



Gebruik van alternatieve bindmiddelen en gerecyclede granulaten in eenlaagse betonverhardingen met grote dikte: resultaten van het MONOCRETE-project

Van der Wielen Audrey, OCW¹, Smets Sylvie, OCW², Van Hoya Thomas, ELOY³, Hubert Julien, ULiège⁴, Courard Luc, ULiège⁵, N'Ganjie Josiane, OCCN⁶, Schaerlaekens Steven, Holcim⁷

Inleiding

Eenlaagse betonverhardingen met grote dikte (≥ 30 cm) worden steeds populairder in Europa, omdat ze een oplossing bieden voor het toenemende verkeer op snelwegen, taxibanen op luchthavens of logistieke bedrijventerreinen. Ze vragen minder onderhoud dan andere verhardingsmaterialen, hebben een zeer lange levensduur, zelfs bij zware belasting, en zijn zonder blijvende vervorming bestand tegen statische lasten. Maar dikkere betonverhardingen zijn soms moeilijker uit te voeren en te verdichten door trillen, omdat er een groter risico bestaat op ontmenging en zogenaamd "zweten" van het beton. Bovendien is de milieu-impact van deze verhardingen aanzienlijk vanwege de grote hoeveelheden cement en inerte materialen die nodig zijn voor elk project. Het onderzoeksproject MONOCRETE (maart 2021 - maart 2024), gefinancierd door de Waalse innovatiepool GreenWin, bracht een aantal industriële partners (Eloy en Holcim) en onderzoeksinstituten (OCW, CRIC-OCCN en ULiège) bij elkaar om deze uitdagingen aan te gaan. In dit artikel presenteren we de resultaten van het project met betrekking tot de vermindering van de milieu-impact door het gebruik van gerecyclede betongranulaten en een alternatief cement met lagere CO₂-voetafdruk. Deze parameters werden onderzocht aan de hand van laboratoriumproeven en de uitvoering van proefvakken.

Beschrijving van de betonmengsels met gerecyclede granulaten

Aangezien het project tot doel had oplossingen te ontwikkelen voor wegen met druk verkeer, werd de betonsamenstelling voor het project geformuleerd aan de hand van de eisen voor snelwegbeton in het typebestek Qualiroutes (Service Public de Wallonie [SPW], Infrastructures, 2021, hoofdstuk G). De eisen met betrekking tot de samenstelling en de prestaties van het beton staan in **Tabel 1**.

Tabel 1 - Eigenschappen van beton voor snelwegen in Wallonië (D_{max}=20 mm)

Parameters	Waarde
Cementgehalte	≥ 400 kg/m ³
Water-cementfactor W/C	<0,45
Cementtype	CEM III/A 42,5 N LA
WAI (waterabsorptie door onderdompeling)	$\leq 6,3\%$ (gemiddelde waarde)
Gemiddelde druksterkte R _c na 90 dagen op kernen (h = 10 cm, opp. = 100 cm ²)	≥ 50 MPa (in geval van gebruik van luchtbelvormer)
Luchtgehalte v	$3\% \leq v \leq 6\%$
Vorst-dooiweerstand in aanwezigheid van dooizouten	Afschilfering <5 g/dm ² volgens de ISO/DIS 4846-2 methode ("CME 53-16") (ISO, 1984)

1. Van der Wielen Audrey; PhD Eng.; Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw; a.vanderwielen@brrc.be
2. Smets Sylvie; MSc; Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw; s.smets@brrc.be
3. Van Hoya Thomas, ingenieur, Eloy Béton, t.vanhoye@eloybeton.be
4. Hubert Julien, ULiège; PhD Eng.; Université de Liège; Julien.Hubert@uliege.be
5. Courard Luc, ULiège; Pr. PhD Eng.; Université de Liège; Luc.Courard@uliege.be
6. N'Ganjie Josiane, ingenieur, CRIC-OCCN, J.Nganjie@cric-occn.be
7. Schaerlaekens Steven, ingenieur, Holcim Belgium, steven.schaerlaekens@holcim.com

Voor de beoordeling van de vorst-dooiweerstand werd besloten de Slabtestmethode (CEN/TS 12390-9 Europees Comité voor Normalisatie [CEN], 2016) te gebruiken in plaats van de oude ISO/DIS-procedure. De eerste wordt namelijk veel meer gebruikt op Europees niveau en zal de ISO/DIS-proef in de komende jaren wellicht vervangen in het typebestek Qualiroutes (SPW, Infrastructures, 2021). Voor snelwegbeton zijn de maximale cumulatieve verliezen na 28 vries-dooicycli vastgelegd op 1,5 kg/m² (in de voorstudie van het wegebeton) door het Vlaamse standaardbestek SB250 (Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer (AWV, 2021).

Op de locatie van de proefvakken van het project waren verschillende natuurlijke en gerecyclede granulaten beschikbaar. De natuurlijke materialen waren rivierzand 0/2 en gebroken porfiergranulaten 2/6 en 6/20. Er waren ook gerecyclede betongranulaten (RCA) beschikbaar, met een korrelverdeling van 2/6 en 6/20. Al deze materialen werden fysisch en chemisch gekarakteriseerd in het laboratorium.

Met deze materialen werd besloten om verschillende betonmengsels op punt te stellen, met een gehalte gerecycled granulaat van 0%, 25%, 50% en 100% (vervangingspercentage in volume van de grove granulaatfractie). Voor deze mengsels werd alleen het geleverde RCA 6/20 gebruikt, omdat de korrelverdelingskromme van het 2/6-materiaal minder goed te integreren was met die van het referentiebeton zonder gerecyclede granulaten. Omdat de proeven op betonmengsels met deze fractie (Samenst.5 en Samenst.10) bevestigden dat deze schadelijk was voor de eigenschappen van het beton, zullen de resultaten met betrekking tot deze samenstellingen niet worden gepresenteerd in dit artikel. De volumeverhoudingen van de verschillende gebruikte granulaten en zanden in elke samenstelling zijn te vinden in **Tabel 2**.

Tabel 2 - Volumeverhouding van de granulaten in elke samenstelling

Volumeverhouding van het korrelskelet (%)	0/2 zand	6/20 RCA	2/6 porfier	6/20 porfier	Opmerking
Samenst.1/Samenst.6: 0% RCA	36,5	0,0	5,5	58,0	Referentiemengsel
Samenst.2/Samenst.7: 100% RCA	29,0	71,0	0,0	0,0	100% gerecyclede granulaten
Samenst.3/Samenst.8: 50% RCA	33,0	33,5	0,0	33,5	50% gerecyclede granulaten
Samenst.4/Samenst.9: 25% RCA	36,0	16,0	0,0	48,0	25% gerecyclede granulaten

Het cement dat in België doorgaans gebruikt wordt in de wegebouw is CEM III A 42,5 N, waarin 36 tot 65% van de portlandklinker is vervangen door hoogovenslak. In dit project hebben Holcim en het CRIC-OCCN een nieuw cement met lagere CO₂-voetafdruk ontwikkeld, CEM V/A (S-V) 42,5 N, dat hoogovenslak bevat, maar ook teruggewonnen vliegias. Aangezien dit cement in het kader van het project alleen werd geproduceerd op de dagen voor de uitvoering van de proefvakken, werd voor de laboratoriummengsels een vrijwel identiek bestaand cement, CEM V/A (S-V) 42,5 N, op basis van verse vliegias gebruikt.

Voor elke samenstelling werden de massaverhoudingen van de verschillende bestanddelen berekend, waarbij gestreefd wordt naar een luchtgehalte van 4% en een W/C-verhouding van 0,41. We hebben 85% van het absorptiewater toegevoegd voor de gerecyclede producten en 100% voor de natuurlijke producten. De hoeveelheden plastificeerder en luchtbelvormer werden in het laboratorium aangepast om het gewenste luchtgehalte en de beoogde verwerkbaarheid (slumpwaarde) te verkrijgen (**Tabel 3 en Tabel 4**).

Tabel 3 - Prestaties van de betonmengsels in het laboratorium - met CEM III/A

Materiaal	S1: CEM III-: 0% RCA*	S1: CEM III- 0% RCA	S2**: CEM III-2: 100% RCA	S3: CEM III- 50% RCA	S4: CEM III- 25% RCA*	S4: CEM III- 25% RCA
Effectief water (kg/m ³)	165,00	165,00	168,00	165,00	165,00	165,00
Absorptiewater (kg/m ³)	8,40	8,13	60,84	28,68	20,03	17,88
Plastificeerder (kg/m ³)	2,50	3,00	4,20	3,50	3,50	3,50
Luchtbelvormer (kg/m ³)	0,88	0,60	0,6	0,60	0,70	0,60
Slump (mm)	10	47	7	9	19	54
Luchtgehalte (%)	5	4	3,1	5,1	6	3,6
Volumieke massa vers beton (kg/m ³)	2300	2326	2243	2238	2232	2345
Rc 7 d (MPa)	33,45	32,36	34,18	35,58	30,7	34,96
Rc 28 d (MPa)	49,56	50,15	48,57	50,54	44,34	51,63
Rc 90 d (MPa)	59,37	57,04	58,54	60,4	53,05	60,37
Massaverlies slabtest na 28 cycli (kg/m ²)	1,43			2,07	0,86	
Wateropslorping (WAI) 28 d	6,4	6,1		6,9	6,3	6,77

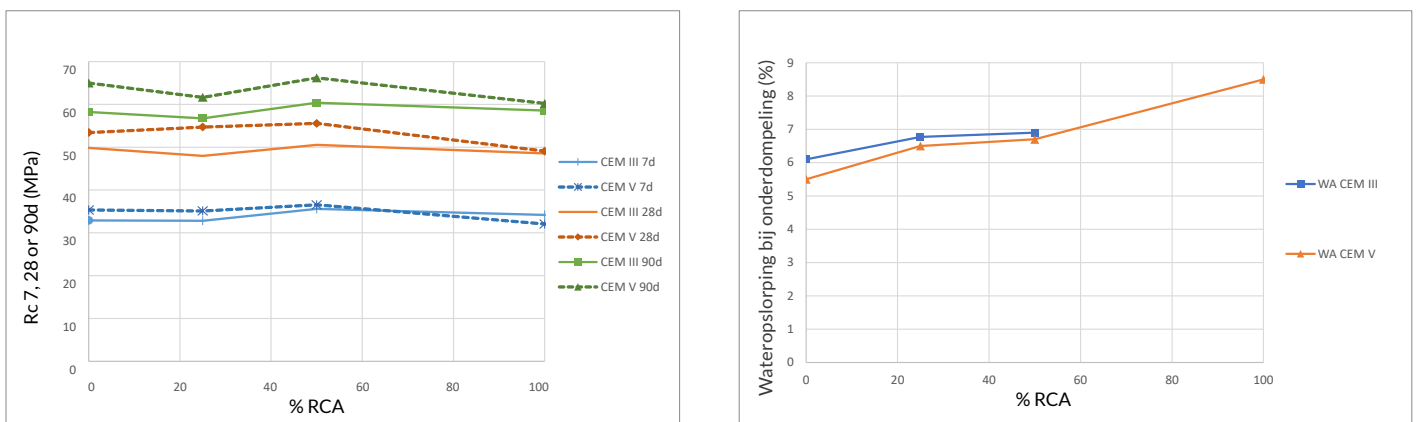
* De verdeling van de deeltjesgrootte is niet 100% optimaal; ** Toename van de hoeveelheid effectief water.

Tabel 4 - Prestaties van de betonmengsels in het laboratorium - met CEM V /A (S-V)

	S6: CEM V - 0% RCA	S7: CEM V- 100% RCA	S8: CEM V- 50% RCA	S9: CEM V- 25% RCA
Effectief water (kg/m ³)	165,00	165,00	165,00	165,00
Absorptiewater (kg/m ³)	8,05	51,37	28,41	17,70
Plastificeerder (kg/m ³)	3,00	3,33	2,50	3,00
Luchtbelvormer (kg/m ³)	0,88	0,65	0,6	0,80
Slump (mm)	12	25	14	22
Luchtgehalte (%)	4,2	3,8	3,4	3,9
Volumieke massa vers beton (kg/m ³)	2311	2209	2282	2296
Rc 7 d (MPa)	35,33	32,06	36,54	35,11
Rc 28 d (MPa)	53,42	49,08	55,56	54,71
Rc 90 d (MPa)	64,97	60,2	66,19	61,63
Massaverlies slabtest na 28 cycli (kg/m ²)	5,44	7,48	5,82	4,88
Wateropsorping (WAI) 28 d	5,5	8,5	6,7	6,5

De proeven toonden aan dat er vrij hoge concentraties plastificeerder moesten worden gebruikt, waarschijnlijk dicht bij het door de fabrikant aanbevolen maximum (maximaal 0,8 tot 1% van het gewicht van het cement), terwijl de dosering van de luchtbelvormer een grote uitdaging bleef. Over het algemeen lijkt de luchtbelvormer minder effectief te zijn bij CEM V/A (S-V) dan bij CEM III/A.

De druksterkte en wateropsorping zijn grafisch voorgesteld in **Figuur 1**, in functie van het cementtype en de vervangingsgraad aan RCA.



Figuur 1 - Invloed van de vervangingsgraad aan RCA op de druksterkte en wateropsorping van betonmengsels (laboratoriumonderzoek)

De invloed van de RCA op de druksterkte lijkt beperkt te zijn. Alleen de mengsels met 100% RCA vertonen een lagere sterkte dan het referentiemengsel, maar alle waarden liggen ruim boven het streefdoel van 50 MPa na 90 dagen. Mengsels met CEM V/A hebben een hogere sterkte dan mengsels met CEM III/A, maar dit kan het gevolg zijn van hun lagere luchtgehalte. We zien echter dat de druksterkte zich iets langzamer ontwikkelt bij CEM V/A, met na 7 dagen 55% van de sterkte na 90 dagen, tegenover 59% bij CEM III/A. De wateropsorping daarentegen wordt duidelijk beïnvloed door de vervangingsgraad van het RCA. Op het referentiemonster leek de absorptie geringer met CEM V/A, maar dit werd niet bevestigd op de mengsels met 25 en 50% RCA.

De massaverliezen tijdens de slabtest zijn hoog in vergelijking met de drempelwaarde van 1,5 kg/m², wat wijst op een geringe weerstand tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten. Bij eenzelfde luchtgehalte lijken CEM III/A-mengsels beter te presteren dan CEM V/A-mengsels. De invloed van de vervangingsgraad aan RCA op de vorstbestendigheid daarentegen, komt niet duidelijk naar voren uit deze resultaten, behalve het feit dat het mengsel met 100% RCA de hoogste massaverliezen vertoont na 28 cycli. Uit deze resultaten blijkt dat het beoogde luchtgehalte van 4% in deze studie niet volstaat om de vorstbestendigheid van het betonoppervlak te garanderen.

Proefvakken

In het kader van het project Monocrete werden er verschillende proefvakken aangelegd aan de betoncentrale van Eloy in Bierset, met een totale oppervlakte van meer dan 3.500 m² (**Figuur 2**). Deze 38 cm dikke betonverhardingen werden gebruikt om de haalbaarheid aan te tonen van een grootschalige toepassing van beton met alternatieve materialen, en om de invloed van de trillingsparameters op de prestaties van het beton te beoordelen (deze resultaten werden beschreven in Van der Wielen et al., 2024).



Figuur 2 – Proefvak van het Monocrete-project in Bierset

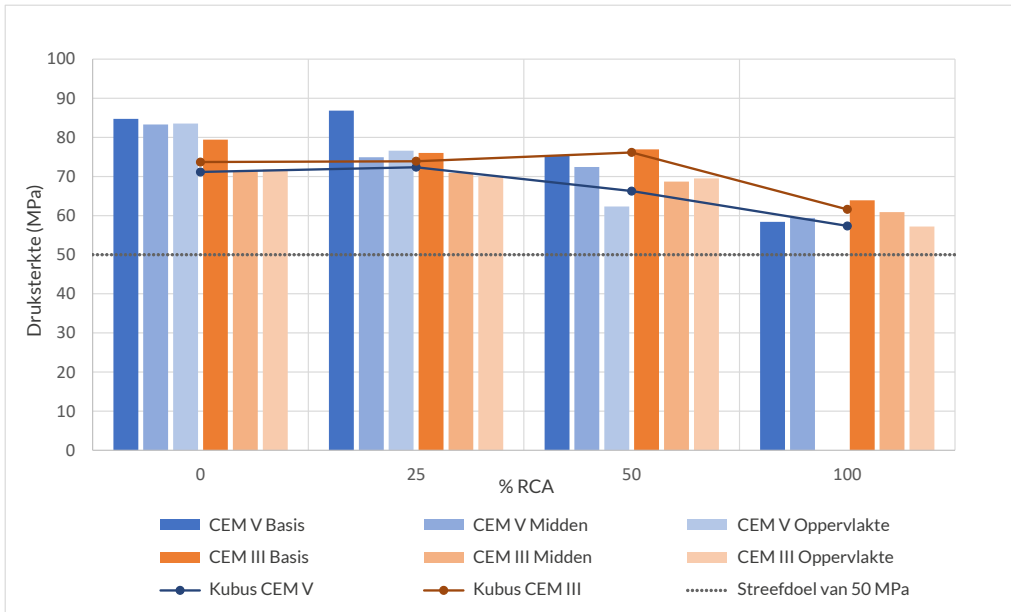
Om de impact van de gerecyclede granulaten en het alternatieve cement te beoordelen op de kwaliteit van het weg beton dat wordt aangelegd met een slipform paver, werd in het voorjaar van 2023 een tweede? proefvak van bijna 500 m lang aangelegd. De mengsels zoals beschreven in **Tabel 3** en **Tabel 4** werden aangemaakt, maar met een aangepaste dosering van de luchtbelvormer en plastificeerder. Het beton werd over het grootste deel van het vak getrild met een gemiddelde frequentie van 170 Hz en aangelegd met een gemiddelde snelheid van 1,1 m/s. Een uittreksel van de verkregen resultaten op dit proefvak is te vinden in **Tabel 5**.

Tabel 5 - Overzicht van de resultaten van het tweede proefvak: proeven op vers beton, op boorkernen en op ter plaatse gevormde of gemaakte? kubussen

Mengsel	Uitvoeringsparameters		Vers beton		Boorkernen					Kubussen		
	Fréq.	Snelheid	Slump (mm)	Lucht (%)	Rc 90 d (MPa)			Slab 28 cycli (kg/m ²)	WAI 90 d (kg/m ²)	Rc 90 d (MPa)	WAI 28 d (%)	Slabtest 28 d (kg/m ²)
					Opp.	Midden	Basis					
C1 : 0% RCA CEM III	Gemiddeld	Gemiddeld	15	4	71,8	71,3	79,4	2,14	4,8	74,41	5,4	1,34
C2 : 100% RCA CEM III	Gemiddeld	Gemiddeld	24	3,5	57,2	60,9	63,9		9,3	60,42	9,1	4,17
C3 : 50% RCA CEM III	Gemiddeld	Gemiddeld	2	2	69,5	68,7	76,9	3,17	6,1	74,83	5,5	3,3
C4 : 25% RCA CEM III	Gemiddeld	Gemiddeld	4	2,7	81	73,2	80,7	2,58	5,6	75,42	6	3,04
C4 : 25% RCA CEM III	Hoog	Gemiddeld	12	4,2	63,4	64,6	71,3		6	69,52	5,8	2,34
C4 : 25% RCA CEM III	Gemiddeld	Laag	26	4,2						69,2		
C6 : 0% RCA CEM V	Gemiddeld	Gemiddeld	49	3						67,72	5,9	3,22
C6 : 0% RCA CEM V	Gemiddeld	Gemiddeld	15	3,2	83,5	83,3	84,7	4,84	5,2	69,73		4,61
C7 : 100% RCA CEM V	Gemiddeld	Gemiddeld	50	2,8		59,4	58,4		9,5	56,61	9,1	6,57
C8 : 50% RCA CEM V	Gemiddeld	Gemiddeld	14	2,9						63,53		3,86
C8 : 50% RCA CEM V	Gemiddeld	Hoog	9	2,6						72,5		
C8 : 50% RCA CEM V	Laag	Gemiddeld	14	3,4	62,3	72,4	75,4		6,5	65,22	7,1	6,04
C9 : 25% RCA CEM V	Gemiddeld	Gemiddeld	10	2,6	76,6	74,9	86,8	2,91	5,3	71,81	6,6	4,07
C9 : 25% RCA CEM V	Gemiddeld	Gemiddeld	26	3,6	65,5	74,8	75,6		5,3	67,46	6	5,83

Het gemeten luchtgehalte was bij bijna alle betonmengsels zeer laag in vergelijking met onze streefwaarde van 4%, ondanks de verhoging van de dosering van de luchtbelvormer van 2 naar 2,5 kg/m³ (meer dan het dubbele van de hoeveelheid die bij de laboratoriumproeven werd gebruikt). Dit lijkt erop te wijzen dat de luchtbelvormer en het nieuwe CEM V/A-cement (waarmee we altijd minder lucht meten dan met CEM III/A) niet erg compatibel zijn. Het kan ook dat het mengproces van de betoncentrale (30"- 45" per batch) te kort is om de "gewenste" luchtbellen te vormen. Met CEM III/A hebben we, bij dezelfde samenstellingen, in het industriële proces namelijk altijd minder lucht gemeten dan in het laboratorium (ondanks de verhoging van de dosering van de luchtbelvormer).

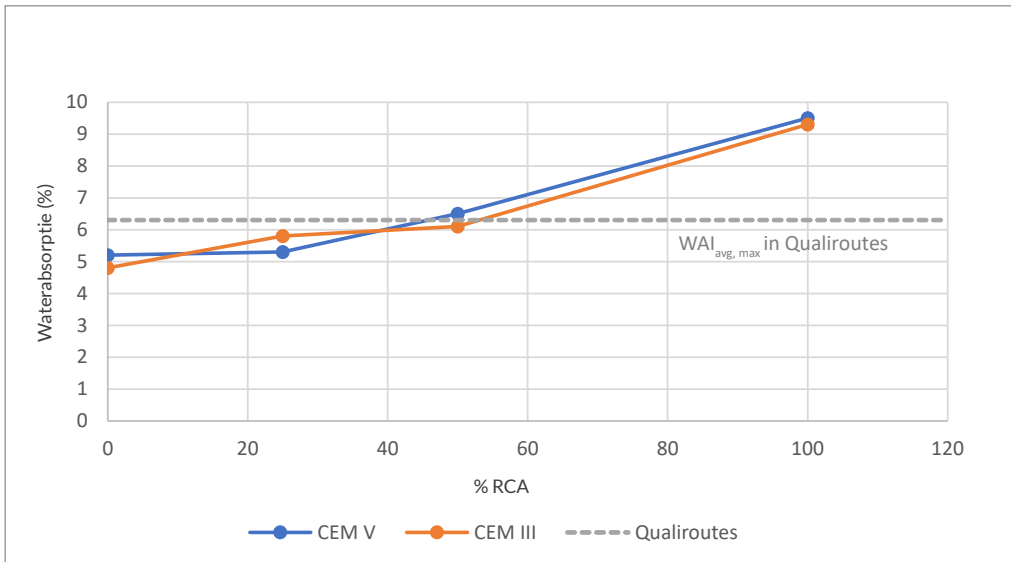
In **Figuur 3** is de gemiddelde druksterkte na 90 dagen weergegeven voor alle boorkernen (in drie monsters van 10 cm hoog gezaagd om de invloed van de ontmenging te beoordelen), afhankelijk van het cementtype en de vervangingsgraad van het RCA.



Figuur 3 - Druksterkte na 90 dagen gemeten op de kubussen en de boorkernen (verdeeld in drie monsters van 10 cm)

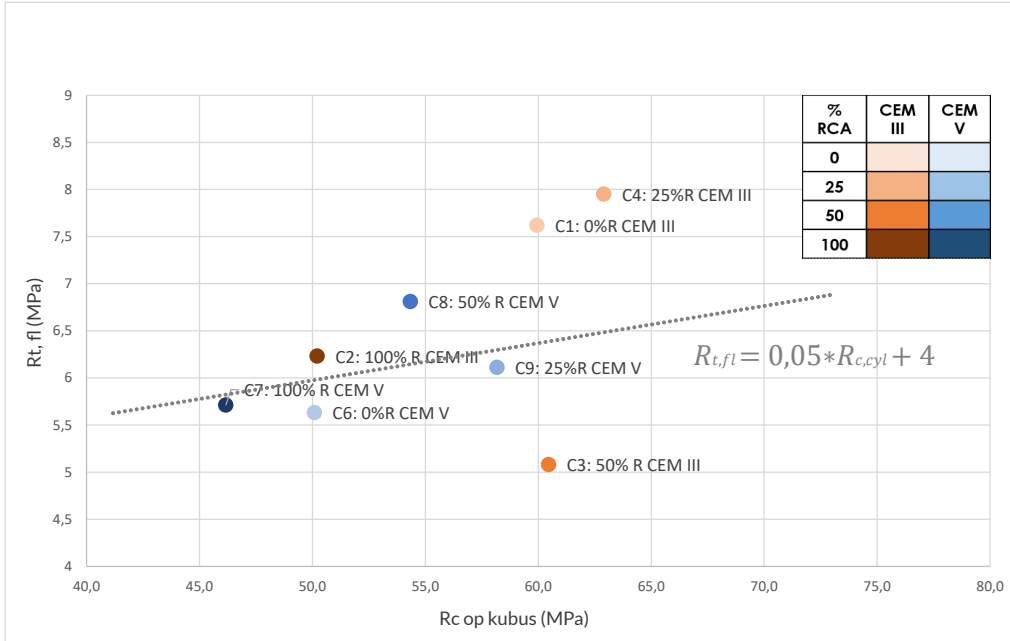
Alle metingen liggen boven de drempelwaarde van 50 MPa. De aanwezigheid van RCA veroorzaakt een vermindering van de druksterkte, met een verlies van ongeveer 25% bij een vervangingspercentage van 100%. De sterkte is gemiddeld 9,4% hoger aan de basis van de boorkern dan aan de oppervlakte.

De wateropsorping aan de oppervlakte werd gemeten op kernen van elke samenstelling (**Figuur 4**). Net als bij de laboratoriumresultaten, lijkt deze parameter rechtstreeks te worden beïnvloed door de vervangingsgraad van het RCA, ongeacht het type cement. Als we willen voldoen aan het criterium voor waterabsorptie volgens het standaardbestek Qualiroutes (SPW, Infrastructures, 2021, hoofdstuk G) (WAI_{avg, max} < 6,3%), lijkt een vervangingspercentage van 50% het maximum.



Figuur 4 - Invloed van de vervangingsgraad van het RCA op de wateropsorping aan de oppervlakte na 90 dagen

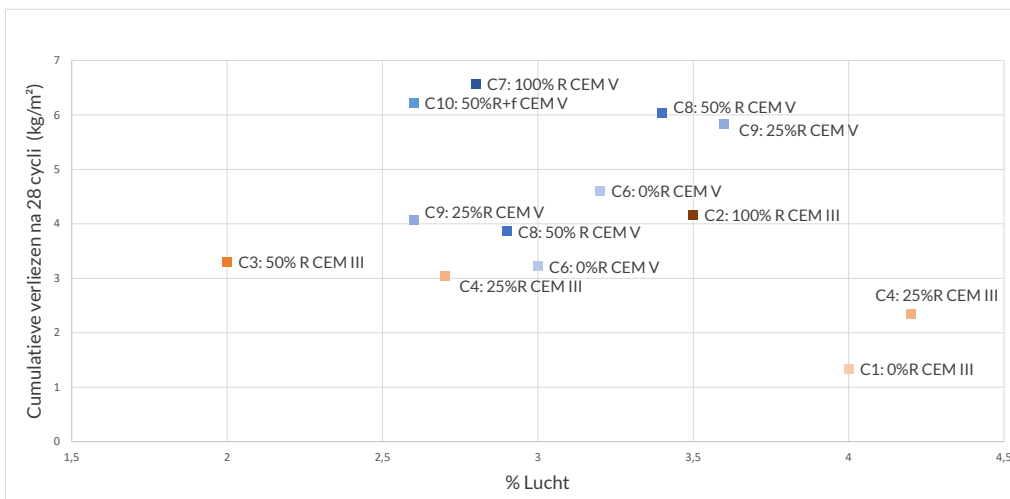
De treksterkte van beton is een belangrijke parameter bij het ontwerp van wegen. Deze wordt meestal bepaald op basis van de druksterkte. Om na te gaan of de relatie tussen deze waarden wordt beïnvloed door de aanwezigheid van gerecyclede granulaten of door het alternatieve cement, werden er 4-punts buigtreksterkteproeven uitgevoerd op prisma's gemaakt met de betonsoorten van het proefvak. **Figuur 5** toont de relatie tussen deze treksterktes en de druksterktes na 28 dagen, gemeten op kubussen van dezelfde betonsoorten.



Figuur 5 - Relatie tussen buigtreksterkte en druksterkte na 28 dagen.

We stellen vast dat de relatie $R_{t,fl} = 0,05 * R_{c,cyl} + 4$, die gebruikt wordt voor de dimensionering van betonwegen in België (QualiDimSPW, 2013) en wordt aangegeven door de stippellijn, vrij goed wordt bevestigd. De gerecyclede granulaten en het alternatieve cement lijken geen bepalende invloed te hebben op deze relatie.

Figuur 6 toont de massaverliezen bij de slabtest na 28 cycli, gemeten op de kubussen aangemaakt op de werf, in functie van het luchtgehalte van de monsters.



Figuur 6 - Invloed van het luchtgehalte in vers beton op de vorst-dooiweerstand in aanwezigheid van dooizouten (slabtest).

We zien dat, op één uitzondering na, de monsters (vaak veel) grotere verliezen vertonen dan de drempel van 1,5 kg/m². De mengsels op basis van CEM III/A lijken bij hetzelfde luchtgehalte beter te presteren. Toch zou het interessant zijn geweest om mengsels met CEM V/A én hoge vervangingspercentages aan RCA met een hoger luchtgehalte (4-5%) te testen om na te gaan of met deze mengsels aan het criterium voor vorstbestendigheid kon worden voldaan. Zoals eerder uitgelegd, was dit niet mogelijk met de luchtbelvormer die ter plaatse aanwezig was.

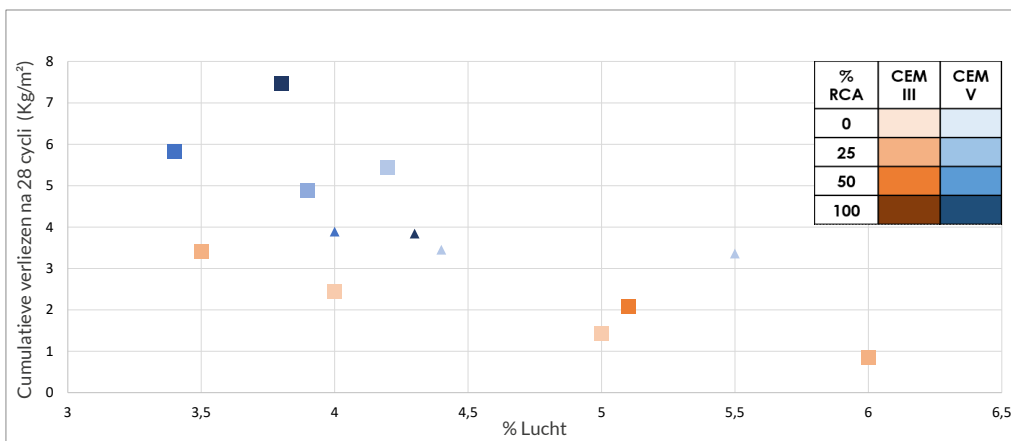
Studie van het netwerk van ingebrachte luchtbelletjes in nieuw beton

Naar aanleiding van deze resultaten werd besloten nieuwe laboratoriummengsels aan te maken om mengsels met CEM V met een voldoende hoog luchtgehalte te testen. Om dit mogelijk te maken, kozen wij een specifieke, poedervormige luchtbelvormer, namelijk AER 200 P van Sika. Deze toeslagstof vormt luchtbelletjes op basis van een chemische reactie, zodat ze weinig wordt beïnvloed door alle andere eigenschappen van het beton (mengtijd, alternatieve samenstelling van de granulaten of het cement, enz.) Gezien de chemische reactie waardoor de luchtbelletjes worden gevormd, raadt de fabrikant aan het luchtgehalte te meten 30 minuten na het mengen.

Er werden samenstellingen getest met 0, 50 en 100% RCA, waarbij gestreefd werd naar een luchtgehalte van 5%, alsook een samenstelling met 0% gerecycled materiaal en een hoger luchtgehalte (6 kg/m³ luchtbelvormer). **Tabel 6** toont de beproefde samenstellingen.

Materiaal	Samenst. 6 : CEM V- 0% RCA	Samenst. 8 : CEM V- 50% RCA	Samenst. 7 : CEM V- 100% RCA	Samenst. 6 : CEM V- 0% RCA
Effectief water	165,6	165,6	165,6	165,06
Absorptiewater	8,03	28,38	51,32	8,03
Plastificeerder Sika BV3M	2,5	2,50	2,5	2,5
Luchtbelvormer AER 200 P	4	4	4,8	6
Slump (mm)	11	12	16	26
Luchtgehalte na 30 minuten (%)	4,4	4	4,3	5,5
Rc 7d (MPa)	35,04	33,28	29,59	26,58
Rc 28 d (MPa)	52,47	48,71	45,65	42,55
Massaverlies Slabtest 28 cycli (kg/m ²)	3,45	3,89	3,84	3,36

De luchtgehalten die worden verkregen met de nieuwe luchtbelvormer zijn inderdaad hoger dan die met de klassieke luchtbelvormer werden verkregen. De werking van het product lijkt echter licht af te nemen naarmate het gehalte aan gerecyclede granulaten (RCA) toeneemt. De verliezen na 28 cycli in de slabtest worden vergeleken met de vorige laboratoriumresultaten (**Figuur 7**).



Figuur 7 - Invloed van het luchtgehalte van het verse beton op de vorst-dooiweerstand in aanwezigheid van dooizouten (slabtest) - vergelijking van de mengsels met de nieuwe luchtbelvormer (driehoeken) met de vorige mengsels (vierkanten)

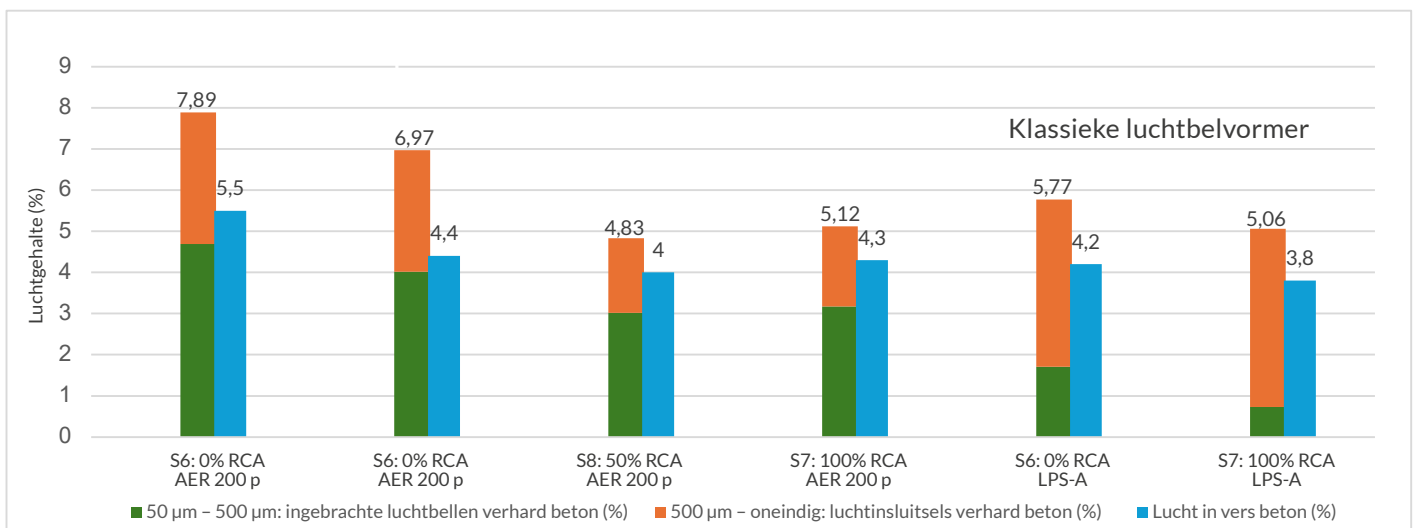
De mengsels die zijn gemaakt met de nieuwe luchtbelvormer (de driehoeken in de grafiek) vertonen effectief een betere weerstand tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten dan de vorige mengsels die met CEM V waren gemaakt. Dit geldt voor mengsels die meer luchtbelletjes bevatten dan wat eerder werd gehaald, maar ook voor het mengsel met 50% gerecycled materiaal dat 4% lucht bevat. Bij een gelijk gemeten luchtgehalte lijkt de bescherming tegen de gevolgen van vorst dus beter te zijn met de nieuwe luchtbelvormer dan met de vorige. Ondanks deze verbeterde prestaties blijven de verliezen na 28 cycli nog steeds hoger dan het streefdoel van 1,5 kg/m². Bij identiek luchtgehalte zijn de prestaties van de mengsels met CEM V-cement minder goed dan die van mengsels met CEM III. Op basis van deze nieuwe proeven blijkt opnieuw dat gerecyclede granulaten een licht negatief effect hebben op de vorst-dooiweerstand van beton.

Om de waargenomen verschillen te kunnen verklaren, werd bij het CRIC-OCCN een analyse gemaakt van de kenmerken van het luchtbelnetwerk, met behulp van het programma Image J (waarvan de resultaten vergelijkbaar waren met die van de norm ASTM C457-98 [ASTM International, 1998]). Deze analyse werd uitgevoerd op gepolijste betonplaten die vervolgens in hoge definitie worden gescand, en was bedoeld om het gehalte aan luchtbelletjes te bepalen met de ideale grootte (50 -500 µm) en die dus de vorst-dooiweerstand van het beton kunnen verhogen. Met deze analyse is het ook mogelijk de afstandsfactor van het beton te meten, die wordt gedefinieerd als de gemiddelde halve afstand tussen twee luchtbelletjes (Powers, 1949). Volgens veel auteurs is deze parameter de beste indicator voor een voldoende vorst-dooiweerstand, waarbij een afstandsfactor van minder dan 200 µm vaak wordt gelijkgesteld met een voldoende weerstand (ACI Committee 201, 2016; GBB, 2018). Deze analyse werd uitgevoerd op beton dat vervaardigd werd met de nieuwe luchtbelvormer, maar ook, ter vergelijking, op twee proefstukken met 0 en 100% gerecycled materiaal die werden vervaardigd met de eerste luchtbelvormer LPS-A (**Tabel 7**).

Tabel 7 - Analyse van de invloed van de luchtbelvormer op de kenmerken van het luchtbelnetwerk

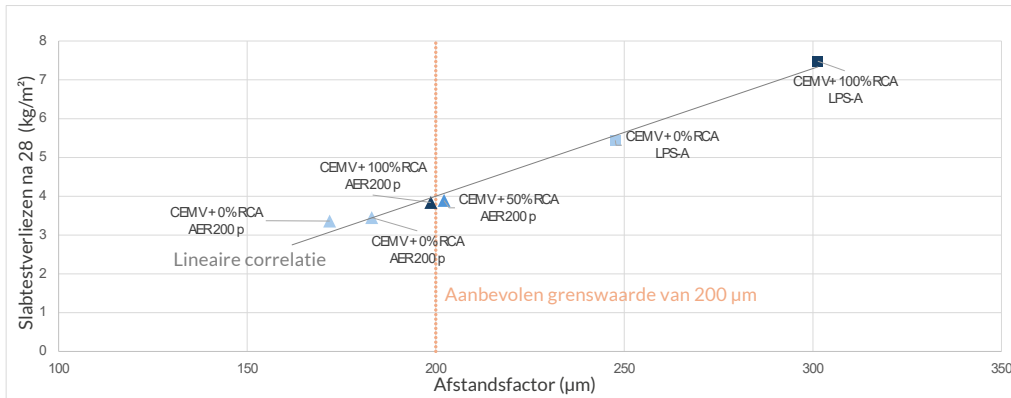
Monsters	Samenst. 6: CEM V 0% RCA AER 200 P	Samenst. 6: CEM V 0% RCA AER 200 P	Samenst. 8: CEM V 50% RCA AER 200 P	Samenst. 7: CEM V 100% RCA AER 200 P	Samenst. 6: CEM V 0% RCA LPS-A	Samenst. 7: CEM V 100% RCA LPS-A
50µm-500µm: luchtbelletjes in verhard beton (%)	4,69	4,02	3,02	3,17	1,71	0,73
500 µm-oneindig: luchtinsluitels in verhard beton (%)	3,2	2,95	1,81	1,95	4,06	4,33
Totale lucht in verhard beton (%)	7,89	6,97	4,83	5,12	5,77	5,06
Afstandsfactor aan de oppervlakte (µm)	171,89	183,03	202,2	198,7	247,6	301,3
Massaverlies in Slabtest na 28 cycli (kg/m ²)	3,36	3,45	3,89	3,84	5,44	7,48
Druksterkte na 28 dagen	42,55	52,47	48,71	45,65	53,42	49,08
Totale lucht in uitgehard beton (%)	7,89	6,97	4,83	5,12	5,77	5,06
Gemeten Lucht in vers beton (%)	5,5	4,4	4	4,3	4,2	3,8

Met de luchtbelvormer AER 200 P kan een hoger luchtgehalte worden bereikt met het cement CEM V, maar hij lijkt ook de kwaliteit van het luchtbelnetwerk te verbeteren. We zien namelijk (**Figuur 8**) dat de luchtbelletjes die met dit product worden verkregen zich grotendeels in het interval van 50 µm - 500 µm bevinden, terwijl de proefstukken die met de oude luchtbelvormer werden gemaakt, voornamelijk luchtinsluitels bevatten (belletjes > 500 µm).



Figuur 8 - Invloed van de luchtbelvormer op de grootte van de luchtbelletjes in laboratoriumproefstukken gemaakt met CEM V

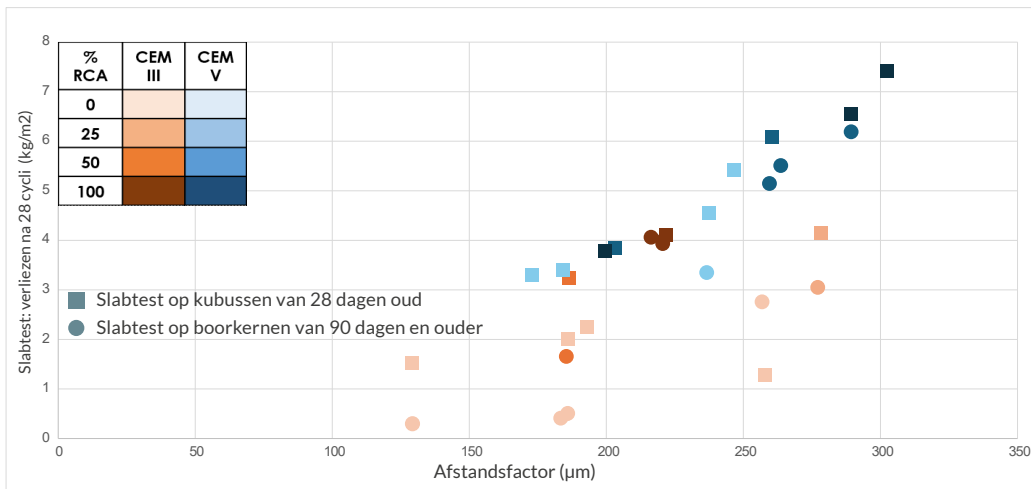
Figuur 9 toont de invloed van de afstandsfactor op de verliezen na 28 cycli bij de vorst-dooiproef (slabtest). We zien een duidelijke correlatie tussen beide parameters, waarbij een lagere afstandsfactor effectief de vorst-dooiverliezen vermindert.



Figuur 9 - Correlatie tussen afstandsfactor en vorst-dooiverliezen

In de literatuur wordt een dergelijke correlatie regelmatig beschreven, maar er wordt aangenomen (ACI Committee 201, 2016) dat de afstandsfactor die nodig is om vorst-dooiweerstand te bereiken, van de orde van 200 µm is, wat hier echter niet wordt waargenomen aangezien de verliezen bij een afstandsfactor van 200 µm groter blijven dan 3 kg/m².

Het CRIC-OCCN voerde ook een analyse van het luchtbelnetwerk in uitgehard beton uit op boorkernen die na meer dan 90 dagen waren genomen uit het proefvak. Deze resultaten kunnen worden gecombineerd met de resultaten op de werf- en laboratoriumkubussen om de invloed van de afstandsfactor op de vorst-dooiverliezen grafisch weer te geven (**Figuur 10**).



Figuur 10 - Correlatie tussen afstandsfactor en verliezen bij de slabtest voor de monsters uit de proefvakken en de laboratoriumproefstukken

We zien dat de punten uitgelijnd liggen langs een rechte, die de maximale massaverliezen voor een gegeven afstandsfactor lijkt weer te geven. Deze verliezen lijken niet rechtstreeks afhankelijk te zijn van het gehalte aan gerecyclede granulaten of het gebruikte cement, maar blijven over het algemeen hoger dan het beoogde doel, zelfs bij een afstandsfactor van minder dan 200 µm. Sommige monsters vertonen verliezen die ver onder deze rechte lijn liggen. Dit zijn meestal betonsoorten op basis van CEM III-cement die weinig (0-25%) gerecyclede granulaten bevatten. Over het algemeen zijn de verliezen op de boorkernen lager dan de verliezen op de kubussen, wat met name kan worden verklaard door het feit dat de boorkernen na meer dan 90 dagen werden genomen, terwijl de proeven op de kubussen werden uitgevoerd op jonger beton.

Conclusies

Eenlaagse betonverhardingen met grote dikte zijn een goede oplossing voor de huidige mobiliteitsuitdagingen. Niettemin blijft hun impact op het milieu (in termen van CO₂-equivalente emissies en uitputting van natuurlijke hulpbronnen) aanzienlijk. Het doel van het project MONOCRETE was de trillingsparameters te optimaliseren en tegelijk de milieu-impact te verminderen door gebruik van gerecycleerde materialen in het kader van een meer circulaire economie.

De analyse van de eerste resultaten die werden verkregen in het laboratorium en op onze proefvakken toonde aan dat de druksterkte van alle mengsels bevredigend was, hoewel er een daling wordt waargenomen bij 100% RCA. De druksterkte kan beduidend hoger zijn aan de basis van de betonverharding dan aan de oppervlakte. De wateropsorping daarentegen neemt evenredig toe met de vervangingsgraad aan RCA.

Volgens deze eerste resultaten is de vorst-dooiweerstand in aanwezigheid van dooizouten het belangrijkste aandachtspunt voor de alternatieve betonsoorten. CEM V-cement is minder compatibel met de klassieke luchtbelvormers en lijkt een lagere vorst-dooiweerstand op te leveren dan CEM III, zelfs bij een vergelijkbaar luchtgehalte. Een uitgebreide analyse van het netwerk van luchtbellens in het beton uit het laboratorium en op de proefvakken liet een sterke correlatie zien tussen de afstandsfactor en de vorst-dooiweerstand. Ze toonde ook het nut aan van het gebruik van specifieke luchtbelvormers, hoewel de vorst-dooiweerstand van de vervaardigde mengsels vaak lager was dan verwacht.

De bouwsector verbruikt bijna 40% van alle natuurlijke hulpbronnen wereldwijd en produceert een vergelijkbaar percentage afval. Dit project wil een stimulans zijn om te helpen minerale hulpbronnen te vrijwaren, bouwafval te regenereren en het transport te verminderen door lokaal gebruik van gerecyclede producten.

Auteur

Audrey Van der Wielen
T +32 2 766 03 87
a.vanderwielen@brrc.be



Referenties

ACI Committee 201. (2016). Guide to durable concrete (ACI Guide No. 201.2R-16). American Concrete Institute (ACI).
<https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=201216&Language=English&Units=US AND METRIC>

ASTM International. (1998). Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete (ASTM C457-98). <https://store.astm.org/c0457-98.html>

Comité Européen de Normalisation (CEN). (2016). Essais sur béton durci. Partie 9: Résistance au gel dégel-dégel en présence de sels de déverglaçage (écaillage) (CEN/TS 12390-9).

Groepement Belge du Béton (GBB). (2018). Technologie du béton.
<https://www.gbb-bbg.be/publications/manuel-technologie-du-beton/>

Organisation Internationale de Normalisation (ISO). (1984). Béton: Détermination de la résistance à l'écaillage des surfaces soumises à des agents chimiques dégivrants (ISO/DIS 4846-2).

Ploaert, C. (2010). Vers une composition optimale des bétons routiers. Fédération Belge du Ciment (FEBELCEM).
https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/autres-publications/fr/Composition-optimale-betons-routiers.pdf

Powers, T.C. (1949, December 13-16). The air requirements of frost-resistant concrete. In R.W. Crum, F. Burggraf & W.N.J. Carey (Eds), Proceedings of the 29th annual meeting of the Highway Research Board, Washington, DC, USA. National Research Council (NRC), Highway Research Board (HRB).

Service Public de Wallonie (SPW). (2013). Guide utilisateur du logiciel QualiDim 2.4.0.

Service Public de Wallonie (SPW), Infrastructures. (2021). Cahier des charges type Qualiroutes (Version 2021 consolidée [et ses adaptations ultérieures]). <https://infrastructures.wallonie.be/pouvoirs-locaux/nos-thematiques/routes/qualite--construction/qualiroutes.html>

Van der Wielen, A., Smets, S., Van Hoye, T., Hubert, J., Courard, L., Cerica, D., Léonard, A., NGanjie, J. & Schaerlaekens, S. (2024, August 25-29). Optimizing vibration parameters of thick single-layer concrete pavements: Results of the Belgian Monocrete project. In Innovative paths toward lower carbon in concrete pavements. 13th international conference on concrete pavements, Minneapolis, MN, USA. International Society for Concrete Pavements (ISCP).

Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer (AWV). (2021). Standaardbestek 250 voor de wegenbouw (Version 4.1a).
<https://wegenenverkeer.be/zakelijk/documenten>