

In situ elektrochemische karakterisatie van corrosie in het kanaal Gent-Terneuzen

Rul Gillian

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Nautische Wetenschappen
aan de Hogere Zeevaartschool

Promotor: Geert Potters
Co-promotor: Wikke Witteveen

Academiejaar 2023-2024

Woord vooraf

Deze scriptie werd geschreven voor het behalen van mijn masterdiploma in de Nautische Wetenschappen aan de Antwerp Maritime Academy.

Het centrale thema van deze thesis is een voorbereidende literatuurstudie en nadien voornamelijk elektrochemisch onderzoek met een potentiostaat. Als student aan de zeevaartschool leek het mij zeer interessant om in een grote onderzoeksgroep terecht te komen. Zo was ik ook bereid om de nieuwe leerstof elektrochemie onder de knie te krijgen. Op die manier kwam ik terecht bij Prof. Dr. Geert Potters.

De weg was zeer lang, maar na lange intensieve weken heb ik een nuttig onderzoek kunnen leiden. Een praktische proef die nuttige resultaten gaven maakte mij een tevreden student.

Ik wil dan ook mijn promotor Prof. Dr. Geert Potters en mijn co-promotor Wikke Witteveen bedanken voor al het geduld en de hulp die ik heb gekregen.

Vervolgens ook een bedankje aan Chat GPT voor mij te helpen bij praktische zaken.

Als laatste zou ik graag ook mijn familie en vrienden bedanken voor de alle hulp die ze mij hebben gegeven. Zonder hun hulp zou deze thesis nooit hetzelfde zijn geweest.

Samenvatting

Putcorrosie en uniforme corrosie in het kanaal Gent-Terneuzen vormen aanzienlijke veiligheidsrisico's voor maritieme infrastructuur. In 2021 werd in het kanaal Gent-Terneuzen microbiële corrosie vastgesteld. Het meten van deze corrosievormen is complex, vooral in veldomstandigheden.

In deze thesis zijn vier elektrochemische testen uitgevoerd om putcorrosie en uniforme corrosie te karakteriseren in het kanaal en de haalbaarheid van deze testen te bekijken: de Linear Polarization Resistance (LPR) methode, de Linear Polarization Curve (LPC) methode, de Cyclic Polarization Curve (CPC) methode en de Critical Pitting Temperature (CPT) methode. Deze testen werden uitgevoerd op twee staalsoorten, S235 en 316L, met verschillende onderdompelingstijden. De variërende omstandigheden op de drie locaties boden een gedetailleerd inzicht in de effecten van lokale factoren op zowel uniforme corrosie als putcorrosie.

De resultaten van de metingen werden geanalyseerd en vergeleken om de prestaties en problemen van de verschillende methoden te beoordelen. Dit onderzoek toont ook een duidelijk verschil in corrosiepatronen in één watermassa en draagt bij aan een beter begrip van uniforme corrosie en putcorrosie in het kanaal Gent-Terneuzen.

Abstract

Pitting corrosion and uniform corrosion in the Ghent-Terneuzen Canal pose significant safety risks for maritime infrastructure. In 2021, microbial corrosion was detected in the Ghent-Terneuzen Canal. Measuring these types of corrosion is complex, especially in field conditions.

In this thesis, four electrochemical tests were conducted to characterize pitting corrosion and uniform corrosion in the canal and to evaluate the feasibility of these tests: the Linear Polarization Resistance (LPR) method, the Linear Polarization Curve (LPC) method, the Cyclic Polarization Curve (CPC) method, and the Critical Pitting Temperature (CPT) method. These tests were performed on two types of steel, S235 and 316L, with varying immersion times. The varying conditions at the three locations provided a detailed insight into the effects of local factors on both uniform corrosion and pitting corrosion.

The results of the measurements were analyzed and compared to assess the performance and issues of the different methods. This research also demonstrates a clear difference in corrosion patterns within a single body of water and contributes to a better understanding of uniform corrosion and pitting corrosion in the Ghent-Terneuzen Canal.

Inhoudsopgave

Lijst van figuren	ix
Lijst van tabellen.....	xii
Lijst van afkortingen	xiii
1 Inleiding.....	1
2 Corrosie	3
2.1 Corrosie van materialen	3
2.2 Economische gevolgen door corrosie	3
2.3 Corrosie types.....	4
2.3.1 Uniforme corrosie	5
2.3.2 Galvanische corrosie, spleetcorrosie en spanningscorrosie	6
2.3.3 Putcorrosie	8
2.3.4 Microbiële Corrosie	8
3 Putcorrosie	9
4 Verband tussen putcorrosie en microbiële corrosie	11
4.1 MIC.....	11
4.1.1 Biofilm	12
4.1.2 Sulfaatreducerende bacteriën	13
4.1.3 Nitraatreducerende bacteriën	13
4.1.4 Ijzeroxiderende -en reducerende bacteriën	14
4.1.5 Zuurproducerende bacteriën	14
4.1.6 Schimmels	14
5 Onderzoeksdoelstelling.....	15
6 Basisbegrippen voor de elektrochemie	16
6.1 Elektrochemisch proces.....	16
6.2 Elektrische dubbele laag.....	17
6.3 Gibbs-energie van elektrochemische cel.....	17
6.4 Vergelijking van Nernst.....	18

6.5	Pourbaix diagram van ijzer	18
7	Corrosiereacties	19
7.1	Overspanning.....	19
7.2	Snelheid van een corrosiereactie	19
7.3	Polarisatiecurve	19
7.3.1	Tafel-plot	19
7.3.2	Evans Diagram	20
7.3.3	Polarisatiecurve	20
7.3.4	Butler-Volmer vergelijking	21
7.3.5	Open circuit potential (OCP)	22
7.4	Passivatie	22
7.4.1	Passivatie van ijzer	23
8	Metten van corrosie	24
8.1	Gewichtsverlies.....	24
8.2	Dikteverlies	25
8.3	Elektrochemische methoden.....	25
8.3.1	Drie-elektroden-testcel	25
8.3.2	Potentiostaat.....	26
8.3.3	Corrosion standards	26
8.3.3.1	American Society for Testing and Materials (ASTM)	26
8.3.3.2	International Organization for Standardization (ISO)	26
8.3.4	Linear polarization resistance technique (LPR).....	26
8.3.5	Potentiodynamic polarization (PDP)	27
8.3.6	Electrochemical impedance spectroscopy (EIS).....	28
8.3.7	Electrochemical Noise (EN)	28
8.3.8	Electrochemical Frequency Modulation (EFM).....	29
8.3.9	Scanning Electron Microscopy (SEM).....	29

8.3.10	Energy Dispersive Spectroscopy (EDS).....	30
9	Meten van putcorrosie.....	31
9.1	Critical pitting potential.....	31
9.2	Cyclic polarization.....	31
9.3	Critical pitting temperature.....	32
9.4	Pitting corrosion standards	32
9.4.1	ASTM G46-21.....	32
9.4.2	ISO 11463:2020	32
10	Praktische meting van corrosie: materiaal en methoden	33
10.1	Ontwerp experiment	33
10.1.1	Drie elektrode testcel.....	34
10.1.1.1	Werkelektrode	35
10.1.1.2	Referentie-elektrode.....	38
10.1.1.3	Counter elektrode.....	38
10.1.2	Elektrolyt	39
10.1.3	Manta Scuba 90.....	39
10.1.4	Potentiostaat Palmsens 4.....	40
10.1.5	Magnetic stirrer hotplate	41
10.1.6	ASTM-standards	41
10.2	Proefopstelling.....	42
10.3	Linear Polarization Resistance	44
10.4	Linear polarization curve	46
10.5	Cyclic voltammetry	48
10.5.1	Repassivatiepotaiaal	49
10.5.2	Critical pitting potential.....	49
10.6	Critical pitting temperature	50
10.7	Electrochemical frequency modulation.....	53

10.8	Verwerken van data	53
10.9	Toepassingen van statistiek	53
11	Hypothese	54
11.1	Hypothese LPR	54
11.2	Hypothese LPC	54
11.3	Hypothese CPC	54
11.4	Hypothese CPT	55
12	Resultaten	56
12.1	Eigenschappen water	56
12.2	LPR	57
12.2.1	LPR in functie van locatie	57
12.2.1.1	Gent	57
12.2.1.2	Terneuzen	58
12.2.1.3	Zelzate	58
12.2.2	LPR in functie van tijd	59
12.2.2.1	Maand	59
12.2.2.2	Week	59
12.2.2.3	Dag	60
12.2.3	Ecorr in functie van locatie	60
12.2.3.1	Gent	60
12.2.3.2	Terneuzen	61
12.2.3.3	Zelzate	61
12.2.4	Ecorr in functie van tijd	62
12.2.4.1	Maand	62
12.2.4.2	Week	62
12.2.4.3	Dag	63
12.3	LPC	63

12.3.1	Corrosion rate in functie van locatie	64
12.3.2	Corrosion rate in functie van tijd.....	64
12.4	CPC	65
12.4.1	Ecorr in functie van locatie	65
12.4.2	Ecorr in functie van tijd.....	66
12.4.3	Repassivatiepotaal in functie van locatie.....	66
12.4.4	Repassivatiepotaal in functie van tijd	67
12.4.5	CPP in functie van tijd.....	67
12.4.6	CPP in functie van locatie	68
12.4.7	CPC rooster	69
12.5	CPT	70
12.6	Interpretatie van resultaten	70
12.6.1	LPR	71
12.6.2	LPC	72
12.6.3	CPC.....	72
12.6.4	CPT	73
13	Conclusie.....	74
14	Bibliografie.....	76
15	Lijst met bijlagen	82

Lijst van figuren

Figuur 1	Corrosiecyclus van ijzer en staal	3
Figuur 2	Algemene corrosie (roesten) van de stalen ketelconstructie.....	4
Figuur 3	Galvanische reeks van gewone metalen en legeringen	6
Figuur 4	Dwarsdoorsnede vormen van putjes.....	9
Figuur 5	Stapsgewijze vorming van de biofilm	12
Figuur 6	Mechanisme van MIC van ijzer door SRB	13
Figuur 7	Typische galvanische cel, zoutconcentratie cel en elektrolytische cel.....	16
Figuur 8	Een evenwichtsmodel voor de elektrische dubbele laag	17
Figuur 9	Het potentiaal-pH-diagram voor ijzer aan watersysteem ijzer-water bij 25°C	18
Figuur 10	Tafel plot om de corrosiestroomdichtheid te bepalen	20
Figuur 11	a) Een typische Butler-Volmer vergelijking (b) De Tafel plot van de nettostroom (c) Drie-elektroden-testcel	21
Figuur 12	Een Butler-Volmer stroom-potentiaal curve.....	22
Figuur 13	Passivatie van een metaal	23
Figuur 14	Laboratoriumtechnieken om het verschijnsel corrosie te bestuderen	24
Figuur 15	Schematisch diagram van het ultrasoon onderzoek.....	25
Figuur 16	Schema van een testcel met drie elektroden	25
Figuur 17	Schatting van corrosieweerstanden met lineaire polarisatiegegevens	27
Figuur 18	PDS curve for passive corrosion behavior.....	27
Figuur 19	Enkelvoudige tijdconstante complex vlak plot	28
Figuur 20	De toepassing van elektrochemische ruis voor de studie van metaal.....	28
Figuur 21	Voorbeeld van EFM	29
Figuur 22	SEM schema	29
Figuur 23	Energy dispersive spectroscopy analysis.....	30
Figuur 24	Typische cyclische polarisatieplot voor roestvrij staal.....	31
Figuur 25	Bepaling van de kritische putpotentiaal uit de anodische curve	32
Figuur 26	Overzicht van de meetlocaties	33
Figuur 27	Schematische weergave van de drie elektroden testcel	34
Figuur 28	Opstelling van drie elektroden testcel	35
Figuur 29	Voorbeelden werkelektroden S235 en 316L staal	37
Figuur 30	Ag Ag/Cl referentie elektrode	38
Figuur 31	Geconstrueerde counter elektrode in epoxy	38

Figuur 32	Scuba 90 met parameters	39
Figuur 33	Palmsens 4 potentiostaat.....	40
Figuur 34	Magnetische roerder met verwarmingsplaat	41
Figuur 35	Schematische weergave van een reeks werkelektroden.....	42
Figuur 36	Locatie van werkelektroden.....	43
Figuur 37	Voorbeeld van een LPR test in PSTrace.....	44
Figuur 38	Instellingen PSTrace voor een LPR meting	45
Figuur 39	Opstelling van drie elektrode testcel in de Bredastraat als voorbereidend werk ..	45
Figuur 40	Instellingen PSTrace LPC meting	47
Figuur 41	Instellingen van een CPC test	48
Figuur 42	Voorbeeld CPC test van de voorbereiding in 3,5% zoutwater	48
Figuur 43	Aanduiding van de CPP en de Erep op een CPC	49
Figuur 44	Proefopstelling CPT thuis	50
Figuur 45	Magnetische roerder met verwarmplaat; drie elektroden testcel voor CPT test ..	51
Figuur 46	Voorbeeld grafiek CPT	52
Figuur 47	Grafiek LPR Gent	57
Figuur 48	Grafiek LPR Terneuzen	58
Figuur 49	Grafiek LPR Zelzate	58
Figuur 50	Grafiek LPR één maand	59
Figuur 51	Grafiek LPR één week.....	59
Figuur 52	Grafiek LPR één dag	60
Figuur 53	Grafiek Ecorr Gent.....	60
Figuur 54	Grafiek Ecorr Terneuzen.....	61
Figuur 55	Grafiek Ecorr Zelzate	61
Figuur 56	Grafiek Ecorr één maand.....	62
Figuur 57	Grafiek Ecorr één week	62
Figuur 58	Grafiek Ecorr één dag	63
Figuur 59	Grafiek corrosion rate per locatie	64
Figuur 60	Grafiek corrosion rate in functie van tijd	64
Figuur 61	Grafiek Ecorr per locatie	65
Figuur 62	Grafiek Ecorr in functie van tijd.....	66
Figuur 63	Grafiek Erep per locatie.....	66
Figuur 64	Grafiek Erep in functie van tijd.....	67

Figuur 65	Grafiek CPP in functie van tijd.....	67
Figuur 66	Grafiek CPP per locatie.....	68
Figuur 67	Grafieken van CPC in rooster	69
Figuur 68	Grafiek CPT per locatie	70

Lijst van tabellen

Tabel 1	Overzicht van alle werkelektroden	36
Tabel 2	Chemische samenstelling van S235 en 316L staal	37
Tabel 3	Fysicochemische metingen op de drie locaties op het moment van de metingen	56

Lijst van afkortingen

AC	Alternating current
ASTM	American Society for Testing and Materials
BBP	Bruto binnenlands product
CPT	Critical pitting temperature
DC	Direct current
EDL	Electrical double layer
EDS	Energie dispersieve spectroscopie
EFM	Elektrochemische frequentiemodulatie
EIS	Elektrochemische impedantiespectroscopie
EN	Elektrochemische noise
ISO	International Organization for Standardization
LPR	Lineaire polarisatieweerstand
MIC	Microbially induced corrosion
NACE	National Association of Corrosion Engineers
NWE	Normaalwaterstofelektrode of SWE Standard waterstof elektrode
OCP	Open circuit potential
PDP	Potentiodynamische polarisatie
SEM	Scanning elektronenmicroscopie
LPC	Linear polarization curve
CPC	Cyclic polarization curve
CPP	Critical pitting potential
Ecorr	Corrosiepotentiaal
EW	Equivalent weight

TDS Total dissolved solids

Erep Repassivatiepotentiaal

1 Inleiding

Corrosie is een wijdverspreid probleem dat leidt tot materiaaldegradatie door elektrochemische of chemische interactie met de omgeving. Het heeft aanzienlijke economische gevolgen en kan veiligheidsproblemen veroorzaken, variërend van roestende huishoudelijke apparatuur tot corroderende auto's en bruggen.

Corrosie kent verschillende vormen, zoals uniforme corrosie, galvanische corrosie, spleetcorrosie, spanningscorrosie en putcorrosie. Uniforme corrosie tast het materiaal gelijkmatig aan, terwijl microbiële corrosie wordt veroorzaakt door micro-organismen die biofilms vormen.

Om corrosie te bestrijden, worden methoden zoals het gebruik van dikkere metalen, kathodische en anodische bescherming, corrosie-inhibitoren, milieuaanpassingen, coatings en galvanisatie toegepast.

Putcorrosie, gekenmerkt door kleine putjes op metalen oppervlakken, ontstaat door elektrochemische of chemische depassivering. Factoren zoals potentiaal, chlorideconcentratie, legeringsstructuur, dikte van de passieve laag en chemische samenstelling van de omgeving dragen bij aan putcorrosie. Putcorrosie en microbiële corrosie komen vaak samen voor.

Corrosie kan destructief of niet-destructief worden gemeten. De gewichtsverliesmethode, een eenvoudige destructieve techniek, meet het gewichtsverlies van metalen coupons na blootstelling aan corrosieve omstandigheden.

Elektrochemische methoden omvatten het gebruik van een drie-elektroden-testcel, waarbij een testelektrode, een tegen-elektrode en een referentie-elektrode worden gebruikt. Een potentiostaat wordt gebruikt om het potentiaalverschil tussen de elektroden te meten en te regelen. Dit maakt het mogelijk om corrosiestromen en polarisati weerstand te bepalen.

Andere technieken om corrosie te meten zijn onder meer lineaire polarisati weerstand (LPR), potentiodynamische polarisatie (PDP), elektrochemische impedantiespectroscopie (EIS), elektrochemische ruis (EN), elektrochemische frequentiemodulatie (EFM), scanning elektronenmicroscopie (SEM) en energie dispersieve spectroscopie (EDS).

Deze technieken bieden verschillende benaderingen om corrosie te meten en kunnen helpen bij het karakteriseren en evalueren van corrosiegedrag.

In de jachthaven van Zelzate is de afgelopen jaren een aanzienlijke hoeveelheid uniforme en putcorrosie waargenomen op de romp van diverse boten. Deze corrosie wordt veroorzaakt door elektrochemische en microbiële processen. De eigenschappen en samenstelling van het water, die variëren over het gehele kanaal Gent-Terneuzen, spelen hierbij een cruciale rol. Uniforme corrosie en putcorrosie kunnen op verschillende manieren worden gemeten, waarbij de meest gangbare methode de gewichtsverliesmethode is. Deze methode is echter niet efficiënt en vergt een aanzienlijke hoeveelheid tijd. Daarom bestaat er behoefte aan een verbeterde meetmethode.

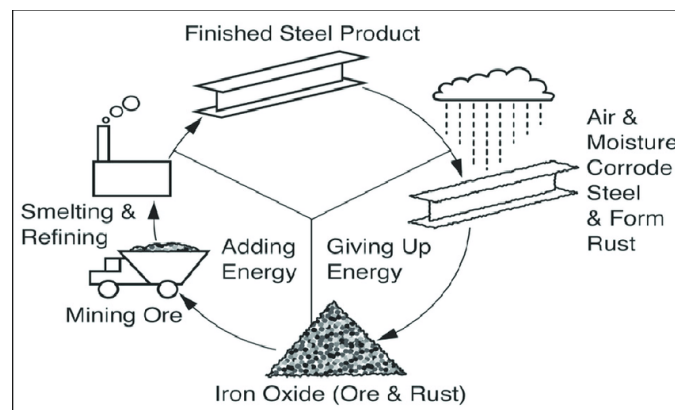
In het praktische onderzoek worden de mogelijkheden onderzocht om uniforme corrosie en putcorrosie te meten. Dit wordt gedaan met behulp van vier elektrochemische testen: de *Linear Polarization Resistance* methode, de *Linear Polarization Curve* methode, de *Cyclic Polarization Curve* methode en de *Critical Pitting Temperature* methode. Deze testen worden uitgevoerd met twee staalsoorten op drie locaties, waarbij onderdompelingstijden variëren over drie perioden. Op deze manier kunnen de resultaten onderling vergeleken worden. Op basis van de verkregen waarden wordt een conclusie getrokken.

2 Corrosie

2.1 Corrosie van materialen

Corrosie wordt gedefinieerd als een degradatie van een materiaal. Corrosie komt voor bij alle materialen waarbij het de staat van het materiaal verminderd. Er bestaat ook een corrosiecyclus (Figuur 1). Dit is dan het gevolg van elektrochemische of chemische interactie met de omgeving (Umoren et al., 2022a).

Een materiaal is het meest nuttig als het lang zijn goede staat behoud. Een materiaal dat jaren meegaat is in alle opzichten beter dan een materiaal dat direct vergaat.



Figuur 1 Corrosiecyclus van ijzer en staal

Bron: Sahan, Sudarsono, Silviana, Chairul, & Wisrayetti (2018)

2.2 Economische gevolgen door corrosie

Corrosie gaf doorheen de jaren al verschillende problemen bij de mensheid. Hierbij gaat het dan vaak over veiligheidsproblemen. Hier is een rechtstreeks gevolg dat het behandelen en vermijden van corrosie een dure operatie blijft.

Het corroderen op zich kan zeer gevaarlijk worden. Kleinschalig is het roesten van huishoudelijke apparatuur en grootschalig het corroderen van auto's of bruggen. In de Verenigde Staten zijn er in de laatste 22 jaar 52 grote, door corrosie veroorzaakte klimaatgerelateerde rampen geweest. Dit gaat dan over overstromingen, droogtes, branden, orkanen, tropische stormen, vrieskou en tornado's. Naar schatting is er zo in totaal 380 miljard dollar verloren gegaan. Het zou dan gaan over 17 miljard dollar per jaar. Volgens een rapport van de NACE is de kost van corrosie ongeveer gelijk aan 3.4 procent van het BBP van de Verenigde Staten (Verma, 2022; Zehra, Mobin, & Aslam, 2022).

De kosten splitsen zich in directe en indirecte kosten. De directe kosten omvatten vooral de vervanging van gecorrodeerde metalen. Dit gaat dan over metalen constructies of machines of onderdelen.

2.3 Corrosie types

Er zijn verschillende soorten van corrosie. Zo kan corrosie worden geïdentificeerd aan de oppervlakte van een materiaal. Hier specifiek de oppervlakte van een metaal. Hierbij kan het gehele oppervlak uniform corroderen, maar ook kan het metaal zeer gelokaliseerde corroderen. Uniforme corrosie is de naam van de meest voorkomende vorm (Figuur 2). Bij putcorrosie en spleetcorrosie vormen zich spleetjes en putjes op het metaal waar de corrosie optreedt.

Galvanische corrosie treedt op in treedt op wanneer twee metalen met verschillende elektrochemische potentialen rechtstreeks met elkaar in contact staan.

De laatste vorm die besproken wordt, is spanningscorrosie, een vorm van corrosie onder invloed van interne spanningen in een materiaal. Trekspanning en de corrosieve omgeving spelen bij spanningscorrosie een grote rol.

Elke vorm van corrosie heeft zijn eigen specifieke behandelingen en eigenschappen. Hieronder wordt elk type besproken (Verma, 2022).



Figuur 2 Algemene corrosie (roesten) van de stalen ketelconstructie

Bron: Riskin & Khentov (2019)

2.3.1 Uniforme corrosie

Uniforme corrosie, of ook wel de algemene corrosie genoemd, is de meest voorkomende vorm. Deze vorm van corrosie veroorzaakt vooral aantasting van het materiaal over de gehele blootgestelde oppervlakte. Vaak gaat dit dan over de gehele metaaloppervlakte. De uniforme corrosie heeft een voortdurende verdunning op de metaalobjecten. Deze vorm is zeer gemakkelijk te herkennen alsook te identificeren (Figuur 2).

Hoe de vorm wordt gemeten is ook geen moeilijke procedure tegenover het meten van andere vormen van corrosie.

Algemene corrosie is geen gevaarlijke soort corrosie, maar toch is het uiterst essentieel om het metaal goed te onderhouden. Dit doordat de voortdurende corrosie van het metaaloppervlak zal resulteren in een ruw materiaal met als gevolg roest en schilfers. Ook kan dit leiden tot andere soorten corrosie die later besproken worden (Vargel, 2020).

Er zijn twee belangrijke aspecten bij het type van uniforme corrosie, namelijk de corrosiesnelheid en de gevoeligheid.

De corrosiegevoeligheid is het vermogen van een bepaald materiaal om corrosieve desintegratie te ondergaan. Dit heeft ook een link met de thermodynamica. Het bepaalt meestal of het materiaal wel of niet zal corroderen onder specifieke omstandigheden.

De corrosiesnelheid daarentegen bepaalt de hoeveelheid van het materiaal dat zal corroderen in mate van kwantiteit. Uniforme corrosie wordt uitgedrukt als massaverlies per oppervlakte-eenheid per tijdseenheid (Verma, 2022).

De monitoring van dit type corrosie gebeurt dan ook door het massaverlies te meten. Een massaverliesexperiment is zeer voordelig en makkelijk uit te voeren. Dit experiment is ook zeer accuraat en kan zonder moeite meerdere malen uitgevoerd worden. De deficiëntie van deze methode van het bepalen van het massaverlies kan worden opgevangen door de corrosiesnelheid te bepalen met behulp van elektrochemische testen (Verma, 2022).

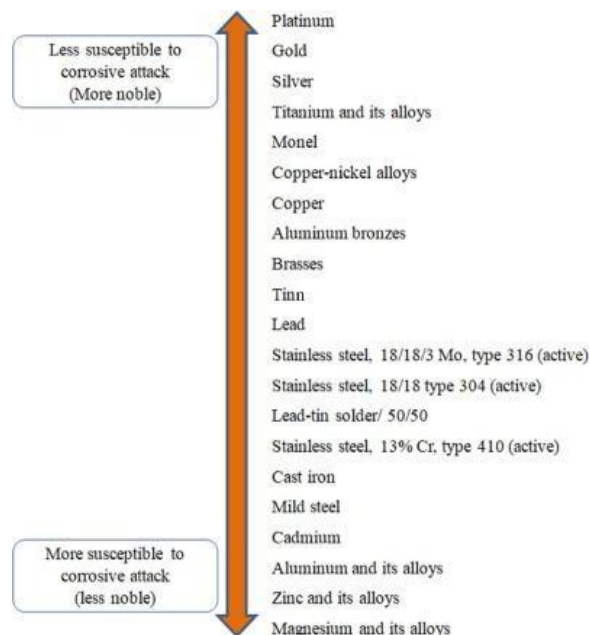
Enkele typische voorbeelden van algemene corrosie zijn het roesten van metaal en legeringen, hoge temperatuuroxidaties en ook het corroderen van waterige elektrolyten. Omdat uniforme corrosie zich gelijkmatig verdeelt over de gehele oppervlakte, zijn er een paar gemakkelijke methoden om dit te bestrijden. Relatief dikkere metalen kunnen gebruikt worden, maar ook kathodische bescherming, anodische bescherming, corrosie-inhibitoren, milieuaanpassingen, coatings en galvaniseren (Evitts & Kennell, 2018; Verma, 2022b).

2.3.2 Galvanische corrosie, spleetcorrosie en spanningscorrosie

Galvanische corrosie, ook wel bimetaalcorrosie genoemd, is een vorm van corrosie die kan optreden wanneer er twee verschillende metalen met elkaar in contact komen in een elektrolyt. Dit type corrosie heeft ook veel overeenkomsten met de galvanische cel.

Het meest voorkomende verschijnsel bij galvanische corrosie is dat er een potentiaalverschil is bij de twee gekoppelde metalen. Dit gebeurt bij een bepaalde omgeving. Zo zijn er vaak verschillende geometrische verhoudingen in de twee gekoppelde metalen die de corrosie kunnen beïnvloeden.

Hoe groter het potentiaalverschil van de twee metalen en hoe groter de kathodische oppervlakte ten opzichte van de anodische oppervlakte, hoe groter dat de anodische corrosie zal zijn (Figuur 3).



Figuur 3 Galvanische reeks van gewone metalen en legeringen

Bron: Verma (2022)

Dit type corrosie kan voorkomen worden door de elektrische verbinding te verbreken of metalen te kiezen met een gelijkaardige potentiaal. Dit kan ook beschermd worden door een coating en inhibitoren. Ook voldoende opofferingsanode voorzien kan voor bescherming zorgen.

Spleetcorrosie is een van de schadelijkste vormen van lokale metaaldegradatie. Deze vorm van corrosie heeft sterke gelijkenissen met de putcorrosie die optreedt bij stilstaande omstandigheden. Dit gebeurt ook met een elektrolyt (Oldfield & Sutton, 1978).

Spleetcorrosie ontstaat bij een wijziging van de plaatselijke chemie. Dit wil zeggen zuurstofgebrek in de spleet, stijging van de pH-waarden met verhoogde concentraties van waterstofionen en chloride-ionen. Door dit zuurstofgebrek zal er binnen de spleet geen zuurstofreductie plaatsvinden en zal er een metaaloplossing als gevolg zijn (Zehra, Mobin, & Aslam, 2022).

Overal op elk metaal kan spleetcorrosie zich vormen. Metalen die door hun weerstand afhankelijk zijn, zijn het meest gevoelig voor dit type corrosie, vooral in omgevingen met chloride-ionen. De oorzaken van spleetcorrosie doen zich voor in verschillende materialen zoals plastic en rubber. Hoeken en stilstaande zones zijn het meest kwetsbaar. Gebruik hiervoor lasverbindingen in plaats van schroeven (Zehra e.a., 2022).

Spanningscorrosie (*stress corrosion cracking*, SCC) is het scheuren van metalen structuren dat wordt veroorzaakt door de combinatie van corrosie en trekspanning (Oldfield & Sutton, 1978). Het effect van deze corrosie ligt over het algemeen bij vermoeidheid en scheuren van een materiaal. Spanningen in de metalen kunnen worden veroorzaakt door lassen, koud vervormen, slijpen en warmtebehandelingen. Deze spanningen worden vaak onderschat.

2.3.3 Putcorrosie

Putcorrosie is lokale corrosievorm die de vorming van kleine putjes in het metaal veroorzaakt. Een paar kleine putjes hebben geen invloed op sterkte van een metalen plaat, maar wel voor de romp van een schip. De structurele integriteit wordt pas verstoord als er meerdere kleine putjes zijn. Deze zorgen ervoor dat de kwaliteit van het metaal sterk achteruitgaat. Dit gaat sneller achteruit dan bij de algemene corrosie.

Er zijn verschillende parameters die de invloed van putcorrosie kunnen bevorderen of belemmeren. Dit is zeer specifiek en voor elk soort metaal anders. Zo is er de corrosieve omgeving, de chlorideconcentratie, de zuurtegraad van het elektrolyt, de concentratie van de oxidator, de temperatuur, de structurele kenmerken, de metaalsamenstelling (legeringen) en zuurstofconcentraties (Burstein et al., 2004).

Wat hoofdzakelijk bepaalt wat er gebeurt met het metaal is dat de elasticiteitsmodulus, de oppervlaktekracht en de treksterkte lokaal sterk gaan reduceren. Factoren die van belang zijn, zijn de diepte van de putjes, de diameter en de vorm. Hierbij is de diepte van het putje het belangrijkste (Yao et al., 2018).

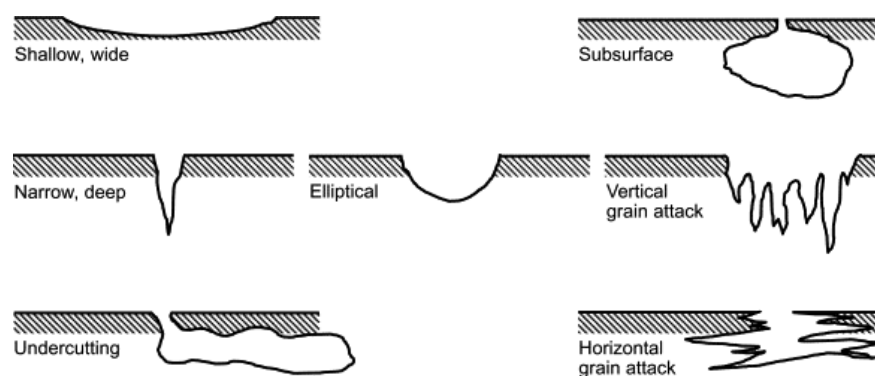
2.3.4 Microbiële Corrosie

Microbiële corrosie (MIC) is een zeer uitdagende vorm van corrosie. Het voorkomen van deze soort corrosie is hierbij nog belangrijker, vooral in de maritieme wereld en in pijpleidingen voor olie en gas. MIC is de degradatie van verschillende metalen door de invloed van micro-organismen. Corrosie kan hierbij direct of indirect evolueren door die reactieve microben. Deze microben vormen daardoor een biofilm, die dan verder bestaat uit bacteriën, schimmels en andere micro-organismen. Deze zijn echter zeer lokaal en kunnen een kleine galvanische cel maken in de omgeving. De anode is dan de putjes en de kathode is de passieve omringende omgeving. Zoals hierboven besproken zorgt een galvanische cel voor een potentiaal. Zo veranderen de elektrochemische condities op de metaaloppervlakte (Y. Li et al., 2020; Telegdi et al., 2017; Yazdi et al., 2022).

3 Putcorrosie

Putcorrosie bestaat uit drie types, elektrochemische depassivering, chemische depassivering en etsputten. Deze lijken morfologisch op elkaar, maar ze hebben elk verschillende soorten mechanismen. De eerste is de meest voorkomende en deze wordt het meest gevonden in de praktijk. Deze vorm wordt benaderd met de putpotentiaal waar deze enkel kan geobserveerd worden boven de potentiaal. Putcorrosie begint bij een kritisch punt, de kritische putpotentiaal E_{pit} . Deze wordt als maat gebruikt voor de weerstand tegen putcorrosie (Alvarez & Galvele, 2010).

Afhankelijk van de potentiaal, de chlorideconcentratie in de elektrolyt, de structuur van de legering, de dikte van de passieve laag en de chemische samenstelling van de corrosieomgeving, kunnen verschillende soorten putjes ontstaan (Figuur 4)(Bhandari et al., 2015).



Figuur 4 Dwarsdoorsnede vormen van putjes

Bron: Popov (2015)

Gelocaliseerde mechanische of chemische schade aan een passief oxide, onvoldoende bescherming door inhibitoren en oneffenheden en onzuiverheden in de metaalstructuur dragen bij tot de vorming van putcorrosie. De meest agressieve soorten zijn de halogeenionen. Deze komen ook het meeste voor in de praktijk. Chloride is bijvoorbeeld heel goed oplosbaar en een anion van een sterk zuur. Chloride in de elektrolyt verhindert de vorming of afbraak van passieve films op vele metalen en legeringen, waaronder aluminium, ijzer, nikkel en roestvrij staal. De omvang van oppervlaktepitting is evenredig met het logaritme van de chlorideconcentratie in de elektrolyt. Om de putcorrosie te initiëren moet de elektrolyt optreden als een sterke oxidator en de passieve toestand verbeteren. De oxiderende metaalionen, zoals ijzerhalogeniden, kunnen zo elektronen opnemen en hebben geen zuurstof nodig voor de putcorrosie. Zo zijn er ook andere ionen die putcorrosie kunnen veroorzaken zoals $S_2O_3^-$ (Popov, 2015b).

Bij roestvrij staal zijn er ook nog manieren om putvorming te bekomen. Niet-metalen insluitingen of tweede-fase intermetallica in de oppervlakte microstructuur laat ook putcorrosie ontstaan. Een oplossing van MnS is zo ook de eerste stap in het corroderen van roestvrij staal in putjes. Opgelost zuurstof in het elektrolyt creëert een onstabielere beschermende film. Dit zal in samenhang met chloriden putcorrosie doen ontstaan (Popov, 2015b).

4 Verband tussen putcorrosie en microbiële corrosie

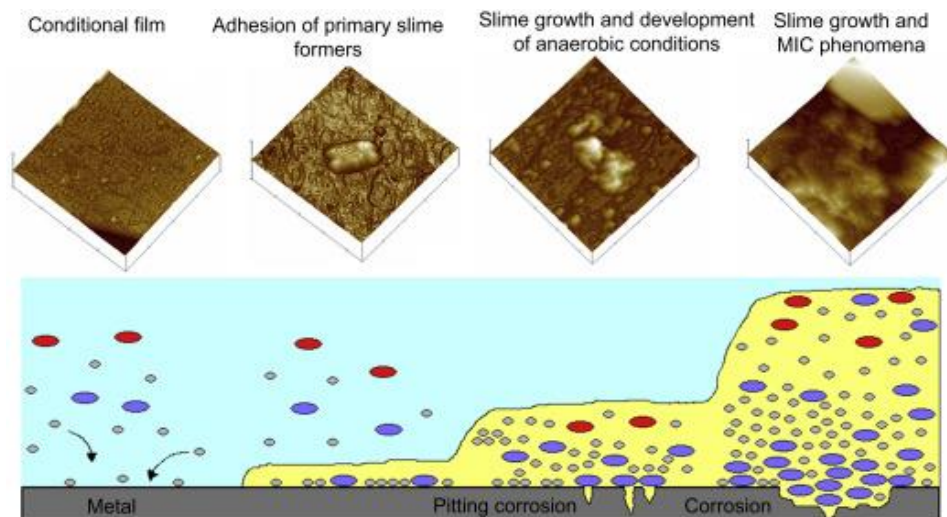
Voor elektrochemische processen, en dus ook putcorrosie, is er een medium nodig om ionen te kunnen overdragen. Dit wordt de elektrolyt genoemd en in de meeste gevallen is dat water. Water heeft zeer goede elektrische geleidbaarheid en kan zo de nodige elektrische ladingen tussen twee stoffen doorgeven. Zo is water op zichzelf geen elektrolyt maar kan water wel een uitstekende kandidaat zijn met zijn eigenschappen. In vele industrieën wordt er gedemineraliseerd water gebruikt. Omdat water in de praktijk slecht geleidend is en zo minder kans heeft op corrosie. Zeewater daarentegen heeft veel mineralen en zout in zijn oplossing en is daarom een goede elektrolyt om te zorgen voor een anode en een kathode. Het is echter niet toevallig dat bacteriën ook graag water verkiezen om in te leven. Hun nodige voedsel en chemicaliën zitten in water. Dit gaat ook over vocht in de bodem of in andere plekken. Zo zijn deze ideaal voor MIC en elektrochemische corrosie. Om MIC te begrijpen moet er kennis zijn over microbiologie en elektrochemische corrosie (Javaherdashti & Alasvand, 2019).

4.1 MIC

MIC is geen precies type van corrosie, het is eerder een proces. Hiermee wordt bedoeld dat er gezocht wordt naar een manier om dit proces te behandelen. Elektrochemische microbiële corrosie kan zo makkelijker begrepen worden doordat bacteriën als een levende kathode worden beschouwd door hun opname van elektronen. MIC is nooit geassocieerd met één micro-organisme. Zo zijn er verschillende groepen bacteriën die elk verantwoordelijk kunnen zijn voor een vorm van MIC, zoals de sulfaatreducerende bacteriën (SRB), de ijzeroxiderende bacteriën (IOB) en de ijzerreducerende bacteriën (IRB) (Tabish et al., 2022; Yazdi et al., 2022).

4.1.1 Biofilm

Wat altijd centraal staat bij microbiële corrosie is het concept van een biofilm. Waar een biofilm ontstaat zal er naar verwachting veel corrosie optreden. Daaruit wordt er geconcludeerd dat MIC en biofilm vorming dicht bij elkaar staan. Verschillende bacteriën hechten zich samen aan oppervlaktes om zo samen een groep te maken (Figuur 5). Als bacteriën voedsel vinden in hun omgeving blijven ze graag beweeglijk of anders planktonisch genoemd. Indien dit niet het geval is zakken de bacteriën naar de bodem of wand en hechten ze zich daar vast. Dan worden ze bewegingsloze bacteriën genoemd. Het zijn deze bacteriën die de biofilm gaan vormen (Telegdi et al., 2017). Hierbij kunnen plaatsen ontstaan met hoge en lage partiële zuurstofdruk. Dit kan nog meer worden beïnvloed door een andere vorm van een elektrochemische cel, gekend als een ionconcentratiecel. Deze cel kan dan zo een agressieve omgeving vormen die de corrosie zal laten toenemen (Gu, 2018; K. Li et al., 2013).



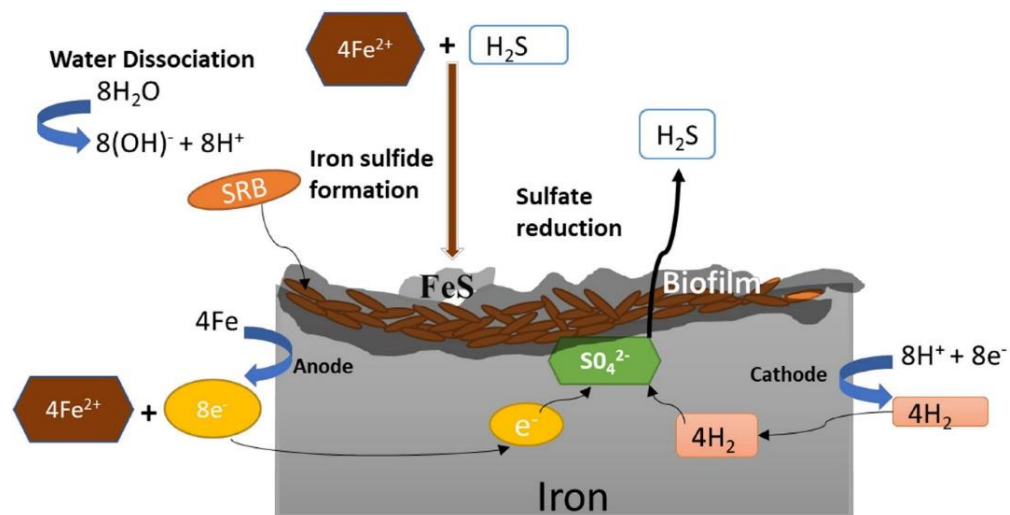
Figuur 5 Stapsgewijze vorming van de biofilm

Bron: Telegdi, Shaban, & Trif (2017)

Een laatste belangrijke opmerking over de biofilm is dat het ook gevaarlijk kan zijn. De groei van de biofilm maakt niet enkel corrosie gerelateerde bacteriën aan, maar ook pathogene bacteriën, zoals *Legionella*. De beheersing van de biofilm is dus ook belangrijk voor de veiligheid, gezondheid en het milieu (Javaherdashti & Alasvand, 2019).

4.1.2 Sulfaatreducerende bacteriën

Sulfaatreducerende bacteriën zijn de meest bestudeerde bacteriën omwille van de industrie. Sulfaatreducerende bacteriën, of SRB die aeroob groeien, staan bekend voor het reduceren van sulfaat SO_4^{2-} naar sulfide S^{2-} . Zonder een aanwezig metaal met metaalionen wordt er een gas H_2S gevormd, maar met de aanwezigheid van een metaal zoals ijzer wordt er ijzersulfide of zwarte roest gevormd. SRB kan overal gevonden worden van de bodem tot in het zeewater (Javaherdashti & Alasvand, 2019). Dit kan schematisch worden voorgesteld (Figuur 6).



Figuur 6 Mechanisme van MIC van ijzer door SRB

Bron: Tripathi e.a. (2021)

Deze bacteriën kunnen zeer snelle corrosiesnelheden halen die kunnen oplopen tot 10mm per jaar. Onderzoekers vinden deze bacteriën vaak zeer opmerkelijk omdat ze anaeroob zijn in een wereld vol zuurstof. Daaruit zijn vele theorieën ontstaan om deze snelle corrosiesnelheden te verklaren (Y. Li et al., 2020).

4.1.3 Nitraatreducerende bacteriën

Wat meer bekend is bij de petroleum-en gasindustrie zijn de nitraatreducerende bacteriën, ofwel de NRB. In vele gevallen wordt er nitraat geïnjecteerd om de groei van NRB te bevorderen en de ontwikkeling van de SRB tegen te gaan (Wang & Melchers, 2017). Dit wordt gedaan omdat de NRB thermodynamisch veel gemakkelijker zijn om te bestrijden en te vermijden (Liu et al., 2022). Niet-verontreinigd zeewater bevat geen nitraat in tegenstelling tot sulfaat (Tabish et al., 2022).

4.1.4 Ijzeroxiderende -en reducerende bacteriën

Ijzerbacteriën behoren bij de aerobe groep van bacteriën. Zo zijn er de ijzer oxiderende bacteriën, IOB en de ijzer reducerende bacteriën, IRB. Deze hebben elk een verschillende werking (Telegdi et al., 2017).

De ijzer oxiderende bacteriën maken gebruik van de ijzerionen waarbij de gekleurde afzettingen te wijten zijn aan ijzerhoudende zouten. Dit zijn gewoonlijk hydroxiden. Er zijn theorieën die zeggen dat de biofilms van IOB een direct effect hebben op de chemische reacties van de passieve films door aanhechting en afzetting van metaaloxiden. Deze oxiden hebben dan de neiging om het potentiaal van de passieve metalen edeler te maken. Dit heeft dan een rechtstreekse invloed die plaatselijke corrosie kan bevorderen (Telegdi et al., 2017).

De ijzerreducerende bacteriën kunnen ook bijdragen aan corrosie. Ze zetten onoplosbaar ijzer om naar oplosbare ijzerionen. Deze kunnen helpen bij de vorming van een beschermende film, maar ze zijn erg oplosbaar dus zal het oppervlak worden blootgesteld aan de corrosieve omgeving (Javaherdashti & Alasvand, 2019).

4.1.5 Zuurproducerende bacteriën

Zuurproducerende bacteriën, of ook APB genoemd zijn het product voor één van de meest corrosieve metaboliëten die door microben worden gemaakt, namelijk de zuren. Deze zouden organische en anorganische zuren kunnen produceren. De APB zou kunnen beschouwd worden als een scheppende voorwaarde van een verhoogde agressiviteit van de SRB. De APB zouden nu gedocumenteerd worden als een belangrijke oorzaak van corrosie doordat ze door fermentatieve activiteiten de plaatselijke pH doen dalen. Dit doen ze hoofdzakelijk in de biofilms (Tabish et al., 2022).

4.1.6 Schimmels

Schimmels zijn eukaryote micro-organismen en in verbinding met MIC zijn deze niet zo veel bestudeerd. Ze kunnen wel een prominente rol spelen in warme en vochtige omgevingen. In een natuurlijke omgeving wordt zuurstof geabsorbeerd door schimmelbiofilms en het ondersteunt daarbij de anaerobe microben zoals de SRB om onder de biofilm te leven (Tabish et al., 2022).

5 Onderzoeksdoelstelling

In de jachthaven van Zelzate is de afgelopen jaren een aanzienlijke hoeveelheid uniforme en putcorrosie waargenomen op de romp van diverse boten. Deze corrosie wordt veroorzaakt door elektrochemische en microbiële processen. De eigenschappen en samenstelling van het water, die variëren over het gehele kanaal Gent-Terneuzen, spelen hierbij een cruciale rol. Uniforme corrosie en putcorrosie kunnen op verschillende manieren worden gemeten, waarbij de meest gangbare methode de *weight loss* methode is. Deze methode is echter niet de meest efficiënte en vergt een aanzienlijke hoeveelheid tijd. Daarom is er behoefte aan een betere meetmethode.

Deze thesis onderzoekt de mogelijkheid om uniforme corrosie en putcorrosie te meten met behulp van elektrochemische methoden. Hierbij wordt tevens beoordeeld of deze methoden praktisch uitvoerbaar zijn op locatie of in een laboratoriumopstelling. Het onderzoek bestaat uit twee delen.

Het eerste deel omvat een beschrijvende literatuurstudie waarin de relevante termen en theorieën worden uitgelegd. Daarnaast wordt in de literatuur gezocht naar mogelijke methoden om corrosie te meten, zonder daarbij de haalbaarheid van deze methoden in beschouwing te nemen.

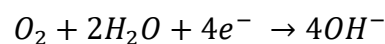
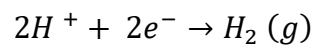
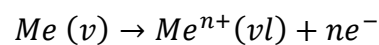
Het tweede deel betreft het praktische onderzoek, waarin de mogelijkheden worden onderzocht om uniforme corrosie en putcorrosie te meten. Dit wordt gedaan met vier elektrochemische testen, namelijk de *Linear Polarization Resistance* methode, de *Linear Polarization Curve* methode, de *Cyclic Polarization Curve* methode en de *Critical Pitting Temperature* methode. Deze testen worden uitgevoerd met twee staalsoorten op drie locaties, met onderdompelingstijden variërend over drie perioden, zodat de resultaten onderling vergeleken kunnen worden. Op basis van de verkregen waarden wordt een conclusie getrokken, die ook antwoord geeft op de onderzoeksdoelstelling.

6 Basisbegrippen voor de elektrochemie

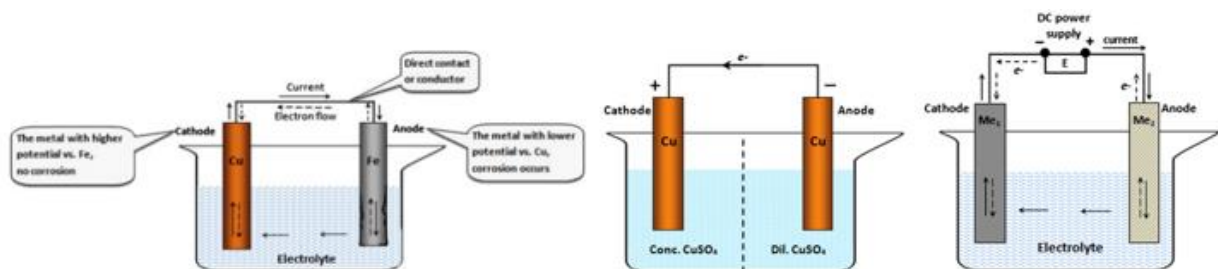
Om de corrosieprocessen te beschrijven is er een zekere basiskennis nodig over de elektrochemische begrippen die ook voorkomen in de thermodynamica. Hier zullen kort enkele begrippen besproken worden.

6.1 Elektrochemisch proces

Een corrosiereactie bestaat uit twee onderdelen. Dit is de oxidatiereactie van het metaal, ofwel de anodische reactie genoemd, en de reductiereactie van de omgeving of de kathodische reactie. In verschillende omgevingen gaat dit over de reductie van protonen ofwel over de reductie van zuurstofgas. Hieronder de 3 reacties (Virtanen, 2011):



Deze chemische reacties maken in praktijk deel uit van een elektrodeproces. Daarin bestaat er een elektrode en een elektrochemische cel. Hiervan is de elektrode een serie van geleidende fasen door een elektrolyt verbonden en bestaat de cel uit verschillende geleidende fasen, begrensd door 2 elektroden. Van die cel bestaan er drie types (Figuur 7), namelijk de Galvanische cel, de concentratie cel en de temperatuur differentiaal cel (Riskin & Khentov, 2019).

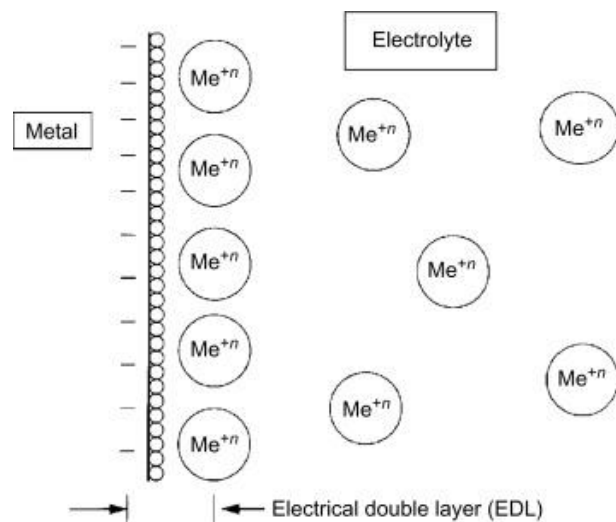


Figuur 7 Typische galvanische cel, zoutconcentratie cel en elektrolytische cel

Bron: Riskin & Khentov (2019)

6.2 Elektrische dubbele laag

Een elektrische dubbele laag, of EDL, wordt gevormd bij een metaal dat ondergedompeld is in een vloeistofomgeving. In deze complexe laag bij water worden de watermoleculen aangetrokken door de negatieve metaaloppervlakte. De wateradsorptie zorgt voor een verstoring van het evenwicht, waardoor de atomen van het metaal de oppervlakte verlaten als ionen. Vaak wordt dit in een basismodel beschreven (Figuur 8) (D. Li, 2004).



Figuur 8 Een evenwichtsmodel voor de elektrische dubbele laag

Bron: Tait (2018)

6.3 Gibbs-energie van elektrochemische cel

De vergelijking van Gibbs drukt de vrije energie van Gibbs uit als functie van de corrosiepotentiaal als

$$\Delta G = -nFE$$

Hierbij staat ΔG voor de Gibbs vrije energie, n voor het aantal elektronen in de anodische reactie, F voor de constante van Faraday en E voor het corrosiepotentiaal (Virtanen, 2011). De evenwichtsreactie van ijzer dat corrodeert is $Fe^0 \leftrightarrow Fe^{+2} + 2e^-$. Als de ΔG negatief is worden er ijzerionen gecreëerd. Bij water zal de reactie spontaan corroderen want de corrosiepotentiaal zal hier rond de -700mV zitten (Tait, 2018).

Deze Gibbsvergelijking kan dus gebruikt worden om te bepalen of corrosie al dan niet zal optreden.

6.4 Vergelijking van Nernst

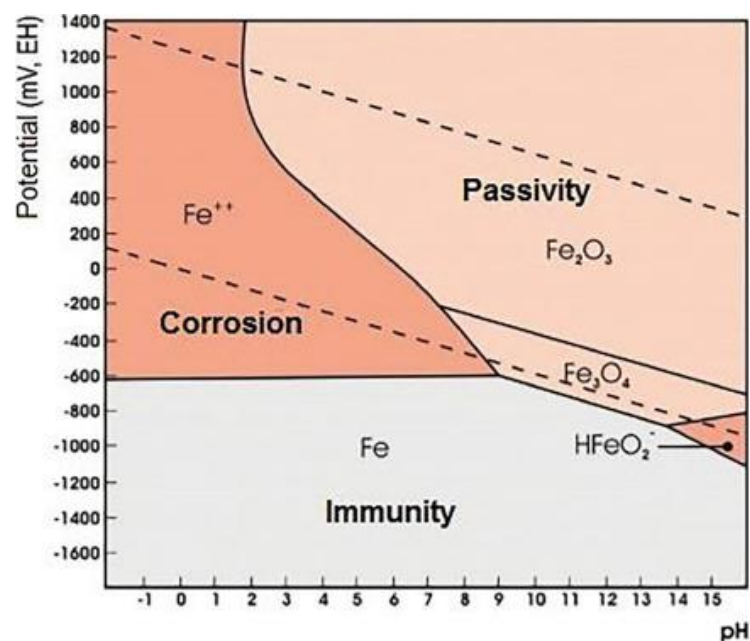
De elektrodepotentiaal kan ook berekend worden door de Nernst vergelijking. Deze vergelijking vat de samenhang van de elektrische dubbele laag en de elektrodepotentiaal samen. De vrije Gibbs energie is de basis van de vergelijking (Dincer et al., 2018).

$$E = E^0 - \left(\frac{RT}{nF}\right) \ln\left(\frac{ox}{red}\right)$$

Hierbij staat E^0 voor de standaard potentiaal, is R de gasconstante, T de temperatuur in K, F de Faraday constante, n de hoeveelheid elektronen in de chemische oxidatie-en reductiestoffen. De Faraday constante vertelt ons dat er een evenredig verband is met de hoeveelheid stroom en de grootte van de lading op de metaalionen (Tait, 2018).

6.5 Pourbaix diagram van ijzer

De basis van de thermodynamische eigenschappen van de corrosiereactie geeft het Pourbaix diagram of ook wel het potentiaal pH diagram genoemd (Figuur 9). Dit diagram geeft de punt aan wanneer ijzer al dan niet zal corroderen. Ook zal deze aanwijzen of ijzer immuun is en niet zal veranderen van staat (Sanni et al., 2023).



Figuur 9 Het potentiaal-pH-diagram voor ijzer aan watersysteem ijzer-water bij 25°C

Bron: Sanni e.a. (2023)

7 Corrosiereacties

7.1 Overspanning

Polarisatie komt van een halfreactie van een metaal. De anodische en kathodische reactie van die halfreactie geven de afwijking van de potentiaal E_M ten opzichte van de evenwichtspotentiaal $E_{298/M}$.

$$\eta = E_M - E_{298/M}$$

Hiermee kan rechtstreeks de overspanning η gevonden worden. Dit is dan de grootte van de afwijking van het evenwichtspotentiaal. Er bestaat een verband tussen de overspanning en de stroomdichtheden. Hierbij wordt de Butler-Volmer vergelijking gebruikt (Popov, 2015a).

7.2 Snelheid van een corrosiereactie

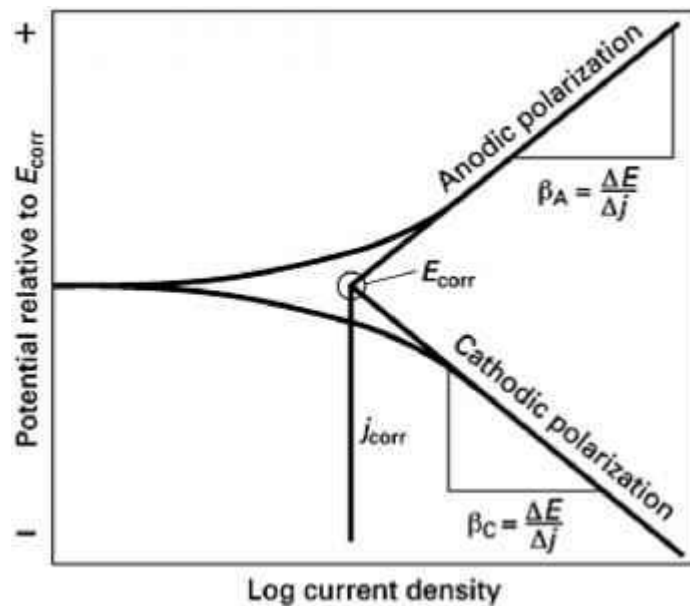
Corrosiestroomdichtheid is het begrip voor de stroom tussen 2 elektroden in een galvanische cel. De anodische stroom is negatief en de kathodische stroom is positief. Daaruit komen rechtstreeks de anodische stroomdichtheid en de kathodische stroomdichtheid. Dit heeft te maken met de potentiaal. De stroomdichtheid wordt gegeven in A/cm². De som van de anodische stroomdichtheid en de kathodische stroomdichtheid is gelijk aan nul, zoals hieronder beschreven. Dit is hetzelfde voor de stroom. Hier is een evenwicht (Pauwels, 2021).

$$I_a + I_c = 0 \text{ en } i_a + i_c = 0$$

7.3 Polarisatiecurve

7.3.1 Tafel-plot

Een van de meest gekende wetten van de elektrochemie wordt beschreven door de wetten van Tafel. Deze worden gebruikt om de kinetische aspecten van de corrosiereactie te bestuderen (Figuur 10). Zo zijn er twee bekende methoden om de corrosiekinetiek te meten die gebaseerd zijn op polarisatiemetingen. De eerste hiervan noemt men de *Tafel slope* extrapolatie en de tweede de Stern Geary-methode met een lineaire polarisatieweerstandsmethode. Tafel vond dat voor een elektrochemische reactie, die plaatsvindt op een corroderend metaaloppervlak, de logaritme van de stroomdichtheid lineair varieert met het potentiaal van de elektrode (Sanni et al., 2023).

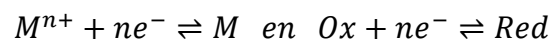


Figuur 10 Tafel plot om de corrosiestroomdichtheid te bepalen

Bron: 'Tafel Plot Corrosion—Corrosion Resistance' (2023)

7.3.2 Evans Diagram

Het uitzetten van de twee Tafelplots tot één plot noemt men het Evans diagram, zoals op de bovenstaande figuur. Deze zijn dus de oxidatie en de reductie plot samen op één diagram.



$$\eta_a = \beta_a \cdot \log \frac{i_a}{i_0} \text{ anodische en } \eta_c = \beta_c \cdot \log \frac{i_c}{i_0} \text{ kathodische}$$

Met deze twee plots kunnen de theoretische corrosiestroom en de corrosiepotentiaal gevonden worden door twee feiten. Een ondergedompeld coupon heeft op elk moment één potentiaal. Alle reacties vinden plaats bij deze potentiaal. Ook moeten de reacties met dezelfde snelheid plaatvinden. Het is daarbij nuttig om in te schatten hoeveel de invloed is van een verandering in de oxidatie -en reductiesnelheid (*Tafel Plot and Evans Diagram*, z.d.).

7.3.3 Polarisatiecurve

Het gebruik van het Evans diagram is helaas enkel voor het gebruik van kwalitatieve schattingen. De verschillende invloeden en kwantitatieve data zorgen ervoor dat de polarisatiecurve altijd gepaard gaat met een experiment. Voor dit experiment wordt de polarisatiecurve gebruikt (Bhandari et al., 2015).

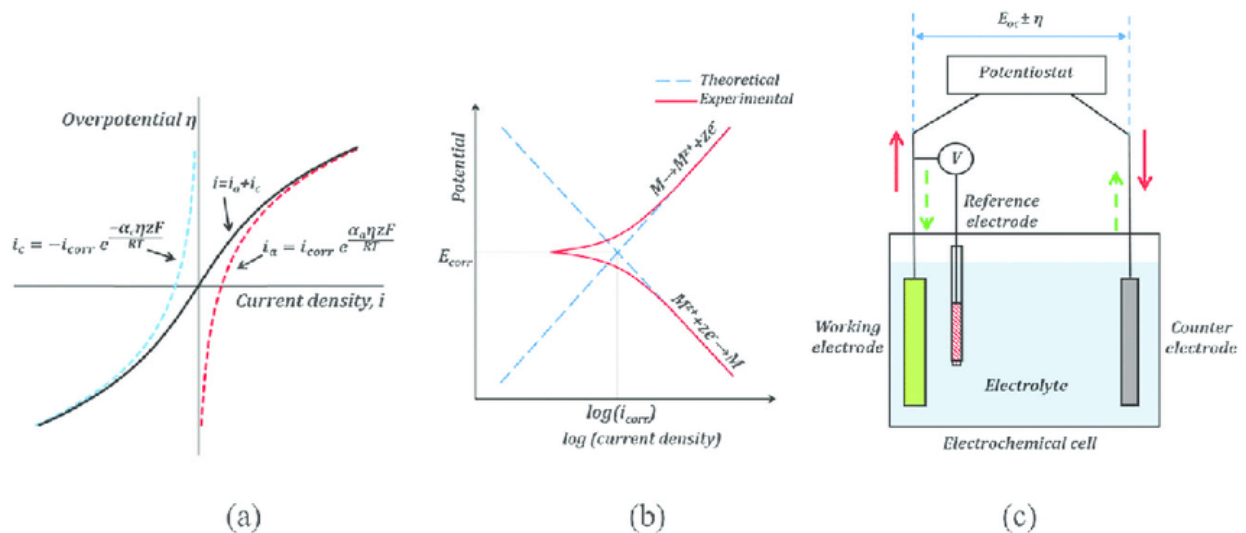
7.3.4 Butler-Volmer vergelijking

In het algemeen beschrijft de Butler-Volmer vergelijking de kinetiek van een redoxreactie in de buurt van de formele potentiaal.

$$i = i_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{\alpha \cdot n \cdot F}{R \cdot T} \cdot \eta \right)} - e^{\left(-\frac{(1-\alpha) \cdot n \cdot F}{R \cdot T} \cdot \eta \right)} \right) \text{ (Tait, 2018)}$$

In deze formule wordt de nettostroomdichtheid gegeven. Deze formule kan ook gesplitst worden naar de kathodische -en anodische stroomdichtheid (Pauwels, 2021). Het rode deel van de formule staat voor de anodische stroomdichtheid en het blauwe staat voor de kathodische stroomdichtheid. In Figuur 11 staat er ook al een proefopstelling genaamd de drie-elektroden-testcel.

In deze 2 diagrammen staan het lineair diagram en het semi-logaritmisch diagram (Figuur 11).

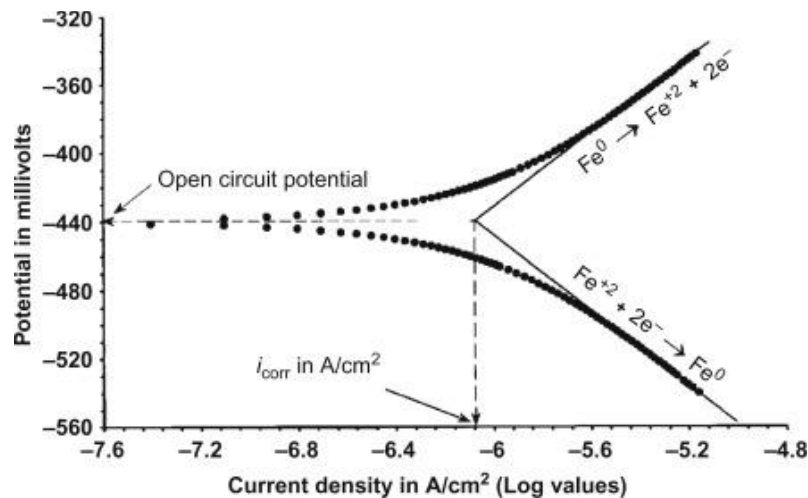


Figuur 11 a) Een typische Butler-Volmer vergelijking (b) De Tafel plot van de nettostroom (c) Drie-elektroden-testcel

Bron: Ramachandran & Nosonovsky (2015)

7.3.5 Open circuit potential (OCP)

In Figuur 12 staat het buigpunt van de curve gegeven. Dit is ook waar de potentiaal geen netto stroom naar de elektrode doet stromen. De corrosiestroomdichtheid kan dus geschat worden door de lineaire delen van de vertakkingen te extrapoleren naar de OCP (Tait, 2018).



Figuur 12 Een Butler-Volmer stroom-potentiaal curve

Bron: Tait (2018)

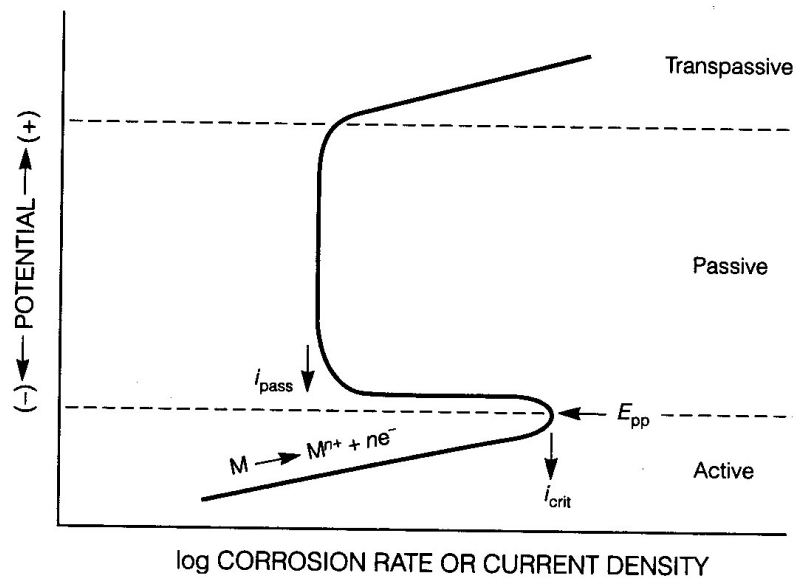
7.4 Passivatie

Een metaal kan passief worden in specifieke omstandigheden door de vorming van een beschermende laag. In vele gevallen is dit een oxide of een zout dat weinig oplosbaar is. Deze film wordt door passivatie gevormd. Zo bestaat er de anodische passivatie en de chemische passivatie (Virtanen, 2011).

Chemische passivatie ontwikkelt op de passiverende metalen en is te danken aan een onzichtbare dunne oxidefilm. Het oxide bepaalt de potentiaal ten opzichte van het milieu. Anodische passivatie daarentegen, is het stijgen van de concentratie van het kation Me^{z+} en vaak een stijgende pH bij het gecorrodeerde materiaal. Dit kan altijd gebeuren wanneer het afzetten van een oplosbaar zout mogelijk is. De lokale omstandigheden zijn hiervoor sterk bepalend. De overgangsfase van passivatie naar corrosie en andersom kan met de polarisatiecurve van het milieu bestudeerd worden (Pauwels, 2021).

7.4.1 Passivatie van ijzer

In dit voorbeeld wordt het ijzer in een zuur geplaatst (Figuur 13). Wanneer de potentiaal stijgt is de ladingsoverdracht de bepalende stap van oxidatie van ijzer. Indien deze nog meer stijgt, ontstaat er een dunne beschermende oxidelaag. Dit geeft een rechtstreekse daling van de corrosiesnelheid (Pauwels, 2021).

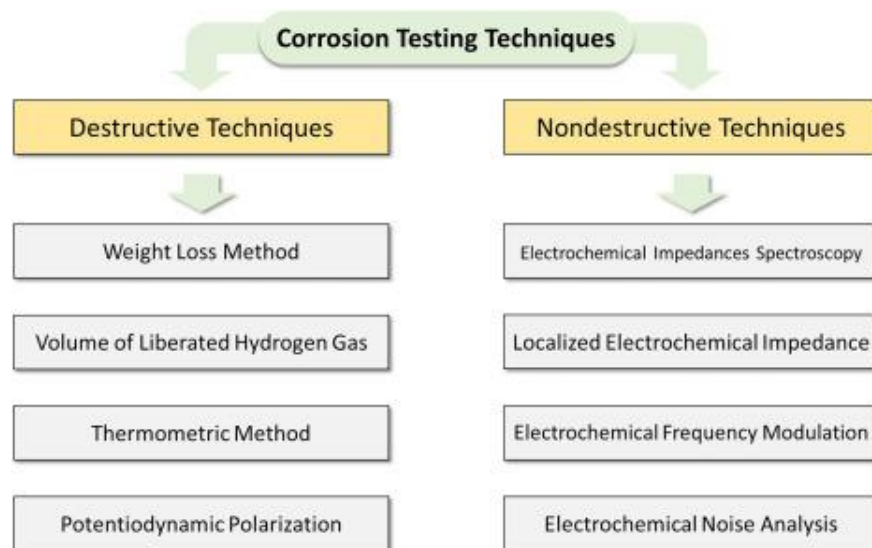


Figuur 13 Passivatie van een metaal

Bron: Pauwels (2021)

8 Meten van corrosie

In dit onderzoek staat het meten van corrosie centraal, om uiteindelijk de putcorrosie te kunnen meten. Laboratoriumproeven op corrosie zijn gewoonlijk de best bestaande bron voor bedrijven die constructies maken op basis van deze proeven. Corrosie kan gemeten worden op twee manieren. Dit kan met een destructieve en een niet-destructieve methode. Daarin zijn nog vele testtechnieken die worden gebruikt Figuur 14 (El Ibrahimi & Berdimurodov, 2023).



Figuur 14 Laboratoriumtechnieken om het verschijnsel corrosie te bestuderen

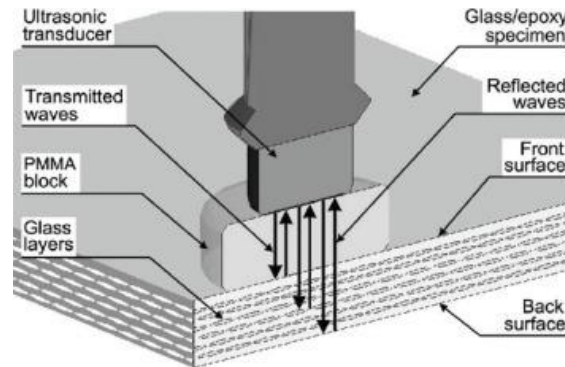
Bron: El Ibrahimi & Berdimurodov (2023)

8.1 Gewichtsverlies

De langst bestaande en eenvoudigste techniek om corrosie te meten is het bepalen van het gewichtsverlies. Voor deze destructieve methode om de corrosiesnelheid te bepalen wordt er gebruikt gemaakt van coupons. Deze worden op voorhand zeer precies gewogen en vervolgens in het proces geplaatst. Na een tijdsinterval worden de coupons verwijderd en gereinigd zonder het metaal te beschadigen. Het gewichtsverlies wordt omgezet naar een corrosiesnelheid of een massaverlies (El Ibrahimi & Berdimurodov, 2023).

8.2 Dikteverlies

Voor het dikteverlies te meten is de *Ultrasonic thickness technique* de meest efficiënte manier voor in de praktijk (Figuur 15). Het maakt gebruik van ultrasone golven. De proef kan bij elke wand of vat worden toegepast.



Figuur 15 Schematisch diagram van het ultrasoon onderzoek

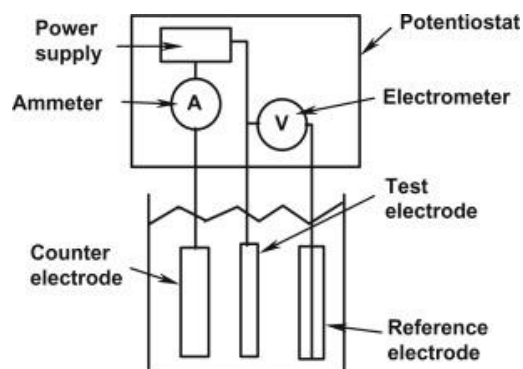
Bron: Sanni e.a. (2023)

8.3 Elektrochemische methoden

Voordat de elektrochemische methoden kunnen besproken worden moet er eerst een kennis zijn van de gebruikte toepassingen van een proefopstelling. Sommige toepassingen zijn hierboven al besproken.

8.3.1 Drie-elektroden-testcel

In deze opstelling worden drie elektroden gebruikt. Een test elektrode, een counter elektrode en een referentie-elektrode (Figuur 16). De referentie-elektrode is onmisbaar om een elektrodepotentiaal te meten. Onder normale omstandigheden is de referentiepotentiaal voor alle elektrochemische spanningen de potentiaal van de normaalwaterstofelektrode (NWE). In de praktijk is het gebruik van een NWE niet zo eenvoudig. Daarom wordt er vaak een kalomelektrode gebruikt die in contact komt met een KCl- oplossing. Deze heeft een spanning van +210mV ten opzichte van de NWE (Pauwels, 2021; Tait, 2018).



Figuur 16 Schema van een testcel met drie elektroden

Bron: Tait (2018)

8.3.2 Potentiostaat

Een potentiostaat is een elektronisch apparaat dat het potentiaalverschil of spanningsverschil tussen twee elektroden meet en regelt. De meetelektroden kunnen zeer klein zijn, zoals micro-elektroden in een geleidende oplossing, maar ook een gecoate metalen coupon in een zure omgeving. Een opstelling met drie elektroden is ook mogelijk (*Potentiostat*, z.d.).

8.3.3 Corrosion standards

8.3.3.1 American Society for Testing and Materials (ASTM)

ASTM International is een organisatie die instaat voor de ontwikkeling en levering van vrijwillige consensusstandaarden. Zo zijn er meer dan 12000 ASTM-standaarden en deze worden wereldwijd gebruikt voor kwaliteit te verbeteren en gezondheid en veiligheid te waarborgen. Dit gebeurt ook in de corrosie-industrie. 3000 experts uit 140 landen creëren testmethoden, specificaties en richtlijnen die industrieën en overheden ondersteunen (*Detailed overview - Overview - About Us*, z.d.).

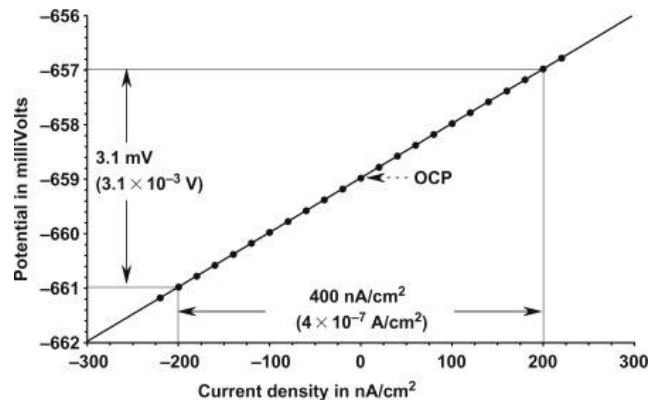
8.3.3.2 International Organization for Standardization (ISO)

De International Organization for Standardization (ISO) is een internationale non-gouvernementele organisatie die wereldwijd normen vaststelt om consistentie en kwaliteit te bevorderen in verschillende sectoren, zoals technologie, industrie, gezondheidszorg en voedsel. ISO-normen worden erkend als referentiepunten voor goede praktijken en worden gebruikt om productkwaliteit, efficiëntie en veiligheid te waarborgen in internationale handel en samenwerking (*ISO - What We Do*, 2022).

8.3.4 Linear polarization resistance technique (LPR)

De lineaire polarisatietechniek schat onmiddellijke corrosiesnelheden onder verschillende procesomstandigheden (Figuur 17). De Stern-Geary vergelijking wordt hiervoor gebruikt voor het omgekeerd evenredig verband tussen de corrosiestroom en de polarisatieweerstand. Zo kan de polarisatieweerstand direct worden omgezet naar corrosiesnelheden. De stroom volgt zo de toegepaste overspanning en kan zo de polarisatieweerstandcurve automatisch uitzetten (Tait, 2018).

Het grootste voordeel is dat het potentiaalspectrum zeer klein is en de LPR als non-destructieve test wordt gezien. De test kan meerdere malen worden uitgevoerd op éénzelfde elektrode.



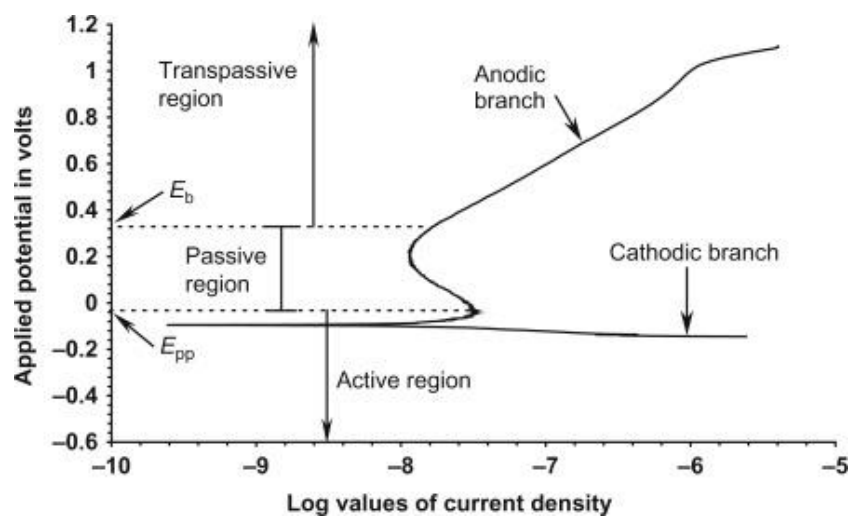
Figuur 17 Schatting van corrosieweerstanden met lineaire polarisatiegegevens

Bron: Tait (2018)

8.3.5 Potentiodynamic polarization (PDP)

Potentiodynamic polarization is een van de meest gebruikte gelijkstroom, DC elektrochemische methode bij corrosiemetingen. De PDP wordt op een breed scala van potentialen op de testelektrode gezet. Dit geeft een curve voor de anodische tak. De primaire passiveringspotentiaal, E_{pp} , is de potentiaal waarna de stroom afneemt. De afbraakpotentiaal, E_b , is de potentiaal waarbij de stroom toeneemt met toenemende potentiaal (Umoren et al., 2022b).

Deze grootheden, samen met de breedte van het passieve gebied, kunnen gebruikt worden om het corrosiegedrag te evalueren en te karakteriseren. Corrosie komt voor in het actieve gebied. Putcorrosie kan ook in het transpassieve gebied voorkomen (Tait, 2018).

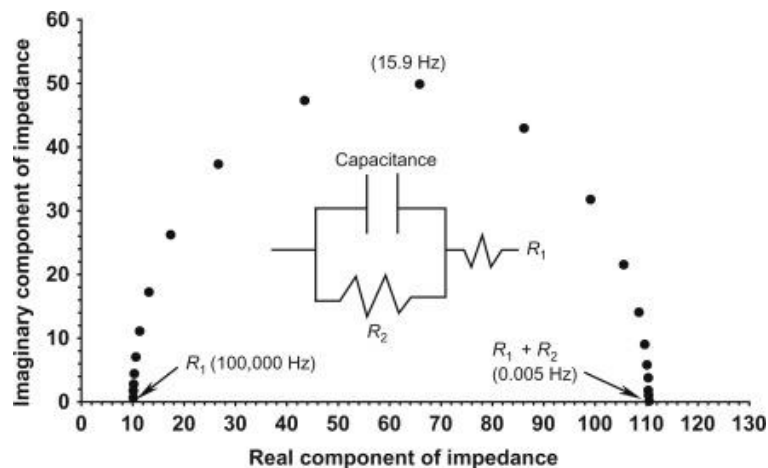


Figuur 18 PDS curve for passive corrosion behavior

Bron: Tait (2018)

8.3.6 Electrochemical impedance spectroscopy (EIS)

Electrochemical impedance spectroscopy, of EIS, onderzoekt de reactie van het corroderende systeem op wisselstroom, AC. Het doet dit aan de hand van frequenties van 100 MHz tot 100KHz. De stroom of spanning wordt gemeten wanneer een kleine amplitude spanning of stroom wordt toegepast op de werkende elektrode. De spanningen gaan van de anodische piek naar de kathodische piek en andersom.



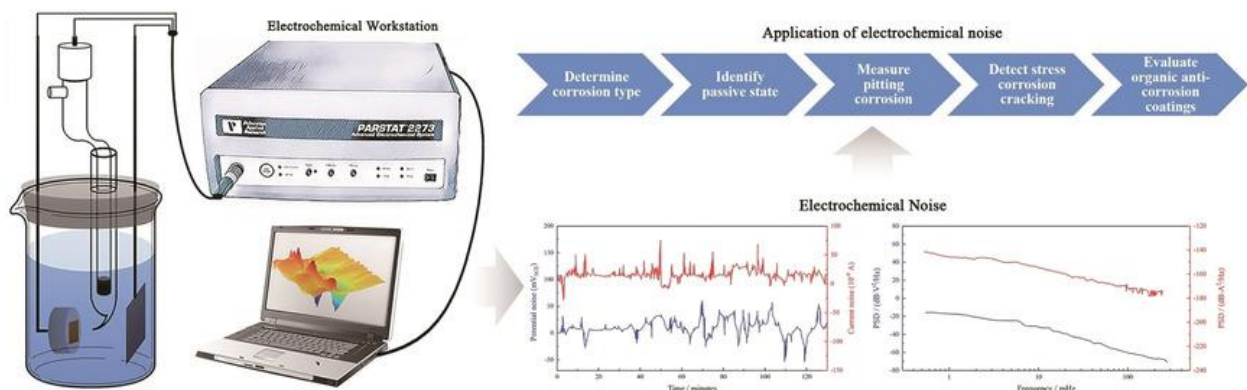
Figuur 19 Enkelvoudige tijdconstante complex vlak plot

Bron: Tait (2018)

In Figuur 19 is er maar een enkel tijdsslot opgenomen. EIS-metingen kunnen meer dan één tijdsslot produceren, maar deze zijn meer complex (Tait, 2018).

8.3.7 Electrochemical Noise (EN)

Elektrochemische ruis, of EN, is een term die de variaties in potentiaal en stroom beschrijft die spontaan optreden als gevolg van veranderingen in de elektrodekinetiek en zijn processen. EN beschrijft spontane variaties in potentiaal en stroom die gevonden worden bij de vrije corrosiepotentiaal bij corrosieonderzoek (Figuur 20). EN kan ook worden onderverdeeld in twee types: *potential noise* en *current noise* (Umoren et al., 2022b).

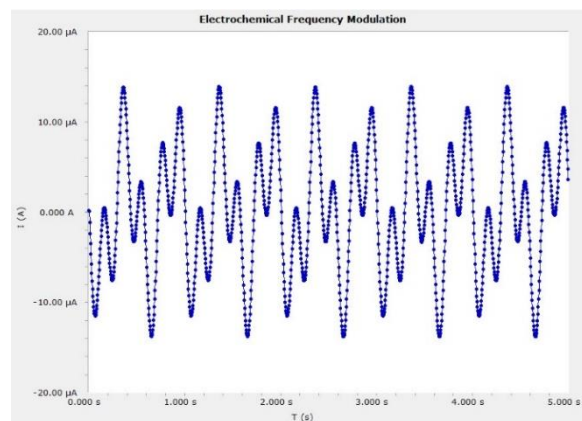


Figuur 20 De toepassing van elektrochemische ruis voor de studie van metaal

Bron: Lv e.a. (2021)

8.3.8 Electrochemical Frequency Modulation (EFM)

Elektrochemische frequentiemodulatie of EFM is een niet-destructieve corrosiemeetmethode die meteen corrosiestroomwaarden kan opleveren zonder Tafel constanten. Corrosie is een niet-lineair proces, daarom zou een potentieel verstoringssignaal met sinusgolven stroomreacties kunnen veroorzaken. Hierbij zouden de frequenties groter zijn dan die van de toegepaste signalen. Het verstoringssignaal bij EFM bestaat uit twee sinusgolven van verschillende frequenties. Bij dit voorbeeld (Figuur 21) kan dit principe gebruikt worden om de corrosiesnelheid te vinden.

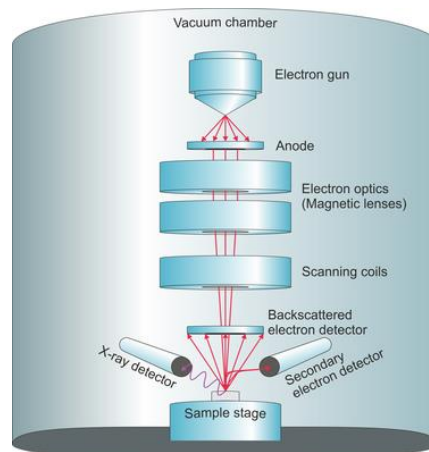


Figuur 21 Voorbeeld van EFM

Bron: 'Electrochemical Frequency Modulation-EFM140-Corrosion Rate Measurement Gamry Instruments' (z.d.)

8.3.9 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy, of SEM, is een methode om oppervlakten met hoge resolutie af te beelden. Voor deze beeldvorming maakt de SEM gebruik van elektronen (Figuur 22). Een energie dispersieve röntgenspectrometer wordt samen met de SEM gebruikt om kwalitatieve en kwantitatieve chemische analyse-informatie te verkrijgen (Qian et al., 2021; Umoren et al., 2022b).

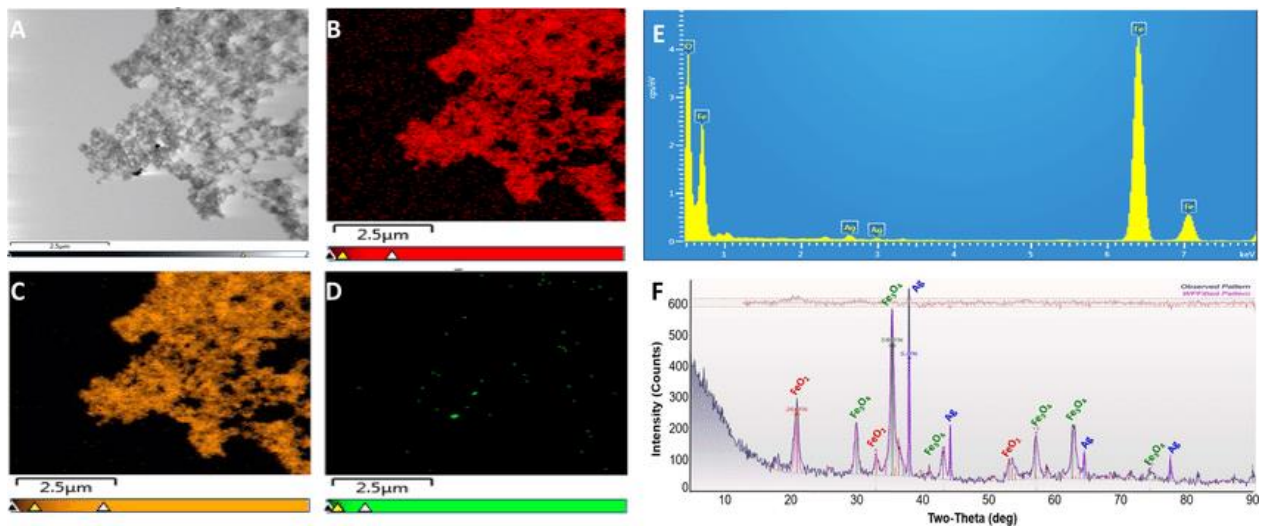


Figuur 22 SEM schema

Bron: hauptrob (z.d.)

8.3.10 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

Energiedispersieve röntgenspectroscopie (EDS) is een chemische microanalysetechniek die wordt gebruikt in combinatie met SEM (Figuur 23). Om de elementaire samenstelling van het bestudeerde volume te karakteriseren, detecteert de EDS-techniek röntgenstralen die uit het monster vrijkomen tijdens een overvloed door een elektronenstraal. Het is mogelijk om kenmerken of fasen zo klein als 1 μm of kleiner te analyseren (Umoren et al., 2022b).



Figuur 23 Energy dispersive spectroscopy analysis

Bron: Park e.a. (2019)

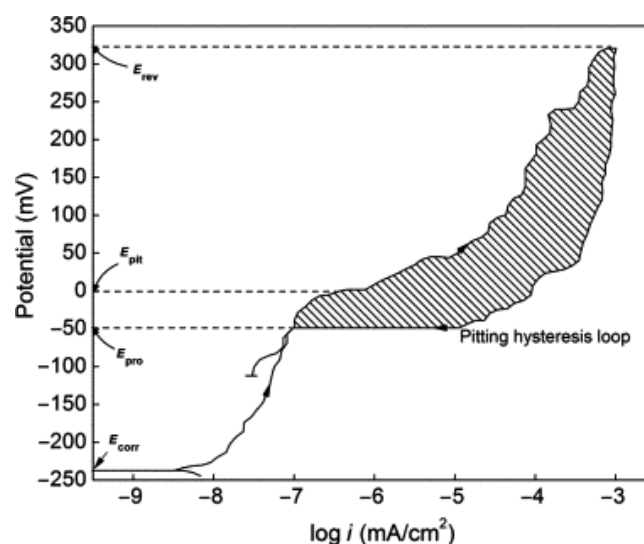
9 Meten van putcorrosie

9.1 Critical pitting potential

De putpotentiaal wordt door de ASTM gedefinieerd als het potentiaal waarboven putvorming optreedt. Stabiele putjes ontstaan bij potentialen die edeler zijn dan de kritische putpotentiaal of de *critical pitting potential*. Bij de anodische tak neemt de stroom sterk toe tijdens de *cyclic polarization*. Deze wordt E_{pit} genoemd. Hierbij kan er ook interkristallijne -en spleetcorrosie voorkomen (Alvarez & Galvele, 2010; Popov, 2015b).

9.2 Cyclic polarization

Cyclische polarisatie meet de *pitting tendency* van een proefstuk in een bepaald elektrolyt (Figuur 24). Deze techniek schat de putpotentiaal en de kritische beschermingspotentiaal. Hierbij zal dit het meest edele potentiaal geven waarbij geen putcorrosie noch spleetcorrosie voorkomt (Popov, 2015).



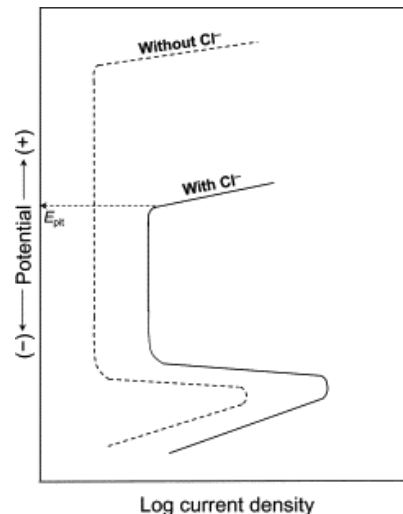
Figuur 24 Typische cyclische polarisatieplot voor roestvrij staal

Bron: Popov (2015)

Figuur 24 geeft een voorbeeld van een typische cyclische polarisatiecurve. In een putcorrosie-experiment wordt er een potentiaalscan uitgevoerd in de anodische richting. De potentiaal wordt gecontroleerd door een potentiostaat met een referentie-elektrode en een counter elektrode. Dit zijn dan vaak een kalomelelektrode en een Pt-elektrode. De figuur beeldt ook af wanneer de beschermende passieve film afbreekt. Dit is vanaf de putpotentiaal, vanaf dat punt zal putcorrosie optreden.

Het verschil tussen put- en beschermingspotentiaal wordt gebruikt om de putcorrosiegevoeligheid van materialen in te schatten (Popov, 2015b).

Op Figuur 25 staat de impact van Cl geïllustreerd (Burstein et al., 2004).



Figuur 25 Bepaling van de kritische putpotentialiaal uit de anodische curve

Bron: Popov (2015)

9.3 Critical pitting temperature

Het begrip kritische puttemperatuur, of CPT, is een criterium voor de evaluatie van putgevoeligheid in roestvrij staal. De CPT wordt gedefinieerd als de minimumtemperatuur in graden Celsius die putcorrosie initieert bij een gegeven potentiaal. Door de temperatuur te variëren bij een vaste potentiaal kan deze puttemperatuur gevonden worden (Popov, 2015b). *Cyclic thermammetry* kan gebruikt worden om de CPT te onderzoeken. Daaruit kan de toenemende temperatuur metastabiele putten vormen onder de CPT. Boven de CPT vormen er stabiele putten (Nakhaie et al., 2021).

9.4 Pitting corrosion standards

9.4.1 ASTM G46-21

Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion is de plaats waar alle standaarden gegeven staan voor putcorrosie. Vroeger was dit de ASTM G46-94, maar deze is recent geüpdatet (*Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion*, z.d.).

9.4.2 ISO 11463:2020

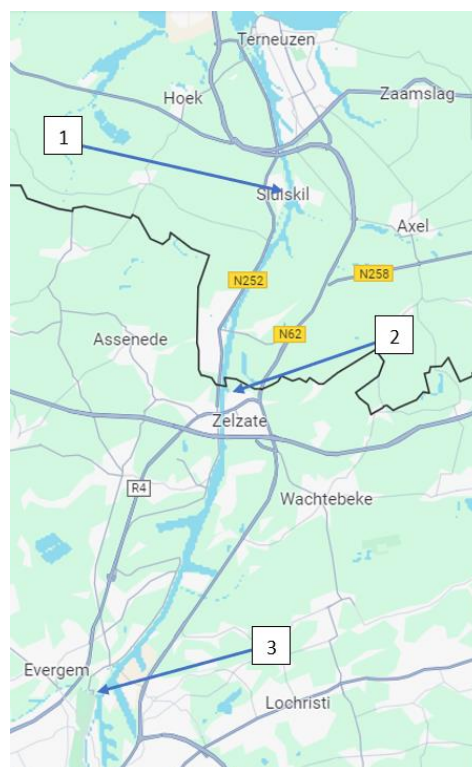
Dit document geeft richtlijnen voor de selectie van procedures die kunnen gebruikt worden bij de identificatie en het onderzoek van corrosieputten en bij de evaluatie van putcorrosie en putgroeisnelheid (*ISO 11463*, z.d.).

10 Praktische meting van corrosie: materiaal en methoden

Om de putcorrosie te kunnen meten in het kanaal Gent-Terneuzen moet er een degelijk plan van aanpak zijn. Er zijn verschillende manieren om dit aan te pakken. Er kan ofwel ter plaatste, ofwel in het labo gewerkt worden. Deze keuze is afhankelijk van de middelen die ter beschikking zijn en de praktische uitvoerbaarheid op de locaties zelf of in het labo. In de hierboven beschreven literatuur werden er enkele methoden beschreven voor het meten van corrosie. Om corrosie te kunnen meten dienen enkele bestaande experimenten als basis, hiermee worden de ASTM-standaarden bedoeld.

10.1 Ontwerp experiment

Op de locatie van het kanaal Gent-Terneuzen werden in het verleden al enkele corrosieonderzoeken uitgevoerd. Om de putcorrosie op een elektrochemische manier te onderzoeken wordt er een proefopstelling gemaakt. Dit is gebaseerd op eerdere bestaande onderzoeken die te vinden zijn in de literatuur. De bedoeling hiervan is om op drie verschillende locaties stalen coupons op te hangen. Hierdoor kunnen de drie locaties vergeleken worden op vlak van putcorrosie. De drie locaties zijn in Sluiskil, Zelzate en Evergem. Verder in de tekst worden naar deze locaties gerefereerd als Terneuzen, Zelzate en Gent (Figuur 26).



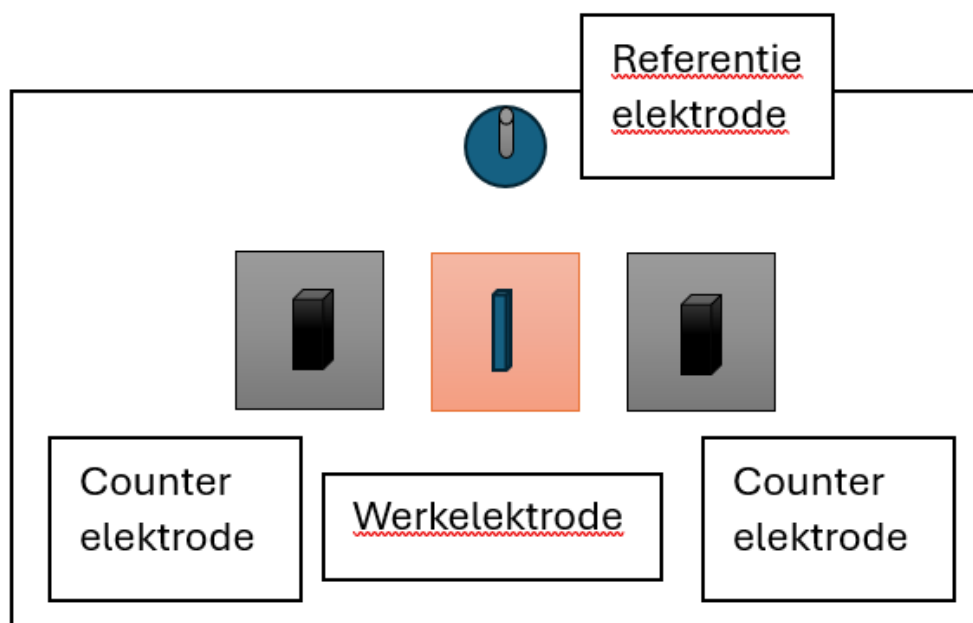
Figuur 26 Overzicht van de meetlocaties

Bron: Eigen werk

De stalen coupons zijn twee verschillende soorten staal, zijnde S235 staal en 316L, waarvan de eerste een *low carbon steel* is en de tweede een *stainless steel*. Op deze twee soorten staal worden enkele elektrochemische testen uitgevoerd na een blootstelling van één maand, één week en één dag. Voor het S235 staal wordt er gekeken naar de uniforme corrosie, ofwel de corrosiesnelheid. Hierbij wordt er een lineaire polarisati weerstand of LPR gezocht die samenhangt met de volledige polarisatiecurve. Op elke S235 coupon wordt er een LPR-meting uitgevoerd. Daardoor zal er een correctie aanwezig zijn voor elke locatie van drie metingen. Zo kan er gekeken worden of er geen fout zit in de resultaten. Doordat een LPR-meting niet-destructief is, kan er nog een meting op uitgevoerd worden. Zo kan er na de LPR, een LPC gemaakt worden of een EFM. De stalen 316L coupons worden onderzocht voor putcorrosie. Hierbij wordt er per locatie gekeken naar de CPT, de CPC en de EFM van een coupon. De CPT-methode en de CPC test zijn destructief, wat maakt dat er geen tweede meting op die coupons uitgevoerd kunnen worden. De proef wordt hieronder verder beschreven.

10.1.1 Drie elektrode testcel

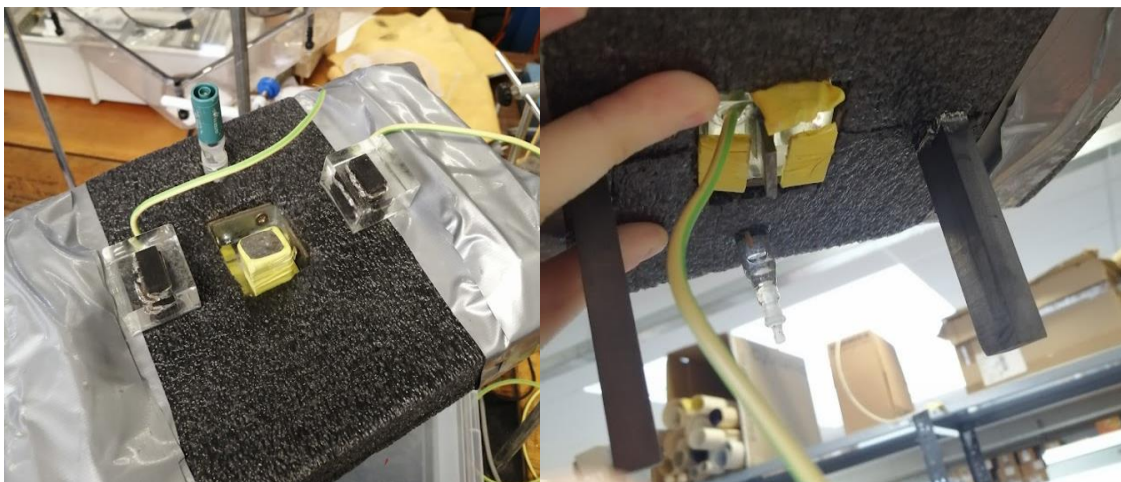
Zoals eerder vermeld, werkt dit onderzoek aan de hand van een drie elektrode testcel volgens de ASTM standaard. De proefopstelling voor de uit te voeren testen, werd door mezelf geconstrueerd, rekening houdend met de standaarden. In Figuur 27 staat een schematische voorstelling.



Figuur 27 Schematische weergave van de drie elektroden testcel

Bron: Eigen werk

De testcel bestaat uit een synthetische drijvende foam. Hierdoor heeft het de mogelijkheid om op het water te drijven. Aan de zijkanten van de foam zijn er een reeks loodjes aan vastgebonden. De functie hiervan is om de testcel zeker voldoende onder water te krijgen, zodat er geen lucht aan de werkelektrode kan. Indien dit het geval zou zijn zou dit het evenwicht kunnen verstoren of een vertekend beeld kunnen geven van de resultaten. Op de plaats waar de werkelektrode zich bevindt is er een metalen toepassing om makkelijk van werkelektrode te kunnen wisselen aangezien er verschillende metingen moeten gedaan worden in dezelfde testcel (Figuur 28). De gele tape is aangebracht om contact met de werkelektrode te vermijden.



Figuur 28 Opstelling van drie elektroden testcel

Bron: Eigen werk

10.1.1.1 Werkelektrode

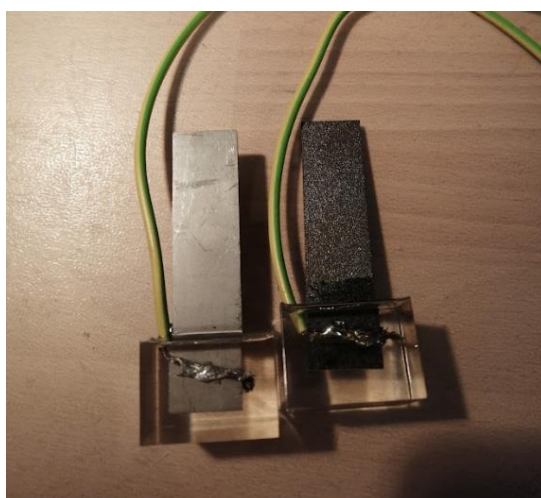
Voor dit experiment worden er twee soorten staal gebruikt. Zoals hierboven reeds vermeld, *S235 low carbon steel* en *316L stainless steel* (Figuur 29). *S235* staal is een zeer vaak voorkomende staalsoort. Deze wordt gebruikt in de industrie en is daardoor dus ideaal om te onderzoeken op corrosie. Dit geldt eveneens voor het *316L* staal. Deze staalsoort beschikt reeds over specifieke eigenschappen ter bescherming tegen corrosie. De werkelektrode is de reactie die onderzocht wordt. De coupons hebben standaard een afmeting van 80mm x 20mm x 3mm. Deze werden voor het onderzoek met elektrochemische testen verder verkleind om een zo klein mogelijke oppervlakte te verkrijgen. Zo werden ze gehalveerd naar 40mm in plaats van 80mm. In Tabel 1 staan alle werkelektroden die deel uitmaken van het onderzoek met elk hun oppervlakte.

Tabel 1 Overzicht van alle werkelektroden

Bron: Eigen werk

Nummer	Locatie	Staalsoort	Duur van	Proef	Lange l (cm)	Korte l (cm)	Breedte (cm)	Dikte (cm)	Oppervlakte (cm ²)
1	Gent	S235	1 maand	LPR	1,47	1,4	2	0,3	7,201
2	Gent	S235	1 maand	LPR + EFM	1,38	1,3	2	0,3	6,764
3	Gent	S235	1 maand	LPR + LPC	1,53	1,36	2	0,3	7,247
4	Gent	S235	1 week	LPR	1,72	1,66	2	0,3	8,374
5	Gent	S235	1 week	LPR + EFM	1,08	1,22	2	0,3	5,89
6	Gent	S235	1 week	LPR + LPC	1,44	1,57	2	0,3	7,523
7	Gent	S235	1 dag	LPR	1,31	1,23	2	0,3	6,442
8	Gent	S235	1 dag	LPR + EFM	1,43	1,41	2	0,3	7,132
9	Gent	S235	1 dag	LPR + LPC	1,27	1,15	2	0,3	6,166
10	Terneuzen	S235	1 maand	LPR	1,41	1,39	2	0,3	7,04
11	Terneuzen	S235	1 maand	LPR + EFM	5,7	5,64	2	0,3	26,682
12	Terneuzen	S235	1 maand	LPR + LPC	1,55	1,42	2	0,3	7,431
13	Terneuzen	S235	1 week	LPR	1,43	1,36	2	0,3	7,017
14	Terneuzen	S235	1 week	LPR + EFM	1,28	1,28	2	0,3	6,488
15	Terneuzen	S235	1 week	LPR + LPC	1,42	1,38	2	0,3	7,04
16	Terneuzen	S235	1 dag	LPR	1,42	1,35	2	0,3	6,971
17	Terneuzen	S235	1 dag	LPR + EFM	1,3	1,25	2	0,3	6,465
18	Terneuzen	S235	1 dag	LPR + LPC	1,31	1,21	2	0,3	6,396
19	Zelzate	S235	1 maand	LPR + LPC	1,52	1,43	2	0,3	7,385
20	Zelzate	S235	1 maand	LPR + EFM	1,4	1,39	2	0,3	7,017
21	Zelzate	S235	1 maand	LPR	1,22	1,19	2	0,3	6,143
22	Zelzate	S235	1 week	LPR	1,47	1,33	2	0,3	7,04
23	Zelzate	S235	1 week	LPR + EFM	1,36	1,36	2	0,3	6,856
24	Zelzate	S235	1 week	LPR + LPC	1,51	1,6	2	0,3	7,753
25	Zelzate	S235	1 dag	LPR	1,3	1,2	2	0,3	6,35
26	Zelzate	S235	1 dag	LPR + EFM	1,54	1,38	2	0,3	7,316
27	Zelzate	S235	1 dag	LPR + LPC	1,28	1,25	2	0,3	6,419
28	Gent	316L	1 maand	CPC	1,46	1,36	2	0,3	7,086
29	Gent	316L	1 maand	EFM	1,31	1,26	2	0,3	6,511
30	Gent	316L	1 maand	CPT	0,96	0,88	2	0,3	4,832
31	Gent	316L	1 maand	Extra	1,29	1,29	2	0,3	6,534
32	Gent	316L	1 week	CPC	1,23	1,19	2	0,3	6,166
33	Gent	316L	1 week	EFM	1,37	1,3	2	0,3	6,741
34	Gent	316L	1 week	CPT	1,49	1,42	2	0,3	7,293
35	Gent	316L	1 week	Extra	1,25	1,2	2	0,3	6,235
36	Gent	316L	1 dag	CPC	1,29	1,24	2	0,3	6,419
37	Gent	316L	1 dag	EFM	0,88	0,78	2	0,3	4,418
38	Gent	316L	1 dag	CPT	1,28	1,22	2	0,3	6,35
39	Gent	316L	1 dag	Extra	1,35	1,2	2	0,3	6,465
40	Terneuzen	316L	1 maand	CPC	1,18	1,17	2	0,3	6,005
41	Terneuzen	316L	1 maand	EFM	1,29	1,27	2	0,3	6,488
42	Terneuzen	316L	1 maand	CPT	1,34	1,33	2	0,3	6,741
43	Terneuzen	316L	1 maand	Extra	1,38	1,33	2	0,3	6,833
44	Terneuzen	316L	1 week	CPC	1,05	0,94	2	0,3	5,177
45	Terneuzen	316L	1 week	EFM	1,35	1,26	2	0,3	6,603
46	Terneuzen	316L	1 week	CPT	1,53	1,45	2	0,3	7,454
47	Terneuzen	316L	1 week	Extra	1,31	1,16	2	0,3	6,281
48	Terneuzen	316L	1 dag	CPC	1,47	1,4	2	0,3	7,201
49	Terneuzen	316L	1 dag	EFM	1,01	0,61	2	0,3	4,326
50	Terneuzen	316L	1 dag	CPT	1,33	1,4	2	0,3	6,879
51	Terneuzen	316L	1 dag	Extra	1,45	1,35	2	0,3	7,04
52	Zelzate	316L	1 maand	CPC	1,1	0,99	2	0,3	5,407
53	Zelzate	316L	1 maand	EFM	1,16	1,11	2	0,3	5,821
54	Zelzate	316L	1 maand	CPT	1,42	1,4	2	0,3	7,086
55	Zelzate	316L	1 maand	Extra	1,32	1,31	2	0,3	6,649
56	Zelzate	316L	1 week	CPC	1,23	1,16	2	0,3	6,097
57	Zelzate	316L	1 week	EFM	1,66	1,64	2	0,3	8,19
58	Zelzate	316L	1 week	CPT	1,85	1,85	2	0,3	9,11
59	Zelzate	316L	1 week	Extra	1,37	1,3	2	0,3	6,741
60	Zelzate	316L	1 dag	CPC	1,38	1,31	2	0,3	6,787
61	Zelzate	316L	1 dag	EFM	1,23	1,11	2	0,3	5,982
62	Zelzate	316L	1 dag	CPT	1,34	1,13	2	0,3	6,281
63	Zelzate	316L	1 dag	Extra	1,44	1,11	2	0,3	6,465

Om een goede werkelektrode te maken is het noodzakelijk dat de coupons verbonden zijn met een elektriciteitskabel. Hiermee kan deze vervolgens aangesloten worden op een potentiostaat. Er werden vervolgens gaatjes in de coupons geboord om hierin met behulp van soldeersel de elektriciteitskabel te bevestigen. Hierna werden de coupons zo ver mogelijk ondergedompeld in epoxy om de oppervlakte van de coupons nog meer te verkleinen en ervoor te zorgen dat enkel het staal van de werkelektrode in contact komt met het elektrolyt. Een schematische voorstelling staat in Figuur 29, alsook de chemische samenstellingen van de twee metalen (Tabel 2).



Figuur 29 Voorbeelden werkelektroden S235 en 316L staal

Bron: Eigen werk

Tabel 2 Chemische samenstelling van S235 en 316L staal

Bron: Seechurn et al. (2023)

1. S235							
C	Mn		P	S		Si	Cu
0.4	1.4		0.04	0.04		0.05	0.55
2. 316L							
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
0.03	1.83	1.83	0.028	1.00	17.5	13.8	2.93

10.1.1.2 Referentie-elektrode

Als referentie- elektrode wordt er in dit onderzoek gebruikt gemaakt van een Ag/AgCl elektrode (Figuur 30) in een elektrolyt van 3M KCl. Een SWE is in deze toepassing praktisch niet mogelijk. Ook is de SCE niet beschikbaar in het labo. Hierdoor wordt er een correctie toegevoegd van 0.222V als er een vergelijking wordt gemaakt met de SWE. Hieraan wordt ook een kabel bevestigd om de connectie met de potentiostaat te kunnen maken.



Figuur 30 Ag Ag/Cl referentie elektrode

Bron: Ag/AgCl Reference Electrode (Length 12.5 Cm) (z.d.)

10.1.1.3 Counter elektrode

De oppervlakte van de counter elektrode moet minstens tien keer zo groot zijn als de oppervlakte van de werkelektrode (Figuur 31). De elektrode dient eveneens een goede geleider te zijn omdat er genoeg stroom door moet kunnen passeren. De meest gekende counter elektroden zijn platinum en grafiet. In dit onderzoek wordt grafiet gebruikt. Platinum wordt gezien als een duurder materiaal. De plaatsbepaling van de counter elektrode is eveneens van zeer groot belang. In Figuur 27 staat een schematische voorstelling hiervan.



Figuur 31 Geconstrueerde counter elektrode in epoxy

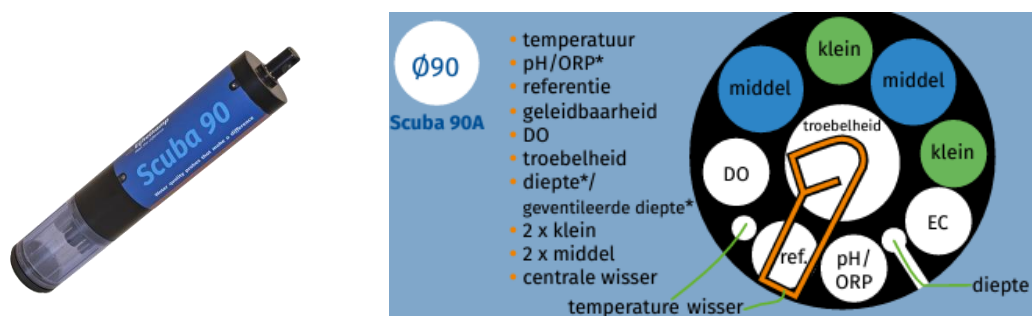
Bron: Eigen werk

10.1.2 Elektrolyt

In het kader van dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een drie-elektrode testcel, die altijd een elektrolyt vereist. Diverse elektrolyten kunnen worden toegepast, waarbij zoutwater of zeewater bijzonder geschikt zijn vanwege hun vermogen om het corrosieproces te versnellen. Het chloridegehalte speelt hierbij een cruciale rol: een hoger Cl-gehalte leidt tot een snellere corrosie, terwijl een verminderd Cl-gehalte het corrosieproces vertraagt. Tijdens de voorbereidingen van het experiment is consistent gebruik gemaakt van een elektrolyt bestaande uit 3,5% zoutwater. Voor de experimenten die specifiek gericht zijn op het kanaal Gent-Terneuzen, werd echter het lokale water als elektrolyt gebruikt. Omdat de metingen werden uitgevoerd op drie verschillende locaties binnen het kanaal, was het elektrolytische water niet uniform. Het zoutgehalte van dit water was aanzienlijk lager dan dat van de eerder gebruikte 3,5% zoutwateroplossing, wat een invloed heeft op de snelheid van het corrosieproces. Om de eigenschappen van het water nauwkeurig te kunnen bepalen, werd gebruik gemaakt van een Manta waterkwaliteitsmonitor. Deze aanpak zorgde ervoor dat de variaties in waterkwaliteit tussen de verschillende locaties in aanmerking werden genomen, wat essentieel is voor een correcte interpretatie van de meetresultaten en de invloed van de lokale elektrolytische omgeving op de corrosieprocessen.

10.1.3 Manta Scuba 90

De eigenschappen van het elektrolyt worden bepaald door een meettoestel. Het meettoestel dat hiervoor wordt gebruikt is de Scuba 90 van Eijkelkamp (Figuur 32). De Scuba kan tot 11 parameters tegelijk opnemen. De metingen worden herhaaldelijk uitgevoerd tot er een goed stabiel beeld is van de het water van de meetlocatie. Voor dit experiment zijn niet alle parameters van belang. Temperatuur, pH, nitraat, chloriden zijn voorbeelden van nuttige informatie.



Figuur 32 Scuba 90 met parameters

Bron: Scuba 90 (z.d.)

10.1.4 Potentiostaat Palmsens 4

Zoals eerder reeds beschreven, dient de potentiostaat voor het regelen van een potentiaal over de elektroden. De Palmsens 4 (Figuur 33) kan verschillende elektrochemische metingen uitvoeren. Voor dit onderzoek wordt het gebruik van het toestel beperkt tot de corrosiemodus, specifiek de lineaire polarisatie, de cyclische polarisatie en de corrosiepotentiaal. Het toestel kan ook EIS uitvoeren. De uitvoering van EFM-metingen vergt een andere potentiostaat. De Palmsens 4 kan via bluetooth verbonden worden met de computer om de software PSTrace te kunnen gebruiken. Zoals hierboven vermeld, wordt het toestel gebruikt in de corrosion mode. Daarnaast is er ook nog een scientific en een analytical mode. Deze worden echter niet gebruikt. In dit programma worden alle instellingen gedaan. Dit is zeer belangrijk voor de resultaten van een meting. Met verkeerde instellingen kan een meting mislukken. In de volgende hoofdstukken zullen per testmethode, de instellingen besproken worden.



Figuur 33 Palmsens 4 potentiostaat

Bron: *PalmSens4* (z.d.)

10.1.5 Magnetic stirrer hotplate

Bij de testen om de CPT te bepalen, wordt er gebruikt gemaakt van een magnetische roerder en een thermische plaat (Figuur 34). Dit zorgt ervoor dat de temperatuur evenredig stijgt. Het apparaat is eenvoudig in gebruik. Met de ronde knop wordt de snelheid van het roeren bepaald. De drukknoppen dienen om het setpoint van de temperatuur in te stellen. Wanneer er een setpoint is ingesteld, gaat de thermische plaat opwarmen en tot de ingestelde temperatuur brengen. De thermometer zorgt voor een terugkoppeling naar het apparaat en stopt de verwarming bij het bereiken van het setpoint.



Figuur 34 Magnetische roerder met verwarmingsplaat

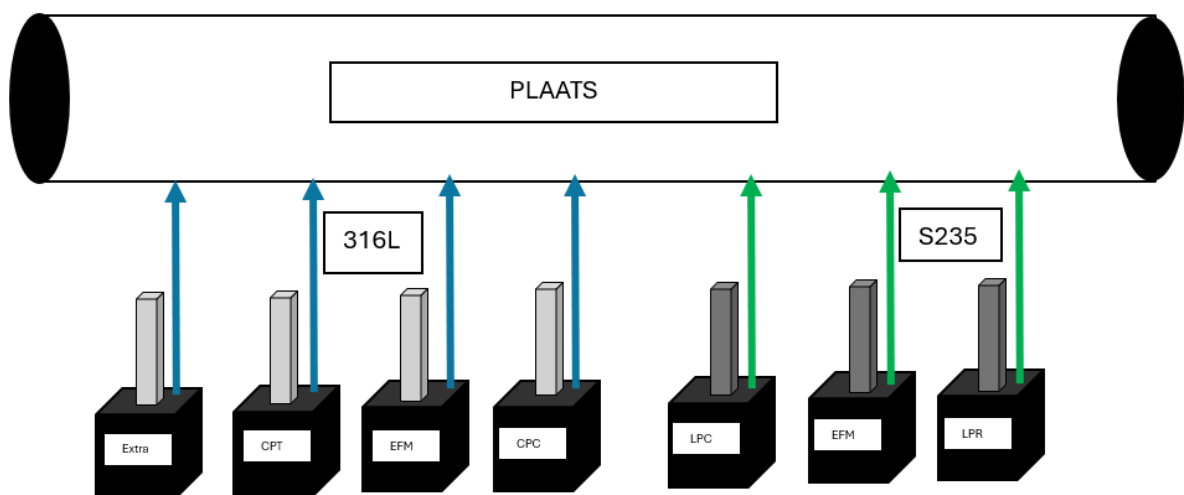
Bron: *Laboratorium Magnetische Roerder Verwarmingsplaat Digitaal Display, 1000 MI 2200 Rpm Verstelbare Churn Roer Machine Blender Laboratorium Roerder* : [Amazon.nl](https://www.amazon.nl): Zakelijk, industrie & wetenschap (z.d.)

10.1.6 ASTM-standards

In dit onderzoek is er gebruik gemaakt van verschillende ASTM-standaarden om een correcte proefopstelling te maken. Hierbij is er geprobeerd om dit zo goed mogelijk na te leven. G3-89, G31-72, G3-14, G48-11, G59-97, G102-89 en G61 zijn gebruikt hiervoor.

10.2 Proefopstelling

De proefopstelling werd ontworpen voor een reeks werkelektroden die gedurende verschillende tijdsintervallen werden ondergedompeld. Per tijdstip en per locatie werden werkelektroden, bestaande uit stalen coupons van S235 en 316L staal, opgehangen in het water met behulp van PVC-buizen. In totaal omvatte de opstelling 63 werkelektroden, verdeeld over 7 werkelektroden per PVC-buis. Deze configuratie is schematisch hieronder weergegeven. Een extra 316L-elektrode werd toegevoegd als back-up, zodat, indien een proef zou mislukken, de meting opnieuw kon worden uitgevoerd. Indien de extra elektrode om de hiervoor gemelde reden niet werd gebruikt, zou deze als controle kunnen gebruikt worden voor een andere proef.



Figuur 35 Schematische weergave van een reeks werkelektroden

Bron: Eigen werk

De opstelling (Figuur 35) werd op drie verschillende locaties steeds aan een ladder opgehangen. De werkelektroden bevonden zich tussen de kade en de ladder om hinder bij het gebruik van de ladder te vermijden. Voordat de coupons in het water werden geplaatst, werd er steeds een foto genomen om een vergelijking te kunnen maken tussen de toestand voor en na de metingen. Deze foto's zijn te vinden in de bijlage.

Na periodes van een maand, een week, en een dag werden alle coupons op dezelfde dag uit het water gehaald. Bij het verwijderen werden de werkelektroden zorgvuldig uit het water genomen en zo snel mogelijk in een bak met water geplaatst om de verstoring van het evenwicht te minimaliseren. Deze werkwijze verzekerde dat de metingen betrouwbaar bleven en dat er een duidelijk verschil waarneembaar was tussen de verschillende tijdsintervallen.



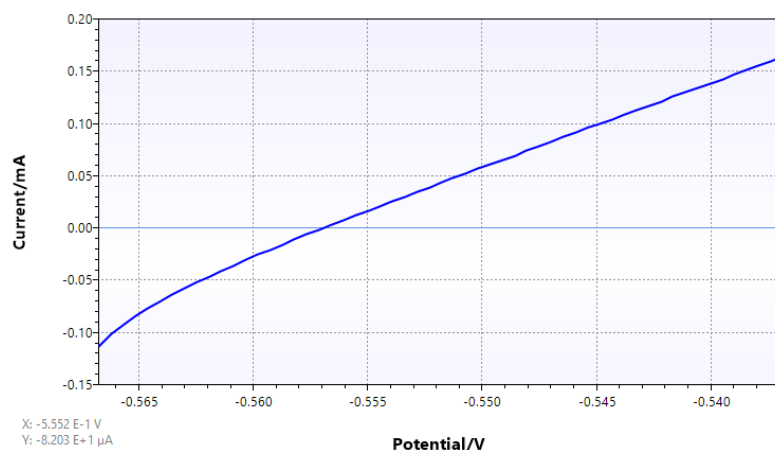
Figuur 36 Locatie van werkelektroden

Bron: Eigen werk

Deze opzet en methodologie zorgden ervoor dat de data systematisch en consistent werden verzameld, wat cruciaal is voor de validiteit van de onderzoeksresultaten. De gedetailleerde aanpak met betrekking tot de fotodocumentatie en de voorzorgsmaatregelen bij het verwijderen van de werkelektroden benadrukt de nauwkeurigheid en zorgvuldigheid die in dit onderzoek werden gehanteerd. Op Figuur 36 zijn de ladders aangeduid waar de werkelektroden aan bevestigd waren.

10.3 Linear Polarization Resistance

De eerste proef die werd uitgevoerd met de potentiostaat is de LPR-meting. Zoals eerder vermeld, is deze test niet-destructief, wat betekent dat er na afloop nog andere tests op dezelfde proefstukken kunnen worden uitgevoerd. Het doel van de LPR-meting is om een klein potentiaalverschil over een coupon aan te brengen, waardoor een lineair verband tussen de stroom en de potentiaal ontstaat. De resulterende grafiek vertoont een rechte, stijgende lijn met een specifieke richtingscoëfficiënt. Een voorbeeld hiervan op Figuur 37. De inverse van deze richtingscoëfficiënt geeft de polarisati weerstand weer, een belangrijke parameter bij de beoordeling van de corrosi weerstand van het materiaal. De open circuit potential (OCP) speelt hierbij ook een cruciale rol, aangezien deze de uitgangswaarde van de meting bepaalt. Bij de LPR meting begint en eindigt de meting 0.015V ten opzichte van de OCP. In dit onderzoek wordt er gezocht naar corrosie, daarbij is E_{corr} ook belangrijk. Die wordt gevonden wanneer de stroom gelijk is aan 0 mA.



Figuur 37 Voorbeeld van een LPR test in PStace

Bron: Eigen werk

In de praktijk neemt deze test ongeveer een minuut in beslag. Tijdens dit onderzoek werd de LPR-meting uitsluitend uitgevoerd op S235-stalen coupons doordat een LPR-meting als niet-informatief wordt beschouwd op 316L-staal, dat andere corrosie-eigenschappen heeft.

Hoewel de instellingen voor PStace grotendeels gelijk blijven voor beide staalsoorten (Figuur 38), verschillen ze wel met betrekking tot het materiaal. Voor S235 is de *equivalent weight* of EW 27,9 g/mol en de dichtheid 7,8 g/cm³. Voor 316L zijn deze waarden respectievelijk 25,5 g/mol en 7,99 g/cm³. Ondanks dat het materiaal van de coupons hetzelfde blijft voor elk experiment, varieert het oppervlak, omdat niet elke coupon precies hetzelfde contactoppervlak heeft. Deze variatie in oppervlakte wordt meegenomen in de analyse om nauwkeurige en betrouwbare meetresultaten te verkrijgen.

Select current range(s):

100 pA 1 nA 10 nA 100 nA 1 μA 10 μA 100 μA 1 mA 10 mA 100 mA

► Pretreatment Settings

▲ Linear Polarization Settings

t equilibration 0 s

E begin -0.015 V

E end 0.015 V

E step 0.0005 V

Scan rate 0.0005 V/s

☐ Stop when i < 0.0 μA

☐ Stop when i > 0.0 μA

☒ Measure vs OCP

☒ E begin versus OCP

Expected duration: 00:01:02s
58 datapoints (real E step is 0.00053)

Figuur 38 Instellingen PStace voor een LPR meting

Bron: Eigen werk

Als voorbereiding op het praktische onderzoek zijn er in het labo testen uitgevoerd om de juiste instellingen en opstelling te vinden. De LPR-metingen verliepen soepel en relevante informatie kon gemakkelijk worden verkregen uit eerdere onderzoeken in de literatuur. Hierbij werd gebruikgemaakt van de drie-elektrode testcel (Figuur 39) op een andere wijze, waarbij een thermische regelaar en een menger werden ingezet. Dit laatste apparaat werd in verband met de CPT-testen gebruikt.



Figuur 39 Opstelling van drie elektrode testcel in de Bredastraat als voorbereidend werk

Bron: Eigen werk

10.4 Linear polarization curve

Als vervolg op de LPR-metingen werd voor enkele staalplaatjes een lineaire polarisatiecurve of LPC opgesteld. Het doel van deze meting is om, met behulp van de Butler-Volmer-vergelijking, de corrosiesnelheid te bepalen, uitgedrukt in millimeters per jaar. Hoewel de software van PSTrace in staat is deze berekeningen volledig automatisch uit te voeren, kunnen de resultaten ook handmatig worden verkregen door het toepassen van specifieke formules.

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 R_p (\beta_a + \beta_c)}$$

i_{corr} = de corrosiestroom in ampères

β_c = de kathodische β Tafelconstante in volt/decade

β_a = de anodische β Tafelconstante in volt/decade

R_p = de polarisatieweerstand

$$CR = \frac{i_{corr} K \cdot EW}{dA}$$

K = een constante die de eenheden voor de corrosiesnelheid definieert

EW = het equivalente gewicht in gram/equivalent

d = dichtheid in g/cm³

A = couponoppervlakte in cm²

Een lineaire polarisatiecurve wordt gekarakteriseerd door een groter potentiaalverschil in vergelijking met de LPR-meting. Terwijl de LPR-meting een klein potentiaalverschil van slechts 0,003V hanteert, bedraagt het potentiaalverschil bij de LPC-meting 1,2V tussen de hoogste en laagste waarde. Dit aanzienlijke potentiaalverschil leidt tot een aantasting van het oppervlak van de staalplaatjes, waardoor de test destructief is. In Figuur 40 volgt een weergave van de instellingen die voor deze metingen werden gebruikt.

Select current range(s):

100 pA 1 nA 10 nA 100 nA 1 µA 10 µA 100 µA 1 mA 10 mA 100 mA

▸ Pretreatment Settings

▾ Linear Polarization Settings

t equilibration 0 s

E begin -0.2 V

E end 1.0 V

E step 0.001 V

Scan rate 0.01 V/s

☐ Stop when i < 0.0 µA

☐ Stop when i > 0.0 µA

☒ Measure vs OCP

☒ E begin versus OCP

Expected duration: 00:02:01s
1211 datapoints (real E step is 0.00099)

Figuur 40 Instellingen PSTrace LPC meting

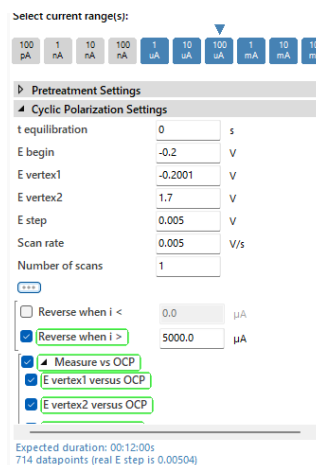
Bron: Eigen werk

Ter voorbereiding op deze metingen werden verschillende coupons gebruikt om de instellingen nauwkeurig af te stemmen. Hierbij werd gebruik gemaakt van een elektrolyt, bestaande uit zoutwater, wat resulteerde in een verhoogde corrosiesnelheid. Tijdens de voorbereidingen werd soms dezelfde coupon twee keer gebruikt om het verschil tussen de eerste en de tweede test te evalueren. Deze experimenten toonden aan dat er een significant verschil was tussen de resultaten van de eerste en tweede test, wat bevestigt dat de test slechts één keer kan worden uitgevoerd per werkelektrode.

De uitvoering van deze destructieve testen en de gedetailleerde analyse van de verschillen tussen opeenvolgende metingen, benadrukken het belang van nauwkeurige en consistente voorbereidingen.

10.5 Cyclic voltammetry

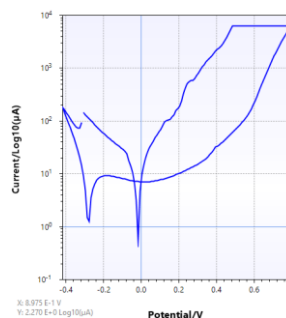
Cyclische polarisatie of *cyclic voltammetry* lijkt sterk op een gewone lineaire polarisatie. Het grootste verschil hierbij is dat de potentiaal op een bepaald ogenblik terugkeert. Wat uit deze data en grafiek kan afgeleid worden is de CPP of *Critical pitting potential* en de repassivatiepotaal. De potentiaal begint hierbij een 0.2 V onder de OCP en gaat zo door tot 1.7 V boven de OCP en keert daarna terug naar -0.2 V zoals vermeld in Figuur 41. Dit is een zeer grote range van 1.9 V die ook terugkomt. Ook deze test zorgt ervoor dat de werkelektrode niet meer gebruikt kan worden en is dus ook destructief. Door de grote range en de relatief lage *scan rate* duurt deze test 12 minuten en zijn er veel datapunten. Hiervan zijn er zo 9 testen gebeurd in totaal op elke locatie voor elk tijdstip.



Figuur 41 Instellingen van een CPC test

Bron: Eigen werk

Als voorbereiding zijn er een aantal testen gedaan waarbij het opviel dat de potentiaal een plateau bereikte (Figuur 42). Dit kwam doordat de stroomdichtheid te groot was. Om dit probleem op te lossen, werd de oppervlakte verkleind. Deze aanpassing werd ook toegepast tijdens het daadwerkelijke experiment. Hierbij bleek ook dat dit verder geen probleem vormde. Tijdens de voorbereiding is er ook weer gebruikt gemaakt van zoutwater als elektrolyt.



Figuur 42 Voorbeeld CPC test van de voorbereiding in 3,5% zoutwater

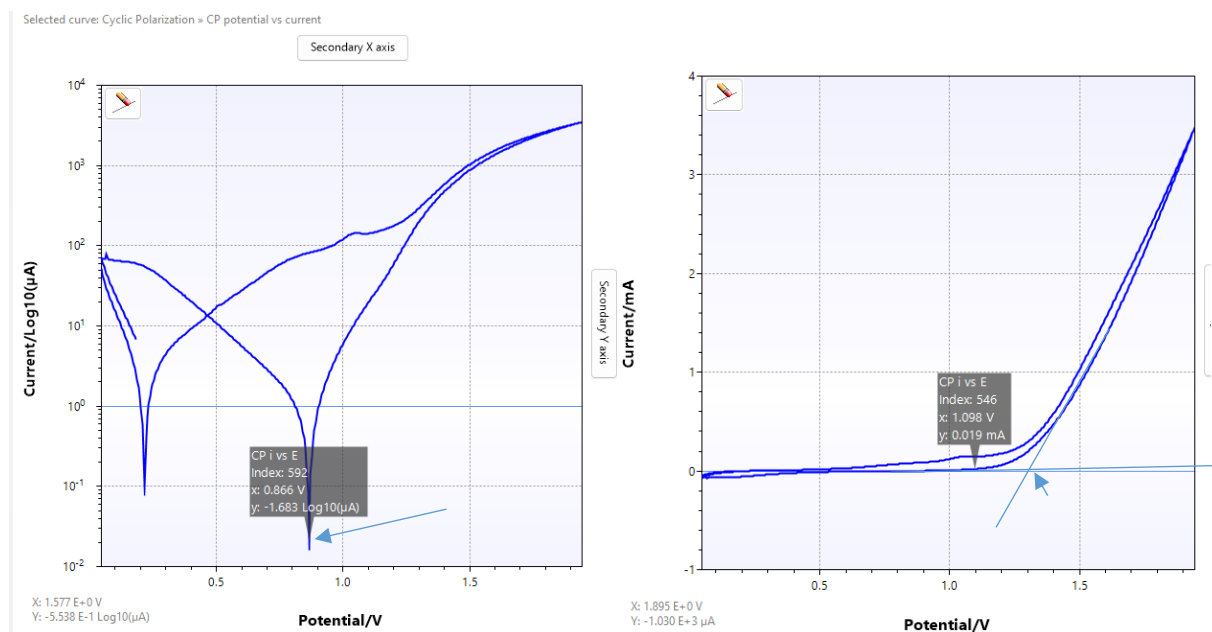
Bron: Eigen werk

10.5.1 Repassivatiepotaiaal

De repassivatiepotaiaal wordt gevonden bij deze test. Op de illustratie hieronder staat duidelijk een voorbeeld hiervan, waarbij de stroom twee keer duidelijk een minimum bereikt. Wanneer dit in het terugkeren van de grafiek gebeurd is de gevonden potentiaal hierbij de repassivatiepotaiaal. Dit is de potentiaal waarbij een coupon niet zal repassiveren. Het coupon wordt aangezet tot putten door een grote anodische potentiaal aan te leggen. Nadat het putten is begonnen, wordt de potentiaal verlaagd tot een testpotentiaal om te zien of het coupon bij die potentiaal zal repassiveren.

10.5.2 Critical pitting potential

De kritische putpotentiaal of CPP is de potentiaal waarbij putcorrosie zich zal initiëren. Op een grafiek is dit te vinden bij het begin van een grote exponentiële stijging van de stroomwaarde. Dit kan gemakkelijk gevonden worden door de grafiek niet in logaritmische schaal te zetten en hierbij de stijging te vinden. In Figuur 43 een voorbeeld hiervan.



Figuur 43 Aanduiding van de CPP en de E_{rep} op een CPC

Bron: Eigen werk

10.6 Critical pitting temperature

Zoals eerder beschreven is de *critical pitting temperature* of CPT een belangrijk gegeven. Dit geeft namelijk weer wanneer putcorrosie zich initieert. Daarom is deze test enkel van belang bij het 316L roestvrij staal. Om deze waarde te kunnen vinden, is er wel wat gereedschap nodig. Uiteraard begint de test bij het opstellen van de drie elektrode testcel. De testcel was echter niet voldoende voor de CPT te vinden aangezien de temperatuur zou moeten kunnen stijgen tijdens uitvoering van deze test. In het labo is er een magnetische roerder met thermische plaat. Dit toestel is geschikt om de temperatuur ongeveer evenredig te laten stijgen. Echter beschikte het apparaat over een niet compatibele stekker, die diende omgebouwd te worden naar een bruikbare versie. Het toestel is na aanpassing geschikt om bij te proef ingezet te worden. Het doel van het experiment is om een constante potentiaal van 0,650V aan te leggen tussen de werkelektrode en de referentie-elektrode wanneer een Ag/AgCl-referentie-elektrode wordt gebruikt. Met deze vaste potentiaal zou de temperatuur in theorie moeten stijgen met maximaal één graad per minuut. In de praktijk was dit echter niet mogelijk aangezien het apparaat niet in verbinding stond met de computer voor registratie van de temperatuur en dus niet automatisch geregeld kon worden. Doordat dit manueel moest gebeuren was de proef iets onnauwkeuriger dan voorgesteld in de ASTM standaard.



Figuur 44 Proefopstelling CPT thuis

Bron: Eigen werk

Doordat voor deze proef, naast de potentiostaat, een extra extern apparaat noodzakelijk was, kon deze proef niet ter plaatste uitgevoerd worden (Figuur 44). Ook zou de temperatuur van het water of het elektrolyt niet warmer mogen zijn dan 15°C. Hoe lager de begintemperatuur van het water hoe beter. De test werd daarom een dag na de andere praktische testen uitgevoerd. Hiertoe werden er 2 emmers water gevuld per locatie om de bijkomende testen nadien thuis te kunnen uitvoeren. Deze werden dan in een koelkast bewaard om een zo laag mogelijke temperatuur te bereiken.

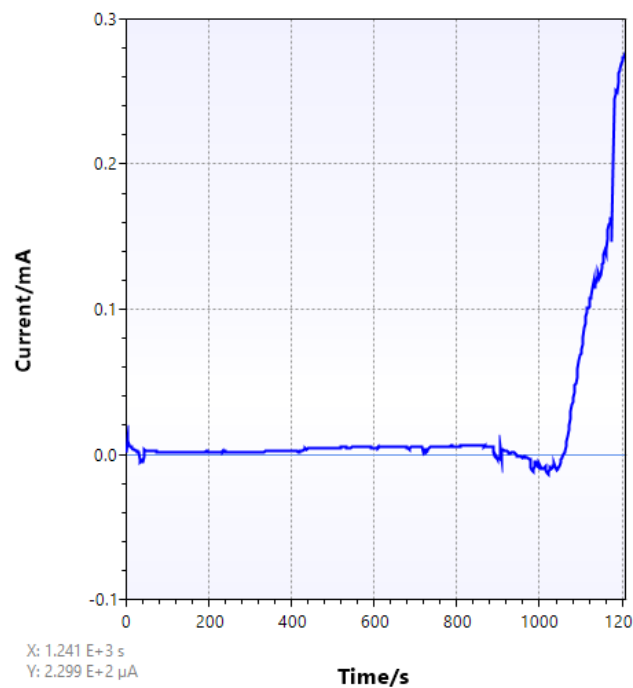
De werkelektroden noodzakelijk voor de testen nadien, werden vervoerd en bewaard in hetzelfde water dan deze van hun locatie, zodat er geen vertekend beeld kon ontstaan. De test begon met het vullen van de maatbeker uit de emmer die in de ijskast stond. Vervolgens werd deze gezet op de magnetische roerder met thermische plaat (Figuur 45). De thermische regelaar gaf zo een temperatuur van ongeveer 8 °C. Nadien werden alle kabels aangesloten op de potentiostaat en werd de juiste nummer van werkelektrode gezocht die bij het juiste water hoorde. De test startte wanneer de potentiaal over de elektrode gezet werd via PSTrace. Dit is via de *potentiostatic* techniek. Hierbij gaat de potentiaal verhoogd worden gedurende 60 minuten en elke seconde wordt de stroom gemeten. Nadien werd het apparaat manueel ingesteld op 80 °C. Deze steeg vervolgens ongeveer één graad per minuut. Na elke test werd er nieuw gekoeld water gebruikt met telkens een nieuwe werkelektrode uit hetzelfde water. Zo werden er negen testen uitgevoerd vanuit elke locatie een maand, een dag en een week.



Figuur 45 Magnetische roerder met verwarmplaat; drie elektroden testcel voor CPT test

Bron: Eigen werk

De voorbereiding van deze proef ging wat moeilijker doordat deze test destructief was en een werkelektrode telkens maar één keer gebruikt kon worden. Ook werd deze test in zoutwater uitgevoerd en hierbij werd de CPT al redelijk snel gevonden bij een temperatuur van 16°C. In de literatuur staat dat de CPT bereikt wordt wanneer de stroom gedurende 60 seconden boven de 100 μA gaat. Wanneer deze waarde bereikt werd, werd dit zorgvuldig genoteerd. In Figuur 46 een voorbeeld van de CPT test.



Figuur 46 Voorbeeld grafiek CPT

Bron: Eigen werk

10.7 Electrochemical frequency modulation

Electrochemical frequency modulation is een zeer complexe vorm om een corrosiesnelheid te meten. Voor dit onderzoek werd samengewerkt met de Universiteit Antwerpen om gebruik te maken van een externe potentiostaat. Echter, vanwege organisatorische redenen bleek dit in de praktijk niet realiseerbaar.

10.8 Verwerken van data

Op 9 en 10 mei werden alle elektrochemische testen zowel thuis als ter plaatse uitgevoerd. Dit zijn de LPR, de LPC, de CPC en de CPT. Elk van deze testen gaven een groot bestand van data weer per werkelektrode na de meting. Deze data en grafieken zijn allemaal beschikbaar in de bijlagen, alsook de foto's van de werkelektroden. De essentiële informatie uit de gegevens zijn verwerkt in het hoofdstuk resultaten. Hieronder staat er een beschrijving hoe de grafieken zijn opgebouwd en hoe de analyse van een afbeelding wordt uitgevoerd.

Er zijn twee belangrijke soorten grafieken in dit onderzoek. Zo is er de potentiaal op stroomdichtheid curve en de potentiaal op een logaritmische stroomdichtheid curve. De twee hebben identiek dezelfde waarden. Enkel de schaal is anders. De X-as is altijd de potentiaal. Er wordt dus altijd ingesteld in de software over welke potentiaalrange het gaat. Zo gaat deze waarde wel ten opzichte van de Ag Ag/Cl referentie-elektrode. Om dit te interpreteren naar NWE moet er +/-0.2V worden bij opgeteld. De stroom is de waarde die gezocht wordt, dit is de waarde op de y-as. De stroom wordt automatisch omgezet per cm^2 door te delen met de oppervlakte van de coupon.

10.9 Toepassingen van statistiek

In dit onderzoek is er ook een deeltje statistiek uitgevoerd op bepaalde waarden. Zo is er een student t-test uitgevoerd op de drie verschillende waarden van LPR en E_{corr} op de drie verschillende locaties. De resultaten werden in de betrokken grafieken besproken en zijn ook te vinden in bijlage.

11 Hypothese

De hypotheses zijn gebaseerd op eerdere tests die in het laboratorium zijn uitgevoerd, rekening houdend met de uitkomsten en de waargenomen succes- of faalfactoren van elk experiment.

11.1 Hypothese LPR

Voor de *Linear Polarization Resistance* metingen verliepen de tests soepel en leverden ze consequent logische resultaten op tijdens de voorbereidingsfase. Aangezien het elektrolyt bestond uit zoutwater in combinatie met gewoon kraanwater, werd verwacht dat de weerstand laag zou zijn, wat direct correleert met een hogere corrosiesnelheid. Er werd verwacht dat de zoutconcentratie laag zou zijn in Gent en hoog in Terneuzen. Er werd voorspeld dat de weerstand een lineair verband zou vertonen met betrekking tot de locaties. Bovendien werd door de hogere aanwezigheid van micro-organismen in Zelzate een lagere weerstand verwacht.

11.2 Hypothese LPC

De bepaling van de corrosiesnelheid in millimeters per jaar bracht aanvankelijk uitdagingen met zich mee tijdens de voorbereidingsfase, aangezien de test als destructief wordt beschouwd en verkeerde instellingen zouden leiden tot onjuiste data. Er werden verschillende werkelektroden gebruikt om de juiste interpretatie te garanderen. Zodra de juiste procedure was vastgesteld, verliep het proces vlotter. Deze test werd ook uitgevoerd op een 316L-coupon om het verschil te observeren. Er werd dus verwacht dat 316L veel minder gevoelig zou zijn voor uniforme corrosie. De voorspelling voor de corrosiesnelheid per locatie werd geacht ongeveer evenredig te zijn aan de waarden van de LPR-metingen, met de laagste snelheden in Gent en de hoogste in Terneuzen vanwege het hogere chloridegehalte.

11.3 Hypothese CPC

Cyclic Polarization Curve testen worden vaak beschreven in wetenschappelijke literatuur als een uitdagende en complexe procedure. Tijdens deze tests werd een plateau waargenomen waar de potentiostaat zijn maximale stroom bereikte, wat het bepalen van de juiste instellingen bemoeilijkte. Er was ook een bezorgdheid dat het experiment zou mislukken, vooral omdat de testduur 12 minuten was en er geen extra tijd was om de test op de dag van meting te herhalen. De resultaten werden verwacht soortgelijke grafieken te opleveren, met variaties alleen in het repassivatiepotaal en het kritische putpotaal of CPP per locatie.

11.4 Hypothese CPT

Het bepalen van de kritische puttemperatuur of CPT werd verwacht een uitdaging te zijn. Deze test moet beginnen bij de laagst mogelijke temperatuur, wat de uitvoerbaarheid beperkt. Tijdens de voorbereidingsfase werd de juiste uitvoering slechts één keer bereikt, waarbij zoutwater werd gebruikt, wat resulteerde in een CPT van ongeveer 16°C. Er werd daarom verondersteld dat vergelijkbare resultaten zouden worden verkregen met kanaalwater. Een grondige bestudering van de literatuur werd verwacht de succesvolle uitvoering van de werkelijke test te waarborgen.

12 Resultaten

Op 9 mei en 10 mei werden alle resultaten van alle testen opgehaald. Het gaat over meer dan 70 datasets en grafieken. Om de nuttige informatie te beperken, zijn van de volledige datasets samenvattende grafieken opgemaakt met de uitgewerkte resultaten. Alle grafieken zijn terug te vinden in de bijlage.

Voor de interpretatie van de resultaten is er gebruik gemaakt van spreidingsgrafieken. Deze kunnen een proportionele weergave geven van de resultaten met een goede groepering van de datapunten. De uitgevoerde testen zijn LPR, LPC, CPC en CPT. EFM is niet uitgevoerd geweest. De metingen van de Manta per locatie staan hieronder eveneens genoteerd. De potentialen zijn weergegeven tegenover de referentie-elektrode. Alle waarden zijn +0.210V indien er vergeleken wordt met de NWE. Na de testen is er ook steeds een foto genomen van het plaatje. Zo is er steeds een afbeelding van het plaatje voor het opgehangen in het water en na de uitvoering van de test. Deze zijn telkens beide te vinden in bijlage.

12.1 Eigenschappen water

De metingen van de Manta zijn op twee verschillende manier uitgevoerd. Zo is de Manta ondergedompeld geweest in water voor een eerste meting. Daarnaast is er ook water in de holster gebracht vanuit de emmer en zo een tweede meting uitgevoerd. Deze werkwijze werd zo gehanteerd om een vertekend beeld te vermijden. De meetwaarden staan gegroepeerd in Tabel 3.

De belangrijkste waarden uit deze tabel zijn de saliniteitswaarden. Dit geeft de hoeveelheid zout in het water aan. Zo is er duidelijk te zien dat er in Gent het minste zout aanwezig is en in Terneuzen het meeste. De temperatuur is overall ongeveer gelijk net als de pH waarde. De verhouding van de *total dissolved solids* en de specific conductance zijn ongeveer hetzelfde. Dit zijn het totaal aantal opgeloste deeltjes en de geleidbaarheid van het water. TDS heeft te maken met de puurheid van het water en kan bij hoge waarden dus zorgen voor extra aanslag op het coupon ('Total Dissolved Solids (TDS)', z.d.).

Tabel 3 Fysicochemische metingen op de drie locaties op het moment van de metingen

Bron: Eigen werk

Locatie	Type	DATE	TIME	Temp	c	pH	ur	SpCo	Salini	TDS	m	HDO	%	HDO	m	Cl	mg/L	Cl	mV	Chl	ug/	SpCond
Gent	In water	05/09/2024	12:46:34	16.02	8.26	884	0.43	565.8	68.4	6.73	18050	49.4	130.47	0.884								
Gent	Uit water	05/09/2024	12:50:34	17.07	8.23	888	0.43	568.2	90.9	8.75	14850	54.4	32.73	0.887								
Terneuzer	In water	05/09/2024	14:50:58	15.7	8.27	5107	2.76	3268	91.9	8.98	19120	50.7	79.31	5.107								
Terneuzer	Uit water	05/09/2024	14:52:38	16.25	8.25	5095	2.75	3261	97.6	9.42	19210	50.7	16.7	5.095								
Zelzate	In water	05/09/2024	17:02:34	15.38	8.19	3829	2.03	2450	77.3	7.63	16010	54.5	65.37	3.829								
Zelzate	Uit water	05/09/2024	17:03:56	15.18	8.16	3831	2.03	2452	84.6	8.39	15750	54.9	16.6	3.831								

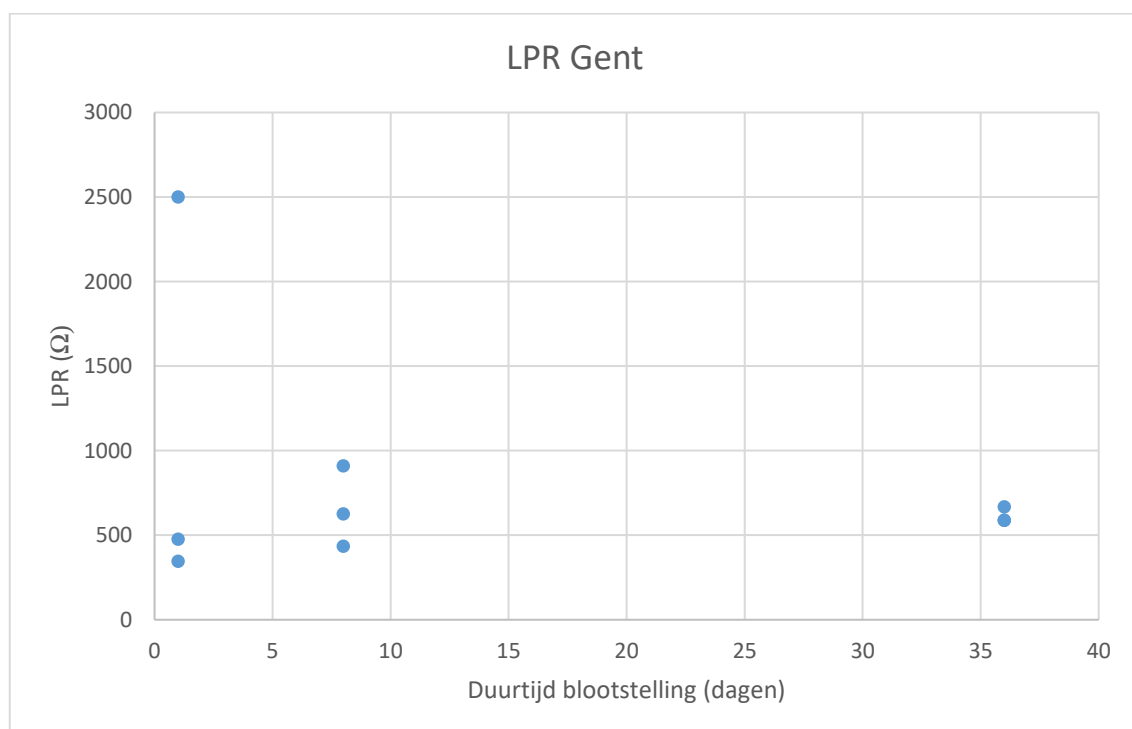
12.2 LPR

De belangrijkste eigenschap van de LPR meting is de weerstand. In de volgende grafieken is de weerstand in functie van de tijd en locatie gezet. Zo zijn er in elke grafiek 9 punten die met elkaar vergeleken kunnen worden met de weerstand. Een hogere weerstand betekent een lagere corrosiesnelheid en hoe lager de weerstand hoe hoger de corrosiesnelheid. De corrosiesnelheid is geen deel van deze test maar die is te vinden bij de LPC metingen. In totaal zijn er 27 coupons getest over 3 locaties genaamd Gent, Terneuzen en Zelzate per tijd van een maand, een week en een dag. Dit gaf zo een 27 grafieken en datasets die hier zijn samengevat in dit hoofdstuk. Dezelfde resultaten komen terug in andere grafieken. De oorspronkelijke grafieken kunnen ook geraadpleegd worden in de bijlage.

12.2.1 LPR in functie van locatie

12.2.1.1 Gent

In de eerste grafiek (Figuur 47) van de LPR valt direct op dat er een *outliner* aanwezig is in de metingen na één dag. Dit zorgt ervoor dat de schaal van de grafiek moeilijker te interpreteren valt. De algemene waarden volgen wel ongeveer dezelfde stijgende trend, waarbij de weerstand naarmate de tijd stijgt bij de locatie Gent. De gemeten punten per tijdseenheid liggen wel bij elkaar.

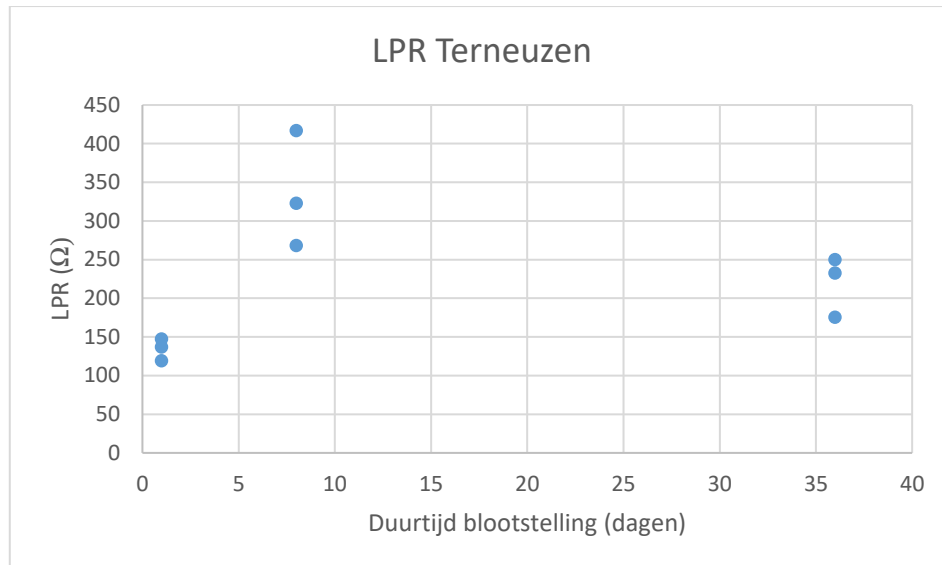


Figuur 47 Grafiek LPR Gent

Bron: Eigen werk

12.2.1.2 Terneuzen

De waarden van Terneuzen zijn al een lager in vergelijking met Gent. Hier is ook niet direct een verband te vinden in de tijd. Daarmee valt op dat er geen lineair gedrag is en er een maximum bereikt bij 8 dagen en een minimum bij één dag (Figuur 48).

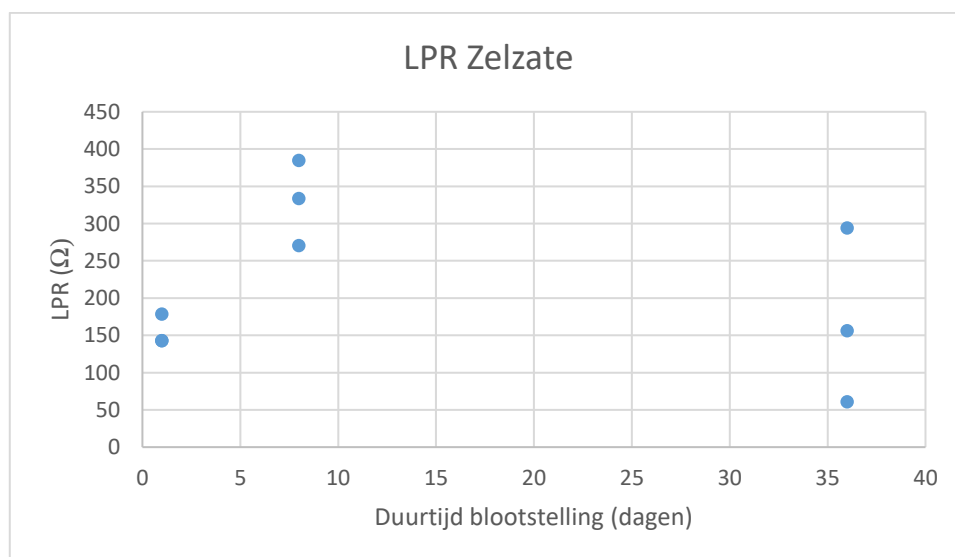


Figuur 48 Grafiek LPR Terneuzen

Bron: Eigen werk

12.2.1.3 Zelzate

Bij LPR Zelzate (Figuur 49) zijn de waarden vergelijkbaar met Terneuzen. Echter hier is er bij 38 dagen een bredere spreiding van resultaten. Ook is er een waarde van 60 ohm. Het kan zijn dat dit een uitschieter is die niet betrouwbaar is. Zo is er hier ook een minimum en maximum zoals in de grafiek hierboven.



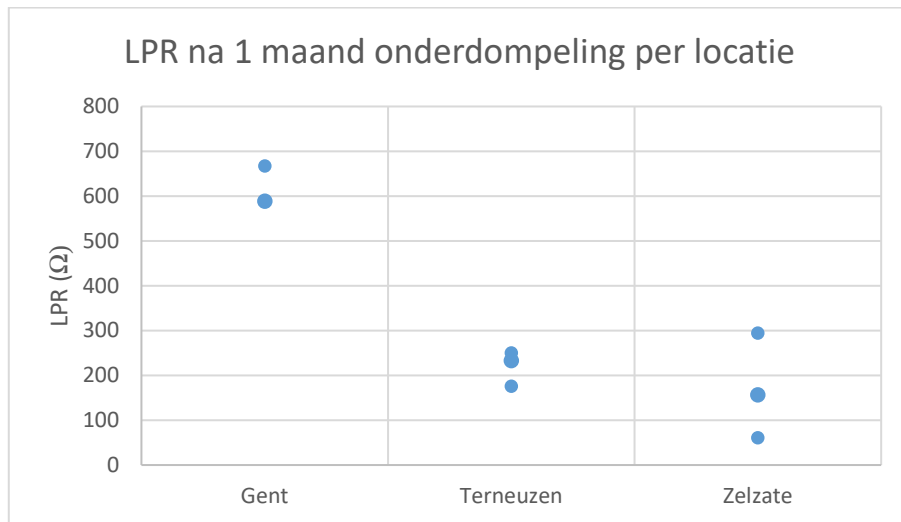
Figuur 49 Grafiek LPR Zelzate

Bron: Eigen werk

12.2.2 LPR in functie van tijd

12.2.2.1 Maand

Figuur 50 geeft een duidelijk overzicht van de LPR-metingen na een maand per locatie. De waarden zitten bij nader in een cluster. Zo valt ook op dat er in Gent dubbel zo hoge waarden zijn dan in Terneuzen of Zelzate. Tussen Gent en Terneuzen alsook tussen Gent en Zelzate is er een significant verschil aanwezig van $p < 0.005$.

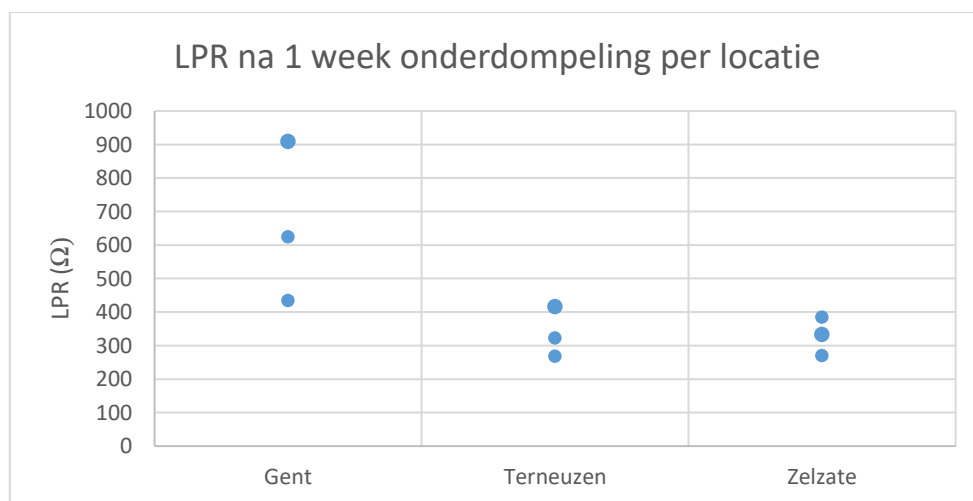


Figuur 50 Grafiek LPR één maand

Bron: Eigen werk

12.2.2.2 Week

Een piek van 900 is een hoog verschil met de andere waarden van de locatie Gent. Dit betekent een grotere spreiding en een indicatie van een hogere weerstand. Zo is hier ook een sterke gelijkenis tussen Zelzate en Terneuzen. Dit is te zien op de andere grafieken, maar hier is een betere weergave ervan (Figuur 51). Er is geen significant verschil tussen de locaties.

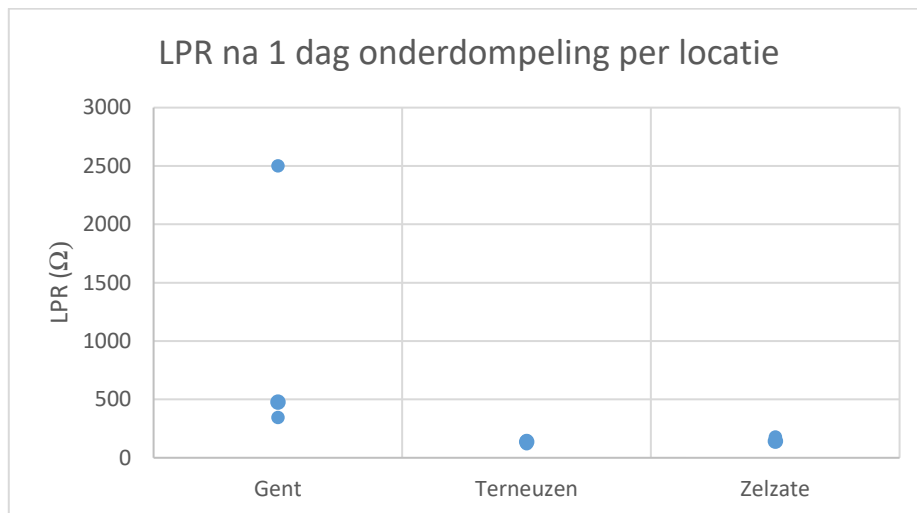


Figuur 51 Grafiek LPR één week

Bron: Eigen werk

12.2.2.3 Dag

Behalve de uitschieter valt er hier op dat in Gent de waarden veel hoger zijn en dat alle waarden in een cluster zitten (Figuur 52). Ook is er een groot verschil met de maand en week. De waarden van één dag liggen lager dan de waarden van een maand of een week. De weerstand in Terneuzen en Zelzate lijkt ook lager te liggen. Hier is ook geen significant verschil.



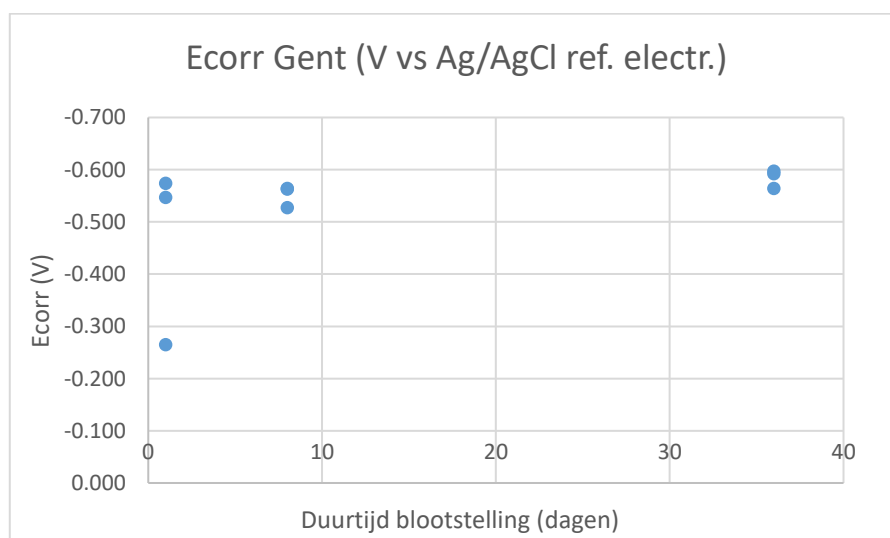
Figuur 52 Grafiek LPR één dag

Bron: Eigen werk

12.2.3 Ecorr in functie van locatie

12.2.3.1 Gent

De waarden in Gent (Figuur 53) liggen bij nader zeer dicht bij elkaar en zijn gegroepeerd, behalve één uitwijkende waarde. Het evenwicht van de S235 coupons lijkt naarmate de tijd vordert stabiel te zijn.

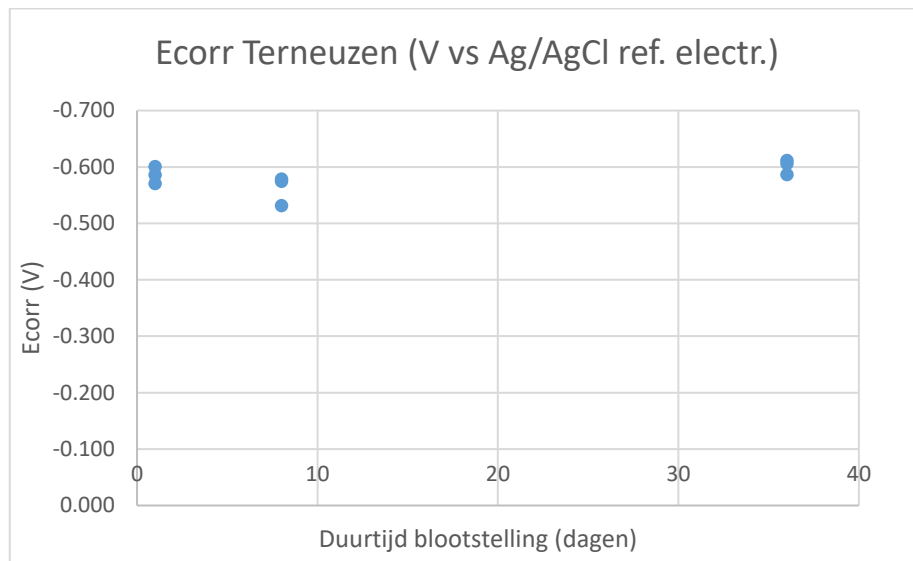


Figuur 53 Grafiek Ecorr Gent

Bron: Eigen werk

12.2.3.2 Terneuzen

In de grafiek van Figuur 54 is er een sterk verband met de vorige grafiek van Gent (Figuur 53). Het gedrag van de waarden zijn in dezelfde lijn. Hier is geen uitschieter.

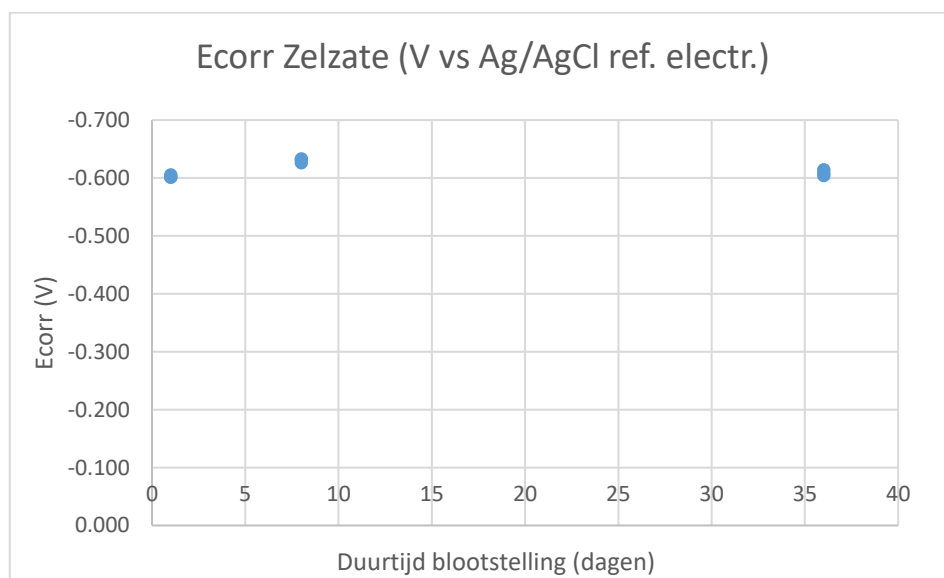


Figuur 54 Grafiek Ecorr Terneuzen

Bron: Eigen werk

12.2.3.3 Zelzate

De drie metingen per tijdseenheid zijn zo goed als hetzelfde in Figuur 55. Hiermee kan er zeker van een betrouwbare test gesproken worden. Wat opvalt is dat alle waarden van de Ecorr in dezelfde grootte valt.



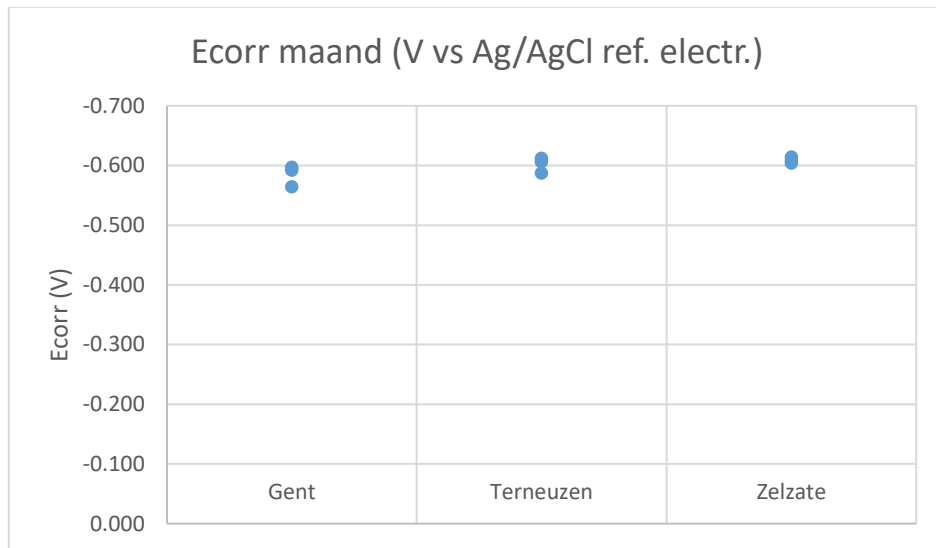
Figuur 55 Grafiek Ecorr Zelzate

Bron: Eigen werk

12.2.4 Ecorr in functie van tijd

12.2.4.1 Maand

In deze grafiek op Figuur 56 is er een lichte stijging waarneembaar in de grafiek wat resulteert in een daling van de waarden. Zo is de Ecorr lager in Zelzate dan in Gent en Terneuzen. De waarden liggen in het algemeen wel in een cluster en dicht bij elkaar.

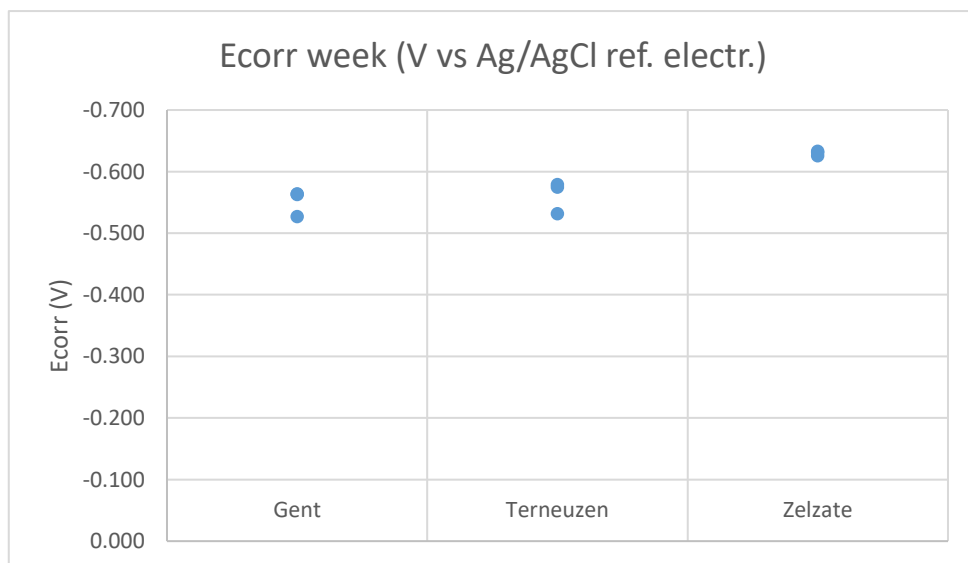


Figuur 56 Grafiek Ecorr één maand

Bron: Eigen werk

12.2.4.2 Week

In de week (Figuur 57) is ook te zien dat in Zelzate de Ecorr lager ligt dan de andere twee locaties. Wel blijven ze in de buurt liggen van elkaar. Er is een significant verschil tussen Gent en Zelzate van $p < 0.005$. Tussen Terneuzen en Zelzate een significant verschil van $p < 0.05$.

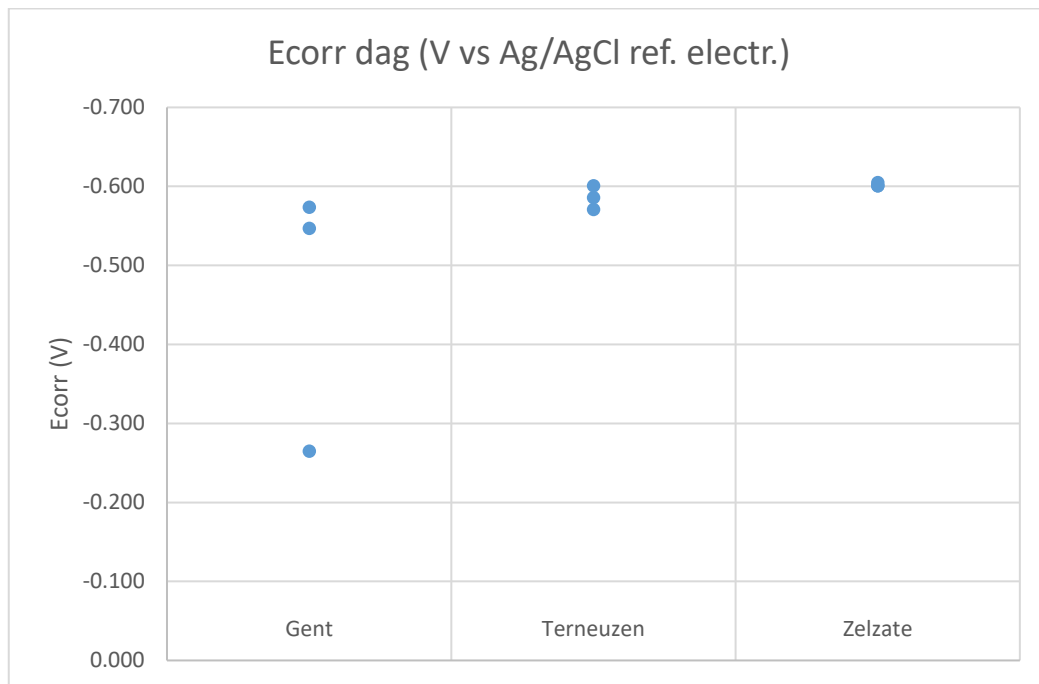


Figuur 57 Grafiek Ecorr één week

Bron: Eigen werk

12.2.4.3 Dag

De stijging is terug aanwezig en zo is in Zelzate de laagste waarde gemeten. Hier is weer dezelfde uitschieter te zien zoals bij Ecorr Gent (Figuur 53).



Figuur 58 Grafiek Ecorr één dag

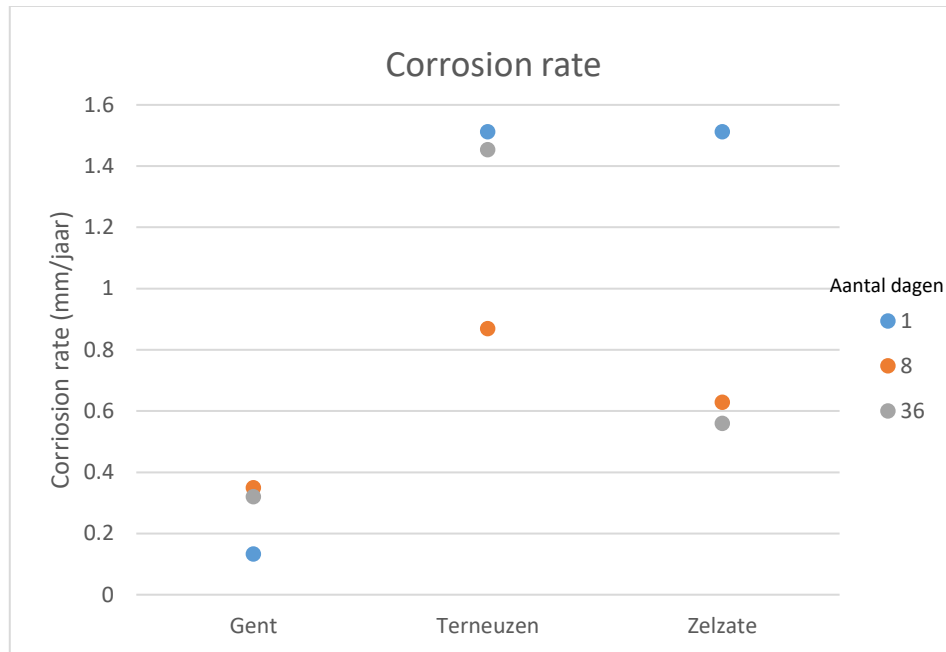
Bron: Eigen werk

12.3 LPC

De LPC test werd uitgevoerd na een LPR test. De belangrijke waarde die hieruit kan gehaald worden is de corrosiesnelheid. De Ecorr is al reeds weergegeven hierboven. De waarden staan in mm/jaar. Hoe hoger de waarde hoe sneller uniforme corrosie gaat op dat staaloppervlak. Zo werden er in totaal 9 testen gedaan voor een LPC te bepalen. Op elke locatie één meting per tijdseenheid. Uit de gegevens zijn twee belangrijke grafieken kunnen opgesteld worden.

12.3.1 Corrosion rate in functie van locatie

De resultaten liggen ver van elkaar gespreid (Figuur 59). De waarden van Gent zijn wel al veel lager dan de andere waarden. De meerderheid is ook wel gegroepeerd. Wat ook opvalt is dat de waarden voor Terneuzen en Zelzate zeer hoog zijn.

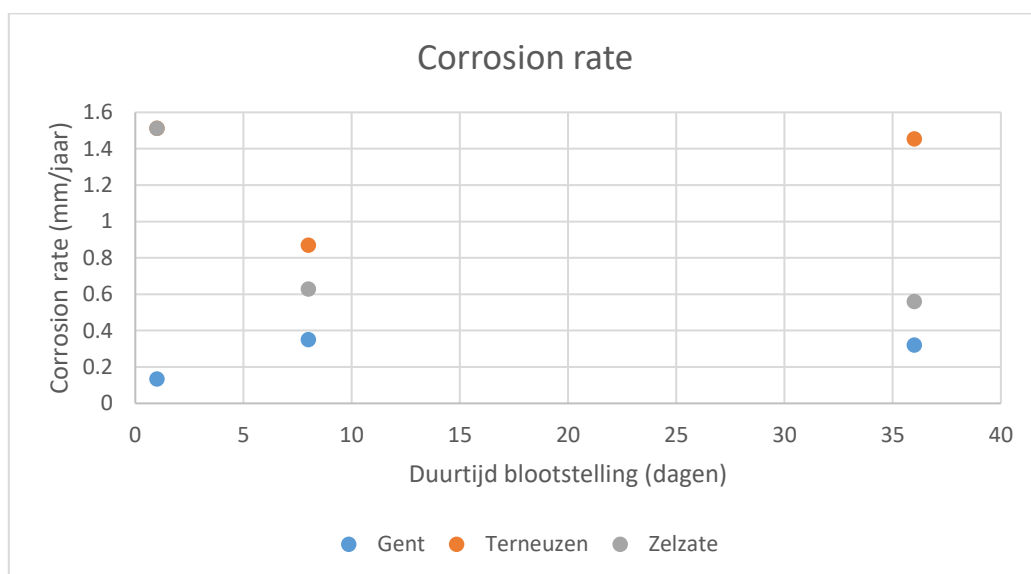


Figuur 59 Grafiek corrosion rate per locatie

Bron: Eigen werk

12.3.2 Corrosion rate in functie van tijd

In Gent en Zelzate lijken de corrosiesnelheden te stabiliseren in Figuur 60. De waarden zijn gemiddeld ook het hoogste in Terneuzen en de kleinste waarden zijn te vinden in Gent.



Figuur 60 Grafiek corrosion rate in functie van tijd

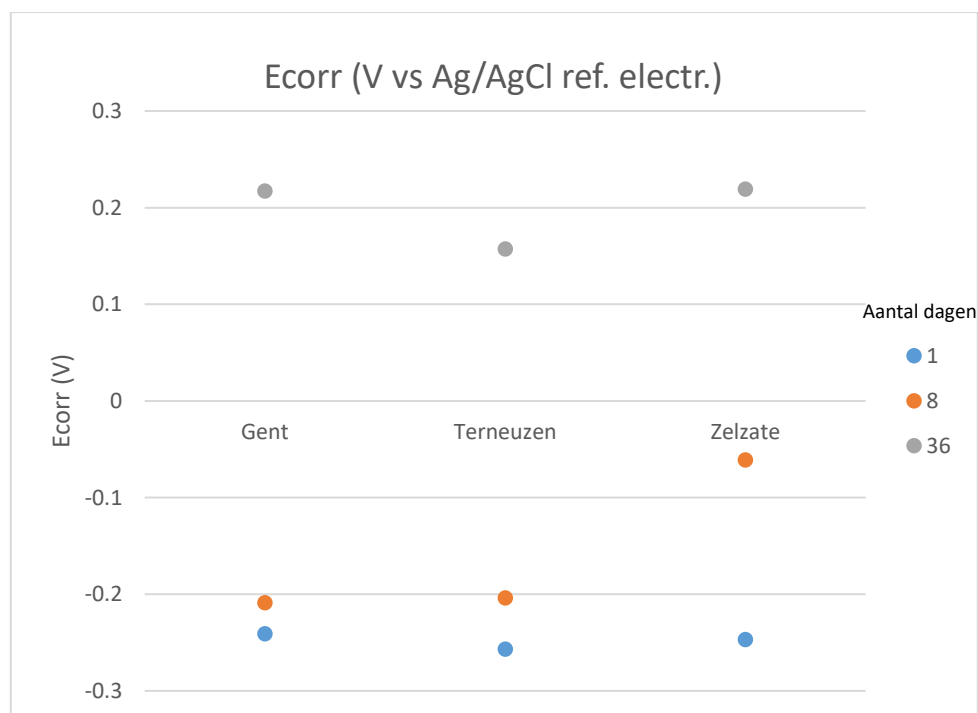
Bron: Eigen werk

12.4 CPC

Cyclische polarisatie was bedoeld om een beeld te geven over putcorrosie. Zo werden er 9 coupons getest. Elke locatie had zo een tijdseenheid. De belangrijke informatie hieruit is de kritische putpotentiaal of CPP en de repassivatiepotentiaal E_{rep} . Ook de E_{corr} is hiervan genoteerd. De CPP bepaalt wanneer putcorrosie initieert: hoe lager deze potentiaal, hoe sneller dat putcorrosie zal ontstaan. De repassivatiepotentiaal geeft aan wanneer de bescherm laag terug zal vormen. Hoe eerder deze komt, hoe sneller het coupon terug beschermd is tegen corrosie etc.

12.4.1 E_{corr} in functie van locatie

Er is in deze grafiek op Figuur 61 een duidelijk verband per locatie. De spreiding van de resultaten is soortgelijk met de hoogste waarden op 36 dagen en de laagste op één dag. Zo lijkt het gedrag van Gent en Terneuzen sterk op elkaar.

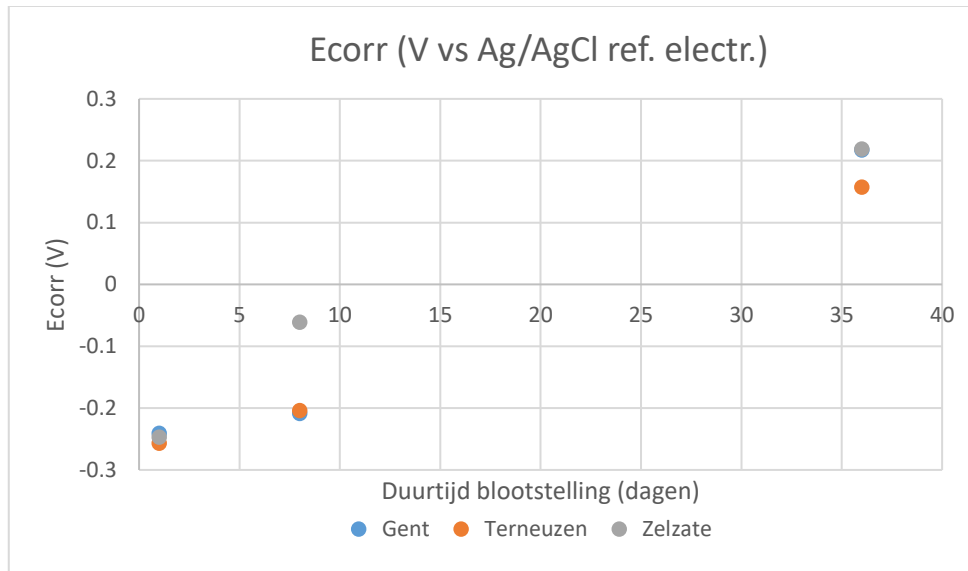


Figuur 61 Grafiek E_{corr} per locatie

Bron: Eigen werk

12.4.2 Ecorr in functie van tijd

Een stijging van alle waarden is meteen zichtbaar (Figuur 62) en de groepering van de waarden per tijdseenheid ook. Zo is het ook duidelijk dat de resultaten van 36 dagen de hoogste Ecorr hebben en de één dag waarden ook de laagste.

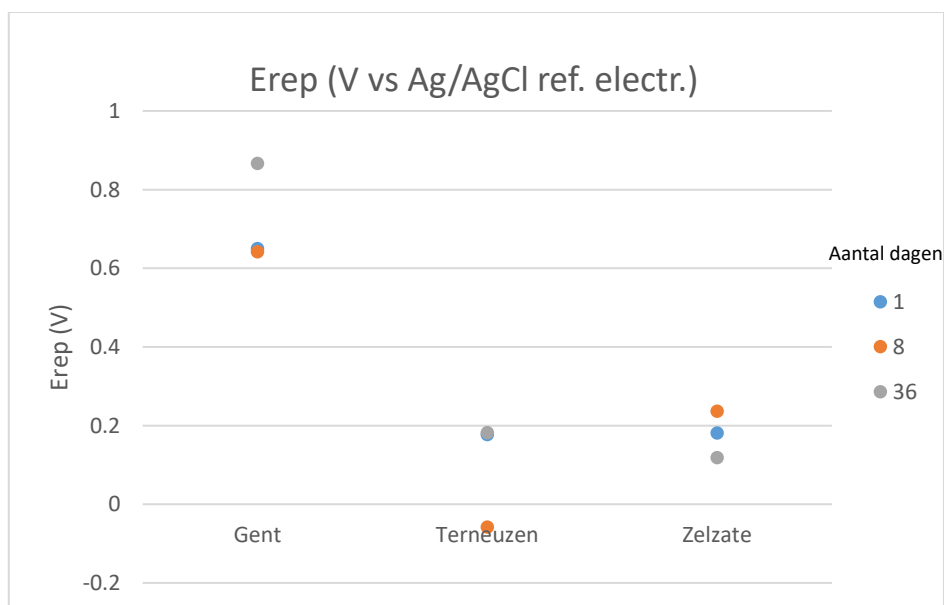


Figuur 62 Grafiek Ecorr in functie van tijd

Bron: Eigen werk

12.4.3 Repassivatiepotaal in functie van locatie

In deze grafiek op Figuur 63 zijn er weer clusters gevormd per locatie. De beschermingslaag zal eerst terugkeren in Gent en later in Zelzate en Terneuzen rond dezelfde potentiaal. Er lijkt ook wel een kleine afwijking te zijn bij twee waarden.

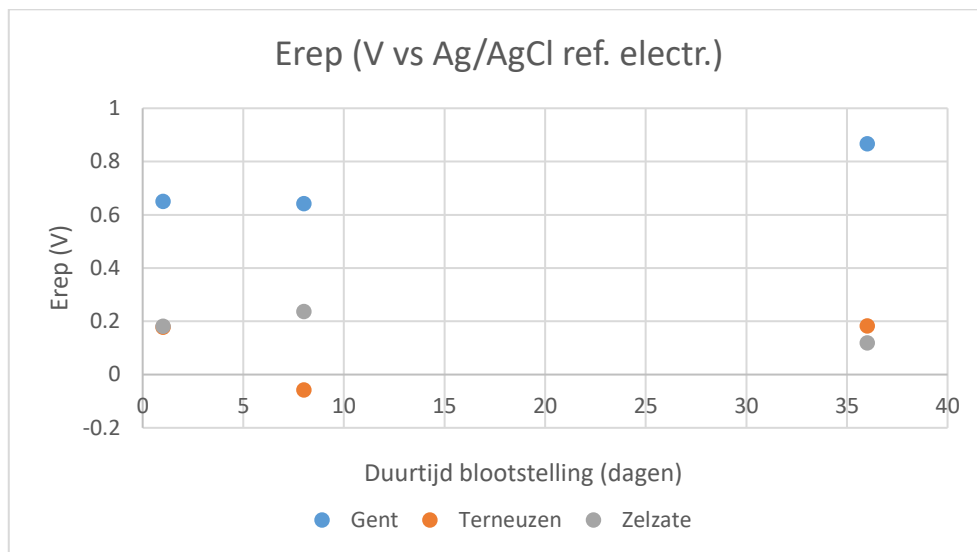


Figuur 63 Grafiek Erep per locatie

Bron: Eigen werk

12.4.4 Repassivatiepotaal in functie van tijd

Zelzate blijft in deze grafiek (Figuur 64) ongeveer stabiel met Gent de hoogste waarde. De resultaten van Zelzate en Terneuzen zijn hier laag.

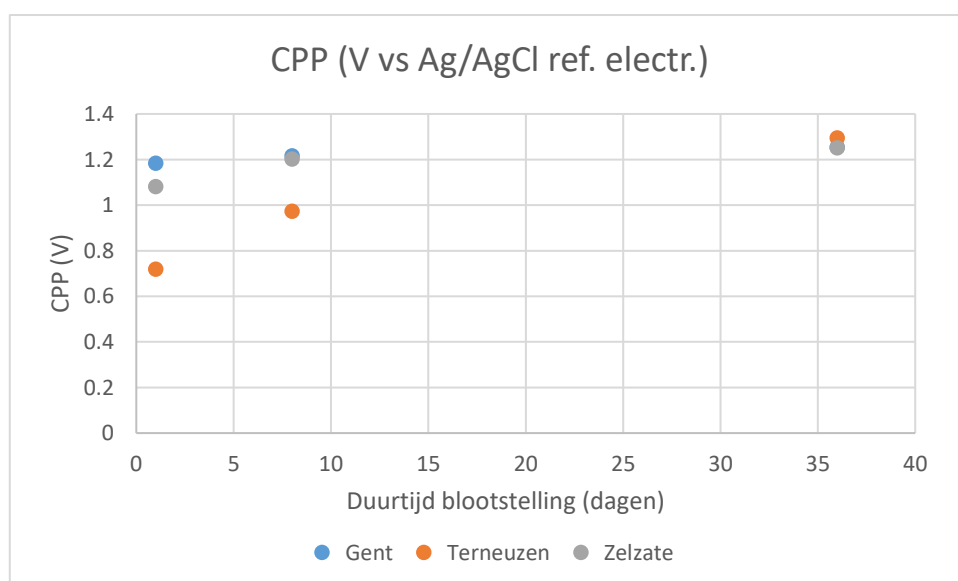


Figuur 64 Grafiek Erep in functie van tijd

Bron: Eigen werk

12.4.5 CPP in functie van tijd

In de CPP grafiek op Figuur 65 is er steeds een lichte stijging te zien. De kritische putpotentiaal zal steeds later bereikt worden en putcorrosie zal bij een hogere potentiaal initiëren. In Terneuzen is de potentiaal als eerst bereikt. Ook is te zien dat na 36 dagen de CPP van elke locatie hetzelfde blijft.

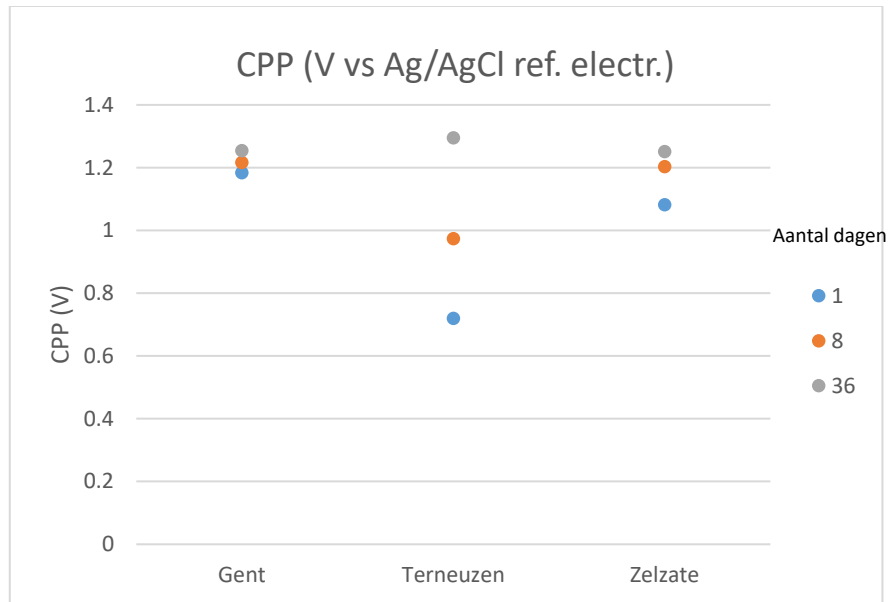


Figuur 65 Grafiek CPP in functie van tijd

Bron: Eigen werk

12.4.6 CPP in functie van locatie

Er zijn twee duidelijke clusters te zien in Figuur 66. Hierbij is Terneuzen de afwijkende factor. Bij één dag is de waarde toch steeds het laagste en bij 36 dagen is deze steeds de hoogste. De waarden van Terneuzen geven wel een lineaire weergave mee ten opzichte van de tijd.

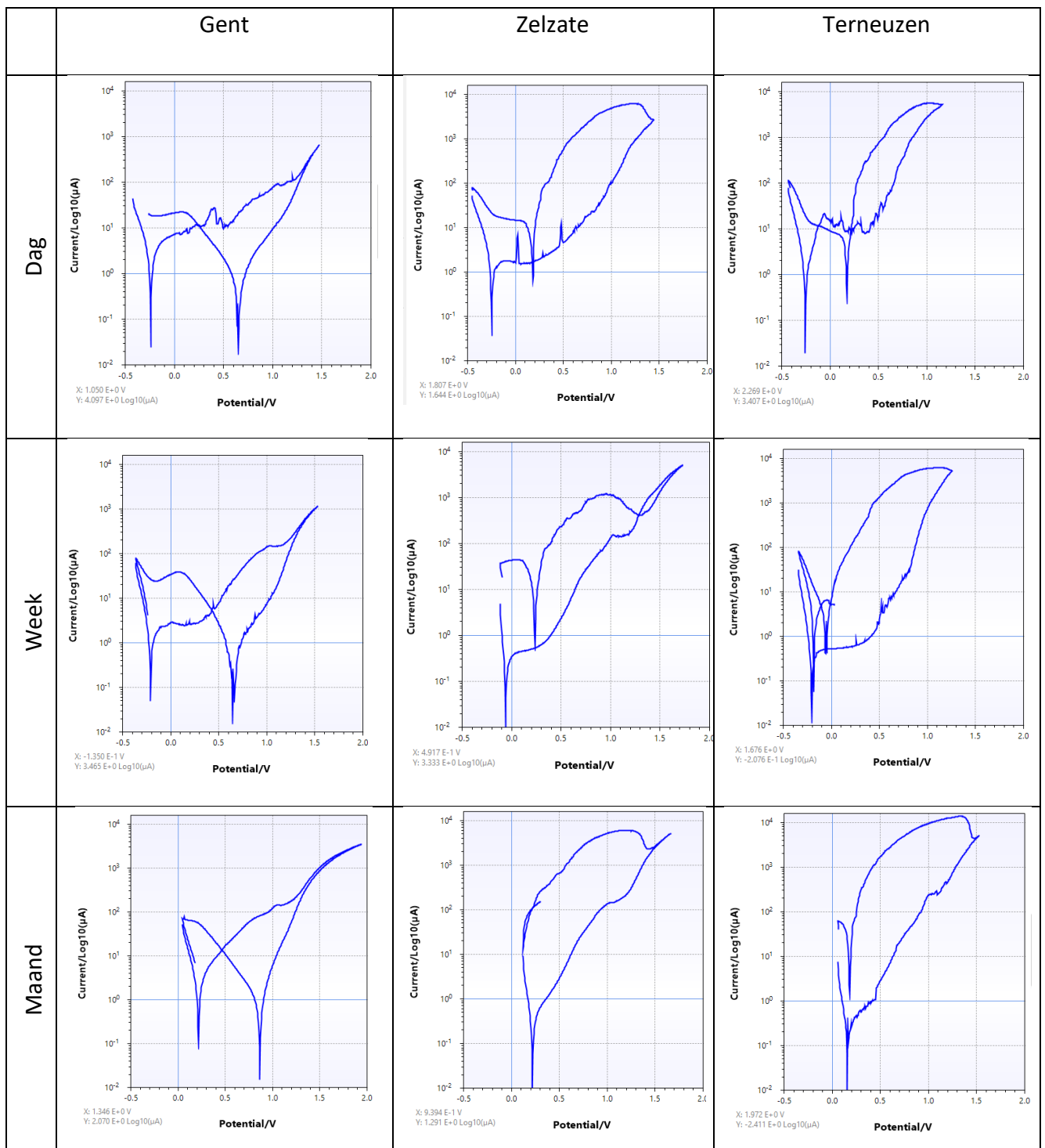


Figuur 66 Grafiek CPP per locatie

Bron: Eigen werk

12.4.7 CPC rooster

Doordat de CPC test de meest complexe is om te interpreteren, is er een rooster gemaakt voor elke locatie en tijdseenheid (Figuur 67). Zo valt op dat er zeker verbanden zijn per locatie. Dit kan al deels bevestigd worden door de vorige gevonden waarden van de E_{corr} , de E_{rep} en de CPP. Om hierover een conclusie te trekken moeten deze grafieken vergeleken worden met andere waarden in de literatuur.



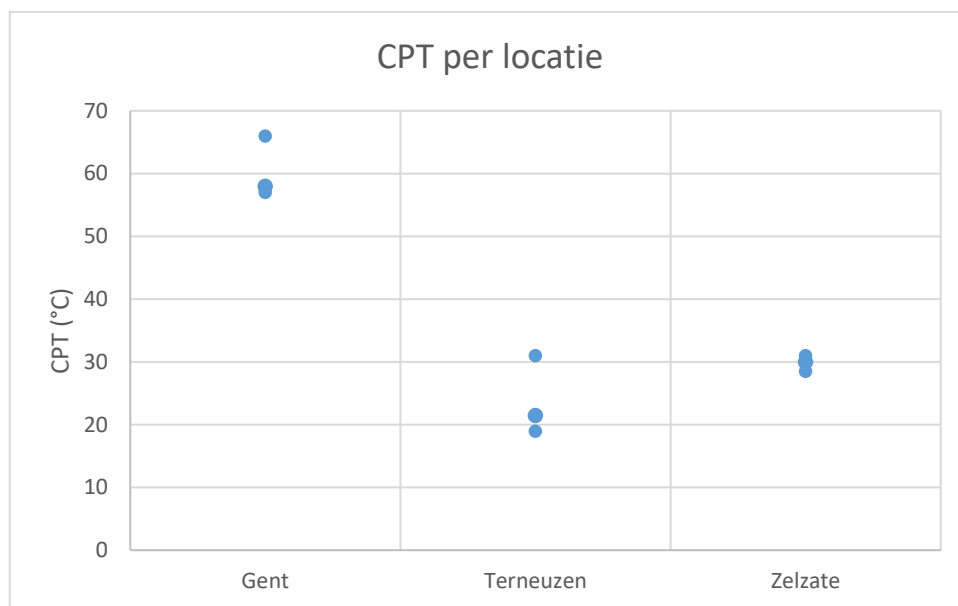
Figuur 67 Grafieken van CPC in rooster

Bron: Eigen werk

Wat opvalt aan de grafiek is, dat per locatie, de vorm van de grafiek consistent blijft. De gevonden curven lijken succesvol te zijn. Enkel bij Terneuzen bij één week is er een fout gelopen in de grafiek. De potentiaal bereikte zijn eindwaarde en begon opnieuw met de test zonder aanzet. Dit was ten gevolge van fout in de software. Ook de grafiek van Zelzate van een maand is anders van vorm. Dit komt doordat de repassivatiepotentiaal lager is dan de corrosiepotentiaal. De exponentiele stijging van de stroom is ook groter hoe langer de blootstelling. Hierbij is ook te zien dat het passieve gedeelte van de grafiek verdwijnt na een maand. De E_{corr} schuift ook steeds verder op naarmate de blootstelling langer wordt. Dit is ook te zien op Figuur 62.

12.5 CPT

De laatste grafiek (Figuur 68) en test is de CPT. De *critical pitting temperature* geeft de temperatuur vanaf wanneer putcorrosie initieert. Hierbij is er in Gent de hoogste temperatuur waarneembaar en lijken de waarden van Terneuzen en Zelzate sterk op elkaar.



Figuur 68 Grafiek CPT per locatie

Bron: Eigen werk

12.6 Interpretatie van resultaten

In dit deel worden de resultaten geïnterpreteerd en besproken om een mogelijke conclusie te trekken voor het corrosiegedrag in het kanaal Gent-Terneuzen. De eerste twee testen staan voor de karakterisatie van uniforme corrosie voor S235 staal en de laatste twee voor putcorrosie bij 316L staal. De resultaten worden besproken per test met betrekking tot de blootstellingstijd en de locatie.

12.6.1 LPR

Zoals eerder besproken, staat een lage weerstand parallel met een hogere corrosiesnelheid. Er wordt geen rekening gehouden met de extreme waarden. In de grafieken wordt er steeds bevestigd dat in Zelzate en Terneuzen steeds de laagste weerstanden te vinden zijn ongeacht de duur van de blootstelling. Dit betekent dat er op die locaties een hogere corrosiesnelheid te vinden valt. In Gent zijn er altijd hoge weerstandswaarden gevonden wat duidt op een lagere corrosiesnelheid. Dit heeft vooral te maken met het zoutgehalte.

Als er gekeken wordt naar de verschillen van de tijd van blootstelling, valt er steeds een zelfde patroon op. De weerstandswaarde is op één dag steeds relatief laag, vervolgens voor één week stijgt die aanzienlijk en na één maand lijkt het tussen de twee waarden te stabiliseren. De grafiek toont een typische respons van een materiaal dat aanvankelijk geen corrosieproductlaag heeft en er één opbouwt doorheen de blootstellingsperiode, waardoor de weerstand stijgt. Dit is typisch voor een laaggelegeerd corrosiestaal. Na ongeveer een maand wordt een toename van de corrosiesnelheid en een afname van de weerstand in Terneuzen en Zelzate geobserveerd.

Voor de corrosiepotentiaal E_{corr} zijn alle waarden negatief voor de interpretatie. De hoogste waarden op de grafiek zijn dus de minima voor de E_{corr} . Hoe lager de E_{corr} hoe sneller de corrosie zal plaatsvinden. Om de resultaten per locatie te bekijken, valt er op in Zelzate dat de waarden steeds het hoogst liggen bij elke blootstellingstijd, met de waarden van Terneuzen hierbij dicht volgend. Gent blijkt steeds de hoogste potentiaal te hebben.

De vorm van de grafieken per blootstellingstijd lijken sterk op elkaar met uitsluiting van de uitschieters. De vorm is omgekeerd evenredig met de LPR grafieken per blootstellingstijd. Dit heeft opnieuw te maken met de corrosieproductlaag zoals eerder besproken. Zo zijn de waarden van één maand wel lager dan de waarden van één dag. Enkel hier valt op dat in Zelzate bij één week de potentiaal kleiner wordt in plaats van groter.

12.6.2 LPC

Voor de *corrosion rate* van de S235 coupons zijn sommige waarden zeer hoog. Dit kan aan verschillende factoren liggen, maar waarschijnlijk ligt de oorzaak hiervan aan het feit dat de LPC test zo goed als onmiddellijk na de LPR test werd uitgevoerd op de locaties van Zelzate en Terneuzen. Bij Gent was het starten van deze test altijd iets later omdat toen alles nog gecontroleerd moest worden. De testen zelf werden correct uitgevoerd en dit waren de resultaten.

In Gent begint de corrosiesnelheid laag, verdubbelt op dag 8, en blijft daarna stabiel, wat wijst op een stabiele corrosieomgeving met een effectieve corrosieproductlaag. Terneuzen vertoont een hoge initiële corrosiesnelheid, die afneemt op dag 8, maar weer stijgt op dag 36, wat kan duiden op tijdelijke passivering gevolgd door afbraak van de bescherm laag. In Zelzate zijn de waarden omgekeerd: de corrosiesnelheid begint hoog, neemt af op dag 8, en daalt verder op dag 36, wat mogelijk te wijten is aan de opbouw van een corrosieproductlaag die de corrosiesnelheid vermindert. Op de afbeeldingen van na de test is te zien dat op de coupons één maand in Zelzate de dikste film laag zat.

12.6.3 CPC

De data toont aan dat de passiveringslaag van 316L staal zich effectief ontwikkelt over een langere blootstellingsperiode, wat blijkt uit de toename in corrosiepotentiaal na 36 dagen. In de vroege fase, bij zowel één dag als 8 dagen, vertonen alle locaties een lage corrosiepotentiaal, wat suggereert dat de passiveringslaag zich nog niet volledig heeft gevormd of nog kwetsbaar is voor initiële corrosie. Echter, na 36 dagen wordt een duidelijke verbetering in de corrosiepotentiaal waargenomen, wat over het algemeen aangeeft dat het metaal meer nobel is geworden, de passivatielaag zich beter heeft ontwikkeld en een hogere bescherming biedt tegen uniforme corrosie. Deze ontwikkeling is het meest uitgesproken in Zelzate, gevolgd door Gent en Terneuzen, wat impliceert dat de omgevingsomstandigheden in Zelzate het meest gunstig zijn voor de vorming van een effectieve passiveringslaag, alleen kijkende naar de corrosiepotentiaal.

Gent toont consequent hogere Erep waarden, wat duidt op een snellere herstelling van de passivatielaag, waarschijnlijk door de lagere zoutconcentratie daar. Terneuzen en Zelzate vertonen lagere Erep waarden, wat wijst op tragere passivering door hogere zoutconcentraties of een andere oorzaak. Over tijd worden de Erep waarden in het algemeen stabiel, wat aangeeft dat de passivatielaag bij langdurige blootstelling verbetert. Bij Terneuzen gaat de waarde na 8 dagen zelfs negatief, wat betekent dat de passivatielaag niet meer gevormd kan worden, bij ontwikkeling van een put.

De kritische putpotentiaal of CPP duidt aan vanaf wanneer putcorrosie zich initieert. Hoe lager de potentiaal, hoe sneller putcorrosie zich zal voordoen. De CPP stijgt naargelang de blootstellingstijd bij elke locatie. Echter is bij Terneuzen te zien dat hier de grootste stijging is. Na één maand zijn de waarden van elke locatie gegroepeerd. Dit heeft te maken met de passivatie.

De cyclische polarisatiecurven tonen aan dat Gent de meest consistente en stabiele passivatielagen heeft, met duidelijke passivatiezones die verbeteren over tijd, waarschijnlijk door de lagere zoutconcentratie. Bij Zelzate en Terneuzen valt er steeds een verkleining van het passief gebied op. Wat duidt op een slechtere bescherming. Daarnaast is er een uitgesproken hysteresislus die aangeeft dat er geen putcorrosie initieert bij Gent, omdat deze daar niet aanwezig is. De repassivatiepotentiaal ligt onder de OCP of corrosiepotentiaal bij Zelzate en bijna ook bij Terneuzen. Dit betekent dat de passivatielaag niet meer hersteld wordt.

12.6.4 CPT

De data toont aan dat de CPT waarden variëren per locatie en lijken beïnvloed te worden door het zoutgehalte in de omgeving. Gent heeft de hoogste CPT waarden, wat suggereert dat het staal hier een sterke weerstand tegen putcorrosie heeft, waarschijnlijk door een lager zoutgehalte. Terneuzen heeft de laagste CPT waarden, wat wijst op een lagere weerstand tegen putcorrosie, waarschijnlijk door een hoger zoutgehalte dat de corrosieve processen versnelt. Zelzate ligt tussen de andere twee locaties in, wat een matig zoutgehalte suggereert en enige weerstand tegen putcorrosie biedt, maar minder dan Gent. De CPT in Terneuzen ligt dicht bij de omgevingstemperatuur, wat niet goed is voor het 316L staal.

13 Conclusie

In deze thesis werd de mogelijkheid onderzocht om uniforme corrosie en putcorrosie te meten met behulp van elektrochemische methoden. De traditionele *weight loss* methode is tijdrovend en inefficiënt, waardoor de noodzaak ontstond voor een snellere en nauwkeurigere meetmethode. Door middel van een literatuurstudie en praktisch onderzoek werden vier elektrochemische testen geëvalueerd: de *Linear Polarization Resistance* methode, de *Linear Polarization Curve* methode, de *Cyclic Polarization Curve* methode en de *Critical Pitting Temperature* methode. De tests zijn uitgevoerd op twee staalsoorten op drie verschillende locaties langs het kanaal Gent-Terneuzen, met variërende onderdompelingstijden.

Uit het onderzoek bleek dat de elektrochemische methoden effectieve en haalbare alternatieven zijn voor het meten van corrosie, zowel in het laboratorium als op locatie. De resultaten toonden aan dat de corrosiesnelheden en weerstand tegen corrosie sterk afhankelijk zijn van de locatie en de duur van blootstelling.

De LPR methode onthulde dat de corrosiesnelheid het hoogst is in Zelzate en Terneuzen, en het laagst in Gent. Dit komt voornamelijk door het hogere zoutgehalte in Zelzate en Terneuzen. De weerstandswaarden vertoonden een patroon waarbij ze na één dag relatief laag waren, na één week aanzienlijk stegen, en na één maand stabiliseerden. Dit duidt op de vorming en afbraak van een passivatielaag.

De LPC test bevestigde deze bevindingen, waarbij Gent een stabiele corrosiesnelheid vertoonde, Terneuzen een tijdelijke passivering gevolgd door afbraak van de bescherm laag, en Zelzate een initiële hoge corrosiesnelheid die afnam door de opbouw van een biofilm.

De CPC test toonde aan dat de passivatielaag van 316L staal zich over tijd effectief ontwikkelt, vooral in Zelzate, gevolgd door Gent en Terneuzen. De Erep waarden waren consistent hoger in Gent, wat wijst op een snellere hervorming van de passivatielaag, waarschijnlijk door de lagere zoutconcentratie. De kritische putpotential steeg met de blootstellingstijd, en was het hoogst in Gent, wat wijst op een sterkere weerstand tegen putcorrosie.

De CPT waarden varieerden per locatie, waarbij Gent de hoogste CPT waarden had, wat duidt op een sterke weerstand tegen putcorrosie door een lager zoutgehalte. Terneuzen had de laagste CPT waarden, wat wijst op een lagere weerstand tegen putcorrosie door een hoger zoutgehalte. Zelzate lag tussen de andere twee locaties in.

Het is belangrijk om te vermelden dat de resultaten mogelijk ook beïnvloed werden door *Microbially Induced Corrosion*. In Zelzate werd bijvoorbeeld een biofilm waargenomen op de staalcoupons na een maand blootstelling, wat suggereert dat microbiële activiteiten een rol kunnen spelen in de corrosieprocessen. De bacteriën kunnen zowel de snelheid van uniforme corrosie als de vorming van putcorrosie beïnvloeden, afhankelijk van de specifieke microbiële gemeenschappen en de omgevingsomstandigheden.

Uit de resultaten van het onderzoek kan geconcludeerd worden dat het materiaal S235 niet geschikt is voor gebruik in corrosieve omgevingen, zoals die in het kanaal Gent-Terneuzen. Dit komt door de hoge gevoeligheid van S235.

Hoewel 316L staal doorgaans beter bestand is tegen corrosie vanwege de aanwezigheid van chroom en nikkel, faalt ook dit materiaal in de specifieke omstandigheden van de locaties Zelzate en Terneuzen. De verhoogde putcorrosie in deze gebieden kan te wijten zijn aan specifieke lokale factoren, zoals microbiële activiteit, waterchemie of vervuilende stoffen, die de corrosieweerstand van 316L staal negatief beïnvloeden.

De onderzoeksdoelstelling was om te beoordelen of uniforme corrosie en putcorrosie efficiënt en nauwkeurig kunnen worden gemeten met elektrochemische methoden, en of deze methoden praktisch uitvoerbaar zijn op locatie of in een laboratoriumopstelling.

Uit dit onderzoek blijkt dat elektrochemische methoden zoals de LPR, LPC, CPC en CPT testen efficiënte en nauwkeurige alternatieven bieden voor het meten van zowel uniforme corrosie als putcorrosie. Deze methoden zijn niet alleen in staat om de snelheid en weerstand tegen corrosie nauwkeurig te meten, maar ze zijn ook praktisch uitvoerbaar in zowel laboratorium- als locatieomstandigheden. De variatie in meetresultaten per locatie benadrukt het belang van omgevingsfactoren zoals zoutgehalte en microbiële activiteit in het corrosieproces, en bevestigt de noodzaak van locatie-specifieke metingen.

Kortom, elektrochemische methoden zijn geschikt voor het nauwkeurig en efficiënt meten van corrosie, en vormen een waardevol hulpmiddel voor het monitoren en beheersen van corrosie in maritieme omgevingen zoals het kanaal Gent-Terneuzen.

De testmethoden zijn goed gelukt en de resultaten zijn betrouwbaar. In de toekomst zou dit project nog verder uitgebreid kunnen worden door andere testen te gebruiken en door de gebruikte coupons onder de microscoop te leggen om de gevonden resultaten te bevestigen.

14 Bibliografie

- Ag/AgCl reference electrode (length 12.5 cm)*. (z.d.). Geraadpleegd 27 mei 2024, van <https://www.metrohm.com/en/products/6/0726/60726100.html>
- Alvarez, M. G., & Galvele, J. R. (2010). Pitting Corrosion. In *Shreir's Corrosion* (pp. 772-800). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044452787-5.00030-5>
- Bhandari, J., Khan, F., Abbassi, R., Garaniya, V., & Ojeda, R. (2015). Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures – A technical review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 37, 39-62. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.06.008>
- Burstein, G. T., Liu, C., Souto, R. M., & Vines, S. P. (2004). Origins of pitting corrosion. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 39(1), 25-30. <https://doi.org/10.1179/147842204225016859>
- Detailed overview—Overview—About Us*. (z.d.). Geraadpleegd 21 mei 2023, van <https://www.astm.org/about/overview/detailed-overview.html>
- Dincer, I., Rosen, M. A., & Al-Zareer, M. (2018). 3.10 Electrochemical Energy Production. In *Comprehensive Energy Systems* (pp. 416-469). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00325-4>
- El Ibrahimy, B., & Berdimurodov, E. (2023). Chapter 5—Weight loss technique for corrosion measurements. In J. Aslam, C. Verma, & C. Mustansar Hussain (Red.), *Electrochemical and Analytical Techniques for Sustainable Corrosion Monitoring* (pp. 81-90). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15783-7.00011-6>
- Electrochemical Frequency Modulation-EFM140-Corrosion Rate Measurement Gamry Instruments*. (z.d.). Geraadpleegd 22 mei 2023, van <https://www.gamry.com/support-2/software/efm140-electrochemical-frequency-modulation/>
- Evitts, R. W., & Kennell, G. F. (2018). Chapter 15—Cathodic Protection. In M. Kutz (Red.), *Handbook of Environmental Degradation of Materials (Third Edition)* (pp. 301-321). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-52472-8.00015-0>

- Gu, J.-D. (2018). Chapter 14—Microbial Biofilms, Fouling, Corrosion, and Biodeterioration of Materials. In M. Kutz (Red.), *Handbook of Environmental Degradation of Materials (Third Edition)* (pp. 273-298). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-52472-8.00014-9>
- hauptrob. (z.d.). *Scanning-electron microscopy* [Page]. Fakultäten an Der HU. Geraadpleegd 22 mei 2023, van https://fakultaeten.hu-berlin.de/en/mnf/forschung_internationales/grs/salsa/p-a-labs/application-lab/instrumentation/a-labs-sem
- ISO - What we do. (2022, december 6). ISO. <https://www.iso.org/what-we-do.html>
- ISO 11463:2020. (z.d.). ISO. Geraadpleegd 20 mei 2023, van <https://www.iso.org/standard/73318.html>
- Javaherdashti, R., & Alasvand, K. (2019). Chapter 3—An Introduction to Microbial Corrosion. In R. Javaherdashti & K. Alasvand (Red.), *Biological Treatment of Microbial Corrosion* (pp. 25-70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816108-1.00003-3>
- Laboratorium Magnetische Roerder Verwarmingsplaat Digitaal Display, 1000 MI 2200 Rpm Verstelbare Churn Roer Machine Blender Laboratorium Roerder: Amazon.nl: Zakelijk, industrie & wetenschap. (z.d.). Geraadpleegd 27 mei 2024, van <https://www.amazon.nl/Laboratorium-Magnetische-Verwarmingsplaat-Digitaal-Verstelbare/dp/B0BX3Q1LXD>
- Li, D. (Red.). (2004). Chapter 2—Basics of electrical double layer. In *Interface Science and Technology* (Vol. 2, pp. 7-29). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(04\)80024-3](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(04)80024-3)
- Li, K., Whitfield, M., & Van Vliet, K. J. (2013). Beating the bugs: Roles of microbial biofilms in corrosion. *Corrosion Reviews*, 31(3-6), 73-84. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2013-0019>
- Li, Y., Feng, S., Liu, H., Tian, X., Xia, Y., Li, M., Xu, K., Yu, H., Liu, Q., & Chen, C. (2020). Bacterial distribution in SRB biofilm affects MIC pitting of carbon steel studied using FIB-SEM. *Corrosion Science*, 167, 108512. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108512>

- Liu, B., Liu, M., Liu, Z., Du, C., & Li, X. (2022). Nitrate-reducing-bacteria assisted hydrogen embrittlement of X80 steel in a near-neutral pH solution. *Corrosion Science*, 202, 110317. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110317>
- Lv, J., Yue, Q., Ding, R., Wang, X., Gui, T., & Zhao, X. (2021). The Application of Electrochemical Noise for the Study of Metal Corrosion and Organic Anticorrosion Coatings: A Review. *ChemElectroChem*, 8(2), 337-351. <https://doi.org/10.1002/celec.202001342>
- Nakhaie, D., Imani, A., Autret, M., Schaller, R. F., & Asselin, E. (2021). Critical pitting temperature of selective laser melted 316L stainless steel: A mechanistic approach. *Corrosion Science*, 185, 109302. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109302>
- Oldfield, J. W., & Sutton, W. H. (1978). Crevice Corrosion of Stainless Steels: I. A Mathematical Model. *British Corrosion Journal*, 13(1), 13-22. <https://doi.org/10.1179/000705978798358671>
- PalmSens4*. (z.d.). PalmSens. Geraadpleegd 27 mei 2024, van <https://www.palmsens.com/product/palmsens4/>
- Park, S. B., White, S. B., Steadman, C. S., Pechan, T., Pechanova, O., Clemente, H. J., Thirumalai, R. V. K. G., Willard, S. T., Ryan, P. L., & Feugang, J. M. (2019). Silver-coated magnetic nanocomposites induce growth inhibition and protein changes in foodborne bacteria. *Scientific Reports*, 9(1), 17499. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53080-x>
- Pauwels, E. (2021). *I-Elektrochemie, corrosie* [Cursus]. Universiteit Antwerpen.
- Popov, B. N. (2015a). Chapter 5—Basics of Corrosion Measurements. In B. N. Popov (Red.), *Corrosion Engineering* (pp. 181-237). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62722-3.00005-7>
- Popov, B. N. (2015b). Chapter 7—Pitting and Crevice Corrosion. In B. N. Popov (Red.), *Corrosion Engineering* (pp. 289-325). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62722-3.00007-0>
- Potentiostat: A short and simple explanation*. (z.d.). PalmSens. Geraadpleegd 21 mei 2023, van <https://www.palmsens.com/potentiostat/>

- Qian, H. C., Chang, W. W., Cui, T. Y., Li, Z., Guo, D. W., Kwok, C. T., Tam, L. M., & Zhang, D. W. (2021). Multi-mode scanning electrochemical microscopic study of microbiologically influenced corrosion mechanism of 304 stainless steel by thermoacidophilic archaea. *Corrosion Science*, 191, 109751. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109751>
- Ramachandran, R., & Nosonovsky, M. (2015). Coupling of surface energy with electric potential makes superhydrophobic surfaces corrosion-resistant. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(38), 24988-24997. <https://doi.org/10.1039/C5CP04462F>
- Riskin, J., & Khentov, A. (2019). 1—Corrosion Basics. In J. Riskin & A. Khentov (Red.), *Electrocorrosion and Protection of Metals (Second Edition)* (pp. 3-47). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64021-5.00001-5>
- Sahan, Y., Sudarsono, S., Silviana, E., Chairul, & Wisrayetti. (2018). Performance of the electrical generator cell by the ferrous alloys of printed circuit board scrap and Iron Metal 1020. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 345, 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/345/1/012038>
- Sanni, O., Iwarere, S. A., & Daramola, M. O. (2023). Chapter 1 - Introduction: Corrosion basics and corrosion testing. In J. Aslam, C. Verma, & C. Mustansar Hussain (Red.), *Electrochemical and Analytical Techniques for Sustainable Corrosion Monitoring* (pp. 1-23). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15783-7.00015-3>
- Scuba 90. (z.d.). Royal Eijkelkamp. Geraadpleegd 27 mei 2024, van <https://www.royaleijkelkamp.com/nl/producten/monitoring/multiparameter-meters/scuba-waterkwaliteit-sondes/scuba-90/>
- Seechurn, Y., Surnam, B. Y. R., & Wharton, J. A. (2023). Marine atmospheric corrosion of carbon steel in Mauritius. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.140>
- Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion. (z.d.). Geraadpleegd 20 mei 2023, van <https://www.astm.org/g0046-21.html>
- Tabish, M., Zarin, A., Malik, M. U., Khan, M. A., Zhao, J., & Yasin, G. (2022). 27—Microbial-induced corrosion of metals with presence of nanoparticles. In H. M. N. Iqbal, M. Bilal, T.

- A. Nguyen, & G. Yasin (Red.), *Biodegradation and Biodeterioration At the Nanoscale* (pp. 675-699). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823970-4.00027-0>
- Tafel Plot and Evans Diagram*. (z.d.). PalmSens. Geraadpleegd 8 mei 2023, van <https://www.palmsens.com/knowledgebase-article/tafel-plot-and-evans-diagram/>
- Tafel Plot Corrosion—Corrosion Resistance*. (2023, februari 25). Beyond Discovery. <https://www.beyonddiscovery.org/corrosion-resistance-3/eq-1.html>
- Tait, W. S. (2018). Chapter 5—Electrochemical Corrosion Basics. In M. Kutz (Red.), *Handbook of Environmental Degradation of Materials (Third Edition)* (pp. 97-115). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-52472-8.00005-8>
- Telegdi, J., Shaban, A., & Trif, L. (2017). 8—Microbiologically influenced corrosion (MIC). In A. M. El-Sherik (Red.), *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies* (pp. 191-214). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00008-5>
- Total Dissolved Solids (TDS). (z.d.). *Corrosionpedia*. Geraadpleegd 30 mei 2024, van <https://www.corrosionpedia.com/definition/1103/total-dissolved-solids-tds>
- Tripathi, A. K., Thakur, P., Saxena, P., Rauniyar, S., Gopalakrishnan, V., Singh, R. N., Gadhamshetty, V., Gnimpieba, E. Z., Jasthi, B. K., & Sani, R. K. (2021). Gene Sets and Mechanisms of Sulfate-Reducing Bacteria Biofilm Formation and Quorum Sensing With Impact on Corrosion. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.754140>
- Umoren, S. A., Solomon, M. M., & Saji, V. S. (2022a). Chapter 3—Basic concepts of corrosion. In S. A. Umoren, M. M. Solomon, & V. S. Saji (Red.), *Polymeric Materials in Corrosion Inhibition* (pp. 83-102). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823854-7.00018-7>
- Umoren, S. A., Solomon, M. M., & Saji, V. S. (2022b). Chapter 4—Fundamentals of corrosion inhibition. In S. A. Umoren, M. M. Solomon, & V. S. Saji (Red.), *Polymeric Materials in Corrosion Inhibition* (pp. 103-127). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823854-7.00026-6>

- Verma, C. (2022a). Chapter1 - Corrosion: Basics and adverse effects. In C. Verma (Red.), *Handbook of Science & Engineering of Green Corrosion Inhibitors* (pp. 1-10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90589-3.00020-3>
- Verma, C. (2022b). CHAPTER2—Forms of corrosion. In C. Verma (Red.), *Handbook of Science & Engineering of Green Corrosion Inhibitors* (pp. 11-20). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90589-3.00015-X>
- Virtanen, S. (2011). 1—Corrosion and passivity of metals and coatings. In D. Landolt & S. Mischler (Red.), *Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings* (pp. 3-28). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857093738.1.3>
- Wang, X., & Melchers, R. E. (2017). Long-term under-deposit pitting corrosion of carbon steel pipes. *Ocean Engineering*, 133, 231-243. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.02.010>
- Yao, Y., Yang, Y., He, Z., & Wang, Y. (2018). *Ocean Engineering*. Dalian University of Technology. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.038>
- Yazdi, M., Khan, F., Abbassi, R., Quddus, N., & Castaneda-Lopez, H. (2022). A review of risk-based decision-making models for microbiologically influenced corrosion (MIC) in offshore pipelines. *Reliability Engineering & System Safety*, 223, 108474. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108474>
- Zehra, S., Mobin, M., & Aslam, J. (2022). 1—An overview of the corrosion chemistry. In C. M. Hussain, C. Verma, & J. Aslam (Red.), *Environmentally Sustainable Corrosion Inhibitors* (pp. 3-23). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85405-4.00012-4>

15 Lijst met bijlagen

0) Readme.pdf

1) Praktische_informatie

- a) Draaiboek 0905.pdf - Overzicht wat gecontroleerd moest worden voor elke test.
- b) Meetlocaties_route.pdf - Overzicht van de meetlocaties

2) Data

- a) Overzicht - Overzicht van alle werkelektroden in een tabel
- b) Methoden – De gebruikte testmethoden In PSTrace per test
- c) Voorbereidingen – Data van voorbereidende testen
- d) Testen – Data van alle testen
- e) Manta – Data van Manta: watereigenschappen
- f) Verwerking – Verwerkte grafieken en statistiek

3) Foto's

- a) Algemeen – Algemene foto's over uitvoering gesorteerd per dag
- b) LPR – Foto's LPR per locatie vóór ophanging in het water en na de uitvoering van de test
- c) LPC - Foto's LPC per locatie vóór ophanging in het water en na de uitvoering van de test
- d) CPC - Foto's CPC per locatie vóór ophanging in het water en na de uitvoering van de test
- e) CPT - Foto's CPT per locatie vóór ophanging in het water en na de uitvoering van de test
- f) EFM - Foto's per locatie vóór ophanging in het water
- g) Extra - Foto's per locatie vóór ophanging in het water