



Verzinkt wapeningsstaal in betonconstructies

Een inleiding voor ontwerpers en bouwkundigen

Inhoud

Inleiding	1
De kosten van corrosie	2
Het thermisch verzinkproces	2
Roesten van onbehandeld wapeningsstaal	3
Carbonatatie	3
Corrosie door Chloriden	4
Levensduur van gewapend beton verlengen	4
Waarom is verzinkt wapeningsstaal zo doelmatig?	5
Vorming van de beschermende laag	5
Carbonatatieweerstand	5
Weerstand tegen corrosie door chloriden	6
Grensvlakbescherming	6
Minimale verstoring van de betonmassa	6
Opofferingsbescherming	6
Hechtsterkte	7
Corrosieprofiel van ongecoat wapeningsstaal versus verzinkt wapeningsstaal	7
Ontwerpvoordelen	8
Een verzinkte deklaag voor betonstaal specificeren	8
De kosten van thermisch verzinkt wapeningsstaal	9
Buigen, lassen, herstellen, handelingen, transport en opslag	9
Montage en afdekken	10
Combineren van onbehandeld en thermisch verzinkt wapeningsstaal	10
Redenen voor het toepassen van thermisch verzinkt wapeningsstaal	11
Referenties	12
Bronvermeldingen	12

Inleiding

Thermisch verzinken wordt al meer dan 100 jaar gebruikt als een optimale oplossing om de levensduur van betonstaal te verlengen. Het meest voorkomende vroege gebruik van thermisch verzinkt betonstaal was bij de bouw van betonnen watertanks waar thermisch verzinkte draad werd gebruikt om de tankwanden voor te spannen.

Vanaf de jaren 1950 werd het gebruik van thermisch verzinkt betonstaal in veel landen steeds gebruikelijker en tegen de jaren 1960 en begin 1970 werd een aanzienlijk tonnage betonstaal verzinkt, vooral voor gebruik bij de bouw van bruggen en snelwegen in de VS. In Australië is het meest bekende gebruik van thermisch verzinkt betonstaal de chevron vormige dakconstructie van het Sydney Opera House, geplaatst in 1963 en nog steeds intact, schoon en vrij van tekenen van corrosie.

De afgelopen 25 tot 30 jaar is er wereldwijd een gestage toename geweest in het gebruik van thermisch verzinkt betonstaal in een grote verscheidenheid aan betonconstructies en blootstellingsomstandigheden. Sinds 1995 wordt bijvoorbeeld al het betonstaal op brugprojecten van de New York Thruway Authority thermisch verzinkt. Veel bruggen in de Verenigde Staten worden periodiek getest op de staat van het verzinkte betonstaal dat werd gebruikt bij de oorspronkelijke constructie en van al deze bruggen is aangetoond dat ze vandaag de dag nog steeds in uitstekende staat verkeren.

In Europa werd verzinkt wapeningsstaal tot nu toe vooral gebruikt in bijzonder agressieve omgevingen, zoals direct aan de kust, in rioleringen, wegtunnels, enz. en om op maat gemaakte voorwerpen te maken voor specifieke projecten.

Naast deze toepassingen kan het gebruik van thermisch verzinkte wapening technische problemen oplossen, lichte en dunne ontwerpen realiseren en het architecturaal ontwerp verbeteren. Ondanks de vele voordelen wordt verzinkte wapening nog niet veel gebruikt. Dit komt omdat men zich nog weinig bewust is van deze voordelen: verzinkt wapeningsstaal kan niet alleen een zeer effectieve oplossing zijn voor klanten, het kan ook een voordeel zijn voor constructeurs en prefab producenten in economische, technische en milieutechnische opzichten.

Vandaag de dag wordt thermisch verzinkt betonstaal erkend als een kosteneffectieve oplossing voor het elimineren van de effecten van carbonatie en het aanzienlijk vertragen van het begin van chloride-geïnitieerde corrosie in vergelijking met ongecoat betonstaal in kust- en industriële omgevingen. Verzinkt betonstaal is ook bij uitstek geschikt voor buitengevels, verbindingen tussen prefab panelen en vloer- en dakelementen waar de afwezigheid van roestvlekken en afbladdering essentieel is.

Het voortdurende succes van constructies gebouwd met verzinkt betonstaal is voor een groot deel verantwoordelijk voor de groeiende interesse in het ontwerpen met thermisch verzinkt betonstaal.



De onlangs voltooide Mario M. Cuomobrug was het grootste brugproject in de geschiedenis van de staat New York. De nieuwe brug verving de vorige Tappan Zee Brug over de Hudson ten noorden van New York City.



Het brugdek van de Mario M. Cuomobrug bestaat uit bijna 6000 prefab panelen, elk 3,66 m lang en 6,7-13,7 m breed, voor de toegangsoverspanningen en 963 dekpanelen voor de hoofdo overspanning. De panelen worden samengevoegd door beton rond de uitstekende thermisch verzinkte stalen wapening te gieten. (Afbeelding met dank aan de New York State Thruway Authority)



De Saint-Nazaire brug werd gebouwd in de jaren 1970 en is nog steeds de langste brug in Frankrijk. Het grootste deel van de betonwapening was niet beschermd tegen corrosie en dit heeft geleid tot een uitgebreid programma van onderhoud en reparaties. Ongeveer 63 ton verzinkte stalen wapening werd gebruikt op zeer specifieke locaties - de flenzen van de T-balkuiteinden en de ter plaatse gegoten verbindingssplaten ter hoogte van de flenzen (zie foto hierboven). Reparaties waren niet nodig op die specifieke locaties waar de thermisch verzinkte wapening werd gebruikt.

De kosten van corrosie

Een in 2016 gepubliceerde studie toonde aan dat de wereldwijde kosten van corrosie in 2013 2,5 biljoen dollar (2,16 biljoen euro) bedroegen, wat overeenkomt met ongeveer 3,4 procent van het wereldwijde bruto binnenlands product (BBP). De studie, die de impact van corrosie en het beheer ervan op de reële economie onderzocht, toonde aan dat het toepassen van "best practices" om corrosieschade te voorkomen zou kunnen leiden tot jaarlijkse besparingen van 15-35 procent (324 tot 755 miljard euro).



De Mario M. Cuomobrug is een 5 km lange, 8-baans tuibrug met twee overspanningen die ontworpen is voor een minimale levensduur van 100 jaar met gebruik van verzinkte wapening.



Voorafgaand aan de keuze voor verzinkt betonstaal voor de Mario M. Cuomobrug ontwikkelde de New York Thruway Authority een corrosiebeschermingsplan om de blootstelling, degradatiemechanismen, ontwerp- en constructiedetails en levenscycluskosten vast te stellen.

Het thermisch verzinkproces

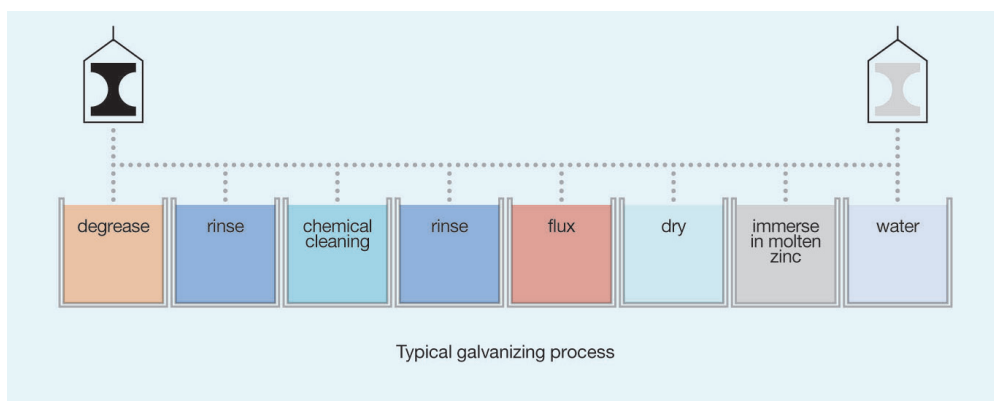
Het thermisch verzinkproces begint met het reinigen van het staaloppervlak door het onder te dompelen in een reeks voorbehandelingsbaden. Na de reiniging wordt het staal in een bad van gesmolten zink neergelaten. Het gesmolten zink reageert met het staal om de verzinkte deklaag te vormen (een metallurgische reactie). Stalen staven kunnen in batches worden verzinkt (bijvoorbeeld door het gebruik van speciale korven). Daarnaast wordt wapeningsnet dat wordt gebruikt om versterkingen te maken meestal aan een traversebalk gehangen en in het bad met gesmolten zink gedompeld.



Meer dan 27.000 ton verzinkt betonstaal zorgt voor de lange termijn duurzaamheid van de torens van de hoofdoverspanning, de pijlers van de aanloopoverspanning, de landhoofden en de wegdekpanelen van de Mario M. Cuomobrug.

Corrosie veroorzaakt aanzienlijke kosten voor de samenleving

Door de best practices toe te passen om corrosie te voorkomen, kan jaarlijks wereldwijd €324 tot €755 miljard worden bespaard.



Verzinken is het onderdompelen van schoon staal in een bad gevuld met gesmolten zink om een metallurgisch gebonden deklaag met een hoge duurzaamheid aan te brengen.

Roesten van onbehandeld wapeningsstaal

Door de sterk alkalische omgeving van beton kan standaard onbehandeld wapeningsstaal een stabiele, passieve ijzeroxidelag ontwikkelen op het oppervlak, die het staal beschermt tegen corrosie. Beton is echter een inhomogeen materiaal dat voornamelijk bestaat uit de hydratatieproducten van cement (cementpasta), zand en toeslagmaterialen. De inherente porositeit van uitgehard beton biedt een pad voor de diffusie van gasvormige en waterige stoffen die na verloop van tijd de passiviteit van het staal kunnen verminderen en corrosie kunnen initiëren. Corrosie van betonstaal in beton wordt geïnitieerd wanneer de beschermende oxidelaag op het oppervlak gedepasseerd wordt. Depassivering kan optreden door een van deze twee mechanismen:

1. Carbonatatie van het beton
2. Corrosie door chloriden.

Zodra corrosie van het betonstaal is gestart, beginnen zich corrosieproducten te vormen op het oppervlak van het betonstaal. Deze producten zijn aanzienlijk volumineuzer dan het staal (roest, dat een product is van ijzeroxidatie in wapeningsstaal, wordt gekenmerkt door een volume dat 7 keer groter is dan het volume van het verbruikte ijzer). Deze volumetoename van de staalcorrosie oefent aanzienlijke spanningen uit op het beton en veroorzaakt uiteindelijk de vorming en verspreiding van scheuren. Deze scheuren zijn op hun beurt een pad voor het snel binnendringen van agressieve stoffen in de richting van het wapeningsstaal, wat het roesten versnelt en schade veroorzaakt zoals delaminatie of afbrokkeling van de betondekking.

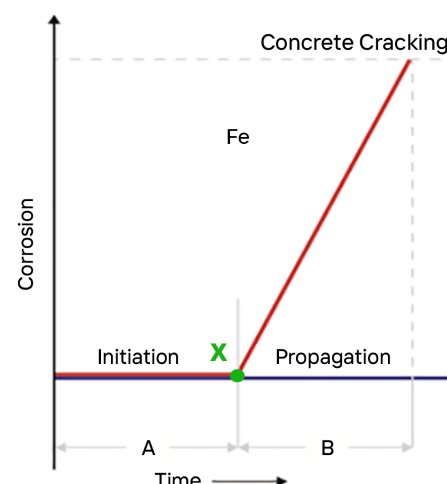
Het corrosieproces voor onbehandeld betonstaal wordt grafisch weergegeven in het aangepaste Tuutti-model hieronder, waarbij:

A. De aanvangsfase – het betonstaal blijft passief (tot het punt x).

B. De vermeerderingsfase – er treedt vermindering op van de passieve laag op het betonstaal en het staal corrodeert actief. Aan het einde van deze periode treedt scheurvorming en afbrokkeling van het beton op.

Het corrosieproces wordt meestal geïnitieerd door ofwel neutralisatie van het gebied rond het betonstaal, bv. carbonatatie, of activering van het oppervlak door sterk corrosieve anionen, bv. chloriden. De tijd tot het begin van corrosie wordt bepaald door de concentratie en de instroomsnelheid van binnendringende stoffen in de betondekking en door de drempelconcentratie die nodig is om corrosie te starten.

Schematisch model voor de corrosie van betonstaal in beton, naar Tuutti 1982



Wanneer betonstaal niet beschermd is, kan het volume roest tot 7x groter worden dan het volume ijzer dat door corrosie wordt verbruikt - wat leidt tot de vorming en uitbreiding van scheuren in beton



Scheuren en afbrokkelen van beton door corrosie van het betonstaal



Carbonatatie

Carbonatatie is een natuurlijk proces dat optreedt wanneer de hoge alkaliteit van het dekbeton geneutraliseerd wordt door een reactie met de in de atmosfeer aanwezig zijnde kooldioxide.

Na verloop van tijd migreert het carbonatatiefront door de betonmassa, waardoor de pH uiteindelijk daalt tot een bijna neutraal niveau (pH 7). Naarmate de pH van het beton daalt, wordt het wapeningsstaal in het beton gevoeliger voor roest.

Typische kenmerken van de carbonatatie van beton zijn:

- Carbonatatie treedt langzamer op bij diepere betondieptes
- De diepte van de carbonatatie hangt af van de doorlaatbaarheid van het beton en van scheuren, holten en poriën.
- Zodra de pH van het beton onder de 11,5 zakt, zal het wapeningsstaal beginnen te corroderen.
- Het effect en de snelheid van de neutralisatie is sterker wanneer zwaveldioxide (SO₂) en stikstofdioxide (NO₂) reageren met water om sterk zure oplossingen te vormen. Deze chemicaliën zijn in een hogere concentratie in het milieu aanwezig in met name industriële gebieden.

Op basis van metingen in het veld is de kwaliteit van het beton van cruciaal belang om de effecten van carbonatatie te verminderen. Testen hebben aangetoond dat:

- In bouwbeton van goede kwaliteit kan na 20 jaar blootstelling aan atmosferische omstandigheden tot 5-10 mm carbonatatie optreden (bijvoorbeeld bouwkundige elementen van bebouwing in een stedelijke omgeving).
- Bij beton van slechte kwaliteit treedt volledige carbonatatie van 200 mm dikke muurpanelen (aan beide zijden) op na 5 - 8 jaar (bijvoorbeeld goedkope volkshuisvesting).

Corrosie door chloriden

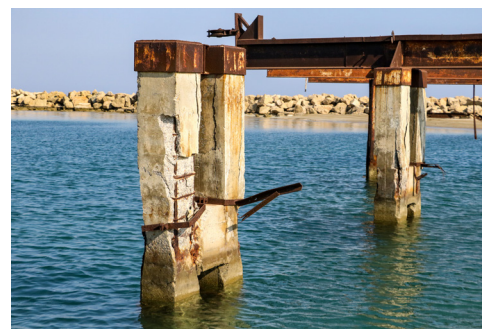
Chloride-gedreven corrosie is wereldwijd de belangrijkste oorzaak van corrosie van betonstaal en daaruit voortvloeiende schade aan gewapende betonconstructies. Chloride-ionen kunnen door het beton migreren en zich ophopen tot de niveaus die nodig zijn om depassivering van de beschermende film op het oppervlak van het betonstaal te veroorzaken, waardoor corrosie begint. De chloride-ionen activeren het oppervlak van het staal en vormen een anode waarbij het overblijvende gepassiveerde oppervlak de kathode vormt.

Chloride-ionen reageren met het ijzeroxide en vormen complexen die zich van het staal verwijderen en roest worden. Nieuw blootgelegde ijzeratomen vormen meer ijzeroxiden en zetten op deze manier het corrosieproces voort.

Chloriden komen het beton binnen via:

- Verontreinigde toeslagmaterialen, zeezand en hulpstoffen
- Brak of zout water gebruikt voor mengen en/of uitharden
- Blootstelling aan zee- en kustmilieus
- Gebruik van dooizout voor gladheidsbestrijding

Chloriden migreren na verloop van tijd door het beton door diffusie, waardoor de chlorideconcentratie aan het oppervlak van het betonstaal toeneemt. Een chloordrempel van 0,2 - 0,4% van het cementgehalte (of 0,6 kg/m³ beton) werd geïdentificeerd als het bereik waarbinnen onbekleed wapeningsstaal kan beginnen corroderen.



Degradatie van wapening en beton in een omgeving met veel chlorides (aan de kust)

Corrosie door chloriden is de belangrijkste oorzaak van corrosie van betonstaal

Levensduur van gewapend beton verlengen

De noodzaak om rekening te houden met duurzaamheid in ontwerp, constructie en onderhoud om vroegtijdige verslechtering van betonconstructies te voorkomen, wordt alomerkend.

De duurzaamheidsplanning bestaat uit de selectie en het gebruik van materialen, ontwerpprocessen en constructiemethoden die erop gericht zijn om de door de klant beoogde levensduur van de constructie te garanderen en vroegtijdige en onverwachte onderhoudsinterventies te voorkomen.

Een technische analyse kan worden gebruikt om de aard en de snelheid van de verslechtering van materialen onder bepaalde macro- en micro-omgevingsomstandigheden te bepalen en het ontwerp, de constructie en het onderhoud van een betonconstructie tijdens de levensduur op basis hiervan te plannen.

Er zijn typisch drie manieren om roesten van betonstaal te voorkomen:

1. Het beton wijzigen

- Aanvullende cementgebonden toevoegingen (bijvoorbeeld vlieg-as, slakken en silica fume)
- Impregneren (bijvoorbeeld polymeren)
- Inhibitoren (bijvoorbeeld nitraten)
- Barrièrelagen (bijvoorbeeld membranen en verven)

2. Het betonstaal wijzigen

- Oppervlaktebehandeld betonstaal (bijvoorbeeld verzinkt staal)
- Corrosiebestendige metalen (bijvoorbeeld roestvast staal)
- Niet-metalen materialen (bijvoorbeeld vezelversterkte polymeer en glasvezelversterkte polymeer)
- Kathodische bescherming (bijvoorbeeld opgedrukte stroom en opofferingsanoden)

3. De betondekking verhogen

Het verhogen van de betondekking zorgt voor een verlenging van de tijd die het carbonatatiefront nodig heeft om het wapeningsstaal te bereiken en van de tijd die nodig is om de chlorideconcentratie aan het oppervlak van het wapeningsstaal een kritisch niveau te laten bereiken.

Er is echter een paradox in deze benadering, want hoe dikker de betondekking, hoe groter de piekwaarde van de uitzettingsdruk door corrosie van het betonstaal en hoe groter vervolgens de omvang van eventuele scheuren.

Deze drie methoden kunnen afzonderlijk worden gebruikt of in combinatie met andere methoden. Elke methode heeft zijn eigen voor- en nadelen. De gebruikte aanpak moet worden ontwikkeld op basis van de individuele situatie, de omgeving en de vereiste levensduurverwachting van het object.



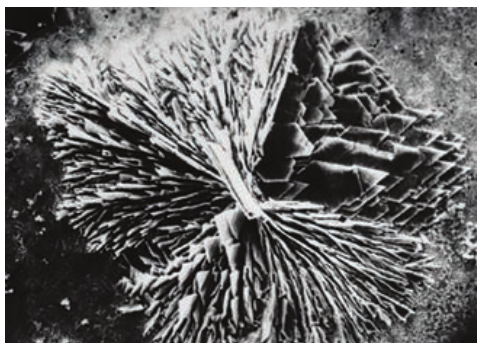
De drijvende pontons in de jachthaven van Sandringham, Victoria (Australië) maakten gebruik van thermisch verzinkte versteviging

Het verzinken biedt langdurige corrosiebescherming en maakt een dunnere betondekking mogelijk - wat middelen en kosten bespaart

Waarom is verzinkt wapeningsstaal zo doelmatig?

Vorming van de beschermende laag

Net als bij onbehandeld betonstaal vormt ook verzinkt betonstaal een beschermende passiveringslaag in beton. Zink in sterk alkalische oplossingen (pH 12,5 - 13,2) wordt gepasseiveerd door de vorming van een laag aanhechtende kristallen van calciumhydroxyzinkaat - $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Deze reactie begint direct bij contact met de natte cementoplossing en vormt een oppervlaktelaag die het zink stabiliseert en isoleert van de omgeving. De eindproducten van de passivering zijn CaHZn -kristallen op het oppervlak van het verzinkte betonstaal.

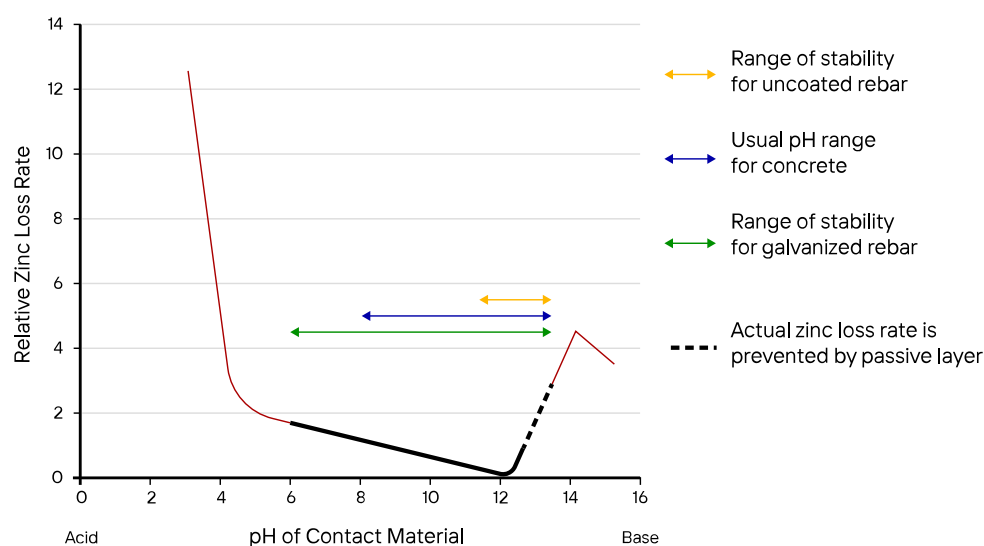


CaHZn kristallen na 24 uur in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oplossing van pH 12,6

Bij het vormen van de passieve laag wordt ruwweg 10 μm van de oorspronkelijke zuivere zinkbuitenlaag van de verzinkte deklaag verbruikt. Dit is een klein deel van de totale laagdikte. De reactie met zink stopt zodra het beton verhardt en na 28 dagen, wanneer het beton zijn normale hechting en druksterkte heeft ontwikkeld, resulteert de vorming van de calciumhydroxyzinkaatlaag op het thermisch verzinkt wapeningsstaal dat een hogere hechtsterkte en minder lastgeïnduceerde slip heeft dan gelijkwaardig onbehandeld wapeningsstaal.

De eigenschappen van deze passiveringslaag zijn essentieel voor de doelmatigheid van thermisch verzinkt betonstaal in beton, met name de chemische stabiliteit bij neutrale pH en bij hoge chlorideconcentraties.

Verzinkt betonstaal ontwikkelt een hogere hechting dan ongecoat betonstaal



Het bereik van pH-stabiliteit van betonwapening

Carbonatieweerstand

Een thermisch verzinkte deklaag heeft een zeer lage corrosiesnelheid over een breed bereik van pH-waarden (pH 6 - 12,5). Hierdoor blijft thermisch verzinkt betonstaal stabiel als de pH-waarde van het beton daalt door carbonatatie tijdens de levensduur. Daarentegen is onbehandeld betonstaal slechts stabiel binnen een klein bereik (pH 11,5 - 13,2) en zal het beginnen te corroderen zodra de pH-waarde van het beton onder de 11,5 zakt. In beton met een pH tussen 12,5 en 13,2 wordt het thermisch verzinkt betonstaal beschermd door de vorming van een passieve laag van calciumhydroxyzinkaat en dit voorkomt een hoog zinkverlies in het sterk alkalische milieu.

Na verloop van tijd migreert het carbonatatiefront door de betonmassa, waardoor de pH uiteindelijk daalt tot bijna neutrale waarden (pH 7). Zoals de figuur hiernaast illustreert, wordt verzinkt wapeningsstaal dus volledig ongemoeid gelaten door de carbonatatie van beton.

Weerstand tegen corrosie door chloriden

Verzinkte wapening heeft een hogere weerstand tegen chlorideaanval dan onbehandelde wapening.

Recent onderzoek over dit onderwerp (Jaśniok, Sozańska, Kołodziej en Chmiela, 2020) wees uit dat: *"Resultaten verkregen uit corrosie (LPR, EIS) en structurele (SEM, EDS) tests op de monsters van beton versterkt met staal B500SP toonden een zeer gunstig effect aan van verzinkte deklagen op wapening door een effectieve bescherming te bieden tegen corrosie in een chlorideomgeving"*.

Een door de industrie voorgestelde chloridengrens voor onbekleed betonstaal is 0,06% van het gewicht van het beton, gebaseerd op een kans van 20% op het initiëren van corrosie. Verzinkt betonstaal kan chlorideconcentraties verdragen die veel hoger liggen dan de concentraties die corrosie veroorzaken bij onbekleed betonstaal, vanwege

de stabiliteit van de calciumhydroxyzinkafilm. Hoewel er geen wereldwijde overeenstemming is, toont een literatuurstudie over dit onderwerp aan dat de chloordrempel van verzinkt betonstaal 2 tot 6 keer hoger ligt dan die van onbekleed betonstaal. In het algemeen wordt een conservatieve waarde voor de kritische chloordrempel voor verzinkt betonstaal aangenomen van 2 tot 2,5 keer hoger dan voor onbekleed betonstaal.

Bovendien is de snelheid van chloordiffusie door beton niet constant, het vertraagt in de loop van de tijd, dus in praktische termen betekent de hogere kritische chloordrempel van verzinkt betonstaal dat de tijd tot aanvang van corrosie veel groter is dan voor onbehandeld betonstaal - ten minste twee keer en in sommige rapporten tot 10 keer langer.

Omdat chloride de belangrijkste oorzaak is van schade aan gewapend beton in de wereldwijde infrastructuur, moet er zorgvuldig rekening mee worden gehouden in duurzaamheidsplannen. Thermisch verzinken is een eenvoudige en kosteneffectieve methode om de chloridebestendigheid, en dus de duurzaamheid, van betonconstructies te verbeteren, en de prestaties ten opzichte van onbehandeld wapeningsstaal kunnen worden gemodelleerd met behulp van conventionele chloridediffusiemodellen.

Een belangrijk feit om op te merken is dat grensbepalende chloordiffusiemodellen alleen de tijd tot corrosie-aanvang modelleren, die onafhankelijk is van de dikte van de verzinkte deklaag. Wanneer de vermeerderingsfase van corrosie in beschouwing wordt genomen, waarin de verzinkte deklaag langzamer corrodeert dan staal, wordt de duurzaamheid verder verhoogd door de dikke verzinkte deklaag.

Grensvlak bescherming

Een ander voordeel van de zinklaag op verzinkt betonstaal is dat het thermisch verzinken zorgt voor een volledige bedekking van alle oppervlakken. Deze metallurgisch gebonden barrièrebescherming fungeert als een extra bescherming tussen staal en de atmosfeer. In combinatie met de uitstekende slijtvastheid en taaiheid van de deklaag is dit ideaal voor het beschermen van betonstaal tijdens het transport naar de bouwplaats en de constructiefase van een project.

Minimale verstoring van de betonmassa

Als corrosie-aanvang van de verzinkte deklaag optreedt, komt het corrosieproces in de vermeerderingsfase. De resulterende zinkcorrosieproducten zijn fijn en poederachtig en zetten in volume slechts tot 1,3 keer het oorspronkelijke zinkvolume uit (vergeleken met onbekleed betonstaal dat door corrosie tot 7 keer het oorspronkelijke staalvolume uitzet).

De zinkcorrosieproducten zijn ook beter oplosbaar in het alkalische poriewater en diffunderen weg van het wapeningsstaal en in de betonsamenstelling, in tegenstelling tot ijzercorrosieproducten die pas van het wapeningsstaal migreren nadat het beton is

gebarsten. Dit voorkomt de opbouw van interne druk die leidt tot het scheuren en afsplinteren van beton.

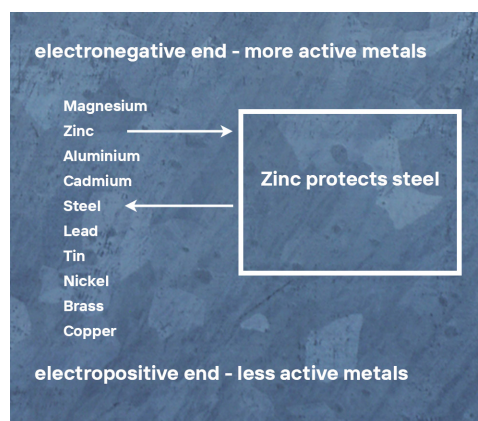
Bovendien vermindert de toevoeging van microscopische corrosieproducten aan de betonmatrix de doorlaatbaarheid ervan door poriën en holtes op te vullen, waardoor de toevoer van agressieve stoffen van het betonoppervlak naar het wapeningsstaal vertraagd wordt. Het resultaat van dit proces is een aanzienlijke verlenging van de tijd voor de vermeerderingsfase van corrosie en een overeenkomstige vertraging van de tijd tot het begin van scheurvorming in het beton.

Opofferingsbescherming

De spanningsreeks van metalen is een lijst van metalen en legeringen gerangschikt volgens hun relatieve potentiaal in verschillende omgevingen. De afbeelding rechts toont een reeks metalen gerangschikt in volgorde van elektrochemische activiteit in zeewater (de elektrolyt). De metalen zijn gerangschikt van boven naar beneden volgens hun opofferingscapaciteit; metalen bovenaan de schaal bieden kathodische- of opofferingsbescherming aan metalen onderaan.

Zink is anodisch voor staal. Daarom zal de verzinkte deklaag kathodische bescherming bieden aan blootgesteld staal. Wanneer zink en staal met elkaar worden verbonden in de aanwezigheid van een elektrolyt, wordt het zink langzaam verbruikt terwijl het staal wordt beschermd. De opofferende werking van zink biedt bescherming aan het staal in geval van schade tijdens ruwe behandeling of montage op de bouwplaats.

Zink beschermt staal

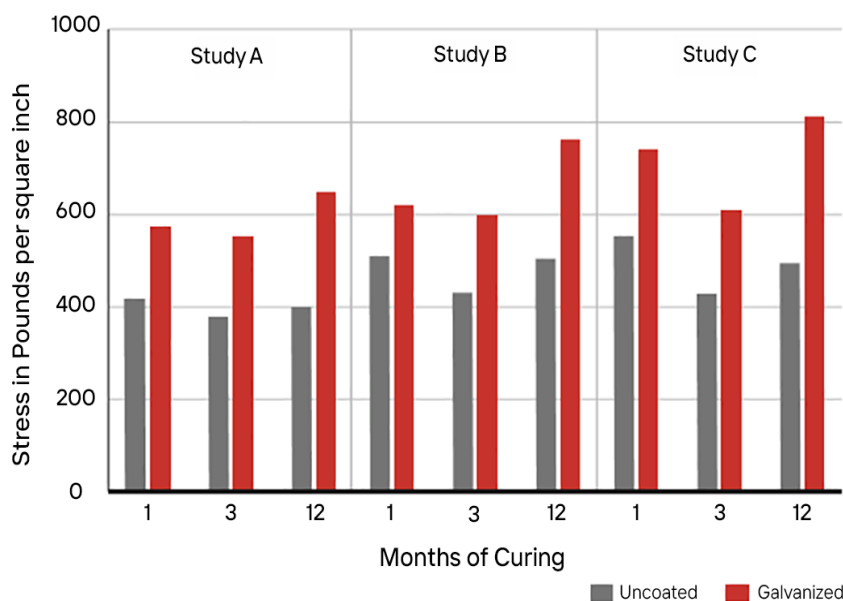


Zink in de spanningsreeks

Hechtsterkte

Er is uitgebreid bewijs van de superieure hechtsterkte-eigenschappen van verzinkt betonstaal ten opzichte van onbehandeld betonstaal.

De gevormde hechtsterkte is nauw verbonden met de vorming van de passieve calcium hydroxyzinkaat-laag en, hoewel bij versnelde testen is gerapporteerd dat de hechtsterkte van verzinkt betonstaal achterblijft bij die van onbekleed betonstaal, duurt dit effect alleen de eerste 1 - 2 weken en houdt het verband met de initiële reactie van zink op de sterk alkalische omstandigheden. Na 28 dagen, wanneer het beton zijn normale hechting en druksterkte heeft ontwikkeld, zal het verzinkt betonstaal een hogere mate van hechting ontwikkelen in vergelijking met onbehandeld betonstaal. Dit komt door de neerslag van de calciumhydroxyzinkaatfilm op het grensvlak tussen het verzinkte wapeningsstaal en het beton.



Vergelijking van de hechtsterkte van onbehandelde en verzinkte staven (Bron: Universiteit van Californië)

Corrosieprofiel van onbehandeld betonstaal versus verzinkt wapeningsstaal

Het aangepaste schema hieronder toont de prestaties van verzinkt betonstaal in vergelijking met ongecoat betonstaal.

De hogere chloordrempel van verzinkt betonstaal en zijn immuniteit voor de effecten van carbonatatie vertragen het begin van corrosie-aanvang (verschuift punt x naar punt y) van het corrosieproces. De barrièrebescherming die zink biedt, in combinatie met de minimale verstoring van de zinkcorrosieproducten, dienen om de vermeerderingsfase van het proces te verlengen.

Elke corrosiefase wordt hieronder beschreven:

A. De aanvang fase - de periode waarin het beton geleidelijk wordt blootgesteld aan corrosieve producten (chloriden / carbonatatie) en het onbeklede wapeningsstaal passief blijft (tot het punt x). De tijd tot aanvang van corrosie kan worden gekwantificeerd door het gebruik van grensbepalende chloordiffusie- en carbonatatiemodellen (alleen vereist voor onbehandeld wapeningsstaal) die gebaseerd zijn op de tweede wet van Fick.

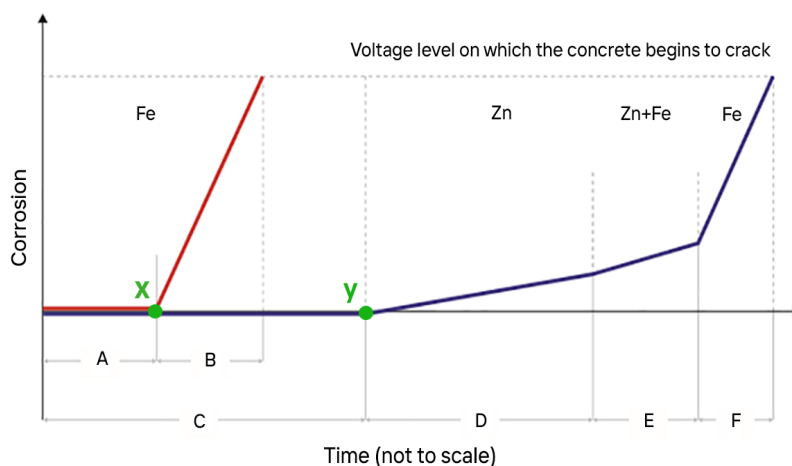
B. De vermeerderingsfase - Vernietiging van de passiveringslaag op het onbeklede wapeningsstaal en corrosie van het wapeningsstaal tot de aanvaardbare limiet van betonaantasting. Aan het einde van deze periode treedt scheurvorming en afbrokkeling van het beton op.

C. De levensduur van de verzinkte passiveringslaag. De aanvangfase van corrosie wordt verlengd door de verhoogde tolerantie voor chlorideaanval en het volledig vermijden van depassivering door carbonatatie van het beton.

D. De periode van bescherming van het verzinkt betonstaal tegen roest omdat chloriden een klein deel van de zuivere zinklaag op het staaloppervlak aantasten en corrosieproducten van het betonstaal weg diffunderen.

E. De periode van extra bescherming waar corrosie het oplossen van de FeZn-legering veroorzaakt.

F. In dit stadium is de verzinkte deklaag volledig verbruikt en wordt de corrosiesnelheid van het betonstaal identiek aan die van het blootliggende onbeklede betonstaal in stadium B - maar in dit stadium heeft de verzinkte deklaag zijn werk gedaan en is de tijd tot het begin van betonscheuren aanzienlijk verlengd.



Schematisch model voor de corrosie van verzinkt betonstaal in beton, naar Tuutti 1982

Ontwerpvoordelen

Een thermisch verzinkte deklaag op betonstaal zorgt voor een aanzienlijke verhoging van de duurzaamheid van staalgewapende betonconstructies. De vorming van een passieve calciumhydroxyzinkaat film op het verzinkt betonstaal verhoogt de kritische chloordrempel van het betonstaal aanzienlijk, waardoor de tijd tot het initiëren van corrosie aanzienlijk wordt vertraagd. Deze vertraging in de aanvang van corrosie kan gekwantificeerd worden met behulp van conventionele grensbepalende chloridediffusiemodellen gebaseerd op de tweede wet van Fick.

De tijd tot aanvang van corrosie wordt verder verlengd omdat verzinkt betonstaal immuun is voor de effecten van carbonatatie. Als het verzinkt betonstaal gedepasseerd wordt, zijn de resulterende zinkcorrosieproducten veel minder volumineus dan de ijzercorrosieproducten die gevormd worden op onbekleed betonstaal en veroorzaken dus minimale verstoring van de betonmassa. Dit voorkomt het ontstaan van interne druk die leidt tot scheuren en afbrokkeling van beton.

De toevoeging van de microscopische zinkcorrosieproducten aan de betonmatrix vermindert de doorlaatbaarheid ervan door poriën en holtes op te vullen, waardoor de toevoer van agressieve stoffen van het betonoppervlak naar het wapeningsstaal vertraagd wordt. Het resultaat van dit proces is een aanzienlijke verlenging van de tijd voor de vermeerderingsfase van corrosie en een overeenkomstige vertraging van de tijd tot het begin van scheurvorming in het beton.



Thermisch verzinkte, met staal versterkte betonnen steunbalken voor de balkons van een elegant appartement in Genua. Er werd gekozen voor verzinkt betonstaal om de draagbalken van de balkons zo goed mogelijk te beschermen tegen smog, regen, vorst en vocht. (Afbeeldingen met dank aan Prefabbricati Torti di Pietro e Lino Torti snc)

Een thermisch verzinkte deklaag zorgt voor een aanzienlijke verhoging van de duurzaamheid van gewapende betonconstructies

Een verzinkte deklaag voor betonstaal specificeren

Verzinkt betonstaal wordt gespecificeerd volgens EN 10348:2024 (Staal voor het versterken van beton - Producten van verzinkt wapeningsstaal). EN 10348 geeft eisen voor verzinkt betonstaal producten die zijn vervaardigd van staven die hebben voldaan aan de eisen van EN 10080.

De vereisten voor het verzinken van de staven zijn in overeenstemming met de internationale norm voor discontinu thermisch verzinken - EN ISO 1461, met de uitzondering dat de vereisten voor de deklaagdikte voor betonstaalproducten welke specifiek zijn gedefinieerd als volgt in de tabel rechts.

EN 10348 garandeert ook dat de geometrie van de ribben (ribhoogte of indrukdiepte) voldoende behouden blijft na het verzinken. Om mogelijke effecten op de mechanische eigenschappen te vermijden, stelt de norm minimale buigdiameters in voor staven die gebogen worden voor het verzinken.

Eisen voor deklaagdikte volgens EN 10348:2024

Staaldiameter (mm)	Massa deklaag (g/m ²)	Dikte deklaag (μm)
> 6	610	85
≤ 6	505	70

De kosten van verzinkt betonstaal



Verzinkte wapening is gebruikt voor de prefab balkons van wit beton in plantenbakmodel voor het Zac Seguin woonproject in het westen van Parijs. Deze oplossing werd gekozen om ervoor te zorgen dat het uiterlijk van de witte prefab betonnen elementen na verloop van tijd geen roestvlekken kreeg. Het gebruik van thermisch verzinkte wapening maakte het ook mogelijk om de betondekking te verminderen om een beter en dunner ontwerp mogelijk te maken. (Afbeeldingen met dank aan Aldric Beckmann Architectes/ Françoise N'Thépe Architecture & Design.Paris)



De totale kostenpost voor het gebruik van verzinkt wapeningsstaal in betonconstructies hangt grotendeels af van de mate waarin het in wordt gebruikt. Het is bijvoorbeeld zelden nodig om de structurele kern of interne elementen van een hoogbouw of de diep ingebedde onderdelen van grote landhoofden en funderingen te verzinken. In deze situaties kan het alleen nodig zijn om verzinkt betonstaal te gebruiken aan het oppervlak van blootgestelde elementen of daar waar funderingen kunnen worden aangetast door agressief of fluctuerend grondwater.

In de bouwsector wordt geconstateerd dat de kosten van het verzinken de totale kosten van de betonwapening met ongeveer 6-10% verhogen, afhankelijk van de grootte en het type van het gebruikte betonstaal, de verzinkingsprijs en de hoeveelheid staal per kubieke meter beton.

Gemiddeld bedragen de kosten van het betonstaal niet meer dan ongeveer 25% van de totale kosten van het gestorte beton. Als je bedenkt dat de kosten van het betonskelet en de buitenschil van een gebouw normaal gesproken slechts ongeveer 25-30% van de totale bouwkosten uitmaken, dalen de extra kosten van het verzinken tot 1,5-3,0% van de totale bouwkosten.

Deze toeslag vermindert tot slechts 0,5-1,0% als het verzinken beperkt blijft tot oppervlaktepanelen. Afgezet tegen de totale projectkosten of de uiteindelijke verkoopprijs worden de extra kosten van verzinken erg klein, vaak niet meer dan 0,1-0,2%.

Professor Richard Weyers van de Virginia Tech University heeft een onderzoek uit 2017 geanalyseerd over de verspreiding van chloride in betondekken en de effecten daarvan op de levensduur in Virginia, VS, voor betonstaal met epoxycoating, verzinkt betonstaal en 316LN roestvast staal. De totale huidige kosten en de levenscycluskosten laten zien dat verzinkt betonstaal de meest kosteneffectieve bescherming biedt voor gewapende brugdekken met een levensduur van 100 jaar.

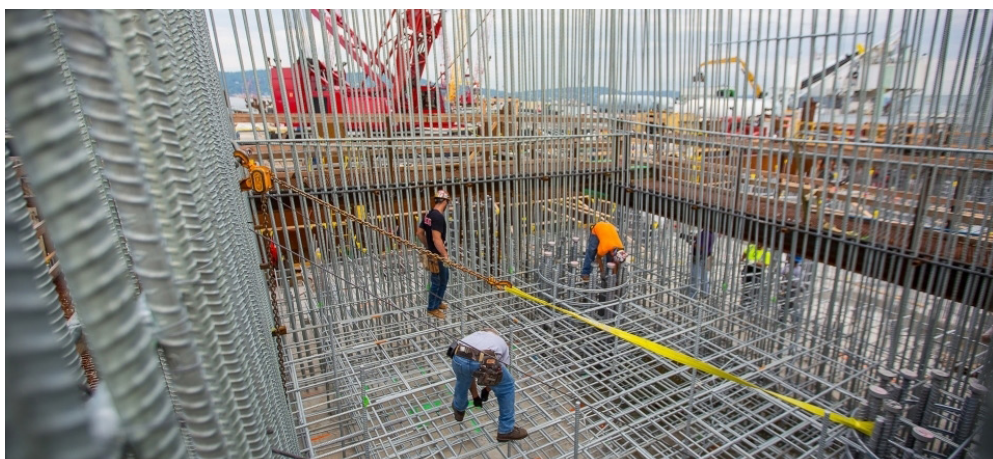
Wanneer de kosten en gevolgen van corrosieschade aan een gewapend betonnen gebouw worden geanalyseerd, zijn deze extra kosten van het verzinken een zeer kleine investering voor superieure corrosiebescherming op lange termijn.

Buigen, lassen, herstellen, handelingen, transport en opslag

Richtlijnen en eisen voor buigen, lassen, reparatie en andere verwerkingsaspecten worden gegeven in EN 10348:2024.

Door de verbeterde duurzaamheid van de verzinkte deklaag is er geen speciale behandeling of zorg nodig bij het transport van verzinkt betonstaal, maar enkele aanbevelingen voor transport zijn:

- Het gebruik van kettingen, staalkabels of kabels om te tillen is aanvaardbaar;
- Bundels moeten op meerdere punten worden opgetild;
- Het gebruik van een hijsbalk wordt aanbevolen om onnodige slijtage van staaf tot staaf te voorkomen bij langere bundels;
- Er is geen speciale positionering nodig, hoewel het betonstaal en het gaas zo gestapeld moeten worden dat regenwaterafloop en luchtstroming mogelijk moet zijn om witte vlekken door natte opslag te voorkomen;
- Omdat de deklaag niet gevoelig is voor UV-licht kan hij overal op de bouwplaats worden opgeslagen.



Montage en Afdekken

Door de uitstekende slijtvastheid van verzinkt betonstaal zijn er geen speciale eisen nodig bij de montage ter plaatse. Dit, in combinatie met de verbeterde hechtsterkte van verzinkt betonstaal, betekent dat er geen extra staal geïnstalleerd hoeft te worden (sommige beschermende deklagen vereisen overlappenden die nog eens 20% - 50% groter zijn in vergelijking met ongecoat betonstaal).

Net als bij ongecoat betonstaal zijn er geen specifieke weersomstandigheden vereist voor de installatie en dankzij de deklaag is verzinkt betonstaal veel netter om mee te werken. Omdat de deklaag metallurgisch gebonden is aan het staal, ontstaat er ook weinig schade tijdens de installatie.

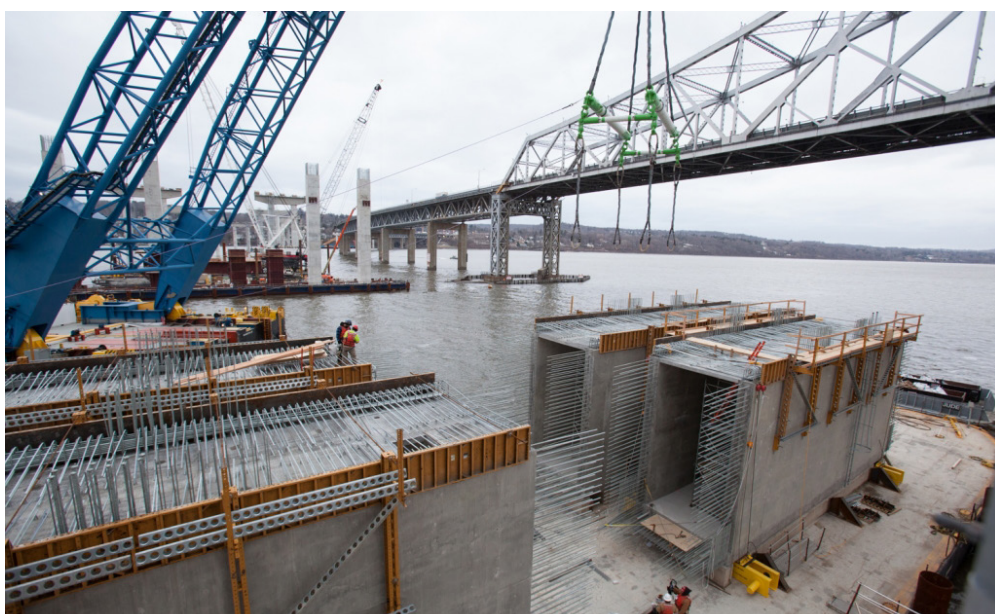


Combineren van onbehandeld en thermisch verzinkt wapeningsstaal

In beton zullen naar verwachting geen corrosieve reacties optreden tussen onbehandeld en verzinkt betonstaal zolang de twee metalen passief blijven. Om ervoor te zorgen dat dit het geval is, mag de betondekking over onbehandeld betonstaal en verbindingen niet minder zijn dan de dekking die nodig is om onbehandeld betonstaal alleen te beschermen onder vergelijkbare omstandigheden.

Wanneer thermisch verzinkt betonstaal wordt gebruikt, is het in de praktijk het beste gebleken dat al het staal dat in contact komt met het betonstaal verzinkt is, inclusief binddraad, inzetstukken en staven of dat niet-metalen of met kunststof beklede binddraad en staven worden gebruikt. Als thermisch verzinkt betonstaal in contact wordt gebracht met onbehandeld betonstaal in corrosiegevoelige gebieden, zal het verzinkte staal het onbehandelde staal beschermen, wat kan leiden tot een kortere levensduur van de deklaag in de buurt van het contactgebied.

Als contact met onbekleed betonstaal onvermijdelijk is en een probleem vormt, kan polyethyleen en isolatieband worden gebruikt om de twee metalen elektrisch te isoleren. Verzinkte binddraad of plastic klemmen moeten worden gebruikt bij het monteren of installeren van verzinkt betonstaal en steunen voor staven moeten ook van verzinkt staal, plastic of een ander inert materiaal zoals metselwerk zijn. Als er mechanische koppelingen worden gebruikt, moeten deze ook verzinkt zijn.



De 43 paar betonnen pijlers van de Mario M. Cuomobrug worden versterkt door korven van verzinkt wapeningsstaal.

Redenen voor het toepassen van thermisch verzinkt wapeningsstaal

1 Verzinkt betonstaal wordt gepassiveerd in nat beton door de vorming van een aanhechtende film van calciumhydroxyzinkaat. Door de vorming van deze film wordt de **hechtsterkte tussen het verzinkte betonstaal en het beton verhoogd**.

2 Verzinkt betonstaal is stabiel over een breed pH-bereik en wordt **volledig ongevoelig voor carbonatatie van beton**.

6 In toepassingen met blootstelling aan carbonatatie biedt **verzinkt betonstaal de mogelijkheid om een dünnere bedekking te gebruiken** in vergelijking met onbehandeld betonstaal, terwijl dezelfde duurzaamheid wordt bereikt. Er zijn geen speciale eisen voor het ontwerp van beton met verzinkt wapeningsstaal en er is geen extra staal of een extra overlap nodig.

7 Als verzinkt betonstaal gedepassiveerd raakt, zal zink langzamer corroderen dan ijzer en de zinklaag vormt een barrière tegen ijzercorrosie. In tegenstelling tot ijzer zullen zinkcorrosieproducten uit de thermisch verzinkte deklaag migreren en door het verminderen van de porositeit de binnendringing van chloride vertragen. Het relatief kleinere volume van zinkcorrosieproducten in vergelijking met ijzer vermindert de uitzettingsdruk die door het corrosieproces wordt gegenereerd, waardoor **de grootte van eventuele scheuren wordt beperkt**.

8 Verzinkt betonstaal is een effectieve manier om de duurzaamheid van een betonconstructie te garanderen tegen **veel lagere kosten dan het gebruik van roestvrijstaal wapening**.

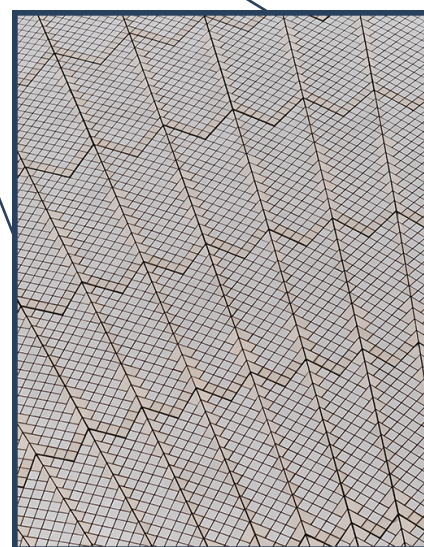
10 In tegenstelling tot epoxycoatings biedt een verzinkte deklaag op wapeningsstaal **barrièrebescherming, een verbeterde hechtsterkte, een superieure passieveerlaag en fungeert als een opofferingsanode mocht het wapeningsstaal onder de coating bloot komen te liggen. Het heeft een uitstekende slijtvastheid, wordt niet aangetast door UV-licht en heeft geen speciale vereisten voor opslag, transport, handelingen en bevestiging**.

12 **Verzinken is een duurzame optie.** Er is een milieuproductverklaring (EPD) beschikbaar voor verzinkt staal en aan het einde van de levensduur van de constructie kan de resterende zinklaag samen met het staal worden gerecycled. De kleine milieu-impact van het verzinkproces wordt gecompenseerd door de enorme CO₂-besparing die gepaard gaat met de verbeterde duurzaamheid van de betonconstructie met verzinkt betonstaal.

3 Normaal gesproken heeft verzinkt betonstaal een 2 tot 2,5 keer hogere drempel voor chlorideaanslag in vergelijking met ongecoat betonstaal - dit verdubbelt de tijd tot het betonstaal depassiveert en corrosie begint. **Verzinkt wapeningsstaal verlengt de levensduur van de betonconstructie 4 tot 5 keer** in vergelijking met onbehandeld wapeningsstaal.

4 **De tijd tot het initiëren van corrosie van verzinkt wapeningsstaal in beton kan modelmatig worden bepaald** met behulp van conventionele industriële chloordiffusiemodellen gebaseerd op de tweede wet van Fick.

5 Het passieve gedrag van verzinkt wapeningsstaal in beton maakt het geschikt voor gebruik in agressieve omgevingen en is bij uitstek geschikt voor buitengevels, verbindingen van prefabelementen en buitenschilpanelen, kortom **voor elke toepassing waar carbonatatie of het binnendringen van chloride een probleem vormt**.



De betegelde dakelementen van het Sydney Opera House werden vervaardigd met gebruik van thermisch verzinkt betonstaal.

Referenties

American Galvanizers Association, Hot-Dip Galvanized Reinforcing Steel: A Specifiers Guide, AGA, Centennial, CO, USA, 2012.

Concrete Institute of Australia, The Use of Galvanized Reinforcement in Concrete, Current Practice Note 17, 2008, Concrete Institute of Australia, Sydney.

Concrete Institute of Australia (2014), "Concrete Durability Series: Z7/05 Durability Modelling", Sydney.

Concrete Institute of Australia (2018), "Concrete Durability Series: Z7/02 Durability Exposure Classifications", Sydney.

ILZRO, Galvanized Reinforcement for Concrete – II, 1981, International Lead Zinc Research Organization, NC, USA

Mariusz Jaśniok, Maria Sozańska, Jacek Kołodziej and Bartosz Chmiela, "A Two-Year Evaluation of Corrosion-Induced Damage to Hot Galvanized Reinforcing Steel B500SP in Chloride Contaminated Concrete", 2020

NACE International, "International Measures of Prevention, Application and Economics of Corrosion Technology (IMPACT)", CORROSION CONFERENCE 2016, Vancouver, Canada

Tuutti, K. (1982) "Corrosion of steel in concrete". Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm

Yeomans S R (Editor), Galvanized Reinforcing Steel in Concrete, Elsevier UK, December 2004, ISBN 008044511

Yeomans, S R (2004), "Chapter 1 – Galvanized Steel in Concrete: An Overview", in Yeomans, S R (ed.) Galvanized Steel Reinforcement in Concrete, Elsevier Science, pp. 1–7.

Zhao Y, Jin W, Damage Analysis and Cracking Model of Reinforced Concrete Structures with Reinforcing steel Corrosion in Steel Corrosion-Induced Concrete Cracking, 2016

Dankwoord

Fotocredits

Omslag, pagina's 1, 2, 9, 10:

Pagina's 3, 4, 5, 7:

Pagina 3, 4:

Pagina 11:

New York Thruway Authority

Galvanizers Association of Australia

Shutterstock.com

stock.adobe.com

Onze dank gaat uit naar de Galvanizers Association of Australia voor hun hulp bij de voorbereiding van dit document.

Meer informatie over verzinkte wapening voor beton:

Zinkinfo Benelux

Smederijstraat 2

4814 DB Breda

The Netherlands

www.zinkinfobenelux.com

Email: info@zinkinfobenelux.com



European General Galvanizers Association

14-16 Reddicroft

B73 6AZ

United Kingdom

www.egga.com

Email: mail@egga.com

