

## Bijlage B.2: BETONONDERZOEK

### 1. BETONDEKKING

#### 1.1 BELANG BETONDEKKING VOOR DUURZAAMHEID

Eén van de belangrijkste parameters voor de duurzaamheid van gewapend beton is de betondekking van de wapening. De betondekking beschermt de wapening tegen invloeden van buitenaf, bij een ontoereikende betondekking zal de wapening sneller beginnen roesten en betonschade veroorzaken. De eisen in verband met de betondekking van gewapend beton hangen dan ook af van de omgevingsomstandigheden en de verwachte levensduur.

Voor het al dan niet optreden van schade ten gevolge van carbonatatie speelt de betondekking op de wapening een grote rol. Hoe dieper de wapening zich onder het oppervlak bevindt, des te langer het zal duren vooraleer het carbonatatiefront de wapening bereikt en de wapening begint te roesten. Hetzelfde geldt voor schade ten gevolge van ingedrongen chloriden.

Wanneer de wapening (inwendig) begint te roesten verloopt er nog een zekere tijd vooraleer dat het roest voldoende druk heeft opgebouwd om de bovenliggende betonlaag af te duwen. Deze vertragsperiode is eveneens afhankelijk van de dikte van de betondekking.

#### 1.2 MEETPROCEDURE EN METHODIEK

De betondekkingsmetingen worden uitgevoerd met een elektromagnetische wapeningsdetector van het type 'Hilti Ferroskan PS200'. Volgens de fabrikant heeft het toestel een nauwkeurigheid van  $\pm 2-4$  mm in het meetbereik tot 60 mm, en van  $\pm 3-5$  mm in het meetbereik tussen 60 en 120 mm. De bepaling van staafdiameter is mogelijk tot 60mm, met een afwijking van  $\pm 1$  normdiameter. Uit ervaring en ook uit testen ter plaatse blijken deze maximale afwijkingen met de praktijk overeen te komen.

#### 1.3 RESULTATEN

De meetresultaten zelf zijn weergegeven in **Bijlage B.3**. Een samenvatting van de resultaten wordt hier nader besproken.

##### 1.3.1 **BETONDEKKING**

De vereiste minimum betondekking volgens de Nationale Bijlage van de NBN EN 1992-1-1 hangt af van de milieu- en omgevingsklassen. Op basis van onze ervaring en uitgaande van de vroegere Belgische Norm NBN B 15-002 kan er algemeen gesteld worden dat er een betondekking van minstens 25 mm vereist is. We berekenen dan ook het percentage wapening dat niet aan dit criterium voldoet. Afhankelijk van de variatiecoëfficiënt wordt hierbij uitgegaan van een normale verdeling of een lognormale verdeling.

We berekenen tevens het percentage wapening dat minder dan 10 mm onder het betonoppervlak ligt.

De resultaten worden weergegeven in **tabel 1**.

We merken hierbij op dat volgens de normen en afhankelijk van de omgevingsomstandigheden een hogere minimale betondekking vereist kan zijn.

Bij de balkonplaten bedoelen we met de dwarswapening, de wapening loodrecht op de gevel en met de langswapening, de wapening die evenwijdig loopt met de gevel.

OMSCHRIJVING		aantal	gemiddelde	st.afw.	minimum	maximum	< 25 mm	< 10 mm
Balkon_onderzijde_dw	- Dwarswapening	28	19,36	6,15	8	38	83,6%	2,4%
Balkon_onderzijde_lw	- Langswapening	31	30,97	6,20	17	40	16,8%	0,0%
Gevelbalk_binnenzijde_bw	- Beugels	39	28,49	3,52	21	36	16,1%	0,0%
Gevelbalk_binnenzijde_lw	- Langswapening	11	29,36	4,18	19	34	14,8%	0,0%
Gevelbalk_onderzijde_bw	- Beugels	34	52,35	17,18	32	86	1,6%	0,0%
Gevelbalk_onderzijde_lw	- Langswapening	28	45,61	8,59	30	61	0,8%	0,0%

Tabel 1: Overzicht van de betondekking

### Bespreking van de resultaten:

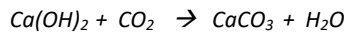
- ◆ Er is een grote variatie in de betondekking tussen de verschillende onderzochte onderdelen.
- ◆ De betondekking van de dwarswapening aan de onderzijde van de inpandige balkonplaten (dewelke vermoedelijk gevormd worden door de doorlopende vloerplaat) kan bestempeld **worden als ondermaats tot zeer slecht**. Meer specifiek bevindt er zich ongeveer 84 % van de dwarswapening op minder dan 25 mm van het betonoppervlak. Bij de langswapening van de balkonplaten blijft het aandeel beperkt tot ongeveer 17 %.
- ◆ Aan de binnenzijde van de betonnen gevelbalken bevindt ongeveer 15 % van de langswapening zich op minder dan 25 mmm van het betonoppervlak en voor de beugelwapening is dit ongeveer 16 %.
- ◆ Bij de onderzijde van de betonnen gevelbalk is het gedeelte van de wapening dat zich op minder dan 25 mm van het betonoppervlak bevindt verwaarloosbaar.

De betondekking van de balkonplaten werd langs de onderzijde gemeten. Rekening houdende met de huidige vloeropbouw kon deze niet langs de bovenzijde worden opgemeten. Uit de bekomen resultaten kunnen we niet opmaken of deze al dan niet uitgevoerd werden met twee lagen wapening.

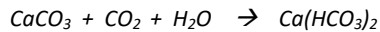
## 2. CARBONATATIESCHADE

### 2.1 ALGEMENE SITUERING VAN DE PROBLEMATIEK

Tijdens de hydratatie worden alkaliën ( $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{KOH}$  en  $\text{NaOH}$ ) gevormd. Door deze alkaliën heeft nieuw beton een basisch karakter. Door luchtverontreinigingen zullen de alkalische bestanddelen reageren, waardoor de alkaliteit vermindert en het beton aldus verzuurt. Een veel voorkomend geval van die zogenaamde verzuring is de inwerking van koolzuur op de opgeloste vrije kalk in het poriënwater van het beton.



Het gevormde  $\text{CaCO}_3$  reageert in een later stadium nog verder tot het goed oplosbaar  $\text{Ca(HCO}_3)_2$ .



Bij het uitdrogen zet dit product zich af op het betonoppervlak, wat aanleiding kan geven tot een witte uitslag die echter meestal afgewassen wordt door de regen.

Dit proces noemt men carbonatatie. Hierbij daalt de pH van het beton van 12 à 13 naar een waarde van 8 à 9. Door die verzuring van het beton zal, bij gewapend beton, de beschermende passiveringslaag op het staal doorbroken worden en zal het staal corroderen in aanwezigheid van een elektrolyt (water). Dit roesten gaat gepaard met een volumevermeerdering, zodat het beton aan trekspanningen wordt onderworpen, en zodoende scheurt.

De carbonatatediepte is die diepte tot waar het koolzuur is doorgedrongen in het beton. Dit doordringen is afhankelijk van de expositie en kwaliteit van het beton.

Hierbij spelen de volgende betoneigenschappen een grote rol:

- De water/cementfactor, met invloed op porositeit, sterkte, vochtgehalte, ...
- Uitvoeringsomstandigheden: weersomstandigheden, nabehandeling, ...
- De gebruikte cementsoort. Portlandcement bevat een 1,25 à 1,40 maal grotere buffercapaciteit aan alkaliën dan hoogovencement. Bij hoogovencement zal men dus een vluggere carbonatatie verkrijgen dan bij Portlandcement. Echter, hoogovencement geeft op een langere termijn een grotere dichtheid aan het beton.

Verder spelen de expositieomstandigheden een rol.

Bevindt het beton zich in een binnenklimaat, dan zal er snelle carbonatatie optreden. Maar omdat er hier weinig water in het beton aanwezig is, zal dan ook maar weinig kans bestaan op corrosie van het wapeningsstaal.

In een buitenklimaat zal de carbonatatediepte sterk afhangen van de berekening en de verdamping van de wand. Bij berekening zal het ingedrongen water de lucht verdringen, die de carbonatatie veroorzaakte. Om die reden zal de carbonatatediepte op lange termijn samenvallen met het droogfront.

In een constant klimaat wordt de carbonatatediepte  $x$  in functie van de tijd gegeven door de formule  $x = a \cdot \sqrt{t}$  (wet van Fick), waarbij  $a$  een constante is die rekening houdt met de hoeveelheid en samenstelling van het cement per  $\text{m}^3$ , de samenstelling, verdichting en nabehandeling van het beton en met de klimatologische omstandigheden.

Voor het al dan niet optreden van schade ten gevolge van carbonatatie speelt de betondekking op de wapening een grote rol. Hoe dieper de wapening zich onder het oppervlak bevindt, des te langer het zal duren vooraleer het carbonatatiefront de wapening bereikt en de wapening begint te roesten.

Wanneer de wapening (inwendig) begint te roesten verloopt er nog een zekere tijd vooraleer dat het roest voldoende druk heeft opgebouwd om de bovenliggende betonlaag af te duwen. Deze vertragsperiode is eveneens afhankelijk van de dikte van de betondekking.

## 2.2 MEETPROCEDURE EN METHODIEK

De carbonatatie diepte wordt bepaald door verstuiwing van een pH indicatorvloeistof fenolftaleïne op een vers breukvlak of boorstof. Gecarbonateerd beton blijft kleurloos, niet gecarbonateerd beton verkleurt paars-rood.

## 2.3 RESULTATEN

De meetresultaten zelf zijn weergegeven in **Bijlage B.3**. Een samenvatting van de resultaten wordt hier nader besproken.

### 2.3.1 CARBONATATIEDIEPTE

De gemiddeld gemeten carbonatatie diepte bedraagt 7 mm voor de onderzochte betonnen elementen. Deze waardes zijn gewoonlijk voor beton van deze ouderdom. Echter wijzen we wel op een aanzienlijke spreiding van de resultaten.

OMSCHRIJVING	AANTAL METINGEN	GEMIDDELDE (in mm)	STANDAARD AFWIJKING	MINIMUM (in mm)	MAXIMUM (in mm)
Alle betonnen elementen (betonplaat & gevelbalken)	15	7	8	2	11

Tabel 2: Gemiddelde carbonatatie dieptes

### 2.3.2 TOEPASSING MATHEMATISCH MODEL

We bepalen de hoeveelheid wapening die in het gecarbonateerd beton ligt. Wapening die in gecarbonateerd beton ligt zal in aan aanwezigheid van zuurstof en vocht inwendig beginnen te roesten en op termijn schade veroorzaken. De hoeveelheid staal die gevoelig is voor corrosie ten gevolge van carbonatatie wordt benaderd met behulp van een wiskundig statistisch computermodel.

De resultaten van de schadegevoeligheid als gevolg van carbonatatie en te weinig betondekking worden weergegeven in – **bijlage B.4** –.

Uit de resultaten van de pessimistische schadeprognose kunnen we volgende conclusies trekken:

## 2.4 SCHADEGEVOELIGHEID

- ◆ De schadegevoeligheid als gevolg van carbonatatie en te weinig betondekking is moeilijk in te schatten gezien de grote variatie in betondekking en carbonatatie diepte.
- ◆ Door de relatief goede betondekking bij de betonnen onderdelen, met uitzondering van de dwarswapening aan de onderzijde van de balkonplaten, en beperkte carbonatatie diepte is het risico op betonschade door carbonatatie eerder beperkt.
- ◆ Door de ondermaatse betondekking bij de dwarswapening aan de onderzijde van de balkonplaten is er significant meer risico op carbonatatie-geïnitieerde wapeningscorrosie.
- ◆ De pessimistische schadeprognose in de veronderstelling dat er geen andere schadeoorzaken zoals een te hoog chloridengehalte of vochtinfiltraties meespelen.

### 3. CHLORIDENONDERZOEK

#### 3.1 PROBLEMATIEK VAN CHLORIDENAANTASTING

Zouten (chloriden) zijn zeer nadelig voor gewapend beton wanneer zij in te hoge concentratie voorkomen. Vanaf 0,4 % gewichtsprocent op de cementmassa kunnen zich problemen voordoen. De kans op corrosie is onder meer ook afhankelijk van de porositeit van het beton, de diepteligging van de wapening en – daarmee verbonden - de vochtigheid in de omgeving van de wapening. Vanaf meer dan 1 % is het echter vrijwel zeker dat er zich problemen zullen voordoen.

Te hoge chloridenconcentraties veroorzaken snelle en hevige corrosie van de wapening, zelfs in niet gecarbonateerd (b.v. nieuw) beton.

De wapeningsstaven worden meestal slechts plaatselijk, maar heel hevig aangetast. Door het zout worden putjes in het staal ingevreten en uitgespoeld, wat aan het betonoppervlak **bruine roestvlekken** kan veroorzaken. Men spreekt ook van **putcorrosie**.

Deze aantastingsvorm is gevaarlijk omdat de wapening lokaal snel zijn kracht verliest. Wanneer het om belangrijke hoofdwapening of verankeringen gaat, dan komt de stabiliteit van het onderdeel snel in het gedrang.

Chloriden kunnen op verschillende wijzen in het beton terechtkomen. Ze kunnen ingemengd zijn in het beton bij de oprichting (zeezand of chloridenhoudende bindingsversnellers, hetgeen ook soms bij prefab beton voorkomt). Ze kunnen ook van buiten af indringen door dooizouten, door rechtstreekse of onrechtstreekse inwerking van zeewater in de kuststrook of door chloriden in de omgeving.

In alle geval wordt chloridenschade in de hand gewerkt door water. Op vochtige plaatsen zal de schade sneller optreden (vb. nabij waterinfiltraties). In droog beton wordt de aantastende werking van de chloriden sterk afgeremd.

Wanneer het vermoeden van chloridenverontreiniging bestaat, is het noodzakelijk de concentratie van de chloride ionen te bepalen. Dit kan door laboproeven op betonmonsters.

Van de concentratie hangt het welslagen van eventuele reparaties en de doeltreffendheid van een oppervlaktebescherming af. Bij lagere concentraties (tot 1%) kan het aanbrengen van een oppervlaktebescherming (hydrofobering of coating) het roestproces in aanzienlijke mate afremmen. Dit kan echter nooit een volledige garantie bieden. Bij te hoge zoutconcentraties dient alle aangetast beton te worden verwijderd en vervangen. In sommige gevallen is een volledige vervanging van het betonelement nodig (bv. uitkragende balkons). Een alternatieve oplossing in het geval van hoge chloridenconcentraties is het toepassen van kathodische bescherming. Het principe van deze techniek bestaat erin de potentiaal van de wapening te verlagen, waardoor de corrosie vertraagt of wordt stopgezet. Deze potentiaalverlaging wordt bekomen door kunstmatig elektronen toe te voeren aan het wapeningsstaal. Er bestaan twee soorten kathodische bescherming: opofferingsanodes en een systeem met opgedrukte stroom.

Bij opofferingsanodes wordt een verbinding gemaakt tussen de wapening en een minder edel metaal, waardoor het minder edele metaal corrodeert in plaats van het wapeningsstaal. Het minder edele metaal offert zich dus als het ware op.

Bij een systeem met opgedrukte stroom wordt de wapening verbonden met de negatieve pool van de spanningsbron waardoor elektronen worden toegevoerd aan het wapeningsstaal. De anode bestaat uit een inert materiaal dat verbonden is met de positieve pool van de spanningsbron. Een systeem met opgedrukte stroom is een permanent systeem, dat periodieke controle vereist.

Andere technieken, zoals het verwijderen van de chloriden door elektro-osmose of binden van de chloridenionen zijn zeer duur en beperkt toepasbaar in bepaalde specifieke gevallen. Bij aangetaste wapening is tevens onderzoek nodig naar de stabiliteit van de betonconstructie.

## 3.2 MEETPROCEDURE & CRITERIUM

### 3.2.1 MEETPROCEDURE

De stalen worden ontnomen door droogboren met boordiameter 16, waarbij het boorstof wordt opgevangen. Er wordt geboord, zodat we een monster van 10 à 15 gram boorstof per staal bekomen. Het oppervlaktelaagje (enkele mm) wordt niet meegenomen.

In het labo worden de monsters nauwkeurig gewogen en onderzocht naar hun chloridengehalte volgens de fotometrie-analyse. Deze analyse wordt uitgevoerd op 2 gram betonstof.

Het meetresultaat geeft het % chloride ionen t.o.v. de totale massa. Voor omrekening naar % chloriden op cementmassa hanteren we volgende gegevens:

- Beton: 2350 kg/m<sup>3</sup>
- Cementgehalte: 350 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.2.2 OORDELINGSCRITERIUM

De aantasting van staal in gewapend beton ten gevolge van te hoge chloridenconcentraties is in wetenschappelijke middens reeds sinds lange tijd bekend. Nochtans is over dit fenomeen en de behandeling ervan het laatste woord nog niet gezegd. De inzichten hierover worden nog meer en meer verfijnd.

De trend hierbij is dat de invloed van chloriden meer en meer belangrijk wordt geacht. Het hoofdcriterium hierbij is het percentage chloridenionen ten opzichte van de cementmassahoeveelheid. Op heden wordt er vrij algemeen aangenomen dat vanaf een percentage van **0,3 à 0,4 %** ten opzichte van het cementgehalte roestvorming van de wapening ten gevolge van chloride **kan** ontstaan.

Dit chloridenpercentage is echter niet de enige invloedsfactor. Verder spelen de porositeit van het beton (kwaliteit van het beton), de diepteligging van de wapening onder het oppervlak (betondekking), en het vochtgehalte van het beton rond de wapening (vochtbelasting) in aanzienlijke mate een rol.

Daarbij komt nog dat studies uitwijzen dat het chloridengehalte onder invloed van carbonatatie achter dit carbonatatiefront wordt verhoogd zodanig dat carbonatatie van het beton medeoorzaak kan zijn van hogere chloridenpercentages rond de wapening.

Nochtans wordt vrij algemeen aangenomen dat boven een zeker percentage chloride de wapening in gewapend beton, blootgesteld aan een buitenomgeving, hoe dan ook gaat roesten. Dit percentage kunnen we stellen op ongeveer 1 % van de massahoeveelheid cement.

De Europese norm EN 206-1:2001 met de aanvullende Belgische norm NBN B15-001:2004 voorziet verschillende chloridenklassen afhankelijk van het beoogd gebruik. Bij iedere klasse hoort een maximum chloridengehalte t.o.v. van de massa van het cement. Voor gewapend beton is de grenswaarde: 0,4%, voor voorgespannen beton is dit 0,2%. Het chloridengehalte van ongewapend beton mag oplopen tot 1%.













Bovendien geldt het verbod op gebruik van chloorhoudende hulpstoffen (bv. calciumchloride) nu ook voor gewapend en voorgespannen beton.

Dit alles overwegend stellen wij voor gewapend beton als absoluut veilige **drempelwaarde** een gehalte van **0,4 %** op de cementmassa voorop. Voor concentraties tussen 0,4 en 1% is waakzaamheid geboden.




### 3.3 MEETRESULTATEN

Bij diverse onderdelen werden monsters<sup>1</sup> genomen, verdeeld over het ganse oppervlak, die onderzocht werden op het chloridengehalte. Dit gehalte aan zout wordt omgerekend naar de massa cement zodat dit aan referentiewaarden kan worden getoetst.

De resultaten zijn hierna in een tabel gegeven.

NR	OMSCHRIJVING	DIEPTE (CM)	% Cl	CORROSIEKANS
1	Onderzijde balkonplaat V6	0-2	0,40	
2	Onderzijde balkonplaat V6	2-4	0,07	
3	Binnenzijde gevelbalk V5	0-2	0,13	
4	Binnenzijde gevelbalk V5	2-4	0,13	
5	Onderzijde balkonplaat V4	0-2	0,07	
6	Onderzijde balkonplaat V4	2-4	< 0,07	
7	Onderzijde gevelbalk V1	0-2	< 0,07	
8	Onderzijde gevelbalk V1	2-4	< 0,07	
9	Onderzijde gevelbalk V2	0-2	< 0,07	
10	Onderzijde gevelbalk V2	2-4	< 0,07	
11	Kolom kelder V-1	0-2	< 0,07	
12	Kolom kelder V-1	2-4	< 0,07	

Legende:

-  Laag corrosiegevaar door chloriden
-  Matig corrosiegevaar door chloriden
-  Hoog corrosiegevaar door chloriden

Tabel 3: Chloridengehaltes en corrosiekans

### 3.4 BESLUIT

- ◆ De gemeten chloridegehalten liggen bij alle genomen stalen, met uitzondering van de onderzijde aan de balkonplaat op verdieping zes, onder de veilige drempelwaarde van 0,4 % .
- ◆ De typische chloridenschade (uitlopende roestvlekken) werden niet waargenomen.

De gemeten betonelementen zijn niet chlorideverontreinigd. Het ontbreken van de typische chlorideschade (uitlopende roestvlekken) laat vermoeden dat andere betonelementen evenmin verontreinigd zijn.

Blijvend afschermen van de zichtbare betonnen onderdelen blijft echter noodzakelijk gezien het gebouw zich in een zee-omgeving bevindt

<sup>1</sup> De boorstofmonsters worden bewaard gedurende 6 maanden na aflevering van het onderzoeksrapport. Zonder tegenbericht worden deze monsters daarna verwijderd.