



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

RWS BEDRIJFSINFORMATIE

Afronding onderzoek vermindering corrosietoeslag damwanden

Datum	2 december 2015
Status	Definitief

Colofon

Uitgegeven door	Programmabureau HWBP-2
Informatie	Henk Senhorst
Telefoon	0320-298849
Fax	
Uitgevoerd door	
Opmaak	
Datum	2 december 2015
Status	Definitief
Versienummer	RWS-2015/44407.01

Inhoud

Inleiding—8

1	Resultaten praktijkonderzoek 2006-2015—10
1.1	Resultaten tot nu toe: 2006-2014—10
1.2	Resultaten afrondend praktijkonderzoek 2014-2015—11
1.2.1	Zoekproces van te onderzoeken damwandplanken—11
1.2.2	Resultaten van de onderzochte planken—12
1.3	Bespreking totaalresultaat—13
1.3.1	Algemeen beeld dikteafname—13
1.3.2	Karakterisatie van de aangetroffen deklagen—16
2	Toepasbaarheid voor vaststellen corrosietoeslag damwanden—18
2.1	Tijdsafhankelijkheid van het corrosiegedrag—18
2.1.1	Aanvulling met korte termijn studies—18
2.1.2	Intermezzo: corrosiesnelheid en deklaagvorming—20
2.1.3	Aanvulling met lange termijn studies—21
2.1.4	Intermezzo: de resultaten van Törnqvist—22
2.1.5	Overall beeld tijdsontwikkeling corrosie—23
2.1.6	Mogelijke invloed deklaag—25
2.1.7	Conclusie tijdsafhankelijkheid corrosie—27
2.2	Representativiteit van de metingen—27
2.2.1	Representativiteit oude stalen voorwerpen voor nieuwe toepassingen—27
2.2.2	Toepasbaarheid voor regionale keringen—28
2.3	Conclusie ten aanzien van toepasbaarheid resultaten—29
3	Zuurgraad als mogelijke risicofactor—30
3.1	Invloed zuurgraad op corrosie—30
3.2	Voorkomen pH-waarden in grondwater in Nederland—30
3.2.1	Beeld ondiepe bodem in Nederland—30
3.2.2	Beeld van diepere bodem en grondwater—31
3.2.3	(Potentiële) Kattekleigronden—31
3.3	Aanbevelingen voor omgaan met zuurgraad als risicofactor—33
3.3.1	Situaties waarin oxidatie van veen op kan treden—33
3.3.2	Situaties waarin oxidatie van pyriet op kan treden—33
3.3.3	Situaties met zandbodems—34
3.3.4	Beslisboom vereiste waarde corrosietoeslag—34
4	Eerste ervaringen met nieuwe methode corrosietoeslag—36
4.1	Beschrijving nieuwe methode corrosietoeslag—36
4.1.1	Protocol nieuwe methode corrosietoeslag—36
4.1.2	Protocol prepareren en slaan van testplanken—37
4.2	Case dijkverbeteringsproject Koegraszeedijk—37
4.3	Case dijkverbeteringsproject Spui-West—39
5	Conclusies en aanbevelingen—42
5.1	Antwoord op onderzoeksvragen—42
5.2	Mogelijke tegenstrijdigheid met eerder advies corrosietoeslag—44
5.3	Conclusies—44

- 5.4 Aanbevelingen—46
- 5.4.1 Aanscherping tekst protocollen—46
- 5.4.2 Toelichting: relatie tussen Eurocode 3 en de nieuwe methode corrosietoeslag—47
- Lijst van referenties—48

Bijlage A Is er een trend in de resultaten van het praktijkonderzoek?—51

Bijlage B Kwantitatieve resultaten studies met kortere en langere blootstellingsduur—53

Bijlage C Protocol nieuwe methode corrosietoeslag—58

Bijlage D Protocol prepareren en slaan van testplanken.—60

Bijlage E Aangepaste tekst protocol nieuwe methode corrosietoeslag—62

Inleiding

Stalen damwanden worden in waterkeringen toegepast om de sterkte van een kering te vergroten. Om daarbij de vereiste levensduur van 100 jaar te kunnen garanderen wordt een corrosietoeslag toegevoegd aan de benodigde dikte, om de dikteafname door roestvorming te compenseren. De waarden voor de toeslag zijn in 1996 vastgelegd in de Handreiking Constructief Ontwerpen. Omdat vanuit de praktijk signalen kwamen dat deze waarden te pessimistisch waren is vanaf 2006 praktijkonderzoek gestart om de daadwerkelijke grootte van de corrosie vast te stellen.

Het Expertise Netwerk Waterveiligheid heeft mei 2014 op basis van de resultaten van Nederlands praktijkonderzoek tot dan toe het programma HWBP-2 de mogelijkheid gegeven om in een proefjaar te gaan werken met een nieuwe methode voor het afleiden van de corrosietoeslag [ENW 2014]. Deze nieuwe methode is gebaseerd op de (bestaande) Eurocode 3 [CEN 2007], en is beschreven in bijlage C. Parallel hieraan zou het praktijkonderzoek afgerond worden met onderzoek aan een beperkt aantal planken met hoge leeftijd c.q. uit locaties waar de zuurgraad een risicofactor voor corrosie kan zijn. Als waarborg tegen mogelijk tegenvallende uitkomsten van dit afrondende onderzoek zal er bij dijkversterkingsprojecten in dat proefjaar een testplank geslagen worden waarmee eventueel te zijner tijd de daadwerkelijke corrosie kan worden vastgesteld. Eind 2015 zullen de resultaten van dit proefjaar door ENW gebruikt worden voor een definitief advies over de corrosietoeslag. Dit eindrapport draagt de benodigde informatie daartoe aan.

In de behandeling door ENW zijn een aantal vragen gesteld rondom de toepassing van de informatie van het praktijkonderzoek:

- A. Hoe representatief is onderzoek aan oude voorwerpen uit de bodem voor de corrosietoeslag bij nieuw aan te leggen damwanden? Zijn er in de afgelopen tientallen jaren veranderingen opgetreden in het staal of het staalproductieproces waardoor oude voorwerpen zich anders gedragen qua corrosie dan nieuw in de bodem aan te brengen voorwerpen?
- B. Wat is het effect van een lage zuurgraad op de corrosie in de bodem? Is dit een risicofactor die in acht genomen moet worden bij de corrosietoeslag?
- C. Kan de nieuwe methode van corrosietoeslag ook van toepassing zijn bij regionale keringen?

Het advies van ENW [ENW 2014] vraagt daarnaast aandacht voor:

1. De mogelijkheid om strips te gebruiken in plaats van testplanken. Hier is geen gebruik van gemaakt om redenen van (snelle) uitvoerbaarheid in dijkversterkingsprojecten. Daarnaast zouden strips in plaats van planken vragen op kunnen roepen over representativiteit;
2. Een eenduidig protocol voor het slaan en monitoren van testplanken. Er is hiertoe door programmabureau HWBP-2 een protocol opgesteld, zie bijlage D en paragraaf 4.1;
3. Eenduidige aanduiding voor corrosie(toeslag) voor de beide zijden samen van een damwandplank: in deze rapportage wordt gesproken over 'corrosie(toeslag) over beide zijden samen' danwel 'dikteafname'.

Om tot een afrondend geheel te komen zijn de volgende onderzoeksvragen gebruikt bij het inrichten van het praktijkonderzoek en het opstellen van dit eindrapport.

1. Is de conclusie van praktijkonderzoek 2006-2014 voldoende robuust geweest? Zijn de nieuwe waarden ook van toepassing bij grotere verblijftijden in de bodem? Uitbreiding van de verzameling onderzochte planken met een aantal oude planken uit met name gebieden met lage pH is gewenst.
2. Is praktijkonderzoek aan historische planken voldoende representatief voor nieuwe planken?
3. Is het risico van zure bodems op corrosie dermate groot dat de toepassing van de nieuwe waarden nader afgebakend moet worden?
4. Is de werkwijze in het omgaan met de nieuwe waarden voldoende goed uitvoerbaar? Welke zone is meest bepalend voor de te hanteren corrosietoeslag?
5. Blijven testplanken noodzakelijk (generiek dan wel op risicolocaties) ?
6. Zijn de nieuwe waarden ook van toepassing op regionale keringen?

Leeswijzer

Dit eindrapport draagt informatie aan over de resultaten van Nederlands praktijkonderzoek 2006-2015 (waaronder het afrondende gedeelte 2014-2015) (Hoofdstuk 1), de toepasbaarheid van deze resultaten voor het opstellen van een corrosietoeslag (Hoofdstuk 2), de inschatting van zuurgraad als risicofactor (Hoofdstuk 3) en de eerste ervaringen met de nieuwe methode (Hoofdstuk 4). De beantwoording van deze onderzoeksvragen zal plaatsvinden in Hoofdstuk 5, gevolgd door aanbevelingen.

Dit document behandelt uitsluitend de corrosie van damwanden die tweezijdig in contact staan met de bodem. De corrosie wordt uitgedrukt in de afname van de dikte, waardoor dus de corrosie van beide zijden samen genomen wordt.

1 Resultaten praktijkonderzoek 2006-2015

1.1 Resultaten tot nu toe: 2006-2014

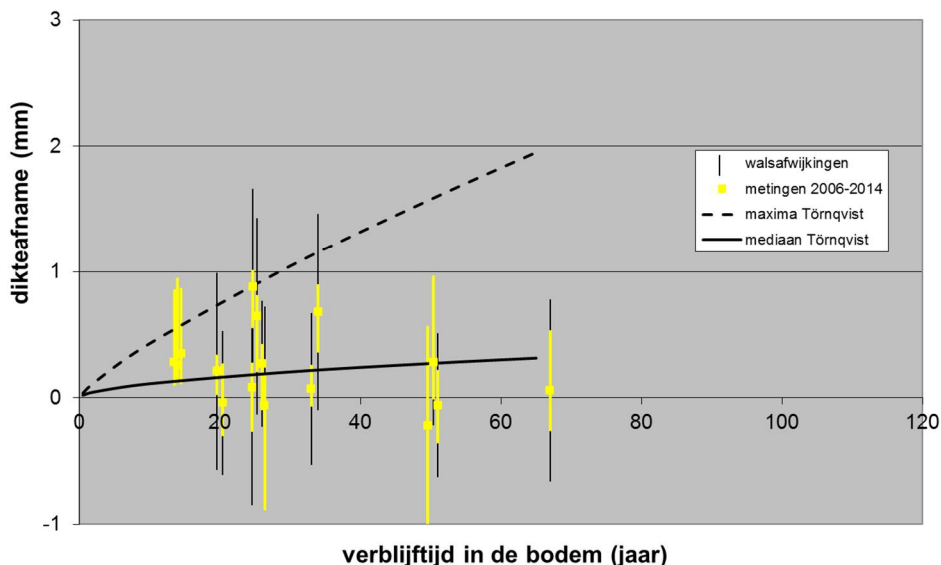
Vanaf 2006 is er door Deltares in opdracht van meerdere waterschappen en het HWBP-2 in meerdere stappen praktijkonderzoek uitgevoerd aan damwandplanken die langere tijd in de bodem hebben gestaan. Het onderzoek bestond uit diktemetingen en een inspectie van de toestand van het oppervlak. Aanvankelijk was dit onderzoek gericht op de invloed van venige bodems, later zijn ook situaties met zout grondwater onderzocht. In de periode tot en met voorjaar 2014 zijn 16 planken van 12 locaties onderzocht.

Dit werk is gerapporteerd in:

1. 'Rapport trekken plank terrein IHC Sliedrecht', [GeoDelft 2006] : plank Sliedrecht;
2. 'Rapportage inspectie getrokken plank', [GeoDelft 2007]: plank Dordrecht;
3. 'Corrosie stalen damwandplanken; twee locaties planken getrokken', [van Meurs 2011]: twee planken te Opperduit;
4. 'Praktijkonderzoek naar corrosie bij damwanden', [Kraaijenbrink 2013]: vijf planken uit gebieden met een venige bodem;
5. 'Corrosie van stalen damwandplanken in de grond ; effect van zout grondwater', [Jansen 2014]: vier planken uit gebieden met zout grondwater.

De onderzochte planken hebben tussen 14 en 67 jaar in de bodem gestaan. Het resultaat van deze studies is weergegeven in afbeelding 1.1.

Resultaten NL praktijkonderzoek 2006-2014



Afbeelding 1.1: resultaten van het praktijkonderzoek tot nu toe (2006-2014). De dikke gele lijnen geven het bereik weer tussen de gemeten minimum en maximum gemeten dikteafname per plank. De dunne zwarte lijnen geven per meetpunt de onzekerheidsmarge vanwege mogelijke walsafwijkingen weer. Ter vergelijking is de fit van [Törnqvist 2005] gegeven door de in de literatuur gevonden mediane en maximale corrosiewaarden (zie paragraaf 2.1.4 voor een beschrijving).

De resultaten van dit onderzoek laten zien dat de corrosie in de bodem kleiner is dan eerder aangenomen was, en was vastgelegd in de Handreiking Constructief Ontwerpen [TAW1994]. Tevens is duidelijk geworden dat het eerder gehanteerde onderscheid naar bodemsamenstelling (zand-klei-veen-zout grondwater) niet significant blijkt te zijn.

Deze resultaten komen overeen met literatuuronderzoek uit 2014, gerapporteerd in Jansen 2014. Hieruit bleek dat juist het onderscheid tussen corrosie onder en boven grondwaterniveau, c.q. geroerde grond wel relevant is. Op basis daarvan is de aanbeveling gedaan om voor damwanden in waterkeringen voortaan aan te sluiten bij Eurocode 3 en de daarin gehanteerde waarden. Eurocode 3 is ook op dit onderscheid in twee zones zijn gebaseerd.

De waarden per zone in Eurocode 3 passen bij een statistische analyse (Törnqvist 2005) van een uitgebreid aantal in de literatuur gevonden waarden voor corrosie in de bodem. De waarden uit het praktijkonderzoek tot en met voorjaar 2014 passen goed bij de mediaanwaarden en blijven onder de door Törnqvist gevonden maxima. Daarmee onderstrepen ze de validiteit aan de corrosiewaarden van de Eurocode. Zie paragraaf 2.1.4 voor meer informatie over de resultaten van Törnqvist.

Het Expertise Netwerk Waterveiligheid [ENW 2014] heeft op basis van bovenstaande resultaten het programma HWBP-2 de gelegenheid gegeven om in een proefjaar te gaan werken met een nieuwe methode voor het afleiden van de corrosietoeslag. Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van de nieuwe methode. Om tot een definitiever inzicht in de betrouwbaarheid van de nieuwe methode te komen heeft HWBP-2 een afrondend praktijkonderzoek uitgevoerd.

1.2 Resultaten afrondend praktijkonderzoek 2014-2015

1.2.1 Zoekproces van te onderzoeken damwandplanken

Voor het afrondend praktijkonderzoek is gestreefd (een beperkt aantal) planken te onderzoeken die gedurende een langere tijd (liefst meer dan 50 jaar) in de bodem hebben gestaan en/of die in grondwater hebben gestaan met relatief lage pH (<4). 'Oude' planken zijn interessant omdat vanwege de door walsafwijkingen geïntroduceerde onzekerheid pas bij langere verblijftijden duidelijke uitspraken gedaan kunnen worden. Gebieden met relatief zuur grondwater zijn interessant omdat er aanwijzingen zijn dat de corrosie in de bodem daar relatief hoog is.

Voor het vinden van planken voor het praktijkonderzoek is een rondgang gemaakt langs met name waterbeheerders met de vraag waar zich damwandplanken bevinden die mogelijk getrokken kunnen worden of anderszins beschikbaar komen voor onderzoek. Hierbij bleek dat het op voorhand vaststellen van de verblijfsduur van de plank alleen al moeilijk was. Juist vanwege de gezochte lange verblijftijd bleken originele bouwtekeningen vaak niet aanwezig en zou in de archieven gedoken moeten worden om zekerheid te krijgen over de verblijfsduur.

Het streven naar planken uit locaties met een lage pH is uiteindelijk losgelaten. Alle mogelijke locaties waar een damwand beschikbaar zou kunnen komen bleken in 'holocene Nederland' te liggen of in een gebied met löss-grond (i.c. Julianakanaal). Op basis van informatie over de pH in deze gebieden bleek de kans op een pH lager dan 4 van de orde 5%. Zie paragraaf 3.2 voor verdere toelichting.

Één mogelijke locatie (Den Oever, aanpassing van een 80 jaar oude damwand bij dijkversterkingsproject HWBP-2) leek interessant vanwege de mogelijke nabijheid van potentiële katteklei. Dit kan na omwoeling van de grond leiden tot tijdelijke, lage pH waarden (tot $\text{pH} = 3$). Een plank uit deze locatie zou waardevolle informatie op kunnen leveren. Echter, omdat de uitvoering van het dijkversterkingsproject vertraagd werd, zou een plank pas in 2017 of later beschikbaar kunnen komen.

De uiteindelijke selectie van te onderzoeken damwandplanken is al met al sterk bepaald door het beschikbaar komen van planken.

De volgende planken zijn in het praktijkonderzoek betrokken:

1. Hollandsche IJsselkering (Krimpen aan de IJssel): een in de waterbodem achtergelaten damwand uit de toenmalige (1954) bouwkuip van de kering is speciaal voor dit onderzoek getrokken. De plank heeft in contact gestaan met een bodemlaag van grof zand;
2. Alblasserdam: bij de nieuwbouw van een containerterminal werd een slechts 10 jaar oude kademuur opgeruimd. Hoewel de leeftijd niet voldeed aan het zoekcriterium is er toch een plank onderzocht als uitbreiding van de verzameling naar korte verblijftijden. Deze plank stond in contact met bodemlagen van klei, fijn zand en grind;
3. Heijsehaven, Rotterdam: uit contact met Havenbedrijf Rotterdam/Piet Jongbloed bleek dat in september 2014 dat een golfbreker verwijderd ging worden die bij de bouw van de haven (1948) is aangelegd. Deze plank stond in een zandlaag;
4. Julianakanaal Steijn: verwijdering van een zinkconstructie van de 'Air Liquide'-leiding. Aanvankelijk werd gedacht dat de constructie uit de bouw van het kanaal (1938) afkomstig was, later bleek hij echter veel jonger (1992). Deze plank stond in een bodem van leem en klei..

De omstandigheden waaronder deze planken in de bodem hebben gestaan verschillen sterk. Ze vormen als zodanig niet één groep, maar zijn een uitbreiding van de verzameling planken uit het onderzoek tot nu toe.

1.2.2

Resultaten van de onderzochte planken

De planken zijn onderzocht (diktemetingen, visuele inspectie) met het protocol zoals dat in het kader van eerder onderzoek is opgesteld. De resultaten zijn vastgelegd in een aantal rapportages (RWS-GPO 2014b en 2015a,b en c). Een samenvatting hiervan is te vinden in tabel 1.1.

	verblijf tijd (jaar)	onder zochte lengte (m)	nominale dikte (mm)	gemeten dikteafname (mm)				max. wals afwijking	
				type	gemiddelde	sigma	min		max
Hollandsche IJsselkering	60	2,75	Larssen V Rombas	21	0,41	0,35	0,39	1,34	1,26
Alblasserdam	10	17	AZ 36	22	0,81	0,03	0,40	1,16	1,32
Heijsehaven Rotterdam	66	8	BZ IVn	14	0,27	0,06	0,13	0,56	0,84
Stein	23	4,6	Larssen III n	13	0,37	0,04	0,05	0,72	0,78

Tabel 1.1: Een overzicht van de resultaten van de vier planken uit het afrondende praktijkonderzoek. Sigma = standaarddeviatie in het gemiddelde, de walsafwijking is conform NEN-EN 10248/2 bepaald als 6% van de dikte met een minimum van 0,5 mm.

De plank van de Hollandsche IJsselkering bleek lastig te trekken. Uiteindelijk is een stuk van 3,5 meter afgebrand van de beoogde 12 meter van de plank. De onderste 2,75 meter van de plank heeft over de volle verblijftijd in dubbelzijdig contact met de bodem gestaan. De plank was deels bedekt met een ± 2 cm dikke, onregelmatig gevormde laag, en deels met een laag van slechts enkele millimeter dikte.

De plank uit Alblasserdam liet ondanks de beperkte verblijftijd de op één na grootste gemiddelde dikteafname uit de metingen zien: 0,8 mm. Vanwege de relatief grote dikte van de plank (22 mm) moet echter wel een aanzienlijke walsafwijking in de beoordeling van de dikteafname aangehouden worden. De plank was bedekt met een goed hechtende deklaag van ± 1 mm, die slechts in beperkte mate roestbruin verkleurd was. Dit beeld qua deklaag komt overeen met andere planken uit het praktijkonderzoek die veel minder corrosie vertoonden, bijvoorbeeld de plank Westerkade Rotterdam (0,055 mm nominale dikteafname). Dit versterkt het vermoeden dat hier sprake is van een grote walsafwijking.

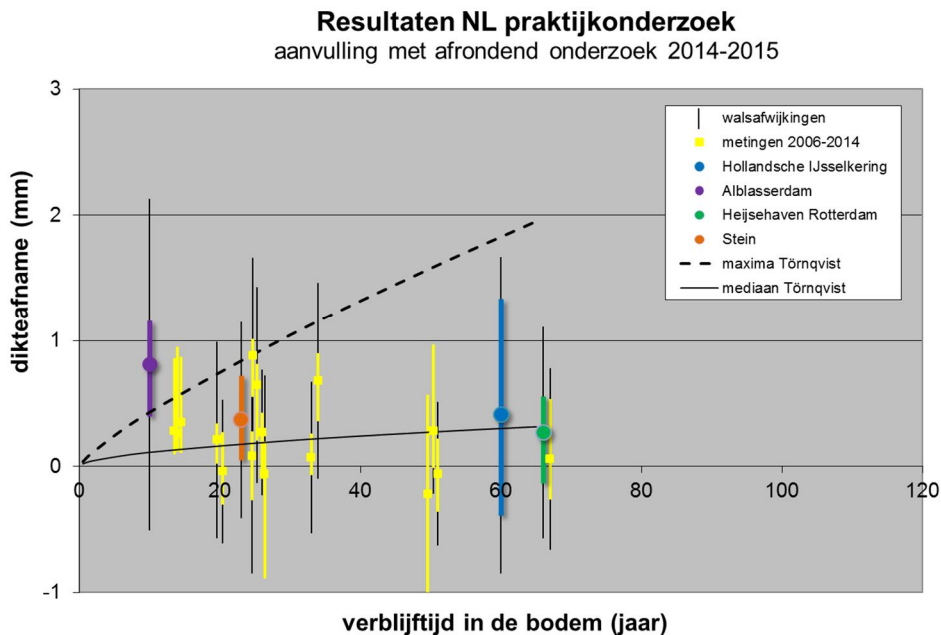
De plank uit de golfbreker uit de Heijsehaven te Rotterdam liet ondanks zijn lange verblijftijd en het zoute milieu weinig bijzonderheden zien: een gemiddelde dikteafname van 0,27 mm, de deklaag is dun en zeer goed hechtend met plaatselijke verdichtingen. Bij verwijderen van de deklaag door deze af te steken of weg te schuren ontstond binnen een uur een dunne laag roest ('vliegroest').

De plank uit het Julianakanaal te Stein had als bijzonderheid dat hij over de gehele lengte boven het grondwater had gestaan. Bij eerdere planken betrof dit nooit meer dan hooguit 1 tot 2 meter. Desondanks liet de nominale dikteafname niets bijzonders zien. Wel werd geconstateerd dat de plank op meerdere plaatsen putcorrosie vertoonde. De dichtheid en de omvang van de putten nam toe gaande van beneden naar boven. Deze putcorrosie is niet meegenomen in de bepaling van de dikteafname voor deze plank, omdat alleen uniforme corrosie van belang geacht wordt voor de door damwandplanken op te brengen sterkte [Jansen 2014].

1.3 Bespreking totaalresultaat

1.3.1 Algemeen beeld dikteafname

De resultaten van het aanvullende praktijkonderzoek 2014-2015 zijn in afbeelding 1.2 toegevoegd aan de eerdere resultaten.



Afbeelding 1.2: De vier meetpunten uit het aanvullende praktijkonderzoek 2014-2015 als aanvulling op afbeelding 1.1. Voor toelichting zie figuur 1.1.

De resultaten van het afrondend onderzoek laten weinig verrassingen zien ten opzichte van de eerdere resultaten. De meetpunten Hollandsche IJsselkering en Heijsehaven bevestigen dat ook bij verblijftijden rond de 60 jaar de dikteafname beperkt blijft.

Door de grote onzekerheid die de walsafwijking met zich mee brengt, is het niet mogelijk om een uitspraak te doen over de onderlinge ligging van meetwaarden. Wel kunnen de meetwaarden als groep beschouwd worden. Deze groep laat geen statistisch significante trend zien. Dit wordt in bijlage A verder toegelicht.

Door het ontbreken van een significante tijdsontwikkeling kunnen alle meetwaarden van de nominale dikteafname uit het praktijkonderzoek 2006-2015 (20 planken, 16 locaties) beschouwd worden als liggende in een band tussen grofweg 0 en 0,8 mm, met een gemiddelde van $0,26 \pm 0,07$ mm.

De grote bandbreedte die aangehouden moet worden, wordt veroorzaakt door de gevolgde werkwijze: doordat de dikte van de planken bij aanvang niet bekend was, kon alleen uitgegaan worden van de door de leverancier toegezegde nominale dikte. Omdat leveranciers op basis van NEN-EN norm 10248/2 een tolerantie van 6% aan mogen houden (met een ondergrens van 0,5 mm), leidt dit tot een onzekerheid van de orde 0,5-1,3 mm.

Een meer gecontroleerde werkwijze waarbij de dikte van een plank of profiel ook wordt opgemeten vóór plaatsing in de bodem kent deze onzekerheidsmarge niet, en kan tot veel preciezere uitspraken over corrosie in de bodem komen. In het paragraaf 2.1 zullen de resultaten van dit praktijkonderzoek samengebracht worden met resultaten van gecontroleerde studies uit de literatuur. Dit leidt tot de opbouw van een overall beeld over de tijdsontwikkeling van de dikteafname, en geeft meer zekerheid over de extrapolatie vanuit de meetwaarden (verblijftijden tot 67 jaar) naar een levensduur van 100 jaar.

In afbeelding 1.2 zijn ook de curves weergegeven die Törnqvist heeft vastgesteld voor het mediane en maximale gedrag van in literatuurstudies gevonden corrosie [Törnqvist 2005]. De mediane curve lijkt (nog steeds) goed aan te sluiten bij gemiddelde gedrag van de resultaten van het praktijkonderzoek. De curve voor de maxima ligt bij grote verblijftijden duidelijk boven de meetwaarden, hetgeen past bij het extreme karakter van de maxima. Conclusie kan dan ook zijn dat de resultaten van het praktijkonderzoek goed passen binnen het beeld uit de literatuur over corrosie in de bodem.

1.3.2 Karakterisatie van de aangetroffen deklagen

Op de onderzochte planken zijn vrijwel altijd stevige, vastzittende deklagen aangetroffen. De aard en opbouw van de deklagen varieerde wel erg van locatie tot locatie. De volgende typen deklagen zijn aangetroffen:

- Harde grijze deklaag: afbeelding 1.3 geeft een voorbeeld. De samenstelling van de deklaag van de plank Dordrecht is geanalyseerd als sideriet (FeCO_3 ; [GeoDelft 2007]);
- Klonterige dikke deklaag, zie bijvoorbeeld de plank Hollandsche IJsselkering in afbeelding 1.4;
- Afsteekbare omhullende deklaag, bijvoorbeeld zoals op plank Westerkade (afbeelding 1.5). Na verwijdering van de deklaag kwam op deze plank een glad staaloppervlak bloot te liggen;
- Afwisseling van bovenstaande deklagen op één plank.

Boven grondwaterniveau waren deklagen veelal roestbruin van kleur, onder grondwaterniveau was de kleur donkergrijs tot zwart.

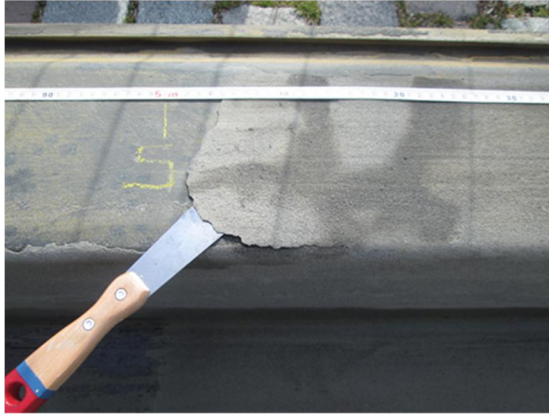
Onder de bovenste deklaag werd veelal een zwarte laag aangetroffen die toegeschreven werd aan de oorspronkelijke walshuid.



Afbeelding 1.3: plank Dordrecht: een dunne wit-grijze deklaag [GeoDelft 2007]



Afbeelding 1.4: plank Hollandsche IJsselkering: een dikke klonterige deklaag [RWS-GPO 2015a]



Afbeelding 1.5: plank Westerkade Rotterdam: een dunne deklaag die met een plamuurmes afgestoken kan worden. [RWS-GPO 2014a]

Bij de planken uit Westerkade, Hollandsche IJsselkering en Heijsehaven is waargenomen dat daar waar de deklaag verwijderd werd, en het staaloppervlak bloot kwam te liggen, binnen korte tijd (15-60 minuten) een roestbruine verkleuring ontstond, die er eenvoudig af te wrijven was. Deze laag wordt gangbaar als 'vliegroest' aangeduid.

Het staaloppervlak was in de regel egaal glad met slechts een enkele put. Alleen de plank te Stein liet een ander beeld zien: deze plank had een groot aantal putten waarvan de dichtheid van boven naar beneden af nam. De grootste aangetroffen put had een diameter van 10-20 mm en een diepte van 3,5 mm. De plank te Stein wijkt af van de andere onderzochte planken in die zin dat hij over de gehele onderzochte lengte boven het grondwater heeft gestaan. Vanwege de algemene constatering in de literatuur dat putcorrosie in de bodem optreedt in de zone boven grondwater, kan dit als een verklaring gezien worden.

De deklaag van de plank Westerkade is uitgebreid onderzocht. Dit is gerapporteerd in paragraaf 2.1.6.

De aanwezigheid van harde deklagen op staaloppervlakken die langere tijd in de bodem hebben gestaan heeft weinig aandacht gekregen in de literatuur over corrosie in de bodem. Wel wordt vaak beschreven dat het oppervlak eerst schoongemaakt moet worden van vastzittende lagen, maar hoe die lagen er uit zien, of waar ze uit bestaan, wordt zelden beschreven. De vorming en aanwezigheid van deklagen wordt in paragraaf 2.1 verder behandeld en blijkt belangrijk voor het begrip van de tijdsafhankelijkheid van corrosie in de bodem.

2 Toepasbaarheid voor vaststellen corrosietoeslag damwanden

Het vorige hoofdstuk heeft laten zien dat de nieuwe resultaten uit het aanvullende praktijkonderzoek een bevestiging geven van het beeld zoals dat tot nu toe opgebouwd was. Dit hoofdstuk bespreekt hoe de resultaten kunnen worden gebruikt om voor damwanden in waterkeringen de robuustheid van de corrosietoeslag conform Eurocode 3 te onderbouwen. Hiertoe worden drie aspecten besproken, namelijk (1) de extrapolatie in de tijd van het corrosiegedrag, (2) de mate waarin het gebruik van historische waarden representatief is voor nieuw aan te brengen damwanden en (3) of toepassing in regionale keringen nog aanvullende eisen stelt.

2.1 Tijdsafhankelijkheid van het corrosiegedrag

Om betrouwbaar een waarde voor de te hanteren corrosietoeslag af te leiden voor een periode van 100 jaar¹, zullen de resultaten van het praktijkonderzoek (10-67 jaar verblijftijd) geëxtrapoliseerd moeten worden naar langere verblijftijden. Om dit te kunnen doen moet er inzicht zijn in de tijdsafhankelijkheid van de corrosie in de bodem.

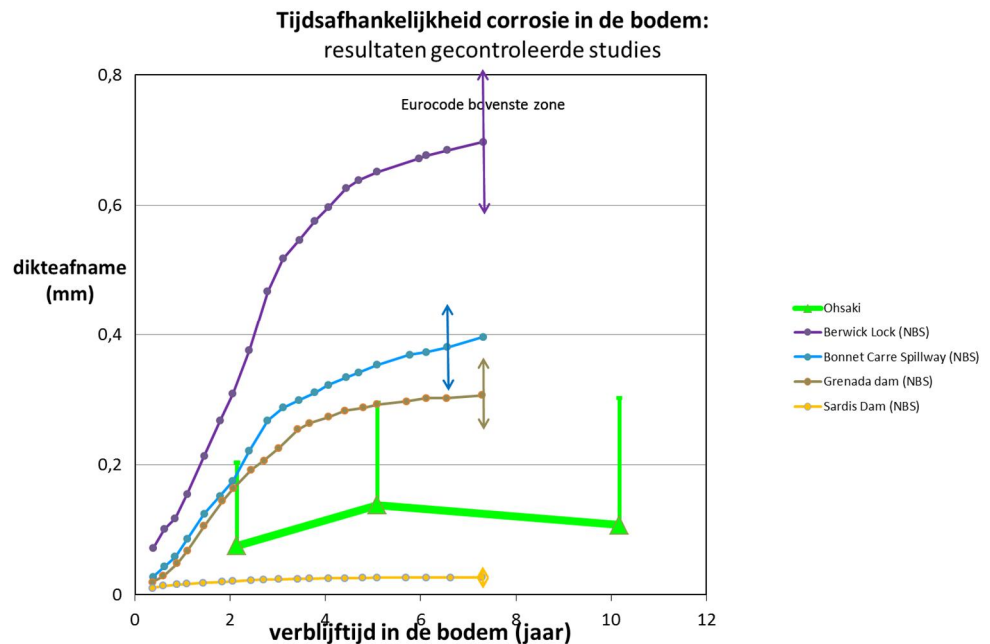
2.1.1 *Aanvulling met korte termijn studies*

In de geïnventariseerde literatuur [Jansen 2014] blijken er twee studies te zijn die voldoende nauwkeurig zijn uitgevoerd om iets te zeggen over het gedrag in de tijd. Het betreft gecontroleerde studies die de dikte van het staal voor en na verblijf in de bodem hebben bepaald:

1. Schwerdtfeger beschrijft in [NBS 1971] een onderzoek met begraven voorwerpen. Door het meten van de polarisatiestroom is de corrosie in de tijd gevolgd over een periode van 7 jaar. Op zich levert deze methode relatieve corrosiewaarden op, maar door op het eind van de meetperiode te kalibreren met het gewichtsverlies van het (opgegraven) voorwerp, kan de dikteafname in absolute zin bepaald worden.
2. Ohsaki 1981 beschrijft de resultaten van een veldproef waarbij op een tiental locaties telkens 9 stalen strips in de bodem zijn gedreven. Door na 2, 5 en 10 jaar telkens een aantal strips uit de bodem te trekken en op dikteafname te onderzoeken kan de tijdsafhankelijkheid van het corrosiegedrag vastgesteld worden. Omdat de dikte van de strips op gemarkeerde plaatsen is vastgesteld vóórdát ze in de grond werden geplaatst, kan de dikteafname met een statistische onzekerheid van slechts 0,01 mm vastgesteld worden.

Bijlage B beschrijft de kwantitatieve achtergrond van de resultaten van deze studies.

¹ Levensduur van nieuwe kunstwerken zoals geëist binnen HWBP-2.



Afbeelding 2.1: De tijdsontwikkeling van corrosie in de bodem uit twee gecontroleerde studies. Dunne, gekleurde lijnen geven de meetwaarden van Schwerdfeger [NBS1971] weer voor vier locaties. De foutenbalk op deze meetwaarden geeft een schatting van onnauwkeurigheid van de metingen: deze bedraagt $\pm 15\%$. De dikke groene lijn is de gemiddelde dikteafname voor de 10 locaties uit Ohsaki 1981. De foutenbalk geeft de afstand tot de grootste waargenomen dikteafname weer.

De twee studies geven vergelijkbare resultaten te zien, in die zin dat ze beide leiden tot het beeld dat de dikteafname door corrosie na een periode van ± 3 jaar in sterke mate afvlakt, zie afbeelding 2.1.

Meest duidelijk is dit te zien in de resultaten van de NBS studie. De resultaten voor de vier verschillende locaties laten weliswaar een groot verschil in absolute waarde van de dikteafname zien, maar dit kan herleid worden tot eenzelfde tijdsafhankelijkheid (afvlakkend na ± 3 jaar) en een locatiespecifieke schaalfactor. De dikteafname na 7,3 jaar verblijf in de bodem varieert tussen 0,03 en 0,7 mm. De oorzaak van deze grote verschillen tussen locaties in de NBS-studie is niet achterhaald. Dit sluit aan bij de algemene conclusie ten aanzien van de corrosie van staal in de bodem [Jansen 2014].

Het resultaat van Ohsaki laat zien dat de gemiddelde dikteafname voor tien locaties toeneemt tussen 2 en 5 jaar. Voor de periode tussen 5 en 10 jaar geeft het resultaat een lichte daling weer, maar het is niet te herleiden in hoeverre dit statistisch significant is. Aannemelijk is natuurlijk dat de dikteafname gelijk is gebleven of (licht) toegenomen. Na 10 jaar verblijf in de bodem bedraagt de gemiddelde dikteafname over alle locaties 0,11 mm. De verschillen in corrosie tussen locaties en planken is vrij groot: de grootste waargenomen dikteafname van enige plank op de tien locaties na 10 jaar bedraagt namelijk 0,3 mm, terwijl de gemiddelde dikteafname van alle planken 0,1 mm bedraagt.

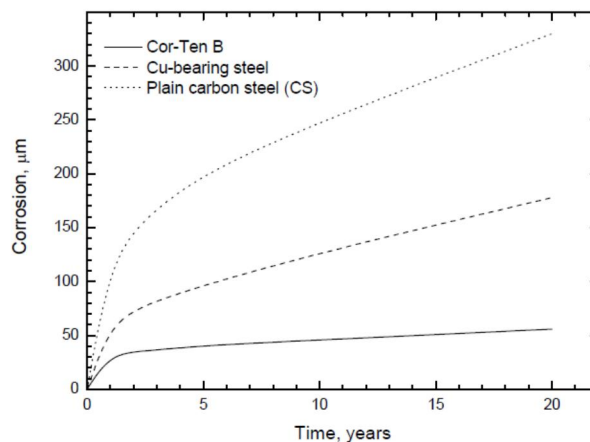
Het verschil in absolute waarde van de dikteafname tussen de NBS-studie en het werk van Ohsaki kan begrepen worden uit het verschil in onderzoeksopzet. De NBS

studie maakt gebruik van begraven voorwerpen die zich veelal boven grondwater bevinden (op locatie Sardis Dam na), en dus in de zone met hoge corrosie. Ohsaki gebruikt strips die in de bodem worden gedreven. Omdat deze zich voor het grootste gedeelte onder grondwater bevinden, zal de corrosie in deze studie relatief laag uitvallen.

2.1.2 *Intermezzo: corrosiesnelheid en deklaagvorming*

De sterke afvlakking in de dikteafname binnen een periode van vijf jaar zoals die naar voren komt in de korte termijn studies, is een bekend verschijnsel bij atmosferische corrosie. Na een aanvankelijk hoge corrosiesnelheid treedt een 'knik' op waarna de snelheid aanzienlijk afvlakt.

De afvlakking wordt toegeschreven aan de opbouw van een afschermdende laag op het ijzeroppervlak. Bij koolstofstaal is dit de gebruikelijke roestlaag die nog relatief open is, maar er zijn staalsoorten waar de corrosieproducten een stevige roestlaag (patina) vormen, zoals koperhoudend staal en CorTen-staal, zie afbeelding 2.2.



Afbeelding 2.2: Tijdsontwikkeling van de dikteafname door atmosferische corrosie onder industriële omstandigheden voor koolstofstaal (puntjeslijn), koperhoudend staal (streepjeslijn) en CorTen-B verweerbaar staal (doorgetrokken lijn) [Morcillo 2013].

De sterke reductie van de corrosie komt het meest duidelijk naar voren bij verweerbare staalsoorten, zoals CorTen-staal. Dit is koolstofstaal waaraan tot één procent koper, chroom, nikkel, fosfor, silicium of mangaan is toegevoegd. Onder atmosferische omstandigheden vormt zich vanwege de voortdurende afwisseling van natte en droge perioden een compacte en goed hechtende laag corrosieproducten. Daardoor daalt de corrosiesnelheid binnen 5 jaar met een factor 5 tot waarden rond 6 micron/j in matig agressieve milieus. De cumulatieve dikteafname na 20 jaar ligt dan in de orde van 0,04-0,2 mm [Morcillo 2013]. De afdekkende laag patina bouwt zich niet op in voortdurend contact met water. De corrosiesnelheid zal dan hoog blijven.

De tijdsafhankelijkheid van de corrosiesnelheid van verweerbare stalen onder atmosferische corrosie wordt beschreven met in het begin een e-machtige afname met karakteristieke tijd t_{stab} , gevolgd door een periode van constante corrosiesnelheid Y_0 :

$$Y(t) = A * \exp(-t/t_{\text{stab}}) + Y_0 \quad (\text{vergelijking 2.1})$$

met $Y(t)$ de tijdsafhankelijke corrosiesnelheid.

De waarde van t_{stab} ligt typisch tussen 4 en 8 jaar voor verweerbare staalsoorten [Morcillo 2013].

2.1.3

Aanvulling met lange termijn studies

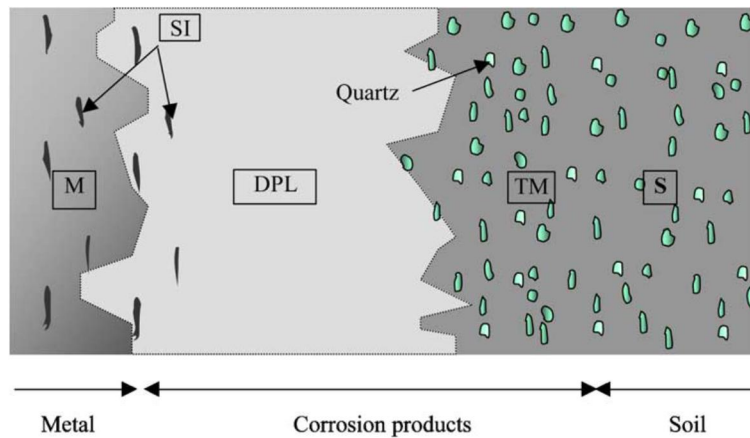
Onderzoek aan de corrosie van archeologische voorwerpen geeft een verwachting van de corrosie voor verblijftijden in de bodem die ver voorbij de 100 jaar liggen. [Neff 2006] stelt de mate van corrosie vast aan de hand van de hoeveelheid ijzer die in de deklaag op het voorwerp wordt aangetroffen. Voor 40 voorwerpen op vijf locaties zijn zo dikteafnames gevonden tot 5,6 mm., zie bijlage B. De verblijftijd in de bodem van de voorwerpen bedroeg tussen 400 en 1800 jaar, op dieptes van 0,3 tot 2 meter. De situatie met betrekking tot grondwater is niet gegeven voor deze locaties.

locatie	Montreuil en caux	Cabaret	Montbaron	Avrilly	Glinet	
Leeftijd	1800	800	800	500	400	jaar
Aantal voorwerpen	3	15	6	8	8	
<i>Dikteafname beide zijden</i>						
gemiddeld	1,08	0,64	2,56	2,2	0,8	mm
min	0,36	0,16	0,16	0,1	0,08	mm
max	1,44	3,2	5,6	3,3	1,92	mm

Tabel 2.1: Resultaten van dikteafname van archeologische ijzeren voorwerpen [Neff 2006]. Zie bijlage B voor de afleiding van deze tabel.

De relatief beperkte dikteafname (orde millimeters) geeft een verdere bevestiging van het beeld dat de dikteafname beperkt blijft voor zeer lange verblijftijden: na de knik neemt de corrosiesnelheid blijvend en aanzienlijk af.

Aan de hand van uitgebreid microscopisch en chemisch onderzoek is door [Neff 2006] een model opgebouwd over de deklaag van archeologisch ijzeren voorwerpen, zie afbeelding 2.3. De deklaag bestaat uit twee deellagen, namelijk een laag die *dense product layer* genoemd wordt en die bestaat uit diverse verbindingen tussen ijzer en zuurstof (o.a. magnetiet (Fe_3O_4) en goetiet ($\alpha\text{-FeOOH}$) en een laag die bestaat uit het oorspronkelijke bodemmateriaal waarvan de poriën gevuld zijn met neergeslagen corrosieproducten (*transformed medium*). De overgangen tussen het metaal, de dense product layer en de laag transformed medium zijn vrij scherp. De overgang tussen dense product layer en transformed matter komt overeen met het originele oppervlak van het voorwerp. De laag transformed matter gaat geleidelijk over in de aansluitende bodemlaag.



Afbeelding 2.3: Schematische weergave van de opbouw van deklagen van archeologische ijzeren voorwerpen [Neff 2005]. M= metaal, SI = slag inclusion, DPL = dense product layer, TM = transformed matter, S = soil.

In [Gerwin 2000] is de relatie onderzocht tussen bodemparameters (zand/klei, pH, chloride, sulfaat, fosfaat) en de mate van corrosie van archeologische ijzeren voorwerpen met een leeftijd tussen 500 en 2000 jaar. Hieruit kwamen zwakke, negatieve correlaties (rond de 0,3) naar voren met pH en carbonaat-gehalte.

2.1.4

Intermezzo: de resultaten van Törnqvist

Door het VTT-instituut te Espoo, Finland is een database opgebouwd van in de literatuur gevonden waarden voor de corrosie van staal in de bodem [Törnqvist 2005]. De database omvat zo'n 1600 waarnemingen van het optreden van uniforme corrosie en de eigenschappen van de bodem en het grondwater waar het staal zich in bevond. De verzameling bevatte meetwaarden met verblijftijden tussen 1 en 61 jaar, met pH-waarden tussen 4 en 9.

Uit een statistische analyse blijkt dat de omvang van de corrosie gecorreleerd is 1) de verblijftijd van het voorwerp in de bodem, 2) de positie van het stalen voorwerp ten opzichte van het grondwaterniveau (boven grondwater hogere corrosie dan eronder), 3) of de bodem verstoord is geweest (dan een hogere corrosie dan een onverstoord bodem), 4) de zuurgraad van de bodem (een lagere pH leidt tot een hogere corrosie).

Om een extrapolatie te kunnen maken voor langere verblijftijden is voor de totale verzameling meetwaarden een analyse gedaan waarbij er per interval van verblijftijd een mediaanwaarde, 95-percentiel en een maximum bepaald is. Door deze waarden is een n-macht: gelegd. $Y = A * t^B$ (t = verblijftijd in jaren).

	Voorfactor A (mm)	Waarde macht B
mediaanwaarde	0,032	0,55
95-percentiel	0,066	0,65
maximumwaarde	0,067	0,81

Tabel 2.2: de resultaten van de fit door mediaan, 95-percentiel en maximum van de dikteafname.

De resulterende curves voor de extrapolatie zijn weergegeven in tabel 2.3. De fitcurves zijn getoond in figuren 1.1, 1.2 en 2.4.

Verblijftijd in jaar	mediaan	95-percentiel	max
0,5	0,02	0,04	0,04
10	0,11	0,29	0,43
30	0,21	0,60	1,04
50	0,27	0,83	1,58
65	0,32	0,98	1,95
100	0,40	1,30	2,76

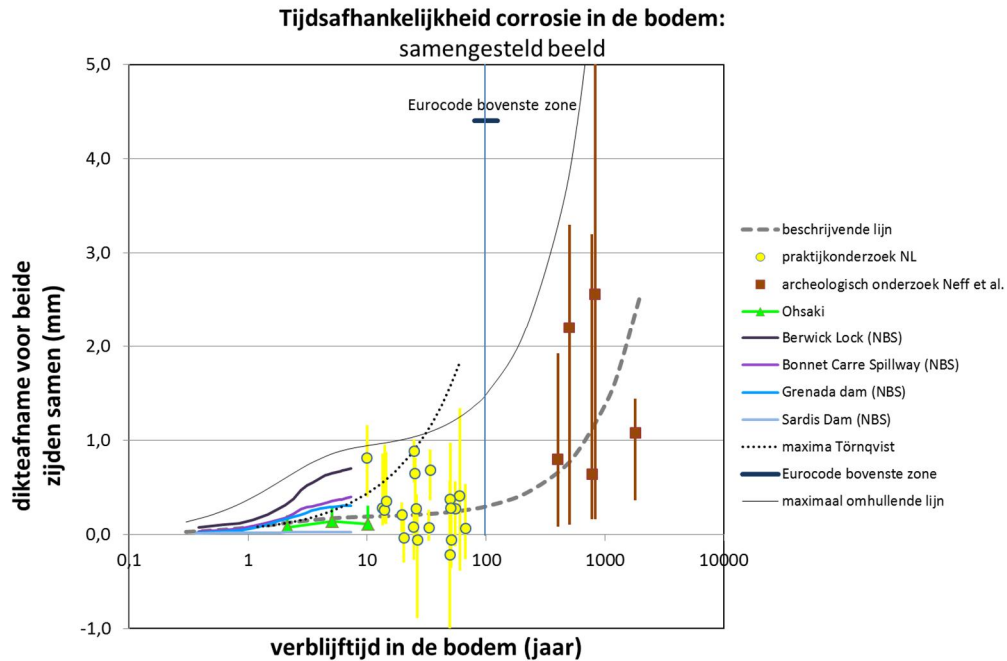
Tabel 2.3: de waarden van de dikteafname voor fitcurves voor mediaan, 95-percentiel en maximum. De dikteafname is in mm gegeven, voor beide zijden samen.

2.1.5 Overall beeld tijdsontwikkeling corrosie

Combinatie van de resultaten van het praktijkonderzoek (afbeelding 1.2) met die van de kortere (afbeelding 2.1) en langere termijn studies (tabel 2.1) laat een vrij duidelijk beeld zien over de tijdsafhankelijkheid van corrosie in de bodem. Afbeelding 2.4 laat de corrosie in de bodem zien op een logaritmische tijdschaal. Dit leidt tot een ogenschijnlijke vervorming van de curves. Zo gaat een lineair verband er exponentieel stijgend uit zien. De aanvankelijke lineaire dikteafname in de eerste jaren uit afbeelding 2.1 ziet er nu anders uit, maar de knik rond de 3 jaar is nog wel goed te zien.

In afbeelding 2.4 is een beschrijvende lijn gelegd die grosso modo het gemiddelde gedrag op de verschillende tijdschalen beschrijft. Op basis van de gelijkenis van het corrosieproces met dat van verweerbare staalsoorten (CorTen-staal, zie paragraaf 2.1.1) is voor de vorm van deze beschrijvende lijn gekozen voor de som van een exponentieel en een lineair verband.² Deze beschrijvende functie bereikt de waarde 0,3 mm voor de dikteafname na 100 jaar.

² Hiervoor is de integraal van vergelijking 2.1 gebruikt. Er is gebruik gemaakt van kleinste kwadraten regressie van de meetwaarden in afbeelding 2.4 met het aantal locaties waarop een meetwaarde is gebaseerd als weefactor. Het resultaat is: $t_{stab} = 1,9$ jaar, $A_0 = 0,18$ mm en $Y_0 = 1,2$ micron/jaar.



Afbeelding 2.4: Samengesteld beeld over de tijdsontwikkeling van corrosie van ijzer/staal op basis van experimentele resultaten op een tijdschaal van 1 tot duizend jaar. De grafiek is opgebouwd uit de informatie van afbeelding 1.2 en 2.1 en van tabel 2.1. Een beschrijvende lijn (zie tekst) is toegevoegd om het gemiddelde gedrag te beschrijven, samen met een maximaal omhullende lijn voor de dikteafname. Ook de waarde van de corrosietoeslag uit Eurocode 3 voor de bovenste zone weergegeven, alsmede het fitfunctie voor maxima uit het werk van Törnqvist.

Tevens is in afbeelding 2.4 een maximaal omhullende lijn aangebracht die de maximale waarden van de dikteafname op de diverse tijdschalen beschrijft. Deze maximaal omhullende lijn is een factor 5 groter dan de beschrijvende lijn genomen³.

Met name op basis van de NBS-studie [NBS 1971] maar ook [Ohsaki 1981] is vast te stellen dat er grote verschillen tussen locaties optreden in corrosie. Er zijn locaties met aanzienlijk meer dan gemiddelde corrosie, maar ook locaties die bijna geen corrosie te zien geven. Dit grote verschil tussen locaties is blijkens de literatuur slecht te herleiden tot de samenstelling van de bodem. Wel blijkt de grote variatie in corrosie samen te hangen met de ligging van de grondwaterspiegel en de mate waarin de bodem vergraven is geweest. In het praktijkonderzoek wordt het grote verschil in corrosiegedrag tussen locaties gemaskeerd door de grote onzekerheid ten gevolge van walsafwijkingen.

De mate van spreiding tussen locaties leidt tot een bandbreedte om de beschrijvende lijn heen. Deze bandbreedte wordt aan de bovenkant begrenst door de maximaal omhullende lijn. De schatting voor de maximaal te verwachten dikteafname na 100 jaar bedraagt dan 1,5 mm.

³ De grootst waargenomen afwijking tussen een meetwaarde en de beschrijvende lijn bedraagt 3,8 voor de NBS studie, 1,7 voor de studie van Ohsaki, 4,3 voor het praktijkonderzoek, en 4,8 voor de archeologische vondsten van Neff.

Vanuit het opstellen van veilige waarden voor de corrosietoeslag is inzicht gewenst in de maximaal te verwachten corrosie. Deze wordt onder andere beschreven door de maximaal omhullende lijn, maar ook de fitfunctie voor maxima uit het werk van Törnqvist geeft een verwachting voor maximaal mogelijke waarden aan corrosie. In afbeelding 2.4 is daarom ook de fitfunctie van Törnqvist getoond. Deze bereikt een waarde van 2,76 mm bij 100 jaar verblijftijd, en ligt dus ver boven de maximaal omhullende lijn. De vraag is nu wat de waarde is van de fitfunctie voor maxima van Törnqvist.

Törnqvist heeft een machtsfunctie (dikteafname = t^n) gebruikt voor het fitten van de maxima. Als de machtsfunctie gebruikt wordt om meetwaarden te fitten met een duidelijke knik in de tijd gevolgd door een afvlakking (zie afbeeldingen 2.1 en 2.2), dan zal de veel geleidelijkere machtsfunctie bij grote tijdwaarden boven de meetwaarden komen te liggen, en in het lagere tijdgebied eronder. Dit is inderdaad wat er gebeurt lijkt te zijn gezien de ligging ten opzichte van de meetwaarden. Dit impliceert dat voor grote verblijftijden de fitfunctie voor maxima een overschatting geeft van de maximaal te verwachten waarden van corrosie.

In afbeelding 2.4 is tevens de waarde van de corrosietoeslag getoond voor de bovenste zone voor 100 jaar levensduur volgens de Eurocode 3 aangegeven (4,4 mm). Deze waarde is een factor 14 groter dan de verwachting op basis van de beschrijvende lijn, en ook nog bijna een factor 3 boven de maximaal omhullende. Dit toont aan dat de Eurocode waarden voor de corrosietoeslag aan de ruime kant zijn en dus zeker als een zeer veilige waarde kunnen worden beschouwd voor toepassing bij damwanden in waterkeringen.

Op basis van bovenstaande discussie zou gesteld kunnen worden dat een corrosietoeslag van 1,5 mm voor 100 jaar ook al volstaat als veilige waarde. Hierop wordt in hoofdstuk 5 terug gekomen.

2.1.6 *Mogelijke invloed deklaag*

De overeenkomst in tijdsafhankelijkheid tussen corrosie in de bodem en corrosie aan de atmosfeer (m.n. met de verweerbare staalsoorten) maakt het voor de hand liggend dat ook bij corrosie in de bodem het de opbouw van een deklaag is die de corrosie doet afnemen in de tijd. De opbouw van deklaag is immers in de bodem nog eerder aan de orde als een beperkende factor vanwege de zeer gereduceerde mogelijkheid tot afvoer van reactieproducten van het oppervlak weg.

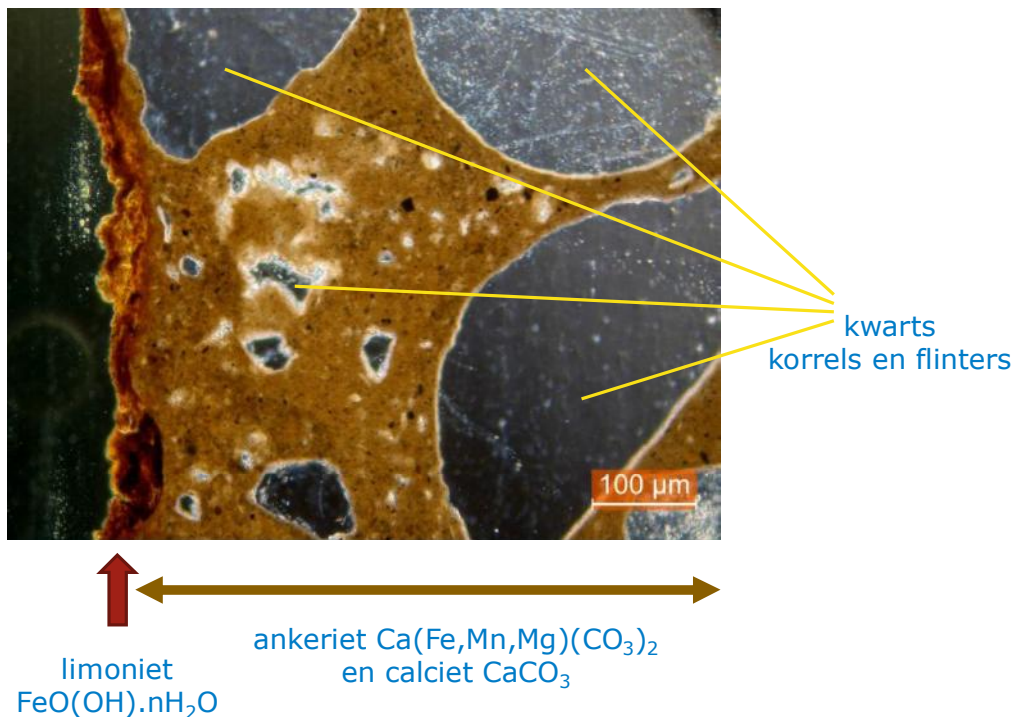
De opbouw van de deklaag van archeologische voorwerpen is reeds beschreven in par. 2.1.3: het model van Neff. In het kader van het praktijkonderzoek is van de deklaag van de plank van de Westerkade Rotterdam (70 jaar verblijf in de bodem) een uitgebreide analyse gemaakt van opbouw en samenstelling [SGS 2014]. Met behulp van polarisatie- en fluorescentiemicroscopie (PFM) is de structuur van de deklaag bepaald. De laag is

- gemiddeld 1000 micron dik;
- heeft aan de zijde van de plank een roestkleurige laag die tot 50 micron dik is en bestaat uit limoniet ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$);
- de bulk van de laag bestaat uit zandkorrels en –flinters, opgevuld met ankeriet (calciumijzercarbonaat) en/of calciet (calciumcarbonaat)
- de porositeit van de deklaag neemt, van de plank weggaande, eerst toe en daarna weer af tot een zeer open structuur ontstaat op de overgang van de deklaag met de bodem.

Met behulp van XRF is het gehalte aan mineralen⁴ vastgesteld als 70% SiO₂, 21 % Fe₂O₃, 4 % CaO en 3% Al₂O₃. Het ijzergehalte van de deklaag komt overeen met een corrosie van 37 micron staal. Ter vergelijking: de gemeten nominale dikteafname van de plank Westerkade bedroeg 55 micron.

Met behulp van SEM/EDXA is de ruimtelijke verdeling van de elementen bepaald. Silicium en aluminium zijn beperkt tot de kwartskorrels en -flinters, ijzer, zuurstof en calcium bevinden zich in de ruimte ertussen. De dunne roestbruine laag tegen het oppervlak van de plank heeft een iets lager ijzergehalte dan de rest van de deklaag. Daarentegen is de concentratie van calcium en zuurstof juist weer lager in de oppervlaktelaag dan in de rest van de deklaag.

Met bovenstaande informatie over de opbouw van de deklaag wordt in afbeelding 2.5 een interpretatie geven van een microscopische opname van de dwarsdoorsnee.



Afbeelding 2.5: Een microscopische opname van een dwarsdoorsnee van de deklaag van de plank Westerkade, Rotterdam. Het staaloppervlak bevond zich aan de linkerzijde van de foto. De foto is genomen in fasecontrast belichting. Kwarts is doorzichtig en daarom donker van kleur, het limoniet-laagje is zichtbaar aan de roestbruine kleur.

Dit resultaat voor de deklaag van de plank Westerkade toont een goede overeenkomst met het model van Neff (zie paragraaf 2.1.3). De dense product layer op het ijzeroppervlak is goed herkenbaar als een dunne laag ijzer oxide/hydroxide.

⁴ Gewichtsverdeling van mineralen in de smelt. Thermisch instabiele verbindingen als hydroxiden en carbonaten zijn niet meer aanwezig.

Deze laag is waarschijnlijk afkomstig van de walshuid dan wel de (poreuse) roestlaag die bij het inbrengen van de plank op het staal aanwezig was. De bulk van de deklaag bestaande uit ankerriet/calciëet plus kwartskorrels kan aangewezen worden als transformed medium (TM), waarvan de structuur geleidelijk opener wordt naar de bodem toe.

De overeenkomst in opbouw tussen de deklaag van de plank Westerkade (67 jaar) en die van archeologische ijzere voorwerpen met verblijftijden van 500 tot 2000 jaar maakt het plausibel te veronderstellen dat er geen grote wijzigingen meer optreden in de deklaag na enkele tientallen jaren. Dit zou dan betekenen dat er sprake is van één mechanisme dat de tijdsontwikkeling bepaalt, waarbij de vorming dan wel aanwezigheid van een deklaag een essentieel onderdeel is.

2.1.7 *Conclusie tijdsafhankelijkheid corrosie*

De beschikbare gegevens van gecontroleerde korte termijn-studies, het in Nederland uitgevoerde praktijkonderzoek, het gemiddelde gedrag gevonden in de literatuur, en de resultaten van archeologisch onderzoek tonen aan dat er na een aanvankelijk snelle corrosie na typisch 3 jaar een afvlakking optreedt, waarna de corrosie nog maar zeer langzaam verloopt. Na verblijftijden van 100 jaar is de staaldikte typisch met ongeveer 0,3 mm afgenomen.

Deze afname hangt samen met, en kan waarschijnlijk verklaard worden door, de opbouw van een afdekkende laag van corrosieproducten die een sterk hinderende werking heeft op de verdere corrosie en dikteafname.

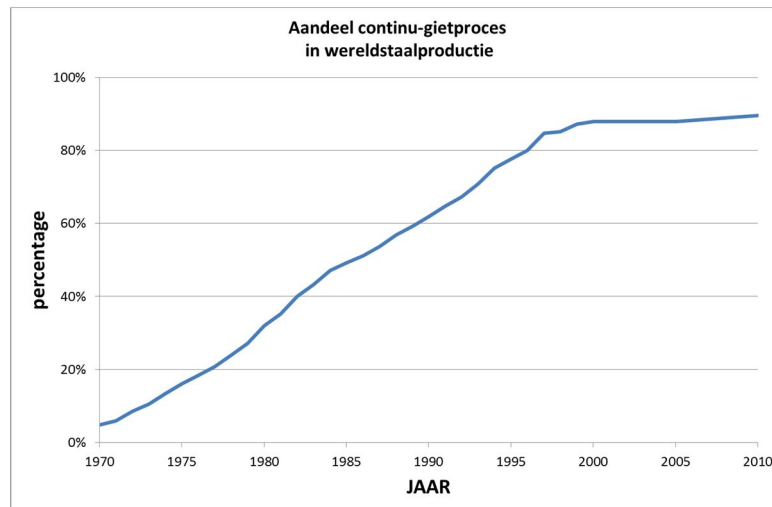
De door de Eurocode geadviseerde waarden voor de corrosietoeslag van 2,4 en 4,4 mm voor respectievelijk de onderste en de bovenste zone, zijn zeer robuust te noemen. Ook als gekeken wordt naar wat op grond van de literatuur maximaal aan corrosie te verwachten is, dan blijft dit nog onder de aanbevolen waarden.

2.2 **Representativiteit van de metingen**

2.2.1 *Representativiteit oude stalen voorwerpen voor nieuwe toepassingen*

De vraag kan gesteld worden in hoeverre onderzoek aan voorwerpen die in het verleden in de bodem zijn gestopt iets kan zeggen over het gedrag van voorwerpen die bij nieuwbouw in de grond geplaatst worden. Zijn er immers in de loop van de tijd geen veranderingen geweest die leiden tot een (eventueel geleidelijk) gewijzigd corrosiegedrag?

Meest in het oog springend hierbij zijn wijzigingen in het productieproces van staal die geleid kunnen hebben tot een veranderde staalkwaliteit. In de periode 1970-2000 is bij de productie van staal geleidelijk overgegaan van blokgieten naar het continu gietproces. Afbeelding 2.6 geeft de opkomst van het continu gieten weer.



Afbeelding 2.6: De opkomst van het continugietproces uitgedrukt als percentage van de wereld-staalproductie. Bron:

<http://www.metapass.com/metaldoc/paper.aspx?docID=25>

De toepassing van het continu gietproces heeft geleid tot een verminderd gehalte aan de elementen fosfor, zwavel, zuurstof en stikstof die als verontreiniging aanwezig waren in het staal. Vraag is dan of deze veranderde samenstelling van koolstofstaal een invloed heeft op het corrosiegedrag.

Deze vraag is voorgelegd aan TNO Materials Solutions (contactpersoon ing. Henk Slot). Op basis van literatuuronderzoek komt TNO tot de conclusie dat de overgang naar continu gieten geen nadelige invloed heeft op de corrosiebestendigheid van warmgewalste stalen [TNO 2015]. Er is geen reden te veronderstellen dat de veranderingen in het productieproces een nadelige invloed hebben op de vorming van de beschermende corrosielaag. De overgang naar continu gieten lijkt eerder de corrosiebestendigheid te verbeteren omdat de variabiliteit van de chemische samenstelling binnen het staalproduct verminderd is.

Uit de analyse van TNO blijkt dat alleen significante veranderingen in de chemische samenstelling van staal, bijvoorbeeld zoals bij legeringen met nikkel of koper, van invloed zijn op de corrosie. Binnen de groep koolstofstaal worden geen verschillen in corrosiegedrag verwacht. Omdat de chemische samenstelling leidend is voor het corrosiegedrag, worden de nabewerkingen die leiden tot de verschillende sterkte-classes van koolstofstaal niet relevant geacht.

2.2.2 Toepasbaarheid voor regionale keringen

In ENW is de vraag gesteld in hoeverre de nieuwe waarden voor de corrosietoetslag ook van toepassing voor regionale keringen.

In fysiek opzicht zullen damwanden in primaire keringen zich niet anders gedragen dan damwanden in regionale keringen. Wel is het mogelijk dat de omstandigheden (grondslag, grondwater, functie) waaronder damwanden in regionale keringen toegepast worden gemiddeld genomen anders zijn. Zo kan er bij regionale keringen wellicht vaker sprake zijn van situaties met een veenlaag boven grondwater of het optreden van potentiële kattenkleigronden. In het volgende hoofdstuk wordt dit geïdentificeerd als een risicofactor voor corrosie vanwege het optreden van mogelijk lage pH waarden. Omdat daar tevens een handelswijze wordt beschreven bij het

hanteren van de corrosietoeslag, is het niet nodig om ook nog onderscheid te maken naar het type kering (regionaal/primair).

Overigens zijn er geen redenen gevonden om aan te nemen dat corrosie van damwanden in waterkeringen zich anders gedraagt dan bij regionale keringen dan bij primaire keringen. In de toepassing van de corrosietoeslag hoeft hier dan ook niet specifiek aandacht aan gegeven te worden.

2.3

Conclusie ten aanzien van toepasbaarheid resultaten

Er zijn geen aanwijzingen gevonden dat moderne staalsoorten zich anders gedragen qua corrosie in de bodem dan de staalsoorten die tientallen jaren geleden zijn toegepast. De resultaten van onderzoek aan stalen voorwerpen die vanaf 1940 geproduceerd zijn geweest kunnen dus gebruikt worden voor het opstellen van een corrosietoeslag van nieuw aan te brengen damwanden. De door Eurocode 3 aanbevolen waarden voor de corrosietoeslag in de bovenste en onderste zone kunnen beschouwd worden als een robuuste en veilige waarde. Hierbij hoeft geen onderscheid aangehouden te worden voor toepassing bij regionale of bij primaire keringen.

3 Zuurgraad als mogelijke risicofactor

3.1 Invloed zuurgraad op corrosie

Er zijn indicaties dat de zuurgraad van bodem en grondwater van invloed kan zijn op de corrosie van staal in de bodem. Echter, hoe de relatie tussen pH en corrosie in kwantitatief opzicht is, en hoe sterk het effect is van een lage pH is niet beschreven in de literatuur. 'Normale' variaties qua pH (tot pH = 4) worden gedekt door de in Eurocode 3 opgenomen waarden voor de corrosietoeslag, omdat de uitgebreide literatuurstudie van Törnqvist metingen tot pH=4 kent (zie paragraaf 2.1.3), en tegelijkertijd maxima laat zien die onder de aanbeveling van Eurocode 3 liggen (zie paragraaf 2.1.5).

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op de waarschijnlijkheid waarin extreem lage pH's (waarden lager dan 4) kunnen voorkomen in Nederland, en hoe daar dan mee omgegaan kan worden bij de aanleg van stalen damwanden. De te beantwoorden onderzoeksvraag wordt dan of er in Nederland bij de toepassing van damwanden in waterkeringen **situaties te verwachten zijn met een pH lager dan 4**. Zo ja, wat betekent dat dan voor de waarde van de te hanteren corrosietoeslag, dan wel: zijn er andere maatregelen nodig om tot veilige toepassing te komen.

3.2 Voorkomen pH-waarden in grondwater in Nederland

3.2.1 *Beeld ondiepe bodem in Nederland*

In de Geochemische bodematlas van Nederland (Mol et al. 2012) wordt een kwantitatief beeld geschetst van de chemische samenstelling van de bodem. De atlas is samengesteld op basis van 358 locaties van landbouwkundige en natuurbodems op dieptes tot 1,2 m. In de atlas wordt de bodem in Nederland in vijf typen ingedeeld: veen, zand, mariene klei, fluviaatiele klei en löss.

Het beeld qua pH waarden in de bodem hangt sterk af van het type bodem.

Mariene en fluviaatiele klei heeft vrij neutrale pH waarden. De waarde van 4 wordt dan ook slechts door enkele procenten van de locaties/meetwaarden onderschreden. Een uitzonderlijk lage pH zal over het algemeen niet voorkomen in gebieden met deze grondsoort.

Anders is de situatie bij zand en veen, deze zijn aanzienlijk zuurder, met pH waarden tot grofweg 3. De mediaanwaarde van de pH bedraagt voor beide bodemtypes 4,5-4,7. De hoge zuurgraad van deze bodems komt tot uiting in een 5-percentielwaarde van 3,1 en 4,1 voor veen-, respectievelijk zandbodems op 1 meter diepte. De hoge zuurgraad van zandbodems is een gevolg van de verzuring van landbouw- en natuurbodems, met name vanwege de intensieve veehouderij in Nederland.

De informatie uit de geochemische bodematlas (landbouw- en natuurbodems, diepten tot 1,2 m) is vanwege verschillen in diepte en landgebruik maar beperkt toepasbaar voor damwanden in waterkeringen. Enerzijds zal er zelden sprake zijn van landbouw dan wel natuur in de directe omgeving van de damwand, anderszijds zijn voor damwanden ook aanzienlijk grotere dieptes aan de orde (tot 20 meter).

3.2.2 *Beeld van diepere bodem en grondwater*

De samenstelling van grondwater op grotere diepten in Nederland is bekend uit werk van TNO en Deltares, zoals weergegeven in [Griffioen et al. 2013]. Het betreft analyse van grondwatermonsters uit de landelijke database grondwateronderzoek waarin grondwatermonsters tot 30 meter diepte zijn opgenomen. Het gaat om 276.000 monsters uit 12.596 putten verspreid over Nederland. De studie maakt onderscheid tussen holocene en pleistocene gebieden in Nederland.

Voor holoceen Nederland, dat gedeelte van het land dat ontstaan is onder invloed van de zee en de rivieren, kan het grondwater als neutraal gekarakteriseerd worden. Uit de data van het uitgebreide achtergrondrapport van de studie [Vermooten 2006] kan afgeleid worden dat op plaatsen waar in holoceen Nederland keringen aanwezig zijn en mogelijk damwanden gebruikt zouden kunnen worden, de pH in de diepere bodem niet lager komt dan 5,3⁵.

In veengebieden is er dus een opvallend verschil in zuurgraad tussen het ondiepe grondwater (5-percentiel waarde = 3,1; mediaanwaarde pH = 4,5) en het diepe grondwater. Dit verschil zou samen kunnen hangen met de beschikbaarheid van zuurstof boven de grondwaterspiegel, waardoor oxidatie van veen optreedt en het geproduceerde organisch materiaal en humuszuren leiden tot een verzuring van het ondiepe grondwater.

Het diepere grondwater in de pleistocene gebieden van Nederland kan over het algemeen als neutraal tot zuur gekarakteriseerd worden. De 17,5-percentielwaarden in de diverse deelgebieden van pleistoceen Nederland liggen tussen 4,4 en 7,1.

3.2.3 *(Potentiële) Kattekleigronden*

Hoewel het grondwater in holoceen Nederland neutraal genoemd kan worden zijn er in dit gebied toch omstandigheden die leiden tot een hoge zuurgraad. Het betreft de zogenaamde kattekleigronden in West-Nederland waar de afbraak van pyriet (FeS_2) onder aerobe omstandigheden kunnen leiden tot pH-waarden tot 3 [van Wallenburg 1975]. Dit zijn uitzonderlijk lage pH-waarden, en dus een risicofactor om rekening mee te houden.

Potentiële kattekleigronden betreffen lutumrijke (>35%) bodemlagen van anaerobe mariene sedimenten met een pyriet-gehalte dat in sulfaat-equivalenten hoger is dan de hoeveelheid Ca^{2+} . Deze lagen zijn onder anaerobe omstandigheden ontstaan en zijn gaandeweg begraven onder latere sedimenten dan wel veenlagen. Indien potentiële kattekleigronden omgewoeld of ontgonnen worden waardoor zuurstof toegang tot de bodem krijgt, kan oxidatie van het pyriet optreden onder de vorming van zwavelzuur. Dit kan afhankelijk van het pyrietgehalte en het bufferend vermogen van de bodem leiden de vorming van zogenaamde katteklei: een gele verkleuring van de grond door jarosietvorming. Deze gronden kennen afhankelijk van de doorlatendheid extreem lage pH-waarden. Vorming van katteklei treedt bijvoorbeeld op bij de ontginning van landbouwgronden in droogmakerijen. De verzuring van de bodem zal waarschijnlijk op een termijn van maanden na het begin van blootstelling aan zuurstof op gaan treden [de Vries, 2015].

⁵ Vermooten 2006 geeft statische informatie voor alle combinaties van geotopgebieden en geologische formaties in Nederland. De waterkeringen in Nederland liggen in de geotopgebieden 1b: Holland (omvat vrijwel geheel Noord- en Zuid-Holland), 2a: Rijndelta en IJssel en 5c2: Friesland met veen, Wieringermeer en Texel. Uit de tabellen voor deze gebieden kan afgeleid worden dat de pH waarden in de onderliggende geologische formaties niet lager is dan 6,6, 6,0 en 5,3 respectievelijk.

De mogelijke vorming van kattenklei in de bovenste meters van de Nederlandse bodem kan ingeschat worden aan de hand van Afbeelding 3.1. Deze kaart is afkomstig uit de Bodemkaart Nederland schaal 1:50.000, en is tot stand gekomen op basis van veldverkenningen waarbij tot op 1 meter diepte is geboord. De aanwezigheid van kattenkleivlekken is gebruikt als indicatie voor de aanwezigheid van pyriet in de bodem. Op basis van meer algemene bodemkarakteristieken is tot een afbakening van de gebieden gekomen. De aangegeven gebieden kunnen als potentiële kattenkleigebieden beschouwd worden.



Afbeelding 3.1: Ligging van potentiële kattenkleigronde in Nederland. Deze kaart is digitaal beschikbaar als shape-file bij programmabureau HWBP-2 en op website <http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/programma/-projecten/hwbp-2/kennis-delen/nieuwe-methode>. Bron: Bodemkaart Nederland schaal 1: 50.000.

Om bij het ontwerp van damwanden vast te stellen of er rekening gehouden moet worden met mogelijk lage pH-waarden kan gekeken worden of de locatie in een potentieel katekleigebied valt. Bij twijfel over de interpretatie van de kaart kan contact opgenomen worden met de WUR Alterra, team Bodem, Water en Landgebruik.

Op basis van afbeelding 3.1 kan gesteld worden dat potentiële kateklei maar zeer beperkt aanwezig is in de nabijheid van primaire keringen.

3.3 **Aanbevelingen voor omgaan met zuurgraad als risicofactor**

Een uitzonderlijk lage pH als risicofactor voor de corrosie van damwanden in waterkeringen lijkt slechts in een beperkt aantal situaties aan de orde te zijn. Het betreft situaties waar oxidatie van veen dan wel van pyriet in de bodem rondom de damwand op kan treden, dan wel waar de bodem bestaat uit zandgrond en het grondwater een pH onder de 4 heeft. Over het algemeen zullen deze situaties optreden in de bovenste zone zoals die in de nieuwe methode voor het bepalen van de corrosietoeslag gehanteerd wordt.

Voor de bespreking hieronder is het van belang te beseffen dat een verhoogde corrosie kán leiden tot een kortere levensduur van de damwand. Óf het leidt tot een kortere levensduur hangt mede af van factoren als (het ontbreken van) ruimtelijke ontwikkelingen bij de kering of gewijzigde inzichten in de stabiliteit van damwanden in keringen. Verwacht mag immers worden dat door deze factoren de kans groot is dat de standtijd van de damwand korter zal zijn dan de 100 jaar die als uitgangspunt dient voor het ontwerp.

Overigens hoeft een grotere corrosie dan voorzien niet per sé te leiden tot onveilige situaties, zo lang maar op tijd de toestand (i.c. de dikte) van de damwand bekend is. Het proces van ontwerp, aanleg en toetsing van de damwand moet er dan op gericht zijn hier voldoende waarborgen voor te krijgen.

3.3.1 *Situaties waarin oxidatie van veen op kan treden*

Oxidatie van veen kan aan de orde zijn bij damwanden die als stabiliteitsscherm gebruikt worden aan de teen van de dijk of meer in het achterland, waarbij er sprake is van veenlagen aan de oppervlakte in het achterland. Ook kan het gaan om damwanden in veenkades. Omdat in deze situaties het grondwater typisch niet meer dan een meter diep zal zitten, zou een versterkte corrosie betrekking hebben op de bovenste meter van de damwand. Omdat hier zelden het maatgevend moment zal optreden en omdat de toeslagwaarden in de nieuwe methode voldoende robuust lijken (par. 2.1) kan het risico van een lage pH op de levensduur van de damwand als erg klein beschouwd worden. In het merendeel van de situaties met oxidatie van veen zal de corrosietoeslag van Eurocode 3 gebruikt worden conform de nieuwe werkwijze (indeling naar bovenste en onderste zone met een toeslag van respectievelijk 4,4 en 2,4 mm) een veilige waarde blijken te zijn.

Mocht er desalniettemin toch gereede twijfel zijn aan de robuustheid van de corrosietoeslag voor bepaalde situaties waar oxidatie van veen op kan treden, dan kan men alsnog besluiten tot het slaan van een testplank die na verloop van tijd op de werkelijk opgetreden corrosie onderzocht wordt. Door gebruik te maken van de beschrijvende lijn uit afbeelding 2.4 kan dan een verwachting gemaakt worden van de verdere dikteontwikkeling van de damwand.

3.3.2 *Situaties waarin oxidatie van pyriet op kan treden*

De aanwezigheid van hoge pyriet gehalten in de bodem hoeft an sich niet te leiden tot lage pH waarden. Boven de grondwaterspiegel kan verwacht worden dat

eventueel pyriet reeds lang weggeoxideerd is, terwijl onder de grondwaterspiegel geen oxidatie op kan treden. In potentiële katekleigebieden zal oxidatie van pyriet alleen op kunnen treden wanneer bij de aanleg van damwanden pyriet in de bodem beschikbaar wordt gemaakt voor oxidatie. Dit kan aan de orde zijn als:

1. de grondwaterspiegel blijvend verlaagd wordt;
2. grond van onder de grondwaterspiegel verplaatst wordt naar de zone boven de waterspiegel.

Een blijvende verlaging van de grondwaterspiegel zal zelden voorkomen. Wel kan een tijdelijke verlaging tijdens de aanleg van damwanden aan de orde zijn. Omdat het risico van de vorming van kateklei als significant gezien wordt, moet een tijdelijke verlaging van het grondwater zo beperkt mogelijk blijven, bij voorkeur tot ongeveer een maand.

Situatie 2 kan ontstaan door vergraving van de grond vanwege de aanleg van de damwand. Echter, indien grond van onder het grondwaterniveau weer teruggebracht wordt onder grondwaterniveau en tussentijds slechts kort in contact is geweest met zuurstof, maximaal een maand, lijkt het risico op lage pH waarden erg beperkt.

Bij aanleg van damwanden in potentiële katekleigebieden zijn er meerdere maatregelen te nemen die het optreden van lage pH waarden in de bodem voorkomen:

- a. monitoring van de pH van grondwater, bodem of ontgraven grond om te beoordelen of pH-daling inderdaad optreedt. Dit hoeft immers niet plaats te vinden, want is afhankelijk van het pyrietgehalte en het bufferend vermogen van de grond.
- b. voorkom dat door het plaatsen van de damwand de grondwaterspiegel blijvend verlaagd wordt, dan wel tijdens werkzaamheden over een significante tijdsduur verlaagd is;
- c. Indien er voor de aanleg van de damwand grond vergraven dient te worden van onder de originele waterspiegel, zorg dan dat deze grond ook weer onder de waterspiegel teruggeplaatst wordt en slechts gedurende korte tijd in contact is geweest met zuurstof. Indien deze grond toch langere tijd in contact komt met zuurstof kan overwogen worden om kalk/calciumcarbonaat in een verhouding 1:1 met het in de grond aanwezige zwavel (sulfaat-equivalenten van pyriet gehalte) toe te voegen dat als pH buffer kan dienen.

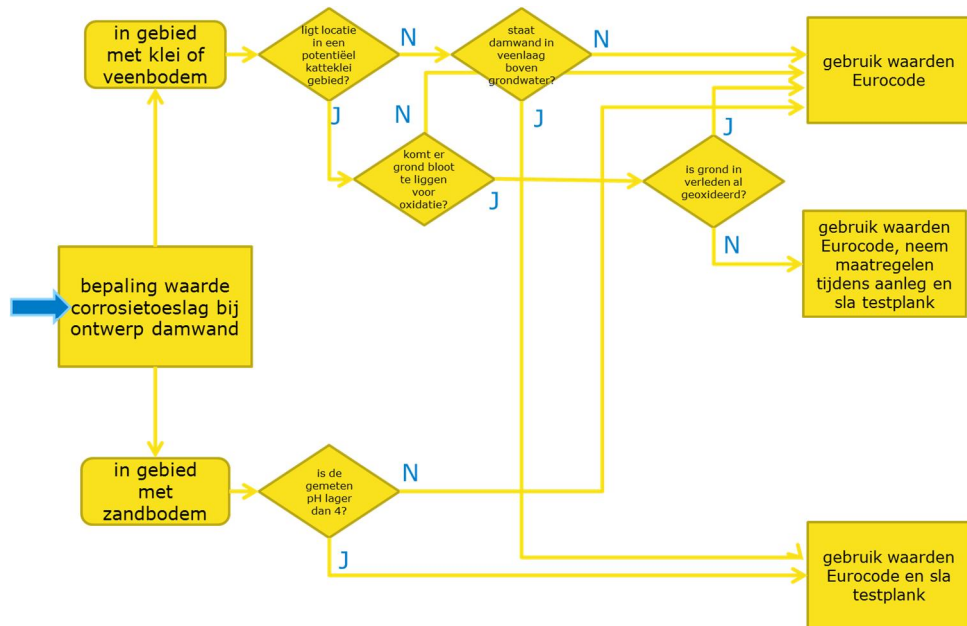
De keuze van de te nemen maatregel(en) kan het beste bij het project gelegd worden. Als waarborg dat er daadwerkelijk geen significante corrosie door pH verlaging opgetreden heeft, moet een testplank bij de damwand geslagen worden.

3.3.3 *Situaties met zandbodems*

Damwanden in waterkeringen zullen zelden toegepast worden in gebieden waar de bodem bestaat uit (pleistocene) zandgronden. Indien dit toch gebeurt is het raadzaam om te onderzoeken of een lage pH van het grondwater aan de orde is. Het eenvoudigst kan dit gebeuren door analyse van grondwatermonsters. Mocht blijken dat de pH onder de 4 ligt, naar verwachting in 5% van de gevallen, dan zou besloten kunnen worden om, vergelijkbaar aan de situatie bij oxidatie van veen (paragraaf 3.3.1), de toetslagwaarde van Eurocode 3 te gebruiken conform de nieuwe methode en tevens een testplank te slaan. Hiermee zou op termijn de daadwerkelijke corrosie ter plaatse vastgesteld kunnen worden.

3.3.4 *Beslisboom vereiste waarde corrosietoetslag*

Bij de toepassing van damwanden kan het risico van een door een lage pH versterkte corrosie ondervangen worden door onderstaande beslisboom te gebruiken bij het vaststellen van de vereiste corrosietoeslag.



Afbeelding 3.2: Beslisboom voor de toepassing van de juiste corrosietoeslag, waarin rekening is gehouden met situaties waarin lage pH-waarden voor kunnen komen.

4 Eerste ervaringen met nieuwe methode corrosietoeslag

Het advies van ENW van mei 2014 over de nieuwe methode voor het bepalen van de corrosietoeslag bij damwanden is direct toegepast binnen de dijkversterking van het programma HWBP-2. Bij de lopende projecten Koegraszeedijk (600 meter damwand) en Spui-West (enkele damwanden van enkele honderden meters) zijn de ontwerpen gebaseerd op de nieuwe methode. Omdat beide projecten gebruik maken van design&construct contracten zijn de ontwerpen gemaakt door de aannemers dan wel de ingenieursbureaus op basis van het protocol. Tevens zijn er testpalen geslagen bij deze projecten. Om te evalueren of de nieuwe methode werkbaar is, zijn deze partijen na het ontwerp benaderd met een vragenlijst. Hieronder worden de ervaringen van de twee projecten samengevat.

4.1 Beschrijving nieuwe methode corrosietoeslag

Het Expertise Netwerk Waterveiligheid heeft mei 2014 op basis van de resultaten het programma HWBP-2 de gelegenheid gegeven om in een proefjaar te gaan werken met een nieuwe methode voor het afleiden van de corrosietoeslag [ENW 2014]. Tegelijkertijd zou het praktijkonderzoek afgerond worden met onderzoek aan een beperkt aantal planken met hoge leeftijd c.q. uit locaties waar de zuurgraad een risicofactor voor corrosie kan zijn. Als waarborg tegen mogelijk tegenvallende uitkomsten van dit afrondende onderzoek zal er bij dijkversterkingsprojecten in dat proefjaar een testplank geslagen worden waarmee eventueel te zijner tijd de actuele corrosie kan worden vastgesteld. Eind 2015 zullen de resultaten van dit proefjaar door ENW gebruikt worden voor een definitief advies over de corrosietoeslag.

Om ontwerpers van dijkversterkingen in dit proefjaar duidelijkheid te geven, zijn door HWBP-2 twee protocollen opgesteld:

- 'Protocol nieuwe werkwijze corrosietoeslag' [HWBP2 2014-1]: geeft een beschrijving voor ontwerpers van hoe de nieuwe methode toegepast moet worden. Kenmerkend in de nieuwe methode is het hanteren van twee zones voor de corrosietoeslag, namelijk een onderste zone onder grondwater en een bovenste zone boven grondwater c.q. met geroerde grond;
- 'Protocol vervaardigen en slaan van testplanken' [HWBP2 2014-2]: geeft aan hoe een testplank toegepast moet worden bij de uitvoering van damwanden in dijkversterkingprojecten.

Deze protocollen zijn op de website van HWBP-2

(<http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/programma'-projecten/hwbp-2/kennis-delen/nieuwe-methode/>) beschikbaar gesteld.

Vanwege de behoefte om op korte termijn een protocol testplanken mee te kunnen geven aan de dijkversterkingsprojecten is niet ingegaan op de suggestie van ENW om teststrips te gebruiken in plaats van hele planken. De inschatting hierbij was dat het binnen een dijkversterkingsproject beter uitvoerbaar is om één extra plank te slaan, dan om een andersoortig voorwerp als een strip de grond in te brengen. Om discussies over representativiteit van testplanken uit te sluiten is er voor gekozen om identieke planken op identieke manier, maar losstaand van damwand, aan te brengen tot identieke diepten. Ook qua uitvoering in de praktijk is dit de meest eenvoudige oplossing.

4.1.1 Protocol nieuwe methode corrosietoeslag

De tekst van het protocol is gegeven in bijlage C. Het beschrijft hoe op basis van 1) de laagst verwachte grondwaterstand, 2) de diepte tot waarop de grond niet

geroerd is geweest en 3) de eventuele aanwezigheid van bodemverontreiniging de juiste waarde voor de corrosietoeslag bepaald kan worden. Het protocol maakt nadrukkelijk de inperking tot warmgewalste damwandplanken die tweezijdig met grond belegd zijn.

4.1.2 *Protocol prepareren en slaan van testplanken*

De tekst van het protocol is gegeven in bijlage D . In het kort komt het erop neer dat een identieke plank als van de echte damwand op 1 tot 5 meter afstand geplaatst wordt, zonder galvanisch contact. De dikte van de plank wordt vóór het plaatsen op gemarkeerde plaatsen met ultrasoon diktemetingen bepaald. De informatie hierover wordt vastgelegd in een PETP-plaat op de testplank zelf en in de legger van het waterschap.

Hieronder wordt beschreven wat de resultaten van het werken met deze twee protocollen is, en in hoeverre aanpassingen gewenst zijn.

4.2 **Case dijkverbeteringsproject Koegraszeedijk**

situatie

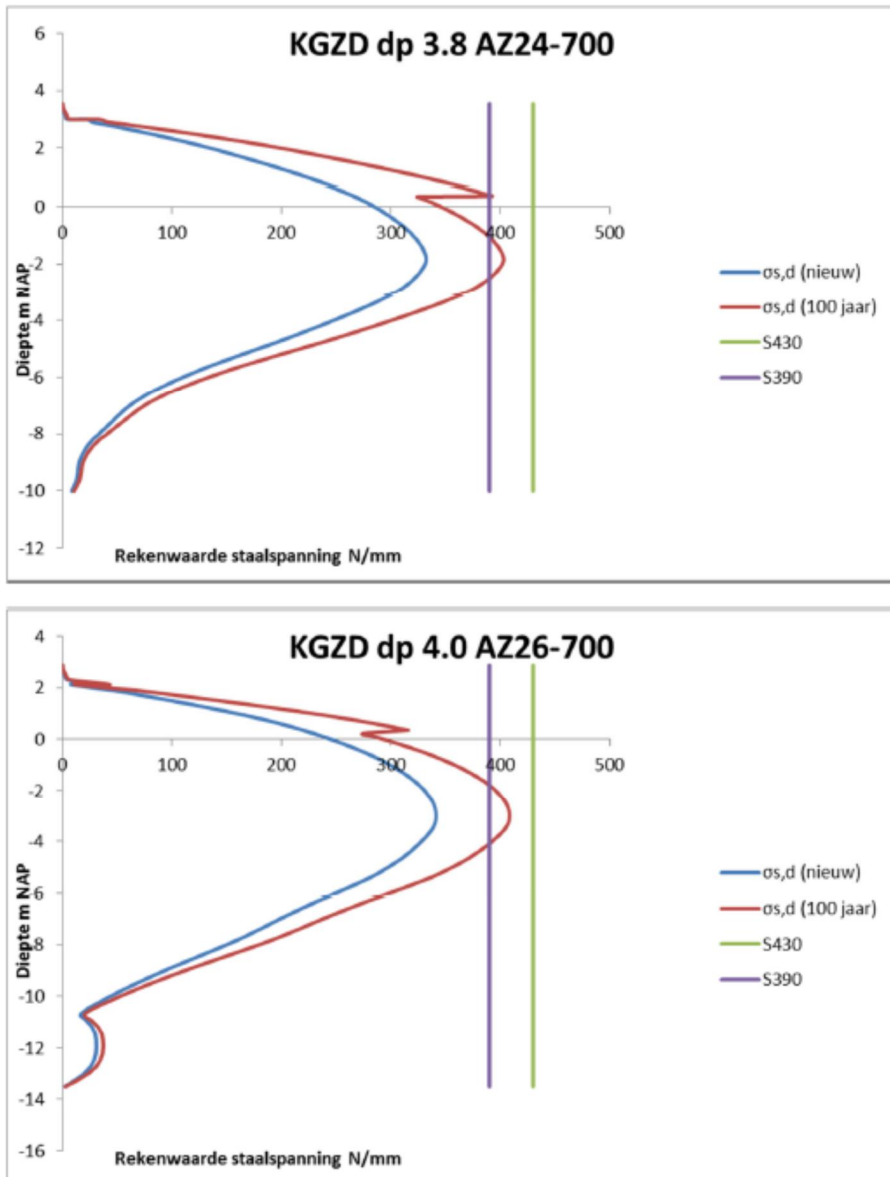
Bij Den Helder heeft Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier de Koegraszeedijk versterkt over een lengte van 800 meter op buitenwaartse stabiliteit en piping. Er is voor gekozen om over een lengte van 600 meter een 14 tot 16 meter diepe verankerde damwand te plaatsen. Hierbij is uitgegaan van twee karakteristieke dijkprofielen, namelijk bij dijkpaal 3,8 en 4,0. De damwand is net achter de kruin van de dijk geplaatst. De laagst gemeten grondwaterstand is op basis van peilbuizen en waterspanningmeters in voor- en achterland bepaald op NAP +0,4 m.

Voor de aanleg van de damwand wordt de bovenste meter vergraven (tot NAP +3-3,5 m). De kering bestaat uit een zandlichaam met kleibekleding. De ondergrond bestaat uit een afwisseling van klei- en zandlagen tot NAP -2m, gevolgd door klei- en veenlagen. De pleistocene zandlaag ligt op NAP -5,3, met nog een leemlaag op NAP -7 tot -8.

Maatgevende zone voor corrosietoeslag

De in de damwand onder maximale belasting optredende spanningen zijn berekend voor de twee karakteristieke profielen, en zijn weergegeven in Afbeelding 4.1. Hierin is voor de situatie na 100 jaar uitgegaan van een diktevermindering conform de toeslagwaarden voor bovenste en onderste zone. De grens tussen de twee zones ligt op de laagste grondwaterstand (NAP +0,4 m). Eerdere vergravingen van grond bij de Koegraszeedijk dateren van tientallen jaren geleden (laatste dijkversterking) en worden niet meer relevant geacht.

Uit de berekeningen is af te leiden dat voor beide karakteristieke profielen de onderste zone bepalend is voor de keuze van het damwandprofiel. Het opstellen van de berekeningen met de twee zones voor de corrosie heeft geen problemen opgeleverd.



Afbeelding 4.1: Spanningen in de damwand van de Koegraszeedijk zoals berekend voor een belastingsituatie als nieuw (blauwe curve) en na 100 jaar corrosie (rode curve: op basis van de toetswaarden voor bovenste en onderste zone). De paarse en groene lijn geven de maximaal op te brengen staalspanning van staalkwaliteit S390 respectievelijk S430 weer. De bovenste grafiek geeft de situatie weer bij dijkspaal 3,8 (AZ24, flensdikte 9 mm, lengte plank 14 meter), de onderste voor dijkspaal 4,0 (AZ26, flensdikte 12,2 mm, lengte plank 16 meter).

Testplank

Bij de damwand is een losstaande testplank geslagen, zie afbeelding 4.2.



Afbeelding 4.2: Testplank Koegraszeedijk. Met de klok mee (vanaf linksboven): de geprepareerde testplank; de externe dradenkruizen die de plaatsen aangeven voor de ultrasonische diktemetingen; het slaan van de damwand in de Koegraszeedijk; de losse testplank na het aanbrengen.

Er zijn op de testplank geen ultrasoon diktemetingen uitgevoerd. Dit werd tijdens de uitvoering verondersteld niet nodig te zijn omdat de plank direct van de fabriek af kwam en nog niet geroest was. Daarmee was de dikte immers voldoende bepaald, naar het leek.

Het hoogheemraadschap beveelt aan om in de tekst van het protocol testplanken ondubbelzinnig op te nemen dat de dikte van de plank gemeten moet worden, en welke meetnauwkeurigheid hierbij nodig is.

4.3 Case dijkverbeteringsproject Spui-West

Situatie

Bij dijkversterkingsproject Spui-West is in sectie 3a1 bij gemaal 'De Volharding' een onverankerde damwand geplaatst in de teen van de dijk. Het betreft een AZ24-700N profiel met een lengte van 19,5 meter. Op vijf meter afstand is in het verlengde van de damwand een losse testplank geslagen. Deze is door de leverancier geprepareerd en op dikte bemeten.

De dijk is ter plekke opgebouwd uit een kleikern die aan de binnenbermszijde is versterkt met zand. De damwand wordt grotendeels onverankerd uitgevoerd, met slechts op plaatsen van coupures en/of leidingkruisingen een verankering. Voor het aanbrengen van de damwand is de bovenste 2 meter vergraven. Daarmee werd het grondwater bereikt, dat op ongeveer mv -1,5 m ligt. Eerdere vergravingen dateren uit de vorige dijkversterking en zijn 25 à 35 jaar oud.

De bodem is opgebouwd uit meerdere klei- en veenlagen met een watervoerende zandlaag op NAP -11 tot -13 m. De pleistocene zandlaag ligt op NAP-19 m.

De grondwaterstand is vastgesteld aan de hand van metingen met peilbuizen en waterspanningsmeters gedurende een periode van 3 tot 4 maanden. Het grondwaterniveau heeft een variatie van 0,2 tot 0,3 m. Omdat voor de damwand de onderste zone overduidelijk bepalend is voor het ontwerp, is niet de moeite genomen de grens tussen de twee zones vast te leggen.

Maatgevende zone

Vanwege de hoge stand van het grondwater en de ondiepe vergraving is de bovenste zone voor de bepaling van de corrosietoetslag beperkt tot de eerste twee meter van de damwandplanken. Omdat de lengte van de planken veel groter is (19,5 meter), wordt het grootste moment duidelijk door de onderste zone opgebracht. De onderste zone is daarmee maatgevend voor de dikte van de damwand.

Uitvoering testplank

De testplank is geprepareerd door de leverancier (ArcelorMittal). Deze heeft conform protocol de externe dradenkruizen aangebracht en de dikte gemeten. De dikte op de 19 meetpunten bedroeg 12,2-12,3 mm. De meetpunten zijn aangebracht op de wang van de plank (nominale dikte 12,5 mm). De data omtrent dikte is in een PETP-plaat gegraveerd die bij oplevering op de testplank wordt aangebracht.



Afbeelding 4.3: Testplank Spui-West. Met de klok mee, vanaf linksboven: detail van de PETP-plaat met resultaat diktemetingen; aangebracht dradenkruis meetpunt J; de losse testplank na het slaan; de positie van de testplank ten opzichte van de damwand.

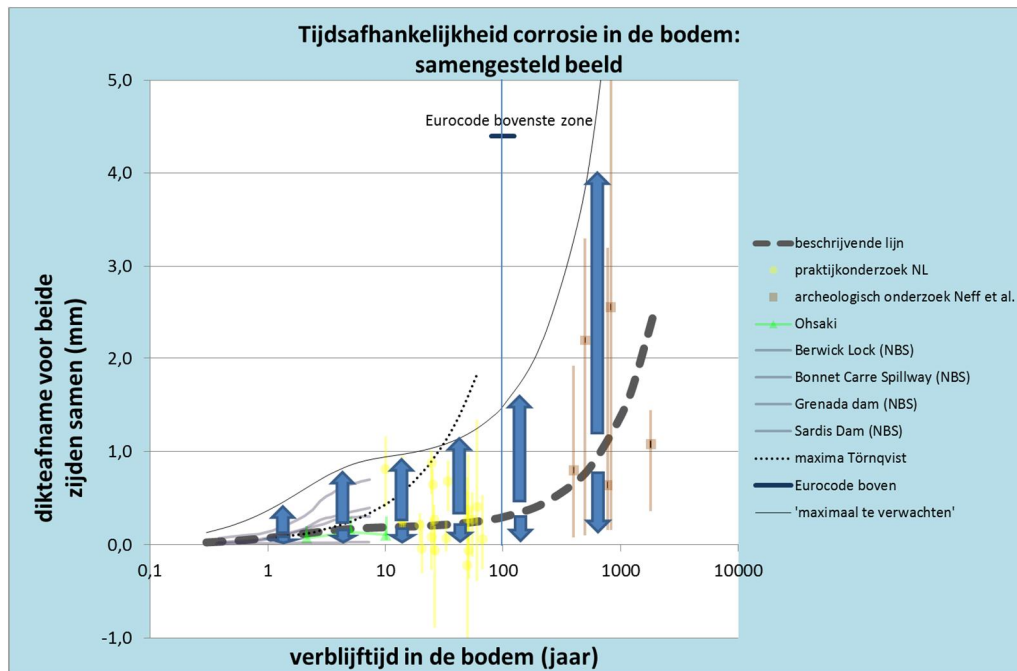
5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Antwoord op onderzoeksvragen

Vraag 1:

Is de conclusie van praktijkonderzoek 2006-2014 voldoende robuust geweest? Zijn de nieuwe inzichten over corrosie in de bodem ook van toepassing bij grotere verblijftijden in de bodem? Uitbreiding van de verzameling onderzochte planken met een aantal oude planken uit met name gebieden met lage pH is gewenst.

Ja, de conclusies van het praktijkonderzoek tot nu toe worden bevestigd met dit afrondende onderzoek. Ook de twee nieuw onderzochte planken met een levensduur van 60 jaar of meer laten een lage corrosiewaarde zien. Voor verblijftijden in de bodem van 100 jaar is te verwachten dat de waarden van de corrosie beperkt zullen blijven, zo rond de 0,3 mm. Om de spreiding tussen locaties te verdisconteren zoals die in het praktijkonderzoek en in korte en lange termijnstudies (zie paragraaf 2.1) is waargenomen, moet hier een factor 5 bovenop gelegd worden. De schatting voor de maximaal te verwachten dikteafname na 100 jaar bedraagt dan 1,5 mm. De in de nieuwe methode gehanteerde toeslagwaarden (2, 4 mm en 4,4 mm voor de onderste, respectievelijk de bovenste zone) kunnen als zeer robuust gekenschetst worden.



In het afrondende onderzoek zijn geen planken betrokken uit situaties met een lage pH. De kans om zo'n situatie aan te treffen is hiervoor te klein gebleken. Het optreden van situaties met een lage pH zal als een risicofactor meegenomen moeten worden bij het ontwerp en aanleg van damwanden. Zie vraag 3, voor hoe te handelen daarbij.

De vraag kan gesteld worden in hoeverre niet toegewerkt zou moeten worden naar een corrosietoeslag van 1,5 mm. De veiligheidsfactor van bijna 3 tussen de

maximaal te verachten dikteafname en de toeslag voor de bovenste zone lijkt immers aan de erg grote kant. Om deze veiligheidsfactor betrouwbaar achterwege te kunnen laten lijkt er nog wel aanvullende informatie noodzakelijk. Deze informatie heeft betrekking op:

1. Nadere afbakening van wat als 'standaard'omstandigheden beschouwd mogen worden, en met name welke situaties als uitzonderlijk gelden. Oftewel: het geldigheidsgebied waarbinnen met 1,5 mm toeslag gewerkt kan worden moet scherp afgebakend worden:
2. Een nadere uitsplitsing van de in afbeelding 2.4 gepresenteerde corrosiegegevens (of vergelijkbare informatie) naar onderste en bovenste zone. Dit moet gebeuren voor eigen metingen uit het praktijkonderzoek, maar ook voor corrosiestudies uit de literatuur. Met een betrouwbaar onderscheid tussen onderste en bovenste zone kan de toeslagwaarde voor de onderste zone wellicht nog lager uitvallen dan 1,5 mm.;
3. Het doen van praktijkonderzoek in de Nederlandse situatie gericht op oude planken en op de bovenste zone. Er zijn tot nu toe namelijk maar weinig diktemetingen beschikbaar uit de bovenste zone.

Het beschikbaar krijgen van deze informatie vergt naar verwachting nog een aanzienlijke inspanning.

Vraag 2:

Is praktijkonderzoek aan historische planken voldoende representatief voor nieuwe planken?

Ja, er zijn geen redenen gevonden waarom nieuw aan te brengen stalen damwanden een andere waarde van de corrosie zouden kennen in de bodem dan in het verleden aangebrachte damwanden of stalen voorwerpen. Alleen significante verschillen in de chemische samenstelling hebben invloed op het corrosiegedrag. Omdat er zich in de loop van de tijd geen veranderingen hebben voorgedaan in de productie van staal en/of damwandplanken die tot dergelijke verschillen hebben geleid, hebben zowel oude als nieuwe planken hetzelfde corrosiegedrag.

Een afgeleide constatering op basis van het effect van chemische samenstelling is dat alle staalsoorten die tot koolstofstaal gerekend kunnen worden een zelfde corrosiegedrag hebben, ongeacht hun sterkte-eigenschappen.

Vraag 3:

Is het risico van zure bodems op corrosie dermate groot dat de toepassing van de nieuwe waarden nader afgebakend moet worden?

Het optreden van een lage pH zal slechts in een beperkt aantal gevallen aan de orde zijn voor damwanden in (primaire) waterkeringen. Wel geldt dat als een lage pH op kan treden er bij de aanleg van de damwand aanvullende maatregelen nodig zijn (maatregelen tijdens aanleg, slaan van een testplank). Het risico van een verhoogde corrosie door zure bodems kan daarmee afdoende beheerst worden. Er is een beslisschema opgesteld voor hoe te handelen dan.

Vraag 4:

Is de werkwijze in het omgaan met de nieuwe waarden voldoende goed uitvoerbaar? Welke zone is meest bepalend voor de te hanteren corrosietoeslag?

De nieuwe werkwijze voor de corrosietoeslag, gebaseerd op de indeling in twee zones, blijkt goed uitvoerbaar. Er zijn geen problemen gemeld vanuit de twee versterkingsprojecten die als eerste de nieuwe methode hebben gehanteerd. De wijze waarop de laagste te verwachten grondwaterstand afgeleid is door de twee projecten is verschillend, maar past voor beide situaties bij de bedoeling van de

nieuwe methode. Bij de twee projecten bleek de onderste zone bepalend voor de waarde van de corrosietoeslag.

Ook het werken met testplanken blijkt goed uitvoerbaar. Wel is het mogelijk gebleken dat bij een project er geen diktemetingen zijn uitgevoerd vóór het slaan van de testplank. Het protocol zou hier ondubbelzinniger in verwoord kunnen worden.

Vraag 5:

Blijven testplanken noodzakelijk (generiek dan wel op risicolocaties)?

Het is niet noodzakelijk om testplanken te slaan bij iedere nieuw aan te leggen damwand. De ruime marge tussen wat maximaal verwacht kan worden aan corrosie en de waarden van de toeslag in de nieuwe methode maakt dit overbodig. Wel kan het slaan van testplanken gewenst zijn in uitzonderlijke situaties, met name bij een lage pH van bodem of grondwater.

Hoewel niet noodzakelijk kan het wel *wenselijk* zijn om testplanken te slaan nieuw aan te leggen damwanden. Zo'n plank kan behulpzaam zijn bij toekomstige toetsrondes, namelijk als er twijfel over de resterende dikte van de damwand bestaat. Met de testplank kan te zijner tijd de daadwerkelijk opgetreden corrosie vastgesteld worden. Extrapolatie door middel van de beschrijvende lijn (paragraaf 2.1.5) levert dan een verwachting van de restlevensduur op. Vraag 6:
Zijn de nieuwe waarden ook van toepassing op regionale keringen?

Er zijn geen redenen gevonden waarom toepassing van damwanden in regionale keringen andere eisen aan corrosietoeslag zou stellen dan in primaire keringen. Wel kan het zijn dat het type grondslag enigszins anders is. Daarmee zou er vaker sprake kunnen zijn situaties waarin een lage pH kan voorkomen, bijvoorbeeld doordat veen of pyriet kan gaan oxideren.

5.2 Mogelijke tegenstrijdigheid met eerder advies corrosietoeslag

In de bijeenkomst van ENW-Techniek waarin het voorstel besproken is om tot een nieuwe methode voor de corrosietoeslag te komen, is ook gevraagd naar de consequenties voor recente projecten waarin de eerder door ENW-aanbevolen waarde van 3 mm toeslag voor venige bodems [ENW 2013] toegepast wordt. Met de nieuwe methode zou mogelijk een tekort ontstaan op de dikte van 1,4 mm (3 mm versus 4,4 mm). Dit kan het geval als én de bovenste zone bepalend is voor de benodigde dikte, én er een risico is op lage pH-waarden. De kans hierop wordt erg klein ingeschat. Mocht dit toch het geval zijn, dan zou dit kunnen leiden tot een verkorting van de levensduur van de damwand.

Deze situaties kunnen eenvoudig ondervangen worden met het slaan van een testplank.

5.3 Conclusies

1. Het afrondend praktijkonderzoek geeft een verdere bevestiging van de resultaten en inzichten uit het eerdere werk [Jansen 2014].
2. De nieuwe methode voor de corrosietoeslag zoals geformuleerd in [ENW2014], namelijk gebaseerd op de Eurocode 3, kan als voldoende veilig beschouwd worden voor de toepassing van damwanden in waterkeringen.

3. De ervaringen bij de eerste dijkversterkingsprojecten die met de nieuwe methode gewerkt hebben, geven aan dat deze goed uitvoerbaar is.
4. Het slaan van testplanken bij nieuwe damwanden is in generieke zin niet noodzakelijk.
5. In uitzonderlijke situaties waarin een lage pH (onder 4) op kan treden zijn eenvoudige aanvullende maatregelen gewenst (maatregelen tijdens aanleg, slaan van testplank).

5.4 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om

1. de nieuwe methode van corrosietoeslag voor stalen damwanden in waterkeringen algemeen van toepassing te verklaren;
2. het beslisschema van afbeelding 3.2 aan te houden om het risico te ondervangen van het optreden van versterkte corrosie door een lage pH van bodem of grondwater;
3. de protocollen voor het toepassen van de nieuwe methode corrosietoeslag en voor het prepareren en slaan van testplanken breed toe te passen.

5.4.1 *Aanscherping tekst protocollen*

Op basis van de ervaringen bij twee dijkversterkingsprojecten en de inzichten opgedaan in dit afrondende onderzoek wordt voorgesteld de tekst van de twee protocollen als volgt aan te scherpen:

Protocol nieuwe corrosietoeslag

- Neem het beslisschema van afbeelding 3.2 op;
- Neem op dat vergravingen van grond ouder dan 10 jaar niet meer relevant geacht worden voor het vaststellen van zones voor corrosietoeslag.
- Wijzig het toepassingsgebied van het protocol van 'warmgewalste damwandplanken' in 'planken en balken van koolstofstaal'. De inperking tot warmgewalste damwandplanken zoals die op grond van het in 2014 gepubliceerde onderzoek [Jansen 2014] voorzichtigheidshalve was opgenomen, blijkt geen grond te hebben. De chemische samenstelling is leidend voor het corrosiegedrag, en daardoor mogen alle elementen van koolstofstaal als één groep beschouwd worden. Met de inperking tot 'planken en balken' heeft het protocol betrekking op damwanden en gordingsconstructies. Trekstangen vallen hier niet onder. Reden hiervoor is dat trekstangen, anders dan de dwarsbelaste balken en planken, gevoeliger zijn putcorrosie. Omdat onderhavig onderzoek alleen heeft gekeken naar uniforme corrosie, moeten trekstangen uitgezonderd worden.

In bijlage E is een aangepaste tekst van het protocol opgenomen.

Protocol prepareren en slaan van testplank

- Neem op dat er diktemetingen gedaan moeten worden met een nauwkeurigheid van 0,05 mm.
- Toevoegen dat representativiteit van de testplank ten opzichte van de damwand uitgangspunt is voor uitvoering en locatie van de testplank.

5.4.2

Toelichting: relatie tussen Eurocode 3 en de nieuwe methode corrosietoeslag
Eurocode 3 [CEN 2007] geeft in deel 5 normen voor de berekening van damwanden. In paragraaf 4.4 worden advieswaarden voor de aan te houden corrosie van palen en damwandplanken gegeven.

	Enkelzijdige afname in 100 jaar (mm)
A niet-verstoorde natuurlijke bodem (zand, silt, klei, schist)	1,2
B vervuilde natuurlijke bodems en industriële bodems	3,0
C agressieve natuurlijke bodems (moeras, veen)	3,25
D niet-gecompacteerde aanvullingen van niet-agressief materiaal	2,2
E niet-gecompacteerde aanvullingen van agressief materiaal	5,75

In de nationale uitwerking kunnen deze advieswaarden aangepast worden om ze geschikter te maken voor de nationale omstandigheden.

Met de nieuwe methode worden de corrosiewaarden van de categorieën A en D overgenomen. De zone onder grondwater die niet verstoord is geweest door vergraving wordt daarmee gelijkgesteld aan categorie A. De zone boven grondwater dan wel waarvan de grond geroerd is geweest wordt gelijkgesteld aan categorie B. Voor categorie C wordt in de nieuwe methode geen aparte categorie aangehouden. Binnen deze categorie kunnen zich situaties voordoen met lage pH-waarden. Met deze situaties wordt rekening gehouden door toepassing van de beslisboom. Het niet-voorkomen van bodemsoorten B en E geldt als voorwaarde in de nieuwe methode.

De (aangepaste) nieuwe methode, zoals opgenomen in Bijlage E, sluit dus volledig aan op de getalswaarden en uitgangspunten van Eurocode 3.

Verduidelijking eenzijdig contact met bodem

Met de geldende formulering van de ENW-aanbevelingen ten aanzien van corrosietoeslag komt het in de praktijk van dijkversterkingen voor dat er in situaties met eenzijdig bodembeleg, een toeslag van 15 mm genomen wordt voor de niet-bodembelegde zijde. Dit is namelijk de grootste waarde uit de Handreiking Constructief Ontwerpen (zijnde de helft van de 30 mm toeslag) en dus altijd veilig. De Handreiking geldt immers als vigerende ontwerprichtlijn!. Omdat deze toeslagwaarde aanzienlijk groter is dan de waarden uit Eurocode 3 /CUR 166 Damwandconstructies (tot 7,5 mm voor de blootgestelde zijde), en omdat Eurocode 3/CUR 166 nadrukkelijk wel geschikt is voor corrosie in contact met water of lucht (en dehandreiking niet) is hier sprake van een ongewenste en foutieve toepassing van een toeslagwaarde.

Aanbevolen wordt om vast te leggen dat de corrosietoeslag voor de niet-bodembelegde zijde gebaseerd dient te worden op Eurocode 3/CUR166.

Lijst van referenties

CEN 2007

European commission for standardization, 'Eurocode 3 Design of steel structures, part 5: piling', February 2007.

ENW 2013

'Advies corrosietoetslag damwanden', advies ENW 13-11, 3 september 2013

ENW 2014

'Advies hanteren nieuwe waarden corrosietoetslag', advies ENW 14-12, 26 mei 2014

Van Wallenburg 1975

C. van Wallenburg, Kattekleigronden en potentiële katteklei in droogmakerijen in het westen van Nederland, Boor en spade, 19 (1975) 116 – 133, beschikbaar via <http://library.wur.nl/WebQuery/groenekennis/789707>

GeoDelft 2006

'Rapport trekken plank terrein IHC Sliedrecht', brief GeoDelft nr CO 398204.154, 19 mei 2006

GeoDelft 2007

'Rapportage inspectie getrokken plank', Brief GeoDelft nr. CO 425180.10, 5 oktober 2007

Gerwin 2000

W. Gerwin, R. Baumhauer, "Effect of soil parameters on the corrosion of archaeological metal finds", Geoderma, vol. 96, p. 63-80, (2000).

Griffioen et al. 2013

J. Griffioen, S. Vermooten, G. Janssen, 'Geochemical and paleohydrological controls on the composition of shallow groundwater in the Netherlands', Applied Geochemistry, vol 39, (2013), 129-149

HWBP2 2014-1

'Protocol nieuwe methode corrosietoetslag', <http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/programma'-projecten/hwbp-2/kennis-delen/nieuwe-methode/protocol-nieuwe/>

HWBP2 2014-2

'Protocol prepareren en slaan van testplanken', <http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/programma'-projecten/hwbp-2/kennis-delen/nieuwe-methode/protocol-prepareren/>

Jansen 2014

'Corrosie van stalen damwandplanken in de grond ; effect van zout grondwater', S. Jansen et al., Rapport 1209030-000-GEO-0006-gbh, Deltares 2014

Kraaijenbrink 2013

'Praktijkonderzoek naar corrosie bij damwanden', P. Kraaijenbrink, Rapport 1206371-000-GEO-0013, Deltares 2013

van Meurs 2011

'Corrosie stalen damwandplanken; twee locaties planken getrokken', G. van Meurs, Rapport 1204612-000-GEO-0002-, Deltares 2011

Mol et al. 2012

G. Mol, J. Spijker, P. van Gaans, P. Römkens (eds), 'Geochemische bodematlas van Nederland', Wageningen academic publishers, 2012, ISBN 978-90-8686-186-6.

Morcillo 2013

M. Morcillo, B. Chico, I. Díaz, H. Cano, D. de la Fuente, "Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review", Corrosion Science, vol. 77, p. 6-24 (2013)

NBS 1971

W.J. Schwerdtfeger, 'Polarization measurements as related to corrosion of underground steel piling', reprinted in NBS monograph 127: 'NBS papers on underground corrosion of steel piling 1962-1971'.

Neff 2006

D. Neff, P. Dilmann, M. Descostes, G. Beranger, 'Corrosion of iron archaeological artefacts in soil: estimation of the average corrosion rates involving analytical techniques and thermodynamic calculations', Corrosion science, vol. 48 (2006), p 2947-2970

Neff 2005

D. Neff, P. Dilmann, L. Bellot-Gurlet, G. Beranger, 'Corrosion of iron archaeological artefacts in soil: characterization of the corrosion system', Corrosion science, vol. 47 (2005), p. 515-535.

Ohsaki 1982

Y. Ohsaki, 'Corrosion of steel piles driven in soil deposits', Soil and foundations, vol. 22, no. 3, p. 57-76 (1982).

RWS-GPO 2014a

'Corrosieonderzoek Westerkade', 14 mei 2014

RWS-GPO 2014b

'Corrosieonderzoek Alblasserdam', 2 oktober 2014

RWS-GPO 2015a

'Corrosieonderzoek Hollandsche Ijsselkering', 6 januari 2015

RWS-GPO 2015b

Corrosieonderzoek Heijsehaven Rotterdam', 12 januari 2015

RWS-GPO 2015c

'Corrosieonderzoek Julianakanaal Stein', 12 januari 2015

SGS 2014

'Praktijkonderzoek damwand Westerkade te Rotterdam', SGS rapport A875380, 24 juli 2014

TAW 1994

'Handreiking Constructief Ontwerpen', Technische adviescommissie Waterkeringen, april 1994

TNO 2015

'Warmgewalste stalen damwandplanken'.

Henk Slot, briefrapport TNO Materials Solutions dept, 10 november 2015

Törnqvist 2005

J. Törnqvist, 'Corrosion of steel pipe piles, dimensioning based on empirical material', VTT publication June 2005.

Vaynman et al., 1997

S. Vaynman, R. Guico, M. Pine, S. Manganello, 'Estimation of atmospheric corrosion of high-strength low-alloy steels', Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science vol. 28A (5), 1997, p 1274-1276

Vermooten 2006

J.S.A. Vermooten, L. Maring, M.E. van Vliet, J. Griffioen, 'Landsdekkende, geologische karakterisering van de regionale grondwatersamenstelling in de geotop van Nederland; Datarapport', TNO-rapport 2006-U-R0171/A, 18 december 2006.

De Vries 2015

Prive-communicatie, Folkert de Vries, Alterra/team Bodem, Water en Landgebruik

Bijlage A Is er een trend in de resultaten van het praktijkonderzoek?

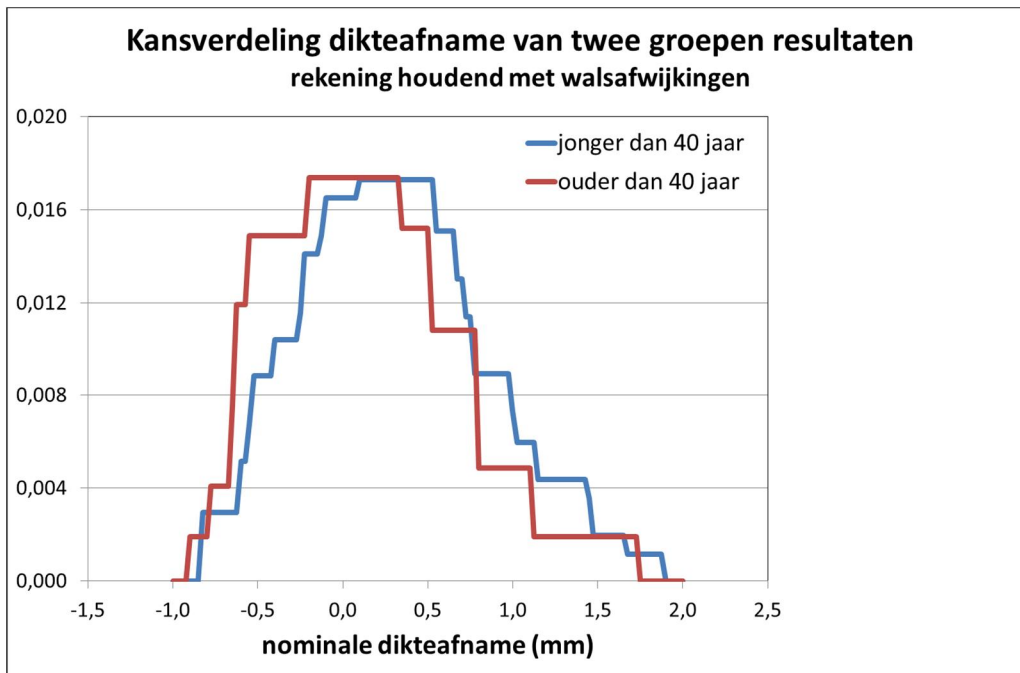
In paragraaf 1.3.1 is geconstateerd dat het lijkt alsof er in afbeelding 1.2 een negatieve trend in de nominale dikteafname te zien is in de resultaten van het praktijkonderzoek met toenemende verblijftijd in de bodem. Deze waarneming is mede ingegeven door de grote waarde van de nominale dikteafname van de plank uit Alblasserdam, met een verblijftijd van 10 jaar. Hier wordt onderzocht of er sprake is van een significante trend.

Mede ingegeven door het ontbreken van meetpunten met verblijftijden tussen 33 en 50 jaar, worden de meetpunten ingedeeld in twee groepen met verblijftijden van onder dan wel boven 40 jaar. De eerste groep kent 14 meetpunten verdeeld over 11 locaties, de tweede groep kent 6 planken verdeeld over 5 locaties. Voor de statistische analyse worden planken van dezelfde locatie (en dezelfde levensduur) behandeld als één (gemiddelde) meetwaarde.

De gemiddelde dikteafname in de jonge groep bedraagt 0,31 mm ($\sigma = 0,10$ mm), de gemiddelde dikteafname van de oude groep bedraagt 0,14 mm ($\sigma = 0,06$ mm)

Voor de test of dit verschil tussen de groepen significant is, is een eenzijdige T-test gebruikt op basis van ongelijke variantie van de twee groepen. De test heeft als resultaat $p=0,10$, waardoor de verschillen als niet-significant worden beoordeeld. Er dus geen reden om op basis van de resultaten van het praktijkonderzoek een tijdsafhankelijkheid in de nominale dikte te veronderstellen.

Bovenstaande analyse gebruikt van elk meetpunt uit het praktijkonderzoek alleen de gemiddelde waarde van de dikteafname, en laat zowel de spreiding (minimum-maximum) in de meetwaarden en de onzekerheid door walsafwijking buiten beschouwing. Om te onderzoeken welk effect het zou hebben als de marge rondom de gemiddelde waarde ook meegenomen zou worden in de bepaling van de significantie van het verschil tussen de twee groepen, is van elke groep een kansverdeling opgebouwd door elk meetpunt een interval te geven gebaseerd op de walsafwijking. In dit interval is de waarschijnlijk even groot genomen. Er wordt dan vanuit gegaan dat de gemiddelde dikte bij plaatsing van de damwand zich bevond ergens in de bandbreedte van \pm walsafwijking, zonder nadere voorkeur. Door voor alle meetwaarden deze waarschijnlijkheden op te tellen en te normeren ontstaat zo een kansverdeling voor de groep.



In afbeelding A1 is de kansverdeling weergegeven voor beide groepen. De figuur toont duidelijk dat, met inachtneming van de walsafwijking er geen significant verschil is tussen de twee groepen.

Bijlage B Kwantitatieve resultaten studies met kortere en langere blootstellingsduur

Opstellen beschrijvende lijn

Deze bijlage beschrijft de kwantitatieve achtergrond van de 'beschrijvende lijn' in Afbeelding 2.4. Om deze lijn op te stellen zijn, naast de resultaten van het praktijkonderzoek, drie andere studies gebruikt. Omdat elke studie de waargenomen corrosie anders heeft uitgedrukt dan als de dikteafname van twee zijden samen, is er enige omrekening toegepast op de gerapporteerde meetdata.

bewerking meetdata Schwerdtfeger

Schwerdtfeger beschrijft in een artikel uit 1971 dat opgenomen is in [NBS 1971] hoe met behulp van metingen van de polarisatiestroom van begraven voorwerpen de corrosie in de tijd gevolgd is.

In het onderzoek zijn op vier locaties in de Verenigde Staten stalen pijpen begraven die voorzien waren van een electrode voor potentiaalmetingen. Met behulp van een hulpelectrode in de bodem konden spanningen en stroomsterktes ten opzichte van de bodem gemeten worden. Het principe van de potentiaalmetingen is dat de spanning op het voorwerp sterk op gaat lopen zodra de stroomsterkte groter wordt dan de zogenaamde polarisatiestroom. Deze stroom is een vrij directe maat voor de corrosie; op basis van de lading van het ion (Fe^{2+}) en de tijdsduur van corrosie kan hiermee de materiaalstroom door corrosie bepaald worden. Schwerdtfeger drukt deze stroom uit in grammen gewichtsverlies, en heeft dit weergegeven voor de verschillende locaties in Tables 1 t/m 4 van [NBS 1971].

De polarisatiestroom werd periodiek gemeten over het verloop van 7,3 jaar. Na afloop van deze periode werden de stalen voorwerpen opgegraven, schoongemaakt en gewogen. Op deze manier kon het daadwerkelijke verlies op het einde van de periode vastgesteld worden.

De metingen zijn uitgevoerd op stalen pijpen, lengte 35,5 cm, diameter 3,8 cm. Op het uiteinde van de pijpen waren rubberen kappen geplaatst die de binnenzijde van de pijpen afsloten. Op deze manier werd een oppervlakte van 0,046 m² van het buitenoppervlak blootgesteld aan corrosie. Voor plaatsing in de grond was loszittende walshuid verwijderd.

De data van Schwerdtfeger zijn als volgt omgerekend naar dikteafname voor twee zijden samen:

- De uit de polarisatiestroom berekende gewichtsverliezen in Tables 1-4 zijn genormaliseerd op het daadwerkelijke gewichtsverlies op het einde van de proefperiode.
- Het gewichtsverlies Δ gewicht (in gram) is omgerekend naar enkelzijdige dikteafname Δ dikte_{enkelzijdig} (in mm) met behulp van

$$\Delta \text{ gewicht (in gram)} = \rho_{\text{Fe}} * A_{\text{pijp}} * \Delta \text{ dikte}_{\text{enkelzijdig}} \text{ (in mm)} = \\ = 361 * \Delta \text{ dikte}_{\text{enkelzijdig}}$$

($\rho_{\text{Fe}} = 7860 \text{ kg/m}^3$ soortelijke massa staal, $A = 0,046 \text{ m}^2$ is oppervlakte)

- De dikteafname voor een enkele zijde wordt verdubbeld tot een dikteafname voor twee zijden samen.

De waarden uit de laatste kolom van onderstaande tabellen zijn gebruikt voor het opstellen van de beschrijvende lijn, iedere waarde met gewichtsfactor 1.

De onnauwkeurigheid waarmee de polarisatiestroom wordt bepaald leidt tot een onzekerheidsmarge van grofweg ± 15% in de afgeleide waarde van het relatieve gewichtsverlies, en dus in de berekende dikteafname. Deze onnauwkeurigheid is middels een foutenbalk weergegeven in 2.1

Berwick Lock		uit table 1		gerenormaliseerd	
verblijftijd		relatief gewichtsverlies uit metingen polarisatiestroom	absoluut gewichtsverlies	dikteafname enkelzijdig	dikteafname voor twee zijden samen
(dagen)	(jaar)	(gram)	(gram)	(mm)	(mm)
140	0,4	17	13	0,04	0,07
225	0,6	24	18	0,05	0,10
308	0,8	28	21	0,06	0,12
400	1,1	37	28	0,08	0,15
532	1,5	51	38	0,11	0,21
652	1,8	64	48	0,13	0,27
751	2,1	74	55	0,15	0,31
877	2,4	90	67	0,19	0,38
1017	2,8	112	84	0,23	0,47
1136	3,1	124	93	0,26	0,52
1262	3,5	131	98	0,27	0,55
1380	3,8	138	103	0,29	0,58
1484	4,1	143	107	0,30	0,60
1618	4,4	150	112	0,31	0,63
1717	4,7	153	115	0,32	0,64
1856	5,1	156	117	0,33	0,65
2180	6,0	161	121	0,34	0,67
2235	6,1	162	121	0,34	0,68
2396	6,6	164	123	0,34	0,68
2669	7,3	167	125	0,35	0,70
		125 gewichtsverlies bepaald op einde proef			

Bonnet Carre Spillway		uit table 2		gerenormaliseerd	
verblijftijd		relatief gewichtsverlies uit metingen polarisatiestroom	absoluut gewichtsverlies	dikteafname enkelzijdig	dikteafname voor twee zijden samen
(dagen)	(jaar)	(gram)	(gram)	(mm)	(mm)
140	0,4	7	5	0,01	0,03
225	0,6	11	8	0,02	0,04
308	0,8	15	10	0,03	0,06
400	1,1	22	15	0,04	0,09
532	1,5	32	22	0,06	0,12
652	1,8	39	27	0,08	0,15
751	2,1	45	31	0,09	0,17
877	2,4	57	40	0,11	0,22
1016	2,8	69	48	0,13	0,27
1135	3,1	74	52	0,14	0,29
1259	3,4	77	54	0,15	0,30
1379	3,8	80	56	0,16	0,31
1483	4,1	83	58	0,16	0,32
1617	4,4	86	60	0,17	0,33
1716	4,7	88	61	0,17	0,34
1855	5,1	91	63	0,18	0,35
2107	5,8	95	66	0,18	0,37
2234	6,1	96	67	0,19	0,37
2395	6,6	98	68	0,19	0,38
2669	7,3	102	71	0,20	0,40
		71 gewichtsverlies bepaald op einde proef			

Grenada Dam verblijftijd		uit table 3		gerenormaliseerd	
(dagen)	(jaar)	relatief	absoluut	dikteafname	dikteafname
		gewichtverlies uit metingen polarisatiestroom (gram)	gewichtverlies (gram)	enkelzijdig (mm)	voor twee zijden samen (mm)
134	0,4	4	3	0,01	0,02
217	0,6	6	5	0,01	0,03
323	0,9	10	9	0,02	0,05
400	1,1	14	12	0,03	0,07
528	1,4	22	19	0,05	0,11
669	1,8	30	26	0,07	0,14
752	2,1	34	29	0,08	0,16
892	2,4	40	34	0,10	0,19
989	2,7	43	37	0,10	0,21
1102	3,0	47	40	0,11	0,23
1249	3,4	53	46	0,13	0,25
1339	3,7	55	47	0,13	0,26
1485	4,1	57	49	0,14	0,27
1611	4,4	59	51	0,14	0,28
1751	4,8	60	52	0,14	0,29
1858	5,1	61	52	0,15	0,29
2081	5,7	62	53	0,15	0,30
2235	6,1	63	54	0,15	0,30
2389	6,5	63	54	0,15	0,30
2663	7,3	64	55	0,15	0,31
		55 gewichtsverlies bepaald op einde proef			

Sardis dam verblijftijd		uit table 4		gerenormaliseerd	
(dagen)	(jaar)	relatief	absoluut	dikteafname	dikteafname
		gewichtverlies uit metingen polarisatiestroom (gram)	gewichtverlies (gram)	enkelzijdig (mm)	voor twee zijden samen (mm)
133	0,4	2,3	2	0,00	0,01
216	0,6	3,2	2	0,01	0,01
322	0,9	3,7	3	0,01	0,02
397	1,1	3,9	3	0,01	0,02
525	1,4	4,3	3	0,01	0,02
666	1,8	4,6	4	0,01	0,02
749	2,1	4,8	4	0,01	0,02
889	2,4	5,2	4	0,01	0,02
986	2,7	5,4	4	0,01	0,02
1099	3,0	5,6	4	0,01	0,02
1246	3,4	5,7	4	0,01	0,02
1336	3,7	5,8	4	0,01	0,02
1481	4,1	5,9	4	0,01	0,03
1607	4,4	5,9	4	0,01	0,03
1747	4,8	6	5	0,01	0,03
1854	5,1	6,1	5	0,01	0,03
2078	5,7	6,1	5	0,01	0,03
2232	6,1	6,2	5	0,01	0,03
2417	6,6	6,2	5	0,01	0,03
2660	7,3	6,3	5	0,01	0,03
		4,8 gewichtsverlies bepaald op einde proef			

Bewerking meetdata Ohsaki

Ohsaki heeft op 10 locaties in Japan een set stalen profielen in de bodem aangebracht en die in delen na 2, 5 en 10 jaar weer uit de grond getrokken. Door vóór en na trekking de dikte van de profielen op dezelfde plaatsen te meten kon met grote nauwkeurigheid de mate van corrosie op die locaties vastgesteld worden.

Per locatie werden 9-15 profielen aangebracht. Het betrof L-profielen koolstofstaal van 15 m lengte. Met intervallen van een meter zijn zones gemarkeerd waarin de diktemetingen worden uitgevoerd. Per zone wordt 20-40 keer de dikte met een micrometer bepaald, telkens door één en dezelfde technicus. De walshuid is niet verwijderd vóór plaatsing in de bodem. Na het trekken worden de profielen eerst gewassen en daarna gereinigd met een roterende staal draadborstel. De gerapporteerde corrosiesnelheid is het dikteverlies voor beide zijden samen gedeeld door de verblijftijd in de bodem.

Per meetserie levert elke locatie zo 45 meetwaarden op (3 profielen, 15 meetvlakken per profiel). Ohsaki geeft hier het gemiddelde van en de maximale waarde.

De waarden van de corrosiesnelheid worden teruggerekend naar dikteafname door te vermenigvuldigen met de verblijftijd, zie onderstaande tabel.

Informatie in Table 10				Omgerekend naar dikteafname	
meetserie	Verblijftijd in de bodem (jaar)	Corrosiesnelheid voor twee zijden samen (mm/jaar)		Dikteafname Voor 2 zijden (mm)	
		gemiddeld	maximaal	gemiddeld	maximaal
1	2,14	0,0351	0,0955	0,075	0,203
2	5,00	0,0275	0,0589	0,138	0,295
3	10,17	0,0106	0,0297	0,107	0,302

'gemiddeld' betreft het gemiddelde van alle diktemetingen van alle planken op de tien lokaties; 'maximaal' betreft de grootstte aangetroffen waarde van al deze metingen

De waarden van de gemiddelde dikteafname uit de eerste en tweede meetserie zijn gebruikt bij het opstellen van de beschrijvende lijn in figuur 2.4, waarbij elke waarde gewichtsfactor 10 kreeg, vanwege het aantal betrokken locaties.

Voor de resultaten van de derde meetserie zijn de corrosiewaarden per locatie op basis van Table 13 gebruikt, ieder met gewichtsfactor 1.

Informatie in Table 13		Omgerekend naar dikteafname
locatie	Corrosiesnelheid voor twee zijden samen (mm/jaar)	Dikteafname voor twee zijden samen (mm)
1	0,0045	0,046
2	0,0114	0,116
3	0,0116	0,118
4	0,0112	0,114
5	0,0083	0,084
6	0,0093	0,095
7	0,0148	0,151
8	0,0094	0,096
9	0,0061	0,062
10	0,0127	0,129

Bewerking meetdata Neff

Een Franse onderzoeksgroep heeft de mate van corrosie bepaald van archeologische ijzeren voorwerpen met leeftijden tussen 400 en 1800 jaar [Neff 2006]. Het oppervlak van de voorwerpen is onderzocht met EDS-SEM (energy dispersive spectrometry-scanning electron microscope), zodat de elementaire samenstelling (in massaprocenten) als functie van de plaats in de oppervlaktelaag verkregen werd. Door te integreren met de dikte van de laag kan zo de hoeveelheid ijzer in de zogenaamde dense product layer (DPL) en de laag transformed matter (TM) bepaald worden (zie ook paragraaf 2.1.3). Hieruit wordt de corrosiesnelheid bepaald als:

$$V_{\text{total}} (\mu/\text{jaar}) = V_{\text{DPL}} (\text{in } \mu/\text{jaar}) + V_{\text{TM}} (\text{in } \mu/\text{jaar})$$

Per locatie zijn 3-15 voorwerpen onderzocht. De gemiddelde en maximum waarden voor de corrosiesnelheid zijn gerapporteerd als $V_{\text{total, average}}$ en $V_{\text{total, max}}$. Door te

vermenigvuldigen met de leeftijd en met de factor 2 wordt de dikteafname voor beide zijden samen bepaald.

De waarden uit onderstaande tabel zijn gebruikt voor de bepaling van de beschrijvende lijn, met per locatie het aantal voorwerpen als gewichtsfactor.

Informatie in Table 4	locatie	Montreuil en caux	Cabaret	Montbaron	Avrilly	Glinet	
	Leeftijd (jaar)	1800	800	800	500	400	jaar
	V_{DPL}	<0,1-0,3	<0,1-2,0	<0,1-2,8	<0,1-2,7	0,10-1,8	μ /jaar
	V_{TM}	0,1	-	0,7	1,5	0,6	μ /jaar
	$V_{total,average}$	0,3	0,4	1,6	2,2	1	μ /jaar
	$V_{total,max}$	0,4	2	3,5	3,3	2,4	μ /jaar
Aantal voorwerpen		3	15	6	8	8	
Dikte afname	gemiddeld	1,08	0,64	2,56	2,2	0,8	mm
	min	0,36	0,16	0,16	0,1	0,08	mm
	max	1,44	3,2	5,6	3,3	1,92	mm

Bijlage C Protocol nieuwe methode corrosietoetslag

Nieuwe methode bepaling corrosietoetslag bij stalen damwanden in waterkeringen

In de nieuwe aanpak wordt voor damwanden die tweezijdig zijn belegd met grond geen onderscheid meer gemaakt naar bodemsoort of naar de aard van het grondwater (zoet/zout). Deze factoren blijken niet significant van invloed op het corrosiegedrag.

In plaats daarvan wordt gewerkt met twee verticale zones. In de bovenste zone wordt toegang van zuurstof verondersteld en is de corrosie relatief hoog, in de onderste zone is die toegang er niet en valt de corrosie lager uit.

Voor het vaststellen van de grens tussen de twee zones is informatie nodig over:

- De ligging van het grondwaterniveau. Bij wisselende grondwaterstanden moet het laagste niveau genomen worden dat verwacht kan worden. Hiervoor kan de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) gebruikt worden, of een vergelijkbare waarde uit projectgerichte metingen van de grondwaterstand;
- De diepte tot waarop de locatie van de constructie niet geroerd is geweest voorafgaand aan de plaatsing van de damwand;
Voor het aspect geroerde grond kan het gaan om (1) ontgraving (kort) voor het aanbrengen van de damwand of (2) een situatie waarbij de damwand moet worden geplaatst in een grondlichaam, dat (recent) is aangebracht of opgehoogd. In beide gevallen moet het niveau van de oude grondslag aangehouden worden als het niveau van de ongeroerde grond.
- De eventuele aanwezigheid van bodemverontreiniging.

In de onderste zone bedraagt de waarde van de toetslag **2,4 mm (voor beide zijden samen en voor een levensduur van 100 jaar)**. In deze zone wordt aan alle drie de volgende eisen voldaan:

1. de bodem is niet geroerd door grondwerkzaamheden,
2. de zone bevindt zich onder het laagste grondwaterniveau,
3. en er is geen sprake van bodemverontreiniging.

In de bovenste zone wordt de hogere waarde voor de corrosietoetslag gehanteerd: **4,4 mm (voor beide zijden samen, voor 100 jaar)**. Deze waarde wordt gebruikt in situaties:

- boven het laagste grondwaterniveau
- boven het niveau van de vaste grondslag als de bodem geroerd is geweest
- als er sprake is van bodemverontreiniging

Voor damwanden die aan slechts aan één zijde met grond belegd zijn (bijvoorbeeld kademuren), moet voor de toetslag aan de bodemzijde de helft van bovenstaande waarden gebruikt worden. Voor de andere zijde (lucht/water) kan de overeenkomstige waarde uit CUR Publicatie 166 gebruikt worden.

De toetslag wordt voor iedere zone apart opgeteld bij de voor de gewenste sterkte benodigde dikte. De grootste, aldus bepaalde waarde is maatgevend voor het aan te schaffen damwandprofiel.

Bovenstaande waarden voor de corrosietoetslag zijn alleen van toepassing op warmgewalste damwandplanken, en zijn dus niet van toepassing voor buispalen, trekstangen, ankerconstructies of koudgewalste damwandplanken. Voor deze

onderdelen moeten, net zoals voor corrosie in contact met water of lucht, waarden gehanteerd worden die gebaseerd zijn op vigerende kennis (Handreiking Constructief Ontwerpen, CUR-publicaties, wetenschappelijke literatuur). In deze gevallen moet per project een onderbouwde waarde vastgesteld worden.

Bijlage D Protocol prepareren en slaan van testplanken.

Preparen en slaan van testplanken

Per project met stalen damwanden wordt een testplank aangebracht in de onmiddellijke nabijheid van de damwand. Van de testplank wordt van te voren op gemarkeerde posities de dikte bepaald. Deze informatie wordt op de testplank aangebracht en in de legger opgenomen.

De testplank kan, bijvoorbeeld na enkele decennia, getrokken worden indien er twijfel is ontstaan over de resterende dikte van de plank.

Testplank

De testplank is van precies hetzelfde profieltype en staalkwaliteit als de damwand waar hij bij hoort. De testplank heeft een zelfde (bewerkings)geschiedenis ondergaan en wordt op dezelfde manier en tot dezelfde diepte in de bodem gebracht.

Prepareren van de testplank

Op de testplank worden op een onderlinge afstand van 1 meter markeringstekens aangebracht ter indicatie van de meetpunten voor de diktemetingen. De posities worden gemarkeerd met een in het staal gegraveerd of geponst extern dradenkruis, zie tekening. Bij elke positie wordt tevens een letter (A, B, C...) aangebracht ter aanduiding van de positie.

Op elke positie wordt met een ultrasoon (US) diktemeter de dikte opgemeten door tien afzonderlijke metingen van de dikte in het midden van het dradenkruis. De gemiddelde waarde wordt aangehouden als de staaldikte voor die positie.

De aldus gemeten waarden worden vastgelegd in /op een PETP (polyetheentereftalaat)-plaat die bovenaan de testplank bevestigd wordt (zie tekening) door middel van bouten. Vastlegging kan plaatsvinden door middel van graveren of diepdruk:

Testplank corrosieonderzoek
 Datum plaatsing: dd-mm-jjjj
 Profiel:
 Staalkwaliteit:

US-diktemetingen (n=10)
 A =..... mm
 B = mm
 Etc.

Plaats van testplank

De testplank lijkt het eenvoudigst in het verlengde van de damwand geplaatst te kunnen worden op een afstand van minimaal 1 en maximaal 5 meter. Indien dit niet mogelijk is zou een plaats vóór of achter de damwand overwogen kunnen worden. Van belang hierbij is dat de positie toegankelijk is en ook in de toekomst blijft voor zware apparatuur, zoals benodigd voor het te zijner tijd trekken van de plank.

De testplank mag geen galvanisch contact maken met de damwand.

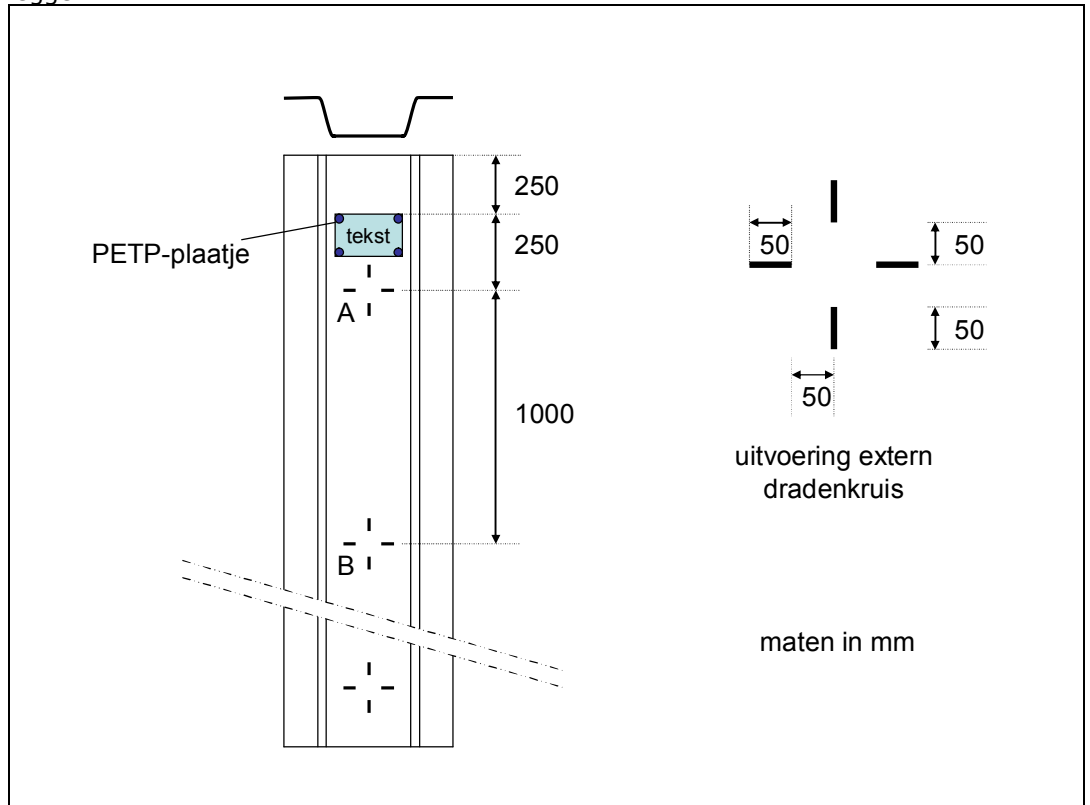
Indien de testplank voor of achter de damwand aangebracht wordt, kan de lengte van de plank overeenkomstig de ligging van het maaiveld of talud korter worden. Wel moet de testplank tot dezelfde diepte als de damwand aangebracht worden.

Informatie over de testplank

Op twee manieren blijft bekend dat er een testplank is en waar die zich bevindt:

- Door opname in de legger (als niet-waterkerend object). In de legger kan dan tevens de resultaten van diktemetingen opgenomen worden.
- Door het plaatsen van een paaltje in de nabijheid van de testplank

Het wordt aanbevolen om het aanbrengen van de testplank middels foto's vast te leggen.



Bijlage E Aangepaste tekst protocol nieuwe methode corrosietoeslag

*Nieuwe methode bepaling corrosietoeslag bij stalen damwanden in waterkeringen
Versie december 2015*

In de nieuwe aanpak wordt voor damwanden die tweezijdig zijn belegd met grond geen onderscheid meer gemaakt naar bodemsoort of naar de aard van het grondwater (zoet/zout). Deze factoren blijken niet significant van invloed op het corrosiegedrag.

In plaats daarvan wordt gewerkt met twee verticale zones. In de bovenste zone wordt toegang van zuurstof verondersteld en is de corrosie relatief hoog, in de onderste zone is die toegang er niet en valt de corrosie lager uit.

Voor het vaststellen van de grens tussen de twee zones is informatie nodig over:

- De ligging van het grondwaterniveau. Bij wisselende grondwaterstanden moet het laagste niveau genomen worden dat verwacht kan worden. Hiervoor kan de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) gebruikt worden, of een vergelijkbare waarde uit projectgerichte metingen van de grondwaterstand;
- De diepte tot waarop de locatie van de constructie niet geroerd is geweest voorafgaand aan de plaatsing van de damwand;
Voor het aspect geroerde grond kan het gaan om (1) ontgraving (kort) voor het aanbrengen van de damwand of (2) een situatie waarbij de damwand moet worden geplaatst in een grondlichaam, dat (recent) is aangebracht of opgehoogd. In beide gevallen moet het niveau van de oude grondslag aangehouden worden als het niveau van de ongeroerde grond.
- De eventuele aanwezigheid van bodemverontreiniging.

In de onderste zone bedraagt de waarde van de toeslag **2,4 mm (voor beide zijden samen en voor een levensduur van 100 jaar)**. In deze zone wordt aan alle drie de volgende eisen voldaan:

1. de bodem is niet geroerd door grondwerkzaamheden,
2. de zone bevindt zich onder het laagste grondwaterniveau,
3. en er is geen sprake van bodemverontreiniging of agressieve grondaanvulling.

In de bovenste zone wordt de hogere waarde voor de corrosietoeslag gehanteerd: **4,4 mm (voor beide zijden samen, voor 100 jaar)**. Deze waarde wordt gebruikt in situaties:

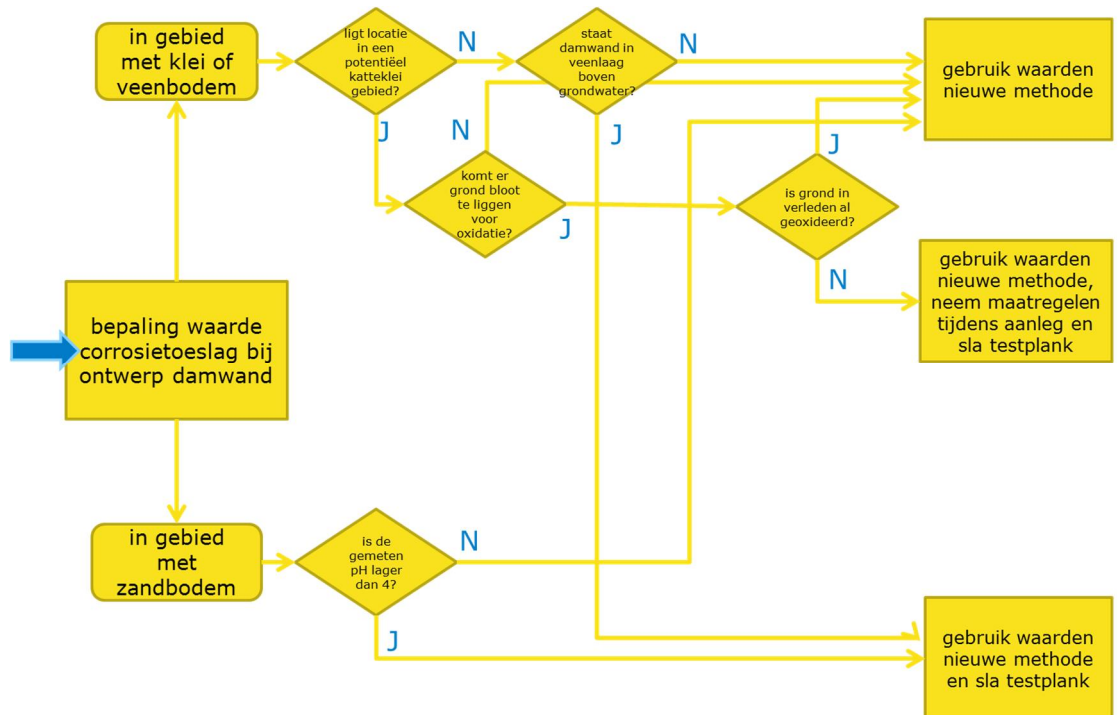
- boven het laagste grondwaterniveau
- boven het niveau van de vaste grondslag als de bodem geroerd is geweest

Voor damwanden die aan slechts aan één zijde met grond belegd zijn (bijvoorbeeld kademuren), moet voor de toeslag aan de bodemzijde de helft van bovenstaande waarden gebruikt worden. Voor de andere zijde (lucht/water) moet de overeenkomstige waarde uit Eurocode 3/CUR Publicatie 166 gebruikt worden.

De toeslag wordt voor iedere zone apart opgeteld bij de voor de gewenste sterkte benodigde dikte. De grootste, aldus bepaalde waarde is maatgevend voor het aan te schaffen damwandprofiel.

Bovenstaande waarden voor de corrosietoeslag zijn van toepassing op damwandplanken en balken van koolstofstaal. . Ankerstangen vallen niet onder dit protocol. Eurocode 3 verwijst voor deze toepassing naar de norm EN 1537.

Voor een beperkt aantal specifieke situaties bestaat het risico op versterkte corrosie vanwege lage pH-waarden van bodem of grondwater. Om in deze situatie de juiste risicobeheersmaatregelen te treffen kan onderstaande beslisboom gevolgd worden.



Afbeelding 1: beslisboom voor het nemen van de juiste maatregelen om het risico te beheersen op versterkte corrosie door lage pH-waarden.

Toelichting bij de beslisboom:

A toepassing van damwanden in een gebied met potentiële katteklei

Potentiële kattekleigronden betreffen lutumrijke (>35%) bodemlagen van anaerobe mariene sedimenten met een pyriet-gehalte dat in sulfaat-equivalenten hoger is dan de hoeveelheid Ca^{2+} . Indien potentiële kattekleigronden omgewoeld of ontgonnen worden waardoor zuurstof toegang tot de bodem krijgt, kan oxidatie van het pyriet optreden onder de vorming van zwavelzuur

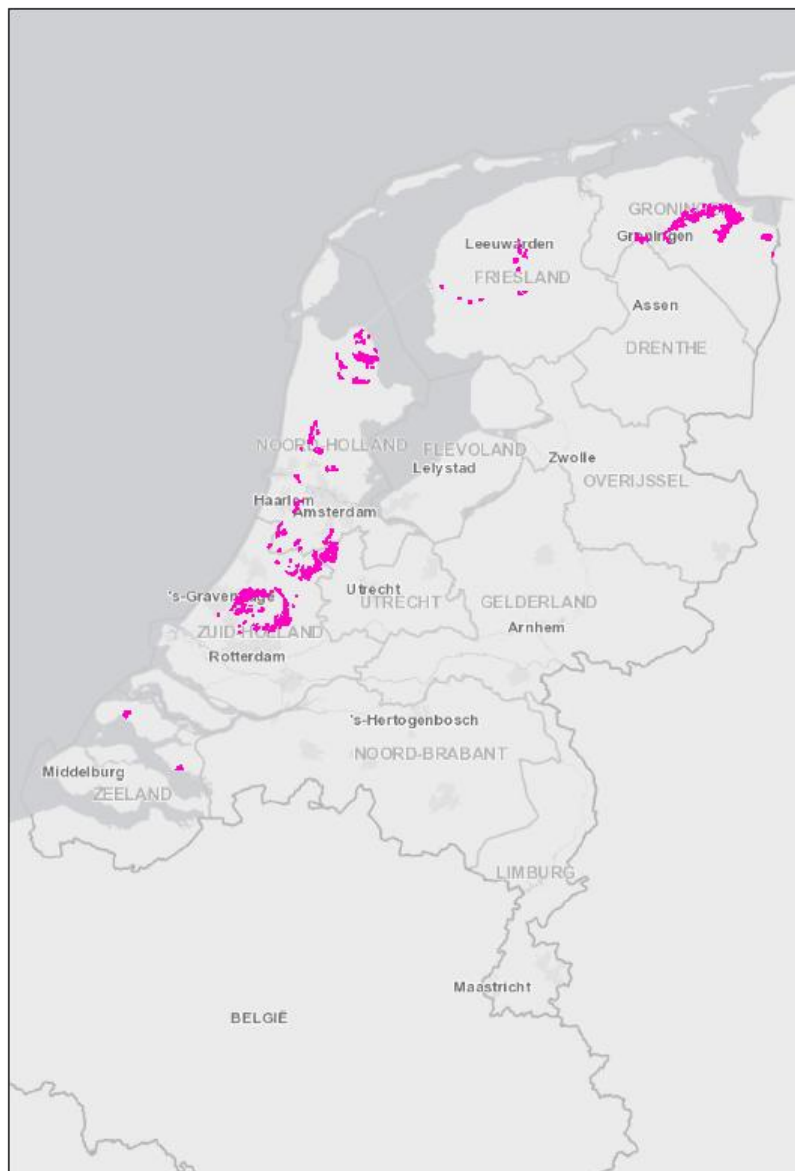
Het voorkomen van deze gebieden is afgebakend in afbeelding 2. In deze gebieden kan zuurvorming aan de orde zijn als:

- de grondwaterspiegel blijvend verlaagd wordt. Omdat het risico van de vorming van katteklei als significant gezien wordt, moet een tijdelijke verlaging van het grondwater zo beperkt mogelijk blijven, bij voorkeur tot ongeveer een maand;
- grond van onder de grondwaterspiegel verplaatst wordt naar de zone boven de waterspiegel. Deze situatie kan ontstaan door vergraving van de grond vanwege de aanleg van de damwand. Echter, indien grond van onder het grondwaterniveau weer teruggebracht wordt onder grondwaterniveau en tussentijds slechts kort in contact is geweest met zuurstof, maximaal een maand, lijkt het risico op lage pH waarden erg beperkt.

Bij aanleg van damwanden in potentiële katekleigebieden zijn er meerdere maatregelen te nemen die het optreden van lage pH waarden in de bodem voorkomen:

- monitoring van de pH van grondwater, bodem of ontgraven grond om te beoordelen of pH-daling inderdaad optreedt. Dit hoeft immers niet plaats te vinden, want is afhankelijk van het pyrietgehalte en het bufferend vermogen van de grond.
- voorkom dat door het plaatsen van de damwand de grondwaterspiegel blijvend verlaagd wordt, dan wel tijdens werkzaamheden over een significante tijdsduur verlaagd is;
- Indien er voor de aanleg van de damwand grond vergraven dient te worden van onder de originele waterspiegel, zorg dan dat deze grond ook weer onder de waterspiegel teruggeplaatst wordt en slechts gedurende korte tijd in contact is geweest met zuurstof. Indien deze grond toch langere tijd in contact komt met zuurstof kan overwogen worden om kalk/calciumcarbonaat in een verhouding 1:1 met het in de grond aanwezige zwavel (sulfaat-equivalenten van pyriet gehalte) toe te voegen dat als pH buffer kan dienen.

De keuze van de te nemen maatregel(en) kan het beste bij het project gelegd worden. Als waarborg dat er daadwerkelijk geen significante corrosie door pH verlaging opgetreden heeft, moet een testplank bij de damwand geslagen worden.



Afbeelding 2: Ligging van potentiële kattekleigronden in Nederland. Deze kaart is digitaal beschikbaar als shape-file bij programmabureau HWBP-2 en op website <http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/programma'-projecten/hwbp-2/kennis-delen/nieuwe-methode>. Bron: Bodemkaart Nederland schaal 1: 50.000.

B toepassing van damwanden in een veenlaag boven grondwater

In deze situatie kan oxidatie van veen optreden hetgeen een lage pH kan geven aan de bodem en het bovenste grondwater. Omdat het maatgevende moment op de damwandplank zelden in de bovenste zone zal liggen, en omdat in slechts 5 procent van de veenbodems de pH onder de waarde van 4 ligt (hetgeen als veilige ondergrens voor toepassing van de corrosiewaarden kan worden beschouwd) is het risico van een versterkte corrosie zeer beperkt. Mocht toch aan de betrouwbaarheid

van de toeslagwaarden voor deze situatie getwijfeld worden, dan kan een testplank geslagen worden voor het vaststellen van de daadwerkelijk optredende corrosie.

C Toepassing van damwanden in gebieden met zandgrond

In gebieden met zandgrond kunnen door verzuring pH-waarden onder de 4 voorkomen. Dit is in ongeveer 5% van de bodems het geval, en is eenvoudig vast te stellen door de pH van bodem of grondwater te meten. Indien dit het geval is kan met het slaan van een testplank op termijn de daadwerkelijk opgetreden corrosie vastgesteld worden.