



BETONSCHADE DOOR CHLORIDEN

Betonschade

Beton is een robuust materiaal, sterk en duurzaam. Indien goed ontworpen en uitgevoerd, zijn betonproducten en betonconstructies zeer goed bestand tegen een veelheid van belastingen en mogelijke aantastingen. Er zijn specifieke aantastingen waar beton minder goed tegen bestand is. We onderscheiden de volgende vormen van betonschade:

- wapeningscorrosie door carbonatatie;
- wapeningscorrosie door chloriden;
- inwerking door vorst en dooizouten;
- chemische aantasting;
- alkali-silica reactie (ASR);
- aantasting door zuren;
- aantasting door sulfaten;
- scheuren door overbelasting van beton;
- grindnesten in het beton;
- craquelé (kleine haarscheurtjes) in het betonoppervlak.

Wapeningscorrosie door chloriden

In gewapend beton is het wapeningsstaal normaal gesproken goed beschermd tegen corrosie. Dankzij het sterk alkalische milieu in beton, wordt op het wapeningsstaal een dunne beschermende laag gevormd, de passiveringslaag. Deze passiveringslaag kan verloren gaan door twee fenomenen: carbonatatie en overschrijding van een maximum chloride-gehalte. Het chloridegehalte in betongrondstoffen is streng gereguleerd. Chloriden kunnen in beton dringen door langdurig contact met zeewater, zeewind en dooizouten. Hoogovencement heeft een positief effect op de weerstand van beton tegen chloride-indringing. Welke maatregelen ten chloride-indringing worden aanbevolen?

Passivering van betonstaal

De bescherming van betonstaal in beton is gebaseerd op de alkaliteit van het poriewater van beton. Is de pH hoog genoeg, dan vormt zich een dunne oxidehuid (Fe_2O_3 en Fe_3O_4) op het staaloppervlak. Deze passiverings-laag remt het in oplossing gaan van de ijzer-ionen zo sterk, dat het corrosieproces tot stilstand komt. Deze passivering van het staal in beton kan door twee oorzaken verloren gaan:

- verlaging van de pH-waarde als gevolg van carbonatatie (zie informatieblad 'Bestandheid van beton tegen wapeningscorrosie door carbonatatie');
- overschrijding van het chloridegehalte waarbij corrosie kan optreden.

Corrosieproces

Corrosie is een elektrochemisch proces dat door potentiaalverschillen tussen verschillende plaatsen op het staaloppervlak wordt veroorzaakt.

Bij dit corrosieproces gaan aan de anode Fe^{2+} -ionen (uit het staal) in oplossing, waarbij het bijbehorende aantal elektronen vrijkomt en via het staal naar de kathode gaat. Aan de kathode reageren de O_2 - en H_2O -moleculen onder opname van elektronen tot OH^- -ionen. De ijzer- en hydroxide-ionen reageren tot verschillende roestproducten (zie kader).

Corrosie treedt op als wordt voldaan aan de volgende randvoorwaarden:

- er moeten potentiaalverschillen zijn waardoor een stroomkring ontstaat;
- de anode en kathode moeten zowel via het staal als elektrochemisch met elkaar zijn verbonden;
- het in oplossing gaan van het ijzer moet door de depassivering mogelijk zijn;
- bij de kathode moet voldoende zuurstof beschikbaar zijn voor de vorming van de hydroxide-ionen.

stroomkring corrosieproces

Stroomkring corrosieproces

Anodische reactie (A):
Het ijzer gaat in de oplossing
 $Fe > Fe^{2+} + 2e^-$

Kathodische reactie (K):
Onder invloed van de zuurstof-reductie wordt hydroxide gevormd
 $O_2 + 2H_2O + 4e^- > 4OH^-$

Roestvorming

De in oplossing zijnde ijzer- en hydroxide-ionen gaan verbindingen aan waardoor, afhankelijk van het aanbod water en zuurstof, verschillende roestproducten worden gevormd (anodische vervolgreactie)

Ijzer II-hydroxide (wit)	$Fe^{2+} + 2(OH)^- > Fe(OH)_2$
Ijzer III-hydroxide (rood / bruin)	$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 > 4Fe(OH)_3$
Ijzer III-oxide (rood / bruin)	$Fe(OH)_3 + 3O_2 > 2Fe_2O_3 + 3H_2O$

Bouwkompaan documentatie

betonschade > wapeningscorrosie door chloriden 2

Depassivering staaloppervlak door chloriden

Vrije chloor-ionen zijn in staat de ijzerionen uit de passiveringslaag vrij te maken (zie kader). In een vervolgreactie ontstaat hierbij zoutzuur (HCl), waardoor de pH van het poriewater wordt verlaagd. Dit heeft vervolgens een versneld in oplossing gaan van ijzerionen tot gevolg, waarbij een nog zuurder milieu ontstaat. Een pH-waarde van 4 is geen uitzondering. Dit gaat gepaard met een zeer lokale aantasting van de wapening, waarbij er putjes in het staaloppervlak ontstaan, de zogenoemde putcorrosie.

effect van vrije chloriden

1. De chloriden dringen in de passiveringslaag, reageren met het ijzer en vormen gemakkelijk oplosbaar ijzerchloride. Door de volgreactie worden chloor- ionen niet verbruikt, maar blijven voor verdere omzettingprocessen beschikbaar:
$$\text{Fe}_2^+ + 2\text{Cl}^- > \text{FeCl}_2$$



2. Door hydrolyse van ijzerchloride kan zoutzuur (HCl) ontstaan:
$$\text{FeCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{HCl}$$

3. Kleine hoeveelheden chloriden kunnen al een plaatselijke verstoring van de passiveringslaag tot gevolg hebben, met als gevolg een plaatselijke sterke aantasting in de vorm van putcorrosie.

Waar komen de chloriden vandaan?

Chloriden in beton kunnen zijn ingemengd via de grondstoffen of zijn ingedrongen van buitenaf. De belangrijkste bronnen zijn:

- chloriden uit grondstoffen;
- chloriden uit zeewater en zeewind;
- chloriden uit andere, niet-maritieme bronnen.

Chloriden uit grondstoffen

Alle grondstoffen waarmee beton wordt gemaakt bevatten chloriden. Uit zee gewonnen toeslagmateriaal zal over het algemeen een hoger chloridengehalte hebben dan riviermateriaal. De leverancier van de toeslagmaterialen zal het chloridengehalte moeten opgeven. Het berekende chloridengehalte in beton mag niet groter zijn dan de maximale waarde zoals genoemd in tabel 1.

maximaal toegestane chloridegehalte in beton volgens 5.2.7 van NEN-EN 206-1 en randvoorwaarden conform NEN 8005

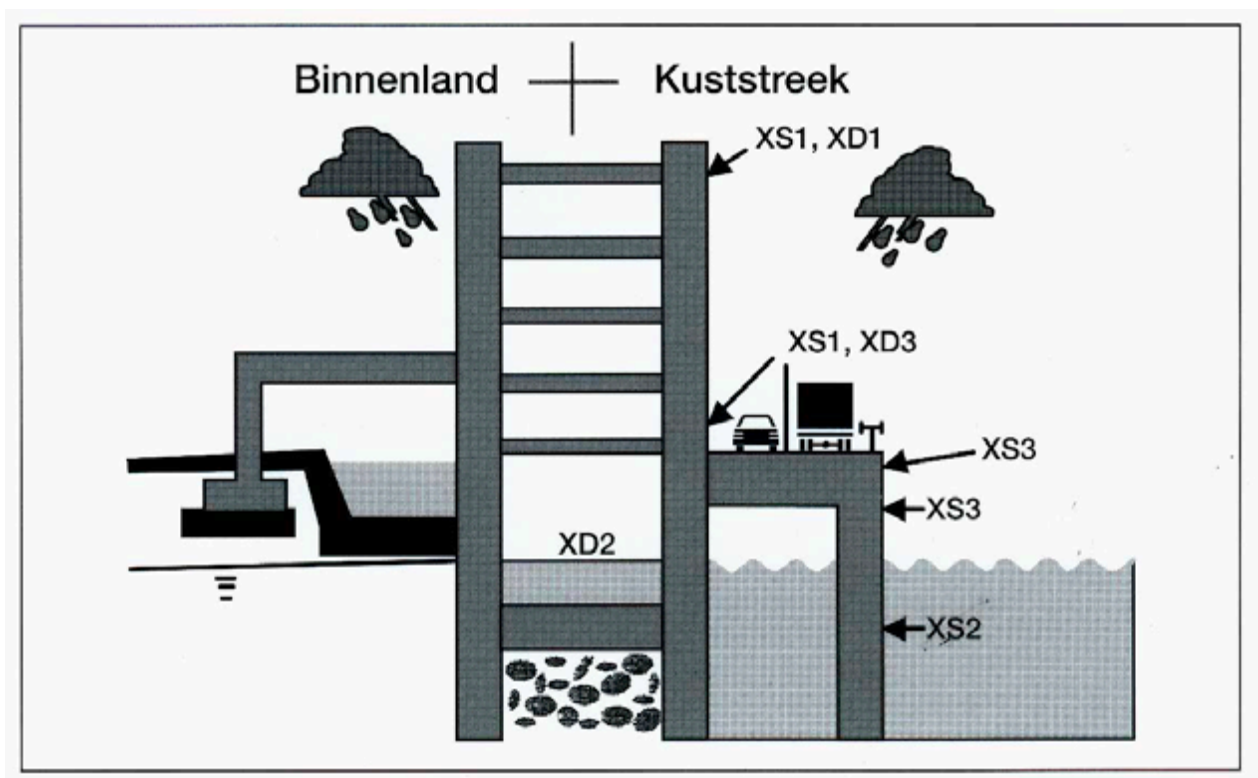
soort beton	maximaal chloridegehalte beton % (m/m) t.o.v. cement- /bindmiddel-gehalte
ongewapend	1,00
gewapend	0,40
voorgespannen	0,20

Chloriden uit zeewater en zeewind

Zeewater bevat zeer grote hoeveelheden opgeloste zouten, vooral chloriden en sulfaten. Het chloridengehalte in water van de Noordzee is gemiddeld circa 2,0% (m/m). Bij de nadere beschouwing van de inwerking van de in het zeewater aanwezige chloriden op betonconstructies moet onderscheid worden gemaakt tussen de volgende situaties (figuur 1):

- Betonconstructies nabij of aan de kust (milieuklasse XS1). De verdamping van vocht aan het betonoppervlak heeft een verhoging van het chloridengehalte tot gevolg. De direct door zeewind getroffen oppervlakken van betonconstructies langs de kust tot zelfs enige kilometers uit de kust worden 'belast' met kleine druppeltjes zeewater. Afhankelijk van de locatie van de constructie en de detaillering (plaatselijke wateraccumulatie) kunnen plaatselijk wat hogere concentraties optreden. Onder deze omstandigheden is er weliswaar continu zuurstof beschikbaar, maar is het risico op corrosie van wapening beperkt;
- Beton van maritieme constructies permanent onder water (milieuklasse XS2). Bij waterverzadigd beton kunnen de chloor-ionen naar binnen dringen. De gevolgen zijn echter in het algemeen gering door het gebrek aan zuurstof onder water;

- Beton van maritieme constructies in getijde-, spat- en stuifzone boven water (milieuklasse XS3). Bij de bevochtigingsfase wordt het beton aan het oppervlak door capillaire opzuiging met een chloridenoplossing verzadigd. In de uitdrogingsfase verdampt het water en de chloriden blijven aan het uitdrogingsfront achter en kunnen van daaruit door middel van diffusie verder in het beton binnendringen. Bij de volgende bevochtigingsfase vullen de poriën zich weer met zeewater, waarbij door oplossen van reeds in de poriën aanwezige chloriden een verhoogde concentratie ontstaat. De duur van de uitdrogingsfase is bepalend voor de snelheid van dit proces, omdat de waterafname in de uitdrogingsfase trager verloopt dan de wateropname. Daarnaast is er ook vanuit de getijden spatzone een toevloed van chloriden door capillaire werking. De mate waarin door capillaire werking chloriden worden aangetrokken hangt nauw samen met de capillaire porositeit van de cementsteen en de verdamping van vocht aan het betonoppervlak. In elk geval is de indringing van chloriden door capillaire opzuiging veel sneller dan door diffusie. Verder geldt dat op een grotere diepte in het beton dan de nat/droog wisselzone, de cementsoort een grote invloed heeft op de indringingssnelheid. Onder deze omstandigheden is veel zuurstof beschikbaar en is er een aanmerkelijk risico op corrosie van wapening.



Figuur 1. Locaties milieuklassen XD en XS

Chloriden uit andere, niet maritieme bronnen

Behalve bij een maritiem milieu, kunnen chloriden ook uit andere bronnen komen (figuur 1):

- Beton blootgesteld aan chloriden in de lucht (milieuklasse XD1). Onder winterse omstandigheden zal het wegverkeer het op de weg aanwezige (dooi)water met dooizout verstuiven. De door de lucht meegevoerde waterdruppeltjes met dooizout treffen de kolommen en onderzijde van rijdekken van viaducten. Ook tunnelwanden en de onderzijde van het tunneldak worden op deze wijze getroffen door het stuifwater met de chloriden uit het dooizout;
- Beton blootgesteld aan zwembadwater en industrieel (afval)water (milieuklasse XD2). Uit oogpunt van hygiëne moet water in zwembaden continu een bepaald chloorgehalte hebben. Ook in de industrie wordt chloor(water) veelvuldig toegepast of moet afvalwater met een bepaalde chloorconcentratie worden opgevangen of afgevoerd. In de hedendaagse betonbouw worden veel kunststoffen toegepast zoals polyvinylchloride (PVC). In geval van brand komt chloride vrij, dat bij contact met (blus)water wordt omgezet in zoutzuur. Door de aanwezigheid van water en de relatief hoge chlorideconcentratie aan het betonoppervlak wordt de indringing van chloor ionen in het beton bevorderd. Na afloop van de brand dringt het chloridefront, afhankelijk van de porositeit en de relatieve vochtigheid van het beton, verder in;
- Horizontale betonoppervlakken blootgesteld aan chloriden uit dooizouten (milieuklasse XD3). Bij de gladheidsbestrijding wordt meestal natriumchloride (NaCl) toegepast omdat dit zout, in vergelijking met calciumchloride (CaCl_2) en magnesiumchloride (MgCl_2), het meest economisch is en de grootste smeltcapaciteit heeft. Bij vermenging met het smeltwater ontstaan oplossingen met hoge concentraties chloor-ionen, waardoor door concentratieverschillen de indringing in het beton in relatief

- korte tijd sterk kan zijn. De mate van indringing is sterk afhankelijk van de kwaliteit van het beton (samenstelling, water-cementfactor en nabehandeling) en de locatie. De grootste concentraties treden op aan de bovenzijde van brugdekken in de zone bij de schampranden. De aansluiting van de asfaltlaag aan deze betonnen schampranden of opstortingen is een kritisch detail. Onder winterse omstandigheden kunnen vloeren van parkeergarages ook langdurig nat blijven door het water met doozout dat door de auto's continu wordt meegebracht.

Technologische maatregelen

De snelheid en mate waarin chloride door de (ongescheurde) betondekking kan binnendringen en de wapening kan bereiken, is primair afhankelijk van:

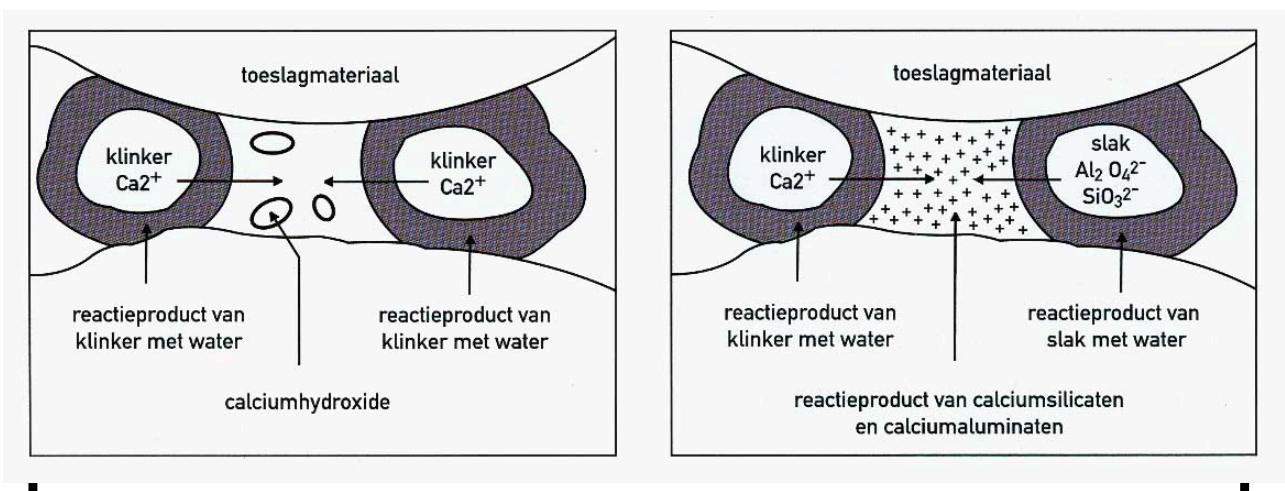
- soort cement;
- cementgehalte;
- water-cementfactor;
- nabehandeling.

diffusiecoëfficiënt (D_{cl}) voor chloriden in beton op basis van portland-, portlandvlieg- en hoogovencement

cementsoort	D_{cl} (m^2/s)
portlandcement	50×10^{-12}
portlandvliegasement	5×10^{-12}
hoogovencement ($\leq 50\%$ HO-slak)	1×10^{-12}

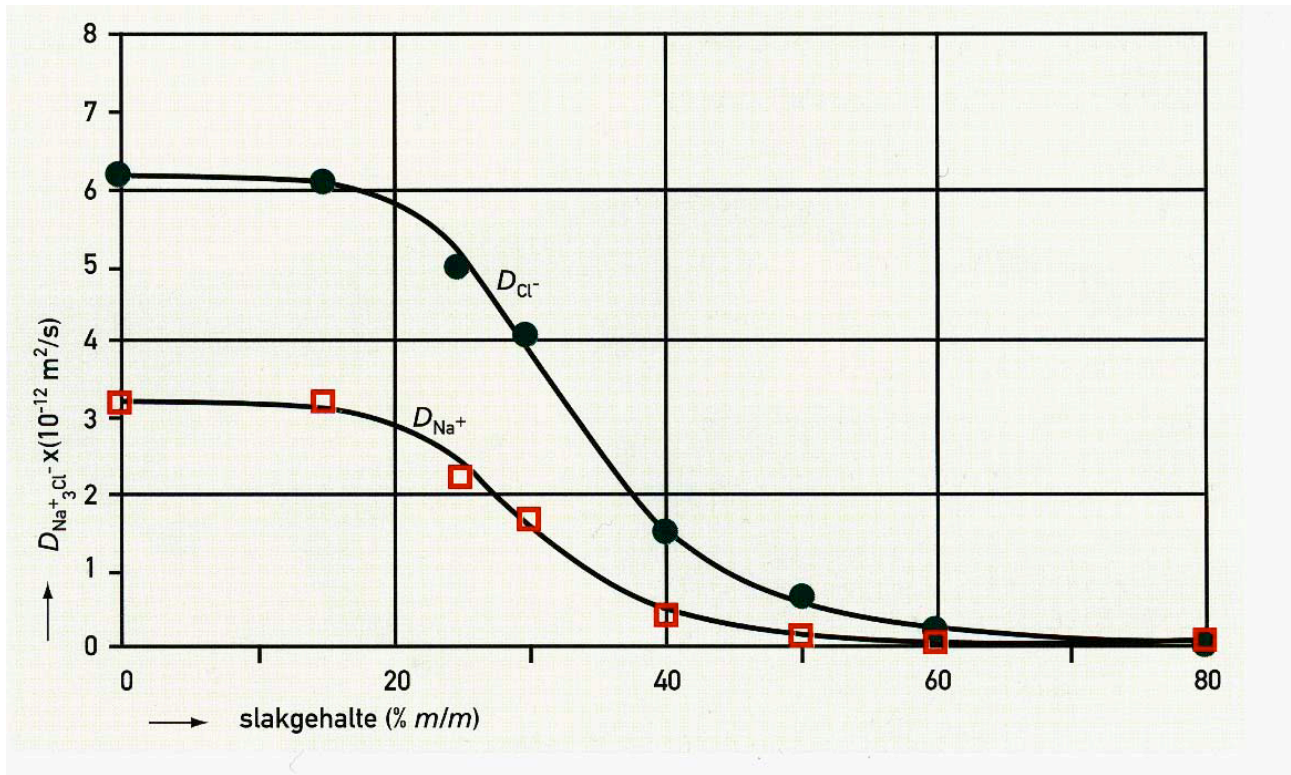
Cementsoort

Diffusie Beton op basis van hoogovencement heeft bij volledige hydratatie een dichtere poriënstructuur dan beton op basis van portlandcement, met als gevolg een grotere weerstand tegen diffusie. De afname van het aantal capillaire poriën bij beton op basis van hoogoven- of portlandvliegasement is een belangrijke oorzaak voor de geringere penetratie van chloriden. In tabel 2 is het grote verschil in diffusiecoëfficiënten in beton bij toepassing van de verschillende cementen indicatief weergegeven. De hogere weerstand van de cementsteen op basis van hoogovencement tegen de indringing en transport van chloriden wordt veroorzaakt door de additionele vorming van calciumsilicaathydraat ($x\text{CaO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O} = \text{CSH}$), ten gevolge van de reactie van de slak (figuur 2).



Figuur 2. Verschil in dichtheid van de cementsteen tussen portlandcement en hoogovencement

Bij hoogovencement is de diffusiecoëfficiënt sterk afhankelijk van het gehalte hoogovenslak in het cement (figuur 3).



Figuur 3. Effect van het slakgehalte van hoogovencement op de diffusiecoëfficiënt van cementsteen voor chloor-ionen en natrium-ionen (wcf = 0,60; T = 21 °C; 3 mol/l NaCl--oplossing)

De grote weerstand van beton dan wel cementsteen op basis van hoogovencement tegen chloridenpenetratie kan niet uitsluitend worden verklaard door de grotere dichtheid van cementsteen bij toepassing van hoogovencement. Blijkbaar speelt hier nog een andere factor; dit is waarschijnlijk de binding van chloor-ionen door de cementsteen.

Chloridebinding

Uit onderzoek is gebleken dat de cementsteen op basis van hoogovencement grotere hoeveelheden chloriden adsorptief kan binden dan portlandcement. De verhouding tussen vrije en gebonden chloriden is niet constant, maar een functie van de cementsoort en de water-cementfactor. In principe geldt dat in beton alleen 'vrije' chloriden tot corrosie van betonstaal leiden; het gebonden chloride is ongevaarlijk.

Cementgehalte

Verhoging van het cementgehalte heeft een verminderde indringing van chloriden tot gevolg. Uit onderzoek is gebleken dat bij een toenemend cementgehalte, bij een constante water-cementfactor, de diffusiecoëfficiënt afneemt. Als chloriden van buiten indringen, wordt de indringing bepaald door de diffusie, die afhangt van de chloridenconcentratie enerzijds, en de permeabiliteit en het vermogen tot binden van chloriden in het beton (cementsteen) anderzijds. Doordat meer cement meer chloriden zal binden, remt een hoog cementgehalte de indringing. In het geval waarbij beton volgens de milieuclassificatie van NEN-EN 206-1 in aanraking komt met chloriden, mag het minimum cementgehalte niet kleiner zijn dan de minimale waarden zoals omschreven in de NEN 8005.

Water-cementfactor Verhoging van de water-cementfactor heeft een reductie van de indringing van chloor-ionen tot gevolg. Afhankelijk van het milieu waarbij er een kans is op corrosie door chloriden, mag de maximale water-cementfactor niet groter zijn dan de maximale waarden zoals omschreven in de NEN 8005.

Nabehandeling

Behalve het soort cement en de water-cementfactor, heeft de hydratatiegraad van het cement een belangrijke invloed op de indringing van chloriden. De hydratatiegraad wordt in belangrijke mate bepaald door de duur (en kwaliteit) van de nabehandeling. Het verdient aanbeveling om delen van kunstwerken, zoals brugdekken, voldoende lang af te dekken met folie of soortgelijke voorzieningen om uitdroging te voorkomen.

De wijze van nabehandeling en de minimale duur van de nabehandeling moet voldoen aan de eisen zoals omschreven in bijlage B van NEN 6722.

Literatuur

1. Betoniek 3/26, Roesten van wapening, juni 1976.
2. Betoniek 6/1, De rol van chloride, januari 1983.
3. Betoniek 6/13, Chloridepenetratie, maart 1984.
4. Betoniek 9/15, Kritisch chloridegehalte, mei 1993.
5. Betoniek 12/10, Nog twee jaar VBT, november/december 2001 (met bijlage 'NEN-EN 206-1').
6. CUR-rapport 92-7, Kritisch chloridegehalte in gewapend beton. CUR, Gouda, 1993.
7. NEN-EN 206-1, Beton - Deel 1: Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit. NEN, Delft, 2001.
8. NEN 8005, Nederlandse aanvulling op NEN-EN 206-1 Beton - Deel 1: Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit. NEN, Delft, 2004.
9. NEN 6722, Voorschriften Beton - Uitvoering, NEN, Delft, 2002.