

De duurzaamheid van beton maakt al verschillende jaren het voorwerp uit van diverse onderzoeksprojecten van het WTCB en het OCCN ⁽¹⁾. Aangezien wapeningscorrosie op wereldschaal de voornaamste schadeoorzaak is van beton, verdient deze bijzondere aandacht [14]. In dit artikel wordt dieper ingegaan op een van de factoren waardoor deze schade kan veroorzaakt worden, met name de carbonatatie van het beton, en worden enkele preventieve maatregelen voorgesteld.

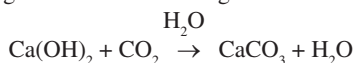
✍ V. Pollet, ir., technologisch adviseur ⁽²⁾, afdelingshoofd 'Beton en Bouwchemie', WTCB
B. Dooms, ir., onderzoeker, laboratorium 'Betontechnologie', WTCB
G. Mosselmans, dr. ir., projectleider, OCCN ⁽¹⁾

1 CARBONATATIE EN CORROSIE

Jong beton vertoont een hoge pH, die schommelt rond 12 à 13. Door deze alkaliniteit wordt er rond de wapeningsstaven een zo goed als ondoordringbaar ijzerhydroxidelagje gevormd dat verdere corrosie van het staal verhindert. Men spreekt van de passivering van het staal.

Beton dat blootgesteld is aan de lucht, verouderd door de reactie van het koolstofdioxide (CO₂) uit de lucht met de alkalische bestanddelen in het beton. Deze reactie wordt aangeduid als carbonatatie van beton.

Het koolstofdioxide lost op in het poriënwater van het beton. Door deze reactie kan het calciumhydroxide (portlandiet) op zijn beurt oplossen in het poriënwater, reageren met het CO₂ en neerslaan in de vorm van calciumcarbonaat (CaCO₃) waardoor de pH ervan daalt tot ongeveer 9. Deze chemische reactie kan voorgesteld worden als volgt :



Bij de meeste betonsoorten uit de afzetting van het calciumcarbonaat (CaCO₃) zich door een verbetering van de dichtheid van de structuur en een kleine toename van de druksterkte. In gewapend beton kan deze reactie echter leiden

Wapeningscorrosie door de carbonatatie van beton voorkomen

tot schade als gevolg van de corrosie van de wapening.

Naarmate de tijd vordert, verplaatst het carbonatatiefront (d.i. de grens tussen de gecarbonateerde en de niet-gecarbonateerde zone van het beton) zich dieper in het beton. De carbonatatie snelheid neemt evenwel af met de tijd, vermits het CO₂ steeds dieper in het beton moet dringen en de poriën vernauwd zijn door de afzetting van calciumcarbonaat. De carbonatatie diepte kan bij benadering berekend worden met behulp van de volgende formule :

$$D = k_c \sqrt{t}$$

waarbij :

D = de carbonatatie diepte (mm)

k_c = de carbonatatiecoëfficiënt, die afhankelijk is van de betonkwaliteit en de blootstelling (mm/√jaren)

t = de leeftijd van het beton (jaren).

De carbonatatiecoëfficiënt k_c is een maat voor de carbonatatie weerstand van het beton en hangt af van de betonsamenstelling, de uitgevoerde nabehandeling en de blootstelling. Naarmate deze coëfficiënt voor een bepaald beton in een welbepaald milieu groter is, zal het beton sneller carbonateren en dus een lagere carbonatatie weerstand vertonen.

Zodra het carbonatatiefront de wapening bereikt, zal de pH op deze plaats dalen, waardoor de passivatielaag instabiel wordt, oplost en haar beschermende werking verliest. In aanwezigheid van water en zuurstof zal de wapening beginnen corroderen. De aldus gevormde corrosieproducten nemen een volume in dat verschillende malen groter is dan dat van het staal, wat scheurvorming in en afbrokkeling van het beton tot gevolg heeft.

Doorgaans stelt men vast dat door carbonatatie ingeleide wapeningscorrosie het staal redelijk gelijkmatig en over grote lengte aantast (gegeneraliseerde corrosie).

2 OPMETEN VAN DE CARBONATATIE DIEPTE

De bepaling van de carbonatatie diepte gebeurt volgens de methode, beschreven in de RILEM-aanbeveling CPC-18 [16] of volgens de



Afb. 1 Carbonatatie diepte op een vers breukvlak.

norm NBN EN 14630 [11]. Hierbij breekt men een relatief groot brokstuk af of splijt men een boorkern in de langsrichting, waarna men het aldus verkregen breukvlak zo snel mogelijk besproeit met een fenolftaleïneoplossing, een pH-indicator. Het niet-gecarbonateerde beton zal onmiddellijk paars kleuren, terwijl de gecarbonateerde zones kleurloos blijven (zie afbeelding 1).

Deze methode vereist tamelijk omvangrijke proefstukken. Om de schade enigszins te beperken, kan een andere proefprocedure gebruikt worden, waarbij kleine gaatjes (met een diameter van 6 tot 8 mm) in het beton geboord worden en het boormeel opgevangen wordt op een met fenolftaleïne doordrenkt blad. In het geval van een betonnen vloerplaat kan het boormeel regelmatig met fenolftaleïne besproeid worden. Zodra het niet-gecarbonateerde beton wordt aangeboord, zal het boormeel verkleuren. De diepte van het boorgat komt dan bij benadering overeen met de carbonatatie diepte. De metingen moeten minstens drie maal herhaald worden in elke onderzochte zone om de invloed van plaatselijke fenomenen, zoals de aanwezigheid van aggregaten, te beperken. Men moet bovendien rekening houden met het feit dat er in scheuren en hoeken een grotere carbonatatie diepte kan voorkomen.

3 PREVENTIEMAATREGELEN, VOORZIEN IN DE NORMEN

Om corrosie door carbonatatie te vermijden, worden in verschillende normen voorschriften voorzien :

- de norm NBN EN 206-1 [4] en zijn Belgische aanvulling, de NBN B 15-001 [1], leggen een minimaal cementgehalte en een

⁽¹⁾ Nationaal Centrum voor Wetenschappelijk en Technisch Onderzoek der Cementnijverheid.

⁽²⁾ Technologische Dienstverlening 'Réparation du béton', gesubsidieerd door het Waalse Gewest.

- maximale W/C-factor op
- de Eurocode 2 [7] legt een minimale betondekking op
- de Europese ontwerpnorm prEN 13670 [15] en de norm NBN EN 13369 [10] schrijven tenslotte een minimale nabehandlingsduur voor.

Er kan tevens een beschermingsbekleding aangebracht worden die beantwoordt aan de norm NBN EN 1504-2 [6]. Deze methode dient men enkel toe te passen indien de betonsamenstelling ongeschikt of de betondekking ontoereikend is.

3.1 MINIMAAL CEMENTGEHALTE EN MAXIMALE W/C-FACTOR

De norm NBN EN 206-1 gaat ervan uit dat een betonconstructie duurzaam is indien deze tijdens haar volledige gebruiksduur voldoende weerstand biedt aan de omgeving waaraan ze blootgesteld is. Afhankelijk van het milieu definieert deze norm verschillende milieuklassen. De milieuklassen, geassocieerd met corrosie, ingeleid door carbonatatie, stemmen overeen met de klassen XC1 tot XC4, die van toepassing zijn op betonconstructies die een wapening of andere metalen deeltjes bevatten en blootgesteld zijn aan lucht en vocht (zie tabel 1).

Aan elk van deze klassen worden door de norm NBN B 15-001 welbepaalde betontypes verbonden, die gekarakteriseerd zijn door een minimaal cementgehalte (C_{\min}) en een maximale W/C-factor (W/C_{\max}) (zie tabel 2).

Volgens de norm NBN EN 206-1 dient de ontwerper van de constructie alle schademechanismen die zich kunnen voordoen in aanmerking te nemen. Om het werk van de voorschrijvers te vereenvoudigen, worden in de norm NBN B 15-001 omgevingsklassen gedefinieerd die overeenstemmen met de omgevingsklassen die in België het meest voorkomen. Deze indeling houdt niet enkel rekening met carbonatatie, maar ook met andere schademechanismen zoals vorst, indringing van chloriden, ... (2).

Tabel 1 Milieuklassen, geassocieerd met corrosie, ingeleid door carbonatatie [4].

Klasse	Beschrijving	Informatieve voorbeelden
XC1	Droog of blijvend vochtig	Beton binnenin gebouwen waar de vochtigheid van de omgevingslucht laag is. Beton dat blijvend ondergedompeld is in water.
XC2	Vochtig, zelden droog	Betonoppervlakken die langdurig in contact staan met water. Een groot aantal funderingen.
XC3	Matige vochtigheid	Beton binnenin gebouwen waar de vochtigheid van de omgevingslucht matig of hoog is. Beton buiten, dat beschermt is tegen regen.
XC4	Wisselend vochtig en droog	Oppervlakken die in contact staan met water, maar niet tot de milieuklasse XC2 behoren.

Tabel 2 Met de milieuklassen geassocieerde eisen inzake de carbonatatieweerstand [1].

Parameter	Klasse XC1	Klasse XC2	Klasse XC3	Klasse XC4
	Beton T(0,65)	Beton T(0,60)	Beton T(0,55)	Beton T(0,50)
C_{\min} (kg/m ³)	260	280	300	320
W/C_{\max}	0,65	0,60	0,55	0,50

3.2 BETONDEKKING

In de norm NBN EN 1992-1-1 zijn, voor bouwwerken van gewapend beton, minimale betondekkingen ($c_{\min,dur}$) opgenomen in functie van de structuurklasse en de milieu- en omgevingsklassen (tabel 3). Voor een levensduur van 50 jaar wordt in België de structuurklasse S4 aangeraden.

3.3 NABEHANDELING VAN HET VERSE BETON

De nabehandeling omvat alle maatregelen die de verdamping van water aan het betonoppervlak beperken of die het oppervlak permanent vochtig houden. In de Europese ontwerpnorm prEN 13670 en de norm NBN EN 13369 worden hieromtrent een aantal voorschriften geformuleerd.

(2) De nieuwe normen voor beton kwamen reeds aan bod in diverse WTCB-Dossiers [19, 20].

Wat ter plaatse gestort beton betreft, definieert de ontwerpnorm prEN 13670 verschillende nabehandlingsklassen. Deze stemmen overeen met een nabehandling van 12 uur of met de tijd die nodig is om een welbepaalde druksterkte te bereiken (zie tabel 4, p. 3). De nabehandlingsklasse moet gespecificeerd worden in de uitvoeringsvoorschriften.

Voor specifieke voorschriften voor geprefabriceerde producten verwijzen we naar de norm NBN EN 13369.

4 DOOR HET WTCB BESTUDEERDE INVLOEDSFACTOREN

4.1 INLEIDING

De fundamentele factor die de carbonatatie van het beton controleert, is de diffusie van CO₂ doorheen de verharde cementpasta. Om deze reden worden in verschillende voorschriften

Tabel 3 Minimale betondekkingen $c_{\min,dur}$ (in mm) om de duurzaamheid van gewapend beton te verzekeren [7].

Structuurklasse	Milieu- en omgevingsklassen (*)					
	XC1	XC2, XC3	XC4	XD1, XS1	XD2, XS2	XD3, XS3
	E1	EE1, EE2	EE3	ES2	ES1, ES3	EE4, ES4
S1	10	10	15	20	25	30
S2	10	15	20	25	30	35
S3	10	20	25	30	35	40
S4	15	25	30	35	40	45
S5	20	30	35	40	45	50
S6	25	35	40	45	50	55

(*) Voor gewapend beton, blootgesteld aan een chemisch agressieve omgeving (XA en EA), dient men de hoogste $c_{\min,dur}$ -waarde, opgelegd voor de andere milieu- en omgevingsklassen, te beschouwen.

Tabel 4 Nabehandelingsklassen [15].

Nabehandelingsklasse	Percentage van de waarde die gespecificeerd werd voor de karakteristieke druksterkte na 28 dagen
Klasse 1 – min. 12 uur (*)	–
Klasse 2	35 %
Klasse 3	50 %
Klasse 4	70 %

(*) Op voorwaarde dat de bindingstijd korter is dan 5 uur en dat de temperatuur aan het betonoppervlak minstens 5 °C bedraagt.

bepalingen opgelegd voor de (maximale) W/C-factor en het (minimale) cementgehalte. De blootstelling van het beton (vochtgehalte) heeft eveneens een invloed op de carbonatatie-snelheid.

Uit de in § 1 (p. 1) gegeven beschrijving van de carbonatatiereactie blijkt dat deze reactie zich enkel kan voordoen in een waterig milieu. De diffusie van CO₂ doorheen droog beton (waarbij de poriën gevuld zijn met lucht) verloopt echter 10000 keer sneller dan doorheen vochtig beton (waarbij de poriën gevuld zijn met water). Hieruit volgt dat beton het snelst zal carbonateren indien het betonoppervlak blootstaat aan vochtige perioden, die opgevolgd worden door langere droge perioden (milieu-klasse XC4, zie tabel 1, p. 2).

Het WTCB heeft, in samenwerking met het OCCN, een onderzoek uitgevoerd waarin de invloed van verschillende parameters op de carbonatatieweerstand van het beton werd nagegaan. De bestudeerde parameters waren :

- het cementtype
- de nabehandeling van het beton
- de W/C-factor
- het cementgehalte.

Vermits er nog geen genormaliseerde proefprocedure bestond, stelde het WTCB zelf een methode op om de carbonatatieweerstand van het beton te karakteriseren en de invloed van de voornoemde parameters na te gaan. Deze methode werd bewust eenvoudig gehouden opdat ze zowel geschikt zou zijn voor het beproeven van betonstalen, afkomstig van de bouwplaats, als voor de uitvoering van controles voor certificatie-doelinden.

4.2 PROEFMETHODE

Voor de samenstelling van het beton dat bestudeerd werd tijdens het onderzoek werd enerzijds gebruik gemaakt van kalksteengranulaten met een korrelverdeling, overeenkomstig de norm NBN EN 480-1, en anderzijds van de volgende cementtypes :

- CEM I 42,5 R
- CEM I 52,5 R
- CEM I 52,5 N HSR LA
- CEM II/A-M 32,5 R
- CEM II/B-M 32,5 R

- CEM III/A 32,5 N LA
- CEM III/A 42,5 N LA
- CEM III/B 42,5 N HSR LA
- CEM III/C 32,5 N HSR LA
- CEM V/A 32,5 N HSR/LA.

De betonmengsels werden vervaardigd met een W/C-factor van 0,525 en een cementgehalte van 300 kg/m³. Met de cementtypes CEM I 42,5 R en CEM III/A 42,5 N LA werden eveneens mengsels samengesteld met een W/C-factor van 0,55 en 0,60 (voor een cementgehalte van 300 kg/m³) en met een cementgehalte van 280 kg/m³ en 350 kg/m³ (voor een W/C-factor van 0,525).

Van elk van deze mengsels werden prisma's aangemaakt van 15 x 15 x 60 cm³ en kubussen van 15 x 15 x 15 cm³. De prisma's werden onderworpen aan een carbonatatieproef, terwijl de kubussen gebruikt werden ter bepaling van de druksterkte (na 28 dagen), de bijhorende volumieke massa en de waterabsorptie door onderdompeling.

Na een uitharding van 24 uur werden de betonstalen ontkist en vervolgens op 2 manieren nabehandeld :

- ideale nabehandeling : bewaring gedurende 56 dagen bij een temperatuur van (20±2) °C en een relatieve vochtigheid (RV) van meer dan 90 %
- ontoereikende nabehandeling : bewaring

gedurende 56 dagen bij een temperatuur van (20±2) °C en een RV van (60±2) %.

De lange nabehandeling (56 dagen) heeft tot doel om een voldoende primaire en secundaire hydratatie te waarborgen. Na deze termijn worden de proefstukken gedurende 14 dagen gedroogd en vervolgens bewaard bij een temperatuur van (20±2) °C en een relatieve vochtigheid van (60±2) % tot een constante massa bereikt wordt.

Daarna worden de prisma's gedurende 56 dagen in een carbonatatiekamer met een CO₂-gehalte van 1 %, een temperatuur van (20±2) °C en een relatieve vochtigheid van (55±5) % geplaatst. Na 3, 7, 14, 28, 35, 42 en 56 dagen wordt een deel van de prisma's afgebroken ter bepaling van de gemiddelde carbonatatie diepte volgens de norm NBN EN 14630 [11].

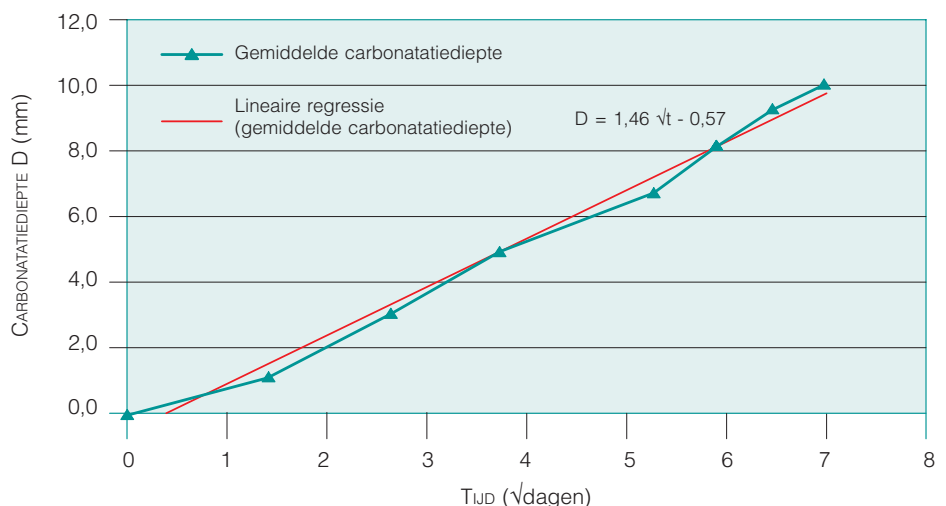
De gemiddelde carbonatatie diepte wordt vervolgens uitgezet in een grafiek, in functie van de vierkantswortel van de blootstellingsduur (√dagen). Uitgaande van de formule uit § 1, verkrijgt men een lineaire-regressierechte, waarvan de helling de carbonatatiecoëfficiënt van het bestudeerde beton (in mm/√dagen) onder versnelde voorwaarden oplevert (zie afbeelding 2).

De resultaten van de druksterkte, de bijhorende volumieke massa en de waterabsorptie door onderdompeling werden vervolgens gebruikt om correlaties te zoeken tussen deze eigenschappen, die vaak gebruikt worden ter karakterisering van beton, en de carbonatatieweerstand.

4.3 PROEFRESULTATEN

4.3.1 Invloed van de W/C-factor

De invloed van de W/C-factor werd nagegaan op beton vervaardigd met de cementtypes

Afb. 2 Bepaling van de carbonatatiecoëfficiënt door lineaire regressie.

CEM I 42,5 R en CEM III/A 42,5 N LA en een cementgehalte van 300 kg/m³. De afbeeldingen 3 en 4 stellen de resultaten voor die met elke gebruikte W/C-factor bekomen werden op drie proefstukken. Zoals verwacht, stijgt de carbonatatieweerstand naarmate de W/C-factor daalt.

4.3.2 Invloed van het cementgehalte

De invloed van het cementgehalte werd eveneens nagegaan op beton vervaardigd met de cementtypes CEM I 42,5 R en CEM III/A 42,5 N LA en een W/C-factor van 0,525. De resultaten die met elk cementgehalte bekomen werden op drie proefstukken zijn weergegeven in de afbeeldingen 5 en 6 (p. 5). Wij konden geen duidelijke invloed van het cementgehalte op de carbonatatieweerstand vaststellen. In deze context willen we echter wel aanstippen dat de in dit onderzoek gebruikte cementgehalten redelijk hoog zijn en redelijk dicht bij elkaar liggen.

4.3.3 Invloed van het cementtype

De carbonatatiecoëfficiënten k_c van beton vervaardigd met de verschillende cementtypes (bij een cementgehalte van 300 kg/m³ en een W/C-factor van 0,525) zijn opgenomen in tabel 5 (p. 5) en worden grafisch voorgesteld in de afbeelding 7 (p. 5).

De invloed van het cementtype werd aangetoond door de carbonatatiecoëfficiënt van elk cement te vergelijken met deze van een referentiecement (CEM I 42,5 R). Bij een identieke W/C-factor en een identiek cementgehalte stelt men vast dat de cementtypes met vliegassen (CEM II, CEM V) en hoogovenslakken (CEM III) een hogere carbonatatiecoëfficiënt bezitten dan Portlandcement. Bij cement met hoogovenslakken vergroot dit nadelige effect naarmate het gehalte aan slakken toeneemt en de fijnheid van het cement vermindert (overgang van klasse 42,5 naar klasse 32,5 voor eenzelfde cementtype).

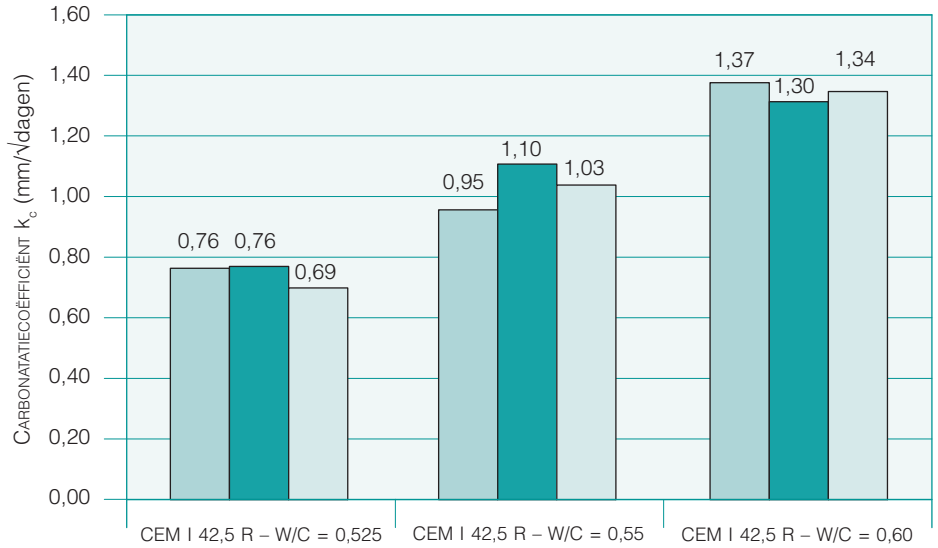
Binnen het OCCN werd de carbonatatieweerstand van mortels bepaald, vervaardigd met enkele van de voornoemde cementtypes en met samenstellingen, conform de eisen uit de NBN EN 196-1 [3]. De resultaten worden voorgesteld in afbeelding 8 (p. 6), en dit zowel voor mortels die een ideale als een ontoereikende nabehandeling kregen [17].

De opmerkingen voor de resultaten op mortel zijn identiek aan deze die reeds geformuleerd werden voor beton.

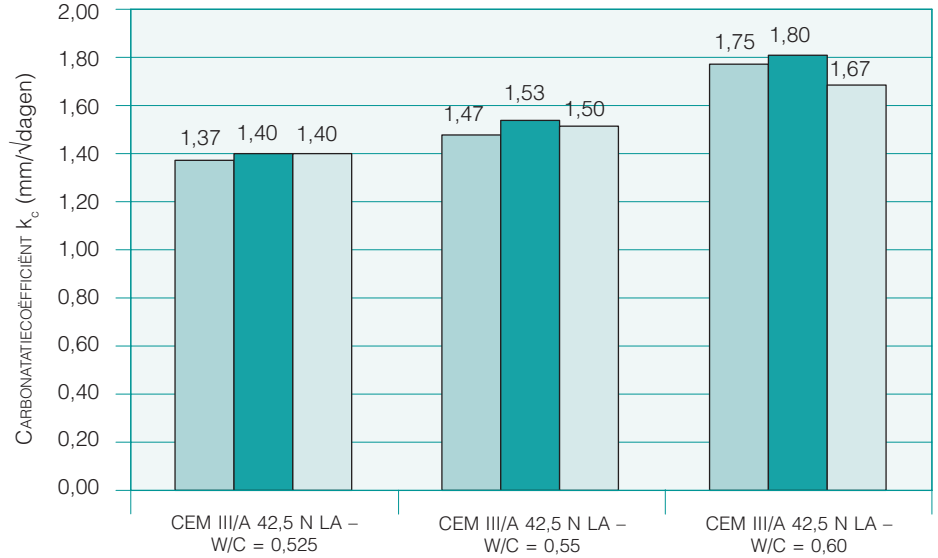
4.3.4 Invloed van de nabehandeling

De resultaten van het onderzoek hebben aan-

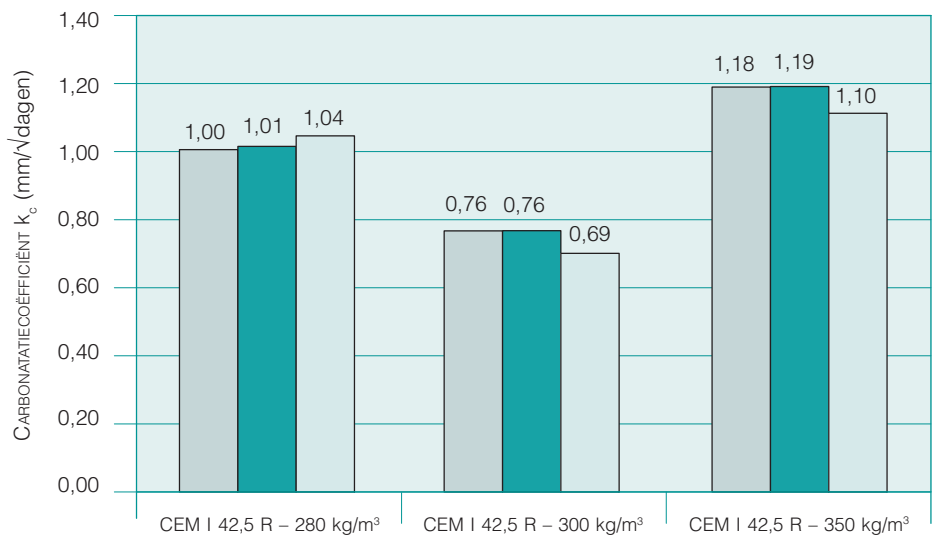
Afb. 3 Invloed van de W/C-factor op de carbonatatiecoëfficiënt van beton vervaardigd met cementtype CEM I 42,5 R en een cementgehalte van 300 kg/m³.



Afb. 4 Invloed van de W/C-factor op de carbonatatiecoëfficiënt van beton vervaardigd met cementtype CEM III/A 42,5 N LA en een cementgehalte van 300 kg/m³.



Afb. 5 Invloed van het cementgehalte op de carbonatatiecoëfficiënt van beton vervaardigd met een cementtype CEM I 42,5 R en een W/C-factor van 0,525.



Tabel 5 Carbonatatiecoëfficiënten k_c , verkregen met verschillende cementtypes en verschillende nabehandelingen.

Cementtype	k_c (mm/ $\sqrt{\text{dagen}}$)		k_c (ontoereikende nabehandeling)/ k_c (ideale nabehandeling)	k_c/k_c (CEM I 42,5 R)	
	Ideale nabehandeling	Ontoereikende nabehandeling		Ideale nabehandeling	Ontoereikende nabehandeling
CEM I 42,5 R	0,74	1,59	2,16	1	1
CEM I 52,5 R	0,72	1,28	1,78	0,97	0,80
CEM I 52,5 N HSR LA	0,62	1,02	1,65	0,84	0,64
CEM II/A-M 32,5 R	1,17	2,31	1,98	1,58	1,45
CEM II/B-M 32,5 R	1,08	1,88	1,74	1,46	1,18
CEM III/A 32,5 N LA	1,45	2,60	1,80	1,96	1,63
CEM III/A 42,5 N LA	1,38	1,85	1,34	1,86	1,16
CEM III/B 42,5 N HSR LA	1,59	2,12	1,33	2,15	1,33
CEM III/C 32,5 N HSR LA	2,24	2,81	1,25	3,03	1,76
CEM V/A 32,5 N HSR LA	1,22	2,19	1,79	1,65	1,38

getoond dat de nabehandeling een belangrijke invloed heeft op de carbonatatieweerstand van het beton en de mortel (zie afbeeldingen 7 en 8, p. 6). Een ontoereikende nabehandeling leidt immers tot carbonatatiecoëfficiënten die twee (beton) tot vier (mortel) keer groter zijn dan deze die bekomen werden op proefstukken met eenzelfde cementtype die een ideale nabehandeling kregen.

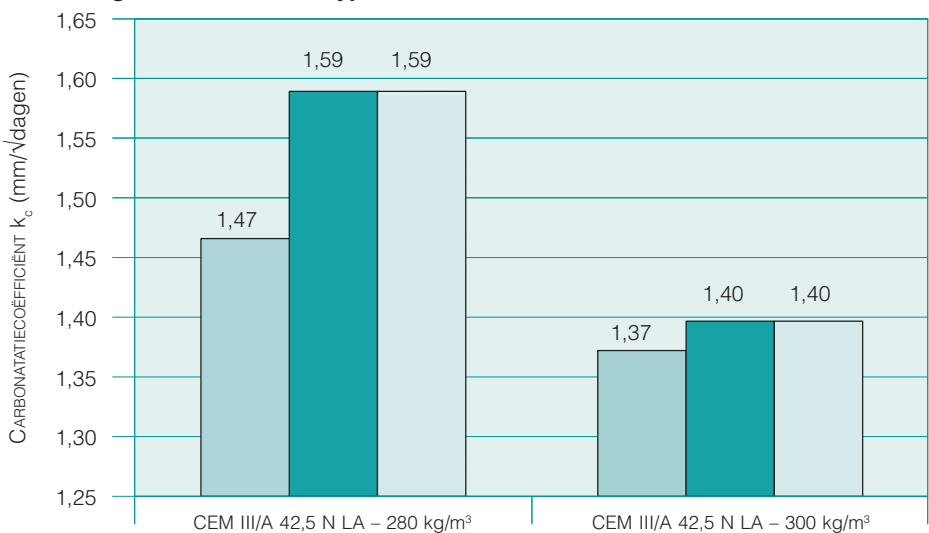
4.3.5 Correlaties met andere courante betonkarakteristieken

De carbonatatiecoëfficiënt is geen courant beoordelingscriterium en vormt evenmin een snelle methode voor de controle van de betonkwaliteit. Om deze reden gingen wij tevens na of het mogelijk is correlaties te leggen met andere, meer klassieke karakteristieken, zoals de waterabsorptie of de druksterkte.

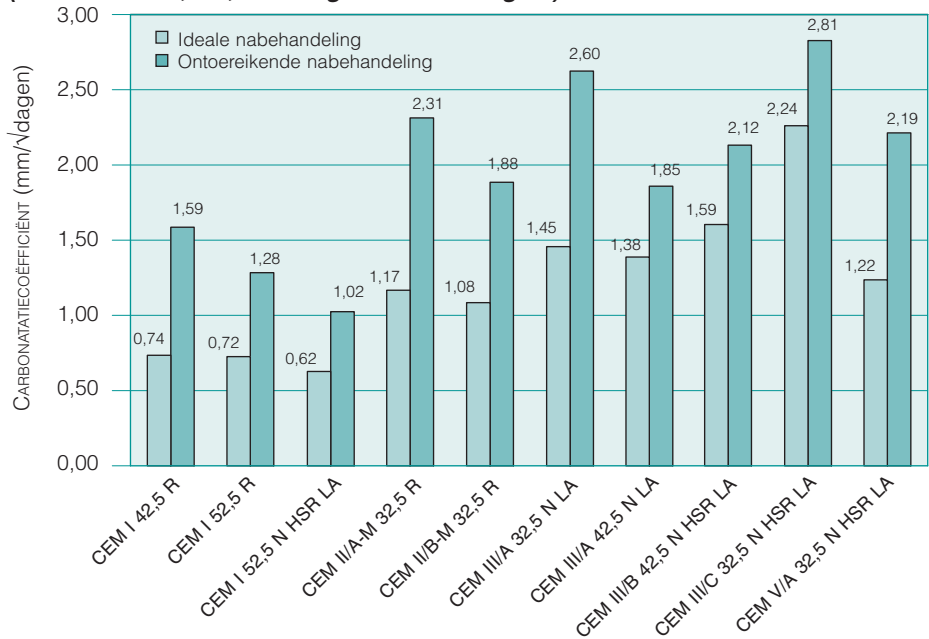
Voor de betonsoorten die bestudeerd werden tijdens het onderzoek schommelt de wateropslorping door onderdompeling, bepaald volgens de norm NBN B 15-215 [2], tussen 4,4 en 6,5 % (afbeelding 9, p. 6). Men kan opmerken dat de kleinste carbonatatiecoëfficiënten verkregen werden met de betonsoorten met de laagste wateropslorping. Het was echter niet mogelijk een direct verband te leggen tussen de carbonatatiecoëfficiënt en de wateropslorping door onderdompeling.

Het cementtype, de W/C-factor, het cementgehalte en de hydratatiegraad zijn eveneens factoren die de druksterkte van het beton beïnvloeden. Daarom werd in het verleden vaak aangenomen dat de carbonatatieweerstand een functie zou zijn van de druksterkte. Uit afbeelding 10 (p. 6) blijkt echter dat er geen rechtstreeks verband bestaat tussen de carbonatatiecoëfficiënt en de druksterkte, bepaald volgens de norm NBN EN 12390-3 [8]. Wel kan opgemerkt worden dat de grootste carbonatatiecoëfficiënten bekomen werden voor

Afb. 6 Invloed van het cementgehalte op de carbonatatiecoëfficiënt van beton vervaardigd met een cementtype CEM III/A 42,5 N LA en een WC-factor van 0,525.



Afb. 7 Gemiddelde carbonatatiecoëfficiënten voor de onderzochte betontypes (W/C-factor = 0,525; cementgehalte = 300 kg/m³).



de betonsoorten met de laagste druksterkten en dat de betonsoorten met de hoogste druksterkten de laagste carbonatatiecoëfficiënten vertonen.

5 BESLUIT

Om carbonatatie en de hieruit resulterende wapeningscorrosie te voorkomen, houden de normatieve voorschriften in Europa en België rekening met de betondekking, de W/C-factor, het cementgehalte en de nabehandeling. De invloed van de volgende factoren op de carbonatatieweerstand van het beton mag echter evenmin onderschat worden :

- *het storten van het beton :*

de verwerkbaarheid van het beton moet zodanig zijn dat het gemakkelijk gestort kan worden. Een te droog beton kan immers leiden tot de vorming van grindnesten en luchtinsluitels, terwijl een te vochtig beton kan ontmengen als gevolg van de verdichting (trillingen)

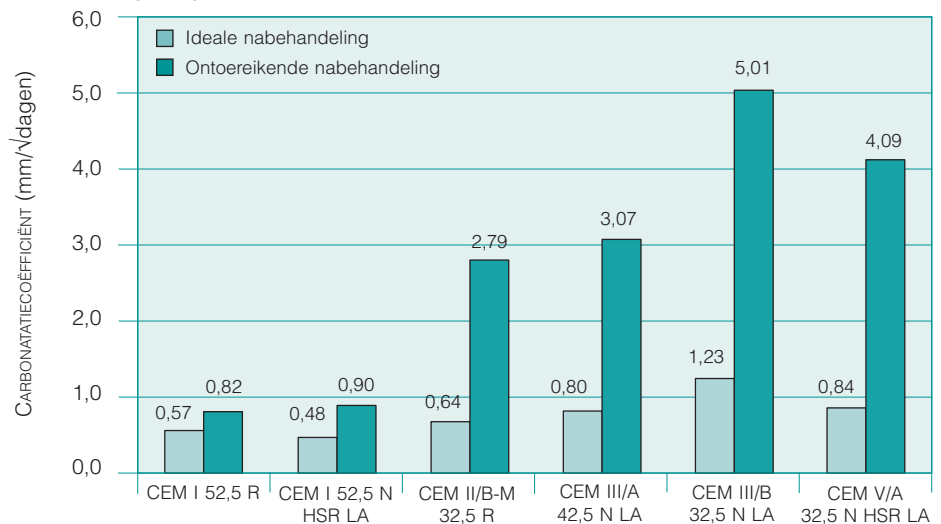
- *het cementtype :*

in sommige landen, zoals Luxemburg (DNA EN 206) [12] en Duitsland (DIN 1045-2) [13], wordt aangegeven welke cementtypes gebruikt mogen worden voor welke milieuklassen. Ons onderzoek heeft uitgewezen dat Portlandcement (CEM I) beter bestand is tegen carbonatatie dan cementen die hoogovenslakken of vliegassen bevatten, en dit ondanks de grotere permeabiliteit van beton met Portlandcement. Deze hogere carbonatatieweerstand kan men verklaren door het feit dat er bij Portlandcement een hoger Ca(OH)_2 -gehalte aanwezig is in de verharde cementpasta. Er is dan ook een grotere hoeveelheid CO_2 nodig voor het verbruik van het Ca(OH)_2 en de productie van CaCO_3 . Vermits deze resultaten zowel op beton als op mortel verkregen werden, kan men ervan uitgaan dat deze vaststelling onafhankelijk is van de betonsamenstelling. Toch moet men goed voor ogen houden dat de keuze van een cementtype voor beton niet enkel gebaseerd kan zijn op de gewenste carbonatatieweerstand. Ook factoren zoals de omgevingstemperatuur tijdens het storten, het al dan niet toepassen van massabeton en de aanwezigheid van chloriden of andere agressieve stoffen (bv. sulfaten) in de omgeving hebben in deze context een rol te spelen

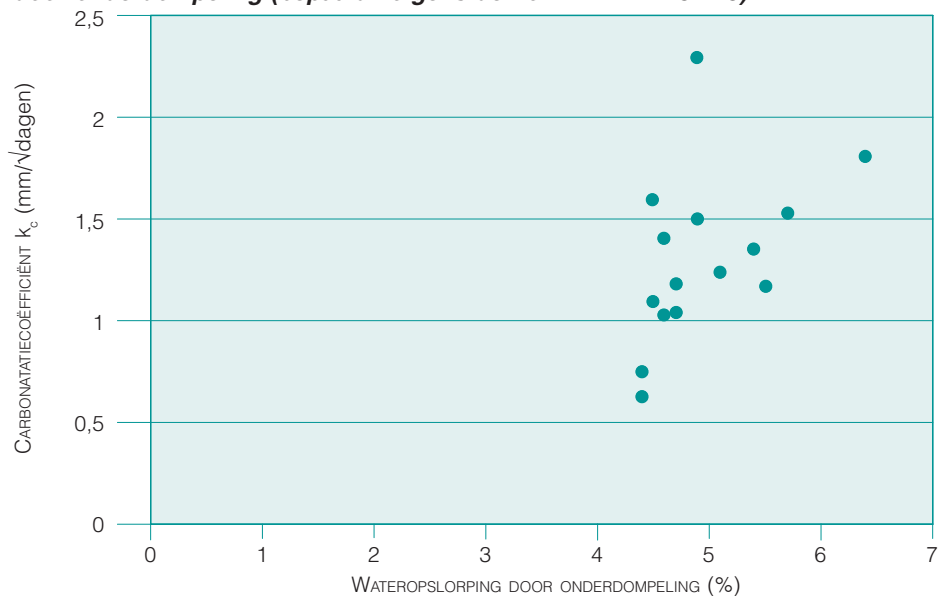
- *de korrelverdeling :*

in Nederland en het Groothertogdom Luxemburg [18, 21] leggen de normen grenswaarden op voor de korrelverdeling om de duurzaamheid van betonconstructies te waarborgen. De korrelverdeling heeft namelijk een belangrijke invloed op de waterabsorptie van het beton. In België voorziet de norm NBN B 15-001 de mogelijkheid de waterabsorptie door onderdompeling te beperken door gebruik te maken van de WAI-klassen. We willen er wel op wijzen dat deze classificatie geen deel uit-

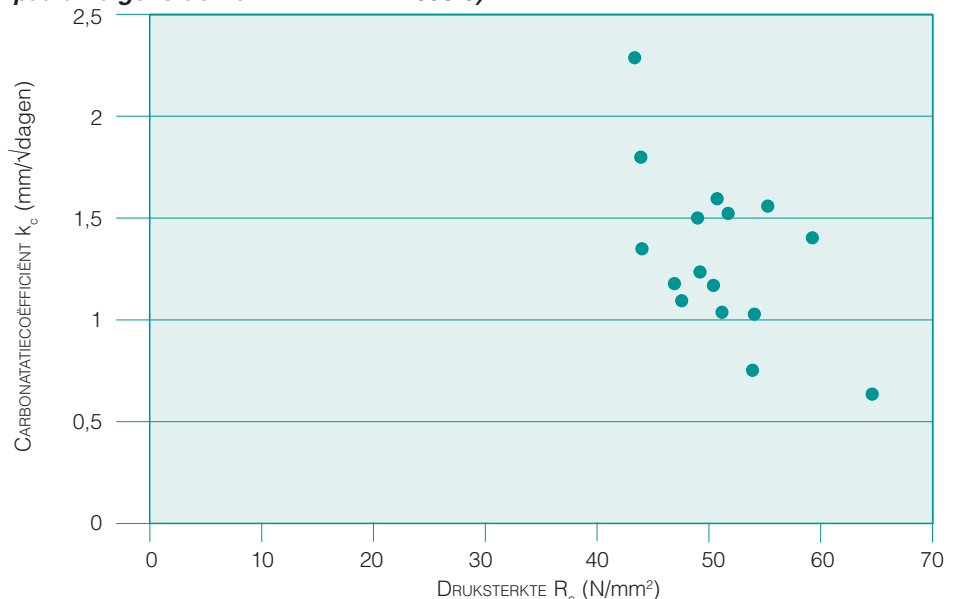
Afb. 8 Gemiddelde carbonatatiecoëfficiënten voor de onderzochte mortels (samenstelling volgens de NBN EN 196-1) [17].



Afb. 9 Correlatie tussen de carbonatatiecoëfficiënt k_c en de wateropsorping door onderdompeling (bepaald volgens de norm NBN B 15-215).



Afb. 10 Correlatie tussen de carbonatatiecoëfficiënt k_c en de druksterkte (bepaald volgens de norm NBN EN 12390-3).



maakt van de basiseisen, maar behoort tot de bijkomende eisen.

De toepassing van Portlandcement (CEM I) kent momenteel een gestage daling in het

voordeel van cementtypes met vliegassen en hoogovenslakken. Om de bescherming van de wapening tegen corrosie tengevolge van de carbonatatie van het beton te waarborgen, moet het gebruik van beide laatste cement-

soorten echter gecompenseerd worden door een aangepaste betonsamenstelling, een voldoende lange nabehandeling en een toereikende betondekking. ■



LITERATUURLIJST

1. Bureau voor Normalisatie
NBN B 15-001 Aanvulling op NBN EN 206-1. Brussel, NBN, 2004.
2. Bureau voor Normalisatie
NBN B 15-215 Proeven op beton. Wateropsloping door onderdompeling. Brussel, NBN, 1989.
3. Bureau voor Normalisatie
NBN EN 196-1 Beproevingmethode voor cement. Deel 1 : Bepaling van de sterkte. Brussel, NBN, 2005.
4. Bureau voor Normalisatie
NBN EN 206-1 Beton. Deel 1 : Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit. Brussel, NBN, 2001.
5. Bureau voor Normalisatie
NBN EN 480-1 Hulpstoffen voor beton, mortel en injectiemortel. Beproevingmethoden. Deel 1 : Referentiebeton en referentiemortel voor beproevingen. Brussel, NBN, 2007.
6. Bureau voor Normalisatie
NBN EN 1504-2 Producten en systemen voor het beschermen en herstellen van betonconstructies. Definities, eisen, kwaliteitsborging en conformiteitsbeoordeling. Deel 2 : Oppervlaktebeschermingssystemen voor beton. Brussel, NBN, 2005.
7. Bureau voor Normalisatie
NBN EN 1992-1-1 Eurocode 2. Ontwerp en berekening van betonconstructies. Deel 1-1 : Algemene regels en regels voor gebouwen. Brussel, NBN, 2005.
8. Bureau voor Normalisatie
NBN EN 12390-3 Beproeving van verhard beton. Deel 3 : Druksterkte van proefstukken. Brussel, NBN, 2002.
9. Bureau voor Normalisatie
NBN EN 13295 Producten en systemen voor het beschermen en herstellen van betonconstructies. Beproevingmethoden. Bepaling van de weerstand tegen carbonatatie. Brussel, NBN, 2004.
10. Bureau voor Normalisatie
NBN EN 13369 Algemene bepalingen voor geprefabriceerde betonproducten. Brussel, NBN, 2004.
11. Bureau voor Normalisatie
NBN EN 14630 Producten en systemen voor het beschermen en herstellen van betonconstructies. Beproevingmethoden. Bepaling van de carbonatatie diepte van verhard beton d.m.v. de fenolftaleïne methode. Brussel, NBN, 2007.
12. Centre de ressources des technologies de l'information pour le bâtiment
Document national d'application luxembourgeois de l'EN 206-1: 2000. Luxemburg, CRTI-B, 2^e uitgave, 2006.
13. Deutsches Institut für Normung
DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2 : Beton, Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Berlin, DIN, 2001.
14. Divet L.
Comment se prémunir des réactions sulfatiques dans les bétons ? Point sur les normes actuelles et quelques recommandations. Parijs, Laboratoire central des ponts et chaussées, BLPC, nr. 240, september-oktober 2002.
15. Europees Comité voor Normalisatie
prEN 13670 Execution of concrete structures. Brussel, CEN, 2007.
16. International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM)
Recommendation CPC-18 : Measurement of hardened concrete carbonation depth. Londen, Materials and Structures, vol. 21, nr. 126, 1988.
17. Nationaal Centrum voor Wetenschappelijk en Technisch Onderzoek der Cementnijverheid
Verslag OCCN 2003-2004. Brussel, OCCN, 2005.
18. Nederlands Normalisatie Instituut
NEN 8005 Nederlandse aanvulling op NEN EN 206-1. Delft, NEN, 2002.
19. Pollet V., Apers J. en Desmyter J.
Nieuwe normen voor beton. Deel 1 : nieuwe versie van de norm NBN B 15-001. Brussel, WTCB-Dossiers, nr. 3, Katern nr. 4, 2004.
20. Pollet V., Apers J. en Desmyter J.
Nieuwe normen voor beton (deel 2). Brussel, WTCB-Dossiers, nr. 3, Katern nr. 6, 2005.
21. Centre de ressources des technologies de l'information pour le bâtiment
Gecombineerd document 'Béton', samengesteld uit de norm EN 206-1 'Beton. Deel 1 : specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit' en het Luxemburgse NAD van de EN 206-1:2000. Luxemburg, CRTI-B, 2006.