

Corrosie van stalen damwandplanken in de grond

Effect van zout grondwater



Corrosie van stalen damwandplanken in de grond

Effect van zout grondwater

dr.ir. S. Jansen
ing. P. Kraaijenbrink
dr.ir. G.A.M. van Meurs

1209030-000

Titel

Corrosie van stalen damwandplanken in de grond

Opdrachtgever
RWS-HWBP2

Project
1209030-000

Kenmerk
1209030-000-GEO-0006-
gbh

Pagina's
50

Trefwoorden

Corrosie, staal, damwandplanken, zout, grondwater

Samenvatting

Stalen damwandplanken worden veelvuldig toegepast bij de versterking van dijken als de ruimte ontbreekt om een stabiliteitsberm in grond uit te voeren. Staal corrodeert echter en daardoor neemt de dikte af. In 2013 is praktijkonderzoek afgerond naar de corrosie van stalen damwandplanken in de ondergrond waarbij sprake is van een bodemmilieu bestaande uit zoet grondwater en waar de bodemlagen bestaan uit veen. De planken zijn steeds aan beide zijden door grond omsloten. Uit dat onderzoek zijn conclusies getrokken over de noodzakelijke corrosietoeslag voor grond-grond belegde planken in veen met zoet grondwater. De vraag is, of de snelheid van corrosie in zout grondwater anders is dan in zoet grondwater zodat bij toepassing van damwanden in zout grondwater een andere corrosietoeslag gehanteerd moet worden.

In opdracht van Rijkswaterstaat is daarom onderzoek uitgevoerd naar corrosie van stalen planken in een bodemmilieu bestaande uit zout grondwater. De werkzaamheden hebben bestaan uit een literatuuronderzoek en een praktijkonderzoek. De interesse is daarbij vooral uitgegaan naar de verwachte dikteafname door corrosie bij langdurige blootstelling gedurende een periode van 50 tot 100 jaar.

In het verleden zijn op meerdere plaatsen in Nederland planken getrokken. De planken die in dit praktijkonderzoek getrokken zijn, staan in westelijk Nederland, daar waar de ondergrond zout grondwater bevat. De getrokken palen en planken zijn visueel geïnspecteerd en de (resterende) dikte is gemeten. De gemeten dikte is gebruikt om de afname in dikte gedurende de blootstellingsduur te berekenen. Deze afname is een maat voor de corrosiesnelheid.

Bij het uitgevoerde literatuuronderzoek is gezocht naar meetgegevens uit de praktijk van verticale stalen planken die onder verschillende omstandigheden langdurig in de ondergrond hebben gestaan. De meetgegevens zijn geanalyseerd en gebruikt om te komen tot een advies betreffende de corrosietoeslag. Het merendeel van de literatuurgegevens laat zien dat bij stalen voorwerpen in de grond de snelheid van corrosie ligt tussen 10 en 100 $\mu\text{m}/\text{jaar}$ (dubbelzijdig¹). De maximale blootstellingsduur van de data bedraagt 60 jaar, maar het merendeel van de data is van toepassing op een blootstellingsduur kleiner dan 30 jaar. De volgende conclusies zijn getrokken.

Meetdata afkomstig uit de literatuur laten het volgende zien:

- Zoutgehalte en bodemtype (veen, klei of zand) hebben geen significante invloed op de corrosiesnelheid van staal in de grond en dat is dus anders dan het effect van zout onder atmosferische omstandigheden en onder omstandigheden nabij de splash zone van een stalen plank in oppervlakte water. Ook de bodemtemperatuur heeft geen significante invloed op de corrosiesnelheid.
- Factoren die wel invloed hebben, zijn de aanwezigheid van verstoorde of geroerde grond, de positie ten opzichte van de grondwaterspiegel (boven/onder) en de

¹ "Dubbelzijdig" wil zeggen dat rekening is gehouden met corrosie aan beide kanten van de plank.

Titel

Corrosie van stalen damwandplanken in de grond

Opdrachtgever
RWS-HWBP2

Project
1209030-000

Kenmerk
1209030-000-GEO-0006-
gbh

Pagina's
50

aanwezigheid van een wisselende grondwaterstand. Bij aanwezigheid van geroerde of verstoorde grond of een positie boven de grondwaterspiegel ligt de snelheid van corrosie hoger dan bij onverstoorde of ongeroerde grond. Ook de aanwezigheid van wisselende grondwaterstanden leidt tot een toename in de snelheid van corrosie boven de grondwaterspiegel. In beide situaties is sprake van een hoger gehalte aan beschikbare zuurstof waardoor de snelheid van corrosie hoger is.

- In alle gevallen neemt de snelheid van corrosie af naarmate de duur van blootstelling toeneemt. Initieel is sprake van een snelle afname, daarna vertraagt de afname. De oorzaak daarvan is gelegen in het feit dat corrosie van staal resulteert in de vorming van een (minerale) laag op de plank. Teruglopen van de porositeit zorgt voor een verminderde aanvoer van stoffen benodigd voor corrosie en voor een verminderde afvoer van gevormde corrosieproducten.
- Een mogelijke risicofactor voor corrosie in de ondergrond is de aanwezigheid van een lage pH ($\text{pH} < 5$), en het optreden van microbiële corrosie als gevolg van stimulering van sulfaat-reducerende bacteriën door de aanwezigheid van hoge concentraties aan sulfaat, en organisch materiaal. Onder natuurlijke omstandigheden in de ondergrond van westelijk Nederland waar dijkversterking gepland is, komt de aanwezigheid van een lage pH niet voor. Wel kan een lage pH aanwezig zijn in een gebied met bijvoorbeeld katteklei. Omstandigheden waaronder MIC kan optreden, komt alleen lokaal voor en zorgt voor 'putcorrosie' (pitting) op een plank. De mechanische eigenschappen van een plank zullen dan echter nauwelijks veranderen.

Törnqvist (1999) heeft veel meetdata verzameld en opgenomen in een dataset. Deze dataset bevat meer dan 500 data. Voor een deel overlappen deze data de meetdata van Decker (2008). De meetdata van Decker et al (2008) zijn echter recenter en beter herleidbaar. Decker heeft zich ook meer gericht op maximumwaarden. Törnqvist heeft zijn meetdata gefit en een gemiddelde, een 67% waarde, een 95% waarde en een maximum bepaald. Ook de corrosietoeslag afgeleid van de CUR Richtlijn kan daarmee vergeleken worden. De corrosietoeslag uit de CUR Richtlijn komt hoger uit dan de curves (gefit) van Törnqvist. Geconcludeerd kan worden dat aanhouden van de CUR Richtlijn, gebaseerd op de Eurocode 3 (2007), zorgt voor een veilige aanpak die kan steunen op een groot aantal praktijkgegevens.

Het advies, gebaseerd op de huidige bevindingen, is opgenomen in onderstaande tabel en vervangt het eerdere advies uit 2013 (ENW, 2013) betreffende de snelheid van corrosie van stalen damwanden in zoet grondwater in bodemlagen bestaande uit veen dan wel humeuze klei. Het toenmalige advies luidde: een dubbelzijdige corrosietoeslag van 3 mm voor een blootstellingsduur van 100 jaar.

Titel

Corrosie van stalen damwandplanken in de grond

Opdrachtgever
RWS-HWBP2**Project**
1209030-000**Kenmerk**
1209030-000-GEO-0006-
gbh**Pagina's**
50

	Corrosietoeslag (dubbelzijdig)² (mm)	
	50 jaar	100 jaar
Ongeroerde, schone grond en permanent beneden de grondwaterspiegel	1,2	2,4
Geroerde grond, of verticale grondwaterbeweging, of boven de grondwaterspiegel	2,4	4,4

Uit een onderlinge vergelijking zijn de volgende conclusies te trekken:

- Voor ongestoorde of ongeroerde grond en onder de grondwaterspiegel gaan de huidige waarden voor corrosiesnelheid van de CUR166 geldend voor "*ongeroerde, schone grond*" goed op.
- Voor verstoorde of geroerde grond, situaties met een verticale grondwaterbeweging of bij ligging boven de grondwaterspiegel gaan de huidige waarden voor corrosiesnelheid van de CUR166 geldend voor "*onverdichte aanvullingsgrond (klei, zand)*" goed op.

Het advies betreffende de corrosietoeslag kan vergeleken worden met meetgegevens verzameld met het praktijkonderzoek. Bij de meetdata zijn alle data uit voorgaande onderzoeken meegenomen. Het betreft ook data van planken die in het verleden ter zijde zijn geschoven omdat de bodem niet uit veen bestond maar uit klei. De resultaten laten zien dat de meetdata uit de verschillende praktijkonderzoeken deels onder de norm voor ongeroerde grond vallen ('benadering lage waarde'), en deels er vlak boven ('benadering hoge waarde'). Dit komt overeen met de observatie dat de gegevens bij een ongeroerde bodem goed overeenkomen met een lage corrosietoeslag, en dat de gegevens bij corrosie-verhogende omstandigheden (geroerde grond, fluctuatie in grondwaterspiegel) daar iets boven uitkomen. Het is bevestigend om te zien dat de praktijkgegevens niet structureel veel lager of hoger zijn dan de literatuurgegevens en de voorgestelde normen.

Het bepalen van de vereiste dikte van een plank wordt gestart door te kijken naar de mechanische belasting. Dat levert een vereiste dikteverdeling met de diepte op. Vervolgens wordt de corrosietoeslag bepaald op grond van eventuele aanwezige zonering (geroerde versus ongeroerde grond) en de gegeven tabel (Tabel 0.1). De beide getallen worden bij elkaar opgeteld en de hoogste waarde is maatgevend voor de vereiste plankdikte. Vervolgens wordt in de praktijk gekeken naar een standaardplank die tegemoet komt aan deze dikte-eis.

Als voorzorgsprincipe wordt voorgesteld om gebieden te identificeren waar een lage pH aanwezig kan zijn. Een eerste identificatie kan ontleend worden aan kaartmateriaal (TNO, 1997) over de zuurgraad van het grondwater.

De meetdata uit de literatuur laten zien dat aanwezigheid van zout grondwater niet significant van invloed is op de snelheid van corrosie. Deze vaststelling is een stevige verandering in vergelijking met de Handreiking Constructief ontwerpen voor zoutgrondwater. De verzamelde

² Enkelvoudige toeslag die rekening houdt met corrosie aan beide kanten, vandaar dubbelzijdig, van de plank.

Titel

Corrosie van stalen damwandplanken in de grond

Opdrachtgever
RWS-HWBP2**Project**
1209030-000**Kenmerk**
1209030-000-GEO-0006-
gbh**Pagina's**
50

praktijkgegevens voor de Nederlandse situatie sluiten daarbij aan. Deze dataset is echter beperkt. Voor het vergroten van de dataset en tevens om de betrouwbaarheid van de voorgestelde corrosietoeslag te toetsen wordt een tweetal aanbevelingen gedaan.

1. Installeer twee losstaande planken bij iedere dijkversterking met een stalen damwand. Alvorens de losstaande planken worden ingebracht, wordt de dikte gemeten. Na 25 en / of 50 jaar wordt een plank getrokken, visueel geïnspecteerd en de dikte gemeten. De afname in dikte geeft een indicatie van de resterende levensduur van de plank en dus van de constructie.
2. De meetdata is afkomstig van voorwerpen met een beperkte blootstellingsduur. Dat geldt voor de meetdata gevonden in de literatuur en de data beschikbaar gekomen uit het Nederlandse praktijkonderzoek. Daarom wordt voorgesteld in Nederland op zoek te gaan naar stalen damwandplanken die meer dan 50 jaar in de bodem hebben gestaan.

De voorgestelde waarden voor de corrosiesnelheid zijn verondersteld veilige waarden te zijn. De daadwerkelijke levensduur van de constructie kan aanzienlijk langer zijn dan de ontwerplevensduur. Het gevolg is dat de constructie langer mee gaat (of zwaarder belast mag worden) en dat onderbouwd kan worden om investeringen voor verdere dijkversterking uit te stellen. Daarnaast kan in uitzonderingsgevallen blijken dat de corrosiesnelheid hoger uitvalt. In die gevallen kan onderzocht worden welke bodemomstandigheden de oorzaak zijn; zoals lage pH waarde, microbiële corrosie of andere nu nog onbekende omstandigheden. Door metingen kan de toetsing op veiligheid volwaardiger worden uitgevoerd ten opzichte van de huidige toetsing waarin bij constructies vaak met aannames over de staat van instandhouding wordt gewerkt.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	maart 2014	dr.ir. S. Jansen		H.A. Schelfhout		ir. L. Voogt	
		ing. P. Kraaijenbrink					
		dr.ir. G.A.M. van Meurs					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding onderzoek	1
1.2 Doel werkzaamheden	1
1.3 Geadresseerde vragen	1
1.4 Plan van aanpak	2
1.5 Leeswijzer	2
2 Stalen damwanden	5
2.1 Toepassing van stalen damwanden	5
2.2 Wrijvingswarmte bij plaatsing planken	6
2.3 Toleranties in dikte planken	6
2.4 Staalkwaliteit	7
3 Proces van corrosie	9
3.1 Wat is corrosie?	9
3.2 Waarom corrodeert staal?	9
3.3 Vormen van corrosie	10
3.4 Omgevingsfactoren die corrosie beïnvloeden	12
4 Normen en achtergrond	15
4.1 Nationale normen en richtlijnen	15
4.2 Internationale normen	16
5 Corrosie van damwanden - literatuurgegevens	19
5.1 Orde-grootte corrosiesnelheid en invloed blootstellingsduur	20
5.2 Effect van omgevingsfactoren: algemene opmerkingen	21
5.3 Effecten van omgevingsfactoren: zoutgehalte / bodemweerstand / chloridegehalte	25
5.4 Effect van andere omgevingsfactoren	27
5.5 Samenvatting effecten omgevingsfactoren op corrosie van staal	28
5.6 Statistische beschrijving van orde-grootte en tijdsverloop corrosiesnelheid	28
6 Praktijkonderzoek	33
6.1 Locaties praktijkonderzoek	33
6.2 Resultaten praktijkonderzoek	33
6.2.1 Maeslantkering	34
6.2.2 Amazonehaven	35
6.2.3 Zeeburgersluiseiland	37
6.2.4 Westerkade Rotterdam	38
6.2.5 Locaties voor mogelijk aanvullend onderzoek	39
7 Synthese bevindingen	41
7.1 Inleiding	41
7.2 Advies corrosietoeslag	41
7.2.1 Advies onder normale omstandigheden	42
7.2.2 Onder afwijkende omstandigheden	43
7.2.3 Bodemlagen met verschillen in corrosiesnelheid	44

8 Conclusies en aanbevelingen	45
8.1 Conclusies	45
8.2 Aanbevelingen	46
9 Referenties	47
 Bijlage(n)	
A Internationale normen	A-1
B Literatuurdata over corrosiesnelheid	B-1
C Expertgroep Corrosie	C-1
D Diepteligging grondwaterstand en fluctuatie	D-1
E Overzicht van toegevoegde rapporten	E-1

1 Inleiding

1.1 Aanleiding onderzoek

Corrosie van staal in de bodem zorgt dat een stalen damwandplank in de loop der tijd dunner wordt. Tegen het eind van de levensduur dient de plank echter nog steeds te voldoen aan de gestelde mechanische eisen. Alleen op deze wijze kan een damwand zijn waterkerende functie gestand blijven doen. De afname in dikte van een stalen plank wordt gecompenseerd door de eis van een corrosietoeslag bij plaatsing van de plank.

In een eerder onderzoek (Kraaijenbrink, 2013) is onderzocht welke corrosie te verwachten is voor stalen damwandplanken die in een milieu met zoet grondwater staan. Onder zoet grondwater wordt grondwater verstaan met een chloridegehalte kleiner dan 200 mg/liter. Bij dit onderzoek is gekeken naar stalen planken die grond-grond belegd zijn (aan beide zijden van de plank bevindt zich grond). De beoogde levensduur bedraagt bij toepassing van stalen damwandplanken 100 jaar en daarom is toen gezocht naar actuele data over corrosie van staal bij een lange blootstellingsduur. Op basis van dit onderzoek is advies uitgebracht voor de corrosietoeslag van grond-grond belegde damwanden in zoet grondwater.

De vraag welke corrosietoeslag moet worden aangehouden voor damwanden in zout grondwater is daarmee nog niet beantwoord. Rijkswaterstaat heeft Deltares daarom gevraagd een advies uit te brengen aan het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) over corrosietoeslag van damwanden die worden toegepast in waterkeringen en terecht komen in een milieu met zout grondwater.

1.2 Doel werkzaamheden

De werkzaamheden van het onderhavige onderzoek zijn gericht op het verzamelen van kennis over de snelheid van ondergrondse corrosie van grond-grond belegde damwanden bij langdurige blootstelling onder verschillende bodemomstandigheden en specifiek naar het effect van zout grondwater.

1.3 Geadresseerde vragen

Dit onderzoek dient uit te monden in een voorstel voor het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) voor de corrosietoeslag. In het voorstel dienen een viertal vragen te zijn beantwoord.

1. Is voor stalen damwanden die langdurig (>10 jaar) in contact staan met de bodem, het zoutgehalte van de bodem en/of grondwater een relevante parameter in de beoordeling van de benodigde corrosietoeslag voor toepassingen met een levensduur van 100 jaar?
2. Indien het zoutgehalte van belang is, wat is dan een veilige waarde voor de corrosietoeslag afhankelijk van het zoutgehalte voor damwanden met een waterkerende functie³ (levensduur 100 jaar)?
3. Indien het zoutgehalte niet van belang is, wat is dan een veilige waarde voor de corrosietoeslag voor stalen damwandplanken met een waterkerende functie (levensduur 100 jaar)?
4. Wat is de optimale instandhouding van bestaande damwanden die in contact staan met de bodem?

³ De waterkerende functies van een damwand bestaan uit een stabiliteitsscherm, een erosiescherm en een scherm om kwel en piping tegen te gaan.

Aanvullende vragen die opgepakt worden in deze studie zijn:

- Is het **zoutgehalte** van de bodem en/of grondwater van belang?
- Hoe kan een **extrapolatie over 100 jaar** worden gemaakt naar de corrosie, en daarmee samenhangend corrosietoeslag? (Achtergrond is de indruk dat de corrosiesnelheid afneemt als de duur van blootstelling toeneemt.)
- Wat is de oorzaak van de **spreiding** die wordt gevonden voor de corrosiesnelheid van stalen voorwerpen in de bodem?
(Deze spreiding komt ook voor per locatie of binnen één studie.)

1.4 Plan van aanpak

De werkzaamheden van het onderzoek bestaan uit verschillende onderdelen. Het eerste onderdeel is een literatuurstudie naar gerapporteerde resultaten over corrosie van stalen planken in de bodem. Deze planken dienen verticaal in de bodem te staan, tweezijdig met grond belegd te zijn, al geruime tijd in de bodem te staan en dus blootgesteld te zijn aan de lokale omstandigheden in de bodem. Daarbij is dankbaar gebruik gemaakt van internationale literatuur. Vooral in de Scandinavische landen blijkt de afgelopen jaren veel onderzoek uitgevoerd te zijn naar corrosie van stalen planken in de bodem.

Het tweede onderdeel is een praktijkonderzoek uitgevoerd in westelijk Nederland. Op verschillende locaties zijn stalen palen of planken getrokken en geïnspecteerd. Inspectie heeft bestaan uit het maken van foto's om eventuele corrosie visueel vast te leggen en uit het meten van de dikte. De gemeten dikte is vergeleken met de dikte tijdens plaatsing. De afname in dikte is een maat voor de corrosie als gevolg van de blootstelling gedurende de tijdsperiode dat het voorwerp in de bodem heeft gestaan.

De werkzaamheden zijn begeleid door een Expertgroep Corrosie. De expertgroep heeft bestaan uit deskundigen op het gebied van corrosie. De discussies tijdens de drie bijeenkomsten van de expertgroep zijn bijzonder vruchtbaar geweest en hebben mede bijgedragen aan de resultaten. De samenstelling van de expertgroep is opgenomen in Bijlage C.

1.5 Leeswijzer

De bevindingen van de werkzaamheden zijn in verschillende hoofdstukken en bijlagen gerapporteerd. Hoofdstuk 2 gaat in op stalen damwanden. De toepassingsvormen en verschillende aspecten verbonden aan dergelijke toepassingsvormen komen aan bod.

Hoofdstuk 3 gaat in op het proces van corrosie. Daarbij komt aan bod wat corrosie is, waarom staal corrodeert, evenals de verschillende vormen van corrosie en de factoren die corrosie beïnvloeden. Hoofdstuk 4 gaat in op de normen die in Nederland, maar ook internationaal, worden gehanteerd in het omgaan met corrosie.

De kern van de rapportage wordt ingenomen door Hoofdstuk 5 en Hoofdstuk 6. Hoofdstuk 5 gaat in op de resultaten van de literatuurstudie. Effecten van omgevingsfactoren, waaronder het zoutgehalte, op de snelheid van corrosie komen daarbij aan bod. Ook wordt een statistische beschrijving gegeven van de orde-grootte en het tijdsverloop van de corrosiesnelheid. Hoofdstuk 6 gaat in op de resultaten van het recent uitgevoerde praktijkonderzoek. De resultaten van een viertal locaties komen daarbij aan bod.

De bevindingen van literatuuronderzoek en het praktijkonderzoek worden samengebracht in Hoofdstuk 7. Dit hoofdstuk bevat het advies over corrosietoeslag en tevens wordt een

vergelijking gemaakt tussen dit advies en meetdata uit het praktijkonderzoek uitgevoerd in 2013 en uitgevoerd in dit kader. Hoofdstuk 8 gaat ten slotte in op de conclusies en aanbevelingen.

De nationale normen en richtlijnen zijn opgenomen in Hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk is ook een kort overzicht opgenomen van internationale normen. Een uitgebreider overzicht van de internationale normen is opgenomen in Bijlage A.

Een uitgebreide verzameling literatuur is geraadpleegd. Een overzicht van de geraadpleegde literatuur is opgenomen in Bijlage B.

De werkzaamheden zijn begeleid door een Expertgroep Corrosie. De namen van de leden van deze groep staan vermeld in Bijlage C. De groep is drie keer bij elkaar geweest. In deze bijlage wordt ook ingegaan op de gehouden evaluatie die na afloop van de derde bijeenkomst is gehouden.

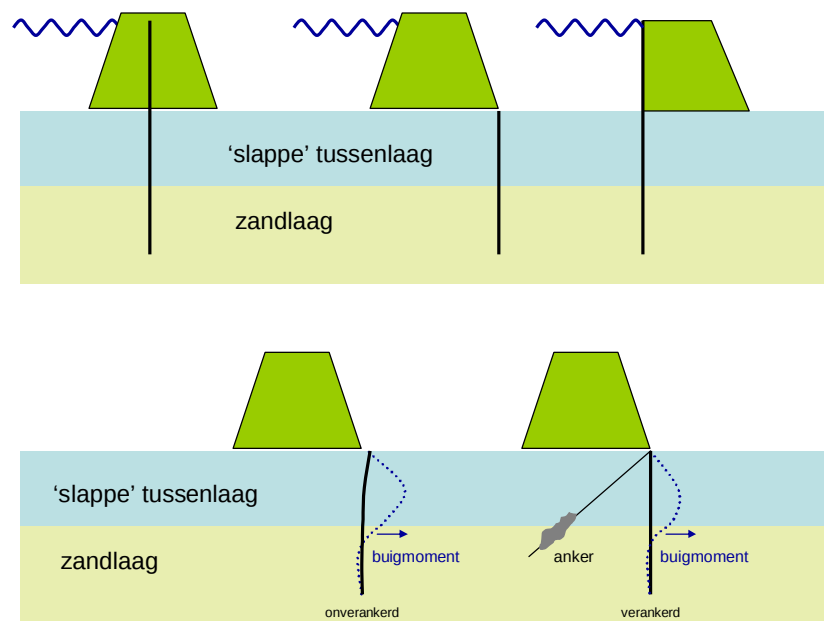
De geadviseerde norm is mede afhankelijk van de ligging van de grondwaterspiegel en fluctuaties van de ligging. In Bijlage D is daarom ingegaan op deze twee facetten.

2 Stalen damwanden

2.1 Toepassing van stalen damwanden

Stalen damwanden worden in Nederland veelal toegepast als stabiliteitsscherm bij dijkversterking. Op plaatsen waar een dijklichaam niet voldoende sterkte heeft en de ruimte ontbreekt voor de aanleg van een stabiliteitsberm, wordt een stalen damwand gebruikt om de integriteit of standzekerheid van de waterkering te garanderen. Instabiliteit van een kering komt veelal voort uit aanwezigheid van slappe lagen in de ondergrond.

Planken van damwanden hebben meestal een lengte van 10 tot 25 meter en de dikte varieert typisch tussen 9 en 20 mm. De planken staan aan de onderkant veelal in een (Pleistocene) zandlaag over een diepte van enkele meters. Typische toepassingen zijn weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Typische bodemopbouw in een Nederlandse situatie waar stalen damwandplanken worden toegepast. Tevens is een impressie gegeven van het buigmoment in de plank voor een onverankerde en verankerde situatie

Damwanden kunnen los geplaatst worden in een stevige zandlaag, maar ze kunnen ook van een verankering voorzien worden. Een dergelijke verankering bevindt zich in de regel 1 tot 1,5 meter onder de bovenkant van de damwand. De dikte en type van een damwand worden gedimensioneerd op het **maximale buigend moment** en de maximale vervorming die ze moeten kunnen opbrengen. Het maximale buigend moment ligt bij een verankerde damwand in de regel halverwege de zandlaag en de verankering. Bij een onverankerde damwand zal het moment lager liggen.

De planken van een damwand worden in de grond gedreven door middel van heien, trillen of drukken. Om damwanden en verankering aan te brengen wordt in de grond vaak een sleuf gegraven die daarna weer wordt aangevuld met grond.

Tussenzandlagen kunnen voorkomen in de 'slappe tussenlaag'. Als gevolg van een betere waterdoorlatendheid, kan stroming van grondwater optreden in een tussenzandlaag. Bij plaatsing van een damwand als stabiliteitsscherm wordt veelal getracht deze stroming niet af te sluiten en daarom wordt om de vier à vijf planken een plank in de damwand weggelaten of wordt de damwand gestaffeld uitgevoerd. Als de damwand ook functioneert als kwelscherm wordt deze grondwaterstroming wel afgesloten.

Bij dijkversterking wordt beperkt gebruik gemaakt van combiwanden. Een combiwand is een damwand waar buispalen afgewisseld worden met (een aantal) planken. De buispalen zorgen dan voor de sterkte en de planken zorgen voor een afgesloten geheel.

Stalen damwandplanken zijn in Nederland op vele plaatsen toegepast. De ontwikkeling van stalen damwanden heeft plaatsgevonden vanaf het einde van 19^e eeuw. In eerste instantie waren het U- en I-profielen. Deze profielen waren met klinknagels gekoppeld. Van het begin van de 20^{ste} eeuw kwamen de eerste stalen damwandprofielen. Volgens een productfolder van Arcelor-Mittal, was het eerste grote stalen damwandproject in 1908 in Sluis Black Rock Harbour VS (platte damwand profielen). Verdere ontwikkelingen waren warmwalsen van U- en Z-profielen, en de ontwikkeling van slotverbindingen in de jaren daarna. Toepassing op grotere schaal vindt in Nederland pas na 1945 plaats. Stalen damwandplanken zijn ook toegepast bij de Stormvloedkering in de Hollandse IJssel. Deze stormvloedkering is gebouwd in de periode 1954 – 1958. Regelmatig komt het voor dat planken die al lang in de bodem hebben gestaan, moeten worden getrokken omdat ze in de weg staan. Een enkele keer wordt de gelegenheid geboden om een getrokken plank te inspecteren op corrosie en dus ook op de afname in dikte.

2.2 Wrijvingswarmte bij plaatsing planken

Het inbrengen van damwandplanken gebeurt door heien, trillen of drukken. Voor het inbrengen is kracht nodig. Deze kracht wordt gebruikt om aan de onderkant van de plank een opening in de bodem te maken voor de plank en om de wrijvingsweerstand tussen plank en bodem te overwinnen.

Warmte wordt gegenereerd bij het overwinnen van de wrijvingsweerstand. Deze warmte zorgt voor een verhoging van de temperatuur van de plank en de directe omgeving ten opzichte van de bodemtemperatuur van 10 à 11 °C. Informatie over het temperatuureffect is niet beschikbaar. Verwacht wordt dat deze warmte binnen een relatief korte tijd dissipeert als gevolg van diffusie in de bodem die met water verzadigd is. Deze tijdsperiode zal relatief kort zijn in vergelijking met de tijdsperiode waarin de plank wordt blootgesteld aan het proces van corrosie in de bodem.

2.3 Toleranties in dikte planken

Stalen damwandplanken worden gewalst. Gedurende dit proces slijten de walsen. Daarom moeten ze na verloop van tijd worden vervangen. Slijtage van de walsen zorgt er voor dat de dikte van de plank toeneemt. Aanbrengen van nieuwe walsen levert dan weer een dunnere plank op.

De leverancier van planken is uiteraard gebonden om planken met een voorgeschreven dikte te leveren. Dit wordt ook wel de nominale dikte genoemd. Voor het ondervangen van de variatie in dikte van een plank door het walsen wordt van oudsher gewerkt met toleranties (Wallin, 1978).

De tolerantie in dikte van een stalen damwandplank is opgenomen in een NEN-norm; de NEN-EN 10248/2 (NEN, 1995). Deze norm geeft aan dat de walsafwijking van de nominale dikte van een plank maximaal 0,5 mm mag bedragen bij planken dunner dan 8,5 mm en maximaal 6% van de dikte van een plank bij planken dikker dan 8,5 mm.

2.4 Staalkwaliteit

Verschillende kwaliteiten van staal zijn aanwezig in de praktijk. Vaak wordt in de literatuur gerapporteerd dat staal een betere weerstand tegen corrosie heeft dan (grijs) gietijzer. Onderzoek uitgevoerd door 'Canada's National Research Council' heeft daarentegen aangetoond dat de snelheid van corrosie van alle 'ferro-materialen' onder de grond ongeveer gelijk is (Naranayan et al., 1992).

In Duitsland is onderzoek uitgevoerd naar de staalkwaliteiten Fe 360, Fe 430 en Fe 510. Ook diverse andere gebruikelijke staalsoorten, met een treksterkte van minimaal 510 N/mm², zijn in het onderzoek betrokken. De materialen zijn geplaatst in de bodem. Er zijn geen significante verschillen waargenomen in het corrosiegedrag van deze materialen (Stüdemann, 1960) en (Stüdemann, 1966).

Verdere informatie over het effect van verschillende materiaaltoepassingen in de bodem is te vinden in de rapportage van onderzoek uitgevoerd door de Centrum Ondergronds Bouwen (COB) naar het gedrag van staal en composiet staalbeton in tunnelconstructies (COB, 2000).

3 Proces van corrosie

3.1 Wat is corrosie?

Corrosie is de aantasting (letterlijk 'aanvreten') van materialen door blootstelling aan de omgeving. De bekendste verschijningsvorm van corrosie is de aantasting van het oppervlak van metalen in combinatie met de reductie van zuurstof in een vochtige, atmosferische omgeving. Voorbeelden van corrosie zijn het roesten van ijzer en het groen uitslaan van koper.

In een winter waarin veel zout is gestrooid, zien auto's er vies uit. Vuil en pekkel hechten zich op de laklaag en kunnen het metaal bereiken door defecten in de coating (bijvoorbeeld krassen of snijkanten). Het roesten van ijzer wordt versneld door blootstelling aan vuil, vocht en zout.

Havens, bijvoorbeeld in Rotterdam, zijn vaak begrensd door een kade. De kadeconstructie bestaat uit een stalen damwand of een combiwand waar de damwand op regelmatige afstanden is aangevuld met een buispaal. De constructie is het meest gevoelig voor corrosie op de water/lucht lijn, de zogenaamde splash-zone. De aanwezigheid van zout water en de wisseling in omstandigheden, onder invloed van een getijbeweging, een stroming van het water of door golven veroorzaakt door wind of schepen, bevordert corrosie.

Bovenstaande voorbeelden laten zien dat onder omstandigheden waar zout en vocht samenkomen, corrosie een serieus probleem kan zijn. Deze voorbeelden domineren het maatschappelijke bewustzijn over corrosie: 'zout leidt tot roest'. Deze veronderstelling hoeft echter niet onder alle omstandigheden geldig te zijn: effecten in lucht of water op corrosie kunnen anders zijn dan in de bodem. Wanneer de invloed van zout op corrosie in de bodem anders is dan in lucht of water, vereist dit een omschakeling in denken.

3.2 Waarom corrodeert staal?

In de natuur komt ijzer vooral voor in ijzererts als Fe(II) of Fe(III). Er is energie nodig om ijzererts om te zetten naar Fe(0). Van Fe(0) kunnen stalen voorwerpen worden gemaakt. Fe(0) bezit veel energie die er voor zorgt dat er een drijvende kracht is om te reageren. Ze doet dat door elektronen af te staan en omgezet te worden in Fe(II) of Fe(III).

De corrosie van staal verloopt via een redoxreactie. Deze reactie bestaat uit twee deelreacties die gekoppeld zijn:

1. IJzer (0) geeft 2 elektronen af en gaat in oplossing als tweewaardig, opgelost ijzer. Dit is de zogenaamde oxidatiereactie, en ijzer(0) is hier de zogenaamde reductor, dat wil zeggen een verbinding die elektronen afstaat.



2. Bij een andere reactie worden elektronen opgenomen. Hierbij zijn verschillende reacties mogelijk, bijvoorbeeld de reductie van zuurstof:



Onder zure omstandigheden kan de reductie van protonen naar waterstof plaatsvinden:



Reactie (3.3) is de reductiereactie, en de stoffen die hierbij reageren treden op als oxidator, dat wil zeggen verbindingen die elektronen opnemen.

De drijvende kracht voor deze reactie wordt geleverd door het potentiaalverschil behorende bij de oxidatie- en reductiereacties. In het geval van een sterke reductor (ijzer) en een sterke oxidator (zuurstof) is er voldoende energie om de reactie te laten verlopen.

Corrosie van staal in de ondergrond treedt op wanneer aan de volgende drie voorwaarden wordt voldaan:

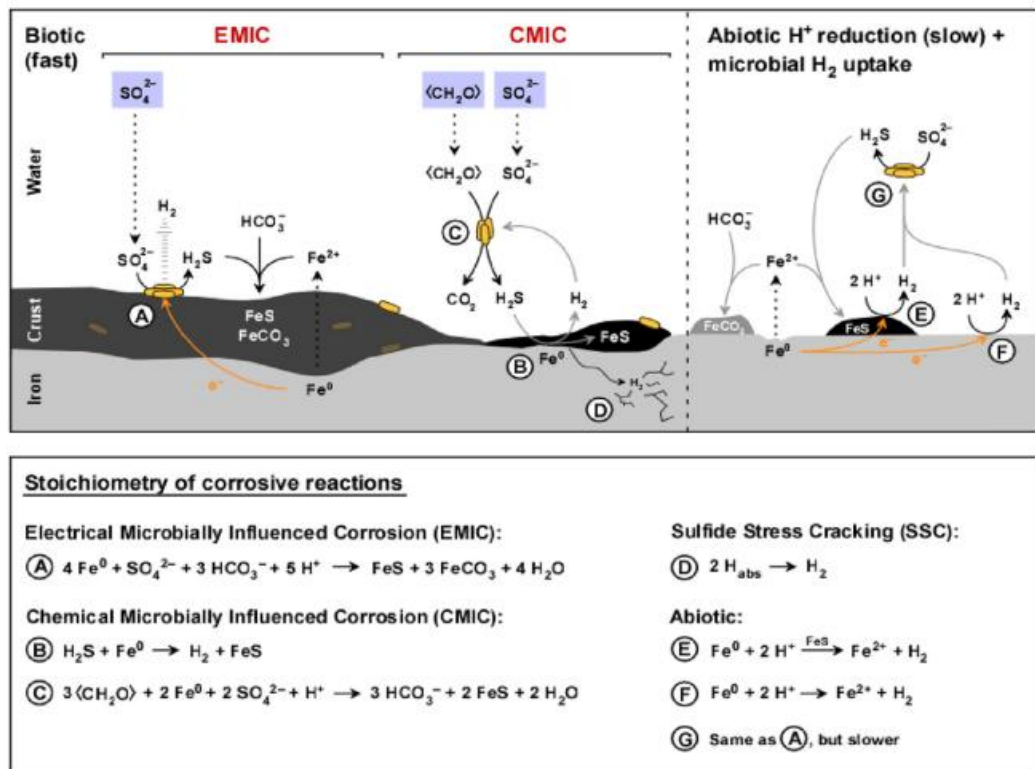
1. Een redoxkoppel moet aanwezig zijn die de gekoppelde oxidatie- en reductiereactie spontaan laat verlopen(bijvoorbeeld ijzer en zuurstof).
2. Een verbindingspad moet beschikbaar zijn tussen de anode en de kathode waarlangs een elektrische stroom (elektronen) loopt (geleidend materiaal, bijvoorbeeld staal).
3. Een elektrolyt moet in contact staan met de anode en de kathode (bijvoorbeeld een waterige oplossing die zout bevat).

Alleen op deze manier is een volledige stroomkring en een drijvende kracht beschikbaar voor het transport van elektronen en ionen.

3.3 Vormen van corrosie

Wat betreft de locatie van de corrosie wordt een onderscheid gemaakt tussen **uniforme corrosie**, die over het gehele aangetaste oppervlak plaatsvindt, en **lokale corrosie**, die zeer lokaal plaatsvindt en waarbij putjes kunnen ontstaan. Voor de sterkte van damwanden is uniforme aantasting van het meeste belang, daarom zal de nadruk op uniforme aantasting liggen.

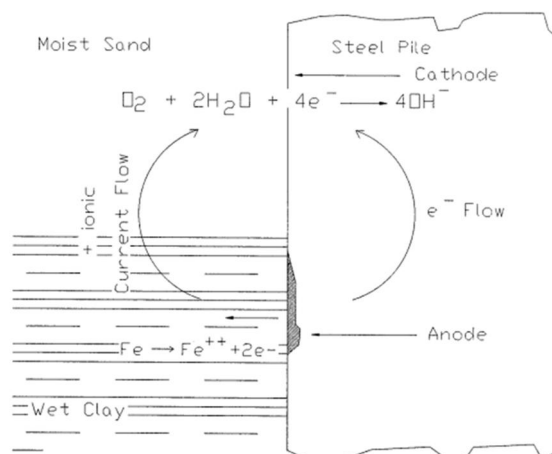
Micro-organismen kunnen van invloed zijn op corrosie van staal. De optredende corrosie wordt dan aangeduid als **microbiële corrosie (Microbiologically Influenced Corrosion, MIC)**. Vooral sulfaat reducerende bacteriën, de zogenaamde SRB's, zijn zeer agressief, maar ook andere bacteriën kunnen voor problemen zorgen, zoals ijzer oxiderende bacteriën. De kans op microbiële corrosie door SRB's wordt verhoogd in een anaeroob milieu bij aanwezigheid van sulfaat en organisch materiaal. De laatste twee zijn voedingsstoffen voor deze micro-organismen (Enning & Garrelfs, 2014). Microbiële corrosie kan zeer lokaal en snel optreden.



Figuur 3.1 Veronderstelde mechanismen van microbiële corrosie door sulfaat reducerende bacteriën (SRB's) (Enning & Garrelfs, 2014)

Naast deze verschijningsvormen kan corrosie ook in andere vormen worden ingedeeld. De meeste hiervan zijn voor dit onderzoek minder relevant en zullen achterwege gelaten worden. Wel maken we de volgende opmerkingen:

- Verschillen in macro chemische omstandigheden in de omgeving kunnen leiden tot een verschil in elektrische potentiaal. Een voorbeeld is opgeloste zuurstof in het milieu van een stalen damwand. Bij oppervlaktewater is sprake van een zone waar, door de waterbeweging of door golven, variatie aanwezig is in omstandigheden met als mogelijk gevolg een verschil in elektrische potentiaal in verticale richting. De optredende corrosie wordt wel aangeduid met **macro-cel corrosie**. (zie bijvoorbeeld Beavers & Durr, 1998).



Figuur 3.2 Macro-cel corrosie door een verschil in elektrische potentiaal in de bodem (Beavers & Durr, 1998)

- Contact tussen verschillende staalsoorten kan overeenkomen met twee stukken staal met een verschillende potentiaal, waardoor er een stroom kan gaan lopen, en er dus corrosie kan ontstaan (**galvanische corrosie**). Dit effect kan benut worden door een minder edel metaal (bijvoorbeeld zink) met een te beschermen stuk staal te verbinden: in dat geval corrodeert het zink wel, maar het staal niet (de zinkanode offert zich op). Dit wordt kathodische bescherming genoemd.
- **Opgelegde stromen** kunnen de corrosiesnelheid beïnvloeden. Dit kan gunstig zijn (bijvoorbeeld kathodische bescherming) of ongunstig (lekstromen en zwerfstromen).

Zoals eerder is aangegeven kan corrosie van staal in de grond verschillende vormen aannemen. Vaak zal sprake zijn van zogenaamde uniforme corrosie. Het oppervlak van een getrokken plank die gedurende enkele decennia in de grond blootgesteld is geweest aan omgevingsinvloeden, ziet er egaal uit. De dikte van de plank is dan over de gehele lengte min of meer uniform afgenomen.

Het kan ook voorkomen dat in een bepaalde zone de afname in dikte door corrosie groter is dan elders op de plank. Dan kan bijvoorbeeld het gevolg zijn van andere bodemomstandigheden of van de ligging van de grondwaterspiegel. De lengte van een dergelijke zone is dan in overeenstemming met de verticale afmetingen van dit gebied in de ondergrond. Het oppervlak van een getrokken plank ziet er op het oog dan nog steeds egaal uit.

Het kan lokaal echter ook voorkomen dat er gebieden op de plank met putcorrosie aanwezig zijn. De dikteafname door putcorrosie is groter dan die van de gemiddelde corrosie. De afmetingen van een dergelijk gebied met putcorrosie zijn meestal klein in verhouding tot de afmetingen van de plank (Törnqvist, 2005).

De belangrijkste chemische vorm van corrosie in de bodem is door reactie met zuurstof (reactie 3.2). Onder zuurstofloze, zure omstandigheden kan ook reactie met zuur optreden (reactie 3.3), maar deze reactie verloopt zeer traag (Enning & Garrelfs, 2014). Daarnaast kan microbiële corrosie optreden, onder invloed van sulfaat reducerende bacteriën of andere bacteriën (Enning & Garrelfs, 2014).

3.4 Omgevingsfactoren die corrosie beïnvloeden

Uit het bovenstaande moge duidelijk zijn dat corrosie een elektrochemisch proces is dat sterk afhankelijk is van fysische factoren, zoals transport. Vanuit de onderliggende mechanismen is de invloed van een aantal bepalende factoren goed te begrijpen. We bespreken hieronder de invloed van de belangrijkste factoren, zoals deze door verschillende publicaties genoemd worden (Palmer, 1989), (Escalante, 1989), (Manning & Morley, 1982), (Beaver & Durr, 1998).

- Onverstoorde vs. verstoorde bodem.
In verstoorde grond is er meer zuurstof beschikbaar dan in onverstoorde grond. De verwachting is dan ook, dat de corrosiesnelheid in verstoorde grond hoger is.
- Transport.
Grondwaterstroming kan lokaal zorgen voor aan- of afvoer van reactieproducten, en daarmee voor een verhoging van de corrosiesnelheid.
- Elektrische bodemweerstand, zoutgehalte, chlorideconcentratie.
Zoals beschreven, is corrosie een elektrochemisch proces, waarvoor een gesloten stroomkring en een goed geleidend medium een voorwaarde is. Een medium met een hoger zoutgehalte heeft een lagere weerstand, en kan leiden tot een hogere

corrosiesnelheid. Chloride heeft naast dit zouteffect ook een chemische invloed op corrosie. Chloride-ionen kunnen namelijk uitwisselen met hydroxide-ionen in de laag bestaande uit ijzer(hydr)oxide. Deze uitwisseling kan corrosie versnellen. (zie Tabel 3.1).

- **Temperatuur.**

Corrosie is een chemisch en fysisch proces, en deze processen kunnen versneld worden bij aanwezigheid van een hogere temperatuur.

- **Zuurgraad.**

Bij corrosie van staal is bekend dat dit sneller kan verlopen bij een lage pH (Figuur 3.3).

- **Redoxpotentiaal.**

Corrosie is een redoxproces, en kan dus beïnvloed worden door de redoxpotentiaal van de bodem in de directe omgeving.

- **Sulfidegehalte.**

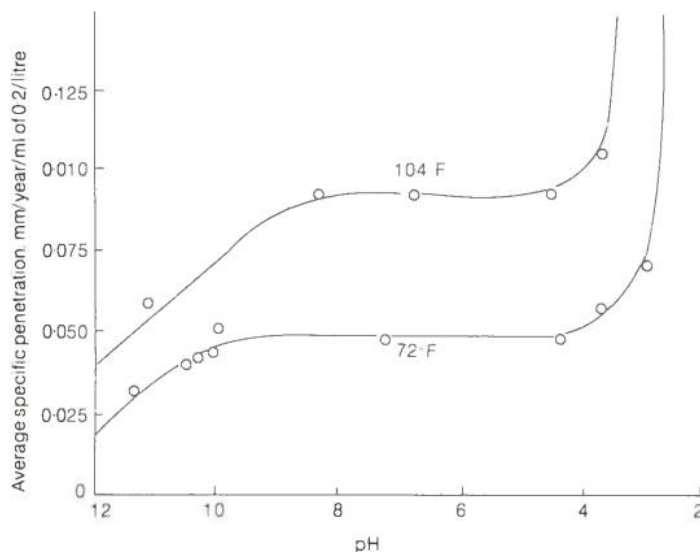
Sulfide kan direct corrosief werken op staal, maar kan ook een teken zijn van de reductie van sulfaat en daarmee van microbiële corrosie.

- **Beschikbaarheid van sulfaat en organisch materiaal.**

Sulfaat en organisch materiaal zijn voedingsstoffen voor sulfaat reducerende bacteriën en kunnen daardoor microbiële corrosie stimuleren.

- **Wisselende omstandigheden.**

Wisselende omstandigheden kunnen de optelsom vormen van meerdere bovengenoemde risicofactoren. Een voorbeeld waarbij dit optreedt, is Versnelde Laagwatercorrosie (Accelerated Low Water Corrosion, ALWC). Deze vorm van corrosie komt voor bij de laagwaterlijn van mariene kadewanden. Hier vormt de hoge zoutconcentratie al een risicofactor. Daarnaast wordt het oppervlak afwisselend blootgesteld aan zuurstofloze en zuurstofrijke omstandigheden. Hierdoor wordt een mogelijk beschermende laag telkens weer afgebroken, waardoor de corrosie extra snel kan optreden.



Figuur 3.3 Effect van pH op de corrosiesnelheid van staal (Manning & Morley, 1982)

TABLE 1—*Relationship between soil resistivity and soil corrosivity [3].*

Soil Resistivity, ohm-cm	Classification of Soil Corrosiveness
0 to 900	Very severe corrosion
900 to 2 300	Severely corrosive
2 300 to 5 000	Moderately corrosive
5 000 to 10 000	Mildly corrosive
10 000 to > 10 000	Very mildly corrosive

Tabel 3.1 *Effect van bodemweerstand op de corrosiesnelheid (Escalante, 1989)*

In theorie kunnen al deze factoren een rol spelen. De daadwerkelijke invloed van deze factoren op corrosie van damwanden in grondwater zal door de literatuurstudie en het praktijkonderzoek moeten worden aangetoond.

4 Normen en achtergrond

4.1 Nationale normen en richtlijnen

De belangrijkste in Nederland gehanteerde normen voor corrosietoeslag voor ondergrondse damwanden zijn beschreven in de Handreiking Constructief Ontwerpen (TAW, 1994) en de CUR Richtlijn 166 over Damwandconstructies (CUR Bouw en Infra, 2012), die overeenkomt met de Eurocode 3 (2007).

De Handreiking Constructief Ontwerpen (Tabel 4.1) neemt aan dat de snelheid van corrosie constant is over de blootstellingsduur want de corrosietoeslag neemt evenredig toe met de tijd. Corrosietoeslag is groter bij aanwezigheid van organisch materiaal in de vorm van veen (10 mm). Voor omstandigheden onder zout grondwater is zelfs sprake van een forse corrosietoeslag van 30 mm.

Grondsoort / grondwater	Dubbelzijdige corrosietoeslag (mm)	
	Levensduur 50 jaar	Levensduur 100 jaar
Zand / zoet water	0,5	1,0
Veenhoudende klei / zoet water	2,5	5,0
Veen / zoet water	5,0	10,0
Zand / zout water	15,0	30,0

Tabel 4.1 Handreiking Constructief Ontwerpen (ENW / TAW, 1994)

De CUR Richtlijn 166 maakt onderscheid in snelheid van corrosie gedurende de blootstellingsduur want de corrosietoeslag varieert in de tijd (Tabel 4.2). In beide tabellen wordt onderscheid gemaakt in type bodem (zand, klei of veen), in zoet of zout grondwater, in zure of verontreinigde ondergrond en in geroerde (onverdicht) versus ongeroerde grond.

Ondergrond / bodemopbouw	Dubbelzijdige corrosietoeslag				
	Beoogde levensduur (jaar) ⁴				
	5	25	50	75	100
Ongeroerde schone bodem	0,00	0,60	1,20	1,80	2,40
Verontreinigde bodem, geroerde grond	0,30	1,50	3,00	4,50	6,00
Zure bodem (veen, moeras)	0,40	2,00	3,50	5,00	6,50
Onverdichte grond (klei, zand) ²⁾	0,36	1,40	2,40	3,40	4,40
Onverdicht, agressief ophoogmateriaal (bodemas, slakken, sintels)	1,00	4,00	6,50	9,00	11,50

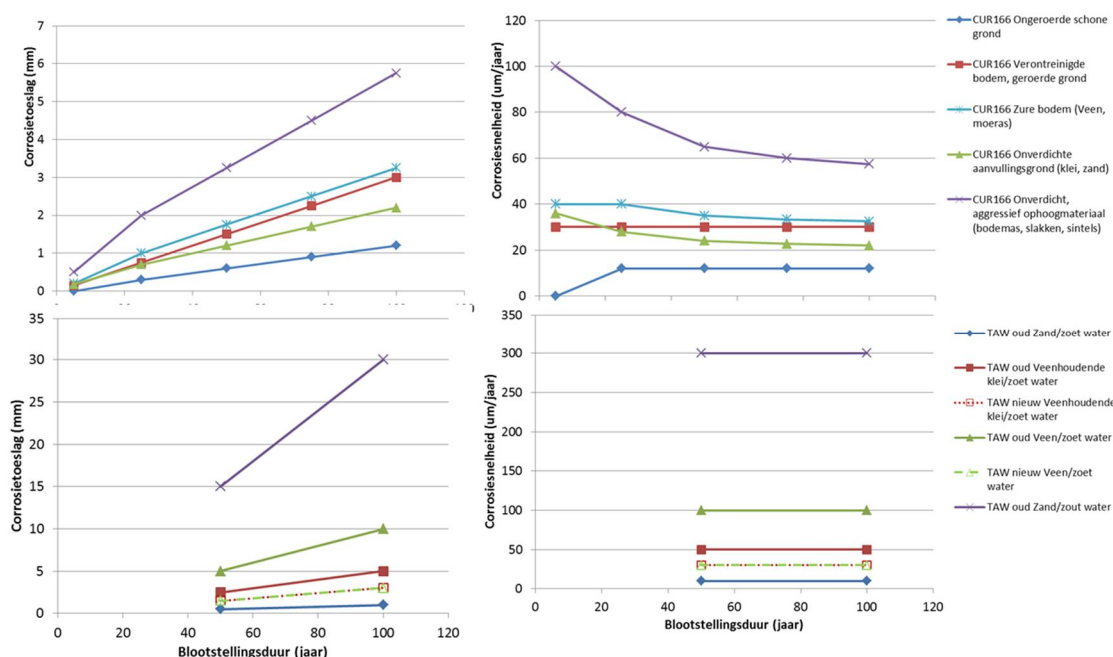
Tabel 4.2 Aantasting (mm) van damwanden in bodem en ophogingen met of zonder grondwater (CUR Bouw en Infra, 2012)

De Handreiking Constructief Ontwerpen gebruikt één literatuurreferentie als toelichting op de toeslagwaarde van 30 mm voor toepassing in zout grondwater. Deze referentie heeft betrekking op corrosie door contact met zeewater dat als een worst case gezien wordt. In de Handreiking staat duidelijk aangegeven, dat de waarden voor corrosietoeslag voorlopig een

⁴ De getallen voor een levensduur van 5 en 25 jaar zijn afgeleid van metingen. De andere getallen zijn door extrapolatie tot stand gekomen.

eerste benadering is: 'Nader onderzoek en discussie zal in de toekomst moeten leiden tot een algemeen aanvaarde norm'.

De waarden voor corrosietoeslag en de bijbehorende corrosiesnelheid zijn grafisch uitgezet (Figuur 4.1). Let op dat deze corrosiesnelheid berekend is door de corrosietoeslag te delen door de blootstellingsduur: deze corrosiesnelheid is dus een gemiddelde waarde gedurende de periode van blootstelling.



Figuur 4.1 Corrosietoeslagen en bijbehorende corrosiesnelheden volgens CUR 166 en Handreiking Constructief Ontwerpen. In CUR 166 is sprake van 'enkelzijdig' en in Handleiding Constructief Ontwerpen van 'dubbelzijdig'

Bij een beschouwing van deze normen vallen de volgende zaken op:

- De corrosietoeslagen uit de Handreiking Constructief Ontwerpen en die uit de CUR Richtlijn 166 verschillen onderling.
- De corrosiesnelheden volgens CUR Richtlijn 166 dalen met de duur van de blootstelling, de snelheden volgens de Handleiding Constructief Ontwerpen zijn echter constant.

4.2 Internationale normen

Naast deze twee normen zijn internationaal diverse methoden voorhanden voor het opstellen van een schatting van optredende corrosie als gevolg van blootstelling aan de omstandigheden in de ondergrond. Voorbeelden van internationale inschattingsmethodieken voor de mate van corrosie zijn:

- DIN 50929.
- AWWA Standard C 105-72.

Detailinformatie over internationale normen staat opgenomen in Bijlage A. De detailinformatie laat het volgende zien:

- De normen bevatten conceptueel en mechanistisch logische indelingen. De mechanismen voor corrosie en mogelijk bepalende factoren zoals we in de paragraaf hiervoor hebben samengevat, zijn op een logische manier vertaald in de indelingen.
- De indelingen lopen van inert tot zeer agressief.
- De normen blijven in de meeste gevallen beperkt tot een kwalitatieve indeling (bijvoorbeeld een indeling in 'niet corrosief', 'corrosief' en 'sterk corrosief').
- Alleen de Duitse DIN-norm geeft ook een kwantitatieve schatting van de snelheid van corrosie.
- In de DIN 50929 is chloride een relatieve milde parameter ten opzichte van bijvoorbeeld sulfide.

Verder valt op dat alle normen een hogere corrosie berekenen als de bodemweerstand kleiner is dan 1.000 Ohm cm. Dit is in overeenstemming met de eerder beschreven mechanismen van corrosie. De aanwezigheid van sulfide valt in alle indelingen samen met een verhoogd risico op corrosie.

5 Corrosie van damwanden - literatuurgegevens

Een overzicht van de belangrijkste verzamelde artikelen met praktijkgegevens over corrosie van stalen damwandplanken is samengebracht in Tabel 5.1. Voor alle in hoofdstuk 4 genoemde factoren zijn meerdere literatuurbronnen voorhanden. Data zijn voorhanden over effecten van een blootstellingsduur over een periode tot circa 60 jaar, hoewel het grootste gedeelte van de data een kortere blootstellingsduur heeft.

Bron	Locatie	Blootstellingsduur (jaren)	Omgevingsfactoren	Chloride (mg/L)	Bodemweerstand (ohm cm)
Romanoff, 1962	Turcot Yard, Montreal, Canada	7-12	Verstoring, bodemtype, geleidbaarheid, blootstellingsduur		345-11.000
Manning & Morley, 1981	Groot-Brittanie	12-46	Blootstellingsduur, bodemtype		
Ohsaki, 1982	Japan	2-10	Chloridegehalte, grondwaterstroming, pH, verstoring, bodemtype, overgangen, blootstellingsduur		1-1.000
Fisher & Bryhn, 1989	Marien sediment, Noorwegen	1	Geleidbaarheid, organisch materiaal, verstoring, temperatuur (laag)		50-250
Camitz & Vinka, 1989	Zweden	4	Grondwaterspiegel, zandopvulling, pH, bodemtype, blootstellingsduur.	20-2.200	1.670-56.900
Escalante, 1992	Turcot Yard, Montreal, Canada	2,8-12,9	Grondwaterspiegel, blootstellingsduur, geleidbaarheid, pH		450-1.170
Wong & Law, 1999	Singapore	22	Verstoring, sulfaat, chloride, pH, geleidbaarheid, temperatuur (hoog)	16-59	50.000 – 70.000
Decker, 2008	Salt lake city, US	34-38	Bodemtype, geleidbaarheid, pH, cation/anion concentraties, grondwaterniveau, blootstellingsduur	18-444	150.000 – 300.000
Törnqvist, & Lehtonen, 1999; Törnqvist, 2005	Meta-analyse	0-60	Staalsoort, bodemtype, grondwaterstand, organische stof, vochtgehalte, bodemweerstand, pH, blootstellingsduur		

Tabel 5.1 Voornaamste literatuur geraadpleegd over corrosie van stalen damwanden na langdurige blootstelling

De studies uitgevoerd door Törnqvist & Lehtonen (1999) en Törnqvist (2006) omvatten de resultaten van een zeer groot aantal onderzoeken. Een aantal van deze onderzoeken overlapt met gegevens uit andere bronnen, vermeld in Tabel 5.1. De twee artikelen van Törnqvist omvatten dan ook de meeste gegevens en zullen als vertrekpunt worden genomen bij de analyse. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van gegevens uit andere bronnen als dat aanvullende informatie oplevert.

De database van Törnqvist omvat meetdata van staven, planken en ankers die geruime tijd in de ondergrond aan de lokale omstandigheden waren blootgesteld. De omstandigheden en de duur van de blootstelling varieert. De database is vervolgens gebruikt om causale verbanden te leggen tussen het aanwezig zijn van bepaalde omstandigheden in de ondergrond en de mate van corrosie. Een selectie van de bronnen waarop de analyse van Törnqvist gebaseerd is, staat vermeld in Tabel 5.2.

Auteur	Land	Bodem	Aantal stalen	Factor van invloed op corrosie
--------	------	-------	---------------	--------------------------------

			voorwerpen	pH	Bodem- weerstand	Bodem type	Tijd
Sandegren (1988)	Zweden	Onverstoord	75 staven	o	o	-	o
Tungesvik (1975)	Noorwegen	Onverstoord	16 planken ⁵ en 15 staven	-	-	-	-
Ohsaki (1982)	Japan	Onverstoord	126 staven	o	o	O	x
Romanoff (1962, 1969)	USA	Onverstoord	54 planken ⁶	o	o	O	-
Rönholm et al. (1987)	Finland	Onverstoord	staven	o	o	O	
Leppänen (1992)	Finland	Onverstoord / Verstoord	7 locaties	(x)	(x)	-	-
Korhonen et al. (1987)	Finland	Verstoord	duizenden ankers	o	(x)	-	-
Camitz & Vinka (1989)	Zweden	Verstoord	180 platen en staven	x	-	X	o

x heeft effect
o heeft geen effect
- geen conclusie te trekken
Blanco cel is niet bekeken

Tabel 5.2 Literatuur geraadpleegd door Törnqvist met vermelding van specifieke omstandigheden aanwezig in de bodem en de duur van blootstelling

In de volgende paragraaf is een analyse uitgevoerd op de corrosiegegevens en wordt ingegaan op de orde-grootte van de corrosiesnelheden, het effect van blootstellingsduur, en het effect van omgevingsparameters, inclusief de concentratie aan opgeloste zouten in het grondwater, waaronder chloride.

5.1 Orde-grootte corrosiesnelheid en invloed blootstellingsduur

De totale database van Törnqvist bevat 500 waarnemingen waarvoor ook relevante omgevingsparameters bekend waren (Tabel 5.3). Iedere waarneming is verbonden met een bepaalde duur van blootstelling. Na trekking van een wand is de afname in dikte vastgesteld. De afname in dikte gedeeld door de duur van blootstelling levert een waarde op voor de gemiddelde snelheid van corrosie gedurende de blootstellingsduur. De aanname is daarbij dat sprake is van uniforme corrosie. Deze waarde voor de gemiddelde corrosiesnelheid is vervolgens lineair geëxtrapoleerd naar een blootstellingsduur van 100 jaar (Figuur 5.1).

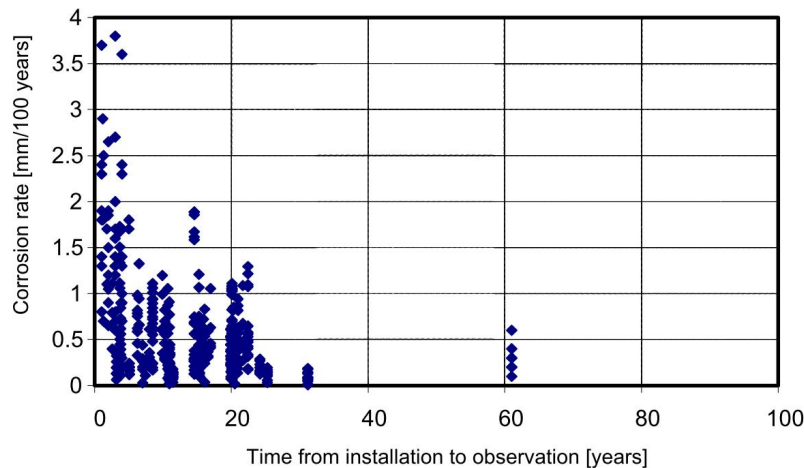
De data laten zien dat de snelheid van corrosie initieel hoog is en vervolgens afneemt naarmate de duur van blootstelling toeneemt. De oudste beschikbare data kennen een blootstellingsduur van ongeveer 60 jaar. Gemiddeld bedraagt de snelheid van corrosie dan minder dan 1 mm per 100 jaar, ofwel 10 µm/jaar (enkelzijdig). Omgerekend liggen alle corrosiesnelheden tussen de 5 en 50 µm/jaar. Dit wordt bevestigd door andere bronnen, zoals Decker (2008) en Ohsaki (1982). Ook de afname van de corrosiesnelheid met de tijd wordt bevestigd door deze en andere bronnen. Er zijn twee fasen te onderscheiden: een eerste fase met een hoge corrosiesnelheid en daarna een fase met een lagere

⁵ De originele dikte van de plank is onbekend.

⁶ Gebruikte damwanden / damwanden waarvan oorspronkelijke afmetingen onbekend waren.

corrosiesnelheid. De afname van de corrosiesnelheid met de tijd wordt waarschijnlijk veroorzaakt door twee processen:

1. Uitputting van aanwezige zuurstof.
2. Vorming van een beschermende laag van corrosieproducten waar de ionen door heen migreren (Ohsaki, 1982).



Figuur 5.1 De snelheid van uniforme corrosie als functie van de tijd (enkelzijdig) (Törnqvist, 2005). De gemeten snelheid is lineair geëxtrapoleerd naar 100 jaar

Bij deze gegevens moet worden aangetekend dat maar een beperkt aantal metingen een blootstellingsduur kennen van iets meer dan 60 jaar. De meest meetdata hebben echter betrekking op een blootstellingsduur van 30 jaar of korter. Bij een grote spreiding in resultaten kan dit leiden tot een op het oog schijnbaar hogere corrosiesnelheid bij een kortere blootstellingsduur dan bij een langere duur.

5.2 Effect van omgevingsfactoren: algemene opmerkingen

Zoals gezegd kan een grote spreiding in meetdata optreden. Soms zijn grotere verschillen in corrosie aanwezig tussen de meetpunten op een plank en binnen een bodemzone, dan tussen meetpunten voor verschillende planken of voor verschillende bodemzones.

Törnqvist (1999, 2005) trekt conclusies betreffende de invloed van individuele variabelen op de corrosiesnelheid, gebaseerd op de meetdata. De conclusies komen naar voren in Figuur 5.2 en staan vermeld in Tabel 5.3.

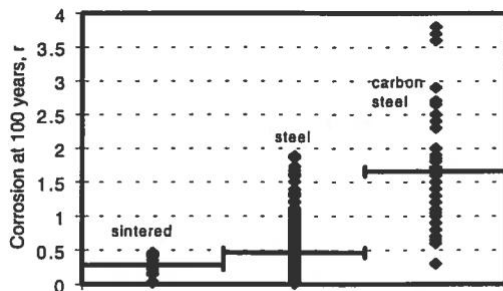


Figure 4. The effect of carbon in steel.

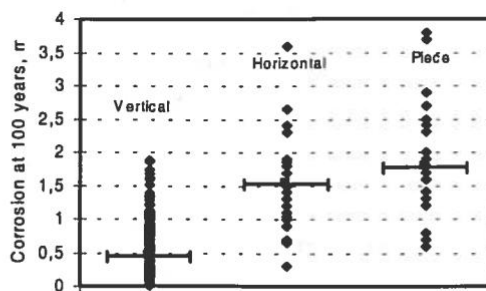


Figure 5. The effect of structure orientation.

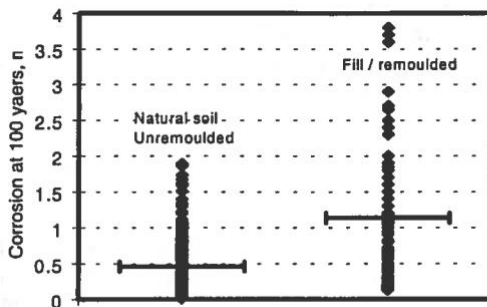


Figure 6. The effect of the soil nature.

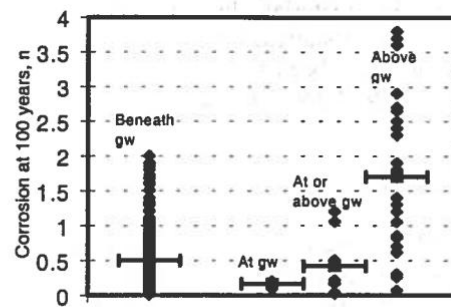


Figure 7. The effect of the ground water level.

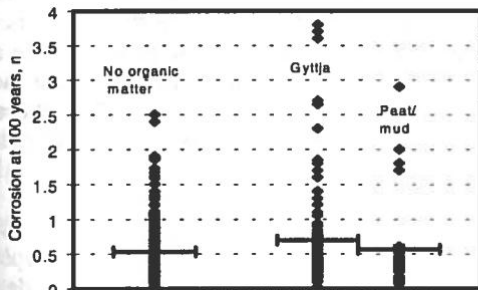


Figure 8. The effect of organic matter.

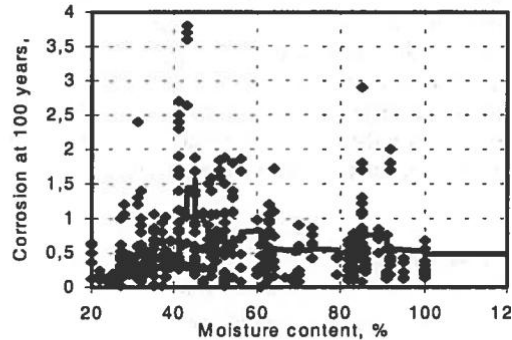


Figure 9. The effect of the moisture content.

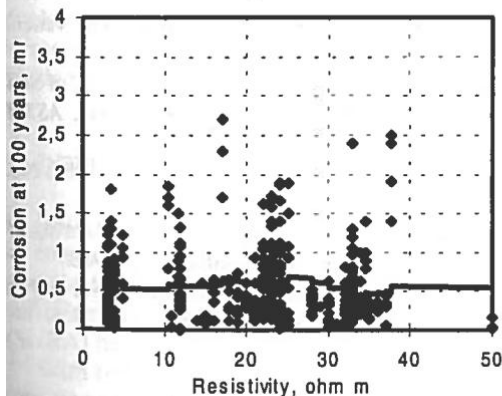


Figure 10. The effect of the resistivity.

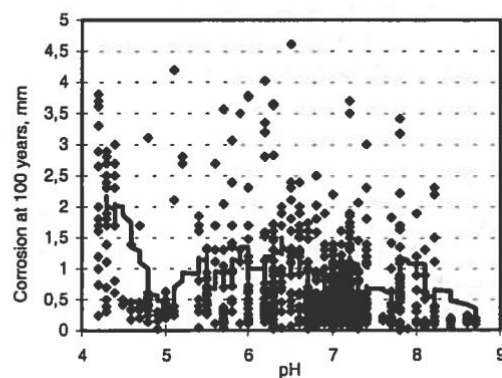


Figure 11. The effect of the acidity.

Figuur 5.2 Effect van omgevingsparameters op de corrosiesnelheid (Törnqvist, 1999)

- Een hoger gehalte aan koolstof in het staal vergroot de corrosiesnelheid.
- Ter plaatse van aanvullingen met verstoorde grond bedraagt de corrosie het dubbele vergeleken met een onverstoord bodem.
- Boven de grondwaterspiegel verloopt corrosie initieel sneller dan onder de grondwaterspiegel, daarna vertraagt de snelheid van corrosie echter en valt lager uit.
- De korrelverdeling van de bodem, en ook het type bodem (zand, klei of veen), heeft geen merkbaar effect op uniforme corrosie.
- De aanwezigheid van organisch materiaal vergroot de corrosie slechts beperkt.
- Wanneer het watergehalte 40 tot 60% bedraagt, en de bodem dus gedeeltelijk verzadigd is, is corrosie significant hoger dan in drogere of in nattere omstandigheden.
- De elektrische weerstand van de bodem heeft geen significante invloed op corrosie. De invloed van de weerstand van de bodem heeft een indirecte invloed: in bodems met een lager watergehalte dan 60% is de corrosiesnelheid hoger, en de bodemweerstand is hoger bij dit lagere watergehalte.
- Onder zure omstandigheden ($\text{pH} < 5$) kan corrosie hoger zijn.

Variabele	Significantie ⁷
1. Oriëntatie van het stalen object in de bodem	++
2. Toestand van de bodem rond het stalen object	++
3. Aanwezigheid van organisch materiaal	0
4. Gelaagdheid in de bodem	0
5. Type bodem / korrel grootte	++
6. Aanwezigheid van special materialen	0
7. Ligging ten opzichte van de grondwaterspiegel	++
8. Staal materiaal	++
9. Type van structuur (staaf, sectie, etc.)	0
10. Ouderdom van het object in de bodem (jaar)	++
11. Water gehalte van de bodem	+
12. Zuurgraad van de bodem	+ (++ als $\text{pH} < 4,5$)
13. Elektrische weerstand van de bodem	+

Tabel 5.3 Variabelen die mogelijk van invloed zijn op corrosie in de bodem, ontleend aan literatuurgegevens (Törnqvist, 2005)

Op basis van deze en andere bronnen wordt hieronder de invloed van de meest bepalende omgevingsfactoren verder toegelicht.

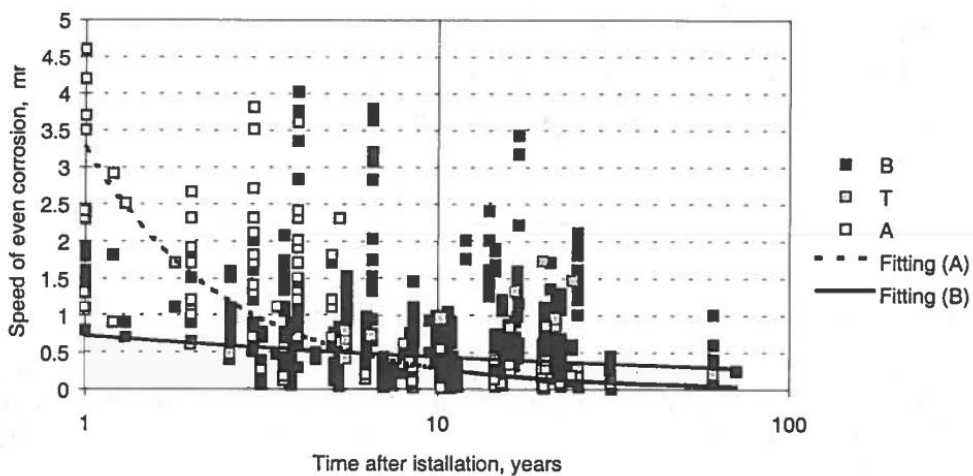
- Verstoorde grond vs. onverstoord grond.

Een stalen damwand in verstoorde (geroerde) grond, corrodeert circa twee keer zo snel als een damwand in onverstoord (ongeroerde) grond. Zie Figuur 5.2, (Törnqvist, 1999), (Escalante, 1989), (Camitz & Vinka, 1989), (Ohsaki, 1982), (Romanoff, 1962). Een verklaring is dat verstoorde grond meer zuurstof bevat en dat de zuurstof bijdraagt aan de mate van corrosie. In het algemeen zal de redoxpotentiaal van verstoorde grond ook hoger zijn (meer geoxideerd) dan van onverstoord grond.

⁷ ++ beïnvloedt corrosie significant, + beïnvloedt corrosie, 0: geen effect.

- Grondwaterstand

Boven de grondwaterstand is de corrosiesnelheid circa twee keer hoger dan beneden de grondwaterstand (Figuur 5.2) (Törnqvist, 1999; Camitz & Vinka, 1989; Ohsaki, 1982; Romanoff, 1962). Een verklaring is dat de beschikbaarheid van zuurstof in de onverzadigde zone boven de grondwaterstand hoger is dan beneden de grondwaterstand. Bovendien geldt dat boven de grondwaterstand de corrosiesnelheid eerst hoog is, en dat deze vervolgens sterk afneemt in de tijd (Figuur 5.3). Beneden de grondwaterstand is de corrosiesnelheid aan het begin veel minder hoog, maar neemt ook minder snel af.



Figuur 5.3 Snelheid van corrosie van stalen voorwerpen geëxtrapoleerd naar 100 jaar (Törnqvist, 2005). B = onder grondwatervniveau, A = boven grondwatervniveau, T = op grondwatervniveau

- Fluctuatie in de grondwaterstand

Verschillende auteurs concluderen, onafhankelijk van elkaar, dat de corrosiesnelheid het hoogst is in zones met een fluctuerende grondwaterspiegel (Decker et al, 2008), (Ohsaki, 1982), (Escalante, 1989). De verklaring is dat in deze zone de aanvoer van zuurstof benodigd voor corrosie en de afvoer van reactieproducten van corrosie, wordt gestimuleerd. Daarnaast kan in deze zone afwisseling plaatsvinden van de redoxpotentiaal. Deze afwisseling verhoogt de corrosiesnelheid. De zone met fluctuaties in de grondwaterspiegel is meestal bovenaan de damwand, en dus ondiep, aanwezig (zie Figuur 5.4), maar kan echter ook op een grotere diepte voorkomen (zie Figuur 5.5).

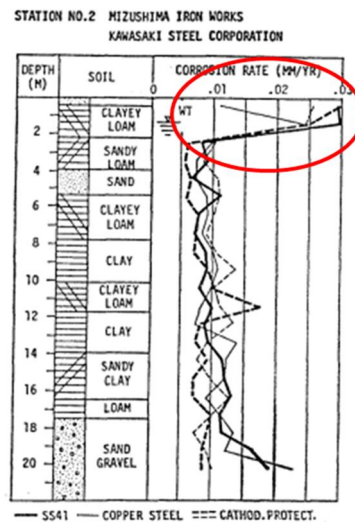


Fig. 4. Corrosion rates at Station No. 2

Figuur 5.4 Voorbeeld van voorkomen van een zone met een grondwaterbeweging aan de bovenkant van een damwand (Ohsaki, 1982)

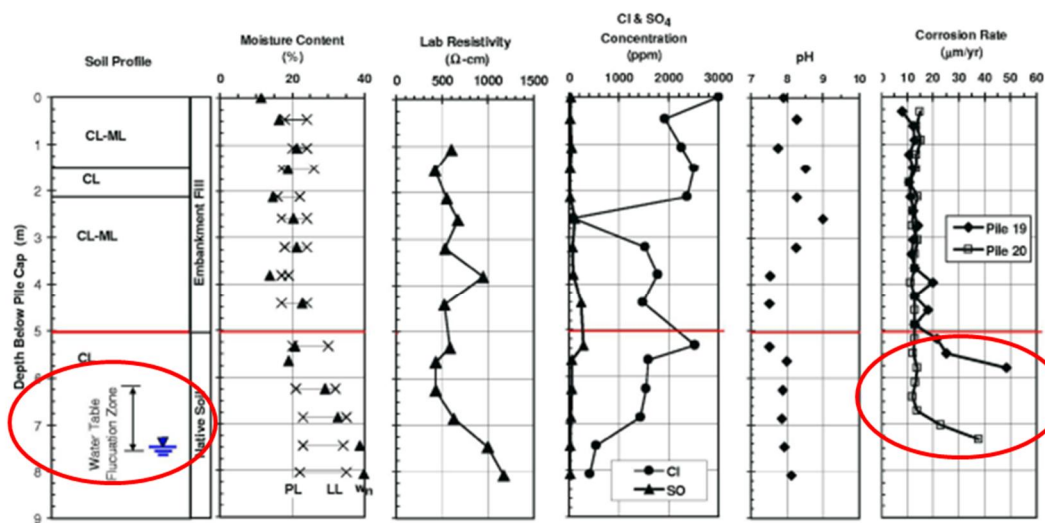


Fig. 8. Soil profile and measured soil parameters versus depth along with corrosion rates for 118th South site

Figuur 5.5 Voorbeeld van voorkomen van een zone met grondwaterbeweging aan de onderkant van een damwand (Decker, 2008)

Alle drie bovengenoemde factoren hebben hun invloed door hetzelfde mechanisme: toename van aanvoer van zuurstof zorgt voor verhoging van de corrosiesnelheid. Op basis van de bestudeerde literatuur kunnen geen duidelijke conclusies worden getrokken wat betreft de invloed van grondwaterstroming onder het grondwaterniveau op de corrosiesnelheid.

5.3 Effecten van omgevingsfactoren: zoutgehalte / bodemweerstand / chloridegehalte

Eén van de hoofdvragen van deze studie is of een duidelijk verschil in corrosie van stalen planken te verwachten is in zout grondwater ten opzichte van corrosie in zoet grondwater. In theorie zou dit kunnen via twee mechanismen.

Ten eerste draagt een hoger zoutgehalte bij aan de geleidbaarheid van het medium (elektrolyt), wat positief kan werken op het corrosieproces. Ten tweede is bekend dat chloride-ionen corrosieprocessen kunnen versnellen doordat ze auto-katalytisch uitwisselen met hydroxide-ionen aan het oppervlak van ijzerhydroxides die gevormd kunnen worden bij corrosie. Zo nemen ze corrosieproducten weg en versnellen het corrosieproces. Hoe zwaar deze processen doorwerken in de praktijk van ondergrondse corrosie aan damwanden kan eventueel aan de hand van praktijkgegevens getoetst worden.

De invloed van zout grondwater kan zich uiten via een aantal gerelateerde parameters. Omdat chloride een belangrijke bijdrage levert aan het zoutgehalte en meestal gelijk opgaat met zoutgehalte, is het in de meeste gevallen gerechtvaardigd om trends ten opzichte van zoutgehalte en chloridegehalte aan elkaar gelijk te stellen. Daarnaast wordt in veel studies effecten van de bodemweerstand als bepalende factor beschouwd. De bodemweerstand is omgekeerd evenredig met het zoutgehalte: hoe hoger het zoutgehalte, hoe lager de bodemweerstand.

De invloed van zoutgehalte op de corrosiesnelheid in een onverstoorde bodem is zeer beperkt. Zie bijvoorbeeld (Ohsaki, 1982) met Figuur 5.6, en (Törnqvist, 1999) met Figuur 5.6. In zones met grondwaterbeweging lijkt wel sprake te zijn van een toename van de corrosiesnelheid met toename van het zoutgehalte (zie Decker, 2008), met Figuur 5.7. De orde-grootte van de corrosiesnelheid blijft daarbij in alle gevallen relatief laag. Het aantal punten waarvoor een effect van zout wordt gerapporteerd is zeer klein ten opzichte van het aantal punten waarbij geen effect wordt gerapporteerd.

Geconcludeerd kan worden dat de invloed van zoutgehalte op corrosie van damwanden in de bodem beperkt is. Dit is te verklaren door het feit dat deze vorm van corrosie gelimiteerd lijkt te zijn door zeer langzame transportprocessen, die in de loop van de tijd tot steeds langzamere corrosie leiden. Ten opzichte van deze factoren speelt de zoutsterkte een zeer beperkte rol.

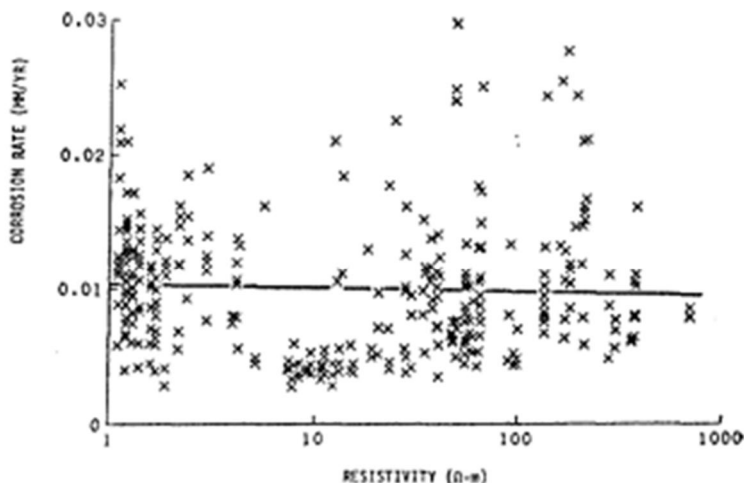


Fig. 25. Corrosion rates and resistivities

Figuur 5.6 Relatie corrosiesnelheid en geleidbaarheid zoals gevonden door Ohsaki (1982): geen duidelijk verband

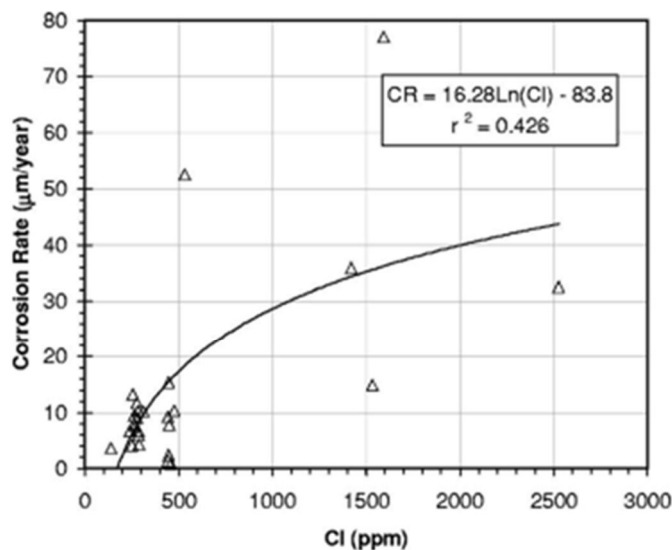


Fig. 9. Relationship between corrosion rate and chloride concentration for data in the water table fluctuation zone from Salt Lake Valley data set

Figuur 5.7 Relatie corrosiesnelheid en chloride-concentratie voor de zone met grondwaterbeweging zoals gevonden door Decker (2008): toename van de corrosiesnelheid met chlorideconcentratie

5.4 Effect van andere omgevingsfactoren

Het effect van het type bodem (zand, klei of veen) op de corrosiesnelheid is zeer beperkt; zie bij voorbeeld Figuur 5.8.

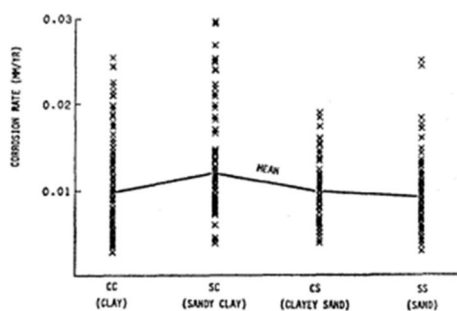


Fig. 20. Corrosion rates and soil types

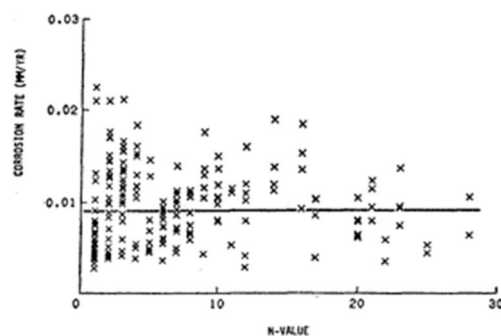


Fig. 21. Corrosion rates and *N*-values

Figuur 5.8 Relatie tussen bodemtype en corrosiesnelheid: geen duidelijk verband (Ohsaki, 1982)

De zuurgraad (pH) leidt alleen tot een verhoging van de corrosiesnelheid bij zeer lage waarden (pH < 5) (Törnqvist, 2005), (Decker, 2008). De verhoging van de corrosiesnelheid onder zure condities is te verklaren door de reactie van protonen (H^+) met elektronen uit het staal.

De aanwezigheid van organisch materiaal kan de corrosiesnelheid verhogen door stimulering van microbiële corrosie (MIC); voorbeelden van het optreden zijn gerapporteerd door Decker (2008) en Fisher & Bryhn (1989). In het geval van MIC kan de corrosiesnelheid sterk oplopen; bijvoorbeeld tot 360 μm /jaar (Fisher & Bryhn, 1989). De geraadpleegde literatuur rapporteert

weinig gevallen waar MIC voorkomt. Indien echter duidelijke aanwijzingen zijn dat MIC optreedt, dan kan de corrosiesnelheid hoog oplopen.

Het effect van de temperatuur is beperkt: er is nauwelijks effect gevonden bij een lage temperatuur (Fischer & Bryhn, 1989) dan wel bij een hoge temperatuur (Wong & Law, 1999) op de snelheid van corrosie.

5.5 Samenvatting effecten omgevingsfactoren op corrosie van staal

Literatuur is geraadpleegd over effecten van omgevingsfactoren op de snelheid van corrosie van stalen voorwerpen die tweezijdig met grond in contact staan. Samenvattend kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De corrosiesnelheid in een onverstoorde bodem is relatief laag (5 tot 50 $\mu\text{m}/\text{jaar}$ enkelzijdig) en neemt af met de blootstellingsduur.
- Factoren met een duidelijke invloed op de corrosiesnelheid zijn:
 - Positie ten opzichte van de grondwaterspiegel.
 - Fluctuatie van de grondwaterspiegel.
 - Geroerde / ongeroerde bodem.
 De corrosiesnelheid is hoger boven de grondwaterspiegel, bij een wisselende grondwaterstand, en in een geroerde bodem.
- Zoutgehalte, bodemweerstand en/of chlorideconcentratie hebben, binnen de concentraties zoals ze in de Nederlandse bodem voorkomen, geen significante invloed op de corrosiesnelheid.
- Microbiologische activiteit leidt in enkele gevallen tot hogere waarden voor de corrosiesnelheid.
- De zuurgraad (pH) verhoogt de corrosie; bij een lage pH-waarde ($\text{pH} < 5$).
- Significante effecten van andere omgevingsfactoren zijn niet aangetoond.

5.6 Statistische beschrijving van orde-grootte en tijdsverloop corrosiesnelheid

De geraadpleegde literatuur biedt een grote hoeveelheid data. De literatuur is gebruikt om te komen tot een aanbeveling voor corrosietoeslag voor verschillende beoogde levensduren. Daartoe is de statistische verdeling van deze waarden beoordeeld en het tijdsverloop van de corrosiesnelheid.

Twee hoofdbronnen zijn daar voor gebruikt. Ten eerste bieden de studies van Törnqvist (Törnqvist & Lehtonen, 1999 en Törnqvist, 2005) een groot aantal datapunten en een statistische analyse van de data. Een voordeel van de analyse van Törnqvist is, dat het een zeer groot aantal punten betreft; een nadeel is, dat de precieze herkomst niet exact te herleiden valt.

Naast deze analyse is informatie uit een groot aantal individuele bronnen voorhanden, zoals al aangegeven in Tabel 5.1. Deze literatuur is voor een deel opgenomen in de analyse van Törnqvist. Decker et al. (2008) hebben recent een soortgelijke analyse uitgevoerd als Törnqvist et al. Voordeel van deze analyse is, dat de verwijzingen naar de originele data duidelijker aangegeven zijn. Nadeel is echter, dat hierbij selectief geput is uit de data, waarbij de nadruk gelegd is op de maxima in corrosiesnelheden. We hebben deze dataset dan ook kritisch bekeken met de originele data erbij, en aangevuld met relevante data. Het overzicht van de gebruikte gegevens staat in Tabel 5.4.

Zowel Törnqvist als Decker heeft een statistische analyse uitgevoerd naar de ordegroottes en snelheidsverloop van de gegevens. De resultaten van de analyse worden vergeleken met

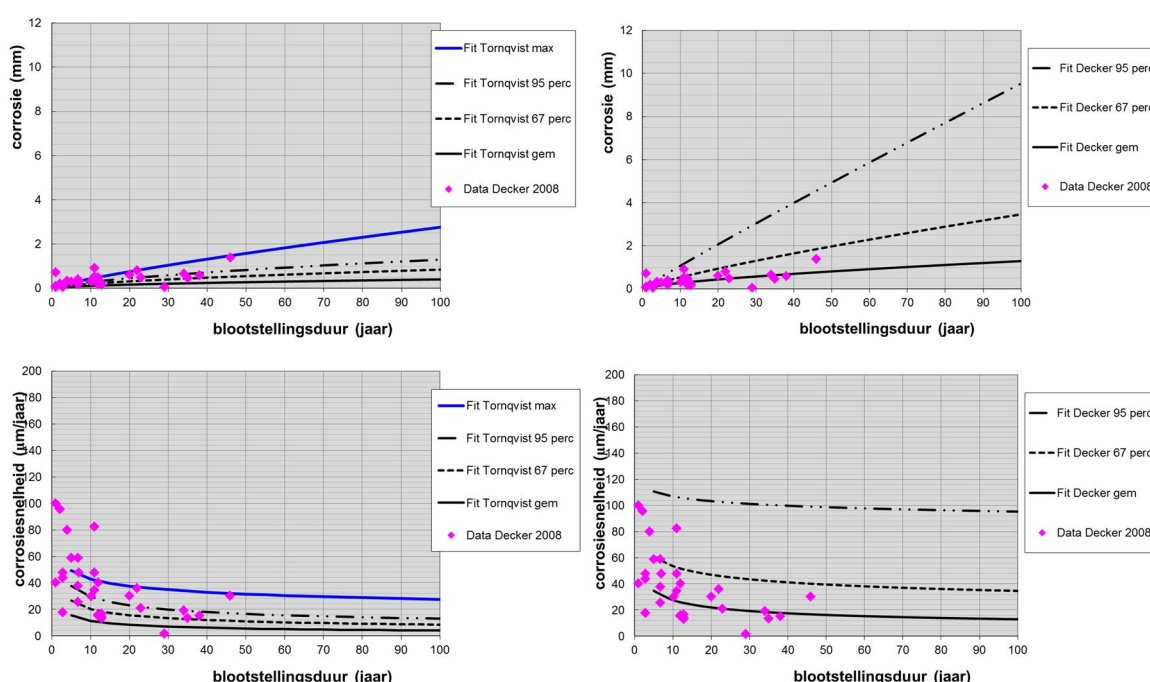
elkaar en met de huidige richtlijnen / normen uit de CUR 166 en de Eurocode 3. Zowel Törnqvist als Decker gebruikt een machtsfunctie om het verloop van de dikteafname door corrosie als functie van de tijd te beschrijven:

$$\text{Corrosie (mm)} = a * t^b \quad (5.1)$$

Waarbij t de blootstellingsduur in jaren is, en a en b constanten zijn. De constanten a en b worden door fitting met data verkregen. De waarden die door Törnqvist en Decker bij deze fit gebruikt zijn, staan vermeld in Tabel 5.4. Onderscheid is gemaakt tussen het gemiddelde, de lijn van 67 percentiel (67% van de data is kleiner dan een bepaalde waarde), de lijn van 95 percentiel (95% van de data is kleiner dan een bepaalde waarde) en het maximum.

	Törnqvist (2005)		Decker (2008)	
	a (mm)	b (-)	a (mm)	b (-)
Gemiddeld	0,0158	0,5509	0,0295	0,67
67-percentiel	0,0245	0,6176	0,0415	0,81
95-percentiel	0,0332	0,6452	0,06	0,95
Maximum	0,0335	0,8076		

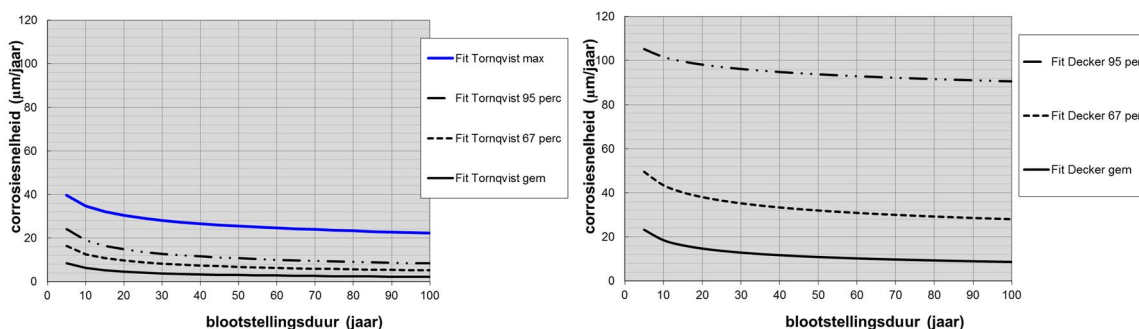
Tabel 5.4 De constanten 'a' en 'b' gebruikt voor fitting door Törnqvist en Decker voor de beschrijving van het verloop van de corrosie met de tijd. De waarden voor Decker zijn aangepast zodat deze gelden voor enkelzijdige corrosie



Figuur 5.9 Cumulatieve corrosie en gemiddelde corrosiesnelheid berekend volgens de methoden uit Törnqvist en Decker. Deze lijnen zijn vergeleken met maximale corrosiesnelheden van de data van Decker (2008)

Voor beide beschrijvingen is niet alleen de cumulatieve corrosie, maar ook de gemiddelde snelheid over de totale blootstellingsduur (is gelijk aan de cumulatieve corrosie gedeeld door de blootstellingsduur) weergegeven. Vervolgens is de actuele corrosiesnelheid berekend door de afgeleide van Vergelijking 5.1 te berekenen. Een vergelijking van deze beschrijvingen met meetdata van Decker (2008) staat weergegeven in Figuur 5.9.

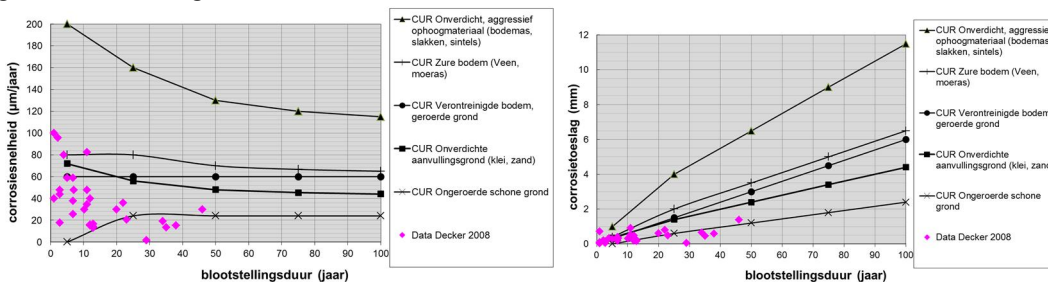
De actuele corrosiesnelheid gedurende de tijd staat weergegeven in Figuur 5.10. De beschrijving van Törnqvist geeft een lagere inschatting van de corrosie dan de beschrijving van Decker. Dit komt overeen met het feit dat de beschrijving van Decker uitgaat van maximale corrosiesnelheden, terwijl de beschrijving van Törnqvist ruwe data gebruikt.



Figuur 5.10 De actuele corrosiesnelheid berekend volgens de methoden uit Törnqvist en Decker

De ontwikkeling van de corrosiesnelheid met de tijd lijkt goed beschreven te worden door beide inschattingen. Beide beschrijvingen laten immers zien dat de actuele corrosiesnelheid na verloop van tijd erg klein wordt in vergelijking met de gemiddelde corrosiesnelheid. De daling is het sterkst aan het begin, en neemt na verloop van tijd sterk af.

Vervolgens is de corrosiesnelheid volgens de beschrijving van CUR Richtlijn 166 vergeleken met de data van Decker (2008). In het algemeen blijkt de data met een korte blootstellingsduur hoger uit te vallen dan de lijn voor een “ongeroerde schone grond”. De data hebben geen betrekking op omstandigheden die aanleiding geven tot extreem hoge corrosiesnelheden (zoals MIC), het ligt eerder voor de hand dat licht verstoorde grond, dan wel fluctuatie van de grondwaterspiegel of de ligging boven een grondwaterspiegel aanleiding geeft tot een hogere waarde.



Figuur 5.11 De CUR 166 richtlijn is vergeleken met de data van Decker (2008) met:

Corrosiesnelheid (links) en Corrosietoeslag (rechts) als functie van de blootstellingsduur

De data zijn ook vergeleken met de normen voor corrosietoeslag uit CUR 166 / Eurocode 3 (Figuur 5.11). De vergelijking laat zien dat de data uit de literatuur goed passen tussen onverstoorde, schone grond en verstoorde grond door aanvulling na graafwerkzaamheden. Aangezien de data maximale waarden betreffen, is het aanhouden van deze normen dan ook een veilige aanpak die kan steunen op een groot aantal praktijkgegevens. Het voorstel is dan ook om een aanpak te kiezen voor de corrosietoeslag, die aansluit bij de waarden uit de CUR Richtlijn 166 / Eurocode 3. Het voorstel voor corrosietoeslag, waarbij sprake is van planken die tweezijdig met grond belegd zijn, staat vermeld in Tabel 5.5.

	Corrosietoetslag (dubbelzijdig) (mm)	
	50 jaar	100 jaar
Ongeroerde, schone grond	1,2	2,4
Verstoorde grond, Grondwater beweging, Boven grondwaterspiegel	2,4	4,4

Tabel 5.5 Voorstel voor corrosietoetslag (dubbelzijdig)

Wanneer aanwijzingen bestaan voor een verhoogd risico op corrosie, dan dient daar aandacht aan te worden besteed. Dit geldt voor situaties waarbij:

- De pH kleiner is dan 5.
- Een grote kans aanwezig is op het optreden van microbiële corrosie:
 - Sulfide houdende grond.
 - Een combinatie van een hoge concentratie aan organisch materiaal en sulfaat.

Een pH kleiner dan 5 komt bijvoorbeeld voor in een gebied met 'katteklei'. Katteklei is de algemene naam voor veelal kleiige afzettingen (soms ook venig) waarin veel zwavelzuur voorkomt en vaak grote hoeveelheden ijzer, aluminium en zware metalen waardoor de grond slecht geschikt is voor landbouw. Ze zijn vooral goed herkenbaar aan de gele jarosiet-vlekken, maar ook ijzervlekken komen veelvuldig voor. De naam katteklei is een gekuiste versie van kattenstront waarmee boeren de kleur van de grond vergeleken. De Engelse benaming is zakelijker: *acid sulfate soil*.

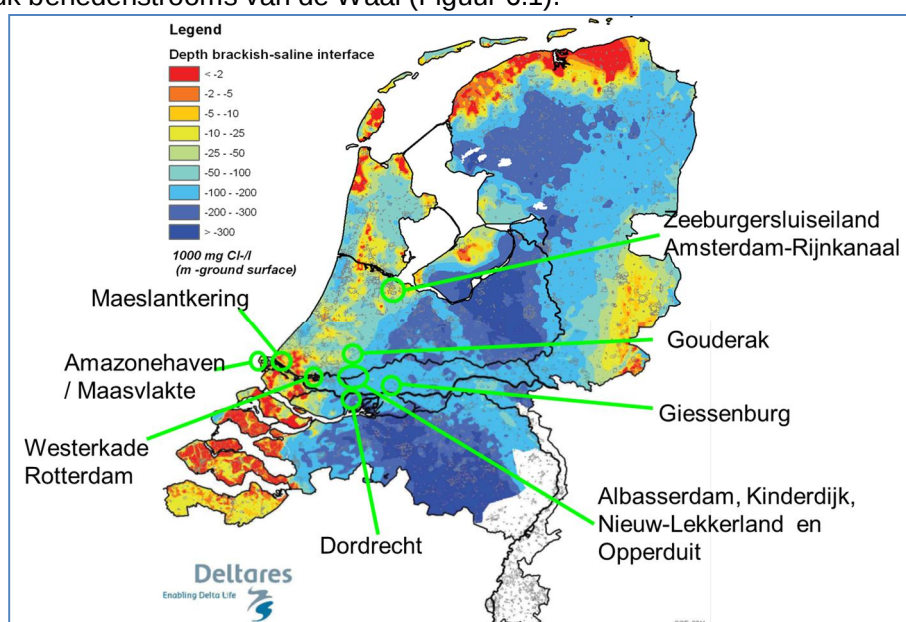
In het beoogde gebied van dijkversterking komt katteklei waarschijnlijk niet voor. Het effect van microbiële corrosie uit zich in het fenomeen putcorrosie (pitting) en treedt lokaal op. Het optreden van pitting heeft slechts een beperkt effect op de mechanische eigenschappen van een stalen damwandplank en daarom wordt daar voornamelijk geen aparte aandacht aan geschonken.

6 Praktijkonderzoek

6.1 Locaties praktijkonderzoek

Een praktijkonderzoek is uitgevoerd om gegevens te verzamelen van stalen verticale voorwerpen (voornamelijk damwandplanken) die enkele decennia in de ondergrond hebben gestaan. In eerste instantie is de aandacht uitgegaan naar planken die in een bodem hebben gestaan bestaande uit veen of humeuze kleigrond. Het afgelopen jaar is de aandacht uitgegaan naar een milieu met zout grondwater.

Het praktijkonderzoek is uitgevoerd gedurende de periode 2005 tot op heden en betreft is uitgevoerd op twaalf locaties. De twaalf locaties liggen verspreid over westelijk Nederland en met nadruk benedenstrooms van de Waal (Figuur 6.1).



Figuur 6.1 Ligging van de locaties uit het praktijkonderzoek gedurende de periode 2003 tot en met heden

6.2 Resultaten praktijkonderzoek

Vanaf 2003 heeft onderzoek plaatsgevonden naar corrosie van stalen damwandplanken in de ondergrond. In 2003 is begonnen met onderzoek naar de processen en risico's verbonden aan corrosie in de ondergrond. Vervolgens is praktijkonderzoek er bij gekomen. Tijdens het praktijkonderzoek zijn op diverse locaties getrokken planken visueel geïnspecteerd en is de actuele dikte gemeten. De bevindingen zijn vaak individueel gerapporteerd. Iedere individuele rapportage is integraal opgenomen in een aparte bijlage bij deze rapportage.

Locatie (s)	Referentie
Literatuurstudie Nederlek	(Van Meurs, 2003)
Nieuw-Lekkerland	(Van Eekelen & van Meurs, 2005)
Sliedrecht	(Van Meurs, 2006)
Dordrecht	(Van Meurs, 2007)
Opperduit	(van Meurs, 2011)
Gouderak, Giesenburg, Nieuw-Lekkerland, Kinderdijk, Alblasserdam	(Kraaijenbrink, 2013)

Tabel 6.1 Onderzoek uitgevoerd in de periode 2003 tot 2013 op het gebied van corrosie stalen damwandplanken

Praktijkonderzoek in Westelijk Nederland is recent uitgevoerd op vier locaties waar het vermoeden bestaat dat de diepere ondergrond zout grondwater bevat. Het gaat om de volgende locaties:

- Maeslantkering nabij Rotterdam.
- Amazonehaven in Rotterdam.
- Zeeburgsluiseiland in Amsterdam.
- Westerkade in Rotterdam.

De belangrijkste bevindingen staan apart beschreven in de volgende paragrafen. De individuele rapporten zijn wederom als bijlage opgenomen bij deze rapportage.

6.2.1 Maeslantkering

De Maeslantkering is gebouwd in 1994. Bij de bouw is een zestal testpalen in de bodem aangebracht. Voor plaatsing is de dikte van iedere testpaal gemeten. De palen (H-profiel) hebben een lengte van 20 meter en staan op een afstand van 3 meter van een kade-wand. De kade-wand is een zogenaamde combi-wand bestaande uit buispalen die onderling verbonden zijn door damwandplanken.

De testpalen zijn bedoeld om proefondervindelijk de dikteafname door corrosie vast te stellen. Deze dikteafname door corrosie van de testpalen wordt verondersteld representatief te zijn voor dikteafname van de voorliggende combi-wand. Van te voren was het de bedoeling om de palen te trekken nadat ze 10 en 20 jaar aan de bodem zijn blootgesteld.

Op 29 april 2008, dus 14 jaar na plaatsing van de palen, is de eerste helft van de palen getrokken. Het betreft de palen met de nummers 1, 3 en 5. De getrokken palen zijn visueel geïnspecteerd en vervolgens is de dikte gemeten. De gemeten dikte is gebruikt om op de betreffende locaties de afname in dikte te berekenen.



Figuur 6.2 Praktijkonderzoek Maeslantkering Rotterdam; ligging locaties van de drie palen

De volgende bijzonderheden zijn vastgesteld:

- De testpalen zijn gestraald en ontdaan van de walshuid voordat plaatsing is uitgevoerd.
- De testpalen zijn galvanisch verbonden met de combiwand.

Over de eerste bevindingen en bijzonderheden heeft een discussie plaatsgevonden tijdens de tweede bijeenkomst met de leden van de Expertgroep Corrosie. Gestraald staal is erg actief en zal zeker sterker corroderen. De galvanische verbinding zorgt dat het H-profiel vermoedelijk wordt 'geofferd' en bloot staat aan extra corrosie. De waargenomen afname in dikte van de verschillende testpalen zal dan ook vermoedelijk een bovenwaarde zijn van de actuele corrosie die de planken van de combiwand ondergaan.

De testpalen laten duidelijk een dikteafname zien. De waarde van de geconstateerde dikteafname verschilt per zone.

- Vanaf het maaiveld tot aan het grondwaterniveau bevindt zich de zone waarin de aanhechtende deklaag bruin verkleurd is. De dikteafname in deze zone bedraagt gemiddeld 450 μm met een maximum van 950 μm .
- Onder grondwaterniveau bevindt zich een donkergrijze deklaag op het oppervlak van de paal. Het is een brosse deklaag met een dikte van ongeveer 2 mm. Daaronder bevindt zich een vlekkerige geelgroene verkleuring. De dikteafname in de zone met grijze deklaag is sterk wisselend en lijkt geen verband te houden met de samenstelling van de bodemlagen. Gemiddeld bedraagt de dikteafname 270 μm , met uitschieters tot 870 μm .

In de ondergrond van testpaal 5 bevindt zich een grindlaag. De getijbeweging in de Nieuwe Waterweg kan zorgen voor een stroming van grondwater naar en in deze laag. Deze veronderstelde grondwaterstroming zou mogelijk de oorzaak kunnen zijn van de dikteafname van 700 μm aan de onderzijde van de paal.

Het optreden van een galvanische wisselwerking tussen de testpalen en de wand zorgt dat de resultaten als een worst case situatie beschouwd worden voor het optreden van corrosie. Een dikteafname in een normale situatie van een damwand valt dan naar verwachting lager uit.

Verdere informatie is te vinden in (Senhorst en Gulikers, 2014). Het rapport is integraal opgenomen als een aparte bijlage bij dit Rapport.

6.2.2 Amazonehaven

De Amazonehaven is onderdeel van Maasvlakte I in Rotterdam. De kademuur van de Amazonehaven is geplaatst in de jaren 1987 – 1988. In verband met een verbreding van de haven wordt momenteel een nieuwe kademuur gebouwd en komt de oude te vervallen. De oude kademuur is in 2013/2014 gesloopt en twee getrokken planken zijn nader onderzocht. Deze twee planken hebben dus ongeveer 26 jaar blootgesteld gestaan aan de omstandigheden in de bodem. De onderzochte planken maken deel uit van een combiwand.



Figuur 6.3 Praktijkonderzoek Amazonehaven Rotterdam; ligging kademuur

Het bovenste gedeelte van de planken heeft aan één zijde in de haven gestaan met blootstelling aan de atmosfeer en oppervlaktewater, en de andere zijde aan de bodem. Het onderste gedeelte van de planken heeft aan beide zijden in contact gestaan met de bodem. Voor het onderhavige onderzoek is alleen het onderste deel van de plank relevant. In 2006 is aan de waterzijde van de damwand een kathodische bescherming aangebracht, deels met aluminium opofferingsanodes en deels met opgedrukte stroom.

Plank 1 heeft over een lengte van 8 meter in de bodem gestaan. Verspreid over de plank is een harde grijze, en soms zwarte, minerale laag aangetroffen. Deze laag zat stevig vast aan de plank. Echter, deze laag ontbrak op grote delen van de plank. Daar waar deze laag ontbrak, is roestvorming vastgesteld. Na verwijdering van aanhangende lagen, bleek de zwarte walshuid nog duidelijk aanwezig te zijn met daaronder het blanke staal van de plank. De plank was egaal glad vanaf de onderkant van de plank tot circa 2 meter onder de bovenkant van de bodem. Daarboven was het oppervlak bobbeler (hamerslagachtig) met ondiepe putjes.

Plank 2 heeft over een lengte van 14 meter in de bodem gestaan. Op dit deel van de plank is wederom een harde en vrijwel aaneengesloten, grijze, en soms zwarte, minerale laag aangetroffen. De laag zat stevig vast aan het oppervlak van de plank. Op bepaalde plaatsen was de laag dikker en was het bovenste gedeelte van de laag gemakkelijk te verwijderen. De bovenste laag bestond hoofdzakelijk uit siltig en zandig, vast en soms kleiachtig materiaal. Na verwijdering van deze laag kwam een dunne grijze en soms zwarte (minerale) laag tevoorschijn. Deze laag zat wederom gehecht op het staal. Na verwijdering van de minerale laag werd de (zwarte) walshuid zichtbaar, met direct daaronder het (blanke) staal.

Op 9,4 m van de onderkant van de plank ontbrak, over een lengte van 20 – 25 cm, de minerale laag. Op dit gedeelte bevond zich een roestige plek. Het staal was lokaal aangetast en leek "aangevreten" te zijn. Als gevolg van deze oneffenheden was de dikte van het staal met de ultrasone meetapparatuur niet te meten. Visueel geschat, bedroeg de diepte van de putjes ongeveer 1 mm.

Bij naastliggende planken, en ook bij de eerder bekeken planken en buispalen, bleek nabij de onderzijde een harde, "gesinterde" laag op het oppervlak vast te zitten. Deze laag, voornamelijk bestaande uit zand, was enkele centimeters dik en kwam voor over een lengte van enkele meters.

De dikte van de plank is gemeten voor het deel dat in de bodem heeft gestaan. De dikteafname is vervolgens berekend als het verschil met de nominale dikte van de planken in

de uitgangssituatie bij plaatsing. De maximale dikteafname van plank 1 bedroeg $1.006 \mu\text{m}$. De dikteafname van Plank 2 bedroeg $816 \mu\text{m}$. De gemiddelde dikteafname van Plank 1 bedroeg $864 \mu\text{m}$ en van Plank 2 $648 \mu\text{m}$. De walsafwijking voor deze planken bedraagt $780 \mu\text{m}$. Verdere informatie is te vinden in (Kraaijenbrink, 2014b). Het rapport is integraal opgenomen als een aparte bijlage bij dit Rapport.

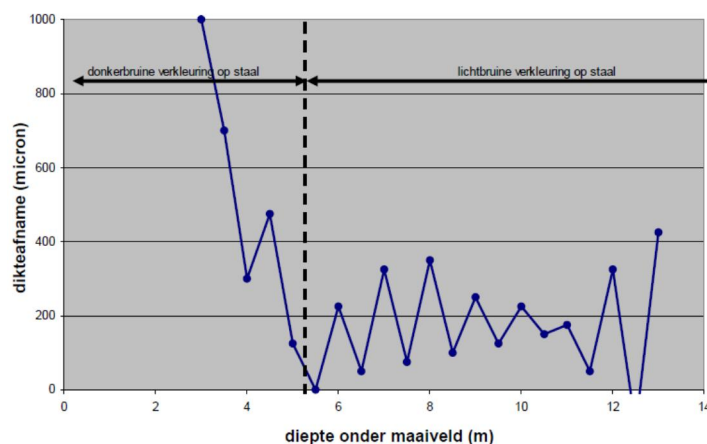
6.2.3 Zeeburgersluiseland

Het Zeeburgersluiseland is een voormalige schutsluis in het Merwedekanaal die bij de aanleg van het Amsterdam-Rijnkanaal in 1948 zijn functie verloor. Als onderdeel van de slooptactiviteiten zijn planken getrokken uit de damwand. De planken zijn afkomstig van de westoever ter hoogte van de punt van het eiland. De planken hebben dienst gedaan als oeverbeschoeiing en hebben 24 jaar in de bodem gestaan.



Figuur 6.4 Praktijkonderzoek Zeeburgersluiseland Amsterdam, locatie getrokken planken

De planken zijn visueel geïnspecteerd en de dikte is gemeten. De planken hebben over een lengte van de onderste 10 m in de bodem gestaan. Over deze zone bedraagt de gemiddelde dikteafname $270 \pm 40 \mu\text{m}$ in vergelijking met de nominale dikte. De maximale dikteafname bedraagt $450 \mu\text{m}$. Voor het profiel geldt een walsafwijking van $\pm 500 \mu\text{m}$.



Figuur 6.5 Afname in dikte van de plank. De plank heeft over de onderste 10 meter aan beide zijden in de grond gestaan

Verdere informatie is te vinden in (Senhorst, 2014a). Het rapport is integraal opgenomen als een aparte bijlage bij dit Rapport.

6.2.4 Westerkade Rotterdam

De Westerkade behoort tot het havengebied van Rotterdam (Figuur 6.6). Op het oostelijke deel bevinden zich twee secties (deel A en deel B) die grenzen aan de Nieuwe Maas. Deel A is aangelegd in 1947 bestaat uit 20 m lange planken die aan de onderkant staan op een diepte van NAP-17,45 m. Uit deel A is op 25 maart 2014 een plank getrokken. Deze plank is visueel geïnspecteerd en de actuele dikte is gemeten. Het onderste deel van de plank, over een lengte van ongeveer 12 m, heeft aan beide kanten in de ondergrond gestaan.



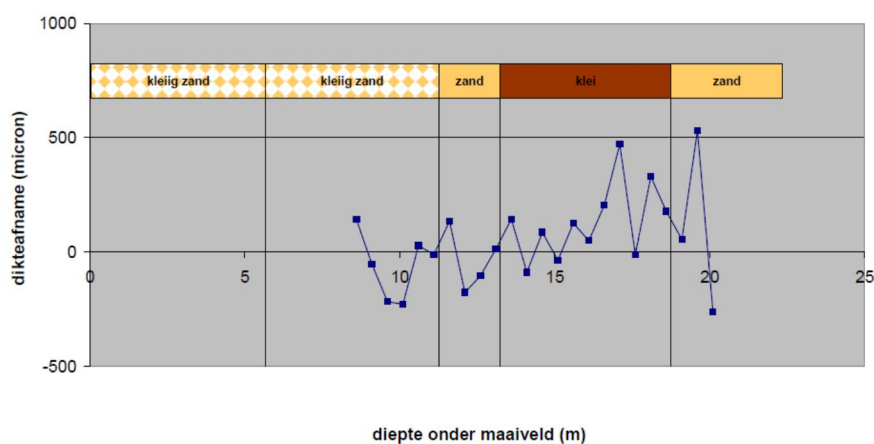
Figuur 6.6 Praktijkonderzoek Westerkade Rotterdam met de twee secties A en B

Het onderste deel van de plank kent een aan het oppervlak hechtende grondlaag over 80 tot 90% van het oppervlak. Deze grondlaag heeft een dikte van 0,5 tot 1,5 mm en is donkergrijs van kleur. Met behulp van een plamuurmes is de grondlaag van de plank gestoken. Het oppervlak van de plank ziet er vervolgens egaal en glad uit, en kleurt vervolgens vrij snel roestbruin. Vermoedelijk corrodeert het aanwezige ijzer met zuurstof uit de lucht. Op een plek op de plank is een (rond) putje aanwezig met een diameter van ongeveer 25 mm.



Figuur 6.7 Het oppervlak is egaal glad en voorzien van een minerale laag (links) met enkele kleine oneffenheden (rechts)

De diktemetingen zijn volgens protocol uitgevoerd. De afname in dikte van de plank ten opzichte van de nominale dikte is bepaald over de lengte van de plank die aan beide kanten in de ondergrond staat. De resultaten laten zien (Figuur 6.8) dat de afname in dikte gedurende de blootstellingsduur van 67 jaar maximaal 500 μm (0,5 mm) heeft bedragen.



Figuur 6.8 Afname van de dikte van de plank in vergelijking met de nominale dikte

Verdere informatie is te vinden in (Senhorst, 2014b). Het rapport is integraal opgenomen als een aparte bijlage bij dit Rapport.

6.2.5 Locaties voor mogelijk aanvullend onderzoek

Tijdens het praktijkonderzoek zijn een groot aantal partijen benaderd; waterbeheerders, havenbedrijven en aannemers. Het verzoek is daarbij gedaan om getrokken damwandplanken te onderzoeken op een afname in dikte. In eerste instantie is gezocht naar projecten waar planken getrokken worden voor 1 mei 2014. Vervolgens zijn ook projecten geïnventariseerd waar planken getrokken worden later dan 1 mei.

Tegen de afronding van het lopende onderzoek is steeds duidelijker geworden dat oude damwandplanken de grootste meerwaarde hebben voor het praktijkonderzoek vanwege de relatief beperkte invloed van de walsafwijking ten opzichte van de veronderstelde corrosie volgens Törnqvist. Bovendien ontstond de behoefte om de locaties voor het onderzoek te kiezen die zich zoveel mogelijk richten op de veronderstelde, meest corrosieve omstandigheden ('worst case').

In overleg met het Expertise Netwerk Waterveiligheid is overeengekomen om het praktijkonderzoek af te ronden met het trekken en bemeten van een aantal oude planken die meer dan 50 jaar in de grond hebben gestaan op locaties waar zout grondwater aanwezig is en/of een hoge zuurgraad. De onderstaande locaties (Tabel 6.2) bieden wellicht een goede mogelijkheid om aan deze criteria te voldoen.

Locatie	Wanneer?	Vermoedelijke blootstellingsduur (jaar)
Hollandsche IJsselkering (plank uit oude bouwkuip)	30 april 2014	60
Velzen	Najaar 2014	52
RDM werf Rotterdam	2014	80
Havenplein Den Oever	2015	50
Hollandsche IJsselkering (renovatie damwand)	2015-2016	60
Kanaal Gent-Terneuzen	2015-2017	30-70

Tabel 6.2 Locaties waar in de toekomst mogelijk planken getrokken kunnen worden

7 Synthese bevindingen

7.1 Inleiding

Het doel van de werkzaamheden is een advies opstellen betreffende de corrosietoeslag van stalen planken in een damwand bij omstandigheden in de bodem met zout grondwater. De corrosietoeslag bij plaatsing van de planken ondervangt de afname in dikte door corrosie gedurende de beoogde levensduur zodat de plank blijft voldoen aan de gestelde mechanische eisen.

De volgende gegevens zijn gebruikt om het advies te onderbouwen:

- Literatuurgegevens over corrosie van stalen damwanden onder verschillende omstandigheden en blootstellingsduur.
- Resultaten van uitgevoerd praktijkonderzoek gedurende de periode 2003 tot heden.

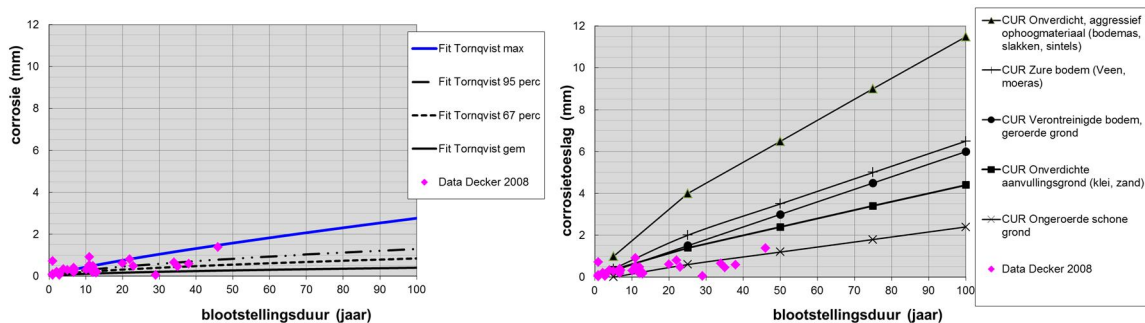
De literatuurgegevens omvatten een zeer groot aantal waarnemingen. De database van Törnqvist omvat de meeste gegevens, en wordt daarom als leidraad genomen.

Meetgegevens uit andere bronnen worden ook meegenomen, vooral waar deze aanvullende informatie bieden. De meetgegevens zijn representatief voor de omstandigheden in de bodem in Nederland en worden dan ook als belangrijk uitgangspunt genomen voor het onderbouwen van het advies.

De literatuurgegevens zijn vervolgens vergeleken met de huidige CUR Richtlijn 166 / Eurocode 3. De resultaten van het praktijkonderzoek omvatten een kleiner aantal datapunten dan het literatuuronderzoek. De meetgegevens zijn daarom gebruikt om te toetsen of de uitkomsten van het literatuuronderzoek ook opgaan voor Nederlandse situaties.

7.2 Advies corrosietoeslag

Törnqvist (2005) heeft een groot aantal data uit de literatuur gefit. De fit is vergeleken met een selectie van maximale corrosiewaarden afkomstig uit de literatuur (zie Bijlage B voor de data van Becker 2008). De fit en de meetdata zijn in één figuur opgenomen (Figuur 7.1). Ook de corrosietoeslag uit de CUR Richtlijn 166 is op een vergelijkbare wijze gepresenteerd.



Figuur 7.1 De fit van Törnqvist (links) en de normen uit de CUR Richtlijn (rechts) vergeleken met data van Decker (opgenomen in Bijlage B)

7.2.1 Advies onder normale omstandigheden

Uit een onderlinge vergelijking zijn de volgende conclusies te trekken:

- Voor ongeroerde grond⁸, geen fluctuatie van de grondwaterspiegel, en gelegen onder de grondwaterspiegel gaan de huidige normen van de CUR Richtlijn 166 geldend voor ongeroerde, schone grond goed op.
- Voor verstoorde grond, fluctuatie van de grondwaterspiegel of ligging boven de grondwaterspiegel gaan de huidige normen van de CUR166 geldend voor onverdichte (verstoorde) aanvullingsgrond (klei, zand) goed op.

De meetdata uit de literatuur opgenomen in de figuren betreffen maximumwaarden. Het aanhouden van deze normen is daarom een veilige aanpak die kan steunen op een groot aantal praktijkgegevens. Het voorstel is dan ook om een aanpak te kiezen voor de corrosietoeslag, die in overeenstemming is met de waarden uit de CUR Richtlijn 166 / Eurocode 3 (zie Tabel 7.1).

		Corrosietoeslag (dubbelzijdig) (mm)	
		50 jaar	100 jaar
1	Ongeroerde, schone grond en permanent beneden de grondwaterspiegel	1,2	2,4
2	Geroerde grond, of ligging in zone met fluctuatie van grondwaterspiegel, of ligging boven de grondwaterspiegel	2,4	4,4

Tabel 7.1 Voorstel voor corrosietoeslag

Het advies (Tabel 7.1) is van toepassing op warmgewalste stalen damwandplanken die aan beide zijden met grond belegd zijn. De corrosietoeslag is de extra dikte die aan de plank moet worden meegegeven om te compenseren voor een afname van de dikte door corrosie over een (lange) blootstellingsduur (in onderstaande tabel is 50 en 100 jaar genoemd). Het advies maakt onderscheid in een tweetal zones. Als meerdere omstandigheden uit de tweede rij aanwezig zijn (geroerde grond, of ...), dan is eenmalig de toeslag van toepassing.

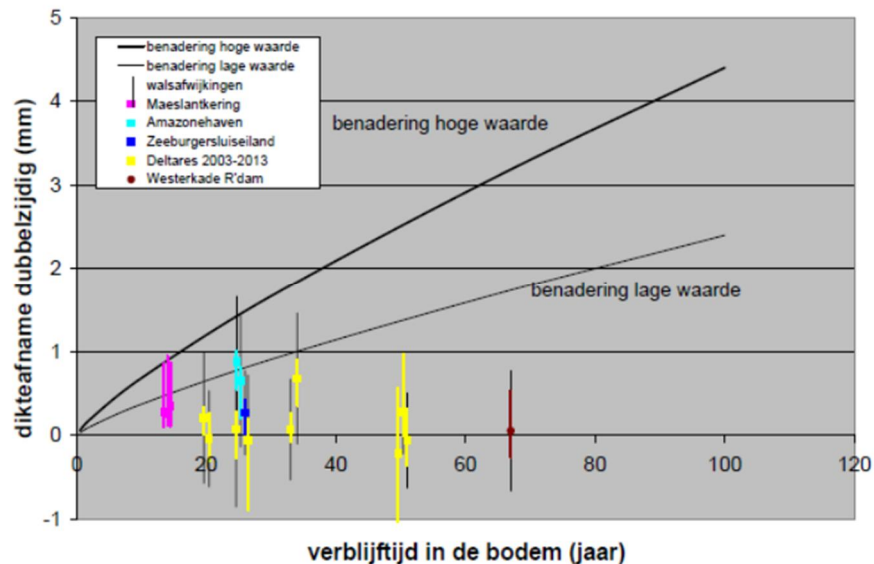
Het advies vervangt het eerdere advies over corrosietoeslag (3 mm gedurende een blootstellingsduur van 100 jaar) uit 2013 (ENW, 2013)⁹. De ligging van de grondwaterstand kan worden gebaseerd op de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) (zie Bijlage D).

Het advies betreffende corrosietoeslag kan vergeleken worden met meetgegevens afkomstig van het praktijkonderzoek (Figuur 7.2). De figuur laat zien dat de meetdata uit het praktijkonderzoek deels onder de voorgestelde norm voor ongeroerde grond ('benadering lage waarde') vallen, en deels er vlak boven ('benadering hoge waarde'). Dit komt overeen met de observatie dat de gegevens bij ongeroerde omstandigheden goed overeenkomen met een lage corrosietoeslag, en dat de gegevens bij corrosie-verhogende omstandigheden (geroerde grond, fluctuatie in grondwaterspiegel) daar iets boven uitkomen. Het is bevestigend voor de geldigheid van de hier geadviseerde normen om te zien dat de

⁸ In de uitdrukking 'ongeroerde' grond betekent ongeroerd dat de grond niet op enige manier is omgewoeld, dus 'vast' is. Het tegengesteld van 'ongeroerd' is 'geroerd'. (www.joostdevree.nl)

⁹ ENW (2013), Corrosietoeslag damwanden, Advies 13-10, 3 september 2013

praktijkgegevens niet structureel veel lager of hoger dan de literatuurgegevens en de hier voorgestelde normen liggen.



Figuur 7.2 Vergelijking tussen het advies (de getrokken lijnen) en de uitkomsten van uitgevoerd praktijkonderzoek. In de figuur staat in kleur de gemiddeld gemeten waarde en het minimum en het maximum aangegeven. Met een zwarte verticale lijn staat de walsafwijking vermeld voor zover die buiten het minimum en maximum valt

7.2.2 Onder afwijkende omstandigheden

Wanneer aanwijzingen bestaan voor een verhoogd risico op corrosie, dan moeten deze apart in beschouwing worden genomen. Dit geldt voor situaties waarbij:

- De pH lager is dan 5.
- Een grote kans aanwezig is op het optreden van microbiële corrosie:
 - Sulfide houdende grond.
 - Een combinatie van een hoge concentratie aan organisch materiaal, sulfaat en zuurstofloze omstandigheden.

Een mogelijke risicofactor voor corrosie in de ondergrond is de aanwezigheid van een lage pH ($\text{pH} < 5$), en het optreden van microbiële corrosie als gevolg van stimulering van sulfaat-reducerende bacteriën door de aanwezigheid van hoge concentraties aan sulfaat, en organisch materiaal. Onder natuurlijke omstandigheden in de ondergrond van westelijk Nederland waar dijkversterking gepland is, komt de aanwezigheid van een lage pH niet voor. Wel kan een lage pH aanwezig zijn in een gebied met bijvoorbeeld kateklei¹⁰. Omstandigheden waaronder MIC kan optreden, komt alleen lokaal voor en zorgt voor pitting op een plank. De mechanische eigenschappen van een plank zullen dan echter nauwelijks veranderen. De risicofactoren kunnen worden geschat aan de hand van de lokale bodem- en grondwatergegevens (TNO, 1997).

¹⁰ Kateklei is de algemene naam voor veelal kleiige afzettingen (soms ook weinig) waarin veel zwavelzuur voorkomt. Ze zijn vooral goed herkenbaar aan de gele jarosiet-vlekken, maar ook ijzervlekken komen veelvuldig voor.

7.2.3 Bodemlagen met verschillen in corrosiesnelheid

Het kan voorkomen, dat een damwand wordt geplaatst in een bodem waarvoor volgens de voorgestelde methodiek een verschillende corrosietoeslag geldt. Een voorbeeld is de situatie waarbij de bovenkant van de damwand zich boven de grondwaterspiegel bevindt. Een ander voorbeeld is de situatie waarbij de onderkant van de damwand in ongeroerde grond staat, en de bovenkant in geroerde grond (bijvoorbeeld opvulzand). Voor een dergelijke situatie stellen wij de volgende aanpak, die ook in de literatuur wordt teruggevonden (Arcelor, 2012), (ThyssenKrupp, 2008), voor:

1. Stel de snelheid van corrosie vast voor iedere afzonderlijke bodemlaag.
2. Stel het maximale buigend moment vast in iedere bodemlaag.
3. Bereken het minimale benodigde weerstandsmoment in iedere bodemlaag.
4. Kies het type damwandplank behorende bij het grootste benodigde weerstandsmoment.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Op basis van het uitgevoerde literatuur- en praktijkonderzoek kunnen de volgende conclusies getrokken worden ten aanzien van stalen damwanden die langdurig (meer dan 10 jaar) in contact staan met bodem.

1. Meetdata uit de literatuur laten zien dat het zoutgehalte van de bodem en/of grondwater geen relevante parameter is in de beoordeling van de benodigde corrosietoeslag.
2. Parameters die wel van belang zijn en waarvan de invloed kan worden meegenomen in de beoordeling van de benodigde corrosietoeslag, zijn: geroerde / ongeroerd grond, fluctuatie in grondwaterspiegel en de ligging ten opzichte van de grondwaterstand.
3. Zeer lage pH ($\text{pH} < 5$) en stimulering van microbiologische corrosie door sulfaat, organisch materiaal en zuurstofloze condities kunnen leiden tot verhoging van de corrosiesnelheid. De invloed hiervan is moeilijk mee te nemen in de beoordeling van de corrosietoeslag, omdat de hoeveelheid gegevens beperkt is.
4. De corrosiesnelheid neemt af met de blootstellingsduur. Initieel is de afname sterk en daarna is de afname langzamer. Deze afname kan met behulp van literatuurgegevens goed geschat worden en worden meegenomen in de corrosietoeslag.
5. De spreiding in de gevonden dikteafname door corrosie is groot, zelfs voor individuele damwanden of bodemlagen. Hierdoor is het vinden van bovengenoemde effecten voor een klein aantal meetpunten moeilijk. Door het grote aantal beschikbare meetpunten kunnen bovengenoemde effecten toch worden onderscheiden. De grote spreiding in de data betekent wel dat bij de formulering van een corrosietoeslag rekening moet worden gehouden met een onzekerheidsmarge.

Op basis van deze conclusies adviseren we de volgende corrosietoeslag voor grond/grond belegde damwanden:

	Corrosietoeslag (dubbelzijdig) (mm)	
	50 jaar	100 jaar
Ongeroerde en schone grond	1,2	2,4
geroerde grond, fluctuatie in grondwaterspiegel, boven de grondwaterspiegel	2,4	4,4

Tabel 8.1 Voorstel voor corrosietoeslag voor beoogde levensduur van 50 en 100 jaar

Deze corrosietoeslag komt overeen met de waarden die worden gegeven door de CUR166/Eurocode 3 voor respectievelijk ongeroerde schone grond en onverdichte aanvullingsgrond (zand, klei).

8.2 Aanbevelingen

Monitoring wordt aanbevolen om eventueel aanwezige risicofactoren in de bodem of in het grondwater vast te stellen in gebieden waar gebaseerd op kaartinformatie een verhoogd risico verwacht wordt.

De meetdata uit de literatuur laten zien dat aanwezigheid van zout grondwater niet significant van invloed is op de snelheid van corrosie. Deze vaststelling is een stevige verandering in vergelijking met de Handreiking Constructief ontwerpen voor zoutgrondwater. De verzamelde praktijkgegevens voor de Nederlandse situatie sluiten daarbij aan. Deze dataset is echter beperkt. Voor het vergroten van de dataset en tevens om de betrouwbaarheid van de voorgestelde corrosietoeslag te toetsen wordt een tweetal aanbevelingen gedaan.

We stellen voor een programma van monitoring uit te voeren door bij iedere dijkversterking met een stalen damwand twee losstaande planken extra te installeren. Alvorens deze losstaande planken worden ingebracht, wordt de dikte gemeten¹¹. Na bijvoorbeeld 25 en 50 jaar wordt een plank getrokken. Vervolgens wordt de getrokken plank visueel geïnspecteerd en de dikte gemeten. De afname in dikte geeft een indicatie van de resterende levensduur van de plank en dus van de constructie.

De meetdata is afkomstig van voorwerpen met een beperkte blootstellingsduur. Dat geldt voor de meetdata gevonden in de literatuur en de data beschikbaar gekomen uit het Nederlandse praktijkonderzoek. Daarom wordt voorgesteld in Nederland op zoek te gaan naar stalen damwandplanken die meer dan 50 jaar in de bodem hebben gestaan. Bij de inspectie van getrokken planken wordt geadviseerd te kijken of op de plank de walshuid nog aanwezig is. Een aanwezige walshuid duidt op geringe corrosie en elimineert daarmee de onzekerheid in dikteafname als gevolg van de walsafwijking.

De voorgestelde waarden voor de corrosiesnelheid zijn verondersteld veilige waarden te zijn. De daadwerkelijke levensduur van de constructie kan aanzienlijk langer zijn dan de ontwerp levensduur. Het gevolg is dat de constructie langer mee gaat (of zwaarder belast mag worden) en dat onderbouwd kan worden om investeringen voor verdere dijkversterking uit te stellen.

Daarnaast kan in uitzonderingsgevallen blijken dat de corrosiesnelheid hoger uitvalt. In die gevallen kan onderzocht worden welke omstandigheden dat veroorzaken; zoals lage pH waarde, microbiële corrosie of andere nu nog onbekende omstandigheden. Door metingen kan de toetsing op veiligheid volwaardiger worden uitgevoerd ten opzichte van de huidige toetsing waarin bij constructies vaak met aannames over de staat van instandhouding wordt gewerkt.

¹¹ Bij het produceren van stalen profielen, waaronder damwanden, zijn afwijkingen in dikte toegestaan als gevolg van de zogenaamde 'walsafwijking'.

9Referenties

Arcelor (2012)

Designing steel piles for marine applications

[http://www.chatham-](http://www.chatham-ma.gov/Public_Documents/ChathamMA_Projects/Designing%20Steel%20Piles%20for%20Marine%20Applications.pdf)

[ma.gov/Public_Documents/ChathamMA_Projects/Designing%20Steel%20Piles%20for%20Marine%20Applications.pdf](http://www.chatham-ma.gov/Public_Documents/ChathamMA_Projects/Designing%20Steel%20Piles%20for%20Marine%20Applications.pdf), December 17th 2012.

AWWA (2010)

Standard C 105/A21.5-10, Polyethylene Encasement for Ductile-Iron Pipe Systems

First edition approved by AWWA in 1972

Approved by ANSI, July 15th, 2010

Beavers & Durr (1998)

Corrosion of steel piling in non-marine applications

NCHRP report 408, Report

Camitz, G. & Vinka, T.-G. (1989)

Corrosion of Steel and Metal-Coated Steel in Swedish Soils - Effects of Soil Parameters.

Effects of Soil Characteristics on Corrosion,

ASTM STP 1013, V. Chaker and J.D. Palmer (Eds.)

American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 37-53

CUR Bouw en Infra (2012)

Damwandconstructies – 166,

Gouda, 6^e herziene druk, juli 2012, twee delen

COB (2000)

Stalen en composiet staalbeton Tunnelconstructies

COB, rapport M612-01, mei 2000, 212 bladzijden

DIN 50929 Part 3 (1985)

Corrosion of Metals, Probability of Corrosion of Metallic Materials Under External Corrosion Conditions, Pipelines and Structural Component Parts in Soil and Water.

Enning & Garrelfs (2014)

Corrosion of Iron by Sulfate-Reducing Bacteria: New Views of an Old Problem

Applied and Environmental Microbiology, Vol. 80, Nr. 4, p. 1226–1236.

ENW (2013).

Corrosietoeslag damwanden

Advies 13-10, 3 september 2013.

Eurocode 3 (2007)

Design of Steel Structures, Part 5: Piling.

EN, 199305:2007

Korhonen, R. et al. 1987

Harusten korroosio

Helsinki, Imatran Voima Oy, T & K-tiedotteita IVO-B-09/86. 41 s. + 22 liitettä (in Finnish)

Kraaijenbrink, P. (2013)

Praktijkonderzoek naar corrosie bij damwanden t.b.v. stabiliteitsschermen en erosieschermen in waterkeringen,

Deltares, notitie, 1206371-000-GEO-0012-gbh, 7 maart 2013, 13 bladzijden

Kraaijenbrink P. (2014a)

Meetprotocol corrosie stalen damwandplanken

Deltares, briefnotitie, 1209030-000-GEO-0003, definitief, 6 januari 2014, 8 bladzijden

Kraaijenbrink P. (2014b)

Corrosieonderzoek stalen damwandplanken Amazonehaven

Deltares, rapport, 1208944-000-GEO-0004, V02, 18 februari 2014, 37 bladzijden

Leppänen, M. (1992)

Teräspaalujen korroosio. Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Geotekniikan laitos (in Finnish)

NEN (1995)

NEN-EN 10248-2, Warmgewalste damwandprofielen van ongelegeerde staalsoorten.

Deel 2: Toleranties op vorm en afmetingen

Nederlandse Norm, Delft, 1e druk, augustus 1995, 10 bladzijden

Ohsaki, Y. (1982)

Corrosion of steel piles in soil deposits

Soils and Foundations, Volume 22, Number 3, pp. 57-76

Romanoff, M. (1962)

Corrosion of Steel Pilings in Soils

Journal of Research of the national Bureau of Standards

Part C. Engineering and Instrumentation, Vol. 66C, No. 3, July - September 1962

National Bureau of Standards Monograph 58. Reprinted in NBS Monograph 127, National Bureau of Standards NBS papers on Underground Corrosion of Steel Piling 1962-1971

Romanoff, M. (1969)

Performance of Steel Pilings in Soils

Proceedings 25th Conference, national Association of Corrosion Engineers, March 1969, pp. 14-22.

Reprinted in NBS Monograph 127, National Bureau of Standards NBS papers on Underground Corrosion of Steel Piling 1962-1971

Rönholm, M., Carpen, L. & Komulainen, H. (1987)

Korroosio maassa ja sen arvioiminen sähkökemiallisin menetelmin. Julkaisematon raportti. VTT (in Finnish)

- Sandegren, E. (1988)
Korrosion på stål - vertikalt orienterat - i jord,
Slutrapport. Statens Järnvägars huvudkontor, avdelningen för geoteknik och
ingenjörsgéologi, Meddelande nr 26. Stockholm (in Swedish)
- Senhorst, H. (2014a)
Corrosieonderzoek Zeeburgersluiseiland
Rapport RWS-GPO, 14 mei 2014, 20 bladzijden
- Senhorst, H. (2014b)
Corrosieonderzoek Westerkade
Rapport RWS-GPO, 14 mei 2014, 23 bladzijden
- Senhorst, H. en Gulikers, J. (2014)
Corrosieonderzoek Maeslantkering
Rapport RWS-GPO, 14 mei 2014, 30 bladzijden
- Stüdemann, G. (1960)
Korrosion an Stahlspundwänden
Sonderheft Korrosionstagung, Schiff und Hafen, 1960
- Stüdemann, G. (1966)
Korrosionsschutzmassnahmen bei Stahlspundwänden im wasserbau
Berlin, Die Bautechnik, 10, oktober 1966
- TAW (1994)
Handreiking Constructief ontwerpen
Onderzoek en berekening naar het constructief ontwerp van dijkversterking
Technische Adviescommissie Waterkeringen, Rapport, april 1994, 97 bladzijden
- TNO (1997)
Corrosiekaarten,
Rapport NITG, 97, 136
- ThyssenKrupp (2008)
Steel piling handbook
Report, Hamburg, July, 2008, 213 pages
- Törnqvist, J. (2005)
Corrosion of steel pipe piles; Dimensioning based on empirical material
VTT Building and Transport, Report, Espoo, June 2005, 38 pages
- Törnqvist, J. & J. Lehtonen (1999)
Estimation of corrosion rate in durability design of steel piles
Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure, Barends et al. (eds)
Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 047 7, pp 433-438
- Tungesvik, K., Moum, J. & Fischer, K.P. (1975)
Investigation of Corrosion Rates on Steel piles in Norwegian marine sediments.
Proceedings of 7th Scandinavian Corrosion Congress, Trondheim, pp. 487-502

Van Eekelen, S.J.M. en van Meurs, G.A.M. (2005)
Dijkversterking Nederlek: Ontwerpfase
Praktijkonderzoek naar corrosie van damwanden
Rapport GeoDelft, CO 393804-66, 9 september 2005, 1009 bladzijden

Van Meurs (2003)
Dijkversterking Nederlek: Ontwerpfase
Literatuurstudie naar corrosie van damwanden
Rapport GeoDelft, CO 398203.62, 23 september 2003, 36 bladzijden

Van Meurs (2006)
Rapport trekken plank terrein IHC Sliedrecht
Briefnotitie GeoDelft, CO 398204.154, 19 mei 2006, 5 bladzijden

Van Meurs (2007)
Rapportage inspectie getrokken damwandplank
Briefnotitie, CO 425180.10, 10 september 2007, 21 bladzijden

Van Meurs (2011)
Corrosie van stalen damwandplanken
Rapport, Deltares, 1204612-000, 7 november 2011, 16 bladzijden

Wallin, L (1978)
Toleranties van gewalste staalprofielen,
Bouwen met Staal, nummer 46, oktober 1978, pp. 36-38

A Internationale normen

Binnen DIN 50929 (1985) wordt een bijdrage aan een totaalscore gegeven op basis van lokale omstandigheden zoals die in de bodem aanwezig zijn. De individuele bijdrage is afhankelijk van waargenomen omstandigheden of van een gemeten concentratie. De verschillende bijdragen staan opgenomen in onderstaande Tabel B.1. kijkende naar de omstandigheden waar een -4 gescoord' wordt valt op dat dat is onder omstandigheden waar sprake is van aanwezigheid van veen of een moerasachtige bodem, een bodemweerstand kleiner dan 1.000 (kortom veel zout opgelost in het grondwater), aanwezigheid van sulfide en waterstofsulfide dan wel de aanwezigheid van sintels en cokes in de bodem.

Table 2.20 Soil Corrosivity Assessment Technique from the German Gas and Water Works Engineers' Association Standard (DVGW GW9)

<i>Item</i>	<i>Measured Value</i>	<i>Marks</i>
Soil composition	Calcareous, marly limestone	+2
	Sandy marl, not stratified sand	
	Loam, sandy loam (loam content 75% or less) marly	0
	loam, sandy claysoil (silt content 75% or less)	-2
	Clay, marly clay, humus,	-4
Ground-water level at buried position	Peat, thick loam, marshy soil	0
	None	-1
	Exist	-2
Resistivity	Vary	0
	10,000 ohm. cm or more	-1
	10,000-5,000	-2
	5,000-2,300	-3
	2,300-1,000	-4
Moisture content	1,000 or less	0
	20% or less	-1
pH	20% or more	0
	6 or more	-2
Sulphide and hydrogen sulphide	6 or less	0
	None	-2
	Trace	-4
Carbonate	Exist	+2
	5% or more	+1
	5-1	0
Chloride	1 or less	0
	100 mg/kg or less	-1
Sulphate	100 mg/kg more	0
	200 mg/kg or less	-1
	200-500	-2
	500-1,000	-3
Cinder and coke	1,000 or more	0
	None	-4
	Exist	

Soil is regarded as non-corrosive if the total of the above is 0 or higher; Slightly corrosive if 0 to -4; corrosive if -5 to -10 and very corrosive if -10 or less.

Tabel A.1 Beoordeling gebaseerd op de Duitse norm afgeleid van Gas and Water Works Engineers' Association Standard (DVGW)

Gebaseerd op bovenstaande beoordeling wordt een totaalscore opgemaakt door de individuele bijdragen bij elkaar op te tellen. De uitkomst, een typering van de corrosie en een schatter van de corrosiesnelheid.

Corrosiviteitsindex DIN-methode	Agressiviteitsklasse van de bodem	Corrosiesnelheid ¹² (µm/jaar)	Kans op optreden van	
			Egale corrosie	Putcorrosie
> 0	Weinig agressief	< 10	Uiterst groot	Uiterst klein
0	Weinig tot matig agressief	10 - 20	Ze er groot	Ze er klein
Van -1 tot en met -2	Matig agressief	21 – 40	Groot	Klein
Van -3 tot en met -4	Matig agressief tot agressief	41 – 50	Middelma tig	Middelmatig
Van -5 tot en met -7	Agressief	51 – 100	Klein	Groot
Van -8 tot en met -10	Agressief tot zeer agressief	110 – 200	Ze er klein	Groot
Kleiner dan -10	Ze er agressief	210 – 500	Ze er klein	Ze er groot
Kleiner dan -10	Bijzonder agressief	> 500	Uiterst klein	Uiterst groot

Tabel A.2 Classificatie van corrosie volgens de DIN-norm

Palmer (1989) bespreekt de AWWA Standard C 105-72. Ook hier worden punten toegekend aan waargenomen of gemeten bodemomstandigheden. De hoogste bijdrage aan de score is als de bodemweerstand lager uitvalt dan 700 Ohm-cm. Een negatieve redoxpotentialaaf levert een bijdrage van 5 aan de score.

Bodemparameter	Meetrange	Punten
<i>Weerstand (Ohm – cm)</i>		
	Minder dan 700	10
	Van 700 tot 1.000	8
	Van 1.000 tot 1.200	5
	Van 1.200 tot 1.500	2
	Van 1.500 tot 2.000	1
	Meer dan 2.000	0
<i>Zuurgraad: pH (-)</i>		
	Van 0 tot 2	5
	Van 2 tot 4	3

¹² Enkelzijdige corrosiesnelheid van onbeschermd constructiemateriaal.

Bodemparameter	Meetrange	Punten
	Van 4 tot 6,5	0
	Van 6,5 tot 7,5	0
	Van 7,5 tot 8,5	0
	Meer dan 8,5	3
<i>RedOxpotentiaal: pE (mV)</i>		
	Meer dan + 100	0
	Van + 50 tot + 100	3,5
	Van 0 tot + 50	4
	Minder dan 0 (negatief)	5
<i>Sulfide</i>		
	Positief (S^{6+} als SO_4^{2-})	3,5
	Spoorelement	2
	Negatief (S^{2-} als vrij S^{2-})	0
<i>Vochtgehalte</i>		
	Slechte drainage, steeds vochtig	2
	Redelijke drainage, over het algemeen vochtig	1
	Goede drainage, meestal droog	0

Tabel A.3 Bijdrage aan de score door Palmer (1989)

Grade	Thickness allowance (mm/yr)	Likely situation
Very low corrosive	0.00	Normal range of soils
Low corrosive	0,01	Including clays
Intermediate corrosive	0,03	Perhaps alluvium soils and silts if water flowing
High corrosive	0,08	Extreme limit for some marine clays
Very high corrosive	0,13	Unprotected steelwork in worst wind and water tidal situations

Tabel A.4 Schatting van de mate van corrosie op basis van de bodemweerstand (AWWA)

B Literatuurdata over corrosiesnelheid

Blootstellingsduur (jaar)	pH			Bodemweerstand (ohm cm)			Cl (ppm/mg/kg)			Corrosiesnelheid (µm/jaar)				Dikteafname door corrosie (µm)				Bron
	min	ma	ge mid del	mi	ma	max	gemiddeld	mi	max	averag	st	mi	max	averag	st dev	min	max	
22				5.1	6	60000	50000	70000		11	2.6	4.3	18	0.24	0.057	0.095	0.40	Wong & Law 1999
20													15				0.3	Manning & Morley 1981
12													7.5				0.09	
46													15				0.69	
29													0.7				0.02	
6.8													29.5				0.20	Escalante 1992
6.8			7			1170							12.8				0.087	
12.9			7.7			2080							6.5				0.083	
2.8			7			1170							21.8				0.061	
2.8			7.2			455							23.9				0.067	
6.8			7.4			710							18.9				0.13	
12.9			7.4			710							8.25				0.11	
2.8													8.8				0.025	
12.9													7				0.090	Ohsaki 1982
2.14										17.6	8.6		47.8	0.04	0.02		0.10	
5										13.8	6.8		29.5	0.07	0.03		0.15	
10.17										5.3	2.6		14.9	0.05	0.03		0.15	
7				7.4	8.2	3925	850	7000	0.3				23.8				0.17	Romanoff 1962
23													10.4				0.24	
11			6.9			7650	4300	11000	0.6				41.2				0.45	
11			8.1			1045	800	1290	0.5				23.8				0.26	
11						1280	950	1610	0				17.3				0.19	
12				7.7	8.4	822.5	345	1300	0.5				7.95				0.095	
34			8.2			300000			17.8				9.5				0.32	Decker et al., 2008
35			7.7			150000			256				6.7				0.23	
38			7.5			150000			444				7.7				0.29	
1	0.2	0.8					50	250				1	50				0.05	Fischer & Bryhn, 1989
1	0.2	0.8					50	250				1	20				0.02	
1	0.2	0.8					50	250				50	360				0.36	
4				5.1	8.2		1670	56900				10	40				0.16	Camitz & Vinka
12	11	20		3.6	8.5	400	50000					0.8	20				0.24	Schwerdfeger

C Expertgroep Corrosie

Het uitgevoerde onderzoek naar corrosie van stalen damwandplanken in de bodem is begeleid door een Expertgroep Corrosie. De samenstelling van de expertgroep heeft bestaan uit de volgende leden:

- Arjan Mol (TU Delft).
- Ed Reddering (TNO, vanaf 1 januari 2014 Endures).
- Henk Jonkers (TU Delft).
- Jo van Montfort (SGS-Intron).
- Joost Gulikers (RWS-GPO).
- Joost Frakking (RWS-HWBP2).
- Piet Jongbloed (HBR).
- Wybren Epema (Epema Advies).

De expertgroep is driemaal bij elkaar geweest (12 december 2013, 22 januari 2014 en 27 februari 2014). De bijeenkomsten hebben geleid tot vragen die vervolgens zijn opgepakt in het onderzoek. Van de bijeenkomsten zijn verslagen gemaakt. De discussies tijdens de bijeenkomsten zijn bijzonder vruchtbaar geweest en hebben mede bijgedragen aan de resultaten.

Na afloop van de derde bijeenkomst is een korte evaluatie uitgevoerd. De leden legden het volgende terug:

- De samenstelling van de groep was goed en evenwichtig.
- De bijeenkomsten waren inspirerend en bijzonder interactief.
- De redeneerlijn om te komen tot het advies is helder en duidelijk.

D Diepteligging grondwaterstand en fluctuatie

Diepte Grondwaterstand

Voor adequate bescherming en risicobeheersing is het van belang om de diepte van de grondwaterstand vast te stellen. In deze paragraaf is daar nader op ingegaan. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen:

- 1 QuickScan-toepassing, bijvoorbeeld in de planningsfase van nieuwe werken, of ten behoeve van risicoschattingen op regionale of landelijke schaal. Hierbij kunnen waarden voor de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) en de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) worden afgeleid uit beschikbare bodemkaarten (de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000 is digitaal beschikbaar; De Fries, 2003¹³).
- 2 Gerichte bepaling van de grondwaterstand op lokale schaal ten behoeve van aanleg van een nieuw werk of monitoring van bestaande constructies. Deze metingen kunnen worden uitgevoerd in peilbuizen met een filter die staat in het freatische grondwater.

Algemeen: fluctuatie van grondwaterstanden.

Zoals beschreven door Jansen et al.¹ verhoogt een fluctuatie van de grondwaterstand de beschikbaarheid van zuurstof en dat bevordert corrosie. De grondwaterstand kan fluctueren door verschillende oorzaken. De grondwaterstand fluctueert als gevolg van seizoensinvloeden: neerslag en verdamping. Daarnaast kunnen lokale effecten optreden door bijvoorbeeld getijdewerking (kustzone), grondwateronttrekking en drainage.

De bodemzone waarbinnen de grondwaterstand fluctueert wordt vaak aangegeven als de zone tussen de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG). Dit zijn langjarig gemiddelde waarden¹⁴. In praktijk kunnen in afzonderlijke jaren hogere c.q. lagere grondwaterstanden dan de GHG respectievelijk de GLG voorkomen. De GHG en GLG zijn echter een goed bruikbare indicatie voor de mate van fluctuatie. GHG en GLG liggen in sterk gedraineerde gebieden (o.a. West-Nederland) dichter bij elkaar dan in vrij afwaterende gebieden (Zuid- en Oost-Nederland).

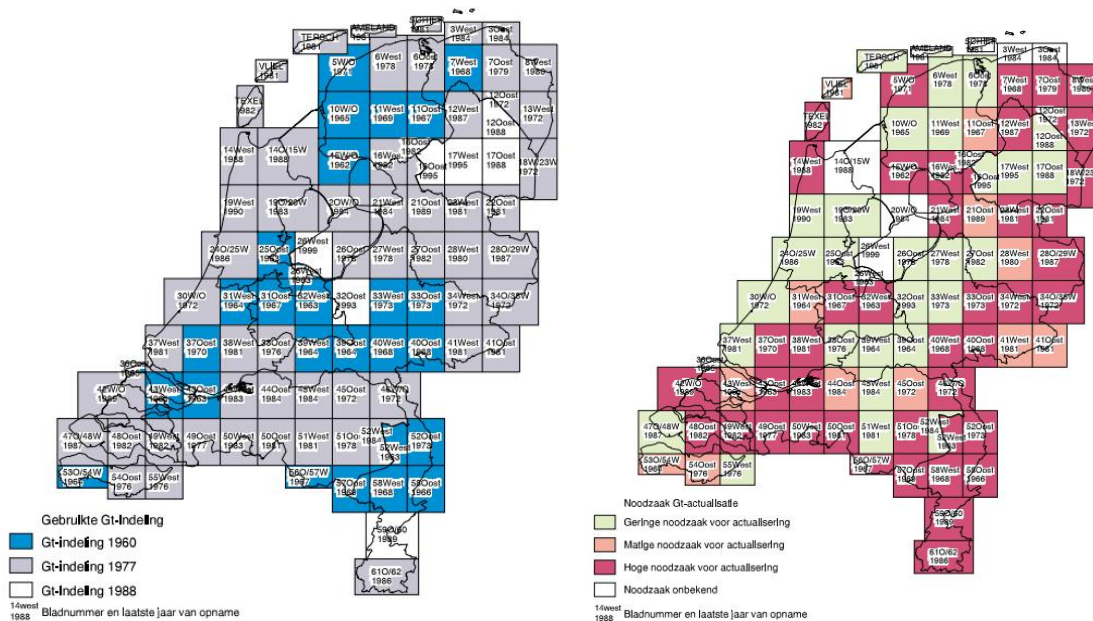
Bepaling van GHG en GLG voor een QuickScan-toepassing

Om op regionale schaal snel inzicht te krijgen in fluctuaties van de grondwaterstand, kunnen GHG en GLG worden afgeleid uit beschikbare bodemkaarten (de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000 is digitaal beschikbaar (De Fries, 2003)¹⁵).

¹³ Vries, F. de, W.J.M. de Groot, T. Hoogland en J. Denneboom (2003) *De bodemkaart van Nederland digitaal, Toelichting bij inhoud, actualiteit en methodiek en korte beschrijving van additionele informatie. Alterra-rapport 811, Wageningen.*

¹⁴ GHG en GLG worden berekend op basis van 14-daagse metingen (elke 14^{de} en 28^{ste} dag van de maand), door het gemiddelde te berekenen van de drie hoogste, respectievelijk drie laagste, grondwaterstanden per hydrologisch jaar (van 1 april tot 1 april) over een periode van minimaal 8 jaar.

¹⁵ Vries, F. de, W.J.M. de Groot, T. Hoogland en J. Denneboom (2003) *De bodemkaart van Nederland digitaal, Toelichting bij inhoud, actualiteit en methodiek en korte beschrijving van additionele informatie. Alterra-rapport 811, Wageningen.*



Figuur D.1 Bladindeling Bodemkaart van Nederland schaal 1: 50 000 en informatie over de toegepaste grondwatertrapindeling en het laatste jaar van opname (links) en noodzaak actualisatie (rechts). Bron: De Fries, 2003

Grondwatertrappen (combinatie van GHG en GLG) in de bodemkaarten (Figuur D.1) zijn tot stand gekomen aan de hand van veldopnames uit grondboringen, in combinatie met langjarige meetreeksen over de grondwaterstand. Per gebied verschilt de ouderdom van de beschikbare bodemkaart. Veldopnames voor de bodemkaart 1:50 000 dateren van 1960 tot en met 1995 (Figuur D.1, links). De grondwatersituatie is soms gewijzigd door ingrepen zoals onttrekkingen, drainage of ruilverkavelingen, na oplevering van de bodemkaart (Figuur D.1, rechts) en daarom is op veel plaatsen actualisatie noodzakelijk.

Recenter opgeleverde of geactualiseerde regionale grondwatermodellen, of resultaten uit het nationaal hydrologische instrumentarium (NHI) kunnen dan uitkomst bieden om de GHG en GLG te bepalen. Modellen en de bodemkaarten zijn altijd een vereenvoudiging van de werkelijkheid. Hierin kunnen lokale fenomenen ontbreken. We adviseren deze daarom toe te passen om op regionale schaal risico's of mogelijkheden te inventariseren. Voor ontwerp van nieuwe werken en monitoring van bestaande damwandconstructies zijn lokale data noodzakelijk.

Bepaling grondwaterstand op lokale schaal

Voor bepaling van de GHG en GLG op lokale schaal zijn enkele metingen dicht bij het beoogde werk nodig. Metingen aan bijvoorbeeld de overzijde van een kanaal of rivier, of in een nabijgelegen zone met een ander bodemtype kunnen sterk afwijkend gedrag van de grondwaterstand vertonen.

Metingen worden uitgevoerd in peilbuizen met een filter die staat in het freatische grondwater. Voor een goede bepaling van de GHG en GLG is een meetreeks van 8 jaar nodig met minimaal 2-wekelijks een meting. Bij hoogfrequente meetreeksen(bijvoorbeeld dagelijks of per uur), zou met behulp van tijdreeksanalyse, in combinatie met langjarig bemeten stambuizen die vergelijkbaar gedrag vertonen een kortere meetreeks kunnen volstaan.

E Overzicht van toegevoegde rapporten

Het onderzoek naar corrosie door Deltares is gestart in 2003 met een literatuurstudie in het kader van dijkversterking Nederlek. De bevindingen zijn gerapporteerd in (van Meurs, 2003). In het kader van het Praktijkonderzoek in de periode van 2005 tot heden zijn vervolgens planken getrokken op verschillende locaties. De planken zijn visueel geïnspecteerd en de dikte van de plank is gemeten. De rapportages van de verschillende locaties zijn in de vorm van een pdf toegevoegd aan de totale rapportage.

- Nieuwlekkerkerk (van Eekelen en van Meurs, 2005)
(398204.066-scan-Dijkversterking Nederlek Ontwerpfase.pdf).
- Dordrecht (van Meurs, 2006)
(398204.154 - resultaat IHC Sliedrecht 15 februari 2006.pdf).
- Dordrecht (van Meurs, 2007)
(425180.10 - briefnotitie - concept.pdf).
- Opperduit (van Meurs, 2011)
(1204612-000-GEO-0002-v1 - eerste concept.pdf).
- Gouderak, Giesenburg, Nieuwlekkerland, Kinderdijk, Alblasterdam (Kraaijenbrink, 2013)
(1206371-000-GEO-0013-v02-r-Praktijkonderzoek naar corrosie bij damwanden.pdf).
- Amazonehaven (Kraaijenbrink, 2014b)
(1208944-000-GEO-0004-v02-r-Corrosieonderzoek stalen damwandplanken Amazonehaven- met bijlagen.pdf).
- Maeslantkering (Senhorst en Gulikers, 2013)
(rapport maeslantkering.pdf).
- Zeeburgersluiseiland (Senhorst, 2014)
(rapport Zeeburgersluiseiland 12 maart.pdf).
- Westerkade Rotterdam (Senhorst, 2014)
(rapportage Westerkade.pdf).

Ten slotte is ook het Meetprotocol toegevoegd. Het meetprotocol (Kraaijenbrink, 2014a) vormt een goede basis voor het uitvoeren van toekomstig praktijkonderzoek.
(1209030-000-GEO-0003-v3-m-Meetprotocol-def.pdf)