

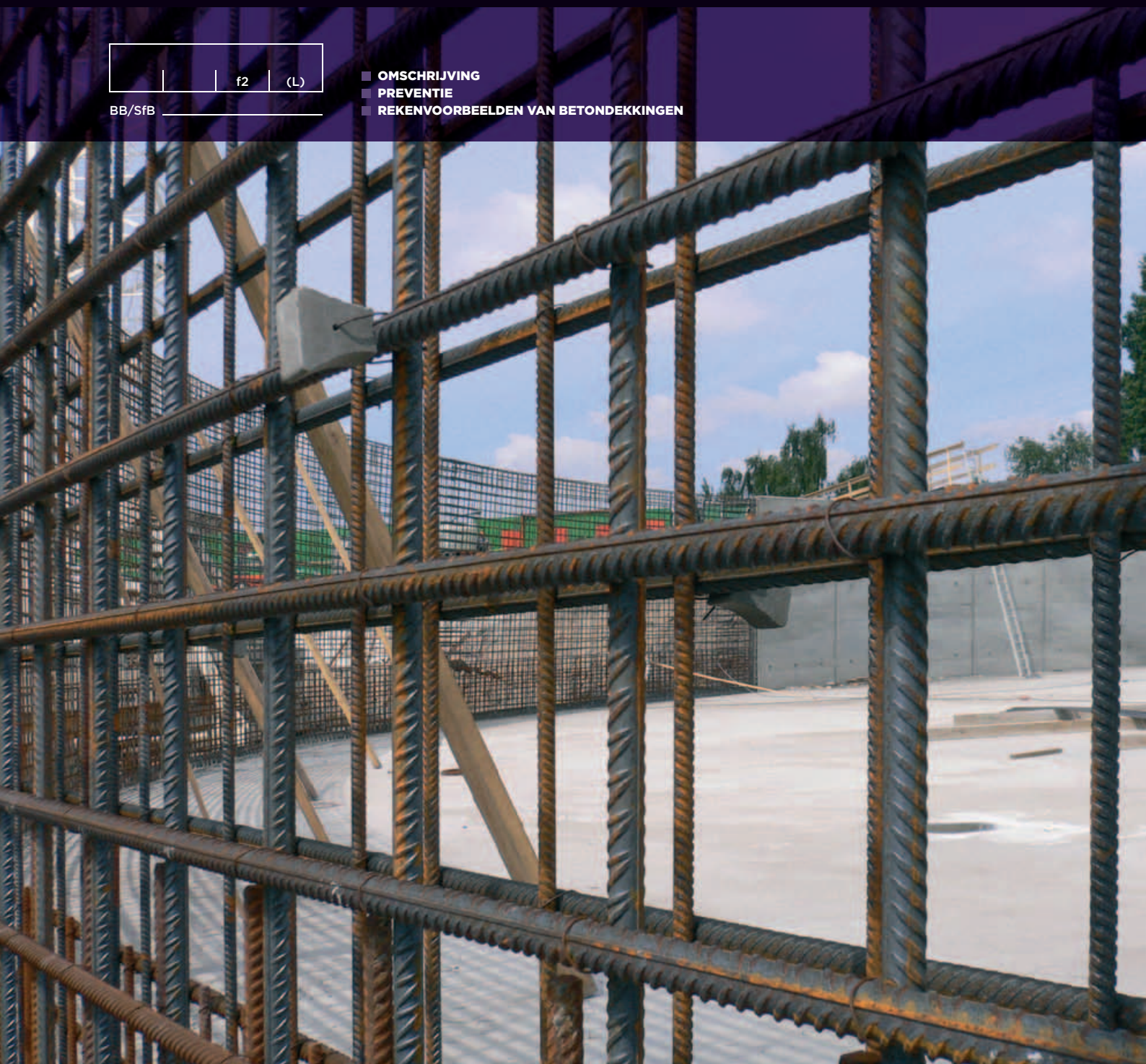
CORROSIE VAN WAPENINGEN IN GEWAPEND EN VOORGESPANNEN BETON

TECHNOLOGIE | NOVEMBER 2008



BB/SfB

- OMSCHRIJVING
- PREVENTIE
- REKENVOORBEELDEN VAN BETONDEKKINGEN





Corrosie omvat het geheel van chemische en elektrochemische fenomenen die materialen, meestal metalen, aantasten bij blootstelling aan de omgeving. Het is geweten dat staal oplost in aanwezigheid van water en van talrijke andere niet-oxiderende waterige oplossingen. De corrosie is zeer sterk in zure oplossingen, verzwakt naarmate de pH van het medium stijgt en is praktisch onbestaande bij pH-waarden tussen ongeveer 9 tot 13. Bij pH-waarden hoger dan 13 kunnen de oplossingen opnieuw corrosief worden.

Een wapening omhuld door beton wordt door dit beton beschermd zolang de pH zich tussen 9 en 13 situeert. Is dit niet het geval, zoals in gecarbonateerd beton, dan kan het oplosproces van het staal de betondekking doen barsten of afbrokkelen, indien deze onvoldoende dik is of van slechte kwaliteit.

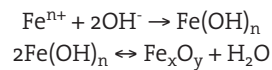
Het betreft het meest voorkomende duurzaamheidsprobleem bij gewapend beton. Nochtans zijn de oorzaken ervan en de maatregelen om schade te voorkomen eenvoudig en perfect gekend. Herstellingen zijn daarentegen steeds omslachtig en duur. Duurzaamheid hoeft niet veel te kosten. Bij gewapend en voorgespannen beton volstaat het de nodige maatregelen in acht te nemen in het stadium van het ontwerp, tijdens de uitvoering van de werken en bij de controle van de wapeningen.

1. BESCHRIJVING

Wanneer wapening wordt ingebed in vers beton, ontstaat een materialencombinatie met gunstige duurzaamheidskenmerken. Door zijn hoge pH-waarde behoedt het beton het wapeningsstaal inderdaad tegen zijn natuurlijke tendens tot verval onder invloed van vochtigheid.

Staal heeft van nature de neiging om op te lossen in water. Op het metaal is er op de ene plaats oxidatie ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{n+} + n\text{e}^-$) terwijl elders reductie plaatsvindt (in aanwezigheid van zuurstof : $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$; indien geen zuurstof voorhanden is : $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2$).

Tussen de twee locaties ontstaat een elektrisch potentiaalverschil, dat als aandrijfkraft fungeert. Indien de gevormde producten zouden worden afgevoerd, dan zou het proces in principe doorgaan tot het staal volledig is opgelost. Gelukkig wordt in het geval van een door beton omhulde wapening het staal « gepassiveerd ». De ionen reageren met elkaar en vormen stabiele oxides. De hoofdreacties – oxidoreducties – worden gevolgd door secundaire reacties waarbij roest wordt geproduceerd en afgezet op het oppervlak van het metaal :



De op het wapeningsoppervlak gevormde oxides Fe_3O_4 en Fe_2O_3 vertragen de reacties die het metaal doen oplossen, omdat ze een « scherm » vormen – tenminste voor zover het stabiele verbindingen betreft. Die zijn des te stabielier naarmate ze omgeven worden door hydroxides – in dit geval $\text{Ca}(\text{OH})_2$ uit het beton – en het beton fungeert als scherm tegen andere agressieve stoffen afkomstig uit de omgeving (Cl^- - ionen...). Noteer dat het hier beton betreft waarvan de pH-waarde een eind boven de 9 ligt.

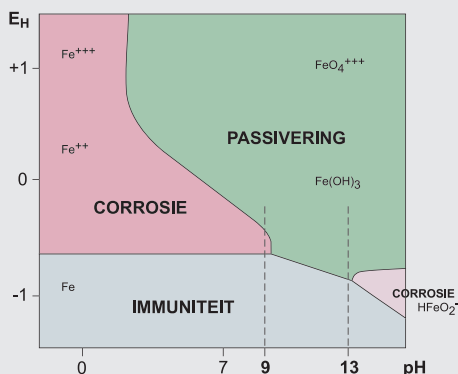
Wapeningscorrosie vangt aan wanneer het beton niet langer een doeltreffende bescherming biedt. Dit is het geval in twee situaties :

- Het beton dat de wapening bedekt, is **gecarbonateerd**, d.w.z. CO_2 uit de lucht heeft gereageerd met $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in het beton \Rightarrow vorming van CaCO_3 en daling van de pH tot onder de 9. Dan is de stabiliteit van het scherm niet langer verzekerd en kan het ijzer beginnen oplossen. Tijdens dit oplosproces worden corrosieproducten (roest) gevormd die een veel groter volume hebben dan het oorspronkelijke ijzer. Deze uitzetting doet het beton afbrokkelen. Eenmaal die beschermende laag beton fysiek geëlimineerd is, zal de wapening in versneld tempo verder corroderen.
- Agressieve ionen (zoals **chloriden**) zijn doorheen de betondekking gedrongen en komen in aanraking met de wapening.

Beide fenomenen die verantwoordelijk zijn voor wapeningscorrosie worden hierna meer in detail besproken.

DIAGRAM VAN POURBAIX

voor het stelsel Fe-H₂O bij 25 °C

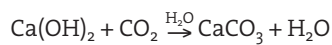


In gezond beton (pH van circa 13 ; temperatuur van 25 °C), bevindt de wapening zich in een elektrochemische toestand die corrosie verhindert (immunitet of ontstaan van een passiverende film). Daalt de pH onder een waarde van ca. 9, dan kan corrosie op gang komen, afhankelijk van de potentiaal. Gezond beton vormt bijgevolg een beschermend milieu voor stalen wapeningen. Een grote daling van de pH maakt de weg vrij voor wapeningscorrosie.

1.1. CORROSIE GEÏNITIEERD DOOR CARBONATATIE

a. Carbonatatieproces (initiatiefase)

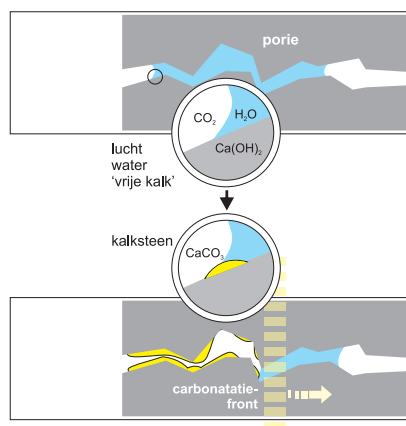
Onder carbonatatie wordt de reactie verstaan tussen de koolstofdioxide (CO_2) uit de lucht en de alkalische (basische) bestanddelen van het beton. Koolstofdioxide en calciumhydroxide (ook wel « vrije kalk » of portlandiet genoemd en afkomstig van de hydratatiereacties van het cement) vormen samen calciumcarbonaat :



Deze reactie kan zich enkel in waterig milieu afspelen (figuur 1). Eerst moet de CO_2 oplossen in het **poriënwater**, hetgeen de pH doet dalen van ongeveer 13 naar 9. Door deze daling gaat de calciumhydroxyde eveneens in oplossing. De twee verbindingen reageren met elkaar en zetten zich neer als calciumcarbonaat.

De relatieve vochtigheid van het milieu bepaalt het watergehalte van het beton en is een fundamentele parameter. Om het proces gaande te houden is aanvoer van verse koolstofdioxide vereist. Welnu, de diffusie van het dioxide gebeurt 10.000 keer sneller in de lucht dan in water. De relatieve vochtigheid moet bijgevolg voldoende laag zijn om diffusie van koolzuurgas mogelijk te maken. Anderzijds vergt de eigenlijke carbonatatie een voldoende hoge vochtigheid, vermits deze reactie alleen in waterige fase kan plaatsvinden.

FIGUUR 1 -
Carbonatatieproces



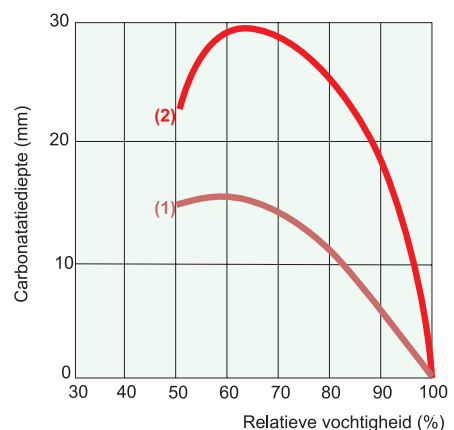
De carbonatatiesnelheid daalt met de tijd. Naarmate de carbonatatiezone zich uitbreidt (en het carbonatatiefront opschuift), doet het gevormde calciumcarbonaat de poriën dicht-slibben en moet de CO_2 een steeds kronkeliger weg afleggen tot de alkalische bestanddelen. Hierdoor vertraagt het proces.

Carbonatatie grijpt maximaal plaats bij een relatieve vochtigheid tussen 40 en 70 %. Bij hogere waarden verzwakt ze snel. Figuur 2 geeft de grootte-orde van de te verwachten carbonatatie diepte in functie van de W/C-factor van het beton. Merk op dat in slecht uitgevoerd, zeer poreus beton, grote carbonatatie dieptes (30 à 40 mm) worden genoteerd.

In beton dat constant ondergedompeld is, treedt omzeggens geen carbonatatie op. Het water biedt een te grote weerstand tegen de diffusie van koolstofdioxide. In normale binnenomgeving carbonateert beton snel maar, bij gebrek aan vocht, oppervlakkig.

In buitenklimaat moet een onderscheid worden gemaakt tussen de situatie waarbij het beton beschermt is tegen regen, en die waarbij het eraan is blootgesteld. In een niet beschutte buitenomgeving zijn de poriën regelmatig met water gevuld, zodat de aanvoer van koolzuur moeilijk loopt. In een beschutte buitenomgeving verloopt het carbonatatieproces daarentegen sneller. De poriën zijn immers slechts zelden verzadigd met water.

Noteer dat de gehydrateerde silicaten (CSH) en aluminaten (CAH), en ook de klinkerbestanddelen in staat zijn te reageren met de koolstofdioxide en tot de vorming van calciumcarbonaat kunnen leiden.



FIGUUR 2 - Invloed van de relatieve vochtigheid van de lucht op de carbonatatie diepte

(curve 1 : W/C = 0,60 ; curve 2 : W/C = 0,80)

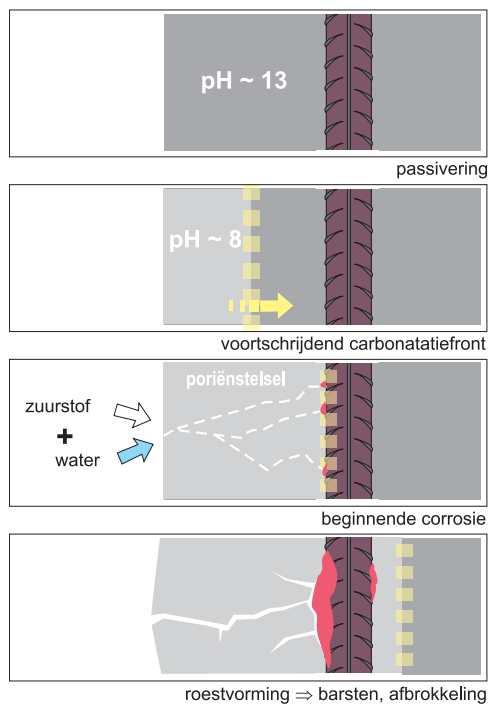
Bron : Universiteit Hannover

b. Corrosieproces (propagatiefase)

In ongewapend beton heeft carbonatatie geen nadelige invloed op de duurzaamheid. Integendeel, de vorming van CaCO_3 doet de porositeit dalen.

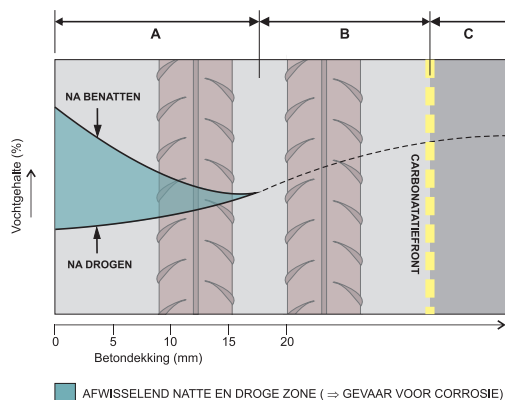
In gewapend beton kan carbonatatie nefast zijn door de **daling van de pH**. De alkalische bestanddelen verdwijnen inderdaad progressief, zodat het staal niet langer beschermd is – m.a.w. niet langer « gepassiveerd ».

De vraag is nu of het staal zal corroderen, en indien ja, met welke snelheid. Het staal kan enkel corroderen wanneer tegelijk zowel water als lucht aanwezig zijn (figuur 3).



FIGUUR 3 - Corrosie ingeleid door carbonatatie

Er bestaat een verband tussen de corrosiesnelheid en de relatieve vochtigheid in het gecarbonateerde beton. Uit de ervaring blijkt dat corrosie vooral te vrezen valt wanneer de wapening regelmatig wordt bevochtigd (bedekt wordt met water) en zuurstof gemakkelijk tot aan de wapening kan doordringen.



FIGUUR 4 - Vochtprofiel en carbonatatiefront

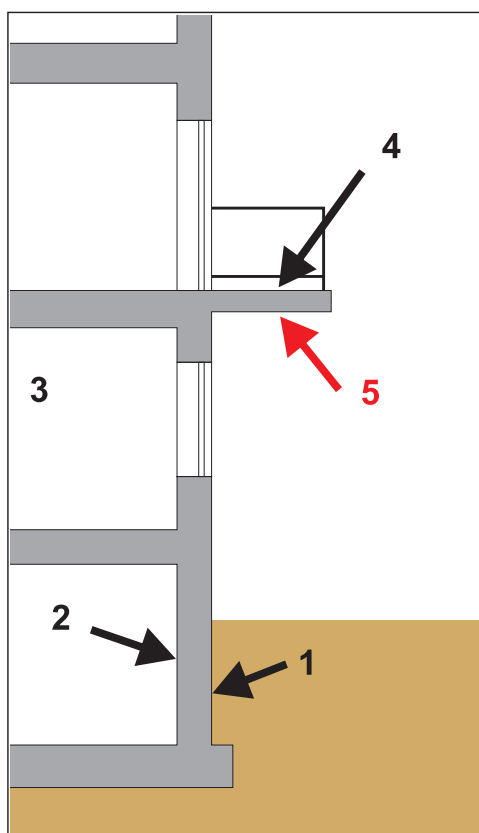
In gecarbonateerd beton hangt de waarschijnlijkheid dat roest wordt gevormd af van de omgevingskenmerken. Wapening in beton blootgesteld aan een normaal binnenklimaat roest niet vermits water ontbreekt. Voor wapening in beton blootgesteld aan het buitenklimaat moet een onderscheid worden gemaakt tussen de drie volgende situaties. Die onderscheiden zich van elkaar door hun vochtigheidsprofiel en de plaats van het carbonatatiefront :

Wapeningen in gecarbonateerd beton en meer bepaald in de **zone onderhevig aan variaties in vochtigheid** (d.w.z. waar benatting en droging alterneren – **zone A**, figuur 4 ; deze zone strekt zich uit tot op een diepte van 15 à 20 mm vanaf het betonoppervlak). In dit geval zal de wapening corroderen. Het al of niet beschermt zijn van het beton bepaalt hoe snel de corrosie vordert. Op een beschutte plaats (b.v. aan de onderzijde van een balkon) zal roest sneller gevormd worden, vermits in die situatie de poriën slechts gedeeltelijk met water gevuld zijn en zuurstof bijgevolg relatief gemakkelijk kan binnendringen. (figuur 5-5). Het roestproces verloopt traag en uniform.

Wapeningen in **gecarbonateerd beton maar buiten de zone die onderworpen is aan schommelingen in vochtigheid** (**zone B**, figuur 4). In deze situatie zal het staal roesten als er voldoende vocht en zuurstof is. Onderzoek van praktijkgevallen heeft geleerd dat die kans eerder klein is. In de meerderheid van de gevallen moet tijdens de levensduur van het bouwwerk niet voor ernstige beschadiging door roest worden gevreesd.

Wapeningen in de **niet gecarbonateerde zone** (**zone C**, figuur 4). Er is geen enkel gevaar voor corrosie.

Er dient nog te worden genoteerd dat door carbonatatie geïnitieerde corrosie een vorm van algemene aantasting van het staal is, met een geleidelijke vermindering van de wapeningssectie tot gevolg. De ophoping van volumes corrosieproducten op de wapening leidt tot uitzetting en doet de betondekking barsten (bouwwerken vertonen afschilferingen).



FIGUUR 5 - De kans op corrosie geïnitieerd door carbonatatie hangt af van de omgeving. De probabilliteit is beduidend kleiner onder de grond (1) en binnen in een gebouw (2 en 3). In buitenomgeving vergroot het risico op die plaatsen waar het betonelement beschut is tegen regen (5) (bijvoorbeeld onderaan een balkon) en verkleint daar waar het beton is blootgesteld aan weer en wind (4).

METING VAN DE CARBONATATIEDIEPTE

De carbonatatie van het beton gaat gepaard met een daling van de pH. Om de carbonatatie diepte te bepalen, wordt nagegaan op welke diepte de pH een waarde van om en bij de 9 bereikt. De eenvoudigste techniek is gebaseerd op de test met fenolftaleïne. Daarbij wordt onderzocht hoe de kleur (violet) verandert enkele ogenblikken nadat het product op het beton is verstoven. In de gecarbonateerde zones wordt de indicator kleurloos. De kleuromslag gebeurt bij een pH van circa 9,5. Het vaststellen van de carbonatatie diepte gebeurt op een genormaliseerde manier door het gemiddelde te nemen van waarden gemeten op verschillende punten. Deze methode is vastgelegd in de norm NBN EN 14630.

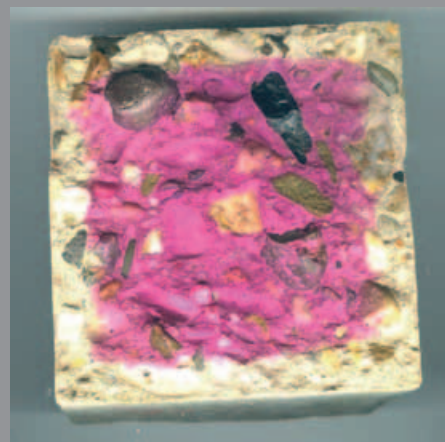
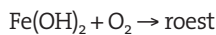
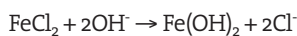


Foto : labo CRIC-OCCN

1.2. CORROSIE GEÏNITIEERD DOOR CHLORIDEN

Chloride-ionen worden meegevoerd in water en kunnen via verschillende wegen in het beton aanwezig zijn : meegekomen met de betonbestanddelen (zeegranulaten...), ingebracht tijdens het mengen (chloridehoudende versnellers...) of in de loop der tijd vanuit de omgeving in het beton gedrongen door diffusie (zeewater, dooizouten...).

Vanaf een kritisch gehalte aan chloriden kan een wapening plaatselijk beginnen roesten, voor zover ze is blootgesteld aan water en zuurstof. Aantasting van het staal gebeurt in de vorm van kleine maar geleidelijk dieper wordende kratertjes (figuur 6). De Cl^- -ionen reageren immers met de Fe^{++} -ionen en vormen ijzerchloride. Dit reageert met de hydroxylionen, migreert en oxideert een eindje verder. Daar wordt roest afgezet. Corrosie door chloride geeft daarom aanleiding tot typische roestvlekken op het betonoppervlak. De scheikundige reacties zijn de volgende :



Merk op dat de Cl^- -ionen « gerecycleerd » worden. Dit verklaart waarom de roest geen chloride bevat, ook al is in een tussenstap ijzerchloride gevormd. Het corrosiemechanisme kan zich bijgevolg op dezelfde plaats in stand houden. Door chloride geïnitieerde corrosie is een plaatselijke corrosie waarbij in het staal holtes worden uitgevreten. Dit is uiterst gevaarlijk want de wapeningssectie wordt lokaal veel kleiner. Wordt de sectie te klein, dan begeeft de wapening plots, hetgeen rampzalige gevolgen kan hebben.

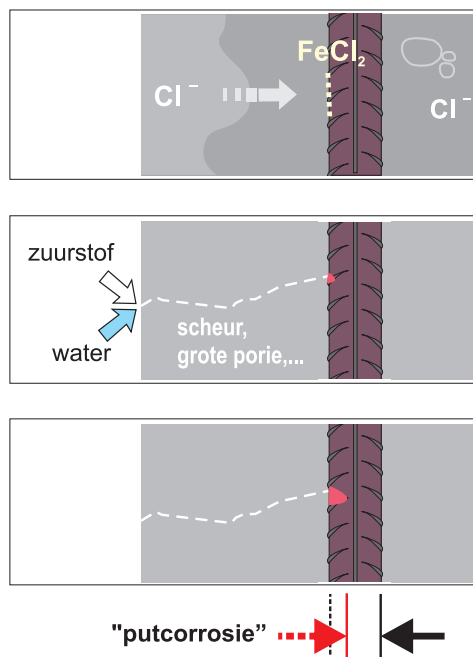
Voor wat het kritische chloridegehalte betreft, is vastgesteld dat er geen eenduidige grenswaarde bestaat. De wapeningscorrosie vangt aan op het ogenblik dat het gehalte chloorionen bij de wapening een zekere « depassiveringsdrempel » bereikt. Deze drempel kan variëren in functie van een groot aantal factoren (kation geassocieerd met de chloride, zuurstofgehalte, relatieve vochtigheid, temperatuur, hydratatiegraad van het cement, gehalte aan C_3A , porositeit, toevoegsels, samenstelling van het staal...). Toch wordt vaak een verhouding $[\text{Cl}^-]_{\text{vrij}}/[\text{OH}^-]$ gelijk aan 0,6 aangenomen. Deze drempel voor het chloridegehalte alleen volstaat niet om te

bepalen of corrosie zal plaatsgrijpen. Vermits zij afhangt van de pH bestaat er indirect een verband met carbonatatie. In vergelijking met niet-gecarbonateerd beton kan in gecarbonateerd beton corrosie optreden vanaf lagere chloridegehalten.

Een verhouding $[\text{Cl}^-]_{\text{vrij}}/[\text{OH}^-]$ begrepen tussen 0,6 en 1 leidt over het algemeen tot een « kritische » totale chlorideconcentratie van ongeveer 0,4 % van de cementmassa in niet-gecarbonateerd beton, en bijgevolg, tot « kritische » concentraties van 0,04 à 0,1 % van de betonmassa, afhankelijk van de betonsamenstelling.

VRIJE CHLORIDEN EN TOTAAL CHLORIDEGEHALTE

- Vrije chloriden bevinden zich in de gedaante van ionen in de interstitiële oplossing. Zij kunnen aan het water onttrokken worden en worden daarom ook « wateroplosbare chloriden » genoemd.
- Het totale chloridegehalte omvat, behalve de vrije, ook de chloorionen die sterk geadsorbeerd zijn aan de C-S-H en de chemisch gebonden chloorionen in de cementmatrix, b.v. in verbindingen zoals de calcium-chloro-aluminaten. Alleen de vrije chloorionen kunnen diffunderen en een actieve rol spelen in de « depassivering » en corrosie van wapeningen.



FIGUUR 6 - Door chloride geïnitieerde corrosie

2. PREVENTIE

De kans dat wapening aangetast wordt door corrosie geïnitieerd door carbonatatie wordt kleiner naarmate :

- het carbonatatiefront meer tijd nodig heeft om de wapening te bereiken. Dit impliceert dat de aanvoer van CO₂ en vocht traag is en bijgevolg dat het beton weinig poreus is. Enerzijds moet de W/C-factor van het omhullende beton laag zijn (< 0,55 of zelfs 0,50), moet het cementgehalte voldoende hoog zijn (≥ 340 kg per m³ beton) en moet de verwerking optimaal gebeuren (maximum diameter van de granulaten afgestemd op de betondekking, correct trillen, enz.). Anderzijds moet de betondekking voldoende dik zijn.
- de propagatiefase langer duurt. Dit kan door de aanvoer van water en zuurstof te beperken (d.w.z. lage porositeit) en de af te leggen weg zo lang mogelijk te maken (m.a.w. voldoende dikke betondekking).

Noteer dat de kwaliteit van de betondekking rechtstreeks afhangt van de nabehandelingscondities. De hydratatie van cement houdt praktisch op zodra de interne relatieve vochtigheid daalt onder de 80 %. Het inkorten van de nabehandelingstermijn doet de carbonatatediepte dan ook duidelijk toenemen.

Op dezelfde manier zal ook de probabiteit van corrosie geïnitieerd door chloride dalen indien de hoeveelheid chloride ingebracht in het beton tijdens het mengen en de hoeveelheid chloorionen en zuurstof die het beton binnendringen zoveel mogelijk worden beperkt. Belangrijke parameters zijn hier eveneens de betonkwaliteit (lage W/C, voldoende cement, optimale verwerking) en de betondekking. Bovendien stelt de norm NBN EN 2061:2001 dat calciumchloride of hulpstoffen die chloriden bevatten niet mogen worden toegevoegd aan het beton waarin wapening, voorspanwapening of andere metalen onderdelen voorzien zijn.

2.1 BETONKWALITEIT

De norm NBN EN 206-1:2001 definieert vier **milieuklassen** met betrekking tot corrosie geïnitieerd door carbonatatie. Ze worden aangeduid met XC. Al naargelang het beton blijvend droog of nat is (XC₁), zelden droog (XC₂), matig vochtig (XC₃) of afwisselend nat en droog (XC₄), gelden strengere duurzaamheidseisen.

Met betrekking tot corrosie geïnitieerd door chloride, definieert de NBN EN 206-1 zes milieuklassen. Drie ervan, afgekort XS, slaan op chloriden in zeewater en brak water : beton blootgesteld aan zeelucht, maar niet in rechtstreeks contact met zeewater (XS₁), beton permanent ondergedompeld in zeewater (XS₂) of beton blootgesteld aan spatwater of schuim, of gesitueerd in de getijdenzone (XS₃).

Drie andere klassen, aangeduid met XD, verwijzen naar chloriden van andere origine, zoals dooizouten, chloridehoudende oplossingen, etc. : matig vochtig (XD₁), nat en zelden droog (XD₂) en afwisselend nat en droog (XD₃). De duurzaamheidseisen zijn het strengst voor beton dat afwisselend nat en droog is.

Van haar kant beschouwt de Belgische aanvulling op de NBN EN 206-1, d.w.z. de norm NBN B15-001:2004, een aantal courante omgevingsypes in België. Deze omgevingsklassen

zijn onlosmakelijk gelinkt aan de milieuklassen van de NBN EN 206-1. In *tabel 1* worden de omgevingsklassen gedefinieerd en de ermee corresponderende milieuklassen. Voor gewapend beton kunnen daarmee de duurzaamheidseisen worden gespecificeerd met betrekking tot wapeningscorrosie. De duurzaamheidseisen worden vertaald in betontypes. Een betontype wordt gekenmerkt door een maximum W/C-factor, een minimum cementgehalte en een minimum sterkteklasse. In *tabel 2* staan de betontypes in relatie tot wapeningscorrosie en de overeenkomstige duurzaamheidseisen.

Ervan uitgaand dat in het beton chloriden kunnen worden ingebracht tijdens de productiefase, voorziet de NBN EN 2061:2001 chloridegehalteklassen. Deze worden aangeduid met « Cl » gevolgd door een getal dat slaat op het maximaal toegelaten gehalte chloorionen in verhouding tot de massa cement in het beton. In België worden de van toepassing zijnde chloridegehalteklassen opgegeven in NBN B15-001:2004 (*tabel 3*). Bij het specificeren van het beton vermeldt de voorschrijver het gebruiksdomein van het beton : ongewapend beton (OB), gewapend beton (GB) of voorgespannen beton (VB). Impliciet definieert hij zo het maximum toegelaten chloridegehalte.

OMGEVINGSKLASSEN			MILIEUKLASSEN voor gewapend beton (GB) en voorgespannen beton (VB)
Klasse	Omschrijving	Voorbeelden	
EI	Binnenomgeving	Binnenmuren van woningen en bureau's	XC1
EE	Buitenomgeving		
EE1	Geen vorst	Funderingen onder vorstgrens	XC2
EE2	Vorst, geen contact met regen	Overdekte open parkeergarage, kruipkelder, open doorgang in gebouw	XC3
EE3	Vorst, contact met regen	Buitenmuren blootgesteld aan regen	XC4
EE4	Vorst en dooizouten (aanwezigheid van ter plaatse ontdooid of opspattend of afløpend dooizouthoudend water)	Infrastructuurelementen in de wegebouw	XC4, XD3
ES	Zeeomgeving		
	Geen contact met zeewater, wel met zeelucht (tot 3 km van de kust) en/of brak water ⁽¹⁾		
ES1	Geen vorst	Fundering onder vorstgrens in contact met brak water	XC2, XS2
ES2	Vorst	Buitenmuur van gebouw aan de kust in contact met regen	XC4, XS1
	Contact met zeewater		
ES3	Ondergedompeld		XC1, XS2
ES4	Getijden- en spatzone	Kaaimuren	XC4, XS3

⁽¹⁾ Ondiep brak water komt voornamelijk voor in de kustvlakte, het poldergebied in de omgeving van Diksmuide, sommige Oost-Vlaamse polders en rond de haven van Antwerpen. De hoogtelijn van 6 m wordt vastgesteld als de grens tot waar deze gebieden zich uitstrekken..

TABEL 1 – Omgevings- en milieuklassen in relatie tot wapeningscorrosie
NB : Behalve deze zijn er nog andere omgevings- en milieuklassen, maar deze hebben geen betrekking op wapeningscorrosie bij gewapend beton.

Betontypes	T(0,65)	T(0,60)	T(0,55)	T(0,50)	T(0,45)
Milieuklassen	XC1	XC2	XC3	XC4 XD1 XD2 XS1 XS2*	XD3 XS2* XS3
Omgevingsklassen (GB of VB)	EI	EE1	EE2	EE3 ES1 ES2	EE4 ES3 ES4
Maximum water-cementfactor	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
Minimum cementgehalte (kg/m ³)	260	280	300	320	340
Minimum sterkteklasse	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45

XS2* : T(0,50) voor beton ondergedompeld in brak water

TABEL 2 – Betontypes en ermee corresponderende duurzaamheidseisen volgens de norm NBN B15-001:2004

Gebruiksdomein		Klasse voor chloridegehalte	Maximumgehalte aan Cl- in % van de cementmassa (*)
Ongewapend beton (OB)	Beton zonder wapening of ingesloten metalen	Cl 1,0	1,0 %
Gewapend beton (BA)	Beton met wapening of ingesloten metalen	Cl 0,40	0,40 %
Voorgespannen beton (BP)	Beton met voorspanwapening	Cl 0,20	0,20 %

(*) indien type II toevoegsels worden gebruikt : in % van de som van de massa cement en de massa toevoegsel

TABEL 3 – Gebruiksdomein en maximum gehalte aan chloriden volgens de norm NBN B15-001:2004

2.2 BETONDEKKING OP WAPENING

In alle gewapend beton met klassieke wapeningen moeten de compactheid en de dikte van de betondekking (afstand tussen het wapeningsoppervlak en het dichtstbij betonoppervlak) in verhouding staan tot het potentiële corrosierisico, uitgedrukt door de omgevings- of milieuklasse. Betondekking en compactheid hebben een onmiddellijke impact op de initiatiefase van wapeningscorrosie en op de verdere ontwikkeling ervan. Zo wordt bijvoorbeeld algemeen aangenomen dat een verhoging van de betondekking met 10 mm de gebruiksduur van het bouwwerk met 50 à 100 jaar verlengt. De betondekking wordt gedefinieerd in de norm NBN EN 199211:2005 (Eurocode 2) en haar Nationale Annex of Bijlage (ANB). Zij moet in het bijzonder voldoen aan de eisen inzake krachtoverbrenging (aanhechting) en aan de omgevingsvoorwaarden. Eurocode 2 voorziet ook de mogelijkheid om de betondekking te verminderen, indien de sterkte van het beton een voorgeschreven niveau haalt.

- Vooreerst dient een onderscheid te worden gemaakt tussen nominale en minimale betondekking. De nominale betondekking (c_{nom}) is weergegeven op de plannen en stemt overeen met de hoogte van de afstandhouders rond de wapeningen. Ze wordt gedefinieerd als de minimale betondekking (c_{min}) vermeerderd met de tolerantie (Δc_{dev}) nodig om sommige moeilijk te vermijden maatafwijkingen in te calculeren (rechtheid van de wapeningen, verplaatsingen tijdens het storten van het beton...)

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

- De minimale betondekking (c_{min}) is nooit kleiner dan 10 mm en is de grootste van volgende waarden :
 - $c_{min,b}$: d.i. de minimum betondekking vanuit het oogpunt van aanhechtingseisen ;
 - $c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}$
Hierin is :
 - $c_{min,dur}$: de minimale betondekking met betrekking tot de milieuvorwaarden ;
 - $\Delta c_{dur,\gamma}$: een veiligheidsmarge (de waarde $\Delta c_{dur,\gamma} = 0$ mm is normatief)
 - $\Delta c_{dur,st}$: de vermindering van de betondekking indien staal wordt aangewend waarvan de bestandheid tegen corrosie

bewezen is (b.v. sommige inox staaltypes) ($\Delta c_{dur,st} = 0$ mm tenzij een bijzondere motivering kan worden ingeroepen – zie artikel 4.4.1.2 (7) van de Nationale Bijlage) ;
→ $\Delta c_{dur,add}$: de vermindering van de betondekking indien een bijkomende bescherming wordt voorzien, zoals b.v. een bekleding (de waarde $\Delta c_{dur,add} = 0$ mm is normatief).

Met betrekking tot de de eisen inzake hechting tussen beton en staal is $c_{min,b}$, gelijk aan :

- de staafdiameter in het geval van een individuele wapening ;
- de equivalente diameter in het geval van een groep wapeningen ;

en wordt vermeerderd met 5 mm als de diameter van de grootste betongranulaten groter is dan 32 mm.

Betreft het voorspanwapeningen dan is $c_{min,b}$ gelijk aan 2 maal de diameter van de strengen of gladde draden, en 3 maal de diameter van geprofileerde draden.

Voor elke milieuklasse wordt de minimum betondekking ($c_{min,dur}$) opgegeven rekening houdend met de verwachte levensduur van het bouwwerk. Deze verwachte levensduur wordt weergegeven door de “**constructieklasse**”, aangeduid met een cijfer. Hoe lager dit cijfer, hoe korter de verwachte levensduur en des te kleiner de vereiste $c_{min,dur}$. Klasse S4 komt overeen met een verwachte levensduur van 50 jaar. In de *tabellen 4 en 5* staan de waarden van $c_{min,dur}$ voor respectievelijk gewapend en voorgespannen beton. **Als minimumwaarden worden die van constructieklasse S4 aanbevolen.** Vanaf een hogere minimum druksterkteklasse is het mogelijk de constructieklasse 1 rang lager te nemen. Voor een levensduur van 100 jaar moet de constructieklasse daarentegen 2 rangen hoger genomen worden. Zie *tabel 6* voor meer details.

Noteer dat voor gewapend of voorgespannen beton blootgesteld aan een chemisch agressieve omgeving (klassen XA en EA), de hoogste waarde $c_{min,dur}$ vereist voor de andere milieu- en omgevingsklassen waaraan het beton is blootgesteld, van toepassing is. Bovendien is een minimum betondekking noodzakelijk voor structuren met een voorgeschreven **brandweerstand**. Meer informatie in de NBN EN 1992-1-2:2005.

Constructieklasse	Milieuklassen en omgevingsklassen					
	XC1	XC2, XC3	XC4	XD1, XS1	XD2, XS2	XD3, XS3
	EI	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

TABEL 4 – Minimale betondekkingen $c_{min, dur}$ (mm) met betrekking tot de duurzaamheid, voor gewapend beton (volgens prNBN EN 1992-1-1-ANB:2007, aanpassingen momenteel in voorbereiding)

Constructieklasse	Milieuklassen en omgevingsklassen					
	XC1	XC2, XC3	XC4	XD1, XS1	XD2, XS2	XD3, XS3
	EI	EE1, EE2	EE3	ES2	ES1, ES3	EE4, ES4
S1	15	20	25	30	35	40
S2	15	25	30	35	40	45
S3	20	30	35	40	45	50
S4	25	35	40	45	50	55
S5	30	40	45	50	55	60
S6	35	45	50	55	60	65

TABEL 5 – Minimale betondekkingen $c_{min, dur}$ (mm) met betrekking tot de duurzaamheid, voor voorgespannen beton (volgens prNBN EN 1992-1-1-ANB:2007, aanpassingen momenteel in voorbereiding)

Criterium (1)	Milieu- en blootstellingsklassen					
	XC1	XC2, XC3	XC4	XD1	XD2, XS1	XD3, XS2, XS3
	EI	EE1, EE2	EE3		ES1, ES2	ES3, EE4, ES4
Gebruiksduur van het bouwwerk 100 jaar	vermeerdering met 2 klassen	vermeerdering met 2 klassen	vermeerdering met 2 klassen	vermeerdering met 2 klassen	vermeerdering met 2 klassen	vermeerdering met 2 klassen
Sterkteklasse	≥ C30/37 vermindering met 1 klasse	≥ C35/45 vermindering met 1 klasse	≥ C40/50 vermindering met 1 klasse	≥ C40/50 vermindering met 1 klasse	≥ C40/50 vermindering met 1 klasse	≥ C45/55 vermindering met 1 klasse
Prefab element vergelijkbaar met een vloerplaat en horizontaal gestort (2)(3)	vermindering met 1 klasse	vermindering met 1 klasse	vermindering met 1 klasse	vermindering met 1 klasse	vermindering met 1 klasse	vermindering met 1 klasse
Prefab element met bijzondere beheersing van het betonproductieproces (2)	vermindering met 1 klasse	vermindering met 1 klasse	vermindering met 1 klasse	vermindering met 1 klasse	vermindering met 1 klasse	vermindering met 1 klasse

TABEL 6 – Wijziging van de constructieklasse

(1) Verminderen van klasse volgens verschillende criteria zijn cumuleerbaar

(2) Vermindering van klasse is alleen mogelijk indien de volgende 3 voorwaarden gelijktijdig vervuld zijn :

- het kwaliteitsborgingssysteem en de industriële zelfcontrole zijn conform met § 6 van NBN EN 13369:2004 en worden beoordeeld door een derde partij die continu toezicht houdt ;
- de procedure en de praktische modaliteiten van de toepassing van § 4.2.1.3 van NBN EN 13369:2004 (curing – bescherming tegen uitdroging) worden gevalideerd door een derde partij ;
- het kwaliteitsborgingssysteem en de industriële zelfcontrole impliceren dat de betondekking gemeten wordt en dat niet-conforme elementen worden geweerd.

(3) Het kan ook een deel van een prefab element zijn.

De minimale betondekking moet vermeerderd worden om rekening te houden met toleranties tijdens de uitvoering (Δc_{dev}):

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

Volgens NBN EN 1992-1-1:2005 mag van deze waarde worden afgeweken afhankelijk van het kwaliteitscontrolesysteem op de bouwplaats.

- Als dit kwaliteitscontrolesysteem ook het meten van de betondekking inhoudt, mag de uitvoeringstolerantie als volgt worden vermindert: $10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 5 \text{ mm}$.
- Voor elementen in prefab beton mag de uitvoeringstolerantie worden vermindert zodat voldaan is aan: $10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 0 \text{ mm}$. Deze vermindering mag alleen worden toegepast indien gelijktijdig aan de volgende 3 voorwaarden wordt voldaan:
 - het kwaliteitsborgingssysteem en de industriële zelfcontrole worden beoordeeld door een derde partij die continu toezicht houdt;
 - het kwaliteitsborgingssysteem en de industriële zelfcontrole houden in dat de betondekking gemeten wordt en dat niet-conforme elementen worden afgekeurd;
 - tijdens de productie worden passende maatregelen, goedgekeurd door de derde partij, toegepast om te waarborgen dat de door de producent opgegeven tolerantie niet wordt overschreden

Wordt het beton tegen een onregelmatig oppervlak gestort, dan moet de betondekking bijkomend vermeerderd worden met een ruimere marge. De vermeerdering wordt gekozen in functie van de oneffenheden op het oppervlak. De nominale betondekking (c_{nom}) zal minstens 40 mm zijn indien het beton wordt gestort op een bodem die een voorbereiding heeft ondergaan – bijvoorbeeld een laag zuiverheidsbeton – en 75 mm indien het beton rechtstreeks in contact komt met de grond.

De betondekking moet eveneens met minstens 5 mm vermeerderd worden in al die gevallen waarin het betonoppervlak een oneffen textuur heeft, zoals b.v. gegroefd beton, uitgewassen beton...



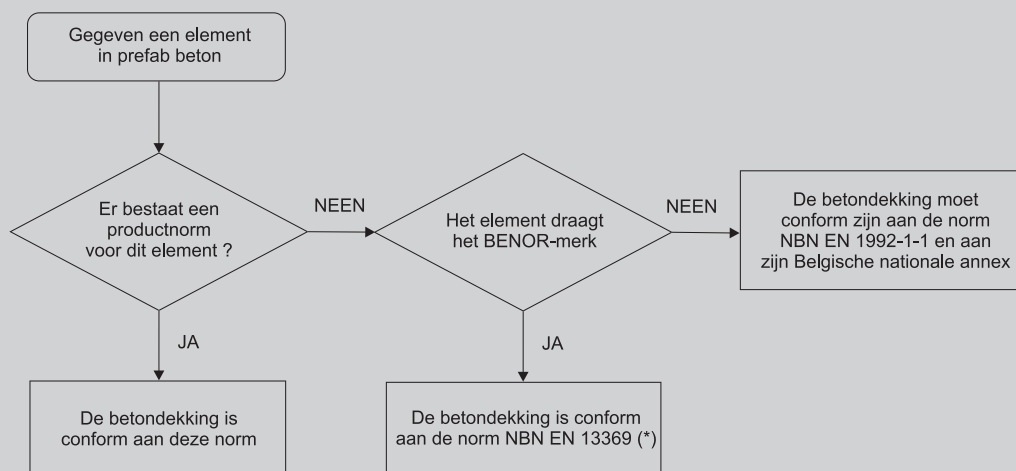
Foto's PHA

BETONDEKKING VAN PREFAB BETONELEMENTEN

De betonprefab industrie biedt bijzondere technische mogelijkheden met betrekking tot de duurzaamheidsaspecten van het beton. Het is bijgevolg logisch dat voorschriften deze mogelijkheden valoriseren. De technische specificaties van prefab betonelementen en bijgevolg ook de minimum betondekkingen maken het voorwerp uit van de Europese norm NBN EN 13369:2004 (Algemene bepalingen voor geprefabriceerde betonproducten), en haar nationale aanvulling die alsnog het statuut van normontwerp heeft (prNBN B 21 600:2007, aanpassingen momenteel in voorbereiding). Bovendien hebben sommige prefab producten hun eigen referentienorm en bijgevolg hun eigen specificaties. Deze laatste omvatten onder meer voorschriften inzake minimum betondekking.

De betonindustrie respecteert nauwgezet de nationale en internationale normen. Wanneer de gebruiker een prefab betonelement voorschrijft en daarbij de ermee corresponderende norm en de milieuklasse opgeeft, dan kan hij er bijgevolg zeker van zijn dat de kenmerken van het geleverde element conform zullen zijn aan de normeisen.

De website www.febe.be (menu 'producten') geeft voor elk type product de voor te schrijven referentienorm. Bestaat er voor een bepaald product geen dergelijke norm, dan moet de voorschrijver eisen dat wordt voldaan aan de algemene bepalingen van de norm NBN EN 13369:2004 en zijn nationale aanvulling.



* De betondekking volgens NBN EN 13369:2004 is 5 mm kleiner dan in de norm NBN EN 1992-1-1 en haar Belgische nationale bijlage (constructieklasse S4).

Kwaliteitsbeheersing en -controle gebeuren hier evenwel in het kader van het BENOR-merk.

1. WAND BLOOTGESTELD AAN DOOIZOUTEN

Gegeven een wand in gewapend beton met een dubbel wapeningsnet \varnothing 12 mm. Dooiwater kan tegen de wand opspatten. Het beton is van sterkteklasse C35/45. Er is geen kwaliteitsborgingssysteem of zelfcontrole dat maatregelen voorziet omtrent de betondekking van de wapeningen. De geplande gebruiksduur is 50 jaar.



Foto PHA

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}}$$

c_{min} is groter dan of gelijk aan 10 mm en de grootste van volgende waarden :

- $c_{\text{min}, b}$ (minimum betondekking in verband met aanhechtingseisen) :

In het geval van individuele wapeningen is $c_{\text{min}, b}$ gelijk aan de staafdiameter, in het geval van een groep wapeningen aan de equivalente diameter. Indien de diameter van de grootste korrel groter is dan 32 mm moet $c_{\text{min}, b}$ vermeerderd worden met 5 mm.

$$\Rightarrow c_{\text{min}, b} = 12 \text{ mm}$$

- $c_{\text{min}, \text{dur}} + \Delta c_{\text{dur}, \gamma} - \Delta c_{\text{dur}, \text{st}} - \Delta c_{\text{dur}, \text{add}}$

Hierbij is :

- $c_{\text{min}, \text{dur}}$: de minimum betondekking met betrekking tot de omgevingscondities
- (EE4 : vorst en regen \Rightarrow tabellen 4 en 6, constructieklasse S4, $c_{\text{min}, \text{dur}} = 45 \text{ mm}$) ;
- $\Delta c_{\text{dur}, \gamma}$: de veiligheidsmarge ($\Delta c_{\text{dur}, \gamma} = 0 \text{ mm}$);
- $\Delta c_{\text{dur}, \text{st}}$: de vermindering van de betondekking bij gebruik van inox wapeningen ($\Delta c_{\text{dur}, \text{st}} = 0 \text{ mm}$);
- $\Delta c_{\text{dur}, \text{add}}$: de vermindering van de betondekking indien een bijkomende bescherming wordt voorzien, b.v. een bekleding ($\Delta c_{\text{dur}, \text{add}} = 0 \text{ mm}$).

$$\Rightarrow c_{\text{min}} = 45 \text{ mm}$$

Er is geen kwaliteitscontrolesysteem op de bouwplaats

$$\Rightarrow \Delta c_{\text{dev}} = 10 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow c_{\text{nom}} = 55 \text{ mm}$$

2. BODEMVERHARDING VOOR EEN OPSLAGZONE VAN CHEMISCH AGRESSIEVE PRODUCTEN

Gegeven een betonverharding voor maïskuilvoeder aangelegd rechtstreeks op de grond na verwijdering van de teelaarde. Het beton is als volgt voorgeschreven :

- beton in overeenstemming met de normen NBN EN 206-1 en NBN B15-001 ;
- druksterkteklasse : C35/45 ;
- omgevingsklasse : EE3 en EA3 ;
- consistentieklasse : S3 ;
- grootste diameter : 20 mm ;
- aanvullende eisen : minimum 375 kg LA-cement per m³ beton.

Als wapening worden netten gebruikt met maaswijdte 100 mm en diameter 8 mm.



Foto CLP

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

c_{min} is groter dan of gelijk aan 10 mm en de grootste van volgende waarden :

- $c_{min,b}$ (minimum betondekking in verband met aanhechtingseisen) : in het geval van individuele wapeningen is $c_{min,b}$ gelijk aan de staafdiameter, in het geval van een groep wapeningen aan de equivalente diameter. Indien de diameter van de grootste korrel groter is dan 32 mm moet $c_{min,b}$ vermeerderd worden met 5 mm.

$$\Rightarrow c_{min,b} = 8 \text{ mm}$$

- $c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}$

Hierbij is :

- $c_{min,dur}$: de minimum betondekking met betrekking tot de omgevingscondities
- (EE3 : vorst en regen \Rightarrow tabellen 4 en 6, constructieklasse S4, $c_{min,dur} = 30 \text{ mm}$) ;
EA3 : sterk agressieve chemische omgeving = risico van aantasting van het beton door zuren \Rightarrow zonder invloed op wapening en betondekking; betonplaat horizontaal gestort, maar geen prefab \Rightarrow geen vermindering van klasse,
- $\Delta c_{dur,\gamma}$: de veiligheidsmarge ($\Delta c_{dur,\gamma} = 0 \text{ mm}$);
- $\Delta c_{dur,st}$: de vermindering van de betondekking bij gebruik van inox wapeningen ($\Delta c_{dur,st} = 0 \text{ mm}$) ;
- $\Delta c_{dur,add}$: de vermindering van de betondekking indien een bijkomende bescherming wordt voorzien, b.v. een bekleding ($\Delta c_{dur,add} = 0 \text{ mm}$).

$$\Rightarrow c_{min} = 30 \text{ mm}$$

Er is geen kwaliteitscontrolesysteem op de bouwplaats

$$\Rightarrow \Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

$\Rightarrow c_{nom} = 40 \text{ mm}$ voor de betondekking aan de bovenkant, en $c_{nom} = 75 \text{ mm}$ aan de onderkant vermits het beton op volle grond wordt gestort

Dit bulletin is een publicatie van:
FEBELCEM
Federatie van de Belgische Cementnijverheid
Vorstlaan 68 - 1170 Brussel
tel. 02 645 52 11 - fax 02 640 06 70
www.febelcem.be
info@febelcem.be

Auteur:
ir. C. Ployaert

Wettelijk depot:
D/2009/0280/04

V.u.: A. Jasienski

infobeton.be

BIBLIOGRAFIE

- [1] NEVILLE A., Propriétés des bétons, Parijs : Eyrolles, 2000
- [2] Betontechnologie, Brussel : BELGISCHE BETONGROEPERING (BBG), 4e herziene druk, 2006
- [3] OLLIVIER J.P. ; VICHOT A., La durabilité des bétons, Parijs : ATHIL, Ecole française du béton. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2008
- [4] POURBAIX M., Atlas d'équilibres électrochimiques à 25 °C, Paris : Gauthier-Villars & Cie Editeur, 1963
- [5] NBN B 15-001:2004 : Aanvulling op NBN EN 206-1:2001 - Beton - Deel 1 : Specificaties, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit, Brussel : NBN, 2004
- [6] NBN EN 206-1:2001 : Béton - Deel 1 : Specificaties, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit, Brussel : NBN, 2001
- [7] NBN EN 1992-1-1:2005 : Eurocode 2 : Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1 : Algemene regels en regels voor gebouwen, Brussel : NBN, 2005
- [8] prEN 1992-1-1 - ANB :2007 - Eurocode 2 : Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1 : Algemene regels en regels voor gebouwen, Brussel : NBN, 2007
- [9] APERS J. ; DE BLAERE B., Herstellen van oude gebouwen in beton, A+ Architectuur nr. 159, 4/1999
- [10] WIERIG X., Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure, Rilem Seminar on the durability of concrete structures under normal outdoor exposure, Hannover, 1984
- [11] Inzicht in duurzaamheid van beton, 's-Hertogenbosch : ENCI, 2003
- [12] NBN EN 14630:2007 : Producten en systemen voor het beschermen en herstellen van betonconstructies - Beproevingmethoden - Bepaling van de carbonatiediepte van verhard beton d.m.v. de fenolftaleïne-methode, Brussel : NBN, 2007
- [13] NBN EN 13369:2004 : Algemene bepalingen voor geprefabriceerde betonproducten, Brussel : NBN, 2004
- [14] NBN B 21-600:2008 : Algemene bepalingen voor geprefabriceerde betonproducten - Nationale aanvulling bij NBN EN 13369:2004, Brussel : NBN, 2008

