

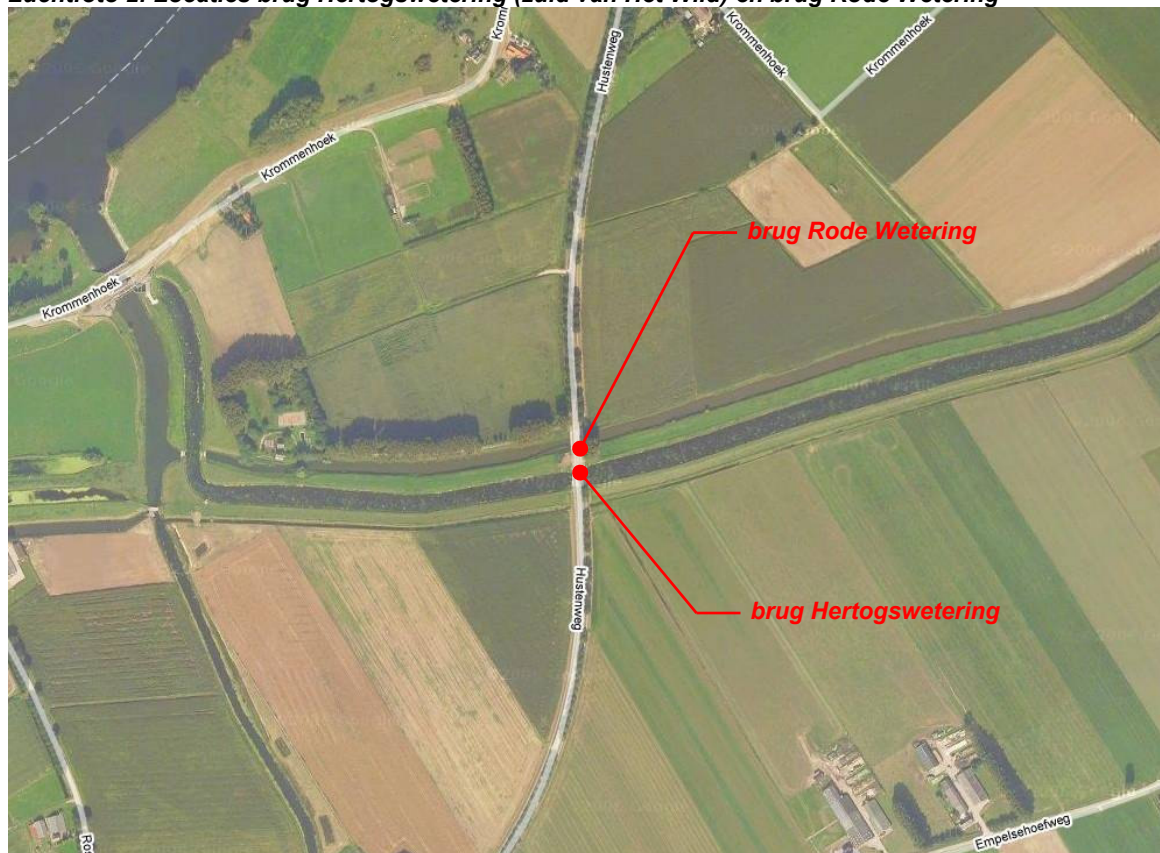
Bijlage 1

Geografische ligging kunstwerken

Luchtfoto 1: Locaties brug Nieuwvliet en brug Hoefgraaf



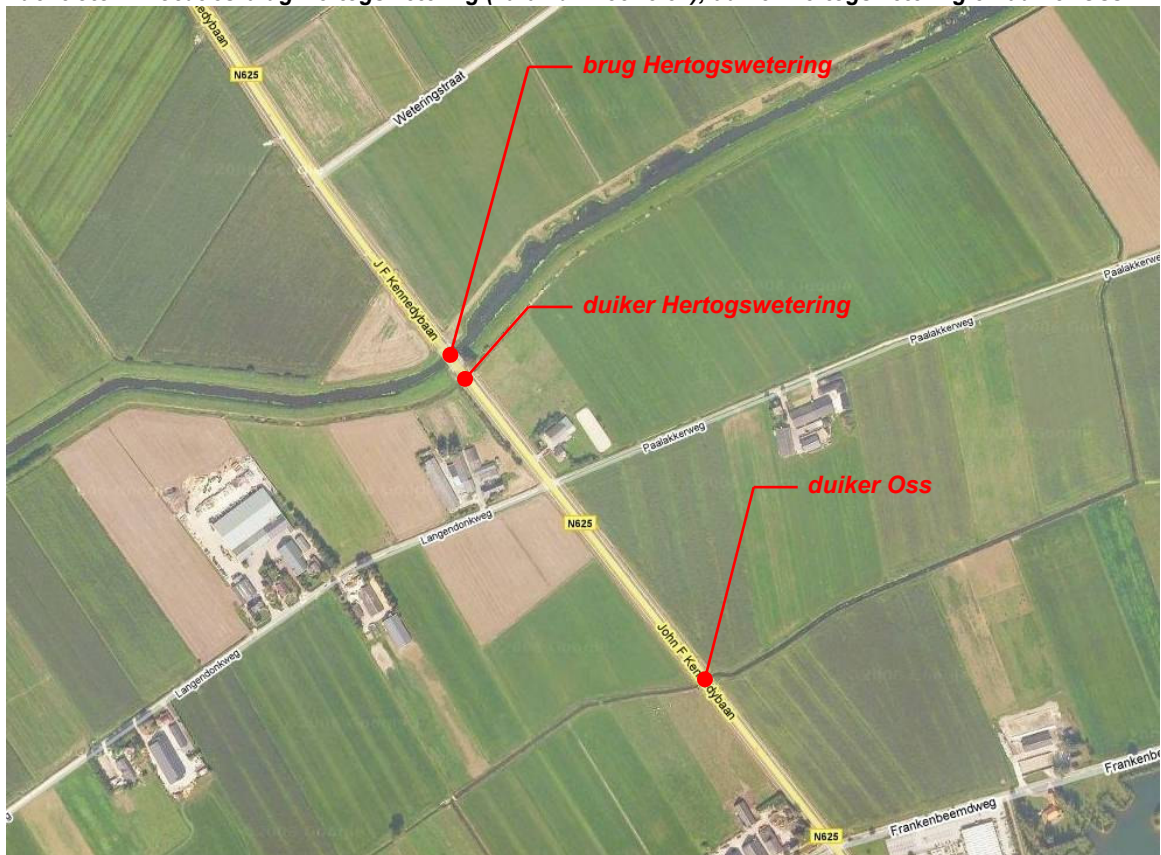
Luchtfoto 2: Locaties brug Hertogswetering (zuid van Het Wild) en brug Rode Wetering



Luchtfoto 3: Locatie duiker Teeffelen



Luchtfoto 4: Locaties brug Hertogswetering (zuid van Teeffelen), duiker Hertogswetering en duiker Oss



Bijlage 2

Inspectiefoto's

Afb. 1



Brug Nieuwvliet

De beide brugranden zijn niet voorzien van een beschermende conservering (zie rode pijlen).

Op foto:

Eén van beide brugranden...

Afb. 2



Brug Nieuwvliet

In de onderzijde van het dek, bij de meest oostelijke overspanning, ligt op meerdere plaatsen wapening bloot.

Afb. 3



Op beide foto's (Afb. 2 en Afb. 3):
Meest oostelijke overspanning.

Afb. 4



Brug Nieuwvliet

In de onderzijde van het dek bevinden zich op meerdere plaatsen binddraadjes.

Op foto:

Meest oostelijke overspanning.

Afb. 5



Brug Nieuwvliet

In het oostelijke landhoofd ligt op twee plaatsen wapening bloot.

Op foto:

Een van de twee plaatsen met blootliggende wapening.

Afb. 6



Brug Nieuwvliet

Aan de onderzijde van het frontvlak van het oostelijke landhoofd bevinden zich 'natte' corrosieproducten. De verbrede voet is de onderzijde van het landhoofd (zie rode pijl), het erboven gelegen deel is het frontvlak van het landhoofd (rode pijl).

Afb. 7



*Op beide foto's (Afb. 6 en Afb. 7):
Oostelijk landhoofd.*

Afb. 8



Brug Nieuwvliet

Ongeveer in het midden van het oostelijke landhoofd bevindt zich één verticale scheur.

Afb. 9



Brug Nieuwvliet

De rijvloer bevat verspreid over het gehele oppervlak kale delen.

Afb. 10



Brug Nieuwvliet

De beide taludbekledingen zijn over nagenoeg de gehele breedte verzakt, onderspoelt of is lokaal verdwenen. Het houtwerk van de teenconstructies (perkoenen en steunplanken) is over het algemeen (deels) verrot of is zacht.

Afb. 11



Brug Nieuwvliet

De kesp van het westelijke tussensteunpunt bevat aan het westelijke uiteinde een openstaande naad.

Afb. 12



Brug Hoefgraaf

De beide brugranden zijn niet voorzien van een beschermende conservering.

*Op foto:
Een van beide brugranden.*

Afb. 13



Brug Hoefgraaf

In de onderzijde van het dek, bij de meest westelijke overspanning, ligt op meerdere plaatsen lokaal wapening bloot en welke licht tot lokaal matig is gecorrodeerd.

Afb. 14



*Op beide foto's (Afb. 13 en Afb. 14):
Westelijke overspanning.*

Afb. 15



Brug Hoefgraaf

De kessen van beide tussensteunpunten bevatten aan alle uiteinden openstaande naden.

*Op foto:
Een van de uiteinden van het westelijke tussensteunpunt.*

Afb. 16



Brug Hoefgraaf

Een van de uiteinden van het westelijke tussensteunpunt bevat op één plaats kalkafzetting.

Afb. 17



Brug Hoefgraaf

Eén van de palen van het oostelijke tussensteunpunt bevat op één plaats, ter hoogte van de aansluiting met de kesp, blootliggende wapening (zie rode pijl).

Afb. 18



Brug Hoefgraaf

De beide taludbekledingen zijn over nagenoeg de gehele breedte verzakt, onderspoelt of is lokaal verdwenen. Het houtwerk van de teenconstructies (zie rode pijl; geheel onder water) en dat van de insteek (zie gele pijl) is over het algemeen (deels) verrot of is zacht.

Op foto:
Noordelijk landhoofd.

Afb. 19



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Rond de zuidzijde van de brug is het dek c.q. zijn de rijvlakken vervuild met modder

Op foto:
Oostelijke groenstrook bij zuidelijke aanzet.

Afb. 20



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Rond de in-/uitrit van en naar het boerenervf zuidwest van de brug, is de groenstrook zeer modderig en bevat rijsporen.

Op foto:
Westelijke groenstrook bij zuidelijke aanzet.

Afb. 21



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

De beide brugranden zijn niet voorzien van een beschermende conservering (zie rode pijlen).

Op foto:
Zuidelijke brugrand.

Afb. 22



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Daar waar het dek is opgelegd op het noordelijke landhoofd, bevinden zich in de onderzijde van het dek en evenwijdig aan het frontvlak van het landhoofd, op meerdere plaatsen en verspreid over de gehele breedte, natte rode corrosieproducten (zie rode pijlen).

Op foto:
Noordelijk landhoofd.

Afb. 23



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Daar waar het dek is opgelegd op het zuidelijke landhoofd, bevinden zich in de onderzijde van het dek en evenwijdig aan het frontvlak van het landhoofd, op meerdere plaatsen en verspreid over de gehele breedte, natte rode corrosieproducten (zie oa. rode pijl).

Op foto:
Zuidelijk landhoofd.

Afb. 24



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Ter hoogte van de noordelijke overspanning bevindt in de onderzijde van het dek en evenwijdig aan de langsas van de brug, één scheur.

Op foto:
Noordelijke overspanning.

Afb. 25

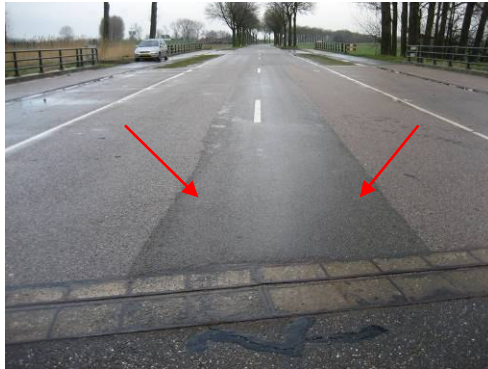


Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Bij zuidelijke overspanning is eveneens dezelfde scheur aangetroffen, welke is getoond bij Afb. 24.

Op foto:
Zuidelijke overspanning.

Afb. 26



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

In het rijvlak is een bitumineuze strook asfaltbeton ingezet...

Afb. 27



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Zowel de zijkanten van het dek als ook de zijkanten van de landhoofden zijn voorzien van een witte coating. Deze coating is op vele plaatsen afgebladderd, zit op meerdere plaatsen deels los of is vervuild.

Op foto:
Oostelijke zijde brug.

Afb. 28



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Verspreid over de gehele breedte van het noordelijke landhoofd, bevinden zich op meerdere plaatsen natte rode corrosieproducten tegen het frontvlak.

Afb. 29



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Verspreid over de gehele breedte van het zuidelijke landhoofd, bevinden zich op meerdere plaatsen natte rode corrosieproducten tegen het frontvlak.

Afb. 30



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Tegen elke zijkant van elk landhoofd, bevindt zich één ongelijkbenig hoekstaal. Elk hoekstaal is matig tot ernstig gecorrodeerd.

Op foto:

Oostzijde noordelijk landhoofd.

Afb. 31



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Tussen het landhoofd en het aansluitende dek, en in het verticale vlak, bevindt zich een teer- of bitumenemulsie. De hoogte is daarbij ongeveer gelijk aan de dikte van het dek. Het geheel is aan weerszijden van elk landhoofd afgedekt met behulp van een stalen strip.

Op foto:

Oostzijde noordelijk landhoofd.

Afb. 32



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

De conservering van de beide leuningen is zeer lokaal in lichte mate beschadigd. De beschadigingen bestaan voornamelijk uit krasjes (zie rode pijl).

Op foto:

Westelijke leuning.

Afb. 33



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

De hemelwaterafvoergoten welke zijn opgenomen in de stroken langs de hoofdrijbaan, bevatten verspreid over de gehele lengte diverse materiaalophopingen, waardoor afvloeiing van hemelwater bemoeilijkt wordt (zie rode pijl).

Afb. 34

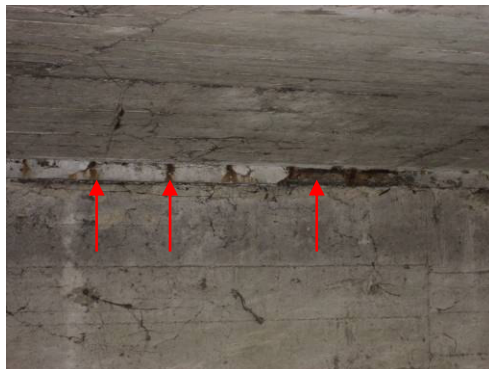


Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

In de verticale vlakken van het zuidelijke tussensteunpunt is beton afgebrokkeld. Het betreffen diverse plaatsen rondom centerpengaten.

Op foto:
Zuidelijk tussensteunpunt.

Afb. 35



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Verspreid over een bepaalde lengte, in de bovenzijde van het noordelijke tussensteunpunt, ligt op meerdere plaatsen wapening bloot (zie rode pijlen).

Op foto:
Noordelijk tussensteunpunt.

Afb. 36



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Op enkele plaatsen ontbreekt taludbekleding.

Op foto:
Noordelijke taludbekleding.

Afb. 37



Brug Hertogswetering (zuid van Het Wild)

Beide voegovergangsijzers zijn grotendeels licht tot lokaal matig gecorrodeerd.

Op foto:

Een van beide voegovergangsijzers...

Afb. 38



Brug Rode Wetering

Rond de noordzijde van de brug is het dek c.q. zijn de rijvlakken vervuild met modder

Op foto:

Westelijke groenstrook bij noordelijke aanzet.

Afb. 39



Brug Rode Wetering

De beide brugranden zijn niet voorzien van een beschermende conservering (zie rode pijlen).

Op foto:

Eén van beide brugranden...

Afb. 40



Brug Rode Wetering

Daar waar het dek is opgelegd op het noordelijke landhoofd, bevinden zich in de onderzijde van het dek en evenwijdig aan het frontvlak van het landhoofd, op meerdere plaatsen en verspreid over de gehele breedte, natte rode corrosieproducten (zie rode pijlen).

Afb. 41



Brug Rode Wetering

Daar waar het dek is opgelegd op het zuidelijke landhoofd, bevinden zich in de onderzijde van het dek en evenwijdig aan het frontvlak van het landhoofd, op meerdere plaatsen en verspreid over de gehele breedte, natte rode corrosieproducten.

Afb. 42



Brug Rode Wetering

In navolging op Afb. 42 zijn hier tevens twee plaatsen aangetroffen met blootliggende wapening (zie rode pijlen)...

Afb. 43



Brug Rode Wetering

Ter hoogte van de zuidelijke overspanning ligt op meerdere plaatsen lokaal wapening bloot.

Afb. 44



Brug Rode Wetering

In het midden van de hoofdrijbaan bevindt zich ter lengte van 22,85 meter en met een breedte van 0,22,00 meter, een ingestorte strook beton (tussen rode pijlen).

Afb. 45



Brug Rode Wetering

Zowel de zijkanten van het dek als ook de zijkanten van de landhoofden zijn voorzien van een witte coating. Deze coating is op vele plaatsen afgebladderd, zit op meerdere plaatsen deels los of is vervuild.

Afb. 46



Brug Rode Wetering

Verspreid over de gehele breedte van het noordelijke landhoofd, bevinden zich op meerdere plaatsen natte rode corrosieproducten tegen het frontvlak.

Afb. 47



Brug Rode Wetering

Verspreid over de gehele breedte van het zuidelijke landhoofd, bevinden zich op meerdere plaatsen natte rode corrosieproducten tegen het frontvlak. Voorts bevinden zich in het frontvlak twee plaatsen met blootliggende wapening, waarvan één op de afbeelding hiernaast (zie rode pijl).

Afb. 48



Brug Rode Wetering

Tegen één zijde van het zuidelijke landhoofd, bevindt zich één ongelijkbenig hoekstaal.

Afb. 49



Brug Rode Wetering

Zowel aan de oost- als aan de westzijde ontbreekt een slijtlaag op de betonnen rijvlakken van de fiets-/bromfietspaden.

Op foto:
Westelijk fiets-/bromfietspad.

Afb. 50



Brug Rode Wetering

In het geheel ontbreekt een slijtlaag op het betonnen rijvlak van de hoofdrijbaan.

Afb. 51



Brug Rode Wetering

In het midden van de overspanning bevindt zich in het midden van de hoofdrijbaan op één plaats deels verbrijzeld beton.

Afb. 52



Brug Rode Wetering

De twee stroken welke gelegen zijn naast de hoofdrijbaan, zijn beiden voorzien van een beschermende conservering. Deze conservering bevat op meerdere plaatsen lokaal kale delen en tevens zijn reflectiescheurtjes vanuit de ondergrond zichtbaar (zie rode pijlen).

Op foto:
Westelijke strook.

Afb. 53



Brug Rode Wetering

Bij de westelijke hemelwaterafvoergoot zijn op meerdere plaatsen betonranden (zie rode pijlen).

Afb. 54



Brug Rode Wetering

Over de volle hoogte van het noordelijke tussensteunpunt bevinden zich drie verticale scheuren (een van de drie scheuren is aangegeven door de rode pijl).

Afb. 55



Brug Rode Wetering

Over de volle hoogte van het zuidelijke tussensteunpunt bevinden zich drie verticale scheuren (een van de drie scheuren is aangegeven door de rode pijl).

Afb. 56



Brug Rode Wetering

Op enkele plaatsen ontbreekt taludbekleding.

Op foto:
Noordelijke taludbekleding.

Afb. 57



Brug Rode Wetering

Beide voegovergangsisijzers zijn grotendeels licht tot lokaal matig gecorrodeerd.

Op foto:
Zuidelijk voegovergangsisijzer.

Afb. 58



Duiker Teeffelen

Van de westelijke frontwand is de noordelijke hoek deels afgebrokkeld en liggen twee wapeningstaven bloot (zie rode pijlen). Beide staven zijn omgebogen.

Afb. 59



Duiker Teeffelen

De coating op de beide frontwanden is op meerdere plaatsen in lichte mate beschadigd, is op meerdere plaatsen vervuild en is op meerdere plaatsen begroeid met algen en mossen. Voorts zijn beide frontwanden aan de achterzijde deels overgroeid met grassen.

Op foto:
Oostelijke frontwand.

Afb. 60



Brug Hertogswetering (zuid van Teeffelen)

De zijvlakken van het dek vertonen zeer lokaal kleine roestvlekjes (zie rode pijlen).

Op foto:
Westelijke zijde van de brug.

Afb. 61



Brug Hertogswetering (zuid van Teeffelen)

De oostelijke brugrand is nagenoeg geheel begroeid met algen en is lokaal begroeid met mossen. De westelijke brugrand is zeer lokaal begroeid met mossen. Voorts bevatten de beide goten over de volle lengtes grond of takjes.

Op foto:
Oostelijke brugrand.

Afb. 62



Brug Hertogswetering (zuid van Teeffelen)

Het noordelijke landhoofd bevat op één plaats afgebrokkeld beton.

Afb. 63



Duiker Hertogswetering

Bij het oostelijke in-/uitstroomelement (koker) is op één plaats een hoek afgebroken (zie rode streeplijnen).

Afb. 64



Duiker Hertogswetering

Vervolg van Afb. 63: op de positie waar het afgebrokkelde beton is aangetroffen, is bij de tegenoverliggende in-/uitstroomopening een roestvast stalen plaat aangetroffen (zie rode pijl).

Op foto:
Westelijke in-/uitstroomelement.

Afb. 65



Duiker Oss

Alle twee frontwanden (zie rode pijl), de vier kopwanden (zie gele pijl) en de vier taludwanden (zie witte pijl) zijn allen goeddeels begroeid met algen en mossen. De bovenvlakken van kopwanden en taludwanden zijn daarbij tevens overwoekerd met grassen.

Op foto:
Oostelijke zijde in-/uitstroomzijde.

Afb. 66



Duiker Oss

Bij de oostelijke in-/uitstroomopening ontbreekt bij de zuidelijke taludwand op meerdere plaatsen voegmortel (zie rode pijl).

Afb. 67



Duiker Oss

Van de oostelijke frontwand zijn zes metselstenen afgebrokkeld.

Afb. 68



Duiker Oss

Van de westelijke frontwand zijn zestien metselstenen afgebrokkeld.

Afb. 69



Duiker Oss

Van de oostelijke twee kopwanden zijn in totaal 12 stenen afgebrokkeld (zie rode pijlen).

Afb. 70



Duiker Oss

Van de westelijke twee kopwanden zijn, gelijk als bij de oostelijke twee kopwanden, ook hier in totaal 12 stenen afgebrokkeld (zie rode pijlen).

Bijlage 3

Informatie carbonatatatieproces in beton

Inleiding

Staal wordt als wapening in beton aangebracht om hoofdzakelijk trekkrachten op te nemen. Door corrosie neemt de staafdiameter af, waardoor het staal minder trekkrachten kan opnemen en waardoor de wapening een gedeelte van zijn functie verliest. Beton beschermt de wapening tegen corrosie. Doordat beton alkalisch is, wordt op staal in beton een beschermende laag gevormd door een dunne oxidehuid van Fe_2O_3 en Fe_3O_4 . Deze laag heet *passiveringslaag*. Kooldioxide uit de lucht kan die alkaliteit echter teniet doen. Het proces dat hier verantwoordelijk voor is, heet *carbonatatie*. Door carbonatatie wordt de passiveringslaag minder stabiel, waarmee de kans op corrosie van het staal in het beton toeneemt.

Corrosie is een elektrochemisch proces, waarbij het ijzer, de hoofdcomponent van staal, reageert met zuurstof en water. De bij corrosie gevormde roest neemt een groter volume in dan het oorspronkelijke ijzer. Vandaar dat het beton rond de wapening uit elkaar wordt gedrukt als wapening gaat roesten. De snelheid waarmee het corrosieproces verloopt, hangt af van:

- de tijd dat het staal vochtig is;
- de aanwezigheid van zuurstof;
- de temperatuur;
- de afzetting van beschermende stoffen op het staaloppervlak (passiveringslaag).

De poriestructuur van het beton speelt hierbij een belangrijke rol. Door betrekkelijk eenvoudige betontechnologische maatregelen kan carbonatatie van beton zodanig worden vertraagd, dat de kans op corrosie binnen de gebruikelijke levensduur verwaarloosbaar klein wordt.

Carbonatatie

Carbonatatie is de inwerking van koolzuurgas (CO_2) op de alkalische bestanddelen van het beton. Koolzuurgas is in de lucht rondom ons aanwezig (variërend van 0,03% tot 0,10% (V/V)). Het carbonatatieproces van beton verloopt langzaam. Voor een deel komt dit door de lage concentratie van het koolzuurgas in de buitenlucht en de grote voorraad aan alkaliën in het beton. Een andere reden is dat koolzuurgas, evenals zuurstof (O_2) zich alleen in uitgedroogde poriën met enige snelheid kan bewegen en binnendringen. De carbonatatiereactie heeft plaats op het grensvlak van poriewater en lucht. Het in het poriënwater aanwezige calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reageert met de koolzuur (H_2CO_3) tot calciumcarbonaat (CaCO_3). Het gevolg van de carbonatatie is dat de pH-waarde wordt verlaagd, de alkaliteit neemt dus af. De pH-waarde van niet-gecarbonateerd beton bedraagt circa 13, van gecarbonateerd beton bedraagt dit circa 8 à 9 of lager. Hierdoor wordt de passiveringslaag van het staal aangetast en krijgt het corrosieproces, mits voldoende zuurstof en vocht aanwezig zijn, de kans te starten.

Corrosieproces

Corrosie is een elektrochemisch proces dat door *potentiaalverschillen* (spanningsverschillen) 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. Bij 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.

Corrosie treedt op als wordt voldaan aan de volgende randvoorwaarden:

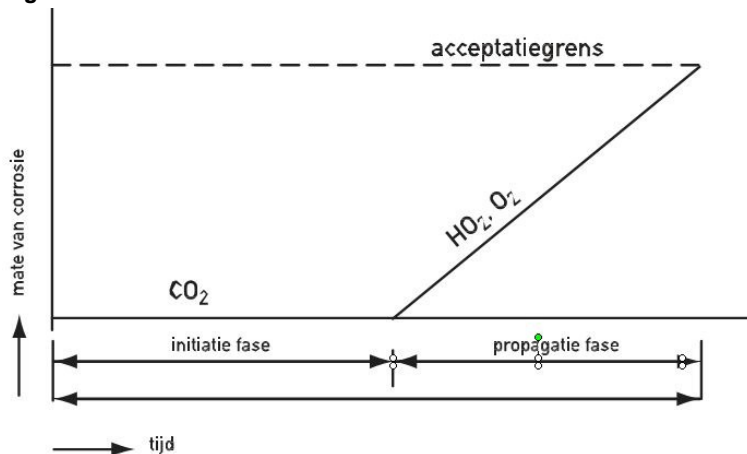
- er moeten potentiaalverschillen op het staal aanwezig zijn, waardoor een stroomkring ontstaat;
- de anode en kathode moeten zowel via het staal als elektrochemisch met elkaar zijn verbonden;
- het in oplossing gaan van het ijzer moet door de depassivering mogelijk zijn;
- bij de kathode moet voldoende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

Bij *carbonatatie-geïnitieerde wapeningscorrosie* is sprake van algemene corrosie, dat wil zeggen dat de corrosie gelijkmatig is verdeeld over het gecorrodeerde staaloppervlak. Het volume van de roestproducten is 2,5 tot 7 maal zo groot als van het oorspronkelijke staal. Hierdoor ontstaan rondom de roestende wapening trekspanningen in het beton, die bij overschrijding van de treksterkte tot scheurvorming leiden. Dit uit zich door scheuren van het beton die het patroon van wapening volgen en/of door afgedrukte schollen beton.

Door de ‘automatische’ passivering in het van oorsprong alkalische milieu, kan bij corrosie van staal in beton onderscheid worden gemaakt in twee fasen:

- De initiatiefase
Dit is de tijdsperiode waarin het beschermende milieu rond de wapening teniet wordt gedaan. De duur van de initiatiefase wordt bepaald door de tijd die nodig is om een carbonatatie diepte te bereiken, die gelijk is aan de dekking op het betonstaal.
- De propagatiefase
Dit is de tijdsperiode waarin de corrosie zich daadwerkelijk ontwikkelt.

Figuur 1: Relatie levensduur - ernst corrosie



Carbonatatieverloop en de kans op corrosie

Het verloop van het carbonatatiefront in beton is afhankelijk van de klimatologische omstandigheden waaraan het beton is blootgesteld. Hierbij kunnen voor de hedendaagse praktijk vier expositieomstandigheden worden onderscheiden, te weten:

- binnenklimaat;
- buitenklimaat, onbeschermt;
- buitenklimaat, beschermt tegen regen;
- onder water.

Binnenklimaat

In een binnenklimaat, met een relatieve vochtigheid van minder dan 60%, droogt beton snel uit. Het carbonatatiefront zal zich snel naar binnen kunnen bewegen. De carbonatatediepte is evenredig met de wortel uit de expositietijd. Er is in deze situatie weinig gevaar voor corrosie, omdat onvoldoende water aanwezig is. Wanneer het uitdrogingsfront de wapening bereikt, zal enige roestvorming optreden. Na enige tijd is het uitdrogingsfront de wapening gepasseerd en stopt de zojuist aangevangen corrosie weer, omdat op dat moment onvoldoende water aanwezig is.

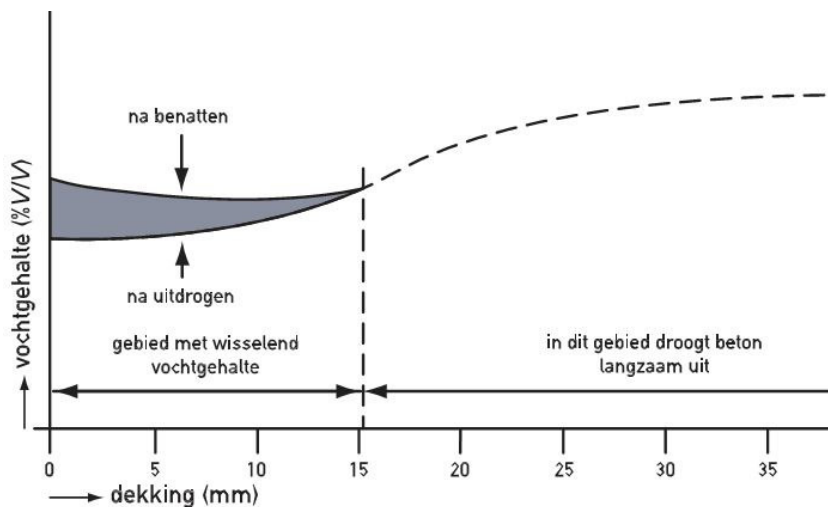
Buitenklimaat, onbeschut

Heel anders is de situatie waarbij het betonoppervlak aan weer en wind is blootgesteld. Er zullen perioden van droogte zijn, waarbij het water uit de poriën verdampt en dus carbonatatie kan optreden. Omdat de relatieve vochtigheid in het buitenklimaat gemiddeld hoger is dan in het binnenklimaat, droogt het beton minder snel uit dan in het binnenklimaat. De carbonatatie verloopt dus langzamer. De droge perioden worden echter afgewisseld met neerslag.

In tegenstelling tot het langzame uitdrogen, zuigen de poriën zich bij regen in korte tijd weer vol met water.

De carbonatatie stopt dan abrupt en kan pas weer doorgaan wanneer in de volgende droge periode het uitdrogingsfront de tot dan toe bereikte carbonatatiegrens passeert. Uiteindelijk bepaalt de langste droge periode de maximale carbonatatediepte. In dit geval gaat de bovengenoemde wortel-tijdformule niet meer op. Het front komt (vrijwel) tot stilstand op een diepte die afhangt van de gemiddelde duur van de droge periode. Voor het ontstaan van ernstige corrosieschade is het nodig dat het uitdrogingsfront vele malen de wapening passeert. Bij elke passage kan de corrosie weer even doorgaan. Onder Nederlandse omstandigheden kan dat alleen gebeuren als het beton erg poreus is of als de wapening heel dicht onder het oppervlak ligt.

Figuur 2: Vochtwisselingen bij expositieomstandigheid Buiten, beschut



Bij een goed ontwerp en een goede uitvoering (ook nabehandeling hoort daar bij) is geen schade te verwachten. Vastgesteld is dat onder uiteenlopende omstandigheden de vochtfluctuaties in de dekkingslaag zich beperken tot de buitenste 15 à 20 mm.

Het op grotere afstand van het betonoppervlak gelegen beton droogt langzaam uit. Door gebrek aan water zal de mogelijkheid van corrosie van wapeningsstaal in dat gebied steeds geringer worden.

Buiten, beschut tegen regen

Evenals bij het binnenklimaat zal het poriënsysteem uitdrogen, zeker in een periode met lage relatieve vochtigheid van de lucht. In een periode met hoge relatieve vochtigheid zal het watergehalte in de poriën weer toenemen. Dat is het geval wanneer de luchtvochtigheid buiten groter is dan in de poriën. De waterdamp dringt dan naar binnen en condenseert in de poriën. Deze situatie doet zich bijvoorbeeld voor bij grote variaties in temperatuur en relatieve vochtigheid ten gevolge van de dagelijkse cyclus van dag en nacht, vooral in de zomer.

De opname van water door condensatie heeft slechts af en toe plaats en verloopt veel langzamer dan bij direct contact met water. Evenals bij beton in een binnenklimaat is de uitdrogingssnelheid en dus ook de carbonatatiesnelheid, kleiner naarmate het front verder naar binnen trekt. Het resultaat is dat het uitdrogingsfront na enige tijd gaat schommelen, waarbij de effectieve voortgang zeer langzaam wordt. In de betreffende zone is bijna voortdurend de combinatie lage pH-waarde, zuurstof en water aanwezig. Het carbonatatiefront valt samen met de grootste uitdrogingsdiepte. Aanvankelijk zal de wortel-tijd-formule nog min of meer opgaan.

In een later stadium neemt de indringdiepte echter naar verhouding steeds sterker af en uiteindelijk zal het front vrijwel tot stilstand komen. Wanneer de wapening zich in deze zone bevindt, moet voor ernstige corrosie worden gevreesd. Van de genoemde expositieomstandigheden is *Buiten, beschut* dus de meest gevaarlijke.

Ook is in de genoemde situatie vastgesteld dat de vochtfluctuaties in de dekkingslaag zich beperken tot de buitenste 15 à 20 mm (figuur 4).

Onder water

In deze situatie is carbonatatie te verwaarlozen door gebrek aan CO₂. Eveneens is de kans op corrosie nihil vanwege de hoge pH-waarde en het gebrek aan zuurstof.

Uitdrogingsfront / carbonatatiefront

De plaats van de grootste uitdrogingsdiepte en daarmee de grootste carbonatatediepte wordt bepaald door de poriestructuur van het beton. De meest belangrijke factoren die van invloed zijn op de poriestructuur zijn:

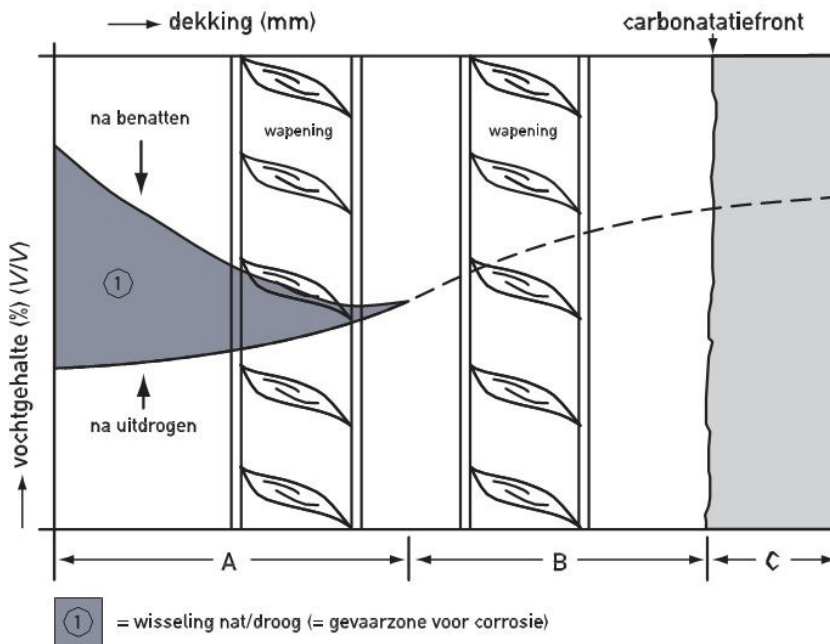
- Cementsoort
De carbonatatediepte neemt toe bij afname van het klinkergehalte van het cement.
- Watercementfactor (wcf) of waterbindmiddelfactor (wbf)
De carbonatatediepte neemt toe bij toename van de watercementfactor. Een grotere watercementfactor geeft een meer *permeabel* ('doordringbaar') beton.
- Nabehandeling
De carbonatatediepte neemt duidelijk af indien langer en intensiever wordt nabehandeld.

Kritieke gebieden voor corrosie

Voor het beoordelen van het risico van door carbonatatie geïnitieerde wapeningscorrosie kunnen in beton drie gebieden (A, B en C) worden onderscheiden. Deze drie gebieden hangen samen met de drie randvoorwaarden waaraan moet worden voldaan bij door carbonatatie geïnitieerde wapeningscorrosie:

- een pH-waarde waarbij de wapening niet gepassiveerd is (gecarbonateerd beton);
- voldoende vocht;
- voldoende zuurstof.

Figuur 3: Kritische gebieden in beton



De volgende drie gebieden worden onderscheiden:

- **Gebied A**
In dit gebied is beton gecarbonateerd en vinden vochtwisselingen plaats. In dit gebied zijn gunstige omstandigheden aanwezig voor wapeningscorrosie.
- **Gebied B**
Een gebied dat wel is gecarbonateerd, maar waar geen vochtwisselingen plaatshebben. In dit gebied is de corrosiesnelheid te verwaarlozen door tekort aan water, mits er geen chloriden aanwezig zijn. Chloriden trekken namelijk vocht aan door de hygroscopische karakter.
- **Gebied C**
Hier is beton niet gecarbonateerd en vinden geen vochtwisselingen plaats. In dit gebied kan door de passivering geen corrosie plaatshebben, ongeacht of er wel of geen water en zuurstof in voldoende mate aanwezig zijn.

Duidelijk is dat voor het beschermen van de wapening tegen corrosie de mate van de betondekking van groot belang is. De betonconstructeur bepaald de mate van betondekking aan de hand van:

- het milieu waaraan het beton is blootgesteld;
- de belangrijkheid van het onderdeel ten aanzien van de veiligheid van de constructie;
- de eventuele nabewerkingen.

Maatregelen

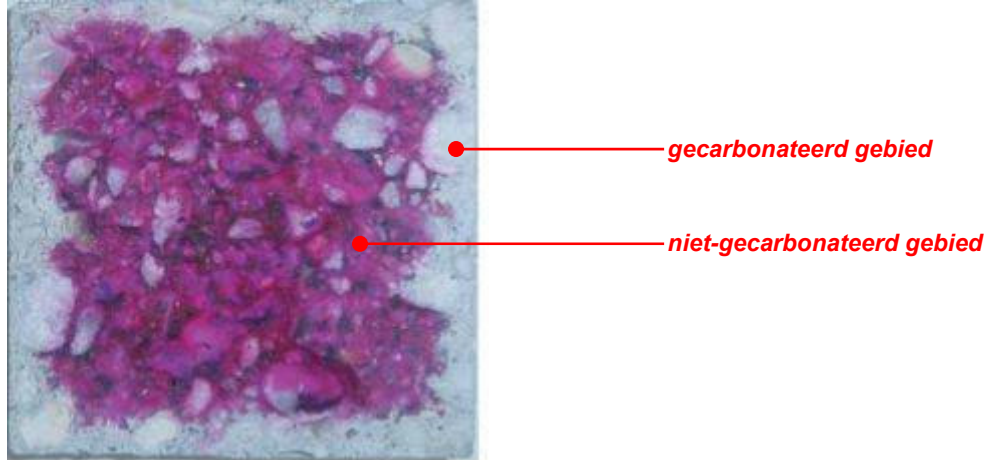
Voor het voorkomen van ernstige schade ten gevolge van carbonatatie geïnitieerde wapeningscorrosie kunnen de volgende vuistregels worden gehanteerd:

- zorg over het gehele betonoppervlak voor voldoende betondekking op de wapening, niet alleen bij het ontwerp maar ook bij uitvoering;
- zorg voor een goede betonkwaliteit, dat wil zeggen een lage water-cementfactor en een goede nabehandeling (de buitenhuid van het beton moet een zo dicht mogelijke structuur hebben);
- inspecteer de betonconstructie regelmatig.

Wel of niet gecarbonateerd beton?

Afhankelijk van de geconstateerde betonschade kan worden besloten te onderzoeken of het carbonatatieproces de aanzet tot de schade is geweest. Rondom blootliggende wapening worden eerst eventuele loszittende betonschollen verwijderd. Daarna wordt in de ondergrond een vers breukvlak gecreëerd. Vervolgens wordt *phenolftaleïne* (indicatorvloeistof) op de ondergrond gespoten. Niet-gecarbonateerd beton zal een paarse opkleuring tonen, gecarbonateerd beton zal echter niet opkleuren.

Figuur 4: Proefkubus, buitenzijden zijn gecarbonateerd



Bron: Bestandheid van beton tegen wapeningscorrosie door carbonatatie, ENCI Media, 2005