBG} = droge massa van grove betongranulaat per kuub beton (kg/m^3);

A_{fBG} = waterabsorptie na 24 uur, bepaald volgens NEN-EN 1097-6, van het fijne betongranulaat (%m/m);

A_{gBG} = waterabsorptie na 24 uur, bepaald volgens NEN-EN 1097-6, van het grove betongranulaat (%m/m).

Bij toepassing in ongewapend en gewapend beton geldt:

- toegepast in krimp- of kruipgevoelige constructies mag T maximaal $22,5 \text{ kg/m}^3$ bedragen;
- toegepast in constructies waarbij krimp en kruip geen relevante rol spelen, mag T maximaal 30 kg/m^3 bedragen.

Bij toepassing in voorgespannen beton dient T in alle gevallen kleiner of gelijk aan $22,5 \text{ kg/m}^3$ te zijn.

Het vervangingspercentage fijn toeslagmateriaal door fijn betongranulaat mag niet groter zijn dan 60%V/V, ook niet wanneer met bovenstaande formule een hoger vervangingspercentage wordt berekend. Voor het vervangingspercentage grof toeslagmateriaal door grof betongranulaat geldt geen generieke beperking.

Ter verduidelijking zijn en bijlage A enkele voorbeelden gegeven.

Relatie met andere Aanbevelingen en normen

Voor het vervangen van grof toeslagmateriaal door traditioneel gebroken betongranulaat is CUR- Aanbeveling 112 toepasbaar. Deze aanbeveling is van toepassing op druksterkteklassen C12/15 t/m C50/60. Tot 50%V/V vervanging van het grove toeslagmateriaal door dit type betongranulaat zijn de constructieve rekenregels ongewijzigd van toepassing en zijn alle milieuklassen toegestaan. Bij vervangingspercentages tussen 50%V/V en 100%V/V moeten correctiefactoren worden toegepast op de E-modulus, de krimp en de kruip van het beton. Tevens is dan toepassing in milieuklassen XD en XS niet toegestaan.

In NEN 8005, de Nederlandse invulling van de Europese betonnorm NEN-EN 206, is op basis van de goede ervaringen opgedaan met CUR-Aanbeveling 112 het maximale vervangingspercentage van grof toeslagmateriaal door betongranulaat van type A1 verruimd naar 50%V/V in milieuklasse X0 en 30%V/V in de overige milieuklassen.

In CUR-Aanbeveling 106 is de toepassing van de fijne fracties uit traditioneel gebroken beton- en menggranulaten als fijn toeslagmateriaal voor beton geregeld. Deze CUR-Aanbeveling betreft de druksterkteklassen C12/15 t/m C35/45 en alle milieuklassen. Het gehalte primair zand dat mag worden vervangen door fijne fracties beton- en menggranulaten bedraagt maximaal 50%V/V voor ongewapend beton, gewapend beton, voorgespannen beton met niet-hechtende spanelementen en voorgespannen beton met hechtende nagerechte spanelementen. In geval van voorgespannen beton met hechtende voorgerechte spanelementen mag het vervangingspercentage maximaal 20%V/V bedragen. In beide gevallen moeten correctiefactoren worden toegepast op de E-modulus, de spanning-rek relatie, de krimp en de kruip van het beton.

In beide voornoemde gevallen mag naast de aangegeven maximale vervanging van het primair zand door fijne fracties beton- en menggranulaten tevens maximaal 20%V/V van het primair grind worden vervangen door beton- of menggranulaat dat voldoet aan NEN-EN 12620 + NEN 5905.

CUR-Aanbevelingen 106 en 112 maken het mogelijk om fijn en/of grof betongranulaat toe te kunnen passen in beton in hogere gehalten dan toegestaan in NEN 8005. Een nadeel van deze aanbevelingen is dat de constructeur moet rekenen met correctiefactoren voor de constructieve eigenschappen. In de ontwerpfase is vaak nog niet bekend of bij de bouw ook daadwerkelijk gebruik zal worden gemaakt van de mogelijkheden van CUR-Aanbevelingen 106 en 112, waardoor eigenlijk 2 ontwerpen zouden moeten worden gemaakt. Dit is vaak ongewenst en daardoor wordt er minder gebruik gemaakt van deze mogelijkheid.

CROW-CUR Aanbeveling 127 is aanvullende regelgeving t.o.v. CUR-Aanbevelingen 106 en 112, die beide geldig blijven.

Slotwoord

Met deze CROW-CUR Aanbeveling wordt een belangrijke bijdrage geleverd aan één van de doelstellingen van het Betonakkoord: 100% hoogwaardig hergebruik van betonreststromen in 2030. Uiteraard moeten we met deze nieuwe regelgeving nog ervaringen in de praktijk opbouwen, maar daar kunnen we morgen al mee aan de slag gaan. Marktpartijen worden dan ook nadrukkelijk gevraagd om de opgedane ervaringen aan CROW terug te koppelen, zodat we die kunnen evalueren en indien nodig kunnen aanpassen/uitbreiden.

CROW-werkgroepleden

Mark Verbaten (ABT, voorzitter)
Ad van Leest (CROW, secretaris en begeleider)
Peter Broere (BRBS Recycling)
Sonja Fennis (RWS-GPO)
Harry Hofman (GBN)
Vincent Jansen (Rutte Groep/BMR)
Marc Ottelé (Heijmans/Bouwend Nederland)
Koos Schenk (Rutte Groep/SmartCrusher)
Ludwig Temme (Gemeente Amersfoort)
John Thoonen (K3Delta/Cascade)
Edwin Vermeulen (Betonhuis)
Siska Valcke (TNO, rapporteur)
Gert van der Wegen (SGS INTRON, rapporteur)

Literatuur

- 1 Van der Wegen, 'Een overzicht van innovatieve recyclingmethoden', Betoniek Vakblad, 1 (2020) p. 12-16.
- 2 CROW-CUR Aanbeveling 127, 'Beton met betongranulaat als fijn en/of grof toeslagmateriaal', (2021) p.1-92.

Bijlage A. Rekenvoorbeelden maximale hoeveelheid toe te passen fijn en/of grof betongranulaat

Voorbeeld 1

Vervanging van grind 4-32 mm door traditioneel grof betongranulaat 4-32 mm met een waterabsorptie na 24 uur van 6,0 %m/m en een droge korreldichtheid van 2260 kg/m³. Het criterium voor krimp- of kruipgevoelige constructies van gewapend beton van 22,5 kg/m³ geabsorbeerd water door het betongranulaat, komt overeen met $22,5 / 0,06 = 375 \text{ kg/m}^3$ betongranulaat. Dit is in dit voorbeeld dus de maximaal toegestane hoeveelheid van dit specifieke grove betongranulaat in het beton volgens deze Aanbeveling. Deze hoeveelheid correspondeert met ongeveer 37%V/V vervanging van het grind (volume betongranulaat = $375 \text{ kg/m}^3 / 2,26 \text{ kg/l} = 166 \text{ l/m}^3$; volume grind = ca. $1200 \text{ kg/m}^3 / 2,65 \text{ kg/l} = 450 \text{ l/m}^3$). Dit is een lager vervangingspercentage dan toegestaan in CUR-Aanbeveling 112.

Voorbeeld 2

Vervanging van grind 4-32 mm door innovatief grof betongranulaat 4-32 mm met een waterabsorptie na 24 uur van 3,0 %m/m en een droge korrel dichtheid van 2450 kg/m³.

Het zelfde criterium van 22,5 kg/m³ geabsorbeerd water door het betongranulaat, komt overeen met $22,5 / 0,03 = 750 \text{ kg/m}^3$ betongranulaat. Dit is in dit voorbeeld dus de maximaal toegestane hoeveelheid van dit specifieke grove betongranulaat in het beton volgens deze Aanbeveling.

Deze hoeveelheid correspondeert met ongeveer 68%V/V vervanging van het grind (volume betongranulaat = $750 \text{ kg/m}^3 / 2,45 \text{ kg/l} = 306 \text{ l/m}^3$; volume grind = ca. $1200 \text{ kg/m}^3 / 2,65 \text{ kg/l} = 450 \text{ l/m}^3$). Dit is een beduidend hoger vervangingspercentage dan toegestaan in CUR-Aanbeveling 112.

Voor krimp en kruip ongevoelige betonconstructies geldt het criterium van 30 kg/m³ geabsorbeerd water door het betongranulaat, hetgeen overeenkomt met $30 / 0,03 = 1000 \text{ kg/m}^3$ betongranulaat en ongeveer 90%V/V vervanging van het grind.

Om 100% van het grind te vervangen door innovatief grof betongranulaat moet de waterabsorptie er van geringer zijn dan 2,0 %m/m (bij T = 22,5 kg/m³) of 2,7 %m/m (bij T = 30 kg/m³).

Voorbeeld 3

Vervanging van zand 0-4 mm door innovatief fijn betongranulaat 0-4 mm met een waterabsorptie na 24 uur van 4,5 %m/m en een droge korrel dichtheid van 2360 kg/m³.

Het criterium van 22,5 kg/m³ geabsorbeerd water door het betongranulaat, komt overeen met $22,5 / 0,045 = 500 \text{ kg/m}^3$ fijn betongranulaat.

Deze hoeveelheid correspondeert met 94%V/V vervanging van het zand (volume fijn betongranulaat = $500 \text{ kg/m}^3 / 2,36 \text{ kg/l} = 212 \text{ l/m}^3$; volume zand = ca. $600 \text{ kg/m}^3 / 2,65 \text{ kg/l} = 225 \text{ l/m}^3$). Dit is een hoger vervangingspercentage fijn toeslagmateriaal dan generiek toegestaan in deze Aanbeveling, waardoor maximaal 60%V/V van het fijne toeslagmateriaal mag worden vervangen door fijn betongranulaat, d.w.z. $0,60 \times 225 \times 2,36 = 319 \text{ kg/m}^3$ fijn betongranulaat.

Voorbeeld 4

Hoeveel innovatief fijn betongranulaat 0-4 mm (waterabsorptie na 24 uur van 4,5 %m/m en een droge korrel dichtheid van 2360 kg/m³) kan worden toegepast indien tevens 50%V/V van grind 4-32 mm door innovatief grof betongranulaat 4-32 mm (waterabsorptie na 24 uur van 3,0 %m/m en een droge korrel dichtheid van 2450 kg/m³) wordt vervangen in een krimpgevoelige betonconstructie?

Bij 50%V/V vervanging grind (450 l/m³; zie voorbeeld 1) bedraagt de hoeveelheid grof betongranulaat:

$0,5 \times 450 \text{ l/m}^3 = 225 \text{ l/m}^3 = 225 \times 2,45 \text{ kg/l} = 551 \text{ kg/m}^3$. Bij een waterabsorptie van 3,0 %m/m komt dit overeen met een hoeveelheid absorptiewater van $0,03 \times 551 = 17 \text{ kg/m}^3$. Dan resteert voor het fijne betongranulaat een hoeveelheid absorptiewater van $22,5 - 17 = 5,5 \text{ kg/m}^3$, hetgeen bij een waterabsorptie van 4,5 %m/m correspondeert met 122 kg/m^3 of te wel $(122 / 2,36 \text{ kg/l} =) 52 \text{ l/m}^3$ fijn betongranulaat. Dit is $(52 / 225 \times 100\% =) 23\%$ vervanging van het fijn toeslagmateriaal.

In dit voorbeeld van een krimpgevoelige betonconstructie kan dus 50%V/V van het grove en 23%V/V van het fijne toeslagmateriaal worden vervangen door de betreffende fracties betongranulaat, hetgeen overeenkomt met een gehalte van respectievelijk 551 kg/m³ en 122 kg/m³ beton.