



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2019

Technische levensduur

Corrosie van damwanden in zoetwater – Deel 1: Literatuurstudie

Hans Brinkman (Deltares)
Stefan Jansen (Deltares)
Renger van de Kamp (Rijkswaterstaat)

Kenmerk : KpNK-2019-BKW-02a003
Versie : 1.0
Datum publicatie : 22 oktober 2019



In het **Kennisprogramma Natte Kunstwerken** (KpNK) werken Deltares, MARIN, Rijkswaterstaat en TNO samen aan de kennisontwikkeling om de vervangings- en renovatieopgave bij natte kunstwerken (stuwen, sluizen, gemalen en stormvloedkeringen) efficiënt en kostenbesparend aan te pakken.

Deltares

MARIN



TNO

Voor het kennisprogramma wordt er jaarlijks een inhoudelijk **Kennisplan** inclusief bijbehorend financieringsplan opgesteld. Andere partijen (zoals waterschappen en marktpartijen) worden nadrukkelijk uitgenodigd om deel te nemen.

Meer informatie over het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vindt op www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl waar ook de onderzoeksresultaten ter beschikking worden gesteld.

NKWK

De samenwerking binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vormt de uitwerking van de onderzoekslijn “Toekomstbestendige Natte Kunstwerken” binnen het **Nationaal Kennisplatform voor Water en Klimaat** (NKWK). Dit kennisplatform brengt Nederlandse overheden, kennisinstellingen en bedrijven bij elkaar om samen te werken aan pilots, actuele vraagstukken en lange termijnontwikkelingen op gebied van water- en klimaatvraagstukken.

Meer informatie staat op www.waterenklimaat.nl.

Voor vragen met betrekking tot het rapport kunt u terecht bij de auteurs:

Hans Brinkman - hans.brinkman@deltares.nl

Stefan Jansen - stefan.jansen@deltares.nl

Voor vragen over Kennisprogramma Natte Kunstwerken en Kennisplan 2019 kunt u terecht bij:

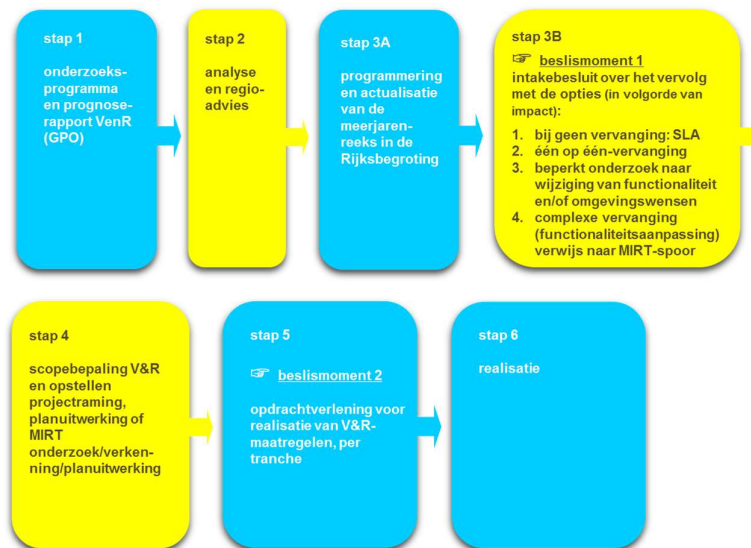
Maarten van der Vlist - maarten.vander.vlist@rws.nl



Voorwoord

Sluizen, stuwen, gemalen en stormvloedkeringen zijn belangrijke assets van beheerders zoals Rijkswaterstaat en de waterschappen. Een groot deel van deze natte kunstwerken bereikt komende decennia het einde van de (technische) levensduur waarvoor het is ontworpen. Er dient zich dan ook een aanzienlijke vervangings- en renovatieopgave van deze kunstwerken aan.

De laatste jaren wordt steeds meer gezocht naar mogelijkheden om levensduur van kunstwerken te verlengen, en om bij einde levensduur (noodzakelijke) ingrepen aan gebiedsontwikkelingen en/of functionele/netwerk ontwikkelingen te koppelen. Rijkswaterstaat heeft daartoe als asset manager een vernieuwde werkwijze voor het Vervanging en Renovatie (VenR) proces opgesteld, welke de basis vormt voor de inrichting van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (zie Figuur 1).



Figuur 1. Vernieuwde RWS-werkwijze Vervanging en Renovatie.

In het Kennisprogramma Natte Kunstwerken wordt kennis ontwikkeld die bijdraagt aan de verschillende stappen binnen deze vernieuwde VenR-werkwijze, met als focuspunten stap 1 (prognoserapport) en stap 2 (regio-analyse en -advies). Het prognoserapport richt zich op de (einde) technische levensduur, het regio-advies brengt met name de relatie object-netwerk-gebied in kaart.

Het onderzoek in het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vindt plaats langs de onderstaande 3 onderzoekssporen en heeft tot doel om een effectieve en efficiënte aanpak van de vervanging- en renovatie-opgave en nieuwbouw van natte kunstwerken mogelijk te maken:

- bestaand object
 - inzicht in (einde) technische levensduur
 - levensduurverlenging
- object-systeem
 - inzicht in (einde) functionele levensduur en object-systeemrelaties
- nieuw(e) object/objectonderdelen
 - toepassen innovaties
 - inspelen op toekomstige ontwikkelingen.



Kennisprogramma Natte Kunstwerken *Kennisplan 2019*

Sinds enkele jaren is er het Nationaal Kennisplatform voor Water en Klimaat (NKWK). Hieronder lopen diverse onderzoekslijnen. Eén van de onderzoekslijnen is “Toekomstbestendige Natte Kunstwerken”. Voor het praktisch laten functioneren van deze onderzoekslijn is er een Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken en een Kennisprogramma Natte Kunstwerken opgesteld:

- Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken. De partijen die momenteel binnen deze overeenkomst samenwerken aan onderwerpen rondom de vervangings- en renovatieopgave bij natte kunstwerken zijn Deltares, MARIN, Rijkswaterstaat en TNO.
- In het kader van de bovengenoemde Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken en de 3 onderzoekssporen van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken wordt er jaarlijks een inhoudelijk Kennisplan inclusief bijbehorend financieringsplan opgesteld.

Naast de genoemde partijen zijn en worden andere partijen nadrukkelijk uitgenodigd om deel te nemen aan de Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken en/of het Kennisplan. Inzet kan zowel in kind en/of financieel zijn. In het Kennisplan 2019 is er binnen het kader van Kennisprogramma Natte Kunstwerken samengewerkt met Acotec BV, Arcadis, ArcelorMittal, Koninklijke Boskalis en DIANA FEA.

Resultaten uit het Kennisprogramma Natte Kunstwerken worden gedeeld met de gehele sector, onder andere via de website www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl.

De hierop volgende samenvatting heeft betrekking op het onderliggende rapport ‘Corrosie van damwanden in zoetwater – Deel 1: Literatuurstudie’. Dit onderzoek is geleid door Deltares in het kader van het Kennisplan 2019. In verband met de Algemene Verordening Gegevensbescherming is het originele Deltares rapport ten behoeve van het publiceren op de website alleen qua persoonsgegevens, maar niet qua inhoud aangepast.



Samenvatting

Corrosie van damwanden in zoetwater – Deel 1: Literatuurstudie

Aanleiding

In Nederland heeft Rijkswaterstaat meer dan 800 km stalen damwand in zoetwater in haar beheer. Voor stalen damwandconstructies richting einde technische levensduur is de dikteafname door corrosie één van de dominante onzekerheden (en waarschijnlijk zelfs de dominante onzekerheid). Immers, als aan het einde van de technische levensduur er nauwelijks of geen staal meer aanwezig is, dan faalt de constructie zeker.

Geconstateerd wordt echter dat op dit moment een rationeel kader lijkt te ontbreken voor de wijze waarop met corrosie wordt omgegaan in ontwerp en beoordeling. Belangrijkste argumenten voor deze stelling zijn dat normen en richtlijnen uitgaan van deterministische waarden voor corrosie en geen inzicht geven in de variatie, terwijl het duidelijk is dat corrosie geen exact proces is. Dat er niet expliciet met de onzekerheid in corrosie rekening wordt gehouden is ook vreemd, in het licht dat er wel expliciet met de onzekerheid in grond en belasting parameters wordt rekening gehouden. Verder zijn de wettelijke kaders op een probabilistische (i.e. rekening houdend met onzekerheid) manier opgesteld. Dit is aanleiding om te trachten tot een meer rationele aanpak van ontwerp en beoordeling van stalen damwandconstructies te komen.

In 2018 heeft een workshop¹ plaatsgevonden met beheerders en inspectiepartijen waarin de eerste resultaten van het onderzoek richting een meer rationale aanpak zijn gepresenteerd en bediscussieerd.

Onderzoeksvraag en -opzet (WAT)

Voorliggende rapportage is de eerste deelrapportage van een serie rapportages richting een meer rationele aanpak van ontwerp en beoordeling van stalen damwandconstructies. Het doel van deze eerste stap was om inzicht te verkrijgen in wat er ten aanzien van corrosie van stalen damwanden in zoetwatercondities al bekend is. De opzet van het onderzoek was het opstellen van een overzicht van recente literatuur over corrosie van damwanden in zoetwater, inspectiemethoden en protocollen en wat voor effect corrosie heeft op de betrouwbaarheid van een damwandconstructie.

Onderzoeksaanpak en -methode (HOE)

Het beschouwen van corrosie van stalen damwandconstructies is een snijvlak van meerdere specialismen:

- biologisch en chemisch: in relatie tot corrosie processen;
- constructief: in relatie tot sterkte van de stalen damwand;
- geotechnisch: in relatie tot grond-constructie interactie;
- probabilistisch: in relatie tot omgaan met onzekerheden.

¹ zie "Technische Levensduur – Verslag workshop 'Corrosie van bestaande stalen damwanden in zoetwater', Kennisprogramma Natte Kunstwerken, kenmerk KpNK-2018-BKW-02a001, versie 1.0, 5 juli 2018;



De beschouwing in voorliggende rapportage is het eerste deel in een reeks van onderzoek naar de veroudering van bestaande stalen damwanden en is grotendeels gedaan met een geotechnische bril, rekening houdend met constructieve en probabilistische aspecten. Daarbij is de beschouwing pragmatisch: getracht is te komen tot meer concrete inzichten en aanbevelingen voor de huidige praktijk.

Met betrekking tot de achterliggende biologische en chemische processen is reeds vroeg in de literatuurstudie geconcludeerd dat de processen complex, onbekend en/of afhankelijk zijn van vele (onbekende en/of niet (makkelijk) te kwantificeren) parameters. Als gevolg daarvan kunnen deze processen op dit moment en in de voorziene toekomst niet, dan wel onvoldoende houvast bieden om tot voldoende nauwkeurige voorspellingen betreffende corrosie te komen voor het ontwerpen of beoordelen van damwandconstructies. Beste alternatief is dan om uit te gaan van een empirische aanpak – dat wil zeggen meten, inspecteren en monitoren van de corrosie – om tot een meer rationele beschouwing te komen.

Deze literatuurstudie betreft verder expliciet corrosie van damwanden grenzend aan zoetwater. Deze afbakening is gemaakt, omdat voor zoutwater condities in Nederland reeds veel kennis bestaat bij het Havenbedrijf Rotterdam.

Onderzoekresultaten en synthese

Uit het literatuuronderzoek worden diverse conclusies getrokken:

- De theoretische weg leidt, vanwege de veelheid aan relevante (chemische, fysische, etc.) variabelen en de daardoor ontstane complexiteit, naar verwachting niet tot direct bruikbare aanbevelingen voor de (geotechnische en constructieve) praktijk.
- De normen en richtlijnen geven geen eenduidig beeld voor de aan te houden corrosiezones, de grootte van de corrosie alsook het verloop van corrosie in de tijd.
- Voor vrijwel alle, voor damwandconstructies relevante, faalmechanismen is de grootte van de horizontale gemiddelde corrosie over meerdere planken relevant en dus niet de individuele extreme uitschieters.
- Diktemetingen met ultrasone techniek (UT) blijkt de standaard te zijn. Deskundig gebruik geeft een betrouwbaar resultaat.
- Damwanden toegepast in natte kunstwerken in zoetwatercondities worden in Nederland niet volgens een vastgesteld protocol geïnspecteerd.

Evaluatie en vooruitblik

Naar aanleiding van het literatuuronderzoek en de belangrijke conclusie, dat de theoretische weg naar verwachting niet leidt tot direct bruikbare aanbevelingen voor de (geotechnische en constructieve) praktijk, worden de volgende aanbevelingen voor de komende tijd gedaan:

- Voer een verkenning uit naar het beeld van corrosie in het huidige damwandareaal in zoetwater op basis van recent uitgevoerde diktemetingen. Onderzoek deze data ten aanzien van o.a. grootte van dikteafname, tijdsverloop, variaties en eventuele trends.
- Stel een standaard meetprotocol op voor het uitvoeren van diktemetingen van damwanden.
- Zet een nationale database op waarin beheerders de meetgegevens van damwandplanken kunnen opslaan én terugvinden.

Corrosie van damwanden in zoetwater

Deel 1 - Literatuurstudie



Corrosie van damwanden in zoetwater

Deel 1 - Literatuurstudie

Hans Brinkman
Stefan Jansen

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Probleemstelling	1
1.3 Doelstelling van het literatuuronderzoek	2
1.4 Afbakening van deze rapportage	2
1.5 Leeswijzer	3
2 Literatuuronderzoek	4
2.1 Corrosie in zoetwater: theorie en praktijk (data)	4
2.1.1 Verwachting over de tijd	9
2.1.2 Risicovolle omstandigheden (stroming, scheepvaart, MIC, ...)	9
2.1.3 Praktijkdata uit de literatuur	9
2.2 Normen en richtlijnen voor dikteverlies ten gevolge van corrosie	13
2.2.1 Eurocode 3	13
2.2.2 Corrosie aan grondzijde Deltares 2014	19
2.2.3 Corrosie aan grondzijde RWS 2015	20
2.2.4 Aanpak in DIN 50929-3:2018	21
2.2.5 Aanbevelingen EAU 2012 en onderliggende data	25
2.2.6 Samenvatting richtlijnen en normen	27
2.3 Invloed van walsafwijkingen op de uit diktemetingen afgeleide corrosiesnelheid	29
2.4 De invloed van corrosie op faalmechanismen van damwandconstructies	31
2.5 Resume van de literatuurstudie	34
3 Corrosie, meetmethode -en protocol	35
3.1 Corrosie meetmethode	35
3.1.1 Opzet ultrasone diktemeting	35
3.1.2 Betrouwbaarheid ultrasone technieken	37
3.1.3 Alternatieve meetmethoden	38
3.2 Meetprotocollen	40
3.2.1 Inleiding	40
3.2.2 Rijkswaterstaat (1989)	40
3.2.3 Handboek Inspectie Staal (2017)	40
3.2.4 BAW (2017)	45
3.2.5 Havenbedrijf Rotterdam (2017)	48
3.2.6 ArcelorMittal (2018)	53
3.3 Resume	54
4 Conclusies	55
5 Aanbevelingen	56
Bijlage(n)	
Literatuur	1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Bestaande natte kunstwerken, zoals b.v. een sluis, leiden aan verouderingsverschijnselen. Stalen damwanden vormen een belangrijk onderdeel bij deze kunstwerken. Beheerders zijn zich bewust van de veroudering van stalen damwanden, bijvoorbeeld door corrosie. Vervanging is een enorme inspanning. De geotechnische en constructieve consequenties van veroudering zijn echter slechts beperkt bekend (laat staan vastgelegd in gevalideerde voorspellingsmodellen), wat kan leiden tot onnodige kosten (reparatie, vervanging) of onveiligheid. In 2015 bleek tijdens het onderzoek naar een probabilistisch grond-constructie-interactie model in het kader van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) dat er geen inzicht is in de betrouwbaarheid van het in [NEN 1993-5] gegeven model betreffende het degradatie gedrag van de niet-grondbelegde zijde van stalen damwanden.

RWS, partner van KpNK, beheert een grote hoeveelheid damwanden, grenzend aan zoetwater, die al lange tijd geleden zijn aangelegd. RWS is zich bewust van de veroudering van stalen damwanden. Op dit moment is niet duidelijk welke (gedetailleerde) inspectiemethoden, en op welke manier, een beeld kunnen geven over de staat van de damwanden.

Vooraf ruimtelijke spreiding, lokale defecten (bijvoorbeeld putcorrosie) en algehele constructieve staat spelen een rol bij de beoordeling. Daarom is sinds 2017 binnen het programma Natte Kunstwerken door Deltares en TNO gewerkt aan een betere onderbouwing van de benodigde inspectiemethoden, gebaseerd op:

- 1 De geotechnische en constructieve eisen te stellen aan, en de eigenschappen van de damwanden.
- 2 Het karakter en de verwachte ontwikkeling van de corrosieprocessen.
- 3 Het toepassen van geavanceerde niet destructieve technieken (NDT) voor inspecteren, meten en monitoren aan (gevolgen van) corrosieprocessen.

1.2 Probleemstelling

Geconstateerd wordt dat op dit moment normen en richtlijnen uitgaan van deterministische waarden van een dikteafname als gevolg van corrosie. Het is onduidelijk of de genoemde waarden gemiddelden zijn of bovengrenswaarden betreffen. Verder is duidelijk dat corrosie geen exact proces is en dat rekening dient te worden gehouden met onzekerheid. De huidige normen en richtlijnen geven echter geen inzicht in de variatie waarmee rekening dient te worden gehouden.

Dat er niet expliciet met onzekerheid in corrosie rekening wordt gehouden is vreemd, zeker in het licht dat er wel uitvoerig over de onzekerheid in geotechnische sterkte parameters worden gesproken en over de onzekerheid in belastingen om de levensduur te schatten. Ook zijn de wettelijke kaders op een probabilistische manier opgesteld: er dient aangetoond te worden dat wordt voldaan aan een bepaalde maximale faalkans (c.q. een minimale betrouwbaarheidsindex).

Verder kan eenvoudig worden beredeneerd dat voor stalen damwandconstructies richting einde technische levensduur de dikteafname door corrosie één van de dominante onzekerheden (en waarschijnlijk zelfs DE dominante onzekerheid) moet zijn: immers als aan

het einde van de technische levensduur er nauwelijks of geen staal meer aanwezig is dan faalt de constructie zeker.

Naar verwachting zal in de toekomst meer en meer met probabilistische ontwerp- en beoordelingstools worden gewerkt. Op deze wijze worden de onzekerheden explicieter in rekening gebracht en kan tot een scherper ontwerp dan wel beoordeling worden gekomen. Een vereiste voor het uitvoeren van dergelijke analyses is echter dat inzicht bestaat in de relevante stochasten.

Voorgaande geeft aanleiding tot een nader onderzoek om te komen tot een meer rationele aanpak van ontwerp en beoordeling van stalen damwand constructies.

1.3 Doelstelling van het literatuuronderzoek

Hoofddoelstelling van dit onderzoek binnen het KpNK is te komen tot een meer rationele aanpak van ontwerp en beoordeling van stalen damwandconstructies.

Voorliggende rapportage is de eerste deelrapportage van een serie rapportages en hierin wordt aan de hand van een overzicht van recente literatuur nagegaan wat er bekend is over corrosie van damwanden in zoetwater, inspectiemethoden en protocollen en wat voor effect corrosie heeft op de betrouwbaarheid van een damwandconstructie.

Doelstelling van voorliggende rapportage is kortom:

Inzicht verkrijgen wat er in de literatuur ten aanzien van corrosie van stalen damwanden in zoetwatercondities bekend is.

In 2018 heeft een workshop [KpNK 2018] met beheerders en inspectiepartijen plaats gevonden waarin de eerste resultaten van het onderzoek zijn gepresenteerd en bediscussieerd. De resultaten en inzichten uit de workshop zijn meegenomen in de rapportage.

1.4 Afbakening van deze rapportage

Het beschouwen van corrosie van stalen damwandconstructies is een snijvlak van meerdere specialismen, zoals:

- Biologisch en chemisch: in relatie tot corrosie processen.
- Constructief: in relatie tot sterkte van de stalen damwand.
- Geotechnisch: in relatie tot grond-constructie interactie.
- Probabilistisch: in relatie tot omgaan met onzekerheden.

De beschouwing in voorliggende rapportage is het eerste deel in een reeks van onderzoek naar de veroudering van bestaande stalen damwanden en wordt grotendeels gedaan met een geotechnische bril, rekening houdend met constructieve en probabilistische aspecten. Daarbij is de beschouwing pragmatisch, getracht wordt te komen tot meer concrete inzichten en aanbevelingen voor de huidige praktijk.

Met betrekking tot de achterliggende biologische en chemische processen is reeds vroeg in de literatuurstudie geconcludeerd dat de processen, complex, onbekend en/of afhankelijk zijn van vele (onbekende en/of niet (makkelijk) te kwantificeren) parameters. Als gevolg kunnen deze processen op dit moment en in de voorziene toekomst niet, dan wel onvoldoende houvast bieden om tot voldoende nauwkeurige voorspellingen betreffende corrosie te komen voor het ontwerpen of beoordelen van damwandconstructies. Beste alternatief is dan om uit te gaan van

een empirische aanpak, d.w.z. meten, inspecteren en monitoren van de corrosie, om tot een meer rationele beschouwing te komen.

Deze rapportage gaat verder expliciet over corrosie van damwanden grenzend aan zoetwater. Deze afbakening wordt gemaakt omdat voor zoutwater condities in Nederland reeds veel kennis bestaat bij het Havenbedrijf Rotterdam.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op corrosie van stalen damwanden onder zoetwatercondities vanuit de theorie, de literatuur en de normen en richtlijnen. Omdat snel duidelijk werd dat een verdere verdieping van de theorie wel interessant is, maar in deze fase van het KpNK onderzoek niet effectief, is besloten niet verder/dieper te zoeken in de literatuur. In hoofdstuk 2 wordt daarom ook verder ingegaan op het effect van corrosie op diverse faalmechanismen van damwandconstructies. In hoofdstuk 3 wordt een overzicht gegeven van de verzamelde informatie op het gebied van methoden voor de meting van de staaldikte en meetprotocollen. In hoofdstuk 4 worden conclusies getrokken en in hoofdstuk 5 worden aanbevelingen gedaan.

2 Literatuuronderzoek

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het uitgevoerde literatuuronderzoek gepresenteerd. Het onderzoek heeft zich toegespitst op de volgende zaken:

- Corrosie van stalen damwanden onder zoetwatercondities: theorie en praktijk (data).
- Normen en richtlijnen voor dikteafname ten gevolge van corrosie.
- Invloed van walsafwijkingen op corrosiemetingen.
- De invloed van corrosie op diverse faalmechanismen van damwandconstructies.

Tijdens het onderzoek is gezocht naar de aanwezigheid van een eventuele inventarisatie van damwanden langs de Nederlandse binnenwateren (ouderdom, profiel type, type toepassing, waterkwaliteit en conditie). Een dergelijke inventarisatie is echter niet gevonden.

2.1 Corrosie in zoetwater: theorie en praktijk (data)

Het proces waarmee corrosie in zoetwater meestal plaatsvindt is de reactie van staal met zuurstof. De snelheid van deze reactie wordt bepaald door de transportsnelheid van zuurstof naar het staaloppervlak, i (A/cm²) [Matsushima 2011] waarbij A staat voor Ampères:

$$i = \left(\frac{D \cdot n \cdot F}{\delta} \right) C \times 10^{-3} \quad (2.1)$$

In formule (2.1) is D , de diffusiecoëfficiënt voor opgelost zuurstof in water (cm²/s), n , het aantal elektronen dat bij de reactie is betrokken F , de Faraday constante (C/mol) en δ , de dikte van de diffusielaag (cm) en C , de concentratie van de opgeloste zuurstof (mol/L).

Corrosiesnelheid

In de literatuur wordt de corrosiesnelheid op twee manieren uitgedrukt de algemene vorm is het verlies van massa per eenheid van oppervlakte per eenheid van tijd. Deze wordt frequent als mdd uitgedrukt dat staat voor:

$$\text{corrosiesnelheid} = mdd = \frac{mg}{dm^2 \text{ jaar}}$$

Door vermenigvuldiging (rekening houdend met de conversie van dm naar mm) met de volumieke massa van het materiaal, ρ , kan de corrosiesnelheid worden uitgedrukt als het verlies van dikte per tijdseenheid. Hiervoor worden meestal mm en jaar gehanteerd:

$$\text{corrosiesnelheid} = \frac{mm}{\text{jaar}}$$

De maximale theoretische corrosiesnelheid die hieruit voor typische condities volgt, is circa 0,45 mm/jaar.

Hard water kenmerkt zich door de hoge concentraties Ca en CO₃ en daardoor kan een laagje bestaande uit calciumcarbonaat gevormd worden. Een dergelijk laagje vormt een barrière voor het transport van zuurstof en daarmee remt de corrosiesnelheid af.

In zacht water is deze beschermende laag dunner, en dus is de corrosiesnelheid hoger, maar niet zo hoog als de eerder berekende theoretische maximale snelheid doordat zich toch een remmende laag corrosieproducten vormt en bovendien met er voldoende aanvoer van zuurstof zijn. Als gevolg van deze beperkende factoren ligt de theoretische corrosiesnelheid dan typisch in de orde van 0,1 mm/jaar [Matsushima 2011].

Verhoging van de zuurstofconcentratie in de waterfase, de stroomsnelheid en de temperatuur van het water kunnen de corrosiesnelheid verhogen. Boven een bepaalde kritische stroomsnelheid daalt de corrosiesnelheid weer; dit komt door passivering van het staal (de opbouw van een corrosieremmende laag).

Wanneer de aanvoer van zuurstof naar het staaloppervlak niet homogeen is of er door andere oorzaken verschillende elektrochemische zones ontstaan, kunnen er elektrische cellen ontstaan waardoor de corrosiesnelheid kan toenemen. Het effect hiervan neemt toe bij hogere zoutsterkte.

Een veel gebruikte maat waarmee de corrosiviteit in zoetwater wordt ingeschat is de Langelier index, *LSI*, (The Langelier Saturation Index):

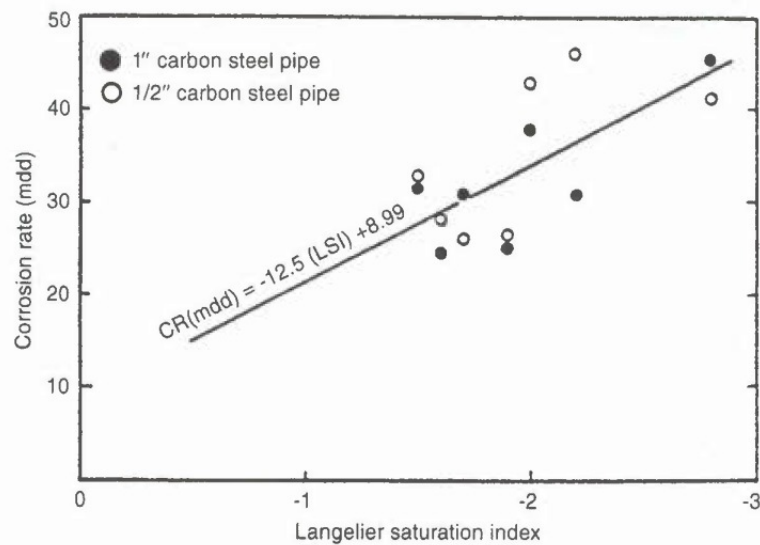
$$LSI = pH_{measured} - pH_s \quad (2.2)$$

Waarbij

$$pH_s \approx \log\left(\frac{K_s}{K_2}\right) - \left\{\log[Ca^{2+}] + \log(alk)\right\} \quad (2.3)$$

pH_s is de pH bij verzadiging in calcië of calciumcarbonaat, K_2 is de tweede dissociatieconstante van koolstofdioxyde en K_s is de oplosbaarheidsconstante van calciumcarbonaat.

Onder condities met een positieve Langelier index wordt een CaCO₃ laag gevormd en is de corrosiviteit laag, onder condities met een negatieve Langelier index wordt geen CaCO₃ laag gevormd en is de corrosiviteit hoger. Naast waarnemingen zie Figuur 2.1, die in overeenstemming met deze relatie tussen de corrosiviteit en de Langelier index zijn, zijn er ook uitzonderingen: water met colloïdaal silica of organische deeltjes zoals algen, hoge concentraties zout of hoge temperaturen kan afwijkend gedrag vertonen.



Figuur 2.1 Relatie tussen de corrosiesnelheid in mdd=mg/(dm² dag) en de Langelier index van waterleidingen [Matssushima 2011].

Een andere methode is de Ryznar Index (RI) [Ryznard 1944]:

$$RI = 2pH_s - pH_{measured} \quad (2.4)$$

Weer een andere index is de PSI waarde:

$$PSI = 2pH_s - pH_e \quad (2.5)$$

Met:

$$pH_e = 1.485 \times \log(\text{total alkalinity}) + 4.54 \quad (2.6)$$

In de range van pH 4-10 zijn geen significante effecten van de pH op de corrosiesnelheid te verwachten.

Het effect van stroomsnelheid op de corrosiesnelheid is te zien in Figuur 2.2.

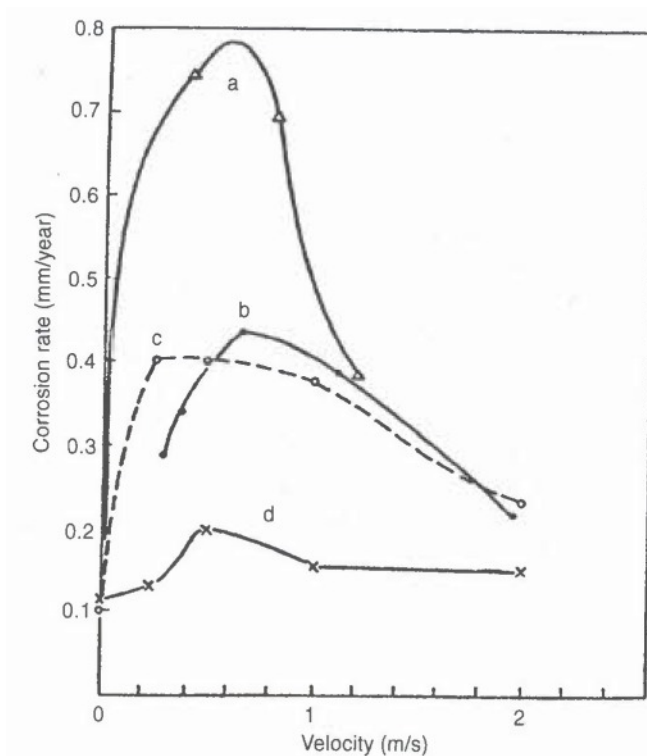


FIGURE 44.4. Effect of water velocity on corrosion of carbon steel (1). (a) Distilled water + 10 ppm Cl^- , 50°C, 14 days [26]. (b) Soft tap water, Tokyo, Japan, room temperature, 67 days [22]. (c) Soft tap water, Amagasaki, Japan, 20°C, 15 days (killed steel) [25]. (d) Soft tap water, Amagasaki, Japan, 20°C, 15 days (rimmed steel) [25].

Figuur 2.2 : Effect van watersnelheid op de corrosiesnelheid in mm/jaar van koolstof staal. Zie onderschrift voor details [Matsushima 2011].

Het gecombineerde effect van stroomsnelheid en zoutsterkte is te zien in Figuur 2.3 en Figuur 2.4.

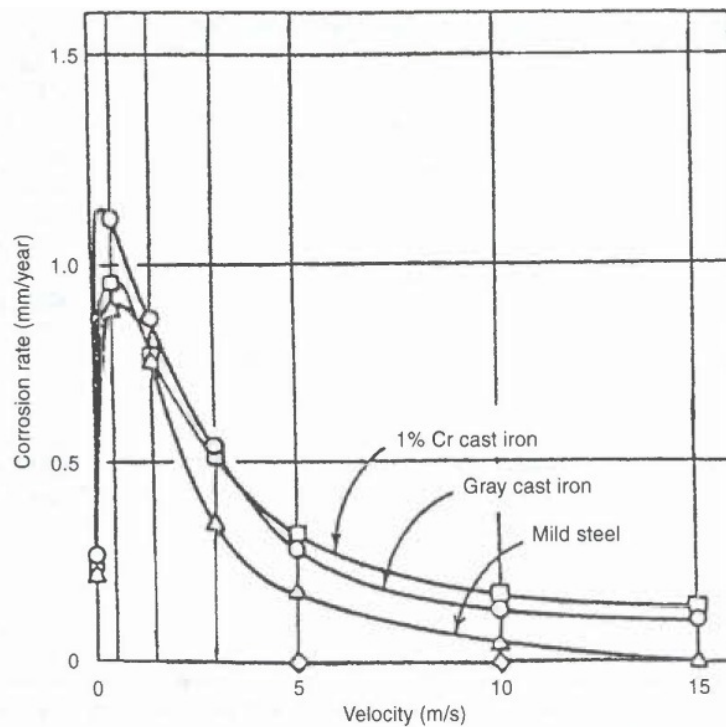


FIGURE 44.5. Effect of water velocity on corrosion of steel (2). 25 ppm Cl^- , 30°C, 30 days [27].

Figuur 2.3 : Effect van watersnelheid op de corrosie van staal. Zie onderschrift voor details. [Matsushima 2011].

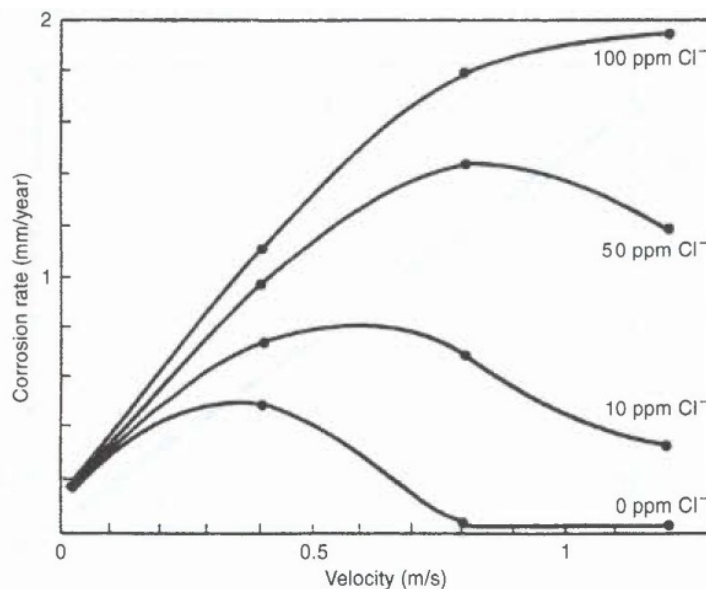


FIGURE 44.6. Effect of water velocity and chloride concentration on corrosion of carbon steel. Distilled water + NaCl, 50°C, 14 days [26].

Figuur 2.4 : Effect van watersnelheid en chloride concentratie op de corrosie van koolstof staal. Zie onderschrift voor details [Matsushima 2011].

De interesse gaat echter vooral uit naar corrosie van stalen damwanden onder zoetwatercondities, geen chloride, en een temperatuur die relevant is voor Nederland, tussen 10 en 20 °C.

2.1.1 Verwachting over de tijd

De verwachting is dat na verloop van tijd zich een beschermende laag vormt, bestaande uit corrosieproducten, op het staal. De vorming van een dergelijke laag belemmert de toetreding van zuurstof en dus zal gedurende de blootstellingstijd, de corrosiesnelheid steeds verder afnemen. Wanneer de beschermende laag wordt afgebroken, zal dit beschermende effect weer afnemen.

2.1.2 Risicovolle omstandigheden (stroming, scheepvaart, MIC, ...)

Verhoging van de zuurstofconcentratie, de stroomsnelheid en de temperatuur van het water zorgen voor een verhoging van de corrosiesnelheid.

Stroming heeft zoals hierboven beschreven twee effecten. Bij een hogere stroomsnelheid neemt de corrosiesnelheid met de stroomsnelheid toe. Boven een bepaalde kritische stroomsnelheid daalt de corrosiesnelheid weer; dit komt door passivering van het staal.

Andere factoren die corrosie kunnen versnellen, zijn:

- Geen toepassing van een coating.
- Mechanische schade.
- Aantasting als gevolg van micro-organismen, ook MIC genoemd (Microbiologically-Influenced Corrosion).
- Begroeiing met mosselen.
- Cavitatie [Acotec 2012a] (imploderen van luchtbellens op het oppervlak) door schepen die zich van de wand duwen via hun boegschroeven zodanig dat de luchtbellens telkens weer tegen de wand worden geperst. Hierdoor wordt de laag roest verwijderd, is sprake van veel zuurstof aan het oppervlak van de plank, en zal de corrosie agressief verder gaan. Dit is een continu herhalend proces. Plaatselijk kan de corrosie dan intenser zijn met mogelijk gaten, die voor verzakking zorgen, tot gevolg.

2.1.3 Praktijkdata uit de literatuur

Door Melchers [Melchers 2006] en [Melchers 2011] is een grote hoeveelheid data over corrosiesnelheden in verschillende omgevingen geanalyseerd, voorbeelden hiervan zijn in Figuur 2.5 en Figuur 2.6 weergegeven. Hieruit zijn door deze auteurs de volgende conclusies getrokken:

- Het corrosieproces vindt volgens deze auteurs plaats via een bimodaal proces (zie Figuur 2.7). In de eerste fase vindt corrosie plaats door een reactie met zuurstof, in de tweede fase is deze reactie sterk vertraagd door diffusie door een laag corrosieproducten en wordt verondersteld dat de corrosie plaats vindt door de reactie met protonen en de vorming van waterstof (Figuur 2.8).
- Factoren die van invloed zijn op de corrosiesnelheid, zijn: temperatuur, pH, hardheid, en nutriëntenconcentraties.
- De invloed van deze factoren is nog niet volledig bekend en verdient het om verder onderzocht te worden.

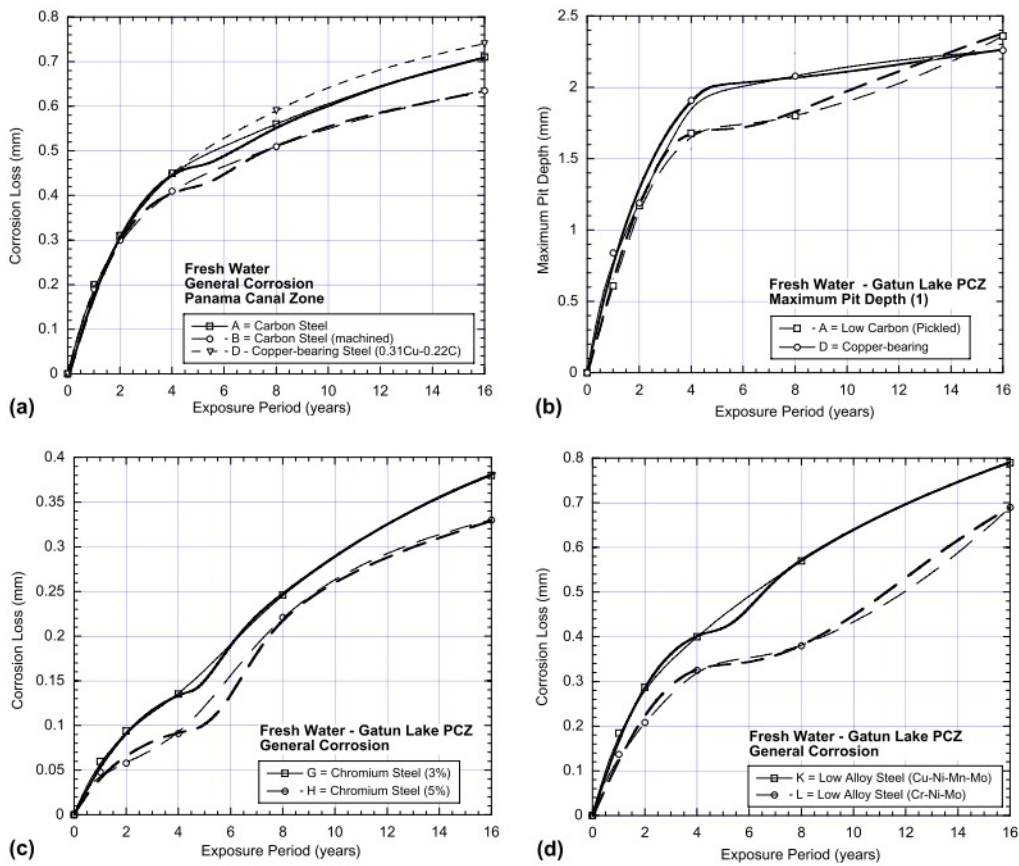


Fig. 2. Corrosion loss data and interpreted trends for several different steel compositions (a, c and d) general corrosion, (b) pitting corrosion of (a). Based on data reported by Forgeson et al. [9] and Southwell and Alexander [33].

Figuur 2.5 Meetgegevens en modelbeschrijving van corrosie in zoetwater voor verschillende locaties. Zie onderschrift voor details. [Melchers 2006].

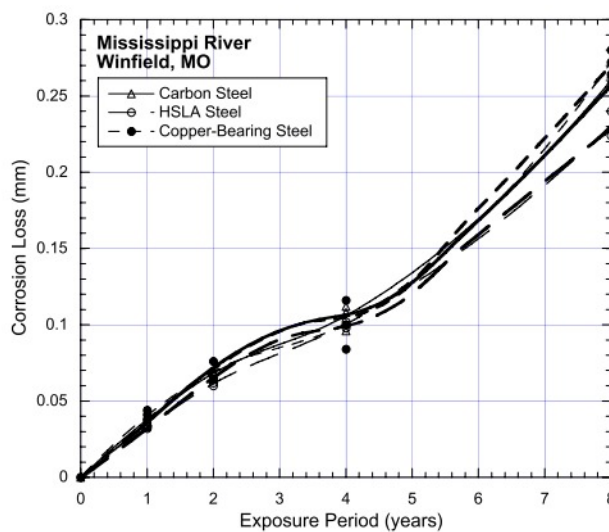


Fig. 4. Corrosion loss-exposure time relationship for three different steels immersed in the Mississippi River near Winfield, OH. Based on data reported by Coburn [35].

Figuur 2.6 Meetgegevens en modelbeschrijving van corrosie in zoetwater in Mississippi. Zie onderschrift voor details. [Melchers 2006].

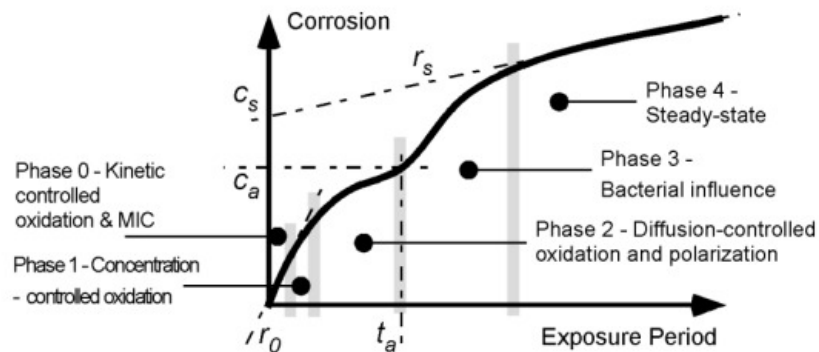


Figure 3. Schematic bi-modal model for corrosion loss showing principal phases and main model parameters.

Figuur 2.7 Schematische weergave van het verloop van de corrosie volgens het bimodale model van Melchers. Zie onderschrift voor details. [Melchers 2011].

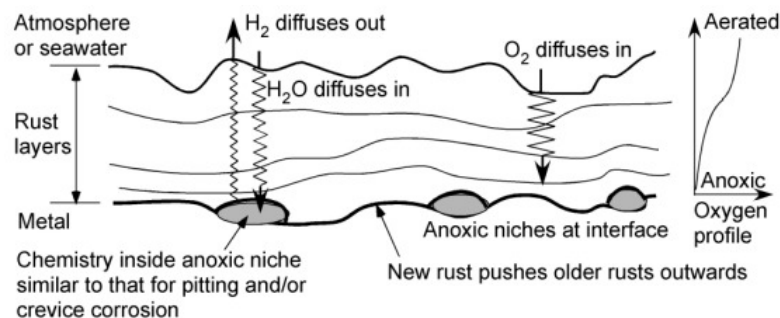


Figure 4. Schematic cross-section through rust layers and parent metal showing location of anoxic niches within which hydrogen reduction can proceed and the fluxes of O_2 , H_2 and H_2O through the rust layers, required to sustain the reactions within the niches. The size of the zig-zag lines indicates, schematically, the difficulty of diffusion.

Figuur 2.8 Schematische weergave van veronderstelde corrosieprocessen in het model van Melchers aan de hand van een schematische doorsnede. Zie onderschrift voor details. [Melchers 2011].

Bij de analyse van Melchers moet wel worden opgemerkt dat de onderbouwing van de bimodale verdeling gebaseerd is op data met een grote spreiding: de onzekerheid in de data is groot in vergelijking met de subtiele bimodale verdeling. Ten tweede is de theoretische onderbouwing niet met directe waarnemingen bevestigd.

Een eenvoudiger model dat veelgebruikt model wordt is qua vorm als volgt:

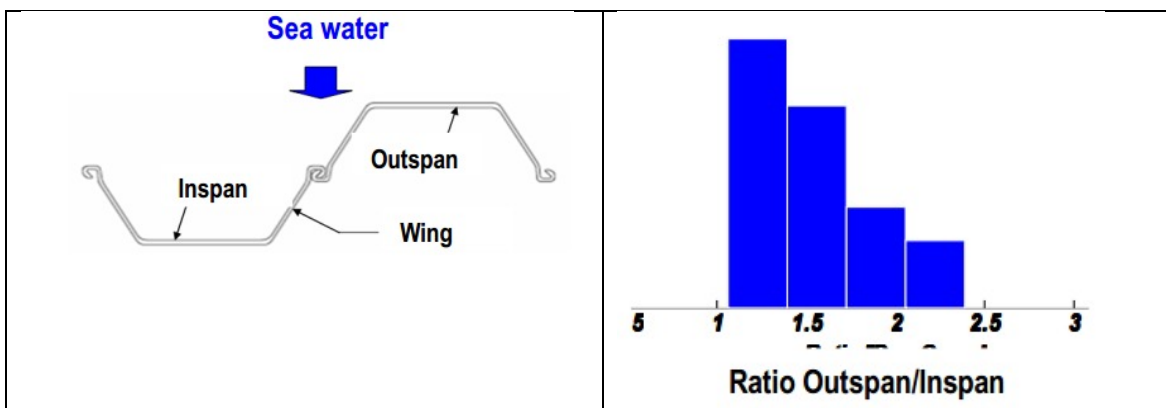
$$c = At^B \quad (2.7)$$

Waarbij c , de corrosie (mm) is t (y), de tijd en A is een constante (dimensies $\text{mm y}^{(B-1)}$) en B een dimensieloze constante.

Een ander voorbeeld van concrete data van damwandcorrosie is ontleend aan [Wall 2014]. Dit voorbeeld gaat wel over zoutwater en niet over zoetwater. Bij de studie van Wall worden twee zones met verhoogde corrosiesnelheid waargenomen: 1) Rond de waterlijn en 2) In een

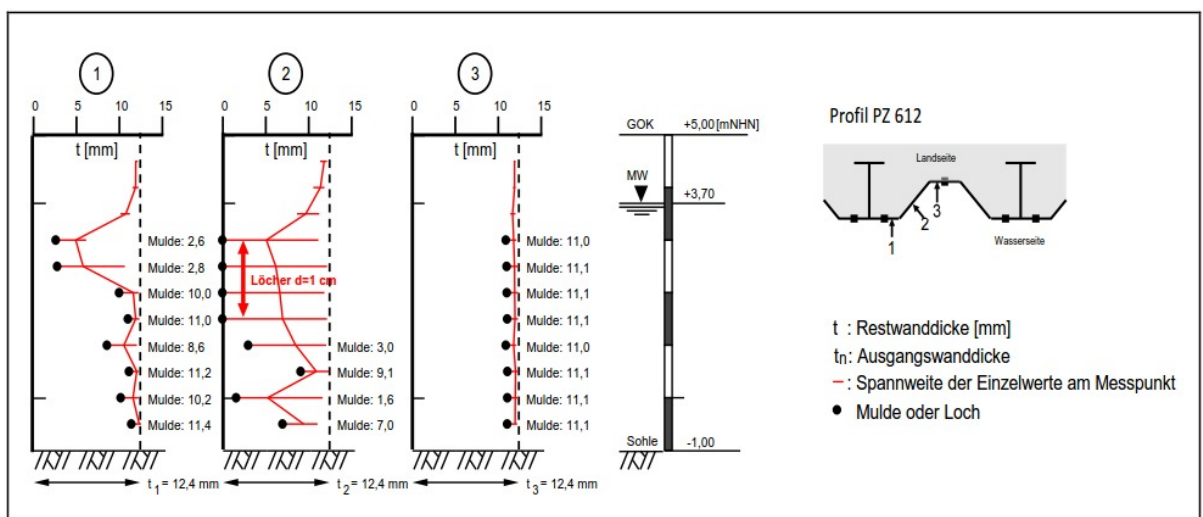
diepere zone, waar boegschroeven veel invloed hebben. Dit komt overeen met eerdere opmerkingen over belangrijke mechanismen.

Een ander verschijnsel wat uit de praktijkdata volgt, is dat er significante systematische verschillen kunnen voorkomen in een damwandsectie tussen de dikteafname bij de voor- (inspan) en achterflens (outspan) van damwandprofielen zie het histogram in Figuur 2.9 van een voorbeeld hiervan in zoutwater [Schoefs 2017]. De invloed op de sterkte van dergelijke verschillen is groot, de vraag is of dergelijke grote verschillen ook in de zoetwatercondities in Nederland optreden.



Figuur 2.9 : Voorbeeld van met een histogram van ratio van dikte afname tussen voor en achterflens [Schoefs 2017].

Verder wordt in de praktijk, lokaal significante grote dikteafname geconstateerd in de directe omgeving van gaten in damwanden. Nadat er door corrosie een gat is ontstaan neemt de corrosiesnelheid in de omgeving van de gaten toe. In Figuur 2.10 in staat een voorbeeld van sterk niet uniforme corrosie met aanwezige door corrosie gevormde gaten.



Figuur 2.10: **Rood horizontaal** bandbreedte gemeten dikten per meetniveau **Rood verticaal** gemiddelde gemeten dikten met **zwarte stippen** is de dikte ter plaatse van de gaten/ putten weergegeven, betreft voorbeeld met constante waterstand BAW 2017b

2.2 Normen en richtlijnen voor dikteverlies ten gevolge van corrosie

2.2.1 Eurocode 3

In de Eurocode 3 [NEN-EN 1993-5] worden aanbevolen uitgangswaarden voor de dikte reductie per blootgestelde zijde van een plank ter compensatie van de corrosiesnelheid voor zoet en zout oppervlaktewater gegeven, zie ook Tabel 2.1. Binnen deze studie is niet duidelijk geworden wat de achtergrond is van de waarden in Tabel 2.1 anders dan dat de waarden na 25 jaar gebaseerd zijn op extrapolatie. Deze extrapolatie is echter niet lineair voor zoetwatercondities dat is te zien wanneer de waarden uit Tabel 2.1 grafisch als functie van de tijd worden weergegeven, zie bovenin Figuur 2.12. Door de dikteafname te delen door het aantal jaren kunnen de gemiddelde corrosiesnelheden vanaf aanleg tot dat jaar worden bepaald, zie de middelste grafiek van Figuur 2.12. In informatie uit Tabel 2.1 kan ook op een andere wijze worden weergegeven met incrementele corrosiesnelheden. Door het verschil in dikteafname tussen twee kolommen in Tabel 2.1 te delen door het verschil in jaren tussen deze kolommen kan de gemiddelde incrementele corrosiesnelheid worden bepaald over de periode tussen deze leeftijden, deze incrementele waarden zijn onderin Figuur 2.12 weergegeven.

Naast waarden voor de waterzijde geeft de [NEN-EN 1993-5] ook waarden voor de grondbelegde zijde, zie Tabel 2.2 ook voor deze waarden geldt de waarden boven 25 jaar gebaseerd zijn op niet lineaire extrapolatie. De [NEN-EN 1993-5] geeft geen nadere verklaring wat precies met de verschillende categorieën Tabel 2.2 wordt bedoeld en wat de achtergronden zijn. Voor de de corrosie in de atmosferische zone in zoetwater omgevingen geeft de [NEN-EN 1993-5] een dikteafnamesnelheid van 0,01 mm/jaar per aan lucht blootgestelde zijde. In de [NEN-EN 1993-5] is een figuur opgenomen met een voorbeeld van hoe een dikteafname verdeling er uit kan zien, zie Figuur 2.11.

De [NEN-EN 1993-5] geeft expliciet aan dat landen afwijkende (bij de voor dat land passende omstandigheden) waarden in hun nationale annex kunnen zetten en dat waarden in Tabel 2.1 en Tabel 2.2. als richtinggevend kunnen worden gebruikt. In de Nationale bijlage van Nederland is opgenomen dat waarden in Tabel 2.1 en Tabel 2.2. normatief zijn en daarmee verplicht zijn om als minimum aan te houden bij een toetsing met NEN1990 in het kader van het bouwbesluit.

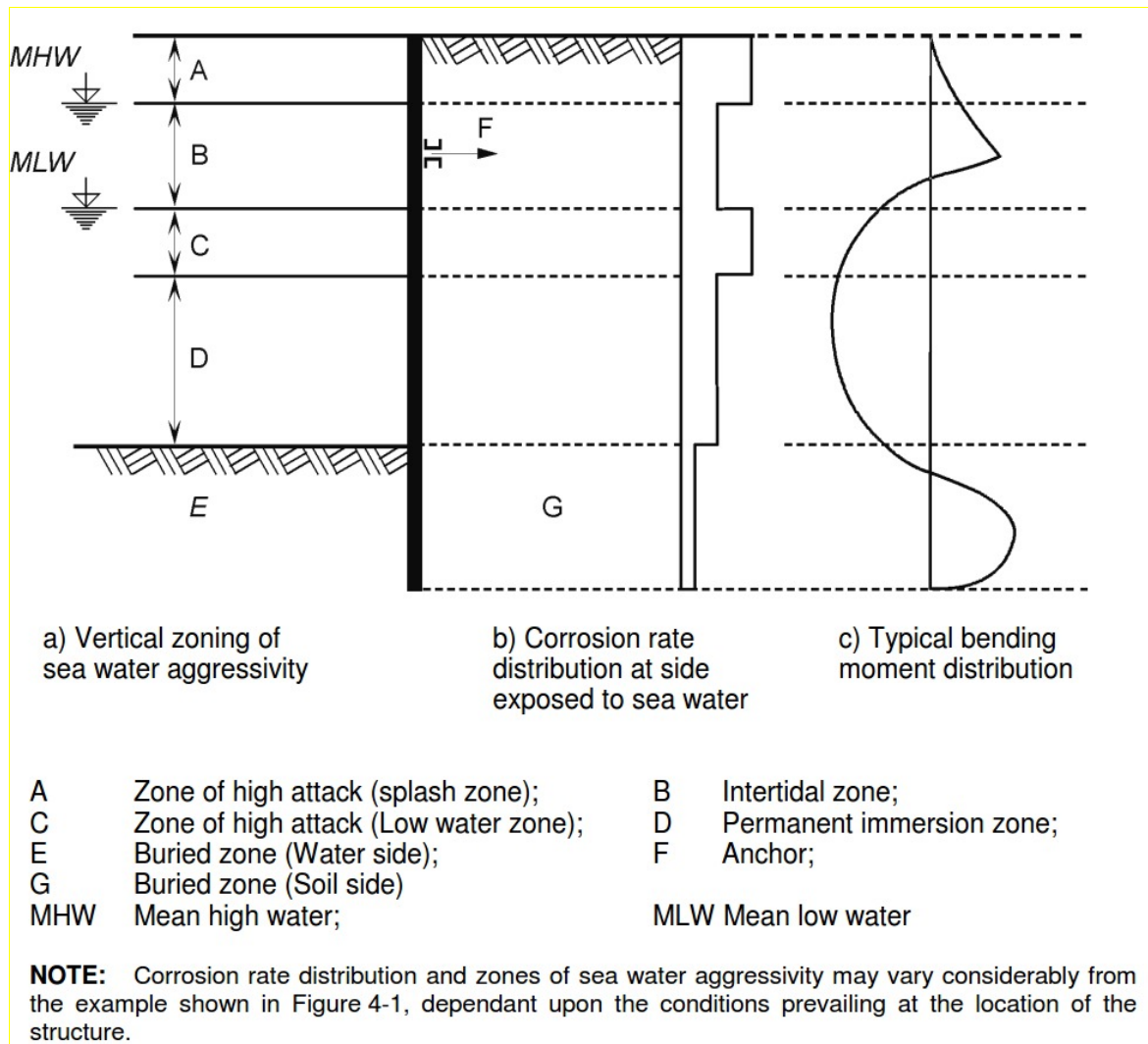
Recommended value for the loss of thickness [mm] due to corrosion for piles and sheet piles in fresh water or in sea water

Required design working life	5 years	25 years	50 years	75 years	100 years
Common fresh water (river, ship canal,) in the zone of high attack (water line)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Very polluted fresh water (sewage, industrial effluent,) in the zone of high attack (water line)	0,30	1,30	2,30	3,30	4,30
Sea water in temperate climate in the zone of high attack (low water and splash zones)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
Sea water in temperate climate in the zone of permanent immersion or in the intertidal zone	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50

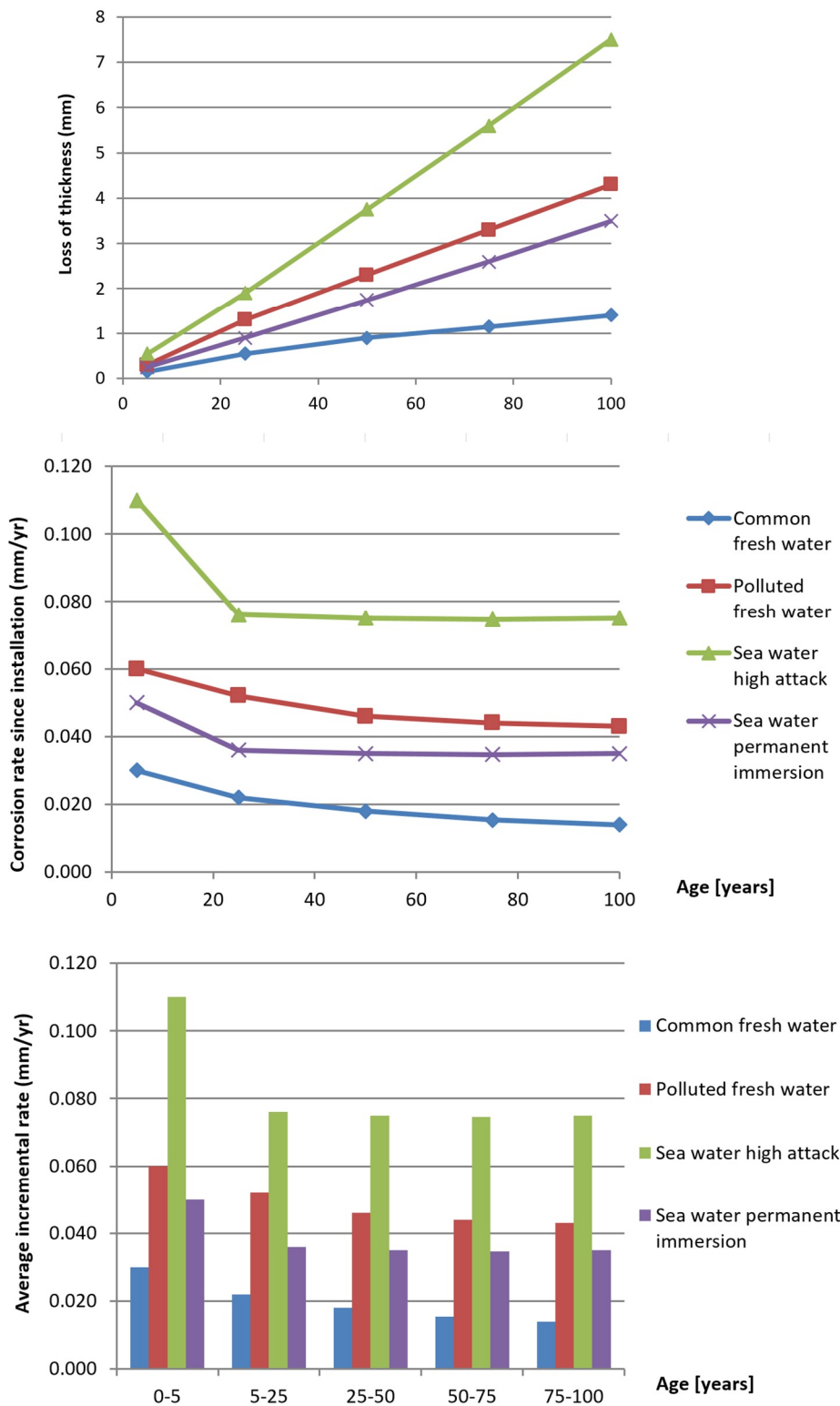
Notes:

- 1) The highest corrosion rate is usually found in the splash zone or at the low water level in tidal waters. However, in most cases, the highest bending stresses occur in the permanent immersion zone, see Figure 4-1.
- 2) The values given for 5 and 25 years are based on measurements, whereas the other values are extrapolated.

Tabel 2.1 In de Eurocode aanbevolen waarden door dikte reductie in mm voor de aan water grenzende zijde van stalen palen en damwanden in zoet en zout oppervlaktewater [NEN-EN 1993-5]



Figuur 2.11 In de Eurocode gegeven voorbeeld van dikteafname verdeling over de hoogte van een damwand [NEN EN 1993-5] Figure 4-1



Figuur 2.12: Dikteafname en corrosiesnelheid als functie van de van het moment van installatie in zoet en zout oppervlaktewater **boven** de waarden uit [NEN-EN 1993-5] **midden** de afgeleide gemiddelde corrosie als functie van het aantal jaren sinds installatie en **onder** de afgeleide gemiddelde incrementele corrosie over een leeftijdsperiode.

Recommended value for the loss of thickness [mm] due to corrosion for piles and sheet piles in soils, with or without groundwater

Required design working life	5 years	25 years	50 years	75 years	100 years
Undisturbed natural soils (sand, silt, clay, schist,)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Polluted natural soils and industrial sites	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressive natural soils (swamp, marsh, peat, ...)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Non-compacted and non-aggressive fills (clay, schist, sand, silt,)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Non-compacted and aggressive fills (ashes, slag,)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75
Notes:					
1) Corrosion rates in compacted fills are lower than those in non-compacted ones. In compacted fills the figures in the table should be divided by two.					
2) The values given for 5 and 25 years are based on measurements, whereas the other values are extrapolated.					

Tabel 2.2 In Eurocode aanbevolen waarden voor dikte reductie per grondbelegde zijde van stalen palen en damwanden [NEN-EN 1993-5]

2.2.1.1 Richtlijn Ontwerp Kunstwerken

De Richtlijn Ontwerp Kunstwerken [RWS 2017] geeft richtwaarden voor corrosie onder eroderende omstandigheden, zie Tabel 2.3. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen zoet- en zoutwater en waarden per corrosiezone. Voor de ligging van de in Tabel 2.3. genoemde zonering zie Figuur 2.11. Binnen deze studie is het ook bij navraag bij RWS niet duidelijk geworden wat de precieze achtergrond is van deze tabel anders dan dat deze al eerder gebruikt werden in voormalige interne richtlijnen bij RWS.

In tegenstelling tot de corrosiewaarden uit de Eurocode voor zoetwatercondities, neemt de corrosiesnelheid in deze richtlijn niet af met de tijd. Dit komt overeen met het mechanisme waarbij het oppervlak voortdurend blootgesteld is aan afspoeling en de opgebouwde corrosie remmende laag weer wordt afgebroken.

Ontwerplevensduur [jaar]	5	25	50	75	100
expositie					
zoet water, zone tussen laagste en hoogste schutpeil (zone B)	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0
zoet water, zone boven hoogste schutpeil en zone onder laagste schutpeil (zones A en C)	0,25	1,25	2,5	3,75	5,0
zout water, zone tussen laagste en hoogste schutpeil (zone B)	0,25	1,25	2,5	3,75	5,0
zout water, zone boven hoogste schutpeil en zone onder laagste schutpeil (zones A en C)	0,75	3,75	7,5	11,25	15,0

Bij sluizen loopt zone C tot op de bodem; zone D is daar niet van toepassing.

Toelichting:

Aangezien in sluizen een door afspoeling eroderende omgeving aanwezig is, is de corrosiesnelheid in tabel 7-3 constant in de tijd. De waarden komen overeen met de 'Handreiking rekenmethodieken NIC, groene versie', de interne bureaurichtlijn die tot 2006 bij de afdeling Constructie Waterbouw van de Bouwdienst Rijkswaterstaat werd gehanteerd.

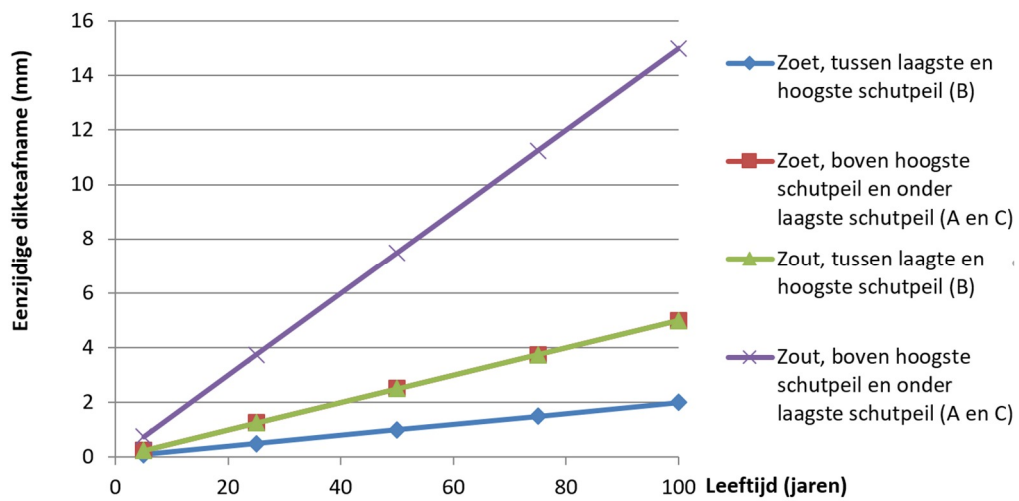
Dikteverlies kan onverwacht hoger uitvallen in de praktijk als gevolg van ALWC (Accelerated Low Water Corrosion) en / of MIC (Microbiological Induced Corrosion).

Om deze versnelde corrosie te kunnen tegengaan, moet het ontwerp en de plaatsing van damwanden zodanig zijn, dat kathodische bescherming op alle damwanden gedurende de hele ontwerplevensduur (dus ook na plaatsing) toegepast kan worden. Een voldoende elektrische geleiding tussen de afzonderlijke damwandelementen is hierbij essentieel.

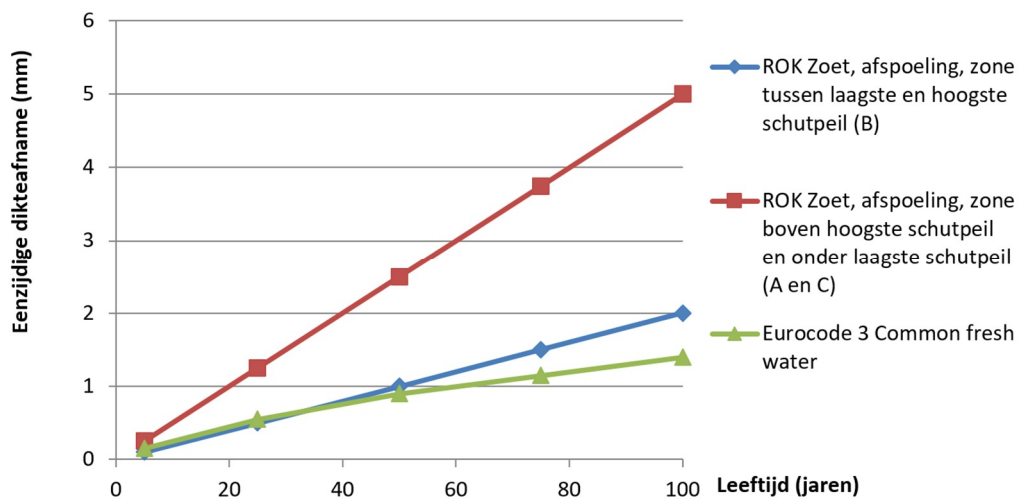
Tabel 2.3 Dikteverlies door corrosie bij eroderende omstandigheden. De waarden van NEN-EN 1993-5, Tabel 4-2 moet voor onbehandeld onbeschermd staal onder eroderende omstandigheden veroorzaakt door afspoeling, zoals bij sluizen door deze waarden worden vervangen volgens Richtlijn Ontwerp Kunstwerken [RWS 2016].

De waarden uit de ROK zijn grafisch weergegeven in Figuur 2.13. Ter vergelijking zijn in Figuur 2.14 de waarden van de ROK voor afspoelcondities vergeleken met de waarden uit de Eurocode 3 voor schoon zoetwater.

Opmerkelijk is dat waar de Eurocode onderscheid maakt naar schoon en verontreinigd water de ROK dit niet doet. En waar de ROK afspoelcondities herkent doet de Eurocode dit niet.



Figuur 2.13 Dikteafname met de tijd voor afspoelcondities in zout en zoetwater [RWS 2016]



Figuur 2.14 Dikteafname als functie van de tijd in zoetwater [NEN-EN 1993-5] en in zoetwater onder afspoelcondities [RWS 2017].

2.2.2 Corrosie aan grondzijde Deltares 2014

De corrosiesnelheid aan de grondbelegde zijde van damwanden neemt af bij een toenemende blootstellingsduur, wat overeenkomt met een aangenomen mechanisme waarbij zich een corrosie remmende laag opbouwt met de tijd. Deltares en Rijkswaterstaat hebben vanaf 2006, aan de hand van literatuur- en veldonderzoek, uitgebreid onderzoek gedaan naar de dikteafname van damwanden in verschillende soorten grond. In de laatste rapportage van Deltares [Deltares 2014a] wordt het onderzoek samengevat en geadviseerd welke dikteafname (corrosietoeslag) dient te worden gehanteerd. Uit het onderzoek kwamen de volgende punten naar voren:

- De belangrijkste bepalende factoren voor dikteafname zijn de positie ten opzichte van de grondwaterstand, de grondwaterbeweging en het geroerd/ongeroerd zijn van de grond.
- Bodemtype (veen, zand of klei) en zoutgehalte zijn niet significant van invloed op de corrosiesnelheid.
- Op basis van de karakteristieken van corrosie wordt verwacht dat zure grond pas vanaf een zuurgraad kleiner dan 4 tot een verhoging van de corrosiesnelheid leidt.

Op basis van deze conclusies is de volgende dikteafname (totale corrosietoeslag) voor grond/grond belegde damwanden geadviseerd. Dit advies is vervolgens voorgelegd aan het Expertisenetwerk Waterveiligheid (ENW) [Deltares 2014b] en is vervolgens overgenomen door ENW [ENW 2014]:

- Voor veen onder de grondwaterstand kunnen de waarden voor “ongeroerde en schone grond” in Tabel 2.4 worden gebruikt .
- Voor veen boven de grondwaterstand kunnen de waarden voor “geroerde grond, fluctuatie in grondwaterspiegel, boven de grondwaterspiegel” in Tabel 2.4 worden gehanteerd in combinatie met het tijdens de aanleg slaan van een testplank.
- Als voorzorgprincipe wordt voorgesteld om gebieden te identificeren waar een lage pH aanwezig kan zijn.

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

Tabel 2.4 Corrosietoeslag (dikteafname) voor beoogde levensduur van 50 en 100 jaar voor tweezijdig met grondbelegde damwanden [ENW 2014] en [Deltares 2014a & b]

*) Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat bij het opstellen van de tabel in 2014 de letterlijke tekst niet volledig complementair is, alhoewel dat in 2014 wel door Deltares wel als complementair was bedoeld. Expliciet gemaakt met de vet aangeven toevoegingen zou de complementaire beschrijving dan worden: “Ongeroerde, schone grond en permanent beneden de **laagste** grondwaterspiegel **en geen verticale grondwaterbeweging**”

) Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat bij het opstellen van de tabel in 2014 de letterlijke tekst niet volledig complementair is, alhoewel dat in 2014 door Deltares wel als complementair was bedoeld. Expliciet gemaakt met de vet aangeven toevoegingen zou de complementaire beschrijving dan worden: “Geroerde grond, **en/of verticale grondwaterbeweging, **en/of** boven de **laagste** grondwaterspiegel”

2.2.3 Corrosie aan grondzijde RWS 2015

Door RWS is in 2015 [RWS 2015] een afrondende rapportage opgesteld van het praktijkonderzoek over de periode 2006 – 2015 waar ook [Deltares 2014a & b] en het ENW-advies [ENW 2014] onderdeel van uitmaken. Tussen [RWS 2015] en de adviezen [Deltares 2014a en b] en [ENW 2014] bestaat een discrepantie/omissie. Daar waar zowel [Deltares 2014a & b] als [ENW 2014] aangeven dat voor situaties met verticale grondwaterstroming de hogere waarde corrosietoeslag geadviseerd wordt, wordt er in [RWS 2015] niet ingegaan op verticale grondwaterstroming. In [RWS 2015] is geen aanvullende informatie te vinden waarom wordt afgeweken van de adviezen [Deltares 2014a & b] en [ENW 2014], het hele woord “stroming” komt niet voor in [RWS 2015].

In bijlage E van [RWS 2015] wordt de geadviseerde methode voor bepaling van de corrosietoeslag gegeven. Voor schone grond worden twee zones gehanteerd die alleen maar afhankelijk zijn van het niveau van de laagste grondwaterstand en of de grond wel of niet geroerd is zoals in Tabel 2.5 weergegeven. [RWS 2015] adviseert verder:

- Vergravingen van grond ouder dan 10 jaar worden niet meer relevant geacht voor het vaststellen van zones voor corrosietoeslag.
- Per project met stalen damwanden wordt een testplank aangebracht in de onmiddellijke nabijheid van de damwand. Van de testplank wordt van tevoren op gemarkeerde posities de dikte bepaald.

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 wordt in [RWS 2015] bijlage E een beslisboom gegeven.

	Corrosietoeslag totaal (mm)
	100 jaar
Ongeroerde grond onder het laagste grondwaterniveau	2,4
Geroerde grond en/of boven het laagste grondwaterniveau	4,4

Tabel 2.5 Voorstel voor corrosietoeslag (dikteafname) voor beoogde levensduur van 100 jaar (dubbelzijdig) naar [RWS 2015]

In 2016 is [RWS 2015] overgenomen in het advies van het Expertisenetwerk Waterveiligheid ENW [ENW 2016]. In [ENW 2016] adviseert ENW:

“de methode voor alle HWBP-2 projecten toe te passen. Dit is conform het eerdere advies van het ENW, maar nu voorzien van een verder uitgewerkte onderbouwing. Aan DGRW adviseren wij de methode algemeen toepasbaar te verklaren door de corrosietoeslag zoals deze nu is opgenomen in de Handreiking Constructie Ontwerpen te wijzigen en de kennis die hieraan ten grondslag ligt algemeen beschikbaar te stellen.”

Het in [ENW 2016] genoemde eerdere ENW-advies betreft [ENW 2014]. Dus in [ENW 2016] wordt de toepassing van de uit [ENW 2014] genoemde corrosietoeslag, zie Tabel 2.4 geadviseerd met [RWS 2015] als nadere onderbouwing.

2.2.4 Aanpak in DIN 50929-3:2018

In de [DIN 50929-3:2018 [DIN 50929-3] wordt een zeer verfijnde aanpak gegeven die is gebaseerd op een puntensysteem welke de invloed van vele variabelen weegt en uiteindelijk resulteert in twee richtgetallen:

- Gemiddelde corrosiesnelheid.
- De gemiddelde maximale indringingssnelheid (putcorrosie).

De [DIN50929-3] geeft bij de resultaten van deze aanpak echter expliciet aan dat het slechts ruwe richtwaarden zijn die met een factor 2 kunnen variëren. De aanpak is gebaseerd op een puntensysteem dat:

- Voor de grondzijde gebaseerd is op sommaties van de individuele invloed van 15 parameters uit **Error! Reference source not found.** en voor de
- Water en luchtzijde gebaseerd is op de individuele invloed van 7 parameters alsmede ratio's en uit Tabel 2.10. Vervolgens dienen de waarden voor w_0 voor het aan water blootgestelde deel nog worden gecorrigeerd voor de zuurstofindex van het water en kan de corrosiviteit K worden bepaald waarmee vervolgens voor de corrosie zones de corrosiesnelheid per jaar kan worden bepaald.
-

Tabelle 1 — Richtwerte zur Abschätzung der mittleren Korrosionsgeschwindigkeit

Bewertungszahlsummen	Abtragsrate w (100 a) mm/a	max. Eindringrate $w_{L,max}$ (30 a) mm/a	Bemerkung
B_0 - und B_1 -Werte (siehe Tabelle 3)			
≥ 0	0,005	0,03	zeitlich abnehmend
-1 bis -4	0,01	0,05	zeitlich abnehmend
-5 bis -10	0,02	0,2	zeitlich abnehmend
< -10	0,06	0,4	zeitlich konstant
B_E - und W_E -Werte (siehe Tabelle 5)			
≥ 0	0,01	0,05	örtlicher Korrosionsangriff überwiegt
-1 bis -4	0,02	0,1	
-5 bis -8	0,05	0,3	
< -8	0,2	1	
W_0 - und W_1 -Werte (siehe Tabelle 8)			
≥ 0	0,01	0,05	örtliche Korrosion überwiegt im Wasser-/Luft-Wechsel- bereich, die $w_{L,max}$ -Werte nehmen zeitlich ab
-1 bis -4	0,02	0,1	
-5 bis -8	0,05	0,2	
< -8	0,1	0,5	

Tabel 2.6 Richtwaarden voor corrosiesnelheden [DIN50929-3]

Daarnaast gaat de [DIN 50929-3] ook in op het effect van het thermisch verzinkt zijn van staal, hoog gelegeerd roestvrijstaal, chroom-nikkelstaal, spanningscorrosie en het effect van koper. Voor deze aspecten wordt verwezen naar de DIN 50929-3:2018.

Tabelle 2 — Angaben zur Beurteilung von Erdböden

Z	Merkmal und Messgröße	Anforderung oder Kriterium	Prüfung	Einheit	Messwertbereich	Bewertung
Bodenproben						
Z ₁	Bodenart — Bindigkeit — Verunreinigungen	Anteil an abschlämmbaren Bestandteilen DIN EN 12501-2:2003-08, Tabelle 1	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang B, Modul 5	Massenanteile in %	< 10 10 bis 30 30 bis 50 50 bis 80 > 80	+4 +2 0 -2 -4 -12
Z ₂	spezifischer elektrischer Bodenwiderstand	niedrigster Widerstand nach Wasserzugabe, gemessen in der Zelle	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang B, Modul 2	Ω m	> 500 200 bis 500 200 bis 50 20 bis 50 10 bis 20 < 10	+4 +2 0 -2 -4 -6
Z ₃	Bodenfeuchte und Bezug für Z ₆ bis Z ₁₀	Wassergehalt nach Trocknen bei 105 °C	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang B, Modul 1	Massenanteile in %	< 20 > 20	0 -1
Z ₄	pH-Wert	pH-Wert bei 50 % Wasseranteil	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang B, Modul 2	—	> 9 6 bis 9 4 bis 6 < 4	+2 ^a 0 -1 -3
Z ₅	Pufferkapazität — Alkalität K _{S 4,3}	Säurekapazität bis pH 4,3	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang B, Modul 4	mmol/kg	> 1 000 200 bis 1 000 < 200	+3 +1 0
Z ₆	Pufferkapazität — Acidität K _{B 7,0}	Basikapazität bis pH 7,0	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang B, Modul 5	mmol/kg	< 2,5 2,5 bis 5 5 bis 10 10 bis 20 20 bis 30 > 30	0 -2 -4 -6 -8 -10
Z ₇	sulfatreduzierende Bakterien	Sulfid-Gehalt	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang B, Modul 6	mg/kg	< 5 5 bis 10 > 10	0 -3 -6
Z ₈	Sulfat-Gehalt	Sulfat-Gehalt	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang B, Modul 4	mmol/kg	< 2 2 bis 5 > 5 bis 10 > 10	0 -1 -2 -3
Z ₉	Neutralsalze	Chlorid- und Sulfat-Gehalt im wässrigen Auszug	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang B, Modul 3	mmol/kg	< 3 3 bis 10 10 bis 30 10 bis 100 > 100	0 -1 -2 -3 -4
örtliche Gegebenheiten						
Z ₁₀	Lage des Objektes zum Grundwasser	Grundwasser vorhanden	visuell	—	nie immer zeitweise	0 -1 -2
Z ₁₁	Bodenhomogenität horizontal anhand Bodenwiderstandsprofil	Schwankungen des Bodenwiderstandes	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang A	—	\Delta Z ₂ < 2 2 ≤ \Delta Z ₂ ≤ 3 \Delta Z ₂ > 3	0 -2 -4
Z ₁₂	Bodenhomogenität Vertikal	unterschiedliche Bodenwiderstände	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang A	—	\Delta Z ₂ < 2 2 ≤ \Delta Z ₂ ≤ 3 \Delta Z ₂ > 3	0 -1 -2
Z ₁₃	Bodenhomogenität — Bettung	artgleicher Boden oder Sand bodenfremde Bestandteile wie Holz, Wurzeln oder Böden mit Merkmalen nach DIN EN 12501-2:2003-08, Tabelle 1	visuell	—	homogen inhomogen	0 -6
Z ₁₄	Bodenhomogenität — unterschiedliche pH-Werte	anthropogene Beeinflussung z. B. Verunreinigung mit Abbruch, gekalkte Böden	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang B, Modul 2	—	\Delta Z ₁ < 1,5 \Delta Z ₁ ≥ 1,5	0 -6
Z ₁₅	Anwesenheit von Fremdkathoden	Objekt-/Boden-Potenzial U _{Ca/CuSO4}	Verfahren DVGW GW 9: 2011-09, Anhang A	V	< -0,5 -0,5 bis -0,4 -0,4 bis -0,3 > -0,3	0 -3 -8 -10

^a Nur bei homogener Bettung. Bei inhomogener Bettung (unterschiedliche pH-Werte) gilt Z₁₄.

Tabel 2.7 Informatie voor de beoordeling van corrosie in de grond [DIN50929-3]

2.2.4.1 Schatting van de corrosie waarschijnlijkheid in de bodem

Voor de schatting van de corrosie in de grond zonder grote objecten die voor een concentratie van de corrosie kunnen zorgen dient (2.8) [DIN 50929-3] te worden gebruikt.

$$B_0 = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_9 + Z_{10} \quad (2.8)$$

Voor de schatting van de corrosie in de grond met grote objecten die voor een concentratie van de corrosie kunnen zorgen dient (2.9) te worden gebruikt.

$$B_1 = B_0 + Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{14} \quad (2.9)$$

Vervolgens kan met de gevonden waarden voor B_0 en B_1 in **Error! Reference source not found.** de bodem, corrosiebelasting en de corrosiewaarschijnlijkheid worden geclassificeerd.

Tabelle 3 — Bodenklassen, Korrosionsbelastung und Korrosionswahrscheinlichkeiten bei freier Korrosion von unlegierten und niedriglegierten Eisenwerkstoffen

B_0 - bzw. B_1 -Werte	Bodenklasse	Korrosionsbelastung ^a	Korrosionswahrscheinlichkeit aufgrund der B_1 -Werte	
			aufgrund der B_0 -Werte	Mulden- und Lochkorrosion
≥ 0	Ia	sehr niedrig	sehr gering	sehr gering
-1 bis -4	Ib	niedrig	gering	sehr gering
-5 bis -10	II	mittel	mittel	gering
< -10	III	hoch	hoch	mittel

Die Größenordnung der zu erwartenden Korrosionsgeschwindigkeit ist in Tabelle 1 angegeben. Bei Röhren und Behältern hat die bleibende Dichtheit Priorität in der Beurteilung. Hier ist die Geschwindigkeit der Loch- und Muldenkorrosion von Bedeutung. Bei Bauteilen hat die bleibende Festigkeit Priorität in der Beurteilung. Hier ist die Geschwindigkeit der Flächenkorrosion von Bedeutung.

^a Die Korrosionsbelastung entspricht der Korrosionswahrscheinlichkeit für freie Korrosion ohne Mitwirken ausgedehnter Konzentrationselemente, siehe 6.1.2.

Tabel 2.8 Classificatie bodem, corrosiebelasting en corrosiewaarschijnlijkheid [DIN50929-3]

Daarnaast geeft de [DIN50929-3] aan dat met (2.10) anodische en met (2.11) kathodische invloeden dienen te worden meegenomen in situaties zonder aangebrachte kathodische bescherming.

$$B_A = Z_1 + Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (2.10)$$

$$B_K = Z_1 - Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 \quad (2.11)$$

Anodische corrosie voor een situatie met aangebrachte kathodische bescherming geeft de volgende vergelijking:

$$B_E = B_A + Z_{15} \quad (2.12)$$

2.2.4.2 Schatting van de corrosie waarschijnlijkheid in water

Voor de schatting van de corrosie onderwater kan de voor Tabel 2.6 benodigde waarde voor W_0 met gebruikmaking van de informatie uit Tabel 2.9 worden bepaald met:

$$W_0 = N_1 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + \frac{N_3}{N_4} \quad (2.13)$$

Voor de schatting van de corrosie lucht-watergrens kan de voor Tabel 2.6 benodigde waarde voor W_1 met gebruikmaking van de informatie uit Tabel 2.9 worden bepaald met:

$$W_1 = W_0 - N_1 + N_2 \cdot N_3 \quad (2.14)$$

Tabelle 7 — Angaben zur Beurteilung von Wässern

Nr.	Merkmal und Dimension	Einheit	Bewertungsziffer für	
			unlegierten Stahl	verzinkten Stahl
1	Wasserart		N_1	M_1
	fließende Gewässer		0	-2
	stehende Gewässer		-1	+1
	Küste von Binnenseen		-3	-3
	anaerob. Moor, Meeresküste		-5	-5
2	Lage des Objektes		N_2	M_2
	Unterwasserbereich		0	0
	Wasser/Luft-Bereich		1	-6
	Spritzwasserbereich		0,3	-2
3	$c(\text{Cl}^-) + 2c(\text{SO}_4^{2-})$	mol/m ³	N_3	M_3
	≤ 1		0	0
	> 1 bis 5		-2	0
	> 5 bis 25		-4	-1
	> 25 bis 100		-6	-2
	> 100 bis 300		-7	-3
4	Säurekapazität bis pH 4,3 (Alkalinität $K_{S4,3}$)	mol/m ³	N_4	M_4
	< 1		1	-1
	1 bis 2		2	+1
	> 2 bis 4		3	+1
	> 4 bis 6		4	0
5	$c(\text{Ca}^{2+})$	mol/m ³	N_5	M_5
	< 0,5		-1	0
	0,5 bis 2		0	+2
	> 2 bis 8		+1	+3
	> 8		+2	+4
6	pH-Wert		N_6	M_6
	< 5,5		-3	-6
	5,5 bis 6,5		-2	-4
	> 6,5 bis 7,0		-1	-1
	> 7,0 bis 7,5		0	+1
7	Objekt/Wasser-Potential U_H (zur Feststellung der Fremdkathoden)	V	N_7	
	> -0,2 bis -0,1		-2	
	> -0,1 bis 0,0		-5	
	> 0,0		-8	

Tabel 2.9 Informatie ten behoeve van beoordeling van corrosie in water [DIN50929-3]

Vervolgens kan voor de gevonden waarden van W_1 en W_0 met behulp van Tabel 2.9 de corrosiewaarschijnlijkheid voor de lucht-watergrens en onderwater worden geclassificeerd.

Tabelle 8 — Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit von unlegierten und niedriglegierten Stählen in Wässern

W_0 bzw. W_1 -Wert	Mulden- und Lochkorrosion	Flächenkorrosion
≥ 0	sehr gering	sehr gering
-1 bis -4	gering	sehr gering
< -4 bis -8	mittel	gering
< -8	hoch	mittel

Die Größenordnung der zu erwartenden Korrosionsgeschwindigkeit ist in Abschnitt 5 angegeben.

Tabel 2.10 Afschatting corrosiewaarschijnlijkheid staal onderwater en op de water-luchtgrens [DIN50929-3]

Vervolgens dient ter bepaling van de corrosiesnelheid per corrosie zone de zuurstofindex $O_{2-Sätt}$ van het water te worden bepaald met:

$$O_{2-Sätt} = \frac{\rho_{m1}}{\rho_{st1}} \quad (2.15)$$

Met een zuurstofgehalte ρ_{m1} en de zuurstofverzadigingswaarde ρ_{st1} bij de meettemperatuur t_1 .

Vervolgens kan op basis daarvan de waarde van de corrosiviteit, K worden bepaald met:

$$K = O_{2-Sätt} \cdot W_0 \quad (2.16)$$

Met de gevonden waarden kan voor de drie corrosiezones in Figuur 2.15 een grove schatting worden opgesteld van de gemiddelde corrosiesnelheid en de waarde van de corrosiesnelheid voor de gemiddeld maximale corrosie (putcorrosie) voor de niet grondbelegde zijde.

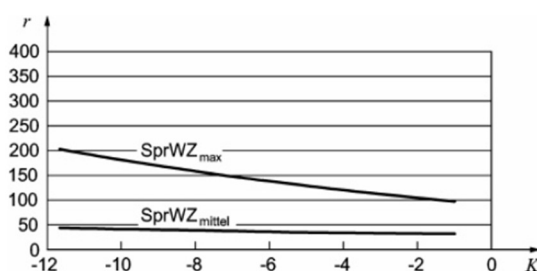


Bild 1 — Abrostungskurven für die Spritzwasserzone (SprWZ)

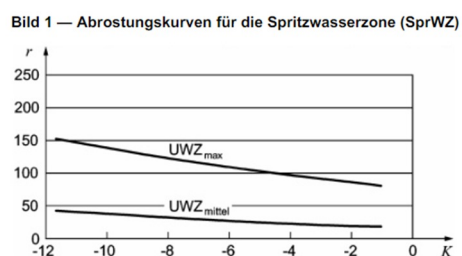


Bild 2 — Abrostungskurven für die Unterwasserzone (UWZ)

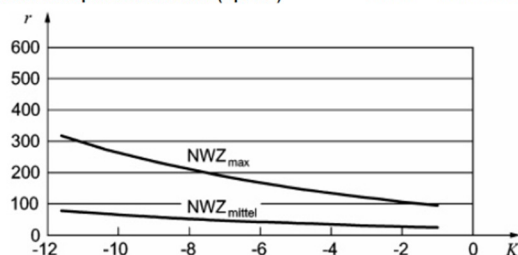


Bild 3 — Abrostungskurven für die Niedrigwasserzone (NWZ)

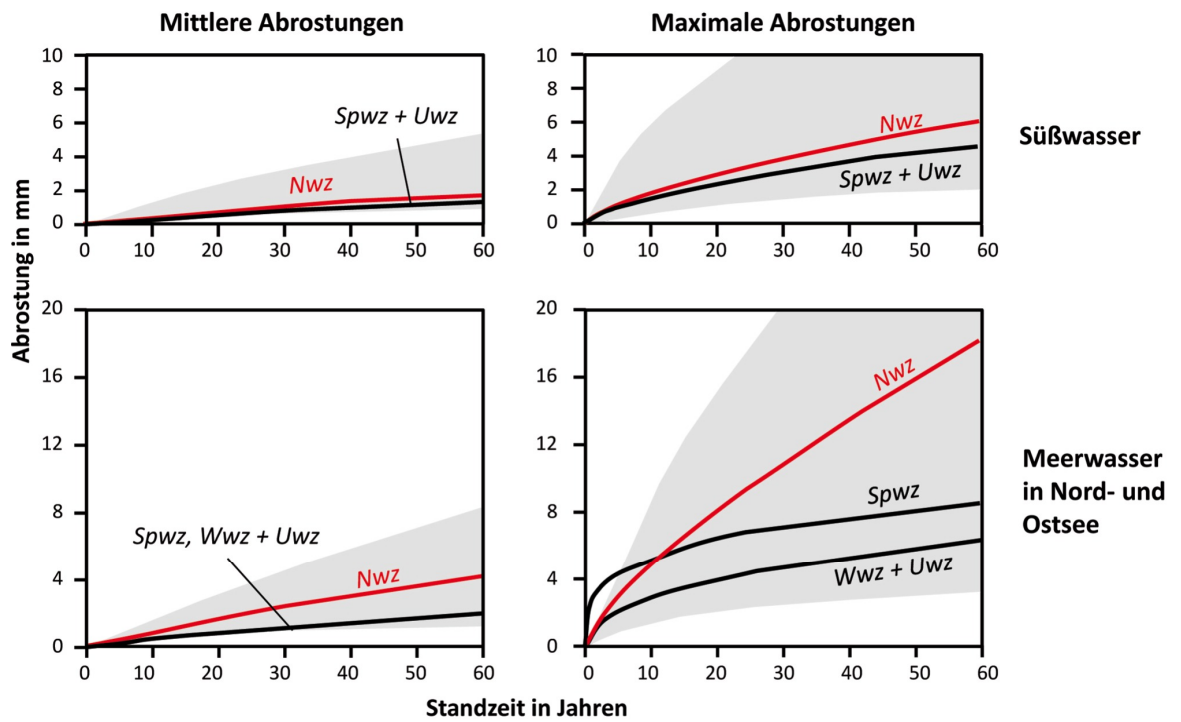
Legende

K Korrosivität r Korrosionsrate in $\mu\text{m/a}$

Figuur 2.15 Corrosiecurven voor damwanden **SprWZ** lucht-waterzone, **UWZ** onderwaterzone en **NWZ** de laagwaterzone [DIN50929-3]

2.2.5 Aanbevelingen EAU 2012 en onderliggende data

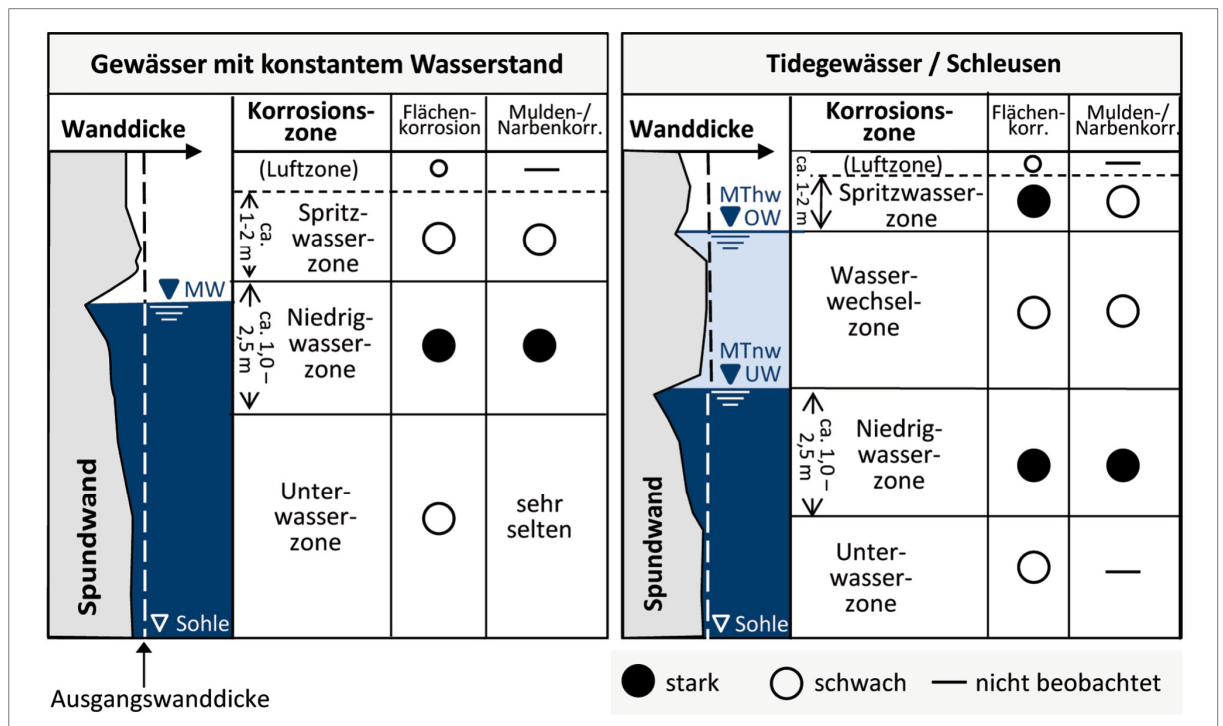
In de [EAU 2012] staan ten behoeve van het ontwerp van waterbouwkundige constructies de lijnen voor de gemiddelde waarde en de gemiddelde van de waargenomen maxima voor dikteverlies in zoet en zoutwater gegeven, zie Figuur 2.16. Deze gemiddelde waarden zijn gebaseerd op de door de Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) verzamelde diktemetingen. De bandbreedte van deze waarnemingen is met een grijze arcering weergegeven in Figuur 2.16. In de [EAU 2012] wordt voor de corrosie-zonering onderscheid gemaakt in een situatie met en zonder waterstandsvariatie, zie Figuur 2.17. De waarden betreffen (aanbevolen) verwachtingswaarden voor het ontwerp. Wel wordt in [EAU 2012] expliciet aangegeven dat er een grote onzekerheidsmarge om deze verwachtingswaarden ligt. De [EAU 2012] geeft aan dat in natuurlijke niet agressieve gronden voor tweezijdig grondbelegde damwand een dikte afname van 0,01mm/jaar kan worden gehanteerd. Voor de corrosie onder atmosferische condities gaat de [EAU 2012] van circa 0,01 mm/jaar uit.



Nwz: Niedrigwasserzone / Spwz: Spritzwasserzone / Wwz: Wasserwechselzone / Uwz: Unterwasserzone

▒ Schwankungsbreite der Messwerte

Figuur 2.16 Gemiddelde maximale waarde voor dikte verlies in zoet en zoutwater (naar EAU 2012) [BAW 2017b]



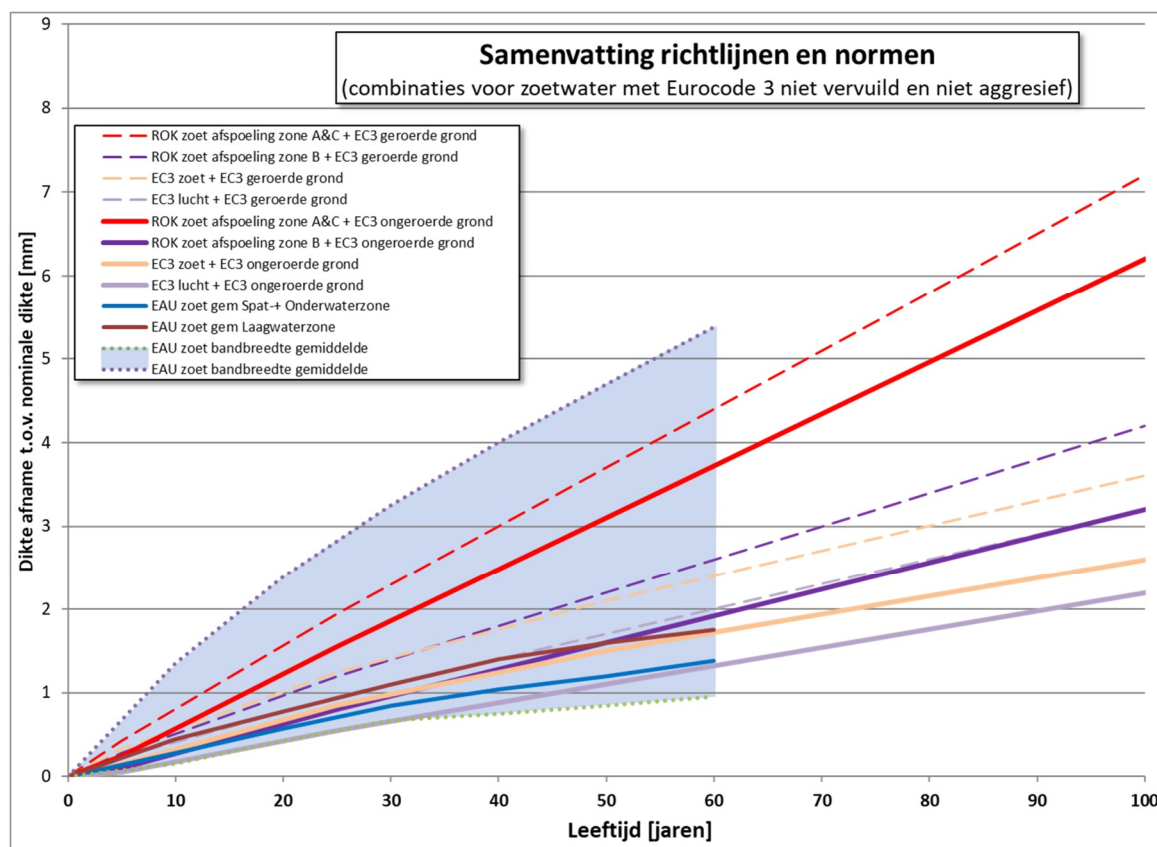
Figuur 2.17 Corrosiezones voor damwanden die de [EAU 2012] aanhoud gebaseerd op [BAW 1997]

2.2.6 Samenvatting richtlijnen en normen

In deze samenvatting staat het overzicht van de diverse normen en richtlijnen, en combinaties daarvan, grafisch weergegeven over een periode van 100 jaar. De combinaties betreffen de mogelijke combinaties van de waarden uit de ROK en de waarden uit de Eurocode 3 (EC3). Vanwege de veelheid aan mogelijke combinaties is een opsplitsing gemaakt in twee grafieken: een grafiek waarin voor de waarden uit de EC3 ten behoeve van schoon zoetwater en schone niet agressieve grond zijn toegepast en een grafiek voor de waarden uit de EC3 voor sterk vervuild zoetwater, vervuilde en agressieve grond. Als eerste wordt opgemerkt dat alleen de ROK een categorie kennen voor afspoeling waarvoor de corrosiesnelheid tot honderd jaar constant is.

2.2.6.1 Combinaties met schoonwater en schone niet agressieve grond

Omdat zowel de waarden voor "Ongeroerde, schone grond en permanent beneden de grondwaterspiegel" en de waarden voor "Geroerde grond, of verticale grondwaterbeweging, of boven de grondwaterspiegel" in Tabel 2.4 alsmede de waarden voor de twee categorieën in Tabel 2.5 getalsmatig overeenkomen met waarden voor respectievelijk "Undisturbed natural soils" en "Non-compacted and non-aggressive fills" van [NEN-EN1993-5] zijn deze niet separaat weergegeven in Figuur 2.18.



Figuur 2.18 Overzicht totale dikteafname van stalen damwanden in zoetwater op basis van combinaties van normen en richtlijnen uitgaande van Eurocode 3 waarden voor niet vervuilde en niet agressieve condities

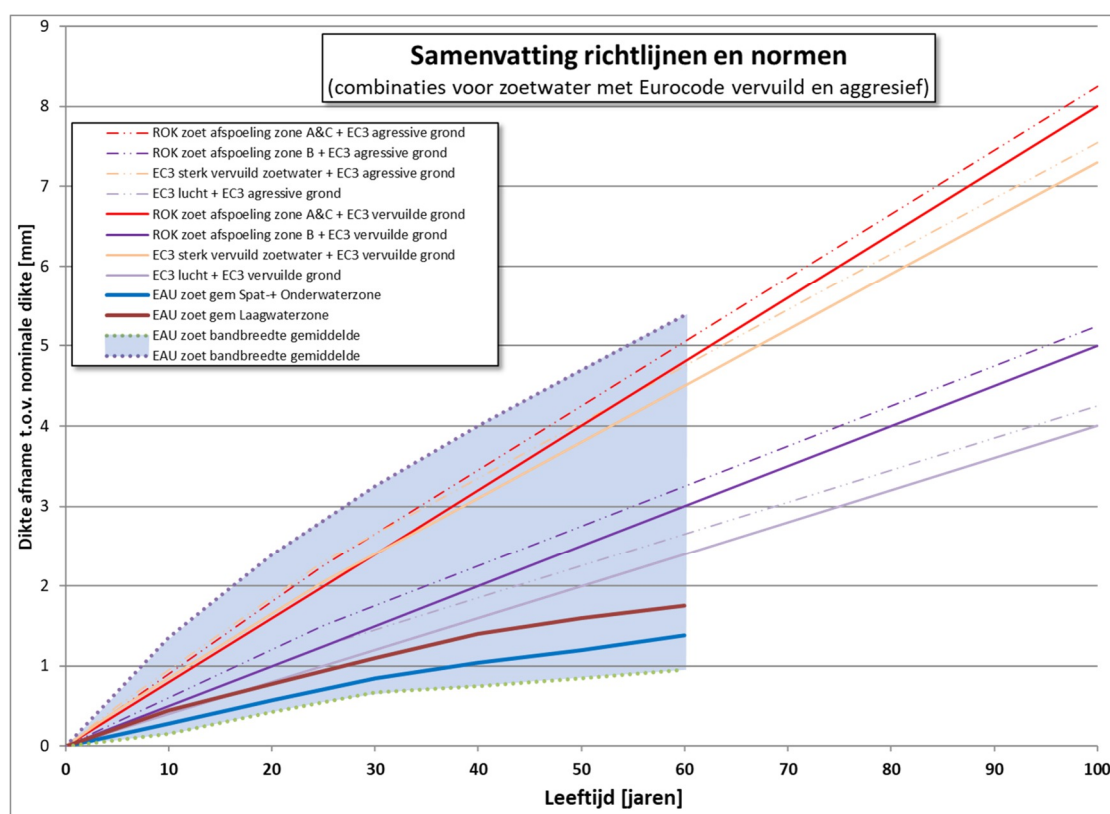
Wat het meest opvalt aan Figuur 2.18, is dat er voor deze zoetwatercondities een zeer grote bandbreedte bestaat aan mogelijke corrosiesnelheden in de normen en richtlijnen en dat deze 'lijnen' allemaal binnen de bandbreedte van de gemeten gemiddelden liggen tot een blootstellingsduur van 60 jaar zoals bepaald door de EAU. Wat verder opvalt in Figuur 2.18 is dat de bovengrens van de gearceerde bandbreedte van de gemeten gemiddelden uit de EAU

ongeveer een soortgelijk verloop kent als de combinatie van ROK zoetwater met afspoeling in zone A&C + geroerde grond, maar dat deze circa 30% hoger ligt. Wat verder opvalt is dat de waarden van de twee combinaties ROK voor zoetwater met afspoeling in zone A&C significant hoger liggen dan alle andere waarden. Wat verder opvalt is dat het verloop in de tijd van de aanbevolen gemiddelde waarden uit de EAU de relatief sterkste afname van de corrosiesnelheid laten zien.

2.2.6.2 Combinaties met EC3 waarden voor sterk vervuild zoetwater, vervuilde en agressieve grond
In Figuur 2.19 staat het overzicht van de diverse normen en richtlijnen in één grafiek weergegeven over een periode van 100 jaar waarin voor de waarden uit EC3 ten behoeve van sterk vervuild zoetwater en voor vervuilde en agressieve grond.

Wat het meest opvalt aan Figuur 2.19 dat de combinaties van ROK zoetwater met afspoeling in zone A&C en die met EC3 voor sterk vervuild zoetwater dichtbij elkaar liggen en tot 25 jaar nagenoeg samenvallen. Verder is te zien dat alle combinaties binnen de bandbreedte van de gemeten gemiddelden liggen tot een blootstellingsduur van 60 jaar leeftijd zoals bepaald door de EAU.

Wat verder opvalt in Figuur 2.19 is dat de bovengrens van de gearceerde bandbreedte van de gemeten gemiddelden uit de EAU ongeveer een soortgelijk verloop kent als de combinatie van EC3 sterk vervuild zoetwater en agressieve grond, maar dat deze circa 15% hoger ligt. Wat verder opvalt dat de waarden voor combinatie van ROK voor zoetwater met afspoeling in zone A&C + agressieve grond, het hoogste zijn en op T = 60 jaar steiler verloopt dan de bovengrens van de waargenomen gemiddelden uit de EAU.



Figuur 2.19 Overzicht totale dikteafname van stalen damwanden in zoetwater op basis van combinaties van normen en richtlijnen uitgaande van Eurocode 3 waarden voor vervuilde en agressieve condities

Verder is in Figuur 2.19 te zien dat de combinaties met ROK voor zoetwater met afspoeling in zone B circa 20% boven die met EC3 voor sterk vervuult zoetwater liggen.

2.3 Invloed van walsafwijkingen op de uit diktemetingen afgeleide corrosiesnelheid

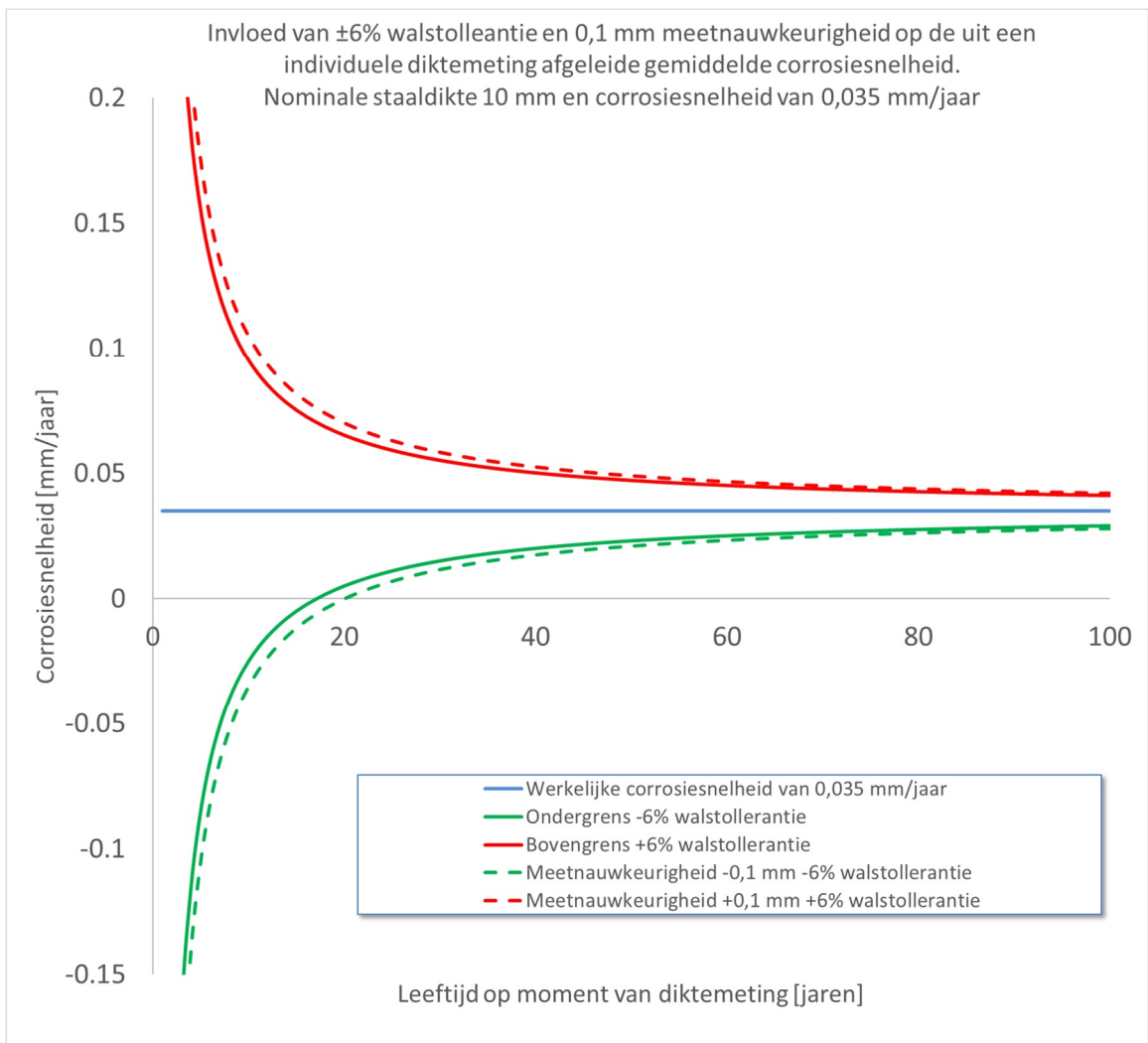
De dikte van op dit moment geproduceerde damwanden moet binnen een door de norm [NEN-EN 10248-2] gegeven walstolerantie van 6% liggen. Dit betekent dat de begindikte van damwanden ten opzichte van de opgegeven (nominale) dikte een maximale afwijking van $\pm 6\%$ kan hebben.

Walsafwijkingen hebben geen invloed op de diktemeting op een zeker tijdstip. Walsafwijkingen zijn wel van invloed op van deze diktemetingen afgeleide corrosiesnelheid wanneer deze worden bepaald over de periode vanaf installatie wanneer de actuele dikte niet is opgemeten ten tijde van installatie zoals in bijzondere situaties bij testplanken wordt gedaan.

Voor het afleiden van de gemiddelde snelheid in dikteafname over de periode sinds installatie is het gebruikelijk uit te gaan van de nominale waarde (uit de tabellenboekjes). In dat geval is de walsafwijking wel van invloed.

De onnauwkeurigheid die een eventuele walsafwijking veroorzaakt op de gemiddelde corrosiesnelheid (sinds de damwandinstallatie) die uit diktemetingen kan worden afgeleid, neemt af met de blootstellingsduur. De invloed is het grootst wanneer relatief kort na installatie wordt gemeten op relatief dunwandige damwandprofielen in een weinig corrosieve omgeving. Uitgaande van een walstolerantie van $\pm 6\%$ en een meetnauwkeurigheid van $\pm 0,1$ mm zijn in Figuur 2.20 de extremen van de invloed op de gemiddelde corrosiesnelheid vanaf installatie tot het uitvoeren van de diktemeting weergegeven voor een nominale dikte van 10 mm en een werkelijke corrosiesnelheid van 0,035 mm/jaar (de blauwe lijn in Figuur 2.20). De uitkomsten komen overeen met die van [Wall 2013]. Voor een dunnere nominale dikte is de invloed proportioneel met de dikte minder groot omdat de walstolerantie daarvan een percentage is.

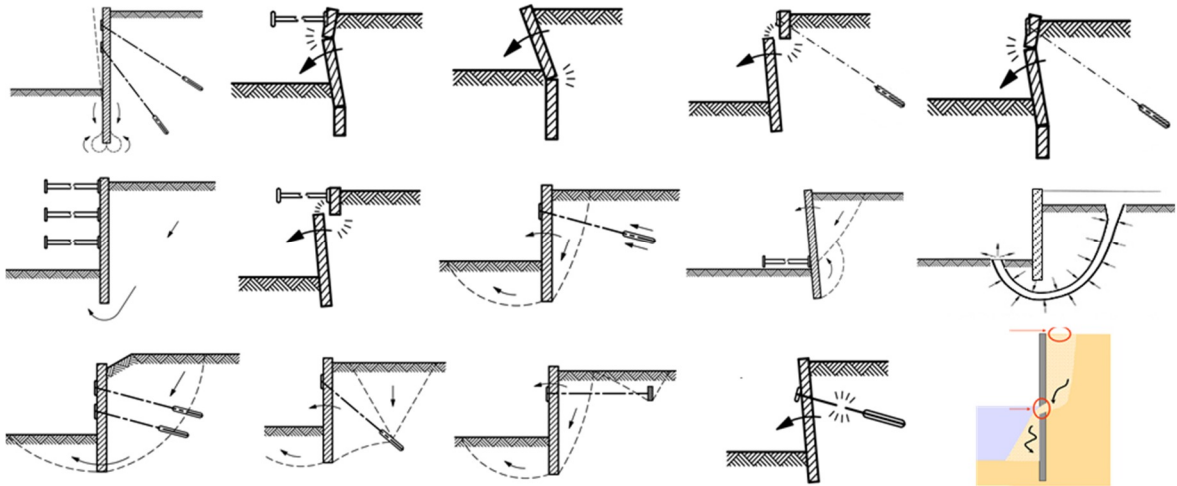
De gepresenteerde waarden in Figuur 2.20 betreffen extremen voor het geval dat wordt gekeken naar één enkele meting op een damwandplank. Het gemiddelde bij grotere aantallen metingen en metingen op meerdere planken zal leiden tot een veel beperktere invloed want er zijn geen indicaties gevonden dat in het verleden damwandprofielen systematisch dikker of dunner werden gewalst. Dus hoe omvangrijker de steekproef en hoe ouder de damwand, hoe dichter de werkelijke gemiddelde corrosiesnelheid kan worden benaderd.



Figuur 2.20: Invloed van walstolerantie ($\pm 6\%$) en meettolerantie ($\pm 0,1$ mm) op maximale en minimale corrosiesnelheid berekend uit een enkele meting. De blauwe lijn geeft de veronderstelde werkelijke corrosiesnelheid, de andere lijnen geven de extremen van onder- of overschatting.

2.4 De invloed van corrosie op faalmechanismen van damwandconstructies

Meerdere mechanismen bestaan waarop damwandconstructies kunnen falen. Figuur 2.21 geeft hier een illustratie van.



Figuur 2.21 Faalmechanismen van een damwandconstructie

Bij een analyse van deze mechanismen komt naar voren dat aan damwandcorrosie gerelateerd falen optreedt wanneer:

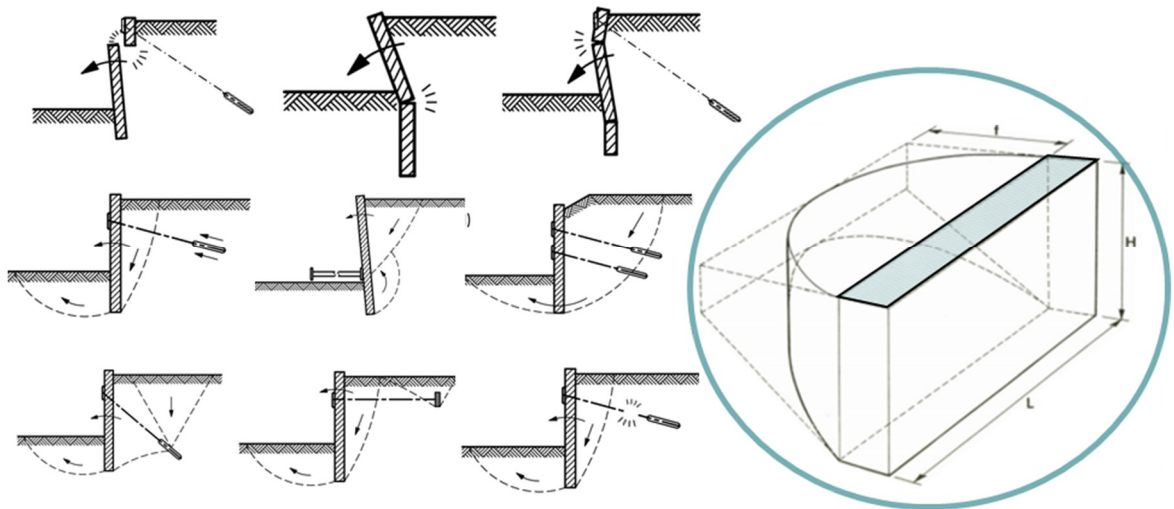
- 1 In een horizontaal vlak/diepte de sterkte en/of rotatiecapaciteit van de damwand over enige breedte wordt overschreden die niet door de herverdelingscapaciteit van de grond en/of constructieve ondersteuning zoals de verankering of stempeling kan worden overbrugd, zie Figuur 2.22.
- 2 De wand als gevolg van een gat niet meer grond dicht is en uitspoeling van de grond kan optreden, zie Figuur 2.23.

Sterkte in het horizontale vlak, mechanismelengte

Het gemiddelde gedegradeerde weerstandsmoment in een horizontaal vlak over een mechanismelengte is voor alle door damwandcorrosie beïnvloedde faalmechanismen, behoudens uitspoeling, de maatgevende parameter, zie Figuur 2.22.

Als mechanismelengte dient enerzijds qua orde van grootte aan de kerende hoogte te worden gedacht = breedte van de mootgrond die bij falen afschuift, zie rechts in Figuur 2.22; dus bij een kerende hoogte van 3 m is dat circa 3 m. Anderzijds is bij een verankerde damwand ook de hart op hart afstand van de verankering van invloed op de mechanismelengte waarover kan worden herverdeeld; dus zonder herverdeling tussen verschillende ankers zou bij een hart op hart afstand van 3 m tussen de ankers ook aan een mechanismelengte van 3 m dient te worden gedacht. In werkelijk is het een en ander veel complexer en zal er ook via de gording nog herverdelingscapaciteit zijn over meerdere ankers en zal de afschuivende grondmoot breder zijn dan de kerende hoogte. In generieke zin kan worden gesteld dat in de praktijk de mechanismelengte betrekking heeft op meerdere aansluitende damwandplanken.

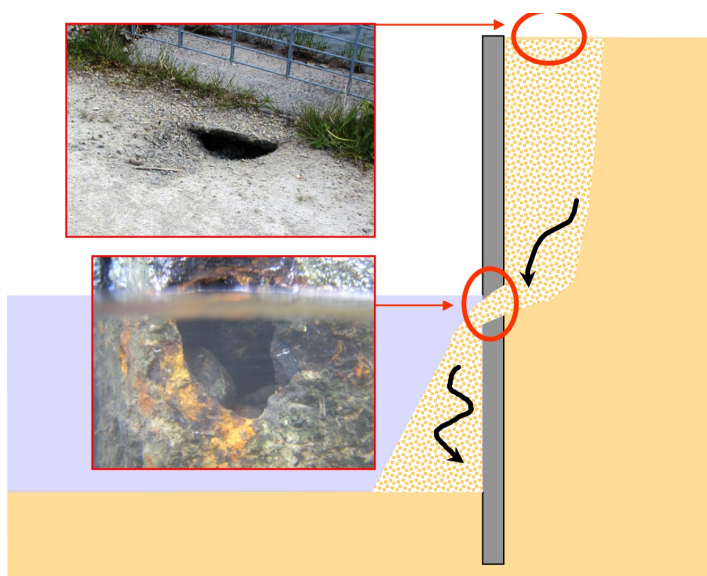
Geconcludeerd wordt dat niet de spreiding in lokale dikteafname ter plaatse van individuele metingen, maar de spreiding van het gemiddelde in een horizontaal vlak over meerdere aansluitende damwandplanken, de maatgevende parameter is bij beschouwing van faalmechanismen waar herverdelingscapaciteit een rol speelt.



Figuur 2.22 **Links:** Faalmechanismen van een damwand waar herverdelingscapaciteit een rol speelt. **Rechts:** schematische weergave van 3D faalmechanisme waarbij de gemiddelde damwandsterkte in een horizontaalvlak over een mechanismelengte L van belang is

Grondichtheid

Voor het faalmechanisme uitspoeling wordt in de praktijk in zand 0,05 m mechanismelengte (afmeting van het gat in de damwand) in zandgrond en 0,1 m in cohesieve grond aangehouden [SBRCURnet 2017]. Het gevolg kan een beperkte verzakking direct achter wand zijn (zie Figuur 2.23) maar kan ook orden groter zijn (zie Figuur 2.24). Voor dit mechanisme is de maximale waarde van de corrosie relevant (gat/doorgeroest). De grootte van de gevolgen/schade is afhankelijk van de hoeveelheid grond die is weggespoeld.



Figuur 2.23 Uitspoeling [BAW 2017b]



Figuur 2.24 Rotterdamse haven, gevolg van uitspoeling t.g.v. uit het slot gelopen damwand [van Weele]

2.5 Resume van de literatuurstudie

Uit de literatuur blijkt al snel dat het elektrochemisch proces van corrosie, van bijzonder veel chemische, fysische maar ook biologische factoren (en hun onderlinge wisselwerking) afhangt. De wetenschappelijke onderzoeken zijn vooral laboratoriumonderzoeken geweest waar de invloed van één en soms enkele parameter(s) geïsoleerd is bekeken. Niet alleen in de literatuur wordt deze theoretische weg ingeslagen maar ook in DIN50929-3 is dat gedaan met een model dat gebaseerd is op 24 parameters met als resultaat een grove schatting van de gemiddelde corrosie die volgens DIN50929-3 best een factor 2 hoger of lager kan liggen.

Geconcludeerd wordt dat de theoretische weg niet effectief is in deze fase van het KpNK onderzoek. Vanuit een praktisch (geotechnisch en constructief) oogpunt is de hoofdvraag met welke snelheid corrosie optreedt en met welke onzekerheid rekening dient te worden gehouden bij het ontwerpen of beoordelen van een damwand constructie. Geconcludeerd wordt dat, om binnen afzienbare tijd tot concrete aanbevelingen te komen, als eerste inzage dient te worden verkregen naar het gecombineerde effect van al deze processen op de staaldikte in Nederland: wat is de bandbreedte, verloop in de tijd en wat lijkt de grootste invloedfactor? Hiervoor is minimaal een groot aantal metingen op damwanden van verschillende leeftijden en op verschillende locaties nodig.

In de literatuur, in richtlijnen en normen worden gewerkt met corrosiezones waar tussen de mate van corrosie verschilt. Het beschreven aantal zones, maar ook de grootte van de corrosie alsmede het verloop in de tijd verschillen sterk. Uit de literatuur blijkt dat:

- 1) De grootte van de gemiddelde corrosie van een zone kan verschillen tussen locaties.
- 2) Op een locatie varieert de corrosie.
- 3) Onderwater kunnen systematische verschillen tussen de lijf- voor- en achterflens optreden.
- 4) Behalve in afspoelcondities neemt de corrosiesnelheid af in de tijd.

Uit het onderzoek naar het effect van corrosie op de betrouwbaarheid van een damwandconstructie volgt dat de grootte van de lokale corrosie (vastgesteld op één punt) alleen van belang is voor de grondichtheid. Voor alle andere, voor damwandconstructies relevante, faalmechanismen is de grootte van de horizontale gemiddelde corrosie over de mechanismebreedte, van meerdere planken, relevant.

Samengevat is de grootte van de horizontale gemiddelde corrosie de belangrijkste parameter. De meest effectieve stap in deze fase van KpNK onderzoek is dan ook het verzamelen van recente diktemetingen en vervolgens deze metingen te analyseren. In hoofdstuk 3 wordt in opmaat daartoe een overzicht gegeven van de verzamelde informatie op het gebied van methoden voor de meting van de staaldikte en meetprotocollen. Voor het beoordelen van de bruikbaarheid van meetdata en het analyseren van de meetdata is inzicht in de wijze van meten van groot belang.

3 Corrosie, meetmethode -en protocol

In dit hoofdstuk wordt besproken op welke wijze corrosie kan worden gemeten. De meest gebruikte meetmethode (ultrasoon) wordt eerst behandeld.

Om tot een eenduidige wijze van corrosie metingen te komen wordt de wijze van meten vastgelegd in protocollen. Er zijn diverse meetprotocollen, de meest relevante worden in dit hoofdstuk behandeld.

3.1 Corrosie meetmethode

3.1.1 Opzet ultrasone diktemeting

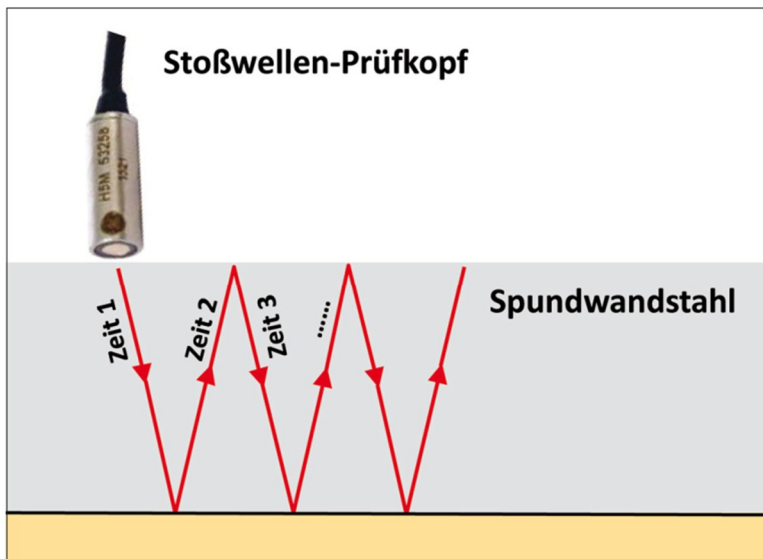
De Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Duitsland doet al vele tientallen jaren uitgebreid onderzoek naar corrosie van damwanden. In de tachtiger jaren van de vorige eeuw was geen geschikt meetinstrument voorhanden om bij de specifieke condities bij damwanden altijd betrouwbaar diktemetingen uit te voeren met een benodigde nauwkeurigheid van minder dan 0,1 mm. De BAW heeft daarom zelf een meetinstrument ontwikkeld, gebaseerd op ultrasone diktemeting, zie Figuur 3.1 waarbij in de meetkop zowel de zender van als de ontvanger van het ultrasone signaal zit..

Bij de metingen zijn de volgende aandachtspunten van belang:

- Voor de toegepaste ultrasone meetmethode met een enkele puls, zie Figuur 3.1, is het nodig dat op het blanke staal wordt gemeten, dus de damwand dient tot het staal te worden gereinigd.
- Voor het benodigde aantal metingen dient een gehele strook volledig blank te worden gemaakt, zie Figuur 3.2.

Het ultrasone meetinstrument moet iedere keer op dezelfde afstand ten opzichte van het gecorrodeerde oppervlak worden gepositioneerd. Dit wordt gerealiseerd door een magneetbevestiging, zie Figuur 3.2 en Figuur 3.3.


Een goed contact tussen het meetinstrument en het staal dient aanwezig te zijn. De ultrasone signalen kunnen dan ongestoord het staal bereiken om voor een nauwkeurige meting te zorgen. Voor de metingen boven water is daarom een watertoevoer aanwezig, zie Figuur 3.2 en Figuur 3.3.



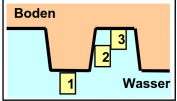
Figuur 3.1 Voorbeeld van een ultrasonische sensor met een enkelvoudig kristal [BAW 2017a]

- **sorgfältige Planung und Vorbereitung:**
 Stationen entlang der Wand
 Messquerschnitte über die Wandhöhe
 Reinigen und Messen mit Taucherhilfe


gereinigter
Messquerschnitt

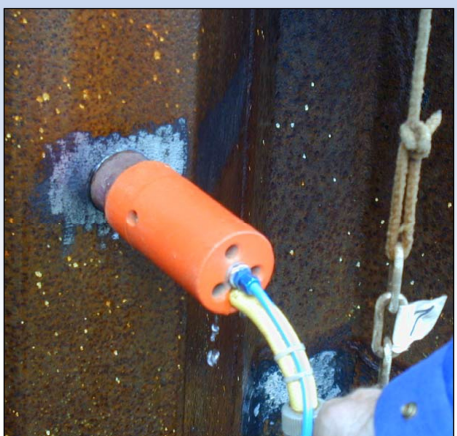



je **Messquerschnitt**
ca. 4 - 6 Einzelmessungen
an Berg, Flanke und Tal

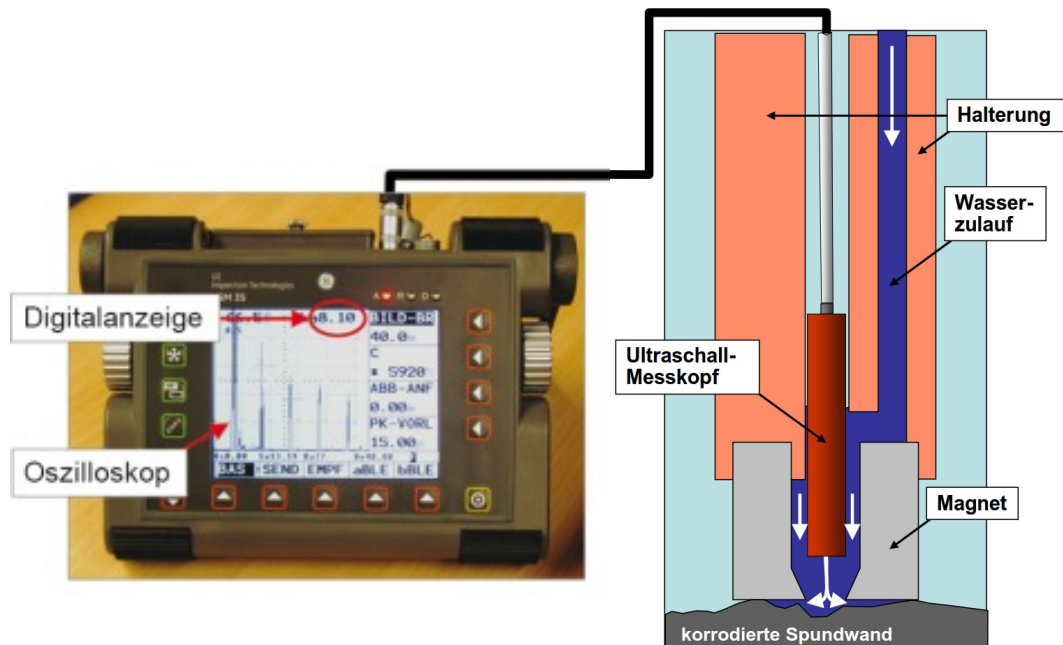


Boden
Wasser



Figuur 3.2 **Boven:** tot op blank staal gereinigte damwanden. **Onder:** magnetisch bevestigde ultrasonische meetapparatuur van BAW met enkelvoudig kristal en watervoorziening [BAW 2005]



Figuur 3.3 Ultrasonische Meetinstrument van BAW met enkelvoudig kristal [BAW 2010]

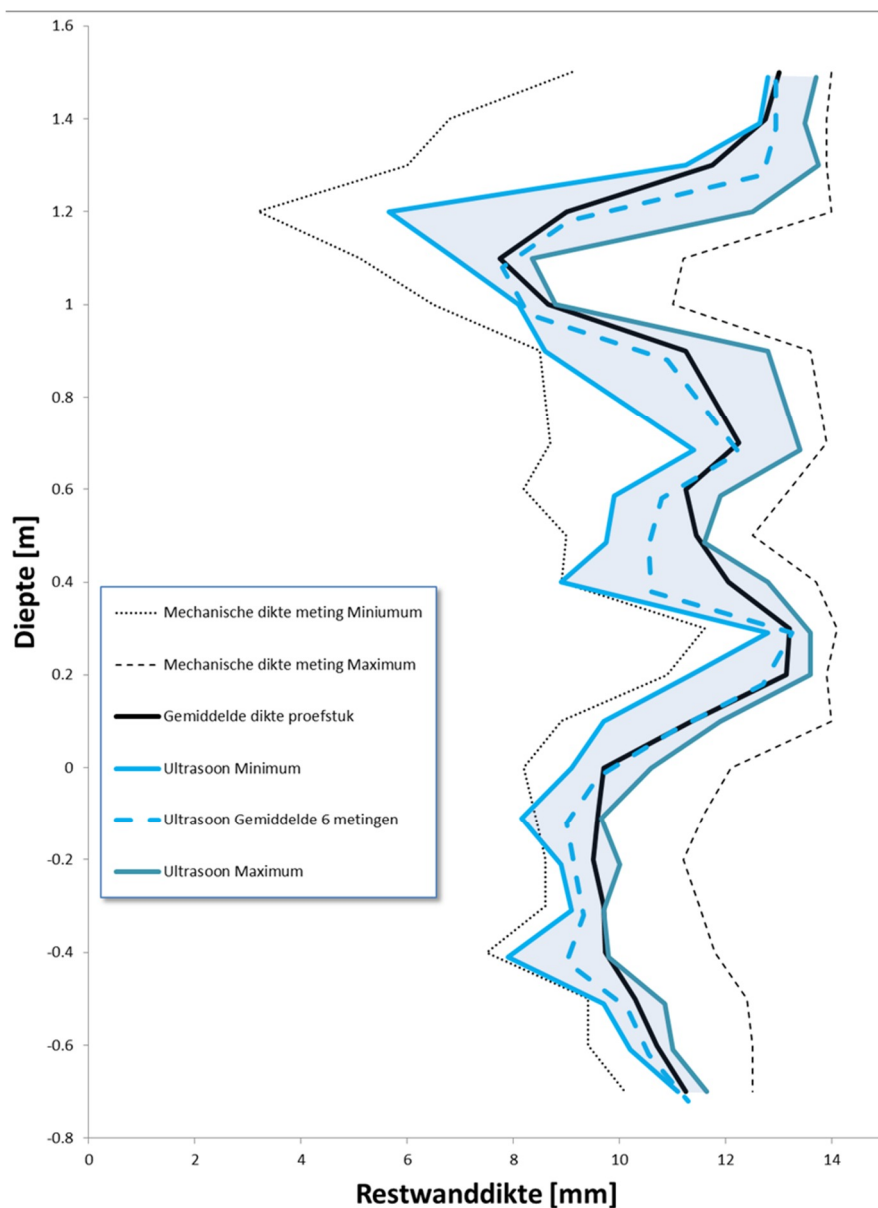
3.1.2 Betrouwbaarheid ultrasonische technieken

In [BAW 1997] zijn de resultaten van onderzoek naar de betrouwbaarheid van ultrasonische meettechnieken gepubliceerd. De ultrasonische meting geeft een waarde die 0,08 mm lager is dan de werkelijke dikte van de proefstukken.

Vervolgens is onderzocht in hoeverre onder werkelijke condities de ultrasonische meting een betrouwbare meting gaf van de actuele dikte van een gecorrodeerde damwand. Uit een 28 jaar oude damwand zijn proefstukken gezaagd en per proefstuk zijn onder water zes ultrasonische metingen uitgevoerd. In Figuur 3.4 zijn in blauw het gemiddelde alsmede de minimale en de maximale met ultrasonische metingen bepaalde dikten van ieder proefstuk uitgezet. Daarnaast is van ieder proefstuk in een raster van 100 meetpunten met een mechanische diktemeter de dikte bepaald waarvan de minimale en maximale en gemiddelde waarden per proefstuk met zwarte lijnen in Figuur 3.4. zijn weergegeven.

In [BAW 1997] wordt geconcludeerd dat het gemiddelde van de (steekproef met) ultrasonische metingen in de regel ruim minder dan 0,5 mm afweek van het "werkelijke" met de mechanische diktemeter bepaalde gemiddelde van de proefstukken. In [BAW 1997] wordt tevens geconcludeerd dat de methode voor het vinden van de minimale restdikte op locaties met meest intensieve corrosie ongeschikt was. Dit komt zowel door:

- De vorm van de corrosieput waardoor onderin de put significant minder goed/sterke reflecties worden gemeten dan ter plaatse van de vlakke gedeelten rondom een corrosieput.
- Ten opzichte van het totale aantal metingen zijn er relatief een klein aantal metingen in een corrosieput. In feite zijn het twee populaties: de gebieden rondom de corrosieputten en de gebieden in de corrosieputten. Een bijkomend nadeel van de statistiek is dat er voor het verkrijgen van eenzelfde betrouwbaarheidsniveau de benodigde steekproefgrootte voor de bepaling van het gemiddelde fors kleiner is dan die voor de bepaling van de extreme waarden.



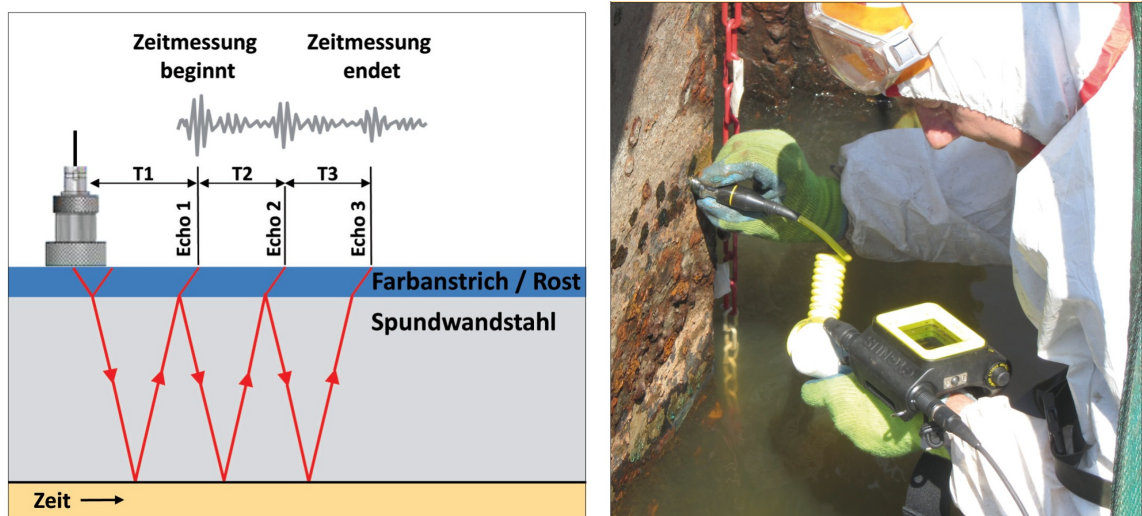
Figuur 3.4 Vergelijking restdiktemetingen met verschillende meetmethode naar [BAW 1997]

3.1.3 Alternatieve meetmethoden

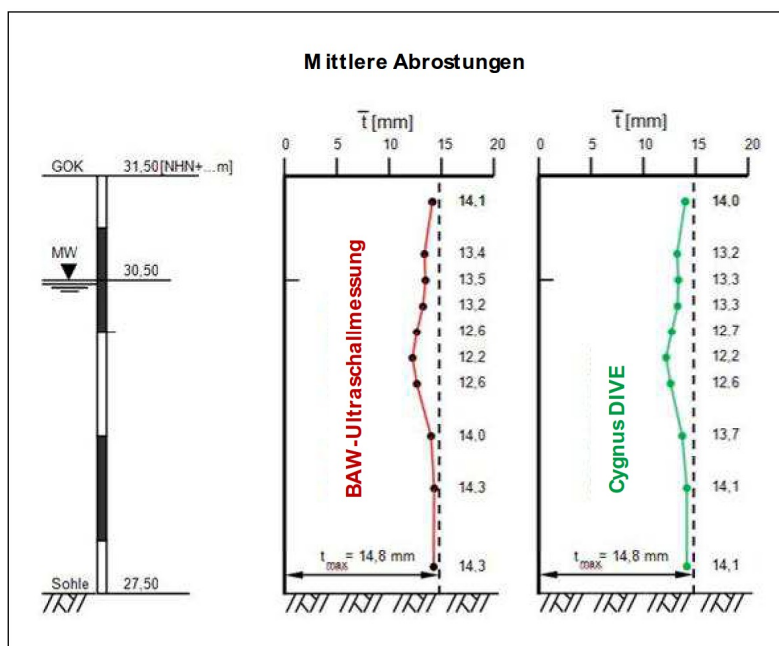
In de periode van 2001 tot en met 2015 heeft de BAW-onderzoek gedaan naar corrosie. Voor dit onderzoek was het nodig de ultrasone meetmethode verder te optimaliseren en om alternatieve meetmethoden te testen. BAW [BAW 2017a] heeft vervolgens in samenwerking met de respectievelijke fabrikanten en distributeurs van meetinstrumenten alternatieve methoden voor damwanddiktemeting onderzocht en geëvalueerd. Ze heeft dat gedaan door een vergelijkend onderzoek uit te voeren in het laboratorium en in damwandconstructies in het veld. Centraal bij het onderzoek heeft de praktische geschiktheid en de meetnauwkeurigheid gestaan.

Het onderzoek heeft aangetoond dat de procedure "Incotest", waarbij stalen wanddikten bepaald worden door pulserende wervelstroom ongeschikt is voor de toepassing bij een damwand. Verder volgde uit dit onderzoek dat de multi-echo ultrasone meetmethode (met een groep van drie echo's) de beste resultaten gaf. Deze methode zorgde voor nauwkeurige,

reproduceerbare metingen, zowel ten aanzien van de gemiddelde dikteafname door corrosie als voor de maximale dikteafname. Een groot voordeel van deze meetmethode is dat het oppervlak niet tot op het blanke staal hoeft te worden gereinigd. Een bijkomend voordeel is dat de beschermende laag, bestaande uit corrosie residu, niet wordt verwijderd en dus niet zal leiden tot een versterkte corrosie ter plaatse van de schoongemaakte delen. De corrosie op het blanke staal dat is schoongemaakt, is zelfs hoger dan bij een normaal stuk blank staal omdat deze schoongemaakte locaties vanwege het potentiaalverschil gaan werken als anodes voor de rest van de constructie. Dat betekent dat latere inspecties op dergelijke schoongemaakte locaties niet representatief meer zijn en dienen te worden vermeden.



Figuur 3.5 Meervoudige echo ultrasone techniek met twee kristallen [BAW 2017a]



Figuur 3.6 Resultaat van vergelijkingsmeting wanddiktemeting 2014 te Tangermünde, Liegestelle Elbe [BAW 2014]

3.2 Meetprotocollen

3.2.1 Inleiding

Verschillende meetprotocollen zijn in het verleden opgesteld. In deze paragraaf komen achtereenvolgens de volgende protocollen aan bod:

- Rijkswaterstaat (1989).
- Handboek Inspectie Staal (2017).
- BAW (2017).
- Havenbedrijf Rotterdam (2017).
- ArcelorMittal (2018).

3.2.2 Rijkswaterstaat (1989)

In 1989 is door Rijkswaterstaat een procedure voor het beoordelen van de restlevensduur van damwandconstructies opgesteld [RWS 1989]. In deze procedure wordt een stapsgewijze aanpak beschreven. De stapsgewijze aanpak is verder onderverdeeld in 25 kleinere stappen. De vijf hoofdstappen zijn:

1. De diktemeting.
2. het verwerken van de meting tot rekenwaarden.
3. het doorrekenen.
4. het beoordelen.
5. het bepalen van de onderhoudsstrategie.

De meetprocedure van Rijkswaterstaat is logisch opgebouwd en in detail beschreven. Per sectie wordt aanbevolen om in minimaal vijf raaien te meten. In de twee zones waar de meeste corrosie wordt gemeten, wordt een afstand van maximaal 0,25 m in de verticale richting tussen de meetniveaus van de meetpunten aangehouden en in de andere zones 0,5 m. Per meetniveau wordt aangegeven dat er minimaal ter plaatse van de flensen dient te worden gemeten en indien dwarskracht maatgevend is ook ter plaatse van de lijven. Ter hoogte van de maximale corrosie wordt op tien planken, gelijkmatig verdeeld over de sectie, de dikte gemeten van bijvoorbeeld de voorflens om een indruk te krijgen van de spreiding en een eventueel verloop. Deze meetprocedure uit 1989 mag geen meetprotocol heten want voor damwandmetingen laat RWS de aanpak volledig over aan de markt.

3.2.3 Handboek Inspectie Staal (2017)

In 2017 is het "Handboek Inspectie Staal" [SBRCURnet 2017] conform CUR-aanbeveling 117 [CUR 2015] verschenen. Hierin wordt gedetailleerd voor verschillende typen stalen kunstwerken mogelijk voorkomende corrosievormen en meetmethoden beschreven. In de [SBRCURnet 2017] wordt aangegeven:

"Om een goed oordeel te kunnen vormen van de optredende corrosie van stalen damwanden, en daarmee de staat van de constructie, moeten voldoende metingen uitgevoerd worden om deze statistisch te kunnen bewerken. Hiertoe wordt de kadeconstructie opgesplitst in een aantal vooraf bepaalde meetraaien (verspreid over de lengte van de kade) en standaardmeetniveaus (over de hoogte van de kade). De meetraaien worden zo gekozen deze zich naast een, voor de inspecteur herkenbaar, object bevinden (zoals bolders, meerpalen, trappen of haalkommen).

Door deze werkwijze ontstaat een raster/matrix over de voorzijde van de damwand. De snijpunten van de verticale raailijnen en de horizontale niveaulijnen vormen de meetpunten waarop de metingen worden uitgevoerd.

Voor iedere kadeconfiguratie zal vooraf een inschatting gemaakt moeten worden van het aantal te kiezen raaien en meetniveaus. In de praktijk blijkt het mogelijk om representatieve uitkomsten te verkrijgen bij raaiafstanden van circa 25 meter (vaklengte tussen twee meetraaien) en verticale afstanden in de diepte van 2,0 à 2,5 meter.”

In Figuur 3.7 wordt een voorbeeldtabel gegeven [SBRCURnet 2017] voor de rapportage van de meetwaarden verkregen met de ultrasone metingen.

Raai	Zone	Meetpunt	Meting 1	Meting 2	Meting 3	Meting 4	Meting 5	Meting 6	Meting 7	Meting 8	Meting 9	Mediaan	Min	Max	Oorspronk dikte	Afname	Afname	
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	
Raai 1	Bodem	Buik																
		Lijf																
		Kas																
	LW -1m	Buik																
		Lijf																
		Kas																
	Getijzone	Buik																
		Lijf																
		Kas																
	Spatzone	Buik																
		Lijf																
		Kas																
	Droge zone	Buik																
		Lijf																
		Kas																

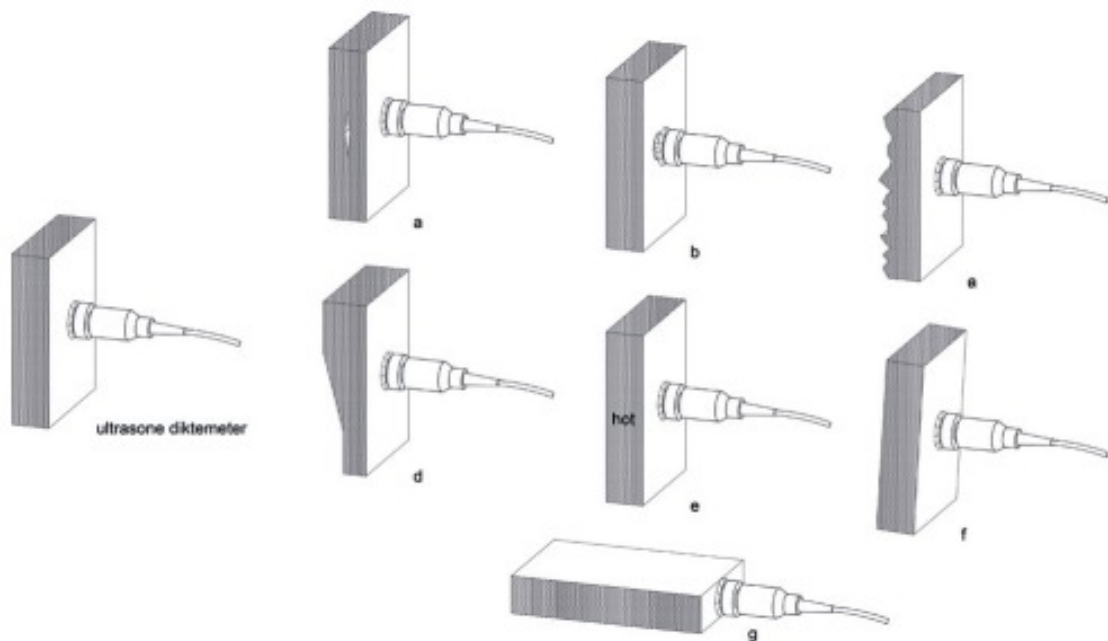
Figuur 3.7 Voorbeeldtabel rapportage meetwaarden [CURSBRnet 2017]

Ten aanzien van de Ultrasone meettechniek stelt [SBRCURnet 2017] verder de volgende vijf aandachtspunten:

- A. “Zorg voor een afdoende gereinigd oppervlak van het te meten object”.
- B. Bij metingen onder droge omstandigheden is het van belang dat een film (ca. 1 mm) geleidingsmiddel (koppelmiddel/gel) tussen de taster en het te meten object aanwezig is.
- C. Het kan voorkomen dat een ander profiel/andere wanddikte toegepast is dan gespecificeerd in de oorspronkelijke berekeningen of tekeningen. Een eerste (visuele) analyse van de meetresultaten moet dit bevestigen. Als uit de meetresultaten blijkt dat er gemeten wanddiktes zijn die dikker zijn dan oorspronkelijk gespecificeerd, dan kan de maximale gemeten wanddikte worden aangehouden als nuldikte. Om een beeld te krijgen van de oorspronkelijke dikte van de in te meten damwandplank is het raadzaam een aantal referentiemetingen uit te voeren op een locatie waar het aannemelijk is dat de damwand minimaal is afgenomen. Probeer altijd op basis van kenmerkende profielmaten en geometrie het oorspronkelijke profiel met bijbehorende dikte vast te stellen.
- D. Bij een ruw oppervlak, bijvoorbeeld als gevolg van putvormige of microbiologisch geïnduceerde corrosie van meer dan 1 mm diepte, is het niet altijd even gemakkelijk de wanddiktemetingen uit te voeren. Om die reden is het belangrijk waakzaam te zijn. De (duik)inspecteur is snel geneigd een beter deel van de damwand op te zoeken om meetwaarden te verkrijgen. Diktemetingen uitgevoerd op een beter deel van de damwandplank geven een te positief beeld van de plankdikte. Dit is een onwenselijke situatie. Het is dan ook aan te raden uit damwandconstructies met forse/slecht meetbare putvormige corrosie de slechtste delen te halen door het uitbranden van coupons. Vuistregel hiervoor is: minder dan 50% meetbaar geeft een te goed beeld van de damwand.

E. Meetfouten of niet betrouwbare meetresultaten (geen of verkeerde aflezing) zijn mogelijk door onderstaande punten. Zie ook Figuur 3.8.

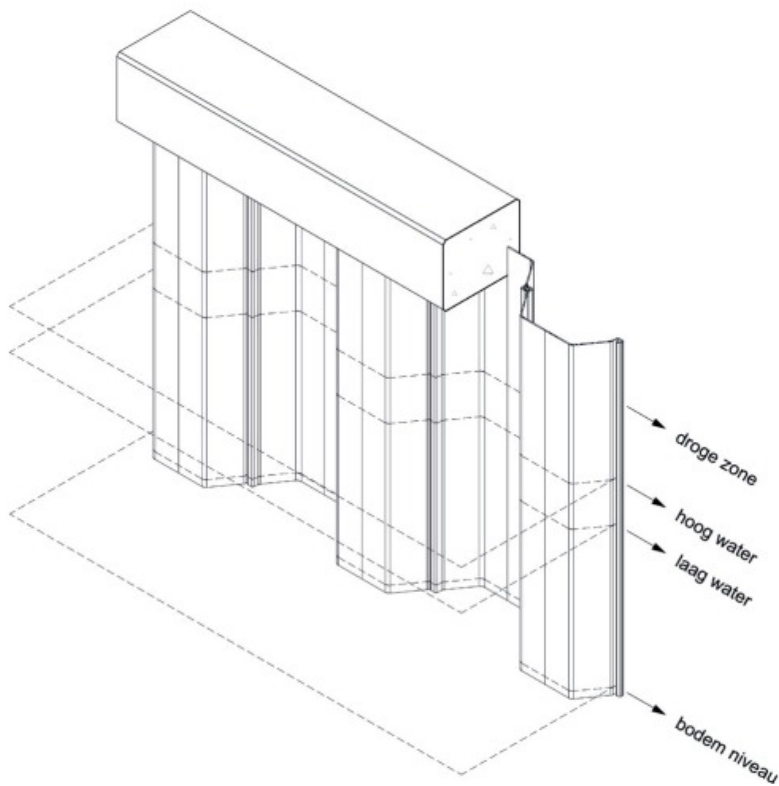
- Reflectie op een dubbeling of insluiting (a).
- Afhankelijk van de vorm en D/t ratio de reflectie op een corrosieput (b).
- Geen reflectie door een te ruwe voor- of achterkant, bijvoorbeeld veroorzaakt door ernstige corrosie (c).
- Voor- en achterzijde van het te meten object zijn niet evenwijdig, dit resulteert in onvoldoende reflectie (d).
- Een te meten object dat te heet is geeft een verkeerde aflezing. De reflectie in het materiaal wordt hoger en de gemeten waarde daardoor lager (e).
- Slecht contact tussen de taster en het materiaaloppervlak, bijvoorbeeld door de taster scheef te houden of onvoldoende geleidingsmiddel (f).
- Reflectie op de zijkanten van een te smal object (g).



Figuur 3.8 Mogelijke oorzaken meetfouten [CURSBRnet 2017]

Om een statistisch voldoende onderbouwd beeld te krijgen van de materiaaldikte is een logische zone indeling gecombineerd met een voldoende aantal metingen. Voorbeelden van zone-indelingen voor damwanden, buispalen etc. zijn:

1. Bodem-Laagwaterlijn-Getijdezone-Spatzone-Droge zone.
2. Noord-Oost-Zuid-West.
3. Onder grondwater-Capillaire zone-Grond/luchtlijn Droge zone.



Figuur 3.9 Voorbeeld niveau lijnen [CURSBRnet 2017]

Daar waar de -voorafgaand aan de inspectie vast te stellen- zones en meetraaien kruisen bevinden zich de meetpunten. Op de meetpunten worden meerdere metingen uitgevoerd. Het exacte meetpunt dient aselekt te worden bepaald. Als dit niet meetbaar is (vanwege een onvoldoende vlak oppervlak) dan moet dat genoteerd worden. Het aantal metingen is minimaal 9 per meetpunt. Dit getal is gebaseerd op de diversiteit die men tijdens metingen kan tegenkomen. Is de spreiding van de getallen $\pm 15\%$ van de mediaan, dan moet het aantal de metingen worden uitgebreid tot 25 per meetpunt. De meetresultaten dienen te worden vastgelegd in tabellen. In de rapportage dienen overzichtstabellen per meetpunt te worden opgenomen. Hierin staan naast de mediaan, de laagste en hoogste meetwaarde, de initiële dikte, de berekende afname in mm en procenten, de 5% en de 95% betrouwbaarheidswaardes en een overzicht van de meetpunten met x en y component (meetraaien/zones).



Figuur 3.10 Een meetmal voor negen ultrasone metingen [CURSBRnet 2017]

Gemiddelde waarde

Om te komen tot één algemeen gemiddelde waarde van de staaldikte bij damwanden moeten bij verschillende ‘meetpopulaties’ uit bijvoorbeeld kas, lijf en buik van een damwand worden gebruikt:

$$n = \sum_{i=1}^k n_i$$

$$m = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot m_i}{n}$$

$$s = \sqrt{\left(\left(\sum_{i=1}^k \frac{2(n_i - 1) \cdot s_i}{(n - 1)} + \sum_{i=1}^k \frac{2n_i (m_i - m)}{(n - 1)} \right) \right)}$$

Waarin:

n_i = de omvang van meetpopulatie i (bijvoorbeeld kas, lijf, buik)

m_i = het gemiddelde van meetpopulatie i

s_i = de standaardafwijking van meetpopulatie i

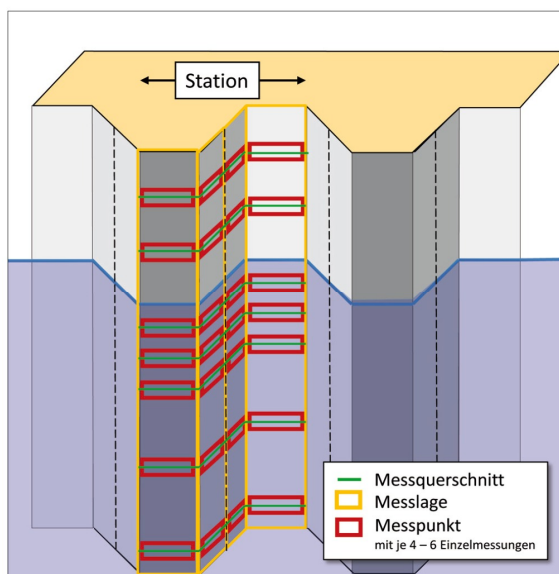
De gemiddelde staalafname per jaar wordt bepaald door het verschil tussen de originele wanddikte en de berekende gemiddelde (gecorrigeerde) wanddikte te delen door de leeftijd van de constructie (μx / leeftijd). In de praktijk is gebleken dat ook bij de geformuleerde meetmethodiek sprake kan zijn van een systematische fout. Deze wordt veroorzaakt doordat de taster waarmee de meting wordt uitgevoerd niet in staat is een meting ter plaatse van “pitting” te doen. De inspecteur zal dan geneigd zijn de taster te verplaatsen tot deze weer een waarde registreert en aldus tot te optimistische waarden komen. Een dergelijk beeld dient benoemd te worden in de rapportage.” **Einde quote**

3.2.4 BAW (2017)

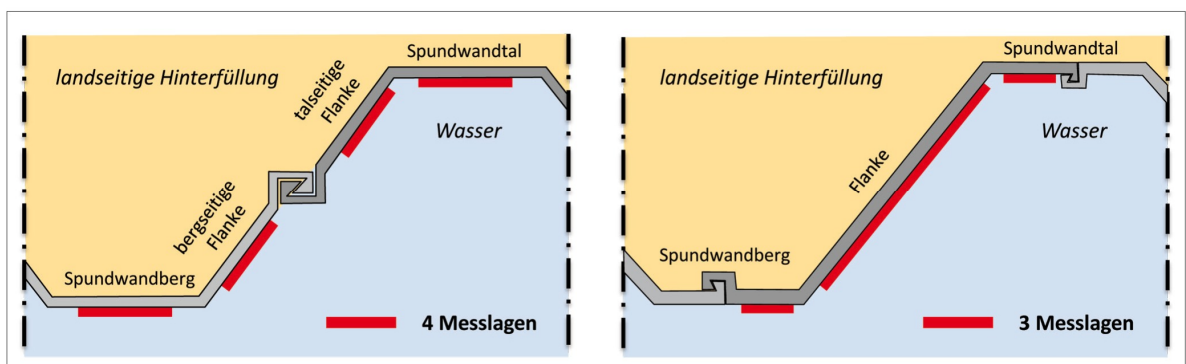
Sinds 2014 werkt het BAW met een multi-puls systeem waardoor damwand niet meer tot op het blanke staal hoeft te worden gereinigd. Het corrosieresidu mag blijven zitten; alleen de aangroei dient te worden verwijderd.

In 2002 en 2003 is een analyse van de BAW-Database WaDiMe (WandDickenMessung) uitgevoerd in samenwerking met het bedrijf Statsoft Europe GmbH, Hamburg [BAW 2017b]. Op basis van de resultaten van restwanddiktemetingen op circa 300 constructies is de meetpraktijk van de BAW geoptimaliseerd. Het onderzoek leidde tot de volgende aanbeveling.

Bij iedere damwandsectie moet een damwand om de 50 tot 100 meter worden gemeten, gelijkmatig over de sectie verdeeld, maar op zijn minst drie planken (in geval van een damwand van minder dan 50 m: ten minste twee planken). Op elke locatie moeten de meetdwarsdoorsneden worden verdeeld volgens Tabel 3.1. De positie en het aantal meetposities zijn gebaseerd op de geometrie van het damwandprofiel. Figuur 3.12 toont een voorbeeld van typische meetposities voor een U- en een Z-profiel. In Figuur 3.11 is een voorbeeld weergegeven van een meetraai met een Z-profiel. Per meetpunt moeten ongeveer vier tot zes afzonderlijke wanddikten worden bepaald. In Tabel 3.1 [BAW 2017b] staat verder het minimale aantal van 100 meetpunten vermeld.



Figuur 3.11 Locatie, doorsnedes, meetposities meetdiepten en meetpunten [BAW 2017b]



Figuur 3.12 Meetpunten langs doorsnede (links: U-profiel; rechts: Z-profiel) [BAW 2017b]

Höhenbereich	Anzahl Messquerschnitte	Bemerkung
oberhalb MW bzw. MThw oder OW	≥ 2	Mindestmesshöhe 1 m
zwischen MThw und MTnw bzw. OW und UW	2 - 4	nur in Tidegewässern und Schleusen: • Anzahl abhängig von der Höhe • gleichmäßig verteilt
unterhalb von MW bzw. MTnw oder UW	≥ 4	• Anzahl abhängig von der Höhe • Mindestmesshöhe 2 m • obere 4 m: Messabstand 0,5 - 1,0 m • unterhalb 4 m: Messabstand 1,0 - 2,0 m
Hinweise		
<ul style="list-style-type: none"> • insgesamt mindestens 100 Einzelwerte pro Bauwerk und Höhenbereich • Geringere Messquerschnittsabstände (< 0,5 m) können zur Festlegung der Korrosionszonen zwar hilfreich sein; diese zusätzlichen Daten sind jedoch bzgl. der Mindestanzahl der Einzelmesswerte <u>nicht</u> zu berücksichtigen. • Abstand von den maßgeblichen Wasserständen: ≥ 0,2 m; im Stillwasser ≥ 0,1 m. 		

Tabel 3.1 Door BAW aanbevolen aantal en verdeling meetdoorsnede per locatie [BAW 2017b]

Door de BAW wordt de diktemetingen op een standaardformulier geregistreerd, zie Figuur 3.13. In dit standaardformulier worden gestandaardiseerde codes gebruikt voor het type aanduiding van de damwand en de meetpositie, zie Figuur 3.14 voor deze codes.

Wanddickenmessung - Stationsprotokoll -			
Auftragsnr.: <i>A395</i>	Auftraggeber: <i>WSA</i>	Bearbeiter: <i>Küster</i>	
Ort: <i>Berlin</i>	Gewässer: <i>Spree</i> km <i>1,23</i>	Datum:	
Bauwerk: <i>Binnenhafen</i>	Bauwerkstyp: <i>Spundwand</i>	Baujahr: <i>1938</i>	Alter: <i>74 J</i>
Stationsname: <i>01BH N/12</i>	Lage der Messstation: <i>S. Lappan Nordufer</i>	Gauß-Krüger Rechtswert:	Hochwert:
MW / MThw / OW: <i>NHN +37,40 m</i>	MTnw / UW: <i>NHN - m</i>		
GOK: <i>NHN +38,40 m</i>	Sohtiefe: <i>4,40 m</i>	m unter GOK	
Stahlprofil: <i>Hasel III</i>	Profiltyp: <i>ZR</i>	Widerstandsmoment: <i>1600</i>	cm ⁴ /m
Skizze Profiltyp mit Bezeichnung der Messlagen	Messlage Bezeichnung	Messlage Nr.	Ausgangswanddicke in mm
	<i>BR</i>	<i>1</i>	<i>12,0</i>
	<i>RFH</i>	<i>2</i>	<i>9,5</i>
	<i>RTL</i>	<i>3</i>	<i>12,0</i>
Taufirma: <i>Aumtander, Baulhof</i>	Reinigungswerkzeuge:	Messgerät: <i>USH 35X</i>	Messkopf: <i>45KAS</i>
Bemerkungen:			

Wanddickenmessung - Messwerte -															
Station:	Höhe ab GOK	Messkette Ird. Nr.	Messlage Nr.	Wanddicke in mm						Muldentiefe in mm			Datenqualität (gut/schlecht)	Bemerkung / Anzahl und Größe Löcher	
				1	2	3	4	5	6	1	2	3			

Figuur 3.13 Meetformulieren [BAW 2017b]

Profil-typ	Profil-bezeichnung	Schemazeichnung und Bezeichnung der Messlagen
ZR	Z-Profil Spundwand (rechtwinklig)	
ZG	Z-Profil Spundwand (gestreckt)	
UR	U-Profil Spundwand (rechtwinklig)	
UG	U-Profil Spundwand (gestreckt)	
EI	Gemischte Spundwand, (Einfachträger, Füllbohle innen)	
EA	Gemischte Spundwand, (Einfachträger, Füllbohle außen)	
DI	Gemischte Spundwand, (Doppelträger, Füllbohle innen)	
DA	Gemischte Spundwand, (Doppelträger, Füllbohle außen)	

LTL/LTM/LTR: Linkes Tal links/mittig/rechts; RTL/RTM/RTR: Rechtes Tal links/mittig/rechts;
LFT/LFM/LFB: Linke Flanke talseitig/mittig/bergseitig; RFT/RFM/RFB: Rechte Flanke talseitig/mittig/bergseitig;
BL/BM/BR: Berg links/mittig/rechts

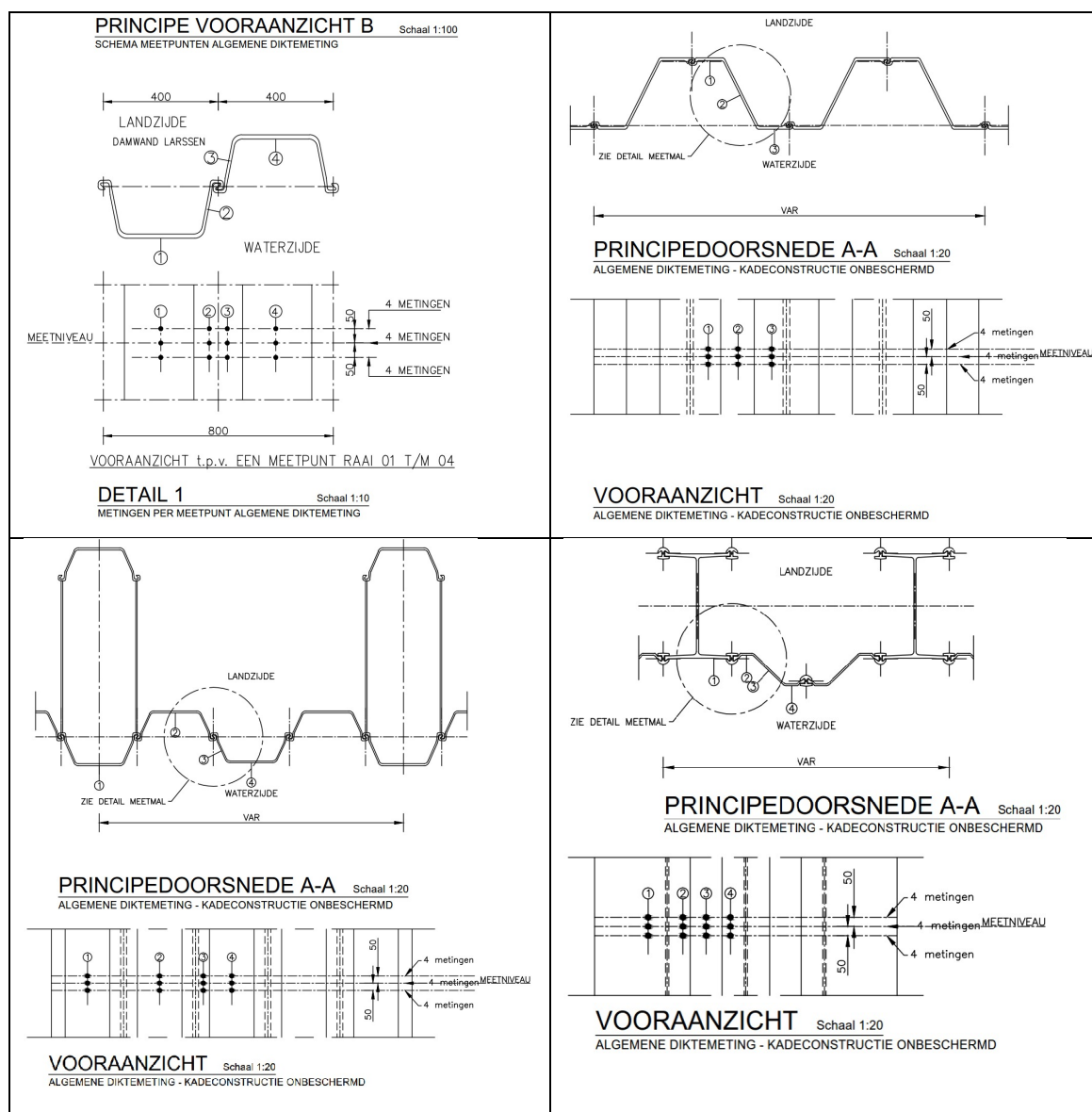
LP1/LPR: Linker Pfahl links/rechts; RP1/RPR: Rechter Pfahl links/rechts;
LB/RB: Linker/Rechter Berg; LT/RT: Linkes/Rechtes Tal;
LFM/RFM: Linke/Rechte Flanke mittig; Rechte Flanke talseitig/mittig/bergseitig;
LPn/LPnR: Linker Pfahl n, links/rechts; RPnL/RPnR: Rechter Pfahl n, links/rechts

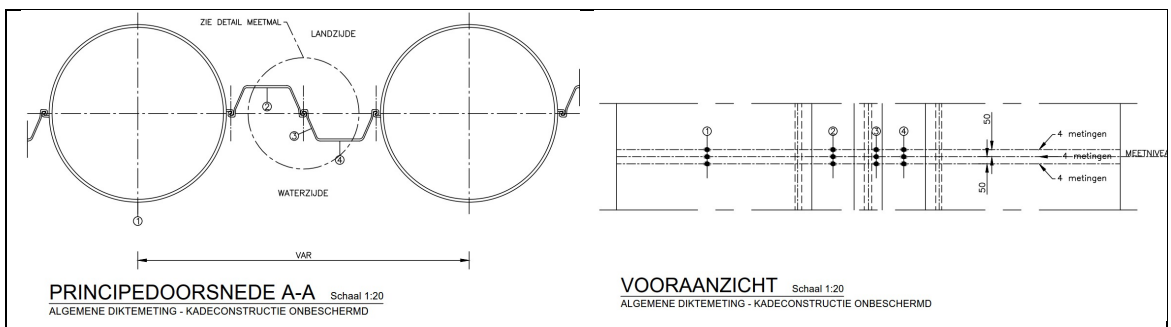
Figuur 3.14 Codering damwandtype en meetlocatie meetpunt [BAW 2017b]

3.2.5 Havenbedrijf Rotterdam (2017)

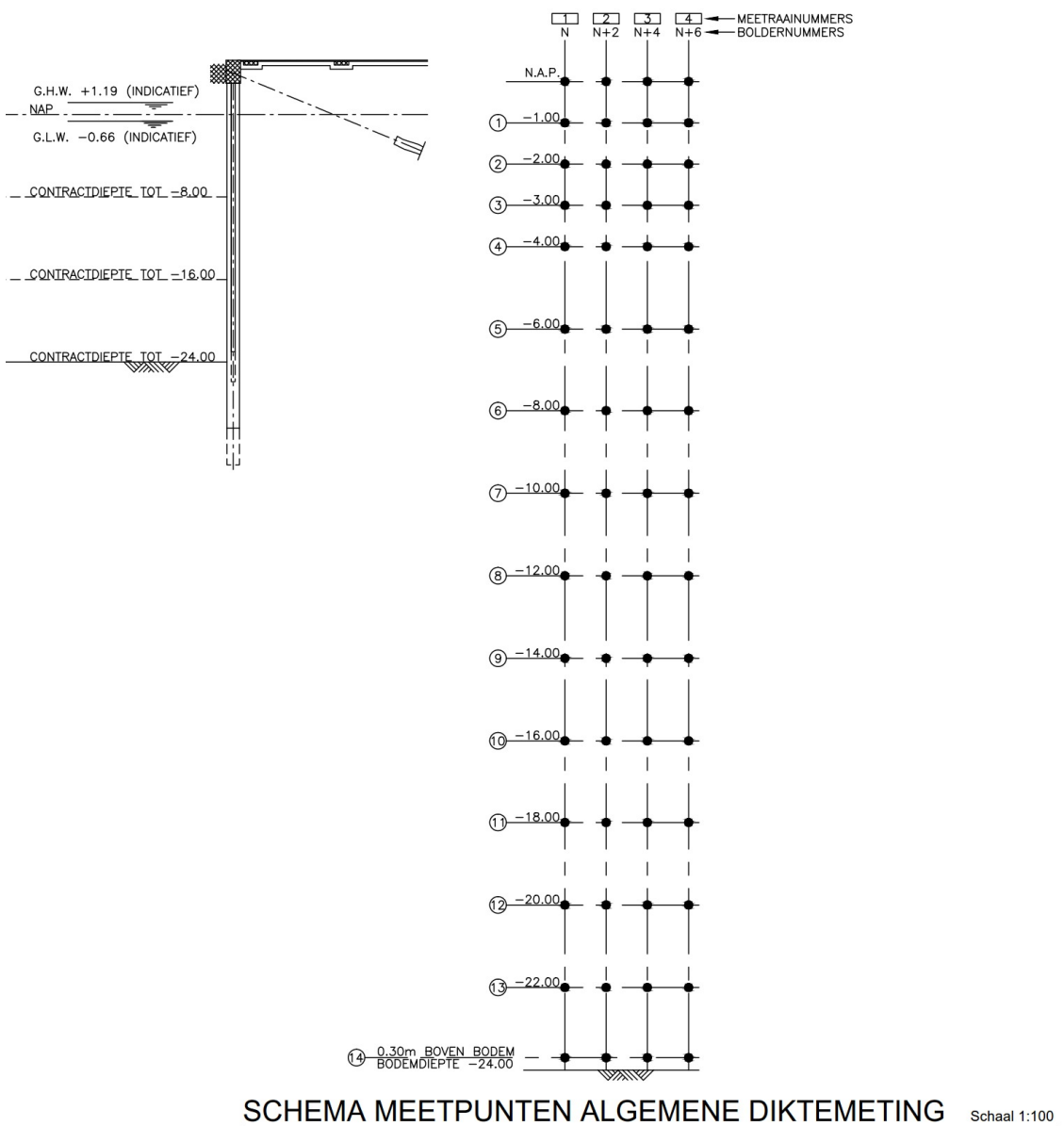
Sinds 1998 voert het havenbedrijf Rotterdam intensief inspecties uit aan de stalen onderdelen van haar areaal Natte Kunstwerken. In de raamovereenkomst [HBR 2017] staat op welke wijze deze inspecties momenteel dienen te worden uitgevoerd. In Figuur 3.15 staan voor vijf constructie typen voorbeelden gegeven van de indeling van de posities waar ultrasone metingen dienen te worden uitgevoerd.

Het schema van de meetpunten met de verdeling van meetraaien en meetniveaus voor een algemene diktemeting staat in Figuur 3.16 weergegeven. Daarnaast worden per sectie ook vijf inspecties voor de mate van pitting uitgevoerd; zie voor de beschrijving Figuur 3.17 en in Figuur 3.19 wordt een voorbeeld van de verdeling van deze inspectie over de meetraaien gegeven. In Figuur 3.18 staat het gestandaardiseerde formulier voor de rapportage van de ultrasone metingen en pitting. De onderlinge afstanden tussen de meetraaien zijn een veelvoud van de bolderafstand en de onderlinge afstand tussen meetraaien varieert in de praktijk tussen de 20 en 40 m. In Tabel 3.2 wordt nader ingegaan op de achtergrond en ontwikkeling van het corrosieonderzoek van het Havenbedrijf Rotterdam.





Figuur 3.15 Verdeling van meetpunten per meetniveau in een meetraai voor vijf wandtypen [HBR 2017]



Figuur 3.16 Schema meetpunten met de verdeling van meetraaien en meetniveau voor een algemene diktemeting [HBR 2017]

US-WANDDIKTEMETINGEN

De werkzaamheden bestaan uit:

- het schoonmaken van de in te meten punten;
- het uitvoeren van wanddiktemetingen op meetpunten, een meetpunt per meetraai per meetniveau bestaat uit: een aantal sets van 3 wanddiktemetingen op de betreffende damwand- of combiwandprofielen.
- incl. rapportage conform bijlage i01.

TECHNISCHE BEPALINGEN CORROSIEMETINGEN

EISEN EN UITVOERING

SCHOONMAKEN VAN DE IN TE METEN PUNTEN

De in te meten punten dienen door middel van een hogedrukspuit met water te worden schoongemaakt op een zodanige wijze dat een blank oppervlak ontstaat.
De mate van aangroei op het damwand en/of buispaalelement geeft geen aanleiding tot verrekening.

ULTRASONE CORROSIEMETING

De corrosiemeting dient te worden uitgevoerd door middel van een ultrasone wanddiktemeter met een meetnauwkeurigheid van ± 0,1 mm en een meetbereik tot minimaal 25 mm.

De calibratie van de ultrasone wanddiktemeter dient te geschieden voor en na de corrosiemetingen van iedere hoeveelheid resultaatsverplichting. De calibratiegegevens dienen bij iedere hoeveelheid resultaatsverplichting te worden geregistreerd.

INSPECTEREN DAMWANDELEN

De werkzaamheden bestaan uit:

- de inspectielocaties over 5 m² expositieoppervlak (verfoppervlak) geheel schoonspuiten d.m.v. een hogedruk unit van minimaal 300 bar;
- op het schoongespoten oppervlakte uitvoeren van inspecties op pittingdieptes en gradaties onderverdeeld in de volgende percentages:
 - * t/m 2 mm diepte, globaal ingedeeld in % van het schoongespoten deel;
 - * van 2 t/m 3 mm diepte, globaal ingedeeld in % van het schoongespoten deel;
 - * groter dan 3 mm diepte, globaal ingedeeld in % van het schoongespoten deel.
- algemene visuele inspecties op opvallende, in de vorm van extreme wanddiktereducties en gatvorming, imperfecties;
- incl. rapportage conform bijlage i01.

Plaatselijke pittingdieptes te meten m.b.v. een pittingmeter met mm-verdeling.

 Figuur 3.17 Beschrijving van, **Links** uitvoeren ultrasone metingen **Rechts** inspectie op pitting [HBR 2017]

Bijlage i01. behoort bij besteksnummer: 1.000943	Invulstaat 1.000943	procedure bij inschrijving: toegevoegd blanco formulier is bedoeld voor algemene informatie procedure bij deelopdracht: - kolom. 1 en 2 wordt ingevuld door de opdrachtgever - zie objecttekening tekening deelopdracht in combinatie met bestekstekeningen procedure bij uitvoering: - kolom. 3 e.v. moet worden ingevuld door de opdrachtnemer - overige kolommen door de opdrachtnemer in te vullen bij afwijkingen (revisie) - dit blad als revisie overdracht invullen zonder euro bedragen	
Onderdeel: Inspectie onbeschermde kades	Wanddiktemetingen 10-101 t/m 108		
* in te vullen bij deelopdracht bestekstekeningen object tekening vak nr. raai nr.			

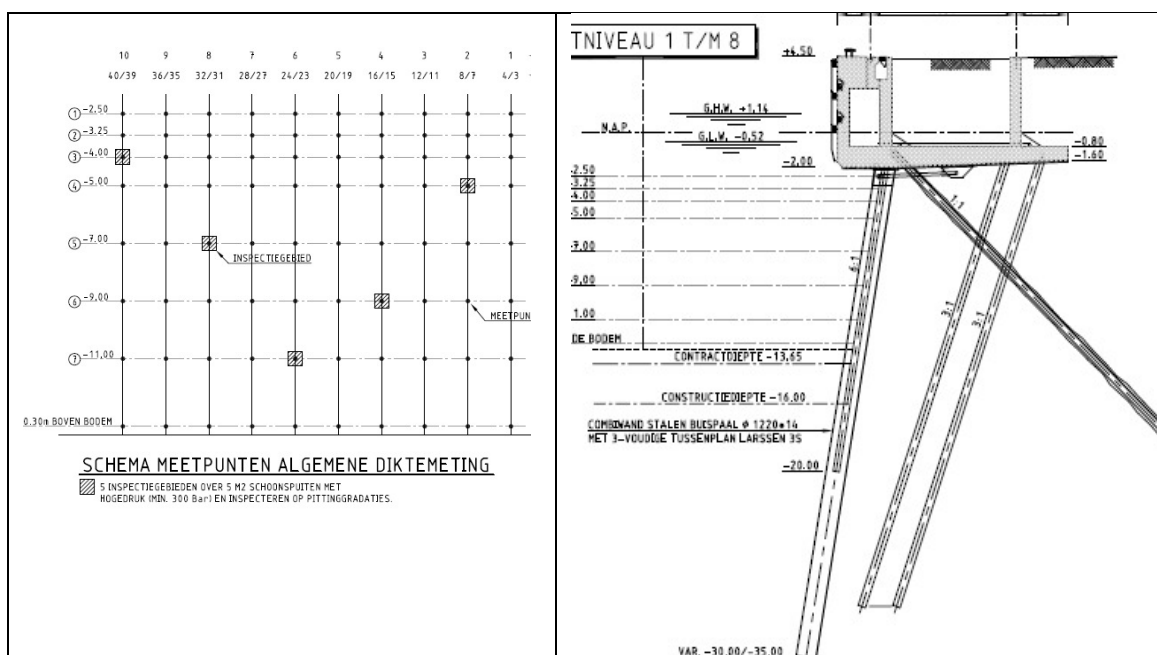
US WANDDIKTEMETINGEN IN XX.X mm

1	2	3	4	5	6	7	8
botom	meetpunt 1	meetpunt 2	meetpunt 3	meetpunt 4	meetpunt 5	meetpunt 6	
	positie:	positie:	positie:	positie:	positie:	positie:	
	buik	kas	wang	buik			
Niveau tov N.A.P.	Hoekselement	tussenplank	tussenplank	tussenplank			
	0,35 boven bodem						
	0,30 boven bodem						
	0,25 boven bodem						

tabel A

INSPECTIELOCATIE:	N.A.P.	(gearceerd deel)
INSPECTIERESULTATEN PITTING		
pittingdiepte < 2mm		% van het schoongespoten deel
pittingdiepte 2 t/m 3 mm		% van het schoongespoten deel
pittingdiepte > 3 mm		% van het schoongespoten deel
mvt % van de pitting bevindt zich op de buispaal van het inspectie gebied.		
INSPECTIERESULTATEN SLOTOPENINGEN		
OVERIGE IMPERFECTIES		

Figuur 3.18 Rapportage ultrasone metingen en pitting [HBR 2017]



Figuur 3.19 Voorbeeld van meetraaien met meetniveaus voor ultrasonische metingen en de inspectielocaties voor pitting [HBR 2019]

Achtergronden corrosieonderzoek Havenbedrijf Rotterdam

Onderstaande beschrijving is gebaseerd op [Jongbloed 2019] en twee gesprekken met de gepensioneerde Piet Jongbloed, oprichter en lange tijd trekker van het corrosieonderzoek van het Havenbedrijf Rotterdam.

Indeling aantal meetpunten per meetniveau

In de Haven van Rotterdam is gedurende de tijdsperiode van Piets betrokkenheid geen onderzoek gedaan naar de indeling van de meetpunten over één enkele of meerdere damwandplanken. In feite was al het corrosieonderzoek primair gericht op combiwanden en niet op damwandconstructies met stalen damwandplanken. Initieel is het corrosieonderzoek (vanaf 1998) select uitgevoerd en pas later is overgegaan naar aselekt onderzoek:

Selecte wijze:

- Eerst werd een algemene visuele inspectie uitgevoerd op de buizen van de combi-wanden (na gedeeltelijk schoonspuiten) en vervolgens zijn op locaties met zichtbare corrosie in een (verticale) raai wanddiktemetingen uitgevoerd. Daarna zijn, in de veronderstelling dat de naastgelegen tussenplanken eveneens waren aangetast, ook de dikten van tussenplanken naast de buispaal gemeten.
- Deze inspectie betrof in beginsel combiwanden met buispalen en kokerpalen. Uit de dikte metingen bleek dat de naast de select gekozen (gecorrodeerde) buis- en kokerpalen gelegen tussenplanken over het algemeen significant minder gecorrodeerd waren dan de buis- en kokerpalen. Piet stelt dat de oorzaak kennelijk ligt bij de plaatselijk grote corrosie van de buispalen in het materiaal zelf en niet aan de veranderende omgevingscondities ter plaatse. De gevonden corrosiepatronen en corrosiesnelheden waren naar Piet zijn mening sterk bepaald door de las in de spiraal gewikkelde koud gevormde buizen. Zowel het koud wikkelen als het lassen zorgt volgens Piet voor de hogere corrosiesnelheden en de niet-uniforme corrosie patronen.
- Van de enorme hoeveelheid metingen die hij heeft laten uitvoeren is slechts één keer een aantal buispalen aansluitend op combiwanden onderzocht dat was in Delfzijl. Deze buispalen stonden hart

op hart enkele meters van elkaar (buisdiameter van de paal en een paar tussenplanken). Ook daar bleek dat de corrosiepatronen van de sterkste corrosie door de ligging van de spiraallas werd bepaald. Deze konstatering was dan ook geen reden om op een selecte wijze raaien te kiezen.

Aselecte wijze:

- Later is overgegaan op aselecte raaien verdeeld over de meetpopulatie. Waarbij per raai van de combiwanden met name de dikten van buispalen en kokerpalen werd gemeten en niet meer alle naastgelegen tussenplanken. Deze metingen zijn per dieptezone uitgevoerd (splash-, getijde, ALWC, en permanent onderwaterzone) die ieder zijn karakteristieke corrosiesnelheid heeft.
- Ook heeft specifieke plaatselijke corrosie de aandacht gehad zoals invloed door schroefstralen, lozing van koelwater door schepen onder de waterspiegel, KB op afgemeerde schepen vooral in die gevallen van grote afmeerfrequentie. In die gevallen was er sprake van gatvorming in de buispalen van de combiwand. Ook in deze gevallen ging het om plaatselijke schades die vrijwel nooit in de naastgelegen buispalen voorkwamen geconcentreerd in een bepaalde zone. Verder is gebleken dat de meeste verzwakking door corrosie niet is opgetreden op de plaats waar het maximale moment is. Door de zeer vele metingen in de Rotterdamse haven over een totale kadelengte van circa 40 km die alle op statistische wijze zijn geëvalueerd, is deze kennis gebaseerd.

Proeven en theoretische beschouwingen, anders dan de uitgevoerde monitoring, hebben geen houvast kunnen geven door de grote variatie in het corrosiegedrag van de onderzochte kades. Alle kades zijn daarom object specifiek behandeld.

Herhaalmetingen

De twee herhaalmetingen op een plank liggen op een afstand van 5 cm van elkaar in verticale richting (één boven en één beneden het meetpunt). Dit is zo gedaan omdat uit ervaring bleek dat de duiker niet altijd de juiste waarde doorgaf omdat de meetsensor niet altijd een goed contact maakte op het staaloppervlak. De drie herhaalmetingen vertegenwoordigde dus één enkele meting.

Pittinggradatie

Op alle kademuren die uitgevoerd zijn als dam- of combiwand zijn in zogenaamde inspectiegebieden op verschillende niveaus inspecties naar pitting uitgevoerd. Over een bepaald oppervlak zijn de oppervlaktes schoongespoten waarna een onderzoek naar pittinggradatie is uitgevoerd door duikers. De pittingdieptes zijn onderverdeeld in dieptes en gradatie over het oppervlak. Aan de hand van deze gegevens kon een uitspraak worden gedaan over de pitting in de verschillende zones en in de berekeningen worden meegenomen als een equivalente wanddiktereductie. Deze waarden zijn ook meegenomen in de berekening van het getransformeerde traagheidsmoment en weerstandsmoment aan de zijde van het water gelet op de verschuiving van de zwaartelij.

Horizontale gemiddelden

Het is bij Piet later nooit meer opgekomen om voor damwanden te kijken naar horizontale gemiddelden over meerdere planken en hij vermoedt dat dat kwam door het feit dat de focus volledig op de combiwanden lag met spiraal gelaste buizen. Piet geeft aan dat voor damwandenplanken dat alsnog zou moeten worden onderzocht.

Hart op hart afstand tussen meetraaien

Hart op hart (h.o.h.) afstanden van de meetraaien waren afhankelijk van de lengte van de kademuur als populatie voor de metingen. Relatief lange kademuren met gelijke geometrie hadden inderdaad raaien met een maximale h.o.h. van 40 meter, kortere kades met een kortere h.o.h. afstand om te kunnen voldoen aan een representatieve hoeveelheid meetraaien (de hoeveelheid meetraaien werd door een statistische beschouwing getoetst aan een betrouwbaarheidsniveau).

Tabel 3.2 Achtergronden van de ontwikkeling inspectiewijze havenbedrijf Rotterdam naar [Jongbloed 2019]

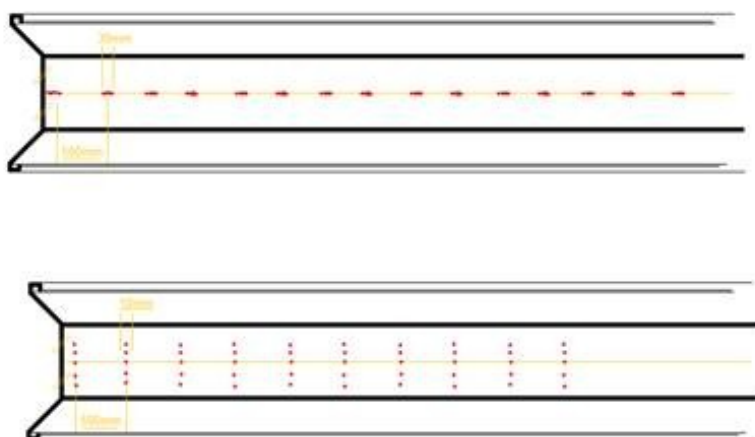
3.2.6 ArcelorMittal (2018)

ArcelorMittal hanteert een algemeen beschreven protocol voor diktemetingen (zie Tabel 3.3) waarbij om iedere 0,5 m diepte er vijf dikte metingen dienen te worden uitgevoerd [ArcelorMittal 2018]. In Figuur 3.20 wordt als voorbeeld voor een meting op een flens aangegeven op welke positie deze vijf metingen mogen worden uitgevoerd [ArcelorMittal 2018].

1. *General visual inspection of the as-received pile sections and photography documentation*
2. *Identify and mark the various corrosion zones corresponding to atmospheric, splash, immersion and under seabed*
3. *Locate and mark the desired locations for remaining thickness measurement as per agreed protocol*
4. *Removal of deposit/corrosion scale by sweep blasting locally at the preferred locations marked in activity 3*
5. *Following blasting, superficial grinding by abrasive paper for identified total spots/locations to reveal the base metal*
6. *Measure remaining thickness on the ground spots by manual UltrasonicTechnics*
7. *Record and report the inspection and UT measurement result*

For a statistical approach, its suggested to take at least three different piles ex three different wall locations as to align to EUROCODE Table, one has to measure by UT on five spots on every 500 mm of pile length assuming a pile length of 20 meters, three piles, makes 600 measures. It is remarked that cleaning will modify locally the future corrosion rate.

Tabel 3.3 Generiek meetprotocol [ArcelorMittal 2018]



Only in case of homogeneous initial flange thickness

Figuur 3.20 Twee mogelijke verdelingen van vijf meetpunten per 0,5 m damwand **boven** altijd toegestaan **onder** alleen toegestaan indien de initiële flensdikte overal gelijk is [ArcelorMittal 2018]

3.3 Resume

Diktemetingen met ultrasone techniek (UT) blijkt de standaard en deskundig gebruik geeft een betrouwbaar resultaat.

Uit het onderzoek blijken BAW en het Havenbedrijf Rotterdam te werken volgens een gestandaardiseerd protocol. In beide protocollen wordt niet gemeten over meerdere planken naast elkaar. RWS, de beheerder van het grootste areaal van damwanden in zoetwater in NL, heeft geen meetprotocol en laat de aanpak volledig over aan de markt. In de praktijk blijkt dat bij RWS wel op meerdere, naast gelegen, planken dikte metingen worden uitgevoerd. Maar bij RWS komt het ook voor dat wordt volstaan met een diktemeting op de waterlijn per 200 m damwandconstructie.

Met de publicatie van het Handboek Inspectie Staal (2015) is een goede kennisbasis gelegd over een goede en betrouwbare uitvoering van ultrasone diktemetingen. Echter het betreft een handboek en geen richtlijn of protocol dus kan eigenlijk nog steeds volledig naar eigen inzicht worden toegepast.

Samengevat kan gesteld worden dat in Nederland voor zoetwater niet volgens een vastgesteld protocol geïnspecteerd wordt. De wijze waarop diktemetingen worden uitgevoerd, de deskundigheid van de operators alsmede het aantal en de locaties van de meetpunten varieert sterk (van een punt op de waterlijn tot meer dan 750 per locatie) en wordt door een grote beheerder van damwanden in zoetwater zoals RWS volledig overgelaten aan de markt.

Bij het zoeken naar meetprotocollen, uitgevoerde metingen en opgedane ervaringen is bovendien niet gebleken dat beheerders een overzicht hebben en werken aan kennisopbouw of -uitwisseling op het gebied van dikteafname van damwanden in zoetwatercondities.

4 Conclusies

Ten aanzien van corrosie van damwanden gebruikt bij Natte Kunstwerken onder zoetwatercondities worden de volgende conclusies getrokken:

- 1 Uit de literatuur volgt dat, het elektrochemische proces van corrosie van bijzonder veel chemische, fysische maar ook van biologische factoren afhangt. De wetenschappelijke onderzoeken zijn vooral laboratoriumonderzoeken geweest waar naar de invloed van één en soms enkele geïsoleerde parameter(s) wordt gekeken. Geconcludeerd wordt dat de theoretische weg met de vele mogelijke invloeden niet effectief is in deze fase van het KpNK onderzoek.
- 2 In de literatuur komen richtlijnen en normen voor en daarbij wordt onderscheid gemaakt in (in de verticale richting) verschillende zones waar de mate van corrosie onderling verschilt. Het aantal beschreven zones, de grootte van de corrosie alsmede het verloop van de corrosie in de tijd verschilt sterk.
- 3 Voor zover bekend is er geen algemeen toegankelijk overzicht beschikbaar van de in praktijk gemeten optredende corrosiesnelheden van damwanden in zoetwater in Nederland.
- 4 Bij beheerders van damwanden in zoetwater maar ook onderling tussen de beheerders lijkt momenteel geen sprake te zijn van een systematische kennisopbouw of kennisuitwisseling op het gebied van damwandcorrosie.
- 5 Uit het onderzoek naar het effect van corrosie op de betrouwbaarheid van een damwandconstructie volgt dat de grootte van de lokale corrosie (op één punt) alleen van belang is voor de grond dichtheid. Voor alle andere, voor damwandconstructies relevante, faalmechanismen is de grootte van de horizontale gemiddelde corrosie over de mechanismebreedte, van meerdere planken, relevant. Oftewel de constructieve veiligheid wordt niet bepaald door de meer extreme uitschieters in de waarden voor corrosie.
- 6 Als eerstvolgende stap in het KpNK onderzoek, ten behoeve van de geotechnische en constructieve praktijk rondom damwand constructies, dient inzage te worden verkregen in het gecombineerde effect van corrosie: de afname van staaldikte in Nederland: wat is de bandbreedte, verloop in de tijd en wat lijkt de grootste invloedfactor?

Ten aanzien van het meten van de dikte van damwandprofielen worden de volgende conclusies getrokken:

- 7 Diktemetingen met ultrasone techniek (UT) blijkt de standaard, en deskundig gebruik geeft een betrouwbaar resultaat.
- 8 In Nederland wordt niet volgens een vastgesteld protocol geïnspecteerd. De wijze waarop diktemetingen worden uitgevoerd, de deskundigheid van de operators alsmede het aantal en de locaties van de meetpunten varieert sterk (van een punt op de waterlijn tot meer dan 750 per locatie) en wordt door de beheerders van damwanden in zoetwater volledig overgelaten aan de markt.

5 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om als eerste de optredende corrosie van damwanden gebruikt bij Natte Kunstwerken in zoetwatercondities in Nederland in kaart te brengen:

- 1 Voer een verkenning uit naar het degradatiebeeld van het huidige damwandareaal in zoetwater op basis van recent uitgevoerde diktemetingen. Onderzoek of in deze data belangrijke trends te herkennen zijn:
 - Is er een significant verschil tussen afspoel en niet afspoelcondities?
 - Zijn systematische trends herkenbaar in de verticaal (corrosiezones)?
 - Zijn systematische verschillen herkenbaar tussen voor- en achterflens?
 - Wat is de bandbreedte/ de variatie van optredende corrosie op puntniveau: horizontale gemiddelden per locatie, per sectie en regionaal?
 - Zijn er verschillen tussen gecoate en niet gecoate damwanden waarneembaar?
 - Hoe verhouden de waarnemingen zich tot de waarden van bijvoorbeeld Eurocode 3-5 en de ROK1.4?

Ten aanzien van het meten van de dikte van damwandprofielen bij inspecties worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- 2 Stel een standaardmeetprotocol op voor het uitvoeren van diktemetingen van damwanden waar beheerders naar kunnen verwijzen bij projecten;
- 3 Maak een opzet voor een nationale database waarin beheerders de meetgegevens kunnen opslaan én terugvinden. Vervolgens kan deze verzameling van diktemetingen gebruikt worden voor het uitvoeren van een beoordeling van bestaande damwanden, voor de verbouw of de vervanging en voor het rationeler kiezen van inspectiemomenten. Na een tijdsperiode van 5 à 10 jaar termijn kunnen dan voor Nederland, of regionaal, specifieke waarden voor de corrosiesnelheid worden afgeleid.

Literatuur

- [Acotec 2012a] Inspectie van de damwand aan de sluis van Eefde, Nederland in opdracht van rijkswaterstaat, Inspectierapport EE-RWS-NL-KC-01, Acotec, 4 april 2012
- [ArcelorMittal 2018] Email aan Hans Brinkman van Deltares betreffende corrosion/inspection techniques van Thomas Uriuos van ArcelorMittal, 21 maart 2018
- [BAW 1997] Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden, Statistische Datenauswertung zur Abschätzung der maximalen Abrostung, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 75, 1997
- [BAW 2005] Beurteilung der Korrosion an Spundwandbauwerken, BAW - DH/ 2005-09 K1 Folie-Nr. 1, Bundesanstalt für Wasserbau, 2005
- [BAW 2010] Ein Vierteljahrhundert Spundwanddicken-messung mittels Ultraschall bei der Bundesanstalt für Wasserbau,
- [BAW 2014] Bemessung korrodierter Stahlspundwände im Wasserbau, Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2014 Bundesanstalt für Wasserbau, 2014
- [BAW 2017a] Ermittlung und Bewertung des Korrosionszustandes von Stahlspundwänden in Häfen und an Wasserstraßen, , BAW Mitteilungen Nr. 100, 2017
- [BAW 2017b] BAW Empfehlung Spundwanddickenmessungen in Häfen und an Wasserstraßen: Grundlagen, Planung, Durchführung, Auswertung und Interpretation (ESM), Bundesanstalt für Wasserbau, 2017
- [CUR 2015] Inspectie en advies kunstwerken, CUR-Aanbeveling 117:2015, Civieltechnisch centrum uitvoering research en regelgeving 2015
- [Deltares 2014a] Corrosie van stalen damwandplanken in de grond; effect van zout grondwater, Rapport 1209030-000-GEO-0006, Deltares, maart 2014
- [Deltares 2014b] Corrosietoeslag van stalen damwandplanken in de grond, Memo 1209030-000-GEO-0007, Deltares, 9 april 2014
- [DIN50929-3] Korrosion der Metalle - Korrosionswahrscheinlichkeit metallener Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung - Teil 3: Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern, DIN 50929-3:2018-03 & DIN 50929-3 Beiblatt 1:2014-11
- [EAU 2012] Empfehlungen des Arbeitsausschusses Uferbefestigungen Häfen und Wasserstraßen, Ernst und Sohn, Berlin, 2012
- [ENW 2014] Advies hanteren nieuwe waarden corrosietoeslag', advies ENW 14-12, 26 mei 2014.
- [ENW 2016] Advies afronding corrosieonderzoek, advies ENW 16-1,29 januari 2016.
- [HBR 2017] Het verrichten van inspecties en reparaties en het leveren en aanbrengen van kathodische bescherming incl. bijbehorende werkzaamheden binnen het Rotterdamse havengebied in de gemeente Rotterdam, Alblasserdam en Dordrecht, Raamovereenkomstnummer I.000943, Havenbedrijf Rotterdam, 09-02-2017
- [HBR 2019] Presentatie Protocol wanddiktemetingen, Werkgroep meetprotocol wanddiktemetingen Port of Rotterdam, 2019

- [Jongbloed 2019]
[KpNK 2018] Achtergrond keuze indeling van meetraai voor corrosiemetingen, email van Piet Jongbloed aan Hans Brinkman, 19 mei 2019
Resultaten workshop corrosie bestaande damwanden in zoetwater, Kennisprogramma Natte Kunstwerken 31 mei 2018, <https://www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl/actueel/resultaten-workshop-corrosie-bestaande-damwanden/item44>
- [Matsushima 2011] Matsushima, I., 2011, Carbon steel – corrosion in freshwaters. Uhlig's Corrosion Handbook Chapter 44
- [Melchers, R.E. 2006] Melchers, R.E., Modelling immersion corrosion of structural steels in natural fresh and brackish waters. Corrosion science 48, 4174-4201
- [Melchers, R.E. 2011] Melchers, R.E., Modelling long-term corrosion of mild steel in unpolluted fresh and sterile seawaters. 18th International corrosion congress 2011, paper 156.
- [NEN-EN 10248-2] Warmgewalste damwandprofielen van ongelegeerde staalsoorten, NEN-EN 10248-2 nl:1995, Nederlands Normalisatie Instituut 1995
- [NEN-EN 1993-5] Eurocode 3, 2007, Design of Steel Structures, Part 5: Piling. NEN-EN, 1993-05:2007
- [RWS 1989] Van der Toorn, Procedure beoordelen restlevensduur, RWS 1989
- [RWS 2015] Senhorst, Afronding onderzoek vermindering corrosietoeslag damwanden. RWS-2015/44407.01., 2015
- [RWS 2017] Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken ROK 1.4, RTD 1001:2017 RWS April 2017
- [Ryznard 1944] Ryznard, J.W. A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water. J. Am. Water. Works Assoc. 1944, 36, 472–486.
- [SBRCURnet 2017] Handboek inspectie Staal conform CUR-aanbeveling 117, SBRCURnet 2017
- [Schoefs 2017] Models and measurements of corrosion of steel structures in marine environment: state of the art and challenges, Retour sur la 4^{ème} WEAMEC Meeting, Corrosion marine appliquée aux EMR Franck Schoefs, 2017
- [van Weele] Dia uit diaserie funderingstechniek Prof. ir. A.F. van Weele
- [Wall 2013] Wall H, Wadsö L (2013) Corrosion rate measurements in steel sheet pile walls in a marine environment, Marine Structures 33 p21–32, 2013.