

Ruimtelijke analyse van uniforme corrosie van S235 staal in het kanaal Gent-Terneuzen

Hudders Gilles

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

Promotor: Katrijn Verhasselt
Co-promotor: Prof. Dr. Geert Potters

Academiejaar 2023-2024

Woord vooraf

Deze thesis werd geschreven ter afronding van mijn diploma Master in de Nautische Wetenschappen aan de Antwerp Maritime Academy. Mijn specifieke interesse in dit onderwerp komt voort uit de behoefte aan een goed afgebakend onderwerp en de wens om concrete resultaten te behalen uit praktisch werk. Deze thesis is het resultaat van maandenlang onderzoek en analyse, en ik ben dankbaar voor de mensen die dit werk hebben ondersteund.

Allereerst wil ik mijn promotor, mevrouw Katrijn Verhasselt, bedanken voor haar paraatheid en snelle antwoorden op mijn vele vragen. Daarnaast wil ik ook mijn co-promotor, Prof. Dr. Geert Potters, voor zijn inzichten in de interpretatie van de resultaten en waardevolle feedback.

Ook wil ik mijn begeleider, Wikke Witteveen, bedanken voor zijn ondersteuning doorheen het hele proces. Hij voorzag in een goede aanpak voor zowel het ophalen van de coupons als het laboratorium werk, en bracht de nodige structuur voor het voltooien van het praktische werk. Daarnaast wil ik hem bedanken voor het schrijven van het script dat de resultaten heeft geanalyseerd en gevisualiseerd.

Verder wil ik de bedrijven en instellingen bedanken die deelnamen aan het COMIC-project.

Ten laatste wil ik ChatGPT bedanken voor het nalezen en grammaticaal verbeteren van mijn tekst.

Tijdens het schrijven van deze thesis heb ik niet alleen mijn kennis over uniforme corrosie verdiept, maar ook waardevolle onderzoeksvaardigheden ontwikkeld en geleerd om te gaan met de uitdagingen van wetenschappelijk onderzoek. Deze ervaring heeft mijn academische groei aanzienlijk bevorderd.

Ik hoop dat deze thesis bijdraagt aan een beter begrip van uniforme corrosie in het kanaal Gent-Terneuzen, en dat het mee kan helpen een startblok te vormen om verder onderzoek naar microbiële corrosie te voeren.

Gilles Hudders

3 juni 2024

Samenvatting

De thesis onderzoekt de ruimtelijke analyse van uniforme corrosie in het Kanaal Gent-Terneuzen binnen het COMIC project, voortgekomen uit de ontdekking van aanzienlijke corrosieschade in de jachthaven van Zelzate begin 2021. Het richt zich op de invloed van geografische en industriële factoren op de corrosiesnelheid en -vertraging langs het kanaal. Hierbij wordt de verspreiding en intensiteit van uniforme corrosie door het kanaal gekwantificeerd om mogelijke corrosieve 'hotspots' te identificeren. Er werd gebruik gemaakt van de alomtegebruikte massaverliesmeting op staalcoupons, toegepast op zeven tijdspunten langs het hele kanaal. Een asymptotisch regressiemodel werd toegepast op de gemeten corrosiesnelheden in elf zones van het kanaal. Er werd een hogere stabilisatie van de corrosiesnelheid vastgesteld in de noordelijke helft van het kanaal, in tegenstelling tot een lagere stabilisatie in de zuidelijke helft. Bovendien vertraagt de corrosiesnelheid sneller in de noordelijke helft dan in de zuidelijke helft. De conclusies benadrukken de noodzaak van gerichte monitoring en voorspellende systemen om corrosie effectief te beheersen. Het gebruikte model toont aan dat corrosie niet uniform evolueert in één doorverbonden havenzone. Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek omvatten het verder onderzoeken van fysicochemische aquatische parameters en specifieke microbiële mechanismen die bijdragen aan corrosie, evenals het ontwikkelen van meer genuanceerde beschermingsstrategieën voor mariene infrastructuur.

Abstract

This thesis investigates the spatial analysis of uniform corrosion in the Ghent-Terneuzen Canal in the context of the COMIC project, arising from a discovery of significant corrosion damage in the Zelzate marina in early 2021. This research focuses on the influence of geographical and industrial factors on corrosion rate and deceleration along the canal.

The distribution and intensity of uniform corrosion throughout the canal is quantified to identify potential corrosive hotspots. The mass loss measurement on steel coupons was applied to the entire channel at 7 time points. An asymptotic regression model was applied to the measured corrosion rates for 11 zones in the channel. A higher stabilization of the corrosion rate was observed in the northern half of the channel versus a lower stabilization in the southern half. In addition, the corrosion rate slows down faster in the northern half than in the southern half.

The conclusions of this study highlight the need for targeted monitoring and predictive systems to effectively control corrosion. The model used indicates that corrosion cannot be assumed to evolve the same way over time in a single interconnected port zone. Recommendations for future research include further investigating the influence of physicochemical aquatic parameters and specific microbial mechanisms that contribute to corrosion and developing more nuanced protection strategies for marine infrastructure.

Inhoudstafel

1	Inleiding	1
2	Theoretische achtergrond	3
2.1	Microbiologie	3
2.2	Mariene corrosie	7
2.3	Parameters in mariene corrosie.....	12
2.4	Bi-modaal model Melchers.....	16
2.4.1	Fase 0	18
2.4.2	Fase 1	18
2.4.3	Fase 2	19
2.4.4	Fase 3	19
2.4.5	Fase 4	19
2.5	Het effect van macrofouling op corrosiesnelheid.....	20
2.6	Kanaal Gent-Terneuzen	24
2.6.1	Beschrijving	24
2.6.2	Werking.....	25
2.6.3	Bronnenonderzoek en analyse in het kanaal.....	26
2.7	Theoretische achtergrond en praktische toepassing.....	28
3	Materiaal en methoden	29
3.1	Design of experiment	29
3.2	Materialen.....	30
3.3	Veld werk op het kanaal Gent-Terneuzen.....	33
3.3.1	Monsternamen en Uitgebreide Analyse.....	33
3.3.2	Locatiegebonden observaties	35

3.4	Laboratorisch werk.....	38
3.4.1	Experimentele analyse.....	38
3.4.2	Behandeling van Coupons.....	38
3.4.3	Belang van het Droogproces	41
3.4.4	Weegproces en Opvolging	42
3.5	Clustering locaties in zones.....	43
4	Statistische analyse	45
4.1	Data analyse.....	45
4.1.1	Onderzoeken van trends, patronen en relaties	45
4.1.2	Statistische analyse en hypothesen.....	45
4.1.2.1	Onderzoeksdesign en steekproef	45
4.1.2.2	Dataverzamelmethode	45
4.1.3	Data verzameling	46
4.1.4	Dataorganisatie en beschrijvende statistiek	46
4.1.4.1	Berekenen van corrosiesnelheid: eerste afgeleide	46
4.1.4.2	Berekenen van corrosievertraging: tweede afgeleide.....	47
4.2	R script	47
4.2.1	Data set-up.....	47
4.2.2	Data plots: genereren van grafieken en modellen.....	52
5	Resultaten.....	63
5.1	Vooronderzoek.....	63
5.2	Eigen resultaten	64
5.2.1	Massaverlies en corrosiesnelheid	64
5.2.1.1	Massaverlies per locatie en maand	64
5.2.1.2	Boxplots van massaverlies per maand.....	66
5.2.1.3	Dichtheidskromme per maand: resultaat uit Shapiro-Wilk test	67

5.2.1.4	Corrosiesnelheid per locatie en maand	69
5.2.1.5	Boxplots van corrosiesnelheid per maand	72
5.2.2	Modellering	73
5.2.2.1	Modellering per locatie	73
5.2.2.2	Modellering per zone	76
5.2.2.3	Restwaarden per zone	77
5.2.2.4	Corrosie vertraging	81
5.2.2.5	Asymptoot	83
6	Discussie	86
7	Conclusie	89
8	Bibliografie	91

Lijst van figuren

Figuur 1 Kaart North Sea Port.....	2
Figuur 2 Roestvorming	8
Figuur 3 Vergelijking tussen bi-modaal model van Melchers en machtsmodel van Tammann	16
Figuur 4 Basismodel voor corrosie met opeenvolgende fasen, model parameters en het effect van voedingsstoffen volgens Melchers	20
Figuur 5 Mosselen.....	22
Figuur 6 Kokerworm.....	23
Figuur 7 Dokken Gent	26
Figuur 8 Overzicht van bedrijven die directe lozingen uitvoeren op het kanaal Gent - Terneuzen, Noorderlijke Ringvaart en Moervaart.....	27
Figuur 9 Overzicht initiële gewichten van alle coupons besteld voor het onderzoek	31
Figuur 10 Boxplot initiële gewichten	32
Figuur 11 Manta 35 - multisensorprobe	34
Figuur 12 Rek met coupons.....	35
Figuur 13 Foto van de voorkant van het middelste rek op locatie 24, uit het water gelaten op 13 juni om 10u50	37
Figuur 14 Coupons met macrofouling	39
Figuur 15 Coupons na hogedrukreiniging	40
Figuur 16 Coupons tijdens blootstelling aan Clark-oplossing	41
Figuur 17 Coupons na blootstelling aan Clark-oplossing	42
Figuur 18 Massaverlies in functie van de tijd per locatie.....	65
Figuur 19 Boxplots van massaverlies per maand	67
Figuur 20 Verdeling van observaties per meetcampagne	69
Figuur 21 Corrosiesnelheid in functie van de tijd per locatie	71
Figuur 22 Boxplots van corrosiesnelheid per meetcampagne	73
Figuur 23 Modelleren van corrosiesnelheid per locatie	75
Figuur 24 Modelleren van corrosiesnelheid per zone	77
Figuur 25 Restwaarden modellering.....	79
Figuur 26 QQplots van restwaarden per zone	81

Figuur 27 Vervalconstante van corrosiesnelheid in functie van afstand van Terneuzen.....83

Figuur 28 Asymptoot van de vervalconstante in functie van de afstand tot Terneuzen 85

Lijst van tabellen

Tabel 1 Samenvatting van potentiële invloeden op mariene corrosie bij onderdompeling van staal in zeewater	15
Tabel 2 Indeling van locaties in zones	44
Tabel 3 Y_f , y_0 , $\log_alpha$ waarden per zone	61

Lijst van afkortingen

DNA: Deoxyribonucleïnezuur

XRF: röntgenfluorescentiespectrometrie

RNA: ribonucleïnezuur

CO₂: koolstofdioxide

H₂S: waterstofsulfide

AMA: Antwerp Maritime Academy

MIC: Microbieel geïnduceerde corrosie

SRB: Sulfaat Reducerende Bacteriën

SOB: Sulfaat Oxiderende Bacteriën

IMPACT: International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies

AMPP: The Association for Materials Protection and Performance

NACE: National Association Of Corrosion Engineers

S235: een soort staal gemaakt voor structurele doeleinden met een minimale vloeigrens van 235 megapascal

VWR PBA124: een weegschaal gebruikt voor analytische doeleinden

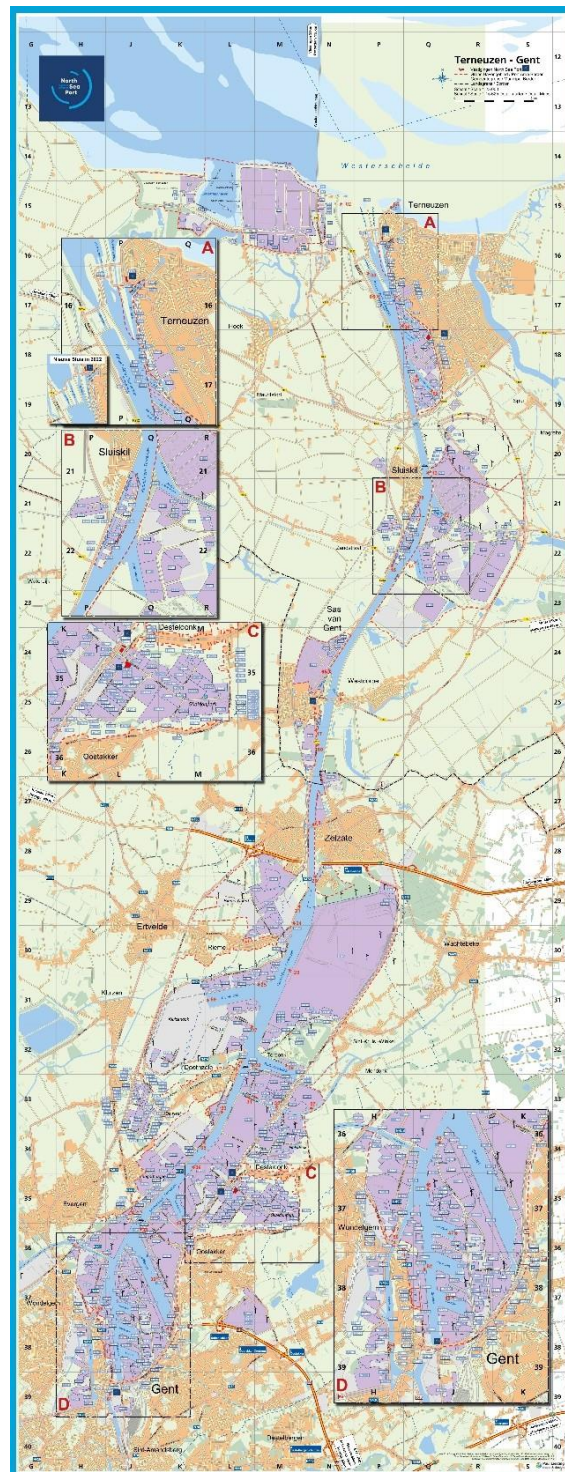
OTU: Operational Taxonomic Unit

SOCORRO: Strategic Observation and Control of Outlier Risk in Corrosion

PPM: parts per million

1 Inleiding

Dit thesisonderwerp komt voort uit een ontdekking gemaakt in de jachthaven van Zelzate. In Zelzate werd begin 2021 corrosieve schade vastgesteld aan verschillende vaartuigen. Uit DNA-analyse van de tuberkels gevonden aan de romp van verschillende vaartuigen werd vastgesteld dat verschillende bacteriën zich ontwikkeld hadden tot grote proporties. Vooral *Gallionella* en *Rhodanobacter*, maar ook sulfaat- en ijzer reducerende bacteriën werden waargenomen. Uit verder onderzoek bleek dat deze bacteriën zich niet enkel limiteerden tot de jachthaven van Zelzate, maar zich verspreid hadden over het gehele kanaal Gent-Terneuzen en de omliggende industriezone. De jachthaven van Zelzate staat namelijk in open connectie met het kanaal. De verspreiding werd in het vooronderzoek vastgesteld door het plaatsen van staalcoupons op strategische plaatsen doorheen het kanaal. Het vooronderzoek gaf aanleiding tot het TETRA project dat een gedetailleerde wetenschappelijke methodologie presenteert voor het onderzoek naar microbiële corrosie op staalcoupons in het Kanaal Gent-Terneuzen (VLAIO aanvraag TETRA, 2021). Een zorgvuldig plan werd opgesteld om microbiële corrosie vast te stellen en te meten over het gehele kanaal. Dit plan wordt grafisch voorgesteld in Figuur 1. De jachthaven van Zelzate is de uitvalbasis van het experimentele traject. Deze thesis focust zich strikt op een ruimtelijke analyse van het kanaal van uniforme corrosie. Er wordt onderzoek gedaan naar de corrosiesnelheid en -versnelling op verschillende locaties in het kanaal. Verder worden de locaties samengevoegd tot 11 zones op basis van geografie en industriële activiteit. Zo kan een vergelijking en eventuele veronderstelling gemaakt worden van eventuele corrosieve 'hotspots'. Alle parameters die tijdens het onderzoek vastgesteld werden, inclusief het onderzoek naar microbiële corrosie specifiek, worden buiten beschouwing gelaten.



Figuur 1 Kaart North Sea Port

Bron: North Sea Port, (z.d.)

2 Theoretische achtergrond

2.1 Microbiologie

Microben zijn sinds het begin der tijd overal terug te vinden op aarde. 3,8 biljoen jaar geleden ontstonden ze als eerste levend organisme op deze planeet. Volgens verschillende bronnen waren prokaryotische eencelligen waarschijnlijk één van de eerste ééncellige levensvormen op deze planeet (NiNa.Az, 2024),(Atanasov, 2016),(Seckbach, 1996).

Prokaryoten zijn cellen zonder organellen zoals een celkern of interne membranen. Zo ligt het DNA, Deoxyribonucleïnezuur, in tegenstelling tot bij de meeste organismen, vrij in de cel en niet in de celkern. Prokaryoten of eencelligen zijn de basis geweest voor al het leven op aarde. Uit deze cellen evolueerden eukaryoten en later meercelligen. Na vijf massa-extincties zijn ze nog steeds alom tegenwoordig.

Volgens Bertrant et al. (2015) manifesteren microben of micro-organismen zich als organismen die alomtegenwoordig zijn en floreren in verschillende omgevingen. Ze overleven en floreren in zowel warme als koude omgevingen, hoge druk en zure omgevingen. Hun aanpassingsvermogen en overlevingsmechanisme is zo uniek dat er geen enkel organisme kan tippen aan hun onnipotentie.

Hun overlevingsdrang is te danken aan homeostase, een techniek waarin een stabiele kern ontstaat binnenin een ondoordringbare, slijmerige kern. Dit omhulsel zorgt ervoor dat de kern niet gestoord wordt door externe factoren zoals temperatuurschommelingen en zuurtegraad.

Micro-organismen, zoals bacteriën, vertonen een complexe structuur die ervoor zorgt dat ze makkelijker kunnen hechten aan staaloppervlakken. De basisstructuur omvat componenten zoals cytoplasma, plasmamembraan, chromosomen en ribosomen. Het cytoplasma, dat voor 70% uit water bestaat, bevat zes hoofdelementen: koolstof, waterstof, zuurstof, stikstof, fosfor en zwavel, waarbij zwavel gebruikt wordt voor de detectie van microbiële organismen op staaloppervlakken via XRF-analyse. Ook de hoeveelheid calcium wordt geanalyseerd.

Calcium is aanwezig in de bescherm laag van de bacterie. Het is van belang in homeostase. Het chromosoom, of nucleotide zone, bevindt zich in het cytoplasma en vertegenwoordigt het DNA van de bacterie. Ribosomen, bestaande uit proteïnen en ribonucleïnezuur, wat wordt beschreven als RNA, spelen een cruciale rol in de eiwitsynthese. De samenwerking van verschillende bacteriële soorten, zoals sulfaat reducerende en sulfaat oxiderende organismen, is essentieel voor hun overleving en voortplanting.

Glycocalyx, een complexe mix van suikers, proteïnen en andere macromoleculen, vormt een cruciale structuur op het oppervlak van microbiële organismen. Deze omhulling manifesteert zich vaak in de vorm van een slijm laag en/of capsule en speelt een veelzijdige rol in de biologie van deze micro-organismen.

De slijm laag, een extern omhulsel rond het celmembraan, heeft vaak een kenmerkende kleur, bijvoorbeeld bruin-oranje bij bepaalde bacteriën. Naast de slijm laag kunnen sommige microbiële organismen ook een dikkere en meer gestructureerde capsule vormen. Deze capsule bestaat uit een samenhangend netwerk van suikers en proteïnen en biedt extra bescherming tegen externe bedreigingen, zoals het immuunsysteem van gastheren.

Eén van de belangrijkste functies van *glycocalyx* is het bieden van bescherming aan microbiële organismen. De slijm laag en capsule fungeren als een beschermend schild tegen *fagocytose* (het proces waarbij cellen, zoals macrofagen en neutrofielen, bacteriën opnemen). Hierdoor kunnen bacteriën ontsnappen aan de afweermechanismen van het gastorganisme.

Tegelijkertijd helpt *glycocalyx* microbiële organismen om zich te hechten aan oppervlakken. Deze hechtingscapaciteit is relevant bij processen zoals microbiële corrosie, waar bacteriën zich aan metalen oppervlakken moeten kunnen vasthechten. De *glycocalyx*-omhulling biedt niet alleen bescherming tegen fysische en chemische stressfactoren, maar stelt de bacteriën ook in staat om te koloniseren en zich te hechten aan specifieke oppervlakken, zoals ijzerplaatjes.

In de context van microbiële corrosie speelt *glycocalyx* een sleutelrol. Het beschermt bacteriën tegen corrosieve omstandigheden en faciliteert hun vermogen om metalen

oppervlakken te koloniseren. Deze interactie kan leiden tot ongewenste effecten, zoals versnelde corrosie van metalen structuren.

Een intrigerend aspect van microbiële organismen is hun vermogen tot beweging, mogelijk gemaakt door *flagella*. *Flagella*, afgeleid van het Latijns woord 'zweep', zijn draadvormige structuren die fungeren als propellers. Deze *flagella* zorgen ervoor dat het micro-organisme de omgeving actief kan verkennen en voedingsstoffen beter kan lokaliseren. De voortbeweging wordt aangedreven door verschillende tactieken, zoals *chemotaxis* in reactie op chemische signalen, *fototaxis* in reactie op licht, en *magnetotaxis* geleid door magnetische velden.

Chemotaxis stelt hen in staat om naar gunstige stoffen te bewegen of zich terug te trekken van ongunstige stoffen, terwijl *fototaxis* en *magnetotaxis* hen helpen te reageren op licht en magnetische velden, respectievelijk. Dit stelt hen in staat actief te reageren op hun omgeving en zich aan te passen aan verschillende levensomstandigheden.

Deze beweeglijkheid is niet alleen van belang voor het verkennen van de omgeving, het heeft ook significante implicaties voor processen zoals microbiële corrosie. In dit geval kan het voortbewegingssysteem een rol spelen bij het gericht koloniseren van metalen oppervlakken, wat bijdraagt aan corrosieprocessen.

Pilus en *fimbriae* worden ingezet voor interacties met andere cellen. Parameters bekomen uit wateranalyse spelen een cruciale rol bij het begrijpen van bacteriële ontwikkeling. Factoren zoals voedingsstoffen, energiewaarde, temperatuur, gasgehalte, zoutgehalte, pH-waarde, radiatie en de aanwezigheid van andere organismen zijn van invloed.

Volgens het onderzoek te Zelzate kwamen vooral bacteriën als *Gallionella* en *Rhodanobacter* aan bod. Verder volgt een theoretische achtergrond op basis van deze soorten.

Het optimaal functioneren van bacteriën varieert op basis van temperatuur. Volgens Kucera et al. (1957) gedijt *Gallionella* bij 20 °C, maar is het minder effectief vanaf een temperatuur van 12 °C of lager. Voor *Rhodanobacter* ligt dit optimum volgens Nalin et al. (1999) rond 30 °C.

Een psychrofiel organisme, zoals *Gallionella*, is een micro-organisme dat goed gedijt bij lage temperaturen, meestal tussen de 0 °C en 20 °C. De term is afgeleid uit het Griekse woord 'psycho', wat staat voor koud, en 'philein', wat staat voor houden van. Psychrofiele organismen houden dus van koude omgevingen.

Een mesofiel organisme, zoals *Rhodanobacter* is een micro-organisme dat optimaal groeit en ontwikkelt in matige temperaturen, tussen 20 °C en 40 °C. Mesofiele organismen zijn bijvoorbeeld vaak terug te vinden op mensen, doordat ze zich aangepast hebben aan de menselijke lichaamstemperatuur (37 °C). Vooral bacteriën en schimmels zijn mesofiel.

Zuurstof kan verschillende effecten hebben voor bacteriën. Het kan zowel positieve als negatieve effecten hebben. *Gallionella* gedijt beter bij een lagere zuurstofgraad.

Belangrijker dan zuurstof en temperatuur is de zuurtegraad waarin metaalionen stabiel zijn. *Gallionella* blijkt onafhankelijk te zijn aan variaties in temperatuur en zuurstofniveaus, zolang een stabiel bivalent ijzerion aanwezig is.

Andere parameters zijn het CO₂-gehalte, zoutgehalte en druk, die gezamenlijk het gedrag en de interacties van microbiële organismen op staaloppervlakken beïnvloeden.

Micro-organismen beïnvloeden corrosie op 2 manieren: indirect door corrosieve middelen te produceren en direct door elektronen of waterstof op te nemen van het oppervlak.

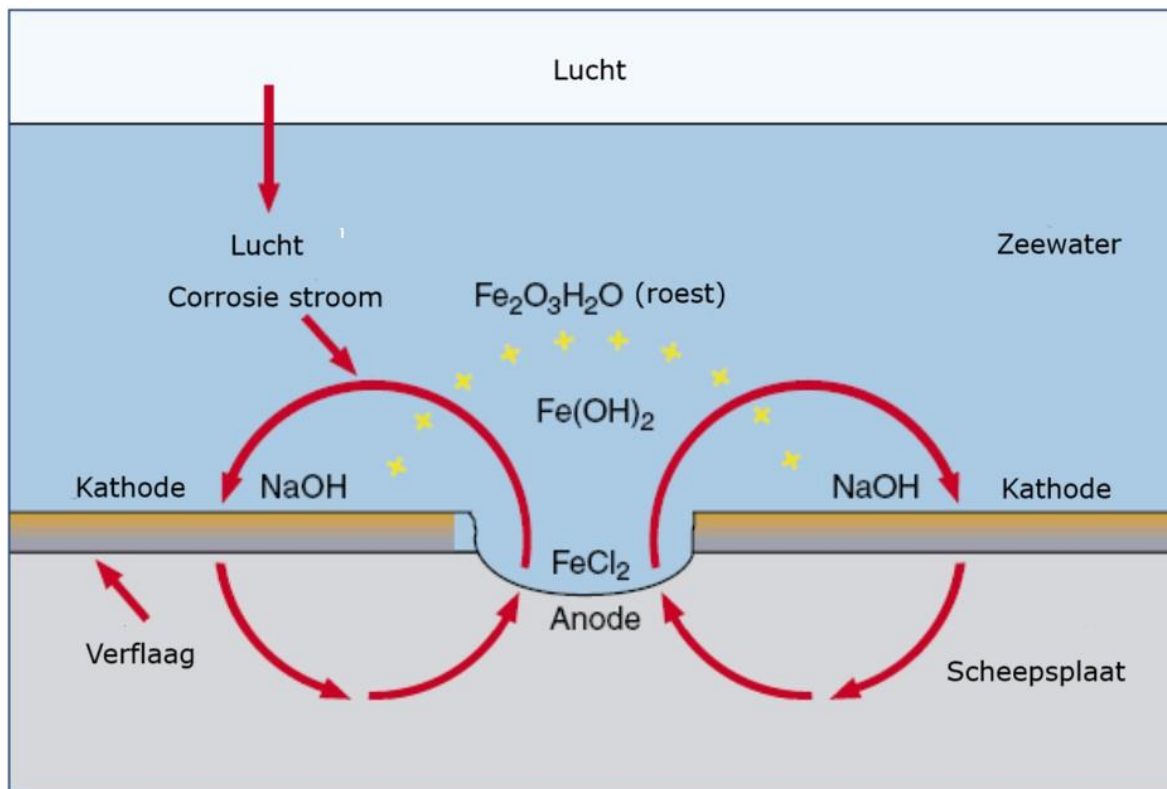
In het nationale nieuws werd vermeld dat de schade aan de rompen van vaartuigen in de jachthaven van Zelzate de oorzaak waren van één soort bacterie ('Vlaanderen geeft een half miljoen euro aan onderzoek ijzeretende bacterie in kanaal Gent-Terneuzen, VRT NWS, 2022). Dit klopt niet helemaal. Vaak werken verschillende bacteriën samen om microbiële corrosie tot stand te laten komen. Ze zijn sterk afhankelijk van elkaar. Deze bacteriën noemen we 'wederzijds afhankelijk'. Een mooi voorbeeld hiervan is de samenwerking tussen de sulfaat oxiderende bacterie, die zwavelzuur produceert, en sulfaat reducerende bacteriën, die zwavelzuur opnemen en waterstofsulfide produceert en ijzer oxiderende bacteriën en ijzer reducerende bacteriën.

Er zijn 4 manieren om MIC aan te tonen. Dit zijn de 'multiple lines of evidence'. Op de AMA is er enkel een mogelijkheid om de eerste stap te voltooien.

- De eerste manier is visuele inspectie. Helaas kan enkel en alleen op basis van visuele inspectie enkel een vermoeden van MIC geacht worden. Het zou wetenschappelijk niet verantwoord zijn om hier verder conclusies uit te trekken.
- De tweede manier is analyse op basis van mineralen in het water. Met de gegevens van de MANTA kunnen onder andere chloridewaarden opgenomen worden, 1 van de hoofdelementen die, naast ijzer en zwavel, in hogere mate waar te nemen zijn bij de aanwezigheid van MIC. MANTA is een software systeem dat tijdens het veldwerk gebruikt werd om een constante wateranalyse uit te voeren. Hier wordt later verder over uitgebreid. Voor verdere analyse kan er gebruik gemaakt worden van XRF-analyse. XRF of röntgenfluorescentiespectrometrie analyseert de identificatie en concentratie van bepaalde stoffen op een staalname. In het kader van dit onderzoek zou kunnen uitgezocht worden in hoeverre levende organismen zich op het metaaloppervlak bevinden (Oyedotun, 2018). Helaas valt dit buiten de reikwijdte van deze thesis.
- De derde en vierde manieren zijn microbiologische analyse en analyse van de omgevingsparameters. Deze manieren worden onderzocht door de universiteit van Gent. Omdat het onderzoeken van een mogelijke invloed van bacteriën op corrosie in het kanaal Gent-Terneuzen buiten de reikwijdte van deze thesis valt, wordt hier niet verder op ingegaan.

2.2 Mariene corrosie

Volgens Shaw en Kelly (2006) is corrosie een degradatieproces dat optreedt bij metalen. Bij de productie van metaal in fabrieksovens wordt een aanzienlijke hoeveelheid energie aan het metaal toegevoegd, waardoor het sterker wordt en geschikt is voor verschillende constructies en materialen. Deze energietoevoer verhoogt de Gibbs-energie van het metaal, maar na verloop van tijd neemt deze energie af. Hierbij geeft het elektronen af aan zijn omgeving en neemt het oxide op. Net als elk ander materiaal dat door de mens geoptimaliseerd wordt streeft metaal ernaar terug te keren naar zijn oorspronkelijke oxide staat, wat resulteert in een terugkeer naar ijzererts. Deze reactie wordt weergegeven in Figuur 2 en verder in detail uitgelegd.

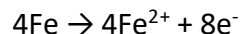


Figuur 2 Roestvorming

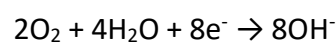
Bron: What is corrosion, bijgewerkt (z.d.)

De aanwezigheid van kathoden en anoden op het staaloppervlak en hun reactie met zuurstof en water zorgen ervoor dat een metaalatoom evolueert tot een metaalion. Het metaal atoom verliest dus enkele van zijn elektronen.

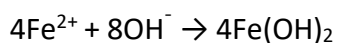
Anodische reactie:



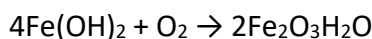
De reactie kan alleen plaatsvinden als er een geschikte elektronenacceptor is om te combineren met de elektronen die vrijkomen door het ijzeratoom. Zeewater bevat opgelost atmosferisch zuurstof wat fungeert als een goede elektronenacceptator. De zuurstof wordt elektrochemisch verminderd tot hydroxyl-ionen in de kathodische reactie:



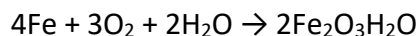
Het heterogene karakter van staal zorgt ervoor dat sommige plaatsen de voorkeur geven aan de anodische reactie en andere aan de kathodische reactie:



Het gevormde ferro-hydroxide reageert met meer zuurstof om gehydrateerd ijzeroxide te vormen, de bekende roodbruine roest:



In theorie vinden al deze reacties tegelijk plaats. Ze wordt voorgesteld als:



Het proces van terugkeer naar het equilibrium Fe^0 kan echter worden vertraagd. Dit is afhankelijk van twee factoren: de samenstelling van de bovenste laag van het metaal en de omgeving waarin het zich bevindt.

Bij metaalcorrosie zijn volgens LaQue (1982) verschillende processen betrokken, waaronder elektrochemische reacties, chemische reacties en microbiële activiteit. Deze processen worden beïnvloed door omgevingsfactoren zoals temperatuur, vochtigheid, pH-niveaus, zoutgehalte en de aanwezigheid van verontreinigingsstoffen. Deze omgevingsfactoren worden later in dit hoofdstuk meer in detail besproken.

Een van de meest voorkomende vormen van corrosie is elektrochemische corrosie, waarbij een metaal reageert met een elektrolyt, zoals zout water, om een elektrische stroom te produceren. Dit leidt tot de vorming van anodische en kathodische gebieden op het metaaloppervlak, wat zorgt voor plaatselijke corrosieverschijnselen zoals putcorrosie en spleetcorrosie. Shaw en Kelly (2006) vergelijken elektrochemische reacties met een batterij in kortsluiting. Een kortsluiting wordt gevormd door een conductor die een elektrische connectie maakt tussen twee verschillende plaatsen over een zeer kleine afstand. Hierbij vindt een oplossingsreactie plaats aan de anode kant waarbij elektronen vrijkomen die opgenomen worden door de reductiereactie van de kathode kant.

Chemische reacties kunnen ook bijdragen aan metaalcorrosie, waarbij metalen reageren met zuren, basen of andere chemische stoffen in de omgeving. Dit kan leiden tot oppervlaktecorrosie, waarbij het metaal geleidelijk wordt aangetast en er een corrosieproduct wordt gevormd.

Daarnaast kan microbiële activiteit een belangrijke rol spelen bij metaalcorrosie, vooral in maritieme omgevingen waar bacteriën en algen zich gemakkelijk kunnen hechten aan het metaaloppervlak en beschermende biofilms kunnen vormen. Deze biofilms kunnen de corrosiesnelheid verhogen door het vasthouden van vocht en het creëren van anaerobe omstandigheden die gunstig zijn voor corrosieve micro-organismen zoals sulfaat reducerende bacteriën (SRB) en sulfaat oxiderende bacteriën (SOB).

Corrosie wordt geclassificeerd in een aantal categorieën op basis van morfologie of vormgeving en omgeving waarin de reactie zich plaats vindt. Uniforme corrosie is de meest voorkomende vorm van corrosie. Iedereen die ooit eens een stuk blank staal voor een nacht buiten liet liggen heeft al eens in contact gestaan met uniforme corrosie. Door contact met open lucht en dauw wordt deze reactie versneld en kan op 1 nacht glanzend staal veranderen in een ruwe, oranje vorm. Voorbeelden van uniforme corrosie kan men terugvinden in allerhande voorwerpen, zoals pijpleidingen, stalen bruggen, bronzen en koperen beelden enzovoort. Uniforme corrosie kan vertraagd worden door een verfcoating te plaatsen of een opofferingsanode zoals zink toe te voegen aan het staaloppervlak. Verf coating bestaat vaak uit verschillende lagen en wordt gebruikt om het metaal van zijn omgeving te isoleren. Opofferingsanodes zijn een veelvoorkomende methode om scheepshuiden die zich onder water bevinden te beschermen tegen corrosie. Dit brengt ons naar een volgende categorie: galvanische corrosie. Metalen zoals titanium of aluminium worden beschermd door een zeer dunne oxide film die zich natuurlijk verspreid over het metaaloppervlak.

Volgens het artikel 'What is corrosion' (z.d.) is zacht staal sinds jaar en dag het meest gebruikte staal voor scheeps- en mariene structuren. Mild staal heeft verschillende voordelen zoals een lagere kost, hoge mechanische weerstand en een makkelijke productie. Door hun relatief 'zachte' structuur vormt het ook een makkelijke structuur om op te lassen. Het heeft echter ook een groot nadeel. In contact met zout water zal het sneller corroderen dan andere soorten staal zoals aluminium. Hierdoor verliest het zijn mechanische kracht en kan er mogelijk structureel veel mislopen. Dit komt doordat de structuur heterogeen en onzuiver is.

Volgens een international IMPACT (International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies) onderzoek, gepubliceerd door NACE International

(nu beter bekend als AMPP - The Association for Materials Protection and Performance) zou de globale directe kost van corrosie geschat worden op zo'n 2.5 triljoen dollar (Koch et al. 2016). Directe schade of kosten omvatten de degradatie van het materiaal door corrosie en de opvolgende reparatiekosten en het vervangen van aangetaste onderdelen. Naast deze directe, makkelijk te meten kosten, worden indirecte kosten als een verlies aan productie en verspilling van basismaterialen buiten beschouwing gelaten. Het verlies aan productie kan optreden wanneer installaties uitvallen als gevolg van schade veroorzaakt door corrosie. Ook de kosten door milieuverontreiniging zijn moeilijk in te schatten. Milieuverontreiniging ontstaat door lekkage van corrosieproducten in bodem- en waterwegen, wat vervolgens een effect heeft op zowel ecosystemen als mensen. Volgens NACE zou Microbiële corrosie instaan voor zo'n 20% van deze directe kosten, wat neerkomt op 500 biljoen dollar wereldwijd. Het rapport behandelt verschillende oplossingen om deze economische kosten en kosten als gevolg van milieuschade te beperken. Verder onderzoek naar preventieve maatregelen is van groot belang om deze kosten te minimaliseren en de duurzaamheid van industriële materialen te maximaliseren.

Kathode reacties omvatten zuurstof reductie, waterstof reductie en metaalreductie. Om corrosie tot stand te laten komen moet de kathode reactie een positiever equilibrium potentiaal hebben dan de anode reactie.

Uniforme corrosie ontstaat op een metaaloppervlak met homogene microstructuren. Deze structuur ontstaat doordat een metaaloppervlak nooit volledig vlak kan zijn. Op microscopisch vlak zal het metaaloppervlak steeds een reliëf hebben. Door de aanwezigheid van dit reliëf ontstaan anodes en kathodes die interageren met elkaar. Deze interactie is een elektrochemische reactie.

In de beginfase verplaatst de stroom zich op de coupon van de anode naar de kathode. Naarmate bacteriën het staaloppervlak koloniseren, wordt een sterkere stroom waargenomen van bacterie naar kathode. Het staaloppervlak fungeert als een elektrode, waarbij het oxidatieproces van het metaal, in samenwerking met het zoutzuur, elektronen levert aan de kathode. Deze uitwisseling van elektronen leidt tot een agressieve vorm van corrosie. Het neemt niet alleen de geleidbaarheid op het oppervlak af, maar ook de activiteit van bacteriën. Bij verzadiging van het oppervlak met corrosie minimaliseert de

elektronenstroom opnieuw. Deze laag bestaat hoofdzakelijk uit oxides, sulfides en micro-organismen.

2.3 Parameters in mariene corrosie

Wanneer staal blootgesteld wordt aan (zee)water zijn verschillende parameters van invloed op de snelheid van corrosie. Volgens Melchers (2003) zijn er vele potentiële parameters die corrosie kunnen beïnvloeden. Deze parameters en hun belang in het corrosieproces worden samengevat in Tabel 1 (Liengen, Basseguy, Feron, Beech, & Birrien, 2014) en worden verder besproken in het vervolg van dit hoofdstuk. In deze tabel zien we dat enkele parameters belangrijker zijn voor de snelheid waarin corrosie zich voordoet dan anderen. Deze tabel werd samengesteld op basis van een staal dat ondergedompeld werd in zeeewater met een lage stroming en onvervuild water.

De aanwezigheid van bacteriën van weinig belang op zichzelf. Het kan wel een grotere invloed hebben bij een aanwezigheid van voedingsstoffen die de kolonie kunnen doen groeien (Salgar-Chaparro et al., 2020). In een eerder hoofdstuk werd het bestaan en de invloed van microben in corrosie al beschreven. In dit onderzoek wordt de invloed van microbiële corrosie niet verder onderzocht. Het is wel van belang om het bestaan ervan te erkennen.

Microbiële activiteit is tevens afhankelijk van de beschikbaarheid van energie en de concentratie aan voedingsstoffen, zoals koolstof, nitraat, sulfaat, fosfaat en het soort metaal (Carlucci, 1974). In onvervuild water zou vooral nitraat een limiterende factor zijn. In het verleden werden microbiologische factoren amper expliciet overwogen bij de ontwikkeling van deze corrosie modellen voor staal in mariene omgevingen. Alhoewel er niet verder wordt ingegaan op het effect van putcorrosie door microbiële activiteit in het kanaal is het wel nuttig om een meer uitgebreide samenvatting te geven van microbiologische effecten (Melchers, 2008). Uit onderzoek bleek dat een continue stroom aan voedingsstoffen resulteerde in een hogere activiteit, dikte en robuustheid van de aanwezige biofilm. Als gevolg werd er meer plaatselijke corrosie waargenomen dan bij metaal wat zich in water met een tekort aan voedingsstoffen bevindt. (Salgar-Chaparro, Lepkova, Pojtanabuntoeng, Darwin, & Machuca, 2020).

De hoeveelheid opgeloste zuurstof in het zeeewater is volgens Ventanilla et al. (2022) van

groot belang. Het zou een direct proportioneel effect hebben op corrosie. Het bevordert direct de oxidatie van metalen, waarbij metalen zoals ijzer reageren met zuurstof om ijzeroxiden te vormen. Opgeloste zuurstof is van belang voor het bestaan en de evolutie van zowel micro- als macrofouling. De oplosbaarheid van zuurstof is ook nog eens afhankelijk van de zoutconcentratie. Bij hogere zoutconcentraties zal de oplosbaarheid van zuurstof verminderen.

Zoutgehalte is van belang omdat het de chloridewaarden in het water mee beïnvloedt. Het versnelt de elektrische conductiviteit van het water, wat de elektrochemische reacties versnelt die leiden tot corrosie. Chloride-ionen kunnen de beschermende oxidelaag op metaal aantasten, wat ook leidt tot versnelde corrosie.

De pH-waarde is van belang omdat een zuurder milieu zorgt voor een versnelde corrosie doordat het de oplosbaarheid van metaalionen verhoogt. pH-waarden in zeewater zijn echter vrij stabiel. De zuurtegraad zou volgens Tanaporn et al. (2013) al onder een pH-waarde van 4 moeten gaan om een zichtbaar effect te hebben op corrosie. In een zure omgeving kan het effect van bepaalde bacteriën onder een beschermde biofilm wel een effect hebben. Bepaalde bacteriën zoals sulfaat reducerende bacteriën zorgen voor een zuur milieu wat wederom zorgt voor versnelde corrosie.

Verschillende verontreinigende stoffen kunnen de groei van corrosieve micro-organismen bevorderen, zoals sulfaten, nitraten, stikstof- en fosforverbindingen, zware metalen en zuren. Sulfiden zoals H_2S en FeS kunnen een direct corrosief effect hebben op metalen. Ook vervuiling van het water zou een effect hebben op corrosie. In 1962 werd een 5-jarig onderzoek gedaan door Booth et al. (1963) op de rivier Thames in Londen. Uit resultaten na 6 maanden en één jaar bleek dat vervuiling van het water een eerder versnellend effect zou hebben op corrosiesnelheid. In de zwaarst vervuilde en meest anaerobe gebieden, zoals Woolwich en Tilbury, zouden de hoogste corrosiesnelheden en putdieptes waargenomen zijn geworden. Hoewel de cijfers anders zijn zou de evolutie van corrosie nog steeds overeenkomen met het bi-modaal model van Melchers. Later werd een vergelijkende studie gemaakt door Booth et al. (1967) met de relatief zuivere rivier Afon Dyfi. Daaruit bleek dat corrosiesnelheid in deze rivier nog groter was. Het bleek dat een hoger zuurstofgehalte in de rivier in combinatie met sulfaat reducerende bacteriën zorgde voor deze corrosieve toestand.

Volgens Melchers (2008) en Guedes Soares et al. (2011) zou temperatuur een grote rol spelen in de vorming en snelheid waarin corrosie zich voordoet. Een hogere temperatuur zorgt voor een hogere kinetiek in atomen (Melchers, 2002). Hierdoor zullen sneller reacties gevormd worden. Ook de diffusie en zuurstofconcentratie verhogen bij een hogere temperatuur. Verder zorgen temperatuursveranderingen ook voor veranderingen in de oplosbaarheid van gassen in de corrosiefilm (Zhang e.a., 2022).

Het effect van druk is volgens Melchers (2005) op zichzelf niet van groot belang. In combinatie met een verandering van temperatuur, omgeving en materiaal kan het wel een impact hebben.

De effecten van golfslag en golfsnelheid zijn in de eerste fases van belang wanneer het materiaal aan het wateroppervlak ligt. Een hogere wateractiviteit zorgt ervoor dat het materiaal zich in een spat zone of 'splash zone' bevindt. Hierdoor is een overvloed van zuurstof en nutriënten aanwezig.

Ook de stroomsnelheid van de elektrolyt zou volgens LaQue (1948) een impact hebben. De stroomsnelheid zou mee de aanvoer van zuurstof aan het metaaloppervlak bepalen.

Beijerinck (1895) maakte als eerste de link tussen de invloed van Sulfaat reducerende bacteriën en een verhoogde snelheid van corrosie. Hij deed onderzoek naar een verhoogde corrosiesnelheid op gietijzeren waterpijpen in waterige grond in Nederland. Een vijftigtal jaar later, na hevige discussies over welke theorie nu juist was, werd een conclusie voorgesteld en bevestigd, kathodische depolarisatie. Deze theorie stelt dat bepaalde bacteriën waterstof afkomstig uit de kathode gebruiken om te groeien, waardoor de galvanische cel activeert. Uiteindelijk blijkt volgens Marshakov en Rybkina (2022) dat metaal zelf de waterstof tot zich neemt in water met hoge chloridewaarden en dit proces opstart.

Tabel 1 Samenvatting van potentiële invloeden op mariene corrosie bij onderdompeling van staal in zeewater

Bron: Liengen et al., bijgewerkt (2014)

Invloed	Potentieel belang
Bacteriën, micro-organismen	Niet belangrijk op zichzelf
Voedingsstoffen	Zeer belangrijk voor microbiële corrosie
Opgeloste zuurstof	Zeer belangrijk op korte termijn
Koolstofdioxide	Niet belangrijk
Zoutgehalte	Over het algemeen niet belangrijk op zichzelf
pH-waarde	Belangrijk, maar verschilt weinig in natuurlijk zeewater
Verontreinigende stoffen	Zeer belangrijk voor microbiële corrosie op korte termijn
Temperatuur	Zeer belangrijk
Druk (diepte)	Niet belangrijk op zichzelf
Golfslag	Belangrijk in de eerste fasen van corrosie
Golfsnelheid	Belangrijk in de eerste fasen van corrosie

Later (Crolet, 1992) werd de theorie bevestigd dat vooral metabolieten, de afvalproducten van SRBs, verantwoordelijk zijn voor MIC. Door een aanmaking van waterstofsulfide (H_2S) zou het staaloppervlak op agressieve wijze aangevallen worden. Desondanks startte Beijerinck wel het onderzoek naar microbiële corrosie waar bijna anderhalve eeuw later nog steeds naarstig naar onderzocht wordt. Naast SRBs zouden ook ijzer oxiderende, ijzer reducerende en mangaan oxiderende bacteriën een (weliswaar kleinere) invloed hebben op het corrosieproces.

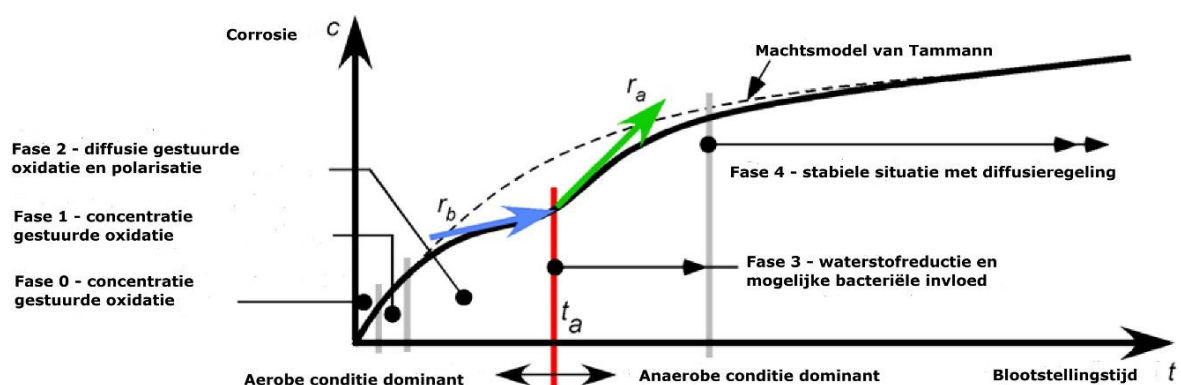
Microbiële corrosie (MIC), veroorzaakt door bacteriën, vormt een ernstige bedreiging voor maritieme installaties en schepen, met aanzienlijke economische kosten en veiligheidsrisico's tot gevolg. Deze bacteriën kunnen zich volgens Stoops (2023) snel ontwikkelen en putvormige corrosie veroorzaken met dieptes tot 3 mm per jaar, oplopend tot 5 mm per jaar op specifieke locaties in de jachthaven van Zelzate.

Standaardmonitoring en beschermingsmaatregelen blijken vaak niet voldoende, waardoor de noodzaak ontstaat voor een proactief systeem dat de aanwezigheid van MIC kan detecteren of voorspellen op basis van omgevingsparameters.

Volgens Chung, J.S. (2012) hangt mariene corrosie ook af van het soort staal waaraan de omgeving blootgesteld wordt. Elementen aanwezig in het staal, de zogenoemde staalcompositie, is van belang. Vooral het koolstofgehalte van staal komt vaak aan bod. Een hoger koolstofgehalte kan volgens Sun et al. (2014) namelijk de vorming van corrosieve producten bevorderen. Het staal dat in dit onderzoek gebruikt wordt is S235 constructiestaal. Het heeft een relatief laag koolstofgehalte van maximum 0,2% (Major et al., 2019). De grootte en oriëntatie van het staal heeft ook een impact op mariene corrosie. Zo kan een groter object of een object met complexe vormen zorgen voor ongelijke corrosiepatronen. Een ruwer oppervlak kan zorgen voor een makkelijkere omgeving voor zowel micro- als macrofouling om zich te hechten. Ook biedt het een groter oppervlak voor de vorming van corrosieve cellen. Nabijgelegen structuren kunnen ook bescherming bieden tegen bijvoorbeeld een hoge stroming van het water of kan een schaduw vormen op het te onderzoeken metaal.

2.4 Bi-modaal model Melchers

In 1923 kwam Tammann (1923) als eerste met een model dat het gedrag van corrosie over de tijd beschreef. Dit model komt overeen met het eerste deel van het bi-modaal model van Melchers, wat de aerobe fases bevat. Het machtsmodel van Tammann trekt zich door en valt terug samen op het einde van fase 4 op het bi-modaal model van Melchers. De vergelijking tussen beide modellen wordt in Figuur 3 weergegeven.



Figuur 3 Vergelijking tussen bi-modaal model van Melchers en machtsmodel van Tammann

Bron: Melchers, bijgewerkt (2018)

Het model van Melchers is een fenomenologisch model dat is ontwikkeld om de langetermijncorrosie van staal in mariene omgevingen te beschrijven. Een fenomenologisch model betekent dat het model gebaseerd is op het bekijken van fenomenen en patronen in experimenten. Deze fenomenen werden geanalyseerd en samengevoegd tot een model dat het gedrag van corrosie in functie van de tijd beschrijft. Een gedetailleerde theoretische verklaring van alle mechanismen wordt niet toegepast. Het model is gebaseerd op data verkregen uit experimenten en observaties in verschillende mariene omstandigheden. Het doel is om het gedrag van corrosie over de tijd op te delen in fases en deze fases te verklaren.

Bij het ontwikkelen van het onderstaande model van Melchers (2008), weergegeven in Figuur 4, werd de gemiddelde jaarlijkse watertemperatuur opgenomen. Hierdoor wordt geen rekening gehouden met de fluctuatie in temperatuur doorheen het jaar. Als gevolg kan het model zich enkel bezighouden met corrosie van jaar tot jaar. Wanneer we het model bekijken ligt de reikwijdte van dit onderzoek in de eerste fases. Elke fase heeft een geschatte duur. De exacte tijdsduur hangt echter af van verschillende factoren. Buiten de blootstellingstijd zijn de belangrijkste factoren de eigenschappen van het metaal dat blootgesteld wordt, het milieu en de omgevingstemperatuur.

Door de fenomenologische aard van het model werd een algemeen model opgebouwd dat rekening houdt met de interacties tussen omgevingsfactoren, materiaalcompositie en corrosiemechanismen.

Het model beschrijft corrosie van staal in mariene omgevingen en deelt het op in een aerobe en een anaerobe fase. Fase 0, 1 en 2 maken deel uit van de aerobe fase van corrosie. Dit betekent dat corrosie voornamelijk gecontroleerd wordt door de aanwezigheid van (opgeloste) zuurstof. De aerobe fase wordt gekenmerkt door een relatief snelle toename van corrosie. De vorming van corrosieproducten gaat vlot: enerzijds door de beschikbaarheid van zuurstof aan het metaal oppervlak, anderzijds door de ruwheid van het metaaloppervlak. Aerobe corrosie wordt ook wel oxidatie genoemd. Stilaan wordt het staaloppervlak bedekt met corrosieproducten. Dit zorgt ervoor dat (opgeloste) zuurstof het metaaloppervlak steeds moeilijker kan bereiken. Hieruit volgt de anaerobe fase. De corrosiesnelheid zal afnemen en na verloop van tijd stabiliseren tot een constante snelheid.

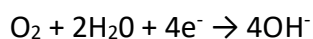
2.4.1 Fase 0

De eerste fase, fase 0 genoemd, beschrijft een kinetisch gecontroleerde oxidatie met een potentiële bacteriële invloed. Fase 0 is een fase van korte termijn. Doorgaans, afhankelijk van verschillende factoren, wordt deze fase op enkele dagen voltooid. Het omvat een polarisatie van de kinetiek van corrosie, beïnvloed door de verspreiding van zuurstof door het omliggende water.

Wanneer blank staal blootgesteld wordt aan water met een hoog zuurstofgehalte, zullen zuurstofmoleculen zich snel en gemakkelijk vasthechten aan het staal oppervlak om een ijzeroxide reactie te bekomen. Met de tijd wordt het moeilijker voor zuurstof om door de gecorrodeerde laag op het staaloppervlak te komen en te reageren met het oppervlak. Dit heet concentratiepolarisatie. Hierdoor kan de snelheid van corrosie in het begin zeer snel gaan en zich dan afbouwen. Wanneer deze oxidatie vertraagt, betekent dit het einde van fase 0 en het begin van fase 1.

2.4.2 Fase 1

De tweede fase, fase 1 beschrijft gecontroleerde oxidatie door concentratie. Deze fase verwijst naar een oxidatieproces waarbij de snelheid van de reactie wordt beïnvloed door de zuurstofconcentratie in de omgeving. Hoe hoger de concentratie van zuurstof, hoe sneller het oxidatieproces zich vormt en hoe sneller de corrosie tot stand komt. Het kathodische proces is de reductie van opgeloste zuurstof en gaat volgens onderstaande reactie:



De maximale oplosbaarheid van opgelost zuurstof in water is relatief laag, rond 8 ppm, maar kan toenemen bij een hogere stroomsnelheid (Jones, 1996). Ppm staat voor 'parts per million'.

De concentratie van zuurstof hangt vooral af van temperatuur en conductiviteit van het water. De roestlaag die zich begint te vormen zorgt voor een barrière waardoor zuurstof minder snel tot aan het metaaloppervlak kan reiken. Doordat roest zich niet uniform verplaatst over het metaaloppervlak kan dit fluctueren van plaats tot plaats. De tijdsduur

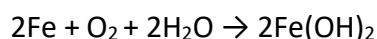
van deze fase kan variëren van enkele maanden tot enkele jaren, afhankelijk van bovengenoemde parameters.

2.4.3 Fase 2

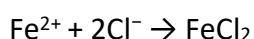
In de derde fase spelen 2 factoren een rol: diffusie-gecontroleerde oxidatie en polarisatie. De snelheid van diffusie van zuurstof verlaagt door de toenemende dikte van de roestlaag op het oppervlak. Het wordt alsmaar moeilijker voor zuurstof om het blank oppervlak te bereiken. De corrosiesnelheid zal dus vertragen. Enerzijds zal door de diffusie van stoffen zoals zuurstof de oxidatiereactie gereguleerd worden. Anderzijds wordt een verandering in elektrochemisch gedrag aan het metaaloppervlak opgemerkt door polarisatie.

2.4.4 Fase 3

De vierde fase, fase 3, beschrijft de impact van bacteriën op het corrosieproces. De omgeving rond het metaaloppervlak neigt vanaf hier eerder naar een anaerobe omgeving. De anodische reactie in natte corrosie beschrijft de omzetting van ijzermetaal tot ijzerionen. Dit betekent dat ijzer oxideert volgens volgende reactie:



De aanwezigheid van chloriden maakt een reactie mogelijk waarbij zuurstof als een elektronenacceptator fungeert. De evenwichtsreactie van Sharland en Tasker (1988) beschrijft de productie van ijzerchloride:



De aanwezigheid van ijzerchloriden zorgt voor een toenemende corrosiesnelheid in het eerste deel van fase 3. Het tweede deel van fase 3 heeft terug een afnemende corrosiesnelheid wat leidt tot een equilibrium in fase 4.

2.4.5 Fase 4

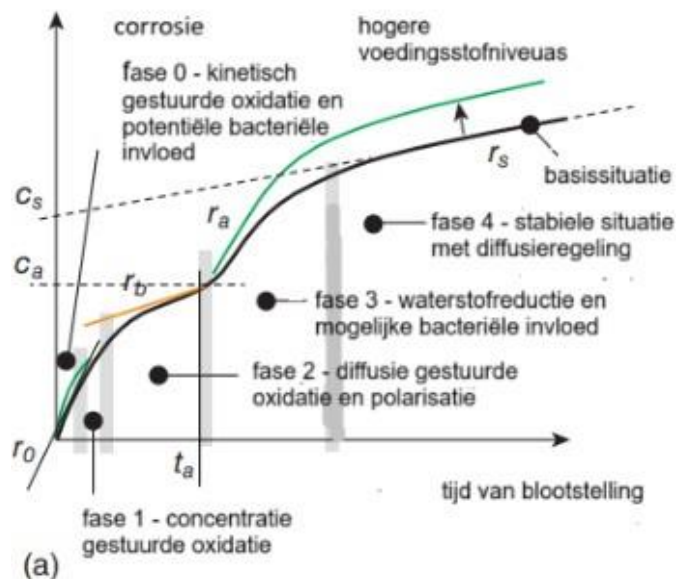
In fase 4 komt een constante corrosiesnelheid tot stand.

De figuur is bi-modaal. Dit betekent dat er een duidelijke opsplitsing is in tijd tussen de aerobe en de anaerobe fase. Het model bestaat dus uit 2 delen.

Zowel in fase 0 en 1, als in fases 3 en 4 zou een mogelijke invloed van bacteriën kunnen ontstaan. In de eerste fasen kunnen bacteriën zich gemakkelijk vestigen op het oppervlak

en wordt de toevoer van voedingsstoffen niet tegengehouden door een corrosieproduct laag.

In fases 3 en 4, wanneer een dikke roestlaag zich gezet heeft op het metaaloppervlak zullen anaerobe bacteriën, zoals sulfaat reducerende bacteriën, een grotere invloed hebben op verdere versnelling van corrosie.



Figuur 4 Basismodel voor corrosie met opeenvolgende fasen, model parameters en het effect van voedingsstoffen volgens Melchers

Bron: Melchers, R.E. en Jeffrey, R., bijgewerkt (2008)

Het model lijkt het best de corrosie te beschrijven van laaggelegeerd koolstof staal. Het is echter een model dat gemaakt is voor corrosie op lange termijn terwijl dit onderzoek zich wijdt aan een analyse over een periode van 8 maanden. Het onderzoek gaat de fases 0 en 1 door en er kan een start van fase 2 waargenomen worden. Fase 2 wordt echter niet helemaal doormaakt.

2.5 Het effect van macrofouling op corrosiesnelheid

Volgens Charleroi en Denayer (1992) omvat biofouling zowel macrofouling als microfouling en verwijst het naar de biologische fauna die zich op oppervlakken onder water kunnen vestigen. De indeling van biofouling is gebaseerd op de grootte van de organismen. Microfouling omvat de hechting van microbiële organismen zoals bacteriën,

schimmels en microalgen aan een onderwateroppervlak. Micro-organismen zijn vaak de eersten die een nieuw oppervlak bereiken. Vanaf een nieuw oppervlak ondergedompeld wordt zit het oppervlak vaak al vol microben. Hier spreekt men van een overrompeling van niet-cellulaire microben die een eerste film leggen rond het oppervlak. Door deze film worden macro-organismen aangetrokken tot het nieuwe oppervlak. Macrofouling omvat grotere organismen van dierlijke of plantaardige oorsprong, zoals oesters, mosselen, ringwormen, zeepokken en algen. Hoewel het effect van microbiële fouling op corrosie buiten de reikwijdte van deze thesis valt, is verder onderzoek van belang om een eventueel verschil op te merken in de effecten van plantaardige en dierlijke macrofouling op corrosie.

Een fouling gemeenschap wordt vaak gedomineerd door één of twee soorten die het lokale oppervlak overheersen. Na verloop van tijd kunnen verschillende soorten elkaar echter opvolgen. Om een succesvolle hechting te bekomen moet macrofouling zich aan een oppervlak kunnen vastzetten. De dichtheid en gladheid van het oppervlak spelen hierbij een cruciale rol. Zowel bij staal als bij de verfcoatings die vaak op staal worden aangebracht, geldt dat een harder en gladder oppervlak de aanhechting van macrofouling bevordert. Een te harde coating kan echter leiden tot een situatie waarbij de fouling zich zo stevig vastzet dat de verfcoating loskomt wanneer er geprobeerd wordt de fouling te verwijderen.

Bij langdurige onderdompeling in zeewater kan het proces van macrofouling veranderen door corrosieverschijnselen. Hierbij vormen zich corrosieproducten die een corrosiefilm creëren. Deze dunne laag biedt een substraat waarop fouling zich kan vestigen. In dergelijke gevallen hangt de hechtingssterkte niet alleen af van de fouling zelf, maar ook van de corrosiefilm en het onderliggende metaaloppervlak. Dit kan resulteren in situaties waarin zowel de film als de fouling loskomt van het oppervlak.

De aangroei van macro-organismen is afhankelijk van verschillende omstandigheden volgens Clapp (1948). De variabele met de grootste invloed is de zoutwaarde. Hoe zouter het water, hoe groter de conductiviteit. Ook temperatuur, stroomsnelheid en lichtvorming zijn factoren die de bloei van fouling organisme sterk bepalen.

Volgens Van Chi (2022) kan macrofouling ook opgedeeld worden in functie van morfologie. Zachte macrofouling zijn flexibele organismen die geen rigide extern skelet

hebben, zoals zeewieren, zachte koralen, sponzen,... Harde of kalkhoudende macrofouling hebben een hard extern skelet in de vorm van een schelp en omvatten weekdieren zoals oesters en mosselen (zoals weergegeven in Figuur 5), kokerwormen (zoals weergegeven in Figuur 6), zeepokken en korstvormige algen. Een zachte soort zal eerder het volledige oppervlak innemen, terwijl een harde soort zich verspreid over het oppervlak. Zo zou een plantaardige fouling voor een beschermende barriere kunnen zorgen tegen corrosief gedrag. Er bestaan verschillende studies (Ning 2012) die wijzen naar de mogelijkheid om een plantaardig gebaseerde coating te ontwikkelen die corrosie kan tegengaan. Door het harde skelet van kalkvormige macrofouling is het niet mogelijk om het volledige oppervlak te overmeesteren. Hierdoor is de kans groter dat er grotere zuurstofverschillen en potentiaalverschillen zijn op een oppervlak met harde macrofouling.



Figuur 5 Mosselen

Bron: Eigen werk



Figuur 6 Kokerworm

Bron: eigen werk

Volgens Hasson & Crowe (1988) kan de relatie tussen fouling door macro-organismen en corrosie het corrosieproces zowel versnellen als vertragen. In de initiële fase zorgen micro-organismen voor potentiaalverschillen over het metaaloppervlak. Deze verschillen in potentiaal kunnen leiden tot lokale corrosieprocessen. Bovendien bevorderen macro-organismen de toevoer van zuurstof naar het metaaloppervlak. Zuurstof fungeert als een oxidator in de elektrochemische reacties die corrosie versnellen. Door de aanwezigheid van zuurstof vormen zich ijzeroxiden en andere corrosieproducten. Dit zijn twee elementen die van belang zijn voor de vorming van corrosieproducten.

In een volgende fase zullen bepaalde macro-organismen zoals, algen, zeepokken en mosselen de gevormde corrosieproducten verwijderen. De film of dunne laag van corrosieproducten fungeert als een beschermende laag. Het houdt de indringing van zuurstofcellen tegen. Door de verwijdering van deze film wordt het onderliggende metaal opnieuw blootgesteld aan de mariene omgeving en begint het hele proces opnieuw.

In corrosiereacties kan waterstofgas ontstaan als bijproduct. Dit gas hoopt zich op op het oppervlak en versnelt de corrosie doordat het het metaal kan verzwakken. Dit fenomeen heet waterstofvermoeiing. Macro-organismen kunnen dit waterstofgas absorberen.

Verder betekent de aangroei van macro-organismen ook de ontwikkeling van micro-organismen. Ook deze organismen kunnen potentiaalverschillen veroorzaken, zuurstof opnemen en andere stoffen, zoals sulfaten, creëren op het metaaloppervlak.

In een latere fase zal het macro-organisme vaak zelf een biofilm aanmaken die het oppervlak scheidt van zijn mariene milieu. Zo zal de invoer van zuurstof beperkt worden en zal het corrosief proces opnieuw scherp vertragen.

Volgens Clapp (1948) ontstaat biofouling niet gelijkmatig over een bepaald oppervlak. Organismen vormen kolonies op specifieke plaatsen, wat resulteert in een onregelmatig patroon van aangroei. Dit leidt tot variaties in de mate van bescherming van het oppervlak op langere termijn, afhankelijk van waar het organisme zich gevestigd heeft. Verschillende soorten organismen hebben verschillende effecten op het onderliggende metaal. Dit resulteert in een variabel patroon van corrosie en bescherming. Door een onregelmatige aangroei kunnen beluchtingscellen ontstaan waardoor op bepaalde gebieden met aangroei het metaaloppervlak zuurstofarm (anodisch) worden, terwijl gebieden zonder organismen zuurstofrijk worden (kathodisch). In de anodische gebieden zullen ijzeratomen hun elektronen sneller verliezen. In de kathodische gebieden kan zuurstof gereduceerd worden tot water dankzij de aanwezigheid van zuurstof en vrije elektronen, wat de corrosiereactie verder aandrijft.

2.6 Kanaal Gent-Terneuzen

2.6.1 Beschrijving

Het Kanaal Gent-Terneuzen verbindt de Ringvaart nabij Gent met de Westerschelde. In Terneuzen werd een sluizencomplex gebouwd. Dit zorgt voor een beperktere invloed van het getij dat vanuit de Westerschelde en de Noordzee komt. De hoofdstroom loopt van Gent naar Terneuzen. Bij zeer hoge hoogwaters kan een tijdelijke waterverplaatsing vormen van de Westerschelde naar het kanaal, wat via het sluizencomplex in Terneuzen leidt tot het binnendringen van zout in het zoetwaterkanaal. Dit proces, dat zorgt voor een verzilting van het kanaal, wordt (gedeeltelijk) gecompenseerd door de invoer van zoet water vanuit de Moervaart. De toevoer van water varieert echter per seizoen, waardoor chloride niveaus variëren door het jaar heen. Tijdens droge periodes wordt volgens een

onderzoek van Rijkswaterstaat (WMCN, 2023) vooral een hoger zoutgehalte waargenomen.

Belangrijk voor dit onderzoek is de stroming in het kanaal zelf, de moervaart en de ringvaart. De afvoer vanaf de Moervaart levert de grootste bijdrage aan de stroming van het kanaal.

Het kanaal strekt zich uit over een lengte van 32 kilometer, waarvan 17 kilometer zich bevindt in Vlaanderen. Met een gemiddelde diepgang van 13,50 meter biedt het kanaal toegang aan Panamax schepen, met een maximale lengte van 265 meter, een maximale breedte van 37 meter en een maximale diepgang van 12,5 meter. Volgens een milieueffectrapport uit 2015 zou het totale oppervlak, inclusief zijtakken en havendokken, 10 vierkante kilometer bedragen.

2.6.2 Werking

De Zeehaven van Gent, is volgens het artikel “Het Kanaal Gent-Terneuzen: Varen Tussen Gent en Zelzate” (2022) de derde grootste haven van België na Antwerpen en Zeebrugge. Het is sinds 2018 onderdeel van 'North Sea Port', een fusie tussen de Belgische haven en de Nederlandse havens van Terneuzen en Vlissingen. Als onderdeel van het Europese transportnetwerk speelt de haven een rol in het faciliteren van handelsstromen naar bestemmingen zoals Italië, Zuid-Frankrijk, Polen, de Baltische staten en andere delen van Europa.

Met verbindingen naar de Middellandse Zee, Groot-Brittannië, Scandinavië, de Baltische staten en Rusland is de Zeehaven van Gent een belangrijk knooppunt in het Europese corridor. Corridors zijn gecombineerde routes over weg, water, spoor en pijpleiding. Ze fungeren als een autosnelweg voor transport en worden steeds gekozen om een optimale route te krijgen doorheen Europa. Verder staat de zeehaven in connectie met de zogenaamde Belt and Road Initiative, een grootschalig netwerk dat China verbindt met Azië, Europa en Afrika.

De haven bestaat uit vijf dokken, weergegeven in Figuur 7, die verschillende industrieën bedienen. Het Grootdok is voornamelijk gericht op schrootrecycling en binnenvaart toerisme. Het Sifferdok herbergt bedrijven zoals Euro-Silo en Louis Dreyfus. Aan het Mercatordok meren roll-on/roll-off schepen aan, met nabijgelegen faciliteiten voor Volvo

Cars Gent en Honda Europe. Het Rodenhuizedok verwerkt en verscheept biodiesel en -ethanol, terwijl het Kluizendok een breed scala aan industrieën herbergt, waaronder staal-, cement- en betonproducenten, evenals opslagfaciliteiten voor bulkgoederen.



Figuur 7 Dokken Gent

Bron: Google maps, bijgewerkt

2.6.3 Bronnenonderzoek en analyse in het kanaal

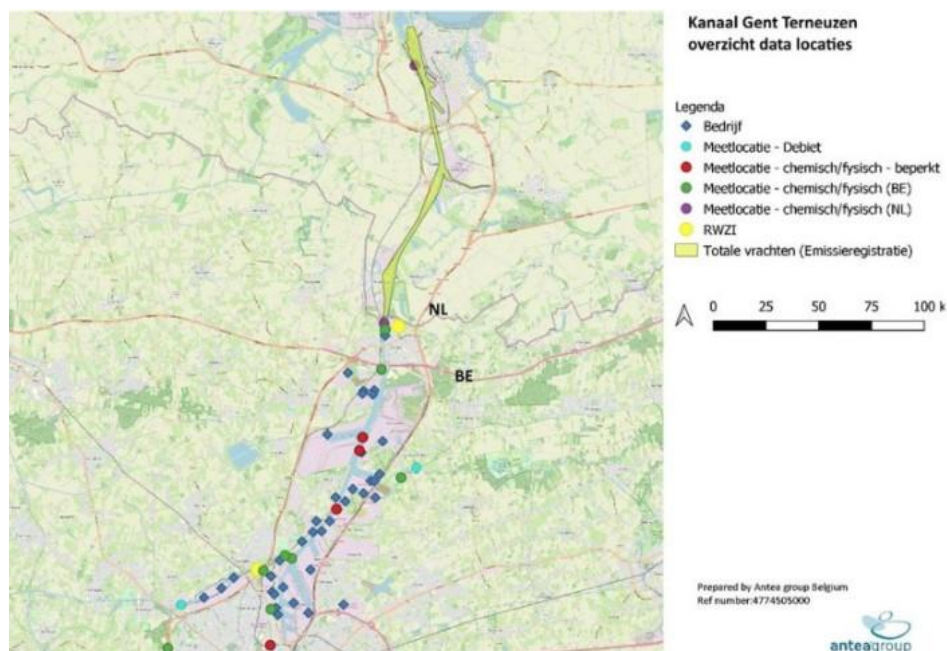
Uit de bronnenanalyse van Antea Group (2021) blijkt dat vooral het water rond Zelzate sterk vervuild is. De bovenafvoer van de Ringvaart en Moervaart ververst het volledige watervolume van het kanaal binnen één maand in de winter en binnen twee maanden in de zomer. Tijdens extreem droge zomermaanden kunnen de chloride-niveaus over het hele kanaal stijgen tot aan de Ringvaart, doordat de aanvoer van zoet water afneemt en de zoutconcentratie toeneemt. In de winter stijgt de aanvoer van zoet water weer, wat de zoutconcentratie doet dalen. De gemiddelde influx van zoet water bedraagt 13,2 m³/s.

Deze analyse is interessant voor het onderzoeken van eventuele parameters die de corrosiesnelheid beïnvloeden, hoewel dit aspect verder niet wordt uitgediept in deze thesis. De watertemperatuur in het kanaal varieert van 22 °C in juli tot 4-6 °C in januari. Er is een lichte stroming aanwezig in het kanaal Gent-Terneuzen.

Door de hoge mate van industrialisering rond het kanaal, weergegeven in Figuur 8, is er een verhoogde kans op vervuiling. Volgens een onderzoek van de Nederlandse Rijkswaterstaat is het kanaal vervuild met zware metalen.

De locaties zullen vergeleken worden met verschillende niveaus van industrialisering om te onderzoeken of er een significant verschil is tussen vervuild en minder vervuild water en het verwachte effect daarvan op de corrosiesnelheid.

In de buurt van Terneuzen is er meer kalkhoudende fouling aanwezig, terwijl dichterbij Gent wieren de coupon oppervlakken domineren. Op de achterkant van de rekken bevindt zich meer fouling, wat komt doordat de meeste macro-organismen beter gedijen met weinig licht. De gemiddelde dichtheid van het water is 1,002 t/m³, met een hogere dichtheid in Terneuzen en een lagere in Gent.



Figuur 8 Overzicht van bedrijven die directe lozingen uitvoeren op het kanaal Gent - Terneuzen, Noorderlijke Ringvaart en Moervaart

Bron: Bronnenanalyse kanaal Gent-Terneuzen, 2021

2.7 Theoretische achtergrond en praktische toepassing

Na de literatuurstudie richt deze thesis zich in het volgende hoofdstuk op het praktische aspect: het verzamelen van veldgegevens om een ruimtelijke analyse van uniforme corrosie op het kanaal Gent-Terneuzen uit te voeren. Na deze fase wordt empirisch onderzoek gedaan, waarbij de invloed van geografische en industriële factoren op de uniforme corrosie in kaart gebracht worden.

In de theoretische achtergrond werden verschillende hoofdstukken aangeboden, gewijd aan specifieke aspecten van microbiologie, mariene corrosie, parameters in mariene corrosie, het bi-modaal model van Melchers, en het effect van macrofouling op corrosiesnelheid.

Verschillende facetten van uniforme corrosie zijn besproken, zoals redelijkerwijs kan worden aangenomen voor het kanaal Gent-Terneuzen. Het hoofdstuk over microbiologie verkent bijvoorbeeld de diverse bacteriën die verantwoordelijk zijn voor corrosieve processen, waaronder *Gallionella*, *Rhodanobacter*, en sulfaat reducerende bacteriën, eerder geïdentificeerd in het kanaal. Het microbiële aspect, samen met de omgevingsparameters die mariene corrosie beïnvloeden worden verder niet besproken in het veldwerk of de analyse.

Door voorgenoemde hoofdstukken te integreren in deze thesis worden onderliggende mechanismen en invloeden van uniforme corrosie aan het licht gebracht. Alhoewel deze niet verder besproken worden is het wel belangrijk dat deze informatie meegegeven wordt. Dit om een beeld te geven van alle aspecten die een invloed kunnen hebben op het corrosiegedrag op het kanaal.

3 Materiaal en methoden

3.1 Design of experiment

Om een beter inzicht te krijgen in de omstandigheden in de kanaalzone Gent-Terneuzen werd in het vooronderzoek een uitgebreide staalname georganiseerd over het gehele kanaal. In overleg met kanaalloosden en North Sea Port werden vijvenvijftig locaties geselecteerd, met aandacht voor een goede spreiding over de kanaalzone en variatie in stroming, zoutgehalte, historische besmettingen met microbiologisch geïnduceerde corrosie (MIC) en industriële invloeden. Uiteindelijk werden zevenenveertig van deze locaties effectief gebruikt voor analyse. Het vooronderzoek identificeerde de jachthaven van Zelzate als een hotspot voor microbiële corrosie.

Elk rek, met 21 staalcoupons, werd ondergedompeld op een diepte van 1 meter. Op locaties 6, 14, 19, 24 en 33 werden extra rekken op dieptes van 1, 3 en 7 meter geplaatst om de correlatie tussen diepte en corrosiesnelheid te analyseren. Deze rekken werden geïnstalleerd op 9, 10 en 19 mei 2023. Maandelijks werden drie staalcoupons verwijderd voor gewichtsverliesmetingen, resulterend in zeven meetcampagnes in juni (12-13), juli (13-14), augustus (17-18), september (20-22), november (7-9), december (14-18) en januari (26-29).

Wanneer de plaatjes uit het water gehaald werden, werd steeds ook een staalname van het water genomen op een diepte van 1 meter. Deze werden samen gekoeld bewaard op een temperatuur van 4 °C. Daarna werden de coupons en de staalname naar het labo aan de Universiteit van Gent gebracht. Daar werd biologisch onderzoek gedaan naar de waterstaal en de fauna die zich vastgehecht had aan de coupons. Wanneer de Universiteit van Gent klaar was met zijn onderzoek werden de coupons naar de Antwerp Maritime Academy – Campus Bredastraat gebracht.

In september en december 2023 werden nieuwe coupons toegevoegd aan de rekken op geselecteerde locaties, welke respectievelijk in november en januari werden verwijderd voor analyse. Dit was bedoeld om een vergelijking te maken tussen de effecten van temperatuurvariaties op de corrosiesnelheid. Uiteindelijk werd echter geconcludeerd dat de gegevens op basis van temperatuur alleen geen wetenschappelijk verantwoorde vergelijkingen opleverden. De gemiddelde watertemperatuur was 22°C tussen april en

mei en 6°C tussen december en januari. Een grondige analyse van de rekken helpt bij het identificeren van mogelijke microbiële corrosiegebieden. Nieuw aangebrachte coupons werden 1 maand in het water gehouden.

Extra rekken werden geplaatst in het Sas van Gent vanwege de variatie in omgevingsomstandigheden. Een referentierek werd geplaatst in de Schelde, net buiten de kanaalzone, waar zout water en snelle stroming is en geen corrosief gedrag door microben opgemerkt wordt. De meetpunten op de Westerschelde dienden als negatieve controle om vergelijkingen te maken tussen brak water in de kanaalzone en zout water in de Schelde. De locaties werden strategisch gekozen zodat ze praktisch bereikbaar zijn vanaf het water. Uiteindelijk bleken twee van de zevenenveertig locaties niet bereikbaar, waardoor er vijvenveertig meetpunten overbleven.

Op deze locaties werden rekken opgehangen met in totaal 21 staalcoupons per rek, vervaardigd uit grade A staal (S235). Dit type staal wordt veel gebruikt in zowel haveninfrastructuur als scheepsrompen vanwege zijn eigenschappen: een treksterkte van 330 N/mm², een rekgrens van 205 N/mm² en een rek van minimaal 35% (EN10204). De staalcoupons werden vooraf gewogen met een Kern precisiebalans en de rekken werden gelabeld met unieke identificatienummers. De coupons werden geïdentificeerd aan de hand van het label op het rek en hun positie daarop, en bevestigd met plastic spanbandjes om elektrische isolatie te garanderen.

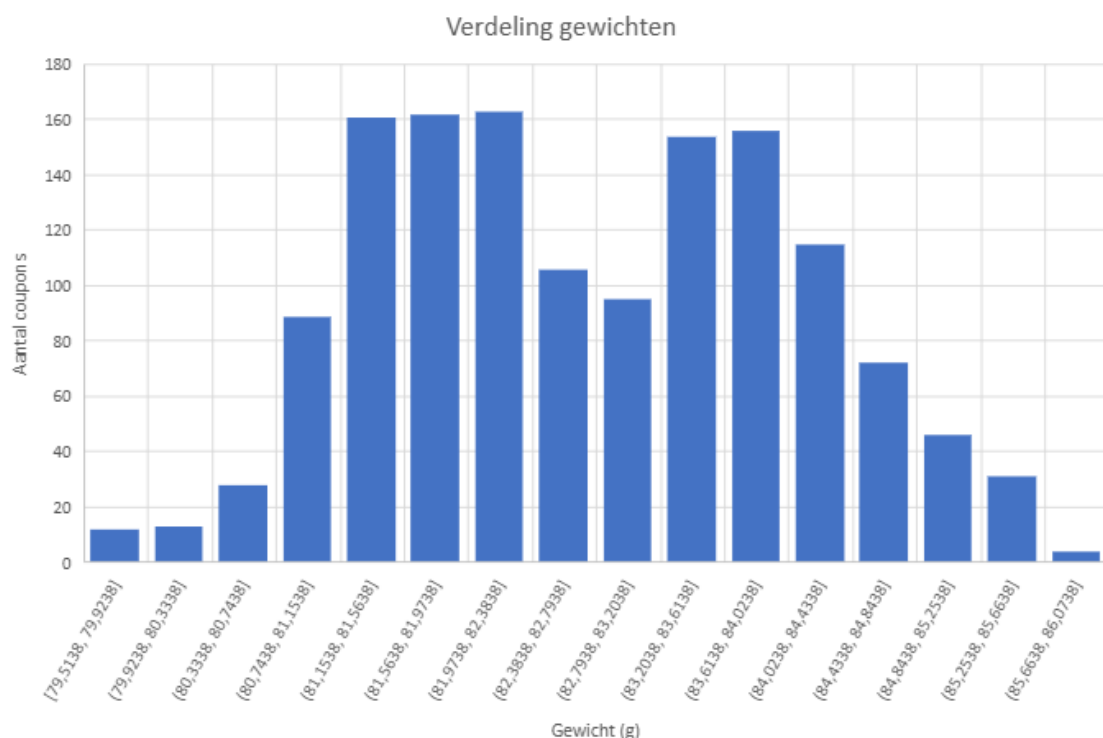
Gedurende het onderzoek, dat liep van mei 2023 tot februari 2024, werd bij elke meetcampagne de zeewatertemperatuur gemeten. Er werd een temperatuurverschil van 18°C vastgesteld tussen juli (22°C) en januari (4°C). Hoewel de nieuwe coupons in september en december werden geplaatst om een vergelijkende analyse te maken, werd deze vergelijking uiteindelijk geschrapt uit de opzet van de thesis.

3.2 Materialen

De bestelde coupons gebruikt voor het experiment zijn gesneden met laserbehandeling. Dit zorgde voor een variatie in gewicht tussen de coupons. De coupons hebben een staallegering S235. Dit is een veelgebruikte staallegering in de constructie van schepen. De 'S' staat voor structural, wat aangeeft dat het staal bedoeld is voor structurele toepassingen. Het getal '235' verwijst naar de minimale vloeigrens van het staal in

megapascal. De minimale vloeigrens is de spanning waarbij het materiaal plastisch begint te vervormen (Schäfer e.a., 2015). Het gemiddeld gewicht is 82,7547 gram. De standaard deviatie is 1,309217 gram. De afmetingen zijn 60 mm X 60 mm X 3 mm.

In Figuur 9 wordt de verdeling van de coupon gewichten weergegeven. Dit volgt een som van 2 normaalverdelingen. Het minimale gewicht is 79,5138 gram en het maximale gewicht is 85,7428 gram. De twee pieken lijken zich te bevinden op 81,7688 gram en 83,8188 gram.



Figuur 9 Overzicht initiële gewichten van alle coupons besteld voor het onderzoek

Bron: eigen werk

In Figuur 10 wordt een boxplot van de initiële gewichten weergegeven, die de verdeling van de gewichten visueel samenvat en vijf numerieke waarden weergeeft. Deze waarden bieden inzicht in de centrale tendens, verdeling en eventuele uitschieters. De dikke lijn in De box geeft de mediaan van alle metingen weer wanneer deze op waarde gerangschikt worden. De interkwartielafstand (IQR), vertegenwoordigd door de box, beschrijft het bereik van de middelste 50% van de data. Dit geeft een idee van de spreiding in het gewichtsverlies. De lijnen die uit de box komen, de zogenaamde ‘whiskers’, geven het bereik aan waarin de meeste data ligt, doorgaans 1,5 keer de interkwartielafstand. De ‘whiskers’ zijn dus afhankelijk van de verdeling van de middelste 50% van de dataset.

Metingen die buiten deze reikwijdte liggen worden beschouwd als uitschieters of 'outliers' en worden weergegeven door punten. Deze uitschieters worden doorgaans niet gebruikt om een vaststelling te maken.

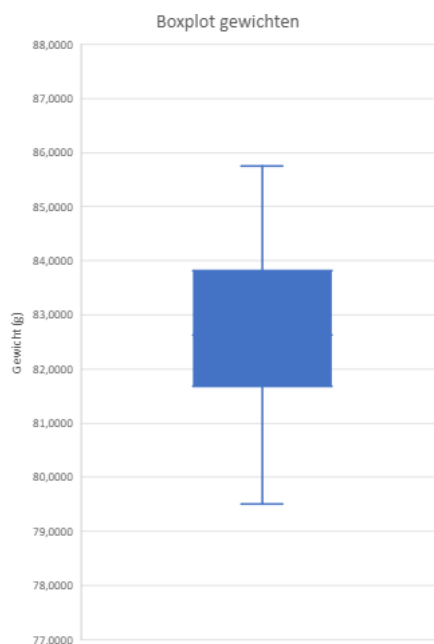
De mediaan is het middelste getal van de set (genummerd op grootte). Deze bedraagt 82,6280 gram.

Het eerste kwartiel is de onderkant van de doos en geeft het 25^e percentiel aan. Deze is 81,6861 gram.

Het derde kwartiel is de bovenkant van de doos en geeft het 75^e percentiel aan. Deze is 83,8155 gram.

De onderste en bovenste lijnen geven de minimum- en maximumwaarde van de dataset weer. Deze zijn respectievelijk 97,5138 en 85,7428 gram.

Als de boxplot symmetrisch is, met de mediaan in het midden van de doos en de lijnen ongeveer even lang aan beide zijden, kan dit een indicatie zijn van een normale verdeling. In dit geval ligt de mediaan niet precies in het midden. Dit kan worden verklaard door de assumptie dat er twee normaalverdelingen zijn.



Figuur 10 Boxplot initiële gewichten

Bron: eigen werk

De aanwezigheid van de twee normaalverdelingen kan verklaard worden dat twee metalen platen met verschillende dikte werden gebruikt tijdens het uitsnijden van de coupons.

3.3 Veld werk op het kanaal Gent-Terneuzen

Het onderzoek omvat een fase waarin ijzercoupons gedurende een gespecificeerde periode worden ondergedompeld op verschillende dieptes (1m, 3m, 7m) in het Kanaal Gent-Terneuzen. Op alle locaties werd een rooster geplaatst met daarop 21 plaatjes bevestigd op een diepte van 1 meter. Op diverse locaties werden aanvullende roosters geplaatst op dieptes van 3 en 7 meter. Deze selectie werd strategisch uitgebouwd om vergelijkende analyses uit te voeren op basis van verschillende diepteniveaus. Alle geselecteerde locaties waren bereikbaar met de onderzoeksboot "Argus", gehuurd van de zeescouts Lange Wapper, op het kanaal zelf. Ze bevonden zich hoofdzakelijk op het Kanaal Gent-Terneuzen en zijn zijtakken en dokken.

Gedurende een reeks van zeven metingen werden de coupons zorgvuldig verwijderd en in hersluitbare plastic zakken met silicagel geplaatst. Het silicagel onttrekt overmatig vocht dat nog aanwezig zou kunnen zijn op de staalcoupon, waardoor verdere voortgang van het corrosieproces wordt voorkomen. Gegevens zoals locatienummer, framenummer, diepte, datum en tijd werden genoteerd op de zak. Erna werden ze koel gehouden voor biologisch onderzoek. In eerste instantie werden deze coupons naar de Universiteit Gent gestuurd voor biologisch onderzoek. Zodra de UGent het onderzoek had voltooid, werden de plaatjes overgebracht naar de Antwerp Maritime Academy - Campus Bredastraat, waar ze werden gereinigd en geëetst met een hogedrukreiniger. Erna konden de coupons gedroogd en gewogen worden.

De evaluatie van zowel oppervlaktecorrosie als putcorrosie kan inzicht geven in het corrosiegedrag en de mogelijke invloed van microbiële corrosie. Visuele inspectie van de coupons was een integraal onderdeel van het onderzoek. Het beoordelen van de mogelijke invloed van microbiële corrosie valt echter buiten de reikwijdte van deze thesis.

3.3.1 Monsternamen en Uitgebreide Analyse

Het ophalen van de ijzercoupons uit het Kanaal Gent-Terneuzen ging gepaard met een grondige analyse van het omgeven water. Deze analyse van het omgeven water werd

vastgelegd met behulp van een multisensorprobe voor de fysicochemische eigenschappen van het water (Manta 35, Royal Eijkelkamp, Nederland). De opstelling van deze multisensorprobe wordt weergegeven in Figuur 11.



Figuur 11 Manta 35 – multisensorprobe

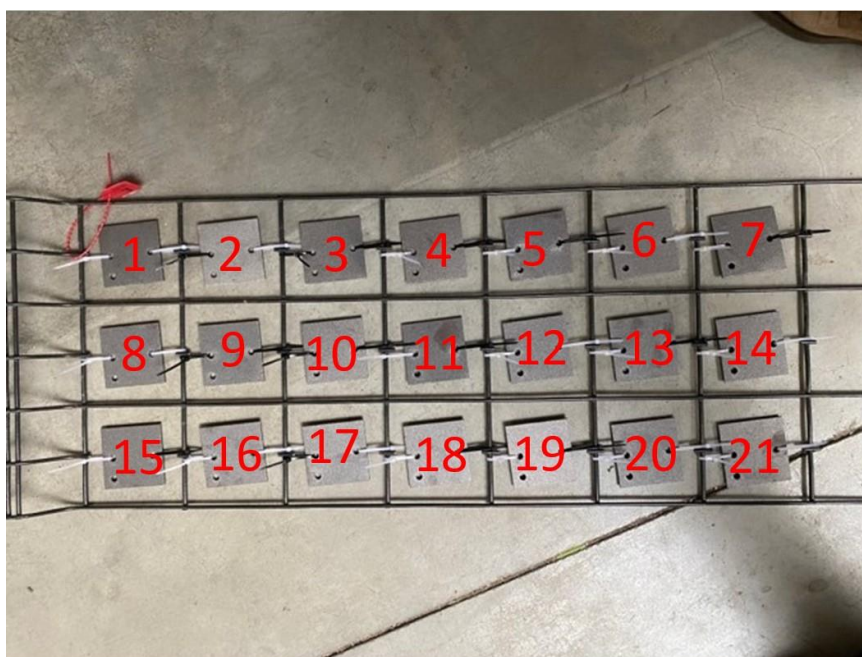
Bron: eigen werk

De probe werd geconnecteerd met de computer. De tijd moest gesynchroniseerd worden met de tijd op de pc. Er werd vergeleken of deze tijd overeenkomt met de gps tijd. Indien er enig verschil was tussen deze tijden zou deze genoteerd worden. Een marge van maximaal 1 seconde was acceptabel. Er werd gecontroleerd indien er een verband bestaat tussen de scheepssnelheid en de waterparameters. De scheepssnelheid was $(4,5 \pm 0,2)$ m/stijds het varen van rek naar rek. Verschillende parameters, waaronder temperatuur, pH-waarden, conductiviteit, zoutgehalte, totale opgeloste vaste stoffen, opgeloste zuurstof, diepte, chlorofylwaarden, reductiepotentiaalwaarde en chloride-waarden werden per tijdsinterval van 2 seconden geanalyseerd en vastgelegd door de multisensorprobe. Meer informatie over deze probe kan worden teruggevonden op de website van het onderzoeksproject SOCORRO (www.socorro.eu).

Deze probe werd aangesloten aan een buis die onder de romp van de “Argus” een constante aanvoer van water analyseert. Deze buis moest correct onder de boot hangen zodat er geen luchtaanvoer in het systeem kwam. Dit zou de analysewaarden verstoren. Wanneer de sensor diepte gelijk is aan de frame diepte wist men dat de buis juist hing. Wanneer de sensor gegevens stabiliseerden, kon men beginnen aan de tocht. Deze uitgebreide reeks aan gegevens bood veel informatie over de omgevingsfactoren die mogelijk van invloed zijn op het corrosieproces. Ook werden staalmonsters van het water genomen op een diepte van 1 meter bij elke locatie waar staalcoupons weggenomen werden. Deze monsters werden geanalyseerd door de Universiteit van Gent

3.3.2 Locatiegebonden observaties

Bij elke locatie werden de rekken met coupons naar boven gehaald voor gedetailleerde observaties. Coupons werden genummerd van 1-21 van linksboven tot rechtsonder. De gaten oriënteren zich linksboven. Het tagnummer van het rek bevindt zich aan de rechterbovenkant bij een oriëntatie aan de voorkant van het rek, zoals weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12 Rek met coupons

Bron: eigen werk

Vóór de staalcoupons van het rek verwijderd werden, werd steeds een foto genomen van de voor- en achterkant van het rek. Hierbij werd een whiteboard geplaatst met vermelding van locatienummer, framenummer, datum en tijd. Een voorbeeld hiervan wordt weergegeven in Figuur 13. Deze foto's hadden een veelzijdig doel. Enerzijds kon de staat van het coupon nadat het proces verlopen is nog bekeken worden. Zo kon bijvoorbeeld het effect van macrofouling op het gewichtsverlies geanalyseerd worden op basis van foto's. Dit was interessant wanneer er bijvoorbeeld een significant verschil in gewichtsverlies is tussen plaatjes die op hetzelfde moment op dezelfde locatie genomen werden. Anderzijds, doordat deze foto's met een iPhone genomen werden en automatisch opgeslagen worden in functie van locatie en tijd, kon dit gebruikt worden om eventuele fouten of tekortkomingen te controleren.

Vervolgens werden drie plaatjes van het rek geknipt op numerieke volgorde. Ze werden in een genummerde container geplaatst. Ten slotte werden de coupons voorzichtig droog gedept met een papieren doek en in een hersluitbare plastic zak gestoken. Er werd zorgvuldig gedept zodat de macrofouling die zich vastgehecht heeft aan de coupon niet beschadigd werd. Het tagnummer op het rek werd geverifieerd met het tagnummer op de lijst van de locatienummers. Op de zak stonden datum en tijd van afname, reknummer, rekdiepte en couponnummer.

Hierna werd het rek terug te water gelaten en werd een schermafbeelding van het manta systeem genomen om de lokale parameters op te slaan. De schermafbeelding werd opgeslagen als volgt: (datetime_locationnumber_framedepth).



Figuur 13 Foto van de voorkant van het middelste rek op locatie 24, uit het water gelaten op 13 juni om 10u50

Bron: eigen werk

3.4 Laboratorisch werk

3.4.1 Experimentele analyse

De experimentele analyse van de uitgehaalde plaatjes begon met de nauwkeurige bereiding van Clark-oplossing, een oplossing voorgeschreven door ASTM G1 (2011) bestaande uit 5000 milliliter zoutzuur (HCl), 250 gram tinchloride (SnCl_2) en 100 gram antimoon(III)oxide (Sb_2O_3). Met een magnetische mixer werd een grondige menging toegepast om een effectieve interactie tussen de verschillende deeltjes in de oplossing te bevorderen. Dit mengsel kon pas gebruikt worden wanneer de volledige stof in oplossing is met het zoutzuur (36%). Doorgaans duurde het enkele uren waarin de stof verschillende tinten van wit tot lichtbruin tot uiteindelijk helder aannam. Om zeker te zijn dat de stof volledig in oplossing was, werd er doorgaans een dag gewacht om de Clark-oplossing te gebruiken. De oplossing werd gedurende het hele proces onder een trekkast gehouden om de vrijkomende gassen weg te filteren. Na aanleiding van de publicatie van Wade et al. (2015) werd besloten dat vijf liter Clark-oplossing vijf maal gebruikt kon worden. Elke keer dat de Clark-oplossing gebruikt wordt, wordt deze agressiever en agressiever. Na vijf sessies zou de stof niet enkel corrosieproducten maar ook staal wegnemen en zou dit de resultaten te zwaar beïnvloeden. De Clark-oplossing werd hierna als chemisch afval beschouwd.

3.4.2 Behandeling van Coupons

Voor de behandeling van de coupons werd een luchtdichte Curver opbergbox gebruikt, zoals weergegeven in Figuur 14, om de ontsnapping van zoutzuurdampen te minimaliseren. Een plateau werd gebruikt om de coupons op hun plaats te houden tijdens het reinigingsproces met hoge druk. Zo konden 28 coupons behandeld worden per proces.



Figuur 14 Coupons met macrofouling

Bron: eigen werk

Na de bereiding van de Clark-oplossing werden de ijzercoupons onderworpen aan een zorgvuldig proces van etsen met behulp van een hogedrukreiniger. De staalplaatjes bevatten vaak nog fouling en overblijfselen van het corrosieproces. Deze behandeling verwijderde de meeste fouling en resulteerde in visueel egale en schone plaatjes. Figuur 15 geeft een set coupons weer na het etsen met hogedrukreiniger.



Figuur 15 Coupons na hogedrukreiniging

Bron: eigen werk

Vervolgens werden de coupons gedurende een periode van 4-5 minuten blootgesteld zoals beschreven in ASTM G1 (2011) aan Clark-oplossing om de resterende corrosieproducten te verwijderen. Deze blootstelling wordt weergegeven in Figuur 16.



Figuur 16 Coupons tijdens blootstelling aan Clark-oplossing

Bron: eigen werk

De keuze voor deze oplossing, bepaald door de ASTM G001 (2011), werd gemaakt door de mogelijkheid om gebruik te maken van een trekkast in het labo en het feit dat de oplossing relatief snel kan worden samengesteld. Het bleek een doeltreffend mengsel te zijn voor het verwijderen van roest. De coupons werden in het mengsel gelaten tot de coupons visueel proper zijn. Dit duurde een vier- à vijftal minuten. Wanneer putcorrosie zich voordeed, werd extra aandacht gegeven dat ook deze zones visueel proper zijn. Zoutzuur zorgt ervoor dat het ijzer Fe^0 terugkeert naar zijn staalvorm Fe^{2+} . Erna werden coupons met water afgewassen zodat de Clark-oplossing aangelengd werd, het proces ophield en niet meer ijzer verwijderd werd dan nodig.

3.4.3 Belang van het Droogproces

Na het oplossen werden de coupons grondig gewassen met water om de Clark-oplossing te verdunnen en af te wassen om zo het corrosieproces te stoppen. Ook overtollig ijzer werd hier mee afgespoeld. Een kritieke fase volgde, waarin de coupons onmiddellijk één

voor één werden gedroogd. Een verlengde blootstelling aan water vergrootte namelijk de kans op een hernieuwd corrosieproces. Het droogproces werd uitgevoerd met snelheid en precisie, aangezien een langere blootstelling aan water de kans op corrosie vergrootte. De gedroogde coupons, weergegeven in Figuur 17, waren nu klaar om gewogen te worden.



Figuur 17 Coupons na blootstelling aan Clark-oplossing

Bron: eigen werk

3.4.4 Weegproces en Opvolging

Na het drogen werden de coupons gewogen met behulp van een analytische weegschaal (VWR PBA124, Leuven, België), die een luchtdichte omgeving bood en een precisie tot op 0,0001 gram mogelijk maakte. De gewichtsgegevens werden overgezet naar een Excel-rekenblad, waarna de coupons in luchtdichte plastic zakken met silica gel werden geplaatst. Deze weging stelde onderzoekers in staat het massaverlies van de ijzercoupons

te berekenen en het effect van corrosie in kaart te brengen. Het massaverlies = De initiële massa – de massa na de wascyclus. Het massaverlies kon dus niet negatief zijn.

3.5 Clustering locaties in zones

Langs het kanaal vormt zich verschillende industrie. Deze industrie is heel divers en moeilijk te groeperen. In functie van het onderzoek werden industriële zones gegroepeerd op basis van hun geografische ligging om meer data samen te leggen en een eventueel verband te bekijken tussen geografische ligging en corrosiesnelheid. De modelgroepen werden als volgt geclusterd, met locaties weergegeven in Figuur 1:

- 1) Buiten het kanaal op de Westerschelde werden locaties 02 en 55 gegroepeerd op basis van de aanwezigheid van zout water afkomstig van de Noordzee en brak water afkomstig van de Schelde. De locatie werd vastgelegd op -1925 meter van Terneuzen.
- 2) Rond Terneuzen werden locaties 03, 05, 06, 07 en 08 gegroepeerd op basis van industriële zone. De locatie werd vastgelegd op 1264 meter van Terneuzen.
- 3) Rond Sluiskil werden locaties 09, 12, 13, 14 en 15 gegroepeerd op basis van industriële zone. De locatie werd vastgelegd op 5929 meter van Terneuzen.
- 4) Rond Sas van Gent werden locaties 16, 17, 60 en 65 gegroepeerd op basis van industriële zone. De locatie werd vastgelegd op 11186 meter van Terneuzen.
- 5) Rond Zelzate werden locaties 19, 20, 21 en 24 gegroepeerd op basis van industriële zone. De locatie werd vastgelegd op 15872 meter van Terneuzen.
- 6) Rond de site Arcelor Mittal en het Rodenhuisendok werden locaties 23, 25, 27, 28, 29 en 59 gegroepeerd op basis van industriële zone. De locatie werd vastgelegd op 19757 meter van Terneuzen.
- 7) Langs de Moervaart werden locaties 31, 32 en 57 gegroepeerd op basis van een seizoensgebonden influx van zoet water. De locatie werd vastgelegd op 21664 meter van Terneuzen.
- 8) Rond Langerbrugge werden locaties 33, 35, 36 en 37 gegroepeerd op basis van industriële zone. De locatie werd vastgelegd op 24125 meter van Terneuzen.
- 9) In Gent rond het Sifferdok werden locaties 38, 39, 41 en 43 gegroepeerd op basis van industriële zone. De locatie werd vastgelegd op 25867 meter van Terneuzen.

10) In Gent rond het Grootdok werden locaties 45, 47, 50, 51 en 52 gegroepeerd op basis van industriële zone. De locatie werd vastgelegd op 28546 meter van Terneuzen.

11) Ten slotte werden in de binnenwateren te Gent de locaties 54 en 56 gegroepeerd op basis van industriële zone. De locatie werd vastgelegd op 27593 meter van Terneuzen.

In Tabel 2 wordt de verdeling in zones samengevat.

Tabel 2 Indeling van locaties in zones

Bron: eigen werk

Zone	Locaties	Afstand tot Terneuzen in meter
Schelde	02 en 55	-1925
Terneuzen	03, 05, 06, 07 en 08	1264
Sluiskil	09, 12, 13, 14 en 15	5929
Sas van Gent	16, 17, 60 en 65	11186
Zelzate	19, 20, 21 en 24	15872
Arcelor Mittal	23, 25, 27, 28, 29 en 59	19757
Moervaart	31, 32 en 57	21664
Langerbrugge	33, 35, 36 en 37	24125
Gent rond het Sifferdok	38, 39, 41 en 43	25867
Gent rond het Grootdok	45, 47, 50, 51 en 52	28546
Binnewateren te Gent	54 en 56	27593

4 Statistische analyse

4.1 Data analyse

4.1.1 Onderzoeken van trends, patronen en relaties

In deze thesis werd onderzoek gedaan naar verschillen en trends in de snelheid en versnelling van uniforme corrosiesnelheid over het kanaal Gent-Terneuzen. Het opzet was om een ruimtelijke analyse te maken. Van hieruit konden conclusies gemaakt worden van mogelijke hotspots voor corrosie en de factoren die deze locaties vatbaar maken voor corrosie in het kanaal. Verder kon onderzocht worden wat die specifieke plaatsen zo aantrekkelijk maakte voor de snellere werking van afbraak door corrosie. Verschillende parameters werden opgemeten en waterstalen zijn opgenomen op elke locatie over verschillende tijdstippen. Verder werd ook biologisch onderzoek gedaan op de Universiteit van Gent. Deze thesis zou zich echter enkel focussen op een ruimtelijke analyse van het kanaal. Locaties werden gegroepeerd per industriële zone om een beter inzicht te creëren en meer data te verkrijgen per zone. De te beantwoorden onderzoeksvraag bestudeert of er specifieke gebieden langs het kanaal zijn die significant hogere corrosiesnelheden hebben dan andere gebieden.

4.1.2 Statistische analyse en hypothesen

4.1.2.1 *Onderzoeksdesign en steekproef*

Volgende data werd gebruikt: massaverlies van coupons, tijd van uithangen, tijd van ophalen en coördinaten van de meetlocaties.

Verschillende data werd bekeken, enerzijds in functie van tijd, anderzijds in functie van hun positie tegenover referentiepunt Terneuzen. Hiervoor werd een kwantitatief onderzoek opgesteld op basis van de metingen.

65 meetpunten werden voorzien die spatiaal verspreid worden over het gehele kanaal. Extra aandacht werd gegeven aan locaties die zwaar bevolkt zijn door industriële activiteit.

4.1.2.2 *Dataverzamelmethode*

Gedurende de periode van mei 2023 tot februari 2024 werden corrosiecoupons ondergedompeld in het water van het Kanaal Gent-Terneuzen. Op regelmatige intervallen werd per locatie een campagne te water georganiseerd om bij elke locatie 3 coupons per

rek op te halen.

4.1.3 Data verzameling

In totaal werden 65 rekken voorbereid plus 2 reserverekken, goed voor een totaal van 1407 coupons. Uiteindelijk werden verschillende locaties uit het onderzoek gehaald doordat het niet mogelijk was om de rekken op te halen. Van de 55 locaties bleven er uiteindelijk 45 locaties over. In september en december werden extra coupons toegevoegd aan de rekken om onderzoek te doen naar corrosiesnelheid op basis van seizoen. 66 coupons werden in september toegevoegd. 57 coupons werden in december toegevoegd. Goed voor een totaal van 1278 coupons die effectief uit het water gehaald werden. 210 van deze coupons zijn niet gewogen geweest. In totaal zorgde dit voor een massaverliesmeting van 1068 coupons over een periode van 8 maanden. Na het verwijderen van twijfelachtige metingen, bleven 1023 geldige metingen over voor analyse. Voor de modellering in clusters werden deze locaties gegroepeerd tot 11 zones.

4.1.4 Dataorganisatie en beschrijvende statistiek.

4.1.4.1 *Berekenen van corrosiesnelheid: eerste afgeleide*

Na de weging van het massaverlies van elke coupon kon de analyse van start gaan. Massaverlies wordt omgezet naar corrosiesnelheid. Corrosiesnelheid kan gezien worden als de eerste afgeleide van massaverlies in functie van de tijd.

Zodra de corrosiesnelheid vastgesteld werd, kon de effectieve analyse beginnen.

De focus lag hierbij op het beantwoorden van de primaire onderzoeksvraag met betrekking tot het gehele kanaal Gent-Terneuzen.

Deze uitgebreide analyse biedt inzicht in de uniforme corrosieverschijnselen die zich voordoen en stelt onderzoekers in staat om patronen en trends te identificeren over verschillende locaties en omstandigheden binnen het kanaal.

Van elke groep van 3 coupons die samen uit het water gehaald werden op een bepaalde locatie wordt een gemiddelde van corrosiesnelheid genomen. Zo blijft één waarde per meetpunt per tijdstip over. Dit komt neer op 341 meetpunten over 7 meetperiodes.

4.1.4.2 Berekenen van corrosievertraging: tweede afgeleide

Voor het beschrijven van corrosie overheen een aantal maanden kan gebruik gemaakt worden van een model waarbij een afname van corrosiesnelheid wordt waargenomen in functie van de tijd. Deze afname kan gezien worden als de tweede afgeleide van massaverlies. In wiskundige termen dus de versnelling of in dit geval vertraging van corrosie. De vertraging wordt weergegeven in de grafiek met een exponentieel vervalmodel dat na verloop van tijd neigt naar een asymptoot. Log alfa of de vervalconstante geeft de mate van vertraging weer. De asymptotische corrosiesnelheid wordt gebruikt om de stabiele snelheid te beschrijven waarnaar corrosie neigt in functie van de tijd. Deze asymptoot geeft dus corrosiesnelheid in functie van de tijd weer en is een goede indicator voor het meten van corrosiesnelheid over het gehele kanaal. Voor de data-analyse werd een script geschreven in R (zie paragraaf 4.3).

4.2 R script

Data wordt verwerkt met een script, geschreven in het softwarepakket R (versie 4.3.2, <https://cran.r-project.org/manuals.html>) en R Studio (versie 2023.12.1+402), een open source pakket om gegevens statistisch en grafisch te verwerken.

4.2.1 Data set-up

De gegevens die gebruikt worden om de analysemodellen op te bouwen, zijn de volgende:

```
corrosiondata <- read_excel("/Users/wikkewitteveen/Library/CloudStorage/OneDrive-hzs.be/WO_COMIC/COMIC WP1  
Corrosie in kaart brengen/Measurement campaign 2023/Analysis/Mass_loss_working_working_doc.xlsx") #ADAPT!!  
corrosiondata1 <- read_excel("/Users/wikkewitteveen/Library/CloudStorage/OneDrive-hzs.be/WO_COMIC/COMIC WP1  
Corrosie in kaart brengen/Measurement campaign 2023/Analysis/coordinates_meas_locations.xlsx") #ADAPT!!  
corrosiondata2 <- read_excel("/Users/wikkewitteveen/Library/CloudStorage/OneDrive-hzs.be/WO_COMIC/COMIC WP1  
Corrosie in kaart brengen/Measurement campaign 2023/Analysis/environmental_data.xlsx")
```

Deze sectie van het R-script importeert gegevenssets vanuit Excel-bestanden, combineert ze en berekent vervolgens het gemiddelde van corrosiesnelheden met standaarddeviatie. Er worden drie Excel-bestanden ingelezen: 'Mass loss working doc', 'coordinates measurement location' en 'environmental data'. Deze bestanden worden apart opgeslagen in 3 gegevensframes, respectievelijk: corrosiondata, corrosiondata1 en corrosiondata2.

Vervolgens worden loops gebruikt om de coördinaten (op de horizontale en verticale as) van het gegevensframe "coordinates measurement location" toe te voegen aan een

algemene database of dataset waarin de corrosiegegevens worden opgeslagen. Een ‘loop’ is een programmeerconstructie die wordt gebruikt om een bepaalde set instructies herhaaldelijk uit te voeren. Zo kan het script door elk record gaan in het Excel-werkblad. Zo kan elk massaverlies van het ‘mass loss working doc’ gekoppeld worden aan de juiste locatie coördinaten.

```
#pay attention to not running these commands twice
#add location coordinates to full corrosion rate set
corrosiondata <- merge(corrosiondata,corrosiondata1,
                      by = "location",
                      all.x = TRUE, all.y = FALSE)
#add environmental data to corrosion rate set
#corrosiondata <- merge(corrosiondata,corrosiondata2,
#                      by.x = c("location", "Months"),
#                      by.y = c("Annotation", "Months"),
#                      all.x = TRUE, all.y = FALSE)
#add coordinates to the environmental data set
corrosiondata2 <- merge(corrosiondata2,corrosiondata1,
                      by.x = "Annotation",
                      by.y = "location",
                      all.x = TRUE, all.y = FALSE)
header <- colnames(corrosiondata)
view(header)
surface_area_sqcm <- 65.21415987
density <- 7.85
K_mmpy <- 87600
```

Dit gedeelte van het script voegt coördinaten toe aan de dataset met corrosiesnelheden, voegt milieugegevens toe aan de dataset met corrosiesnelheden, voegt coördinaten toe aan de dataset met milieugegevens, en voert vervolgens enkele berekeningen uit op de datasets.

De functie ‘merge()’ wordt gebruikt om de dataset ‘corrosiondata’ te combineren met dataset ‘corrosiondata1’ op basis van de kolom “locatie”. Het argument ‘all.x=true’ zorgt ervoor dat alle rijen van ‘corrosiondata’ behouden blijven. Zo worden alle coördinaten toegevoegd aan de dataset ‘corrosiondata’.

Hetzelfde gebeurt in de volgende kolom: de milieugegevens worden toegevoegd aan de dataset met corrosiesnelheden. Dit gebeurt op basis van de kolommen “annotation” en “location”. Opnieuw blijven de rijen van corrosiondata2 behouden.

In de laatste kolom wordt dataset ‘corrosiondata2’ gecombineerd met dataset ‘corrosiondata1’ op basis van de kolom “annotation” in corrosiondata2 en de kolom “location” in corrosiondata1. Alle rijen van corrosiondata2 blijven behouden. De coördinaten worden toegevoegd aan de dataset ‘corrosiondata2’.

De variabelen 'surfacearea sqcm', 'density' en 'K mmpy'; respectievelijk oppervlakte in vierkante centimeter, dichtheid en K. K is een constante dimensieloze waarde in de formule voor corrosiesnelheid die ervoor zorgt dat corrosiesnelheid kan worden uitgedrukt in millimeter per jaar. De oppervlakte is gemiddeld 65 vierkante centimeter. De dichtheid is 7,85 gram per kubieke centimeter. De constante K is 87600. Verder worden onnodige kolommen verwijderd, kolommen hernoemd en gewichtsverlies wordt opnieuw berekend in gram per vierkante centimeter. Corrosiesnelheid wordt berekend met de volgende formule:

$$\text{Corrosiesnelheid} = (K \times W) / (A \times T \times D)$$

waarbij:

K constante [dimensieloos]

T tijd van blootstelling [u]

A oppervlakte [cm²]

W massaverlies [g]

D dichtheid [g/cm³]

```
#clean up the corrosion data file
corrosiondata <- corrosiondata %>%
  filter(Flagged == 0) %>%
  select(location, coupon, depth, initialweight, initialdate, finalweight1, finaldate, COR_X, COR_Y) %>%
  filter(complete.cases(.))
corrosiondata <- corrosiondata %>%
  rename(finalweight = finalweight1)
#calculate weight loss
corrosiondata <- corrosiondata %>%
  mutate(
    weight_loss_gpsqcm = (initialweight-finalweight)/surface_area_sqcm,
    exposure_time = as.numeric(difftime(finaldate, initialdate, units = "hours")),
    corrosion_rate = (K_mmpy*(initialweight-finalweight))/(surface_area_sqcm*exposure_time*density),
    start_month = month(initialdate, label = TRUE), # Extract month as an abbreviation
    completed_months = floor(exposure_time / 730), # Convert hours to completed months
    description = paste("Starting month:", start_month, "- Completed months:", completed_months)
  )
```

Vervolgens werd verder gewerkt op bewerkingen uit de dataset 'corrosiondata', om gewichtsverlies en corrosiesnelheden te berekenen. Een filter wordt toegevoegd aan de dataset. De 'pipe operator' (%>%) wordt gebruikt om de output van één functie door te geven als input aan de volgende functie, waardoor een reeks van bewerkingen eenvoudig kan worden getekend. Met behulp van de '%>%' operator of 'pipe operator' wordt de dataset gefilterd om alleen rijen te behouden waarvoor de kolom "Flagged" gelijk is aan 0. In het excel-werkblad werden data die als onbetrouwbaar beschouwd werden

aangeduid met het cijfer 1. Onbetrouwbare data zijn data waarvan er bij 3 coupons die gelijktijdig uit het water gehaald werd een grote, ongeloofwaardige afwijking was in massaverlies. Een ongeloofwaardige afwijking werd vastgesteld wanneer deze sterk afwijkt van andere sets in de data. Ook wanneer een massaverlies negatief was, werd die set buiten beschouwing gelaten voor de analyse.

Door een variatie in initiële massa van de coupons was het zeer belangrijk om een juiste classificatie aan te houden. Uit de resultaten van het massaverlies bleek dat er hier en daar fouten gemaakt zijn. Dit kan liggen aan een fout doorheen het verwerkingsproces. Coupons konden in het werkveld verwisseld of verkeerd geclassificeerd worden. Soms werd een stift gebruikt die na verloop van tijd vervaagde waardoor het niet duidelijk was van waar de coupon of set van coupons vandaan kwam. Ook later in het labo konden fouten gemaakt worden. Zo is een batch met coupons door elkaar gehaald tijdens het afwassen van het zoutzuur. Wanneer één van de drie coupons een groot verschil in massaverlies had in vergelijking met de andere twee coupons werd de ene coupon gevlagd. Bij meerdere verschillen werden alle drie de coupons gevlagd. In dit geval werden alle gevlagde datasets gefilterd uit de analyse omdat ze als onbetrouwbaar aanzien werden. Verder wordt gefilterd in de kolommen met behulp van de 'pipe operator': alleen de kolommen "location", "coupon", "depth", "initialweight", "initialdate", "finalweight1", "finaldate", "COR_X", en "COR_Y" worden behouden.

In de volgende zin wordt 'filter(complete.cases(.))' gebruikt. Hiermee worden rijen waarin ontbrekende waarden zich bevinden verwijderd.

De kolom "finalweight1" wordt hernoemd naar "finalweight"

In de volgende sectie wordt gewichtsverlies berekend. Via de mutate() functie kunnen er nieuwe kolommen toegevoegd worden aan de dataset.

Gewichtsverlies per oppervlakte-eenheid wordt berekend in gram per vierkante centimeter onder de kolom 'weight_loss_gpsqcm'.

De tijd onder water wordt berekend als tijdsverschil tussen de 'final date' en 'initial date' in uren onder de kolom 'exposure_time'.

Corrosiesnelheid wordt berekend met bovenstaande formule waarbij 'K_mmpy' de materiaalconstante is, 'initialweight' en 'finalweight' de begin- en eindgewichten zijn, 'surface_area_sqcm' het oppervlaktegebied in vierkante centimeter, en 'density' de dichtheid van het kanaal. De berekening van corrosiesnelheid wordt onder de kolom 'corrosion_rate' geplaatst.

De kolom 'start_month' haalt de maand uit de 'initial_date'.

De kolom 'completed_months' zet de 'exposure time' om van uren naar maanden.

De kolom 'description' geeft een tekstuele beschrijving van de startmaand en maand van extractie.

In dit stuk script werden corrosiegegevens verder verwerkt en voorbereid voor analyse.

```
corrosion_average <-
  corrosiondata %>%
  group_by(location, start_month, completed_months, depth, COR_X, COR_Y) %>%
  summarise(
    corrosion_weight_loss_avg_gpsqcm = mean(weight_loss_gpsqcm, na.rm=TRUE),
    corrosion_weight_loss_sd_gpsqcm = sd(weight_loss_gpsqcm, na.rm=TRUE),
    corrosion_rate_avg_mmpy = mean(corrosion_rate, na.rm=TRUE),
    corrosion_rate_sd_mmpy = sd(corrosion_rate, na.rm=TRUE)
  )
#l <- c("Annotation", "Months", "Temp_deg_C", "pH", "Conductivity_uScm", "HDO_mgperl", "ORP_mV", "Cl_mgperl", "Chl_uqperl")
#corrosion_average <- merge(corrosion_average, select(corrosiondata2,l),
#                           by.x = c("location", "Months"),
#                           by.y = c("Annotation", "Months"),
#                           all.x = TRUE, all.y =FALSE)
#write_csv(corrosion_average, "corrosion_average.csv")
```

In dit gedeelte van het script wordt een nieuwe dataset aangemaakt, met name corrosion_average. In deze dataset worden gemiddelden genomen van de gewichtsverliezen en corrosiesnelheden in de groeperingen van de drie coupons die op hetzelfde tijdstip en dezelfde locatie uit het water gehaald werden. Ook de standaardafwijking wordt berekend en relevante milieugegevens worden toegevoegd. Door een nieuwe dataset aan te maken kan men de gegevens die voor deze analyse relevant zijn uit de volledige dataset halen. Het doel is om de dataset te verkleinen tot de gegevens die nodig zijn voor de volgende stappen in het analytische proces, zoals het maken van grafieken, het uitvoeren van statistische analyses of het maken van rapporten. Uit de dataset 'corrosiondata' worden volgende variabelen gefilterd en overgezet naar 'corrosion_average': "location", "start_month", "completed_months", "depth", "COR_X" en "COR_Y".

Met behulp van de 'summarise()' functie worden gemiddelde en standaardafwijking van

corrosiesnelheden berekend.

De dataset 'corrosion_average' bevat nu gemiddelde waarden van gewichtsverlies en corrosiesnelheid en hun standaardafwijkingen voor elke groepering van coupons. De standaardafwijking wordt bepaald om een idee te krijgen van de spreiding tussen de gewichtsverliezen en corrosiesnelheden tussen de 3 coupons. Een lagere standaardafwijking betekent dat de waarden dichterbij het gemiddelde liggen. Een hogere standaardafwijking geeft aan dat de waarden meer verspreid zijn rond het gemiddelde. Doordat het hier gaat om een gemiddelde van 3 coupons die dezelfde processen doorstaan hebben kan men stellen dat een hoge standaardafwijking een fout aangeeft in het wegingsproces. De standaardafwijking wordt berekend met behulp van de 'sd()' functie. De standaardafwijking is een statistische maat die de spreiding weergeeft en geeft aan in hoeverre de waarden in een dataset gemiddeld afwijken van het gemiddelde van die dataset. De standaardafwijking van een steekproef wordt als volgt berekend:

$$\sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Het verschil van de individuele waarde in de dataset en het gemiddelde in die dataset wordt gekwadrateerd, de kwadraten worden opgeteld, de som wordt gedeeld door het aantal waarden min 1 en de vierkantswortel van het totaal wordt genomen.

4.2.2 Data plots: genereren van grafieken en modellen

Nu de datasets gegenereerd zijn, kan een grafische voorstelling gemaakt worden met het R script. Verschillende grafieken worden geplott, zoals corrosiesnelheid in functie van locatie, massaverlies in functie van de tijd en corrosiesnelheid in functie van de tijd. Erna wordt ook een modellering gemaakt. Massaverlies in functie van de tijd kan gezien worden als de eerste afgeleide van het massaverlies. De focus zal bovendien eerder liggen op massaverlies in gram per vierkante centimeter voor een ingenieur, aangezien het meet hoelang een kaaiwand bv mee kan gaan voor het volledig afbrokkelt. Het geeft een massaverlies in millimeters. Corrosiesnelheid kan gezien worden als de tweede afgeleide van massaverlies en meet het massaverlies in millimeter per jaar.

Corrosiesnelheden worden geplot in functie van maand en diepte met de 'facet wrap function'. Dit is een functie waarmee je een set van facetten of subplots kan maken op basis van één of meer variabelen in je dataset. In combinatie met de 'ggplot()' functie kunnen meerdere grafieken gemaakt worden voor elke subset van gegevens, bijvoorbeeld hier per maand.

De regressie die toegepast wordt is niet-lineair. Regressie wordt gebruikt om een afhankelijke variabele en één of meer onafhankelijke variabelen te onderzoeken en modelleren. Zo kan men waarnemen in welke mate de afhankelijke waarde verandert als de onafhankelijke waarde verandert. Bij niet-lineaire regressie wordt niet standaard uitgegaan van een rechte als verband tussen de variabelen.

In dit geval wordt exponentiële regressie gebruikt. Relaties worden gemodelleerd waarin de afhankelijke variabele exponentieel verandert ten opzichte van de onafhankelijke variabele. Een exponentieel vervalmodel wordt gebruikt om de afname van corrosiesnelheid in functie van de tijd te beschrijven. Hoe groter de vervalconstante, hoe sneller de corrosiesnelheid afneemt. Grafisch zal de curve dus sneller dalen bij een hogere vervalconstante.

Regressiemodellering wordt gebruikt om de tijdskinetiek van corrosie te schatten voor elke locatie. Zo kan een beter inzicht gecreëerd worden in de evolutie van de corrosiesnelheid per locatie. Het doel is om om een trend in corrosiesnelheid per locatie te identificeren en eventuele afwijkende gedragingen te detecteren. Deze afwijkingen kunnen wijzen op externe factoren die de corrosiesnelheid kan beïnvloeden.

Het machtsmodel is een formule waarin corrosiesnelheid afhankelijk van de blootstellingstijd gesteld wordt. Zo kan er rekening gehouden worden met veranderingen in de corrosiesnelheid als gevolg van de opbouw van een corrosieproductlaag.

Een betrouwbaarheidsinterval van 95% wordt toegepast. Dit wil zeggen dat men met 95% zekerheid kan stellen dat de geschatte zone van regressie overeenkomt met de ware regressie. Deze methode biedt een manier om trends in de gegevens te identificeren en modelleren en geeft een bepaalde onzekerheid mee over de geschatte regressielijn.

```

corrosion_average_filtered <- corrosion_average %>%
  filter(start_month == 'May')

ggplot(corrosion_average_filtered,
  aes(x=completed_months, y=corrosion_weight_loss_avg_gpsqcm,
    ymin=corrosion_weight_loss_avg_gpsqcm-corrosion_weight_loss_sd_gpsqcm, ymax=corrosion_weight_loss_avg_gpsqcm+corrosion_weight_loss_sd_gpsqcm))+
  geom_point() +
  facet_wrap(~ COR_X, labeller = label_both) +
  #geom_smooth() +
  labs(title = "massaverlies per locatie") +
  xlab("Blootstellingsperiode (maanden)") +
  ylab("Corrosie (gcm^-2)") +
  scale_y_continuous(limits = c(0, 0.1), breaks = seq(0, 0.2, by = 0.025)) +
  theme_bw() +
  theme(
    plot.title = element_text(size = 24, face = "bold"), # Change main title size
    axis.title.x = element_text(size = 20), # Change x-axis title size
    axis.title.y = element_text(size = 20) # Change y-axis title size
  )

```

Vervolgens worden grafieken gevisualiseerd per locatie op basis van massaverlies in functie van de voltooide maanden van blootstelling. De dataset 'corrosion_average' wordt gefilterd tot de gegevens van de startmaand mei. In september en december werden nieuwe coupons aan het rek gevestigd om een effect te kunnen waarnemen tussen zomer- en wintermaanden. Deze data worden dus niet mee opgenomen in deze analyse. De nieuwe dataset, genaamd 'corrosion_average_filtered', bevat de gegevens voor alle coupons die ondergedompeld werden in de maand mei. Een nieuwe ggplot wordt aangemaakt met de gefilterde dataset. De grafieken worden op dezelfde manier opgesteld als vorig voorbeeld. 'scale_y_continuous()' stelt de limieten van de y-as in op 0 en 0,2. De maatstrepen worden opgesteld in intervallen van 0,025.

```

# Generate a ggboxplot per month
ggplot(may_data, aes(x = as.character(completed_months), y = weight_loss_g)) +
  geom_boxplot() +
  labs(title = "Gewichtsverlies per voltooide maand (start maand: mei)",
    x = "Voltooide maanden",
    y = "Gewichtsverlies (g)") +
  theme_minimal()

```

Zoals eerder uitgelegd is een boxplot een grafische weergave van de verdeling van de dataset die kenmerken zoals mediaan, kwartielen en uitschieters voorstelt. Deze boxplots worden voorgesteld per meetcampagne en geven inzicht in hoe het gewichtsverlies van de coupons varieert in functie van de tijd.

Er werd gefilterd naar data voor coupons die enkel in mei zijn gestart. De x-as geeft het aantal voltooide waarden weer, de y-as het gewichtsverlies in gram.

'geom_boxplot()' voegt een boxplot toe aan de grafiek.

'labs()' voegt een titel toe aan de figuur en labelt de x- en y-as.

```

shapiro_results <- list()

for (month in 1:8) {
  month_data <- may_data %>%
    filter(completed_months == month) %>%
    pull(weight_loss_gpsqcm)

  # Perform the Shapiro-Wilk test only if the sample size is between 3 and 500
  if (length(month_data) >= 3 & length(month_data) <= 5000) {
    shapiro_results[[paste("Month", month)]] <- shapiro.test(month_data)
  } else {
    shapiro_results[[paste("Month", month)]] <- "Sample size is not within the required range (3 to 5000)"
  }
}

for (month in 1:8) {
  cat("\nShapiro-Wilk test for Month", month, ":\n")
  result <- shapiro_results[[paste("Month", month)]]
  if (is.character(result)) {
    cat(result, "\n")
  } else {
    print(result)
    # Interpret the result
    if (result$p.value > 0.05) {
      cat("The data does not deviate significantly from a normal distribution (fail to reject H0).\n")
    } else {
      cat("The data deviates significantly from a normal distribution (reject H0).\n")
    }
  }
}

```

Dit stuk code beschrijft de procedure om de Shapiro-Wilk test uit te voeren. Deze test bepaalt of het gewichtsverlies per maand significant afwijkt van een normaalverdeling. De nulhypothese voor deze test neemt aan dat de data niet normaal verdeeld is. De nulhypothese wordt geaccepteerd wanneer de p-waarde kleiner is dan 0,05. Wanneer de p-waarde groter of gelijk aan 0,05 is, wordt geconcludeerd dat er niet genoeg bewijs is dat de data geen normaalverdeling volgt.

De resultaten van deze test zijn de volgende:

Maand 1: W = 0,98218; p-waarde = 0,07079

- De data wijken niet significant af van een normaalverdeling
- H0 wordt niet verworpen; de dataset na 1 maand volgt een normaalverdeling.

Maand 2: W= 0,90131; p-waarde = 0,00000133

- De data wijken significant af van een normaalverdeling
- H0 wordt verworpen

Maand 3: W= 0,89764; p-waarde = 0,00000001796

- De data wijken significant af van een normaalverdeling

- H0 wordt verworpen

Maand 4: W= 0,94035; p-waarde = 0,00001265

- De data wijken significant af van een normaalverdeling
- H0 wordt verworpen

Maand 6: W= 0,86091; p-waarde = 0,0000000004593

- De data wijken significant af van een normaalverdeling
- H0 wordt verworpen

Maand 7: W= 0,89598; p-waarde = 0,00000001745

- De data wijken significant af van een normaalverdeling
- H0 wordt verworpen

Maand 8: W= 0,93304; p-waarde = 0,00006306

- De data wijken significant af van een normaalverdeling
- H0 wordt verworpen

Uit deze test blijkt dat, met uitzondering van maand 1, alle meetcampagnes significant afwijken van een normaalverdeling.

Voor verdere statistische analyse en modellering zal rekening gehouden moeten worden met het feit dat de metingen over het algemeen niet normaal verdeeld zijn.

Deze verdeling wordt grafisch voorgesteld met behulp van volgende code:

```
ggplot(may_data, aes(x = weight_loss_g)) +
  geom_density() +
  facet_wrap(~ completed_months) +
  labs(title = "Dichtheidskromme van waarnemingen per meetcampagne",
       x = "Gewichtsverlies (g)",
       y = "Dichtheid") +
  theme_minimal()
```

‘geom_density()’ voegt dichtheidskrommen toe aan de grafiek. Deze geven een kansdichtheidsfunctie weer van de data.

```

corrosion_average_filtered <- corrosion_average %>%
  filter(start_month == 'May')

ggplot(corrosion_average_filtered,
  aes(x=completed_months, y=corrosion_rate_avg_mmpy,
    ymin=corrosion_rate_avg_mmpy-corrosion_rate_sd_mmpy, ymax=corrosion_rate_avg_mmpy+corrosion_rate_sd_mmpy))+
  geom_point() +
  facet_wrap(~ COR_X, labeller = label_both) +
  #geom_smooth() +
  labs(title = "Corrosiesnelheid per locatie") +
  xlab("Blootstellingsperiode (maanden)") +
  ylab("Corrosiesnelheid (mm/j)") +
  scale_y_continuous(limits = c(0, 0.5), breaks = seq(0, 0.5, by = 0.05)) +
  theme_bw() +
  theme(
    plot.title = element_text(size = 24, face = "bold"), # Change main title size
    axis.title.x = element_text(size = 20), # Change x-axis title size
    axis.title.y = element_text(size = 20) # Change y-axis title size
  )

```

Dit deel van het script is gelijkaardig aan het vorige deel. Enkel wordt het massaverlies veranderd naar de corrosiesnelheid. Ook de limiet wordt mee aangepast, naar een waarde tussen 0 en 0,5 mm/j met intervallen van 0,05 mm/j.

```

may_data <- corrosiondata %>% filter(start_month == "May")
may_data <- may_data %>%
  mutate(completed_months = ifelse(completed_months == 5, 6, completed_months))

# Generate a ggboxplot per month
ggplot(may_data, aes(x = as.factor(completed_months), y = corrosion_rate)) +
  geom_boxplot() +
  labs(title = "Corrosiesnelheid per voltooide maand (start maand: mei)",
    x = "voltooide maanden",
    y = "Corrosiesnelheid (mm/j)") +
  theme_minimal()

```

Deze code is vergelijkbaar met de code gebruikt voor de boxplots gesteld voor het massaverlies per maand. In plaats van massaverlies wordt corrosiesnelheid voorgesteld.

```

modelling_dataset <- corrosiondata %>%
  filter(start_month == "May") %>%
  select(location, COR_X, COR_Y, depth, start_month, completed_months, exposure_time,
corrosion_rate)

results <- modelling_dataset %>%
  nest_by(COR_X, COR_Y) %>% # Group by coordinates
  mutate(
    model = list(try(nls(corrosion_rate ~ SSasyp(exposure_time, yf, y0, log_alpha), d
ata = data), silent = TRUE)),
    parameters = list(if ("try-error" %in% class(model)) {
      tibble(yf = NA_real_, y0 = NA_real_, log_alpha = NA_real_) # handle errors with
NA
    } else {
      as_tibble(as.list(coef(model))) # Extracting coefficients as a tibble if the mo
del runs successfully
    }
  ),
  augmented = list(
    if ("try-error" %in% class(model)) {
      tibble(exposure_time = NA_real_, corrosion_rate = NA_real_, .fitted = NA_real
_, .resid = NA_real_, yf = NA_real_) # handle errors
    } else {
      # Extract fitted data and add the asymptote coefficient
      augmented_data <- augment(model, data)
      augmented_data$yf <- coef(model)["yf"]
      augmented_data
    }
  )
) %>%
select(-data, -model) # Drop the nested data and model columns

# Now Let's separate the dataframes: one for augmented results, one for parameters
results_augmented <- results %>%
  select(COR_X, COR_Y, augmented) %>%
  unnest(cols = augmented) # Expand the augmented data

model_parameters <- results %>%
  select(COR_X, COR_Y, parameters) %>%
  unnest(cols = parameters) # Expand the parameters data

# Ensure both dataframes are ungrouped
results_augmented <- results_augmented %>% ungroup()
model_parameters <- model_parameters %>% ungroup()

# Display the results
print(model_parameters)

```

De dataset 'corrosiondata' wordt opnieuw gefilterd. Gegevens voor de maand mei worden behouden samen met de variabelen locatie, coördinaten, diepte, startmaand, aantal voltooide maanden, blootstellingstijd en corrosiesnelheid.

Vervolgens wordt de modellering gecodeerd. De gegevens worden gegroepeerd op basis van locatie ten opzichte van Terneuzen. Hier wordt naast de afstand in de lengte ook de afstand in de breedte meegenomen in de functie. Wanneer de locatie ten oosten van Terneuzen ligt is de waarde negatief, wanneer ze ten westen ligt is de waarde positief. Voor elke groep per locatie wordt een machtsmodel geschat met de nls-functie. Nls of “Non-Linear Least Squares” wordt gebruikt om de parameters van het niet-lineaire model te schatten. De nls-functie helpt het machtsmodel op de tijdskinetiek van corrosie te modelleren en de asymptotische corrosiesnelheid te schatten voor elke locatie. De asymptotische corrosiesnelheid wordt gemodelleerd met behulp van het ‘Self Starting’ asymptotisch regressie model ‘SSasyp’.

Het asymptotische model van 'SSasyp' wordt vaak gebruikt om te modelleren hoe een responsvariabele naar zijn asymptotische waarde convergeert naarmate de tijd vordert. De vorm van dit asymptotische model is:

$$y(t) \approx y_f + (y_0 - y_f) \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

Waarbij:

- $y(t)$ de corrosiesnelheid op een bepaald tijdstip is,
- y_f de asymptotische corrosiesnelheid is, (snelheid waarmee corrosie stabiliseert)
- y_0 het snijpunt met de y-as, de initiële corrosiesnelheid, is,
- Alfa de vervalconstante is, die aangeeft hoe snel de corrosiesnelheid de asymptotische waarde nadert. De SSasyp functie berekent de parameterlog_alpha, het natuurlijk logaritme van alfa.
- t de blootstellingstijd is.

Dit model wordt gebruikt om een asymptoot vast te stellen op data waarbij waarden naar een limiet neigen naarmate de tijd vordert. ‘ y_0 ’ staat voor het asymptotische beginpunt. Dit is het punt van de eerste waarneming in mei. ‘ y_f ’ is de asymptotische corrosiesnelheid. Wanneer de tijd naar oneindig gaat, gaat de corrosiesnelheid naar zijn asymptoot ‘ y_f ’. De asymptotische corrosiesnelheid wordt gebruikt om de stabiele snelheid te beschrijven waarnaar corrosie neigt in functie van de tijd. Op de asymptoot vindt corrosiesnelheid zijn evenwicht. Zo kunnen langetermijngevolgen van corrosie voorspeld worden. Ook kan de

prestatie van het laaggelegeerd koolstofstaal in verschillende omgevingen beoordeeld worden. ‘log_alpha’ of de schaalfactor geeft de snelheid aan waarmee de responsvariabele de asymptotische waarde nadert. Een grotere vervalconstante zal een snelle benadering weergeven. Dit resulteert in een steilere grafiek en betekent dat de corrosiesnelheid sneller afneemt. Een kleinere vervalconstante zorgt voor een trage benadering en een vlakkere grafiek. De grafiek zal trager naar zijn asymptoot naderen. De corrosiesnelheid neemt dus trager af. Met behulp van ‘log_alpha’ wordt de schaalfactor weergegeven in de vorm van het natuurlijke logaritme. Zo wordt de schaalfactor altijd als positief aanzien. De asymptotische functie wordt gebruikt in dit model omdat het de karakteristieken van corrosie goed weergeeft: een snelle afname in het begin, gevolgd door een geleidelijke benadering naar een constante waarde door de vorming van een beschermende corrosieproductlaag.

```
# Optionally plot the results
ggplot(results_augmented, aes(x = exposure_time, y = corrosion_rate)) +
  geom_point(aes(color = "gemeten")) +
  geom_line(aes(y = .fitted, color = "model")) +
  facet_wrap(~ COR_X + COR_Y) +
  geom_hline(aes(yintercept = yf, color = "asymptoot"), linetype = "dashed") +
  scale_color_manual(values = c("model" = "red", "gemeten" = "black", "asymptoot" = "blue")) +
  labs(title = "Corrosiesnelheid modellering per locatie",
       x = "Blootstellingsperiode (u)",
       y = "Corrosiesnelheid (mm/j)",
       color = "Legende")
```

Hier worden visuele grafieken gecreëerd van de resultaten van het regressiemodel. De werkelijke en voorspelde corrosiesnelheden worden per locatie samen weergegeven in functie van de tijd. ‘Geomhline()’ voegt een horizontale lijn toe ter hoogte van ‘yf’, de asymptotische corrosiesnelheid.

```
write.csv(model_parameters, "gilles.csv", row.names = FALSE)
# Plotting the fitted model
ggplot(results_augmented, aes(x = exposure_time, y = corrosion_rate)) +
  geom_point(aes(color = "gemeten")) +
  geom_line(aes(y = .fitted, color = "model")) +
  facet_wrap(~ group) +
  geom_hline(aes(yintercept = yf, color = "asymptoot"), linetype = "dashed") +
  scale_color_manual(values = c("model" = "red", "gemeten" = "black", "asymptoot" = "blue")) +
  labs(title = "Corrosiesnelheid modellering per zone",
       x = "Blootstellingsperiode (u)",
       y = "Corrosiesnelheid (mm/j)",
       color = "Legende")
```

De startcode voor modellering per zone is gelijkaardig aan de code gemaakt voor de modellering per locatie. Het enige verschil is dat in plaats van de modelparameters per locatie, de modelparameters per zone gebruikt worden. De modelparameters per zone worden samengevat in Tabel 3. Deze tabel wordt door de code gegenereerd en geëxporteerd naar een csv- bestand voorgesteld als “gilles.csv”. Hierna worden deze

parameters geplot in een model. De x-as wordt voorgesteld als blootstellingstijd van de coupon in het water. De y-as wordt voorgesteld als corrosiesnelheid. De gemeten corrosiesnelheid wordt per meetpunt voorgesteld als een zwarte bol. De gemodelleerde corrosiesnelheid wordt voorgesteld als een rode lijn. De asymptotische waarde 'yf' wordt voorgesteld als een blauwe stippellijn. Afzonderlijke subplots worden gegenereerd per zone of 'group'.

Tabel 3 Yf, y0, log_alpha waarden per zone

Bron: eigen werk

group	yf	y0	log_alpha
-1925	4,10855E+14	4,15582E+14	-8,70059E+14
1264	1,29797E+14	1,73188E+14	-6,1226E+14
5929	1,53062E+13	2,99132E+14	-5,84909E+13
11186	1,49565E+14	1,1467E+14	-6,43375E+14
15872	1,37004E+13	2,75396E+14	-5,9018E+14
19757	1,2904E+14	1,08412E+14	-6,33581E+14
21664	1,10255E+14	7,94062E+14	-6,84832E+14
24152	1,00873E+14	5,49471E+14	-7,05483E+14
25867	1,07529E+14	6,57998E+14	-7,06555E+13
27593	7,02471E+13	6,19306E+14	-6,87603E+14
28546	7,27497E+14	5,07149E+14	-7,47263E+14

```
# Plotting residuals for each group
ggplot(results_augmented, aes(x = exposure_time, y = .resid)) +
  geom_point() +
  facet_wrap(~ group) +
  labs(title = "Restwaarden", x = "Blootstellingsperiode", y = "Restwaarden") +
  theme_bw()
```

Verder in de code worden de restwaarden of 'residuals' van de modellering geplot. De dataset 'results_augmented', die de resultaten van de modellering bevat wordt gebruikt. Op de x-as wordt de blootstellingsperiode van de coupons voorgesteld. Op de y-as worden de restwaarden voorgesteld. Per zone wordt een grafiek voorgesteld. De restwaarden worden geplot als zwarte bollen.

```
ggplot(results_augmented, aes(sample = .resid)) +
  stat_qq() +
  stat_qq_line() +
  facet_wrap(~ group) +
  labs(title = "QQ plot", x = "Theoretische kwantielen", y = "gemeten kwantielen") +
  theme_minimal()
```

Dit stuk genereert QQ-plots of 'Quantile-Quantile' plots voor de restwaarden van het model. Het 'ggplot' specificeert de dataset en dat de restwaarden moeten worden gebruikt als steekproefwaarden voor de QQ-plot. 'stat_qq()' voegt de QQ-plot toe aan de

grafiek. Hier kan later een vergelijking gemaakt worden tussen de restwaardes en de waardes van een theoretisch normale verdeling. 'stat_qq_line()' voegt een referentielijn toe van een theoretisch normale verdeling. De grafiek wordt verdeeld per zone of 'group' met behulp van de 'facet_wrap()' functie. 'labs()' voegt labels toe. Op de x-as worden de theoretische kwantielen weergegeven, op de y-as de gemeten kwantielen.

```
# Plotting Log_alpha per Location
ggplot(model_parameters %>%
  filter(group > 0) %>%
  group_by(group) %>%
  summarize(log_alpha = unique(log_alpha), .groups = 'drop'),
  aes(x = group, y = log_alpha)) +
  geom_point() +
  #geom_smooth() +
  labs(title = "Corrosie vertraging, verkregen van het model", x = "Locatie in m tov Terneuzen", y = "log_alpha") +
  theme_minimal()
```

Deze code gaat verder met het genereren van een spreidingsdiagram van de schaalfactor of vervalconstante voor elke zone. De group > 0 filter zorgt ervoor dat de zone op de Westerschelde buiten beschouwing gelaten wordt voor deze grafiek. Verder berekent de 'summarize()' functie een vervalconstante per zone. In totaal worden 10 punten op de grafiek uitgestippeld, 1 per zone (met uitzondering van de zone 'Westerschelde').

```
# Plotting yf per Location
ggplot(results_augmented %>%
  filter(group > 0) %>%
  group_by(group) %>%
  summarize(yf = unique(yf), .groups = 'drop'),
  aes(x = group, y = yf)) +
  geom_point() +
  #geom_smooth() +
  labs(title = "Asymptoot, gegenereerd door model", x = "Locatie tov Terneuzen in m", y = "yf parameter (mm/j)") +
  theme_minimal()
```

In het laatste stuk code wordt een spreidingsdiagram gemaakt van de asymptotische waarde 'yf' per zone of 'group'. Zo kan de corrosiesnelheid op lange termijn gevisualiseerd worden. De group > 0 filter filtert opnieuw de zone van referentie, de Westerschelde, uit het spreidingsdiagram. Een 'yf' waarde per zone wordt berekend. Punten en titels worden toegevoegd. De x-as stelt de locatie tegenover Terneuzen voor, de y-as stelt de 'yf' parameter in millimeter per jaar voor.

5 Resultaten

5.1 Vooronderzoek

In 2021 werd een vooronderzoek gestart naar de aanwezigheid van bacteriën die bekend staan deel uit te maken van microbieel geïnduceerde corrosie. Allereerst werden de tuberkels die waargenomen werden op vaartuigen situerend in de jachthaven van Zelzate onderzocht. Dit werd via DNA-analyse gedaan. Het DNA werd gesequenced voor het bepalen van de OTU waartoe de waargenomen cellen behoren. OTU staat voor Operational Taxonomic Unit, deze methode identificeert en classificeert bijvoorbeeld bacteriën op basis van sequentiegegevens van het 16S ribosomaal RNA-gen. Zo kan het gemakkelijker een onderscheid maken tussen verschillende genera over een bepaalde koepel (bacteriën). Uit het resultaat bleek dat $\frac{3}{4}$ van de bacteriën die aanwezig waren in de tuberkel (of *rusticle*) van de genera *Gallionella* en *Rhodanobacter* waren. Verder werd er ook getest op waterstalen. Hier werd de aanwezigheid van sulfaat reducerende en ijzer reducerende bacteriën getest. Stalen plaatjes werden voor een drietal dagen in het water gehangen om het proces te kunnen opvolgen. Na drie dagen werd vastgesteld dat er zich bacteriële gemeenschappen hadden ontwikkeld op deze plaatjes, waaronder bacteriën van het genus *Gallionella*. Ten laatste werd een versnelde corrosieproef uitgevoerd. Hieruit bleek dat op een zeer korte tijd vele zeer kleine putjes ontstonden in het staal.

5.2 Eigen resultaten

5.2.1 Massaverlies en corrosiesnelheid

5.2.1.1 Massaverlies per locatie en maand

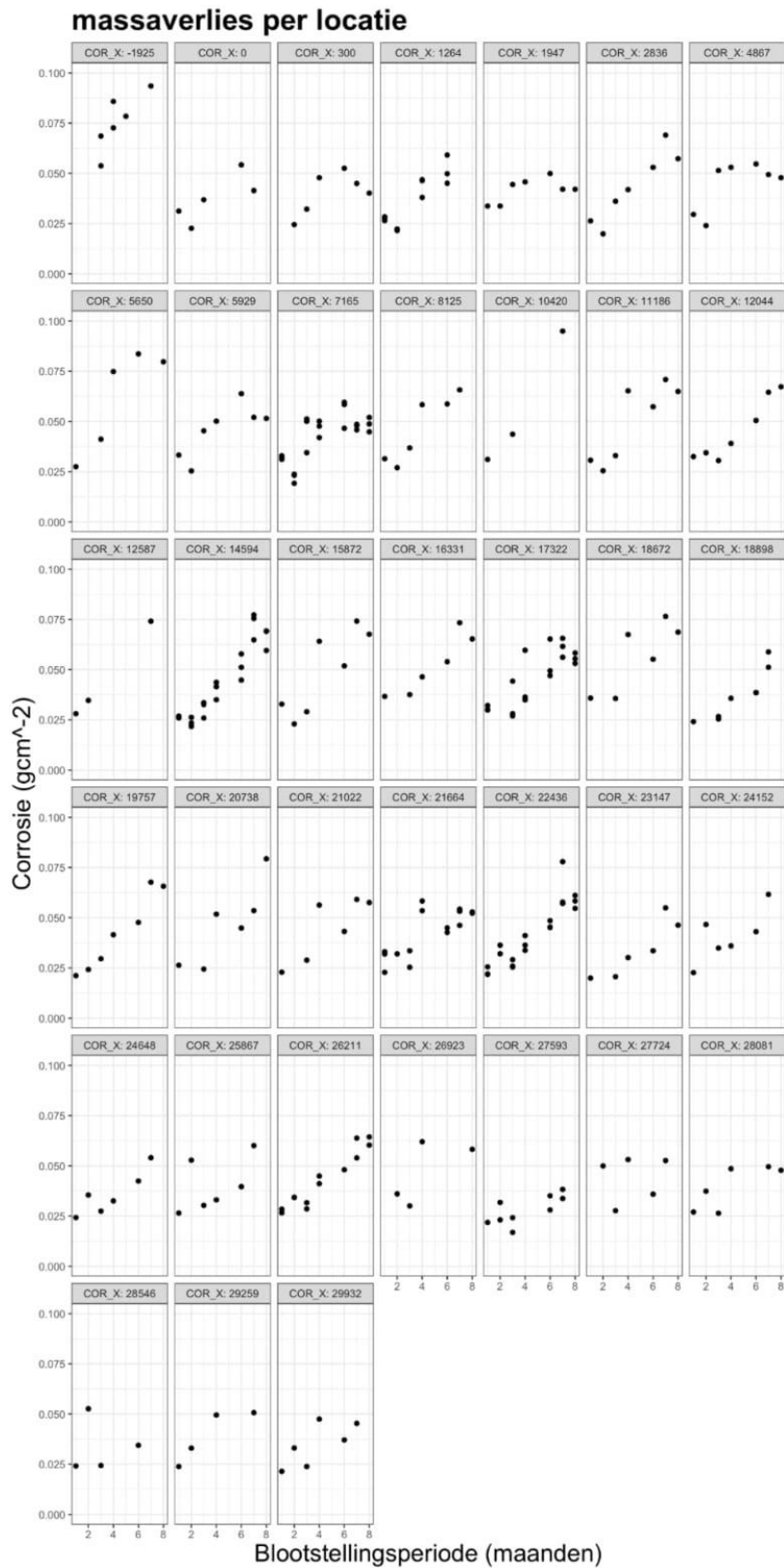
Figuur 18 geeft de ruwe data van het onderzoek weer. De figuur toont het massaverlies per locatie over verschillende blootstellingsperiodes (in maanden). Elke facet vertegenwoordigt een verschillende locatie (COR_X waarde), waarbij de y-as het massaverlies (g/cm^2) en de x-as de blootstellingsperiode in maanden weergeeft. De locaties werden visueel voorgesteld in Figuur 1. Het gemiddelde massaverlies van elke set coupons wordt grafisch weergegeven met een zwarte bol.

Over het algemeen kan gesteld worden dat er aanzienlijke variatie te zien is tussen de verschillende locaties. Deze variatie kan moeilijk gelinkt worden aan de geografie van het kanaal.

Op bepaalde locaties zou een lineaire toename van het massaverlies te zien kunnen zijn, zoals de locaties 0 en 2836 meter van Terneuzen. Op andere locaties lijkt het alsof het massaverlies fluctueert, zoals de locaties 4867 en 14594 meter van Terneuzen.

In de eerste grafiek, op -1925 meter van Terneuzen, wordt opgemerkt dat het massaverlies hogere proporties aanneemt dan de andere locaties, vooral in de eerste meetcampagnes. Dit kan te wijten zijn aan een verschil in zoutgehalte binnen en buiten het kanaal. Deze locatie bevindt zich namelijk als enige in het zoutere water van de Westerschelde.

Op het merendeel van de locaties ligt het massaverlies op 0,025 gram per vierkante centimeter bij de eerste meetcampagne. Verder kan een trend waargenomen worden waarin het massaverlies een zwakkere stijging maakt naarmate men meer richting Gent kijkt. Met uitzondering van enkele uitschieters ligt het massaverlies tussen de 0,075 gram per vierkante centimeter aan de kant van Terneuzen en de 0,05 gram per vierkante centimeter aan de kant van Gent na 8 maanden.



Figuur 18 Massaverlies in functie van de tijd per locatie

Bron: eigen werk

5.2.1.2 *Boxplots van massaverlies per maand*

Figuur 19 toont de boxplots van de verzamelde data per maand, waarbij het gewichtsverlies van de coupons over verschillende meetcampagnes wordt gevisualiseerd.

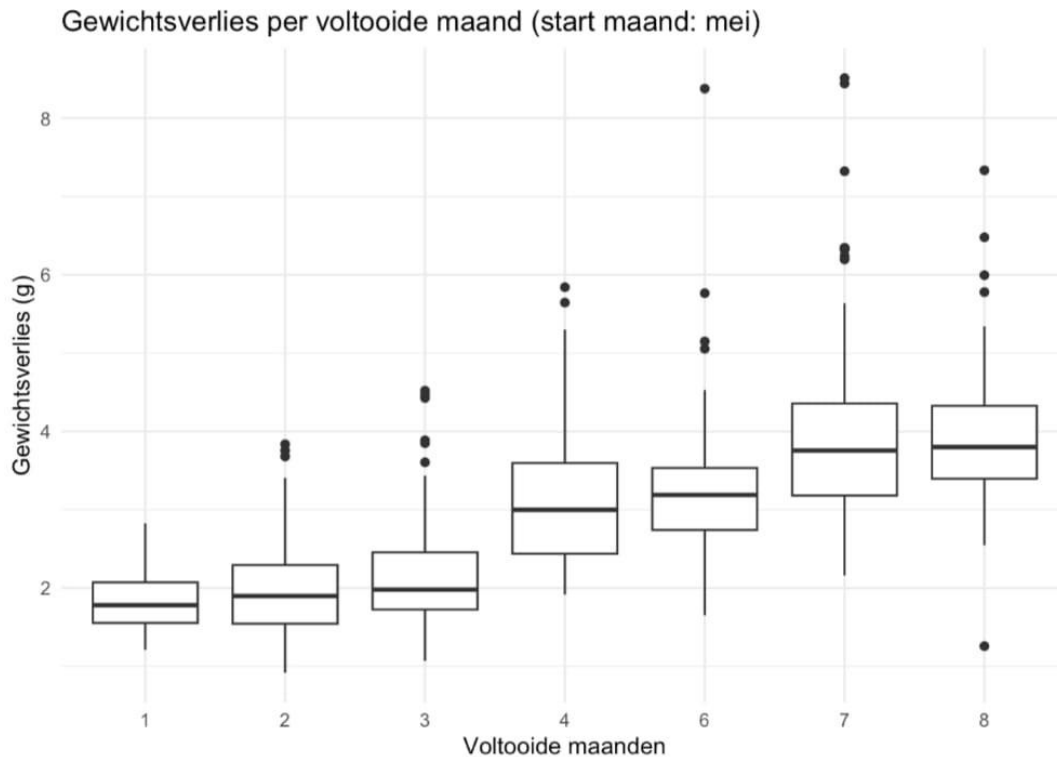
De dikke lijn in de box geeft de mediaan van het gewichtsverlies aan voor elke meetcampagne. Er is een lichte stijging te zien in het gewichtsverlies tussen meetcampagne 1 en 3. Tussen meetcampagne 3 en 4 wordt een aanzienlijke sprong waargenomen, waarna het gewichtsverlies weer licht stijgt richting meetcampagne 5. Tussen meetcampagne 5 en 6 is er opnieuw een sprong in het gewichtsverlies, terwijl de mediaan tussen meetcampagne 6 en 7 gelijk blijft.

Naarmate de tijd vordert, wordt de spreiding binnen de box groter, wat wijst op een toenemende variatie in massaverlies tussen de coupons per meetcampagne. Vooral in maand 4 en 7 is deze variatie opvallend groter, waarvoor momenteel geen verklaring kan worden gegeven.

Er wordt opgemerkt dat er meer en meer uitschieters tevoorschijn komen naarmate de tijd verstrijkt. Vanaf maand 6 gaan deze uitschieters zich steeds verder van de mediaan bevinden. Verder wordt opgemerkt dat uitschieters zich vooral bevinden aan de bovenkant van de boxplot. Dit betekent dat vooral abnormaal hogere massaverliezen aanwezig zijn.

Er wordt opgemerkt dat de verdeling of afwijking groter wordt in functie van de tijd. Een grotere sprong wordt gemaakt tussen meetcampagne 3 en 4.

De algemene toename van variatie in massaverlies kan verklaard worden door het feit dat massaverlies een cumulatieve meting is. Het meet namelijk de hoeveelheid materiaal die verloren is gegaan door corrosie over een bepaalde periode. Naarmate de tijd zullen kleine variaties in de corrosiesnelheid tussen verschillende meetlocaties cumulatief groter worden. Deze variaties zullen dus meer optellen, wat resulteert in een grotere spreiding van het massaverlies. Ook kan deze variatie suggereren dat er factoren zoals variaties in omgevingsparameters een invloed hebben, die met de tijd meer uitgesproken wordt.



Figuur 19 Boxplots van massaverlies per maand

Bron: eigen werk

5.2.1.3 Dichtheidskromme per maand: resultaat uit Shapiro-Wilk test

Figuur 20 toont de dichtheidskrommen van het gewichtsverlies van de coupons per meetcampagne. Deze grafieken geven de verdeling van het gewichtsverlies weer voor elke blootstellingsperiode, met de dichtheid op de y-as en het gewichtsverlies in gram op de x-as.

De figuur laat zien dat de verdeling van het gewichtsverlies per meetcampagne meer naar rechts verschuift naarmate de tijd vordert. Dit betekent dat er meer gewichtsverlies voorkomt naarmate de blootstellingstijd toeneemt, wat een verwachte trend is bij corrosie.

Daarnaast wordt de curve platter en breder over de tijd. Dit duidt op een toename in spreiding of variabiliteit in het massaverlies tussen de verschillende metingen. Naarmate de tijd vordert, vertoont de verdeling een grotere variabiliteit, wat aangeeft dat het massaverlies doorheen het kanaal waarschijnlijk niet uniform is. Deze waarnemingen

suggereren dat lokale omstandigheden een grotere rol spelen in de mate van corrosie naarmate de blootstellingstijd langer wordt.

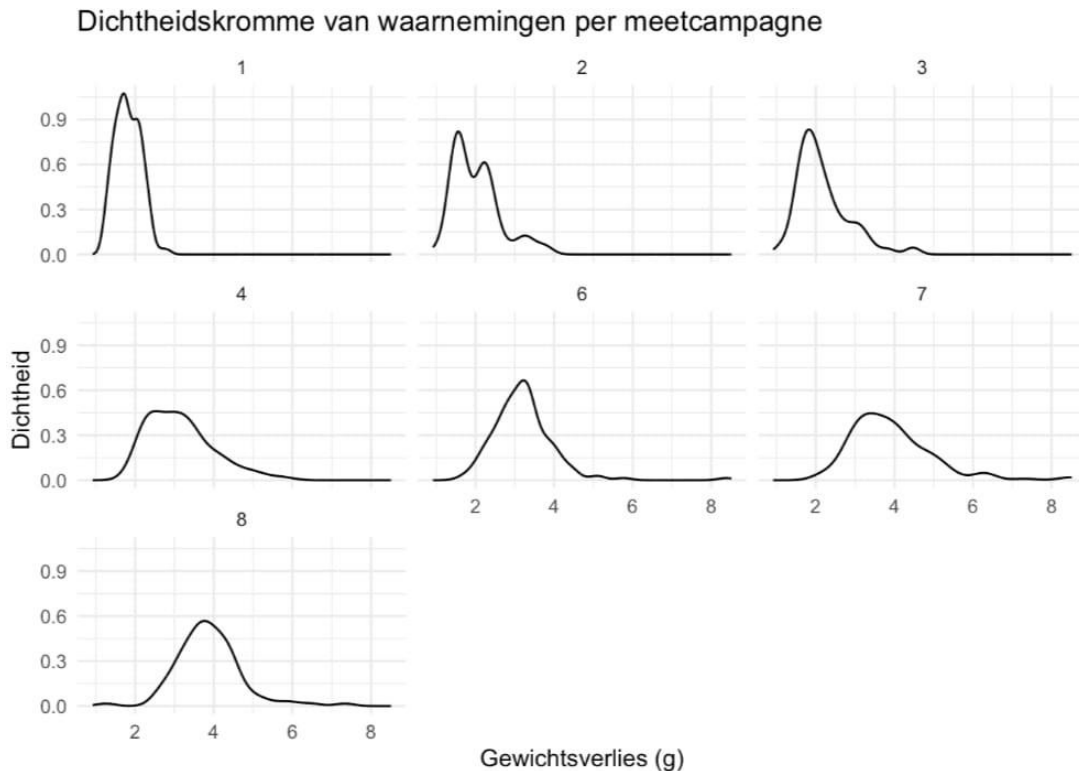
Voor de eerste maand is de verdeling scherp. Ze piekt bij een laag gewichtsverlies, wat wijst op een relatief uniform beginstadium van corrosie over alle meetlocaties. Zoals eerder opgemerkt uit het resultaat van de Shapiro-Wilk test is deze meetcampagne de enige die als een normaalverdeling beschouwd kan worden.

Voor de tweede en derde maand verschuiven de pieken iets meer naar rechts, wat een toename in gewichtsverlies aangeeft. Ook beginnen de curves iets breder te worden, wat wijst op een lichte toename in variabiliteit.

Voor de vierde maand wordt een verdere verschuiving naar rechts opgemerkt met een lagere, bredere piek. Dit suggereert dat er een grotere variatie in gewichtsverlies is.

Voor de opvolgende maanden blijft de verdeling naar rechts opschuiven. Voor maand zes en zeven een bredere spreiding. De verdeling op maand acht, blijft breed.

De toenemende breedte van de verdeling suggereert een groeiende variabiliteit in het massaverlies. Dit kan wijzen op een corrosie over het kanaal die niet uniform reageert. Mogelijke verklaringen zijn variaties in lokale omgevingsomstandigheden, biologische factoren of fouten in de meting.



Figuur 20 Verdeling van observaties per meetcampagne

Bron: eigen werk

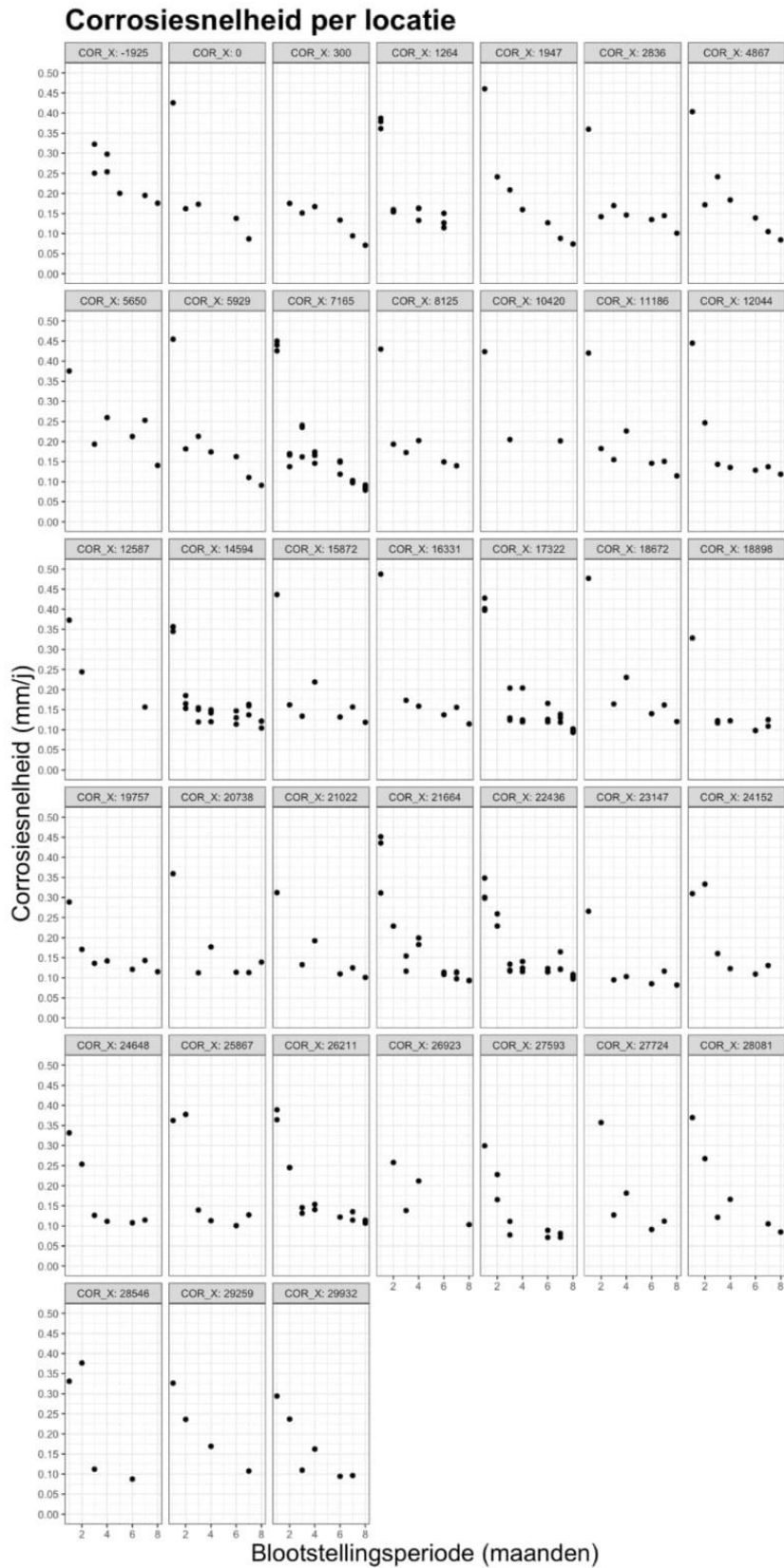
5.2.1.4 Corrosiesnelheid per locatie en maand

Wanneer massaverlies op zichzelf bekeken wordt doet zich het probleem voor dat niet elke meetcampagne op gelijke tijdsintervallen uitgevoerd werden. De meetcampagne zelf duurde drie tot vier dagen en werd niet elke maand op hetzelfde tijdsinterval uitgevoerd. Tussen meetcampagne 4 en 5 is er een tijdsinterval van anderhalve maand terwijl dat voor de andere meetcampagnes telkens één maand is. In deze sectie wordt tijd geïntegreerd als een factor binnenin de dataverwerking.

Figuur 21 toont de spreidingsgrafiek van de corrosiesnelheid per locatie in functie van de tijd (in maanden). Elk facet vertegenwoordigt een verschillende locatie ('COR_X' waarde), waarbij de y-as de corrosiesnelheid in millimeter per jaar weergeeft, en de x-as de blootstellingsperiode in maanden weergeeft.

Over het algemeen lijkt de corrosiesnelheid in de meeste locaties af te nemen naarmate de blootstellingstijd toeneemt. Dit kan wijzen op een initiële fase van snelle corrosie, gevolgd door een afname in snelheid die uiteindelijk zal leiden tot stabilisatie. De hogere corrosiesnelheid kan wijzen op de aanwezigheid van reactieve oppervlakken die snel corroderen bij aanvang van de blootstelling. De afname kan verklaard worden door de vorming van een beschermende laag van corrosieproducten op het metaaloppervlak. Wanneer deze beschermende laag stabiel blijft, zal ook een stabilisatie van corrosiesnelheid eerder voorkomen.

Er is variatie in de corrosiesnelheid tussen verschillende locaties. Sommige locaties vertonen een hoge initiële corrosiesnelheid die snel afneemt, zoals de locatie 1925 meter ten noorden van Terneuzen en de locatie 5650 meter ten zuiden van Terneuzen. Andere locaties zoals Terneuzen en de locatie 300 meter ten zuiden van Terneuzen tonen een meer gestage afname. Nog andere locaties vertonen een relatief consistente corrosiesnelheid na de tweede meetcampagne, met weinig variatie. Voorbeelden hiervan zijn de locaties 2836 en 14594 meter ten zuiden van Terneuzen. Dit zou kunnen wijzen op stabiele omgevingscondities die de corrosiesnelheid niet significant beïnvloeden over de tijd. Locaties zoals deze 1947 en 4867 meter ten zuiden van Terneuzen geven dan weer een meer lineaire vorm weer.



Figuur 21 Corrosiesnelheid in functie van de tijd per locatie

Bron: eigen werk

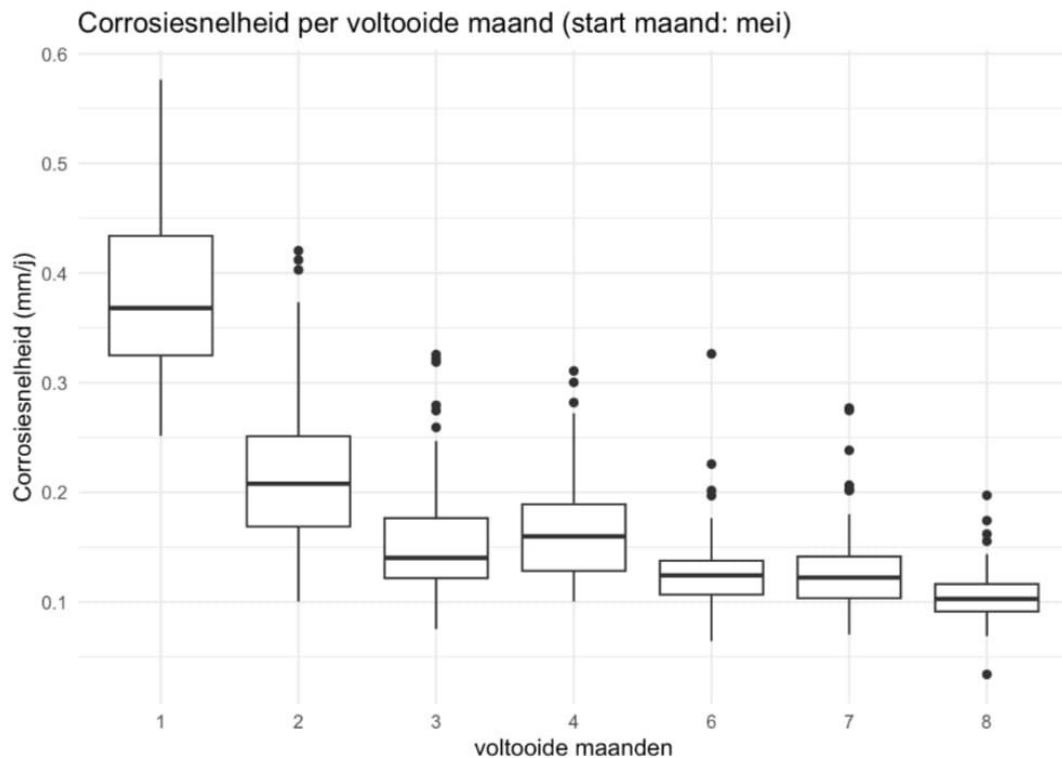
5.2.1.5 *Boxplots van corrosiesnelheid per maand*

Figuur 22 toont de boxplots van de verzamelde data per maand, waarbij de corrosiesnelheid van de coupons over verschillende meetcampagnes wordt gevisualiseerd. Voor de mediaan is een grote daling te zien in corrosiesnelheid tussen meetcampagne 1 en 2. Tussen meetcampagne 2 en 3 daalt de mediaan verder, waarna het weer licht stijgt op meetcampagne 4. Tussen meetcampagne 4 en 5 is er opnieuw een daling in de corrosiesnelheid, terwijl de mediaan tussen meetcampagne 5 en 6 gelijk blijft. Tussen meetcampagne 6 en 7 wordt opnieuw een lichte daling opgemerkt. Over het algemeen daalt de mediaan van corrosiesnelheid sterk tussen campagne 1 en 2, waarna deze licht verder daalt en stabiliseert richting het einde.

In tegenstelling tot Figuur 19 neemt de spreiding af naarmate de tijd vordert, wat wijst op een afnemende variatie in corrosiesnelheid tussen de coupons per meetcampagne. Dit kan verklaard worden door het feit dat corrosiesnelheid in de initiële fase (fase 0) een sneller massaverlies bekommt door de aanwezigheid van reactieve oppervlakken. Nadat een beschermende laag zich gezet heeft op het metaaloppervlak stabiliseert de corrosiesnelheid. Ook is het proces van corrosie sterk afhankelijk van zijn omgeving in de initiële fase. Dit zorgt voor een grotere variatie in corrosiesnelheden. De initiële variabiliteit geeft blijk van verschillende initiële condities op het kanaal.

Er wordt opgemerkt er vanaf maand 2 consistent uitschieters aanwezig zijn aan de bovenkant van de boxplot. Dit betekent dat vooral abnormaal hogere corrosiesnelheden dan de mediaan aanwezig zijn.

In Figuur 22 wordt de data in boxplots gegeven en wordt de factor locatie uitgefilterd. De corrosiesnelheid valt overal tussen de 0,3 en 0,45 millimeter per jaar in de eerste meetcampagne. Na 2 maanden, op de tweede meetcampagne in juli zakt de corrosiesnelheid over het algemeen tussen 0,15 en 0,25 millimeter per jaar. Enkele uitschieters blijven op een niveau van 0,4 millimeter per jaar hangen. Er is een duidelijke daling van corrosiesnelheid in functie van de tijd. Na 8 maanden ligt de gemiddelde corrosiesnelheid rond 0,1 millimeter per jaar.



Figuur 22 Boxplots van corrosiesnelheid per meetcampagne

Bron: eigen werk

De afname in variatie van de corrosiesnelheid in functie van de tijd kan worden verklaard door het beschreven gedrag van corrosie. De consistente aanwezigheid van uitschieters kan echter moeilijker verklaard worden, maar zou kunnen wijzen op lokale variaties in omgevingscondities of specifieke gebeurtenissen die de corrosiesnelheid tijdelijk verhogen.

5.2.2 Modelleren

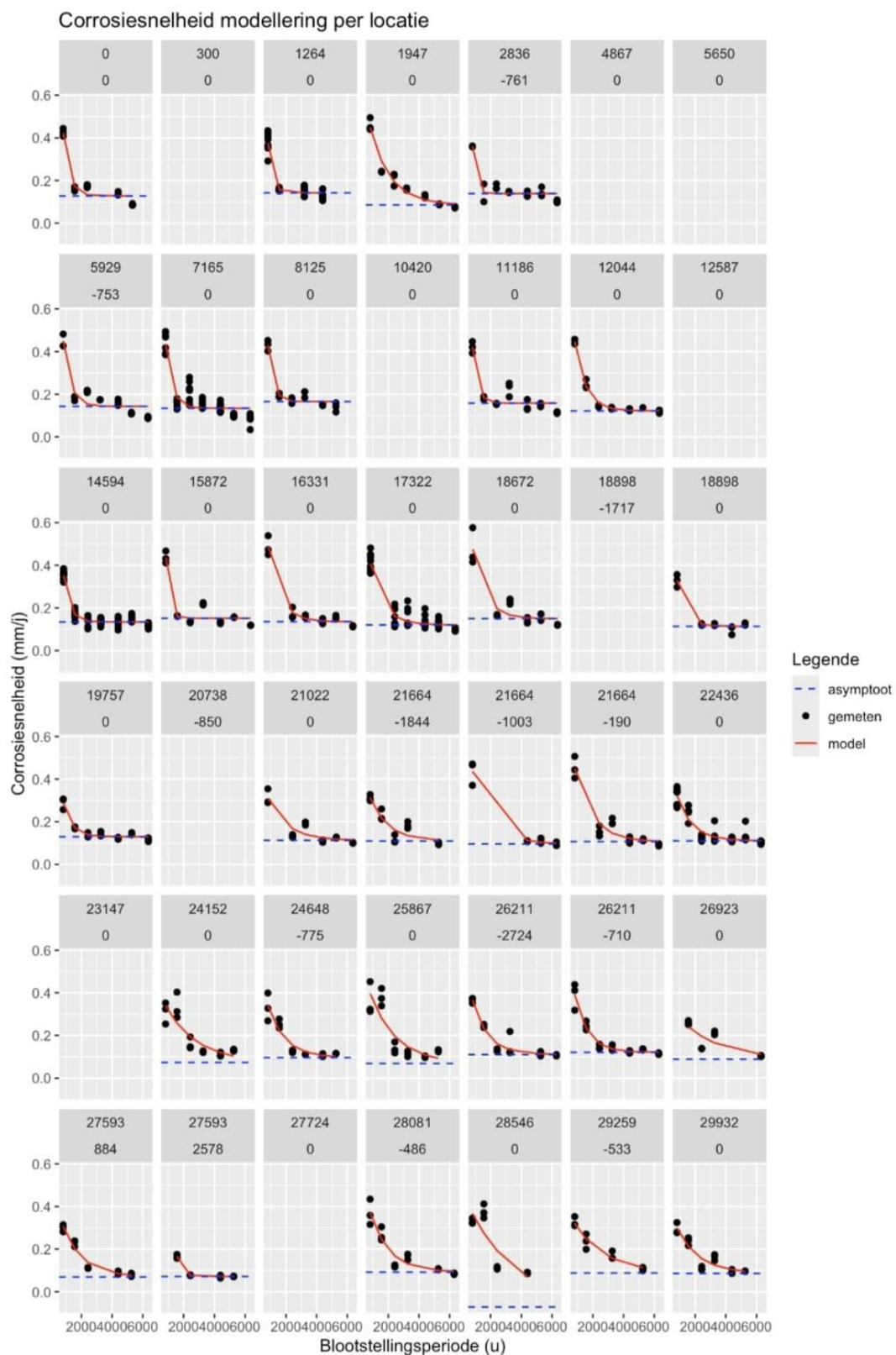
In de analyse wordt exponentiële regressie gebruikt om de afname van corrosiesnelheid te visualiseren in functie van locatie. Gegevens worden gemodelleerd per locatie en zone en asymptoot verval modellen, en vertragsingsparameter modellen worden toegepast.

5.2.2.1 Modelleren per locatie

Bij de modellering volgens nls-functie `nls(corrosion_rate ~ SSasyp(exposure_time, yf, y0, log_alpha), data = data)` komen de volgende resultaten tevoorschijn. Figuur 23 toont

de corrosiesnelheid in functie van de tijd per locatie. De zwarte bollen zijn de observaties per locatie. De nls-functie beschrijft de rode lijn. De blauwe stippellijn beschrijft de asymptoot van de functie. De asymptoot, zoals eerder vermeld, beschrijft een constante corrosiesnelheid in functie van de tijd. Het is een voorspelling van waar de corrosiesnelheid naartoe gaat.

Er kan worden opgemerkt dat de asymptoot op elke locatie tussen de 0,1 en 0,2 millimeter per jaar ligt. Op bepaalde locaties waren te weinig observaties gemaakt om een geldig model te kunnen uitrekenen. Dit geeft aan dat het model niet veel datapunten over heeft ten opzichte van het aantal vereiste datapunten om een model op te maken. Om het probleem met het kleine aantal datapunten aan te pakken, werd de beslissing gemaakt om de locaties te clusteren in zones. Deze zones werden opgedeeld op basis van geografie en industriële zone. Dit zorgt voor een hoger aantal datapunten om het model op te trainen.



Figuur 23 Modellering van corrosiesnelheid per locatie

Bron: eigen werk

5.2.2.2 *Modellering per zone*

Voor de modellering per zone verloopt het model hetzelfde, enkel worden de locaties per zone (group) gegroepeerd. De waarden per zone worden in Tabel 3 weergegeven. In totaal werden 11 zones gekozen. Zie Tabel 2.

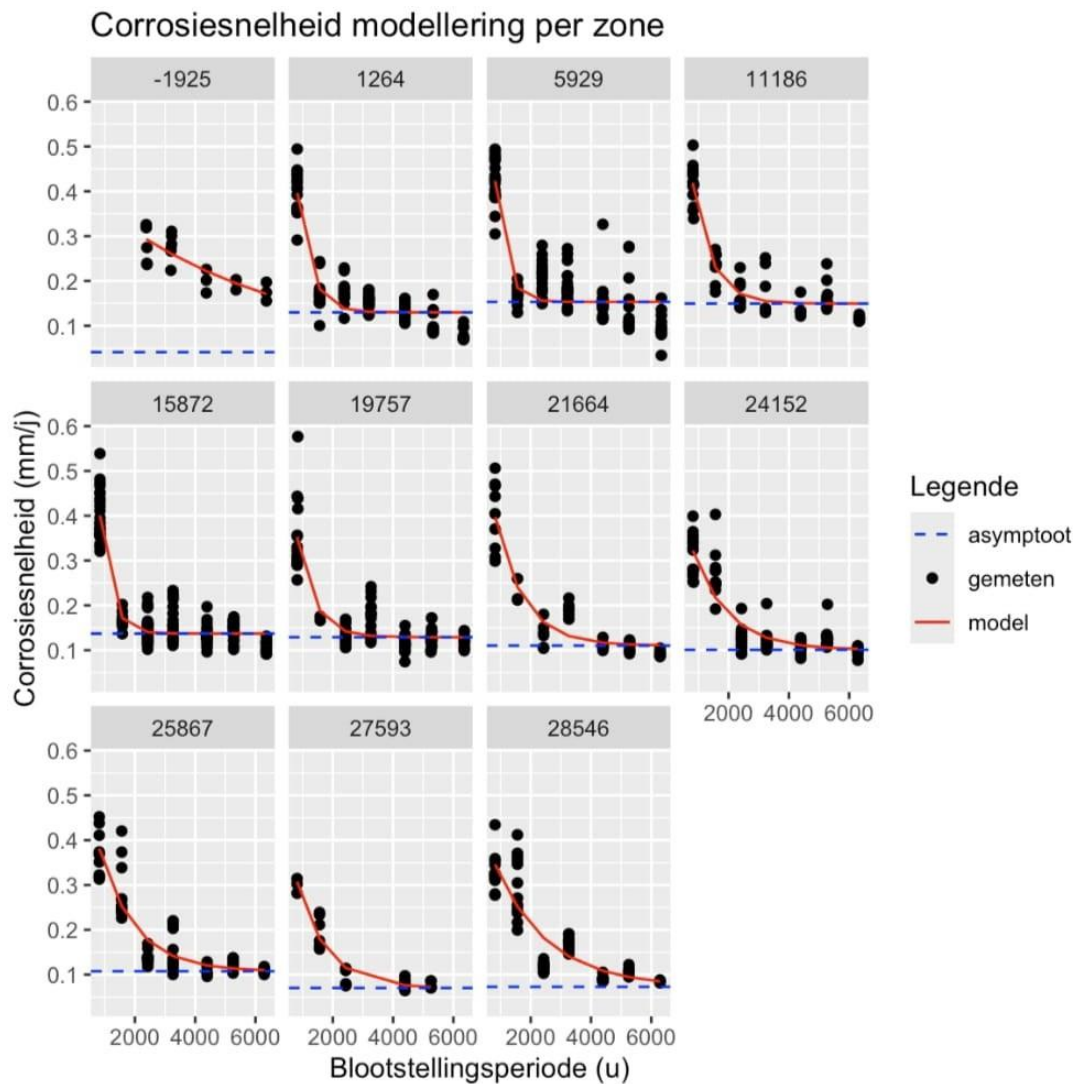
De modellering met de nls-functie (niet-lineaire regressie) geeft inzicht in de dynamiek van de corrosiesnelheid over verschillende zones langs het kanaal van Terneuzen naar Gent. De zones worden chronologisch gepresenteerd, van de Westerschelde tot de binnenwateren van Gent.

Figuur 24 toont de gemeten corrosiesnelheid (zwarte bollen) en het gemodelleerde verval (rode lijn) per zone, met de asymptotische waarde (blauwe stippellijn). Elk facet vertegenwoordigt een verschillende zone langs het kanaal van Terneuzen naar Gent, waarbij de x-as de blootstellingsperiode in uren, en de y-as de corrosiesnelheid in millimeter per jaar weergeeft.

Er wordt een schijnbaar duidelijk verschil waargenomen tussen de zones op het kanaal en de zone van de Westerschelde. Dit kan ook liggen aan het feit dat er geen data is voor de eerste meetcampagne op de Westerschelde (COR_X: -1925). Anderzijds hebben de meetpunten ook een hogere corrosiesnelheidswaarde. In de zones Terneuzen (COR_X: 1264), Sluiskil (COR_X: 5929), Sas van Gent (COR_X: 11186) en Zelzate (COR_X: 19757) wordt een steilere curve opgemerkt. Dit suggereert dat er een grotere vervalconstante is en betekent dat er een snellere vertraging van corrosiesnelheid zou ontstaan in deze zones. Dit zou kunnen wijzen op een snelle vorming van een beschermende laag die verder corrosie vertraagt.

Vanaf de zone Moervaart tot de binnenwateren van Gent wordt een meer geleidelijke afname van de corrosiesnelheid vertoond. Dit kan volgens het model wijzen op een lagere vervalconstante, wat zou kunnen betekenen dat de vertraging van de corrosiesnelheid trager verloopt.

Over het algemeen daalt de asymptoot ook van Terneuzen naar Gent van 0,15 mm per jaar rond Terneuzen tot 0,1 mm per jaar richting Gent. In de binnenwateren van Gent en rond het Grootdok daalt de asymptoot tot onder 0,1 millimeter per jaar.



Figuur 24 Modellering van corrosiesnelheid per zone

Bron: eigen werk

5.2.2.3 Restwaarden per zone

Restwaarden, of 'residuals', stellen het verschil voor tussen de gemeten corrosiesnelheden en de corrosiesnelheden die door het exponentiële regressiemodel (nls model) zijn voorspeld. De restwaarde = Waargenomen waarde – voorspelde waarde

De restwaarden worden voorgesteld in Figuur 25. De restwaarden worden, net zoals de waargenomen waarde en model waarde, voorgesteld in millimeter per jaar. Het plotten

van deze restwaarden helpt bij het beoordelen van zowel de kwaliteit als de validiteit van het model.

Deze beoordeling wordt geanalyseerd door naar enkele aspecten in de grafiek te kijken.

Ten eerste wordt gekeken naar de random verdeling. Als de restwaarden gelijkmatig verdeeld zijn rond de horizontale as (waar $Y = 0$), kan gesteld worden dat het model een goede fit is voor de data.

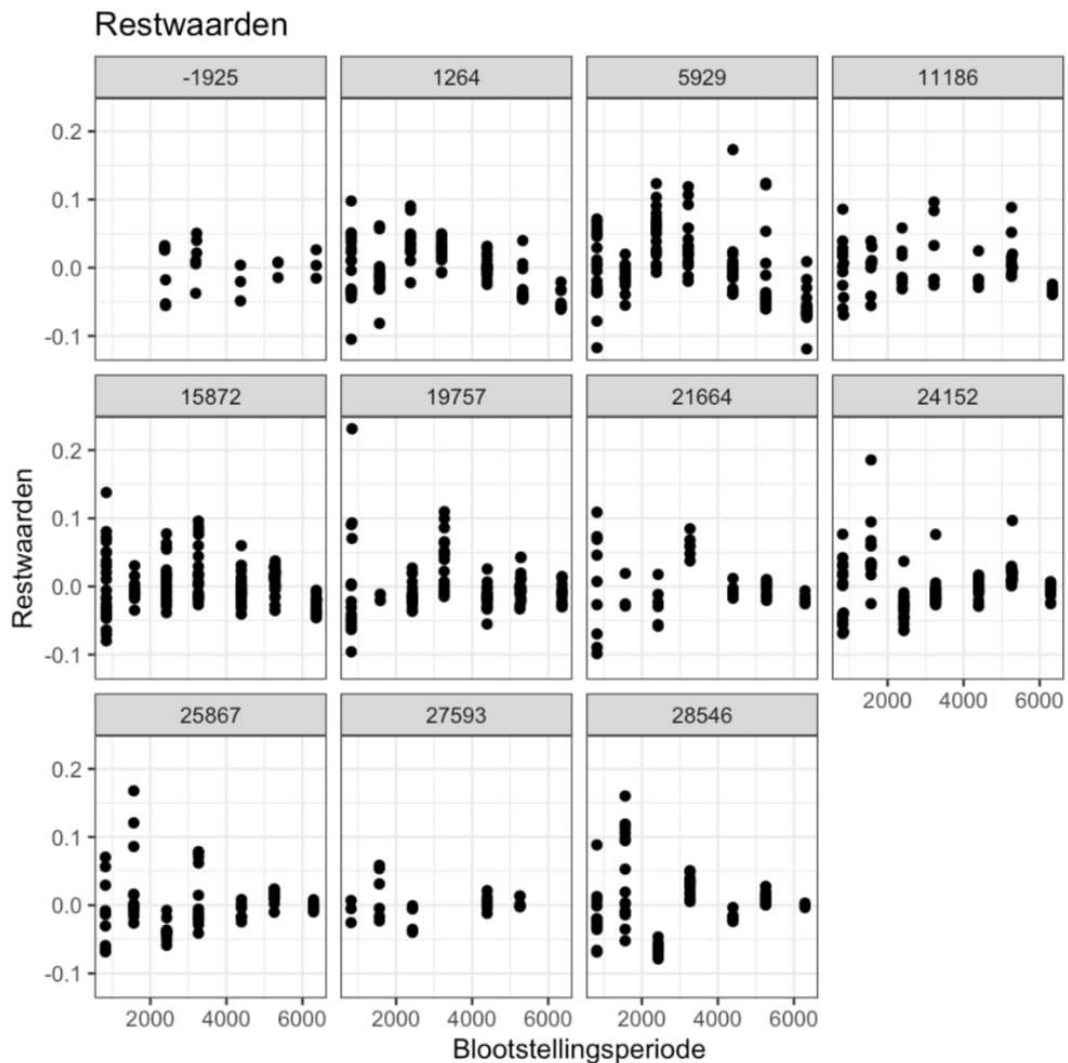
Ten tweede worden systematische patronen onderzocht. Als er patronen, zoals trends of clustering, zijn in de restwaarden, zou dit kunnen wijzen op een verkeerde specificatie van het model, een ontbreking van variabelen, of effecten die niet goed zijn gemodelleerd.

Ten laatste wordt gekeken of de spreiding van de restwaarden constant blijft doorheen de tijd. Zo kan gezien worden of de variantie van de fouttermen constant is.

Kortom, de random fluctuatie van de getallen moet rond de 0 waarde schommelen en de restwaarden mogen geen duidelijke veranderingen in spreiding vertonen doorheen de grafiek. Hier wordt een visuele inspectie van de plot uitgevoerd.

Zones zoals Terneuzen (COR_X: 1264), Zelzate (COR_X: 15872), Arcelor Mittal (COR_X: 19757) tonen een goede verdeling rond de nulwaarde, wat wijst op een goede modelaanpassing. Op andere locaties, zoals Sas van Gent (COR_X: 11186), Moervaart (COR_X: 21664) en Langerbrugge (COR_X: 24152), kunnen lichte trends of patronen waargenomen worden, wat kan wijzen op ontbrekende variabelen of dat het model minder goed past. In de zone Sas van Gent wordt een licht stijgende trend waargenomen in functie van de tijd. In de zone Moervaart wordt een clustering waargenomen, dit wil zeggen dat de meetpunten erg dicht bij elkaar liggen. In de zone Langerbrugge wordt een lichte trend waargenomen van maand één tot twee en maand drie tot zeven. Over het algemeen blijft de spreiding echter redelijk constant doorheen de tijd, wat suggereert dat de variantie van de fouttermen constant is.

In de meeste zones lijken de restwaarden redelijk gelijkmatig verdeeld rond de horizontale as (waar $Y = 0$). Dit suggereert dat het model over het algemeen een goede fit is voor de data. Verschillende testen kunnen worden uitgevoerd om variatie in patronen op te merken.



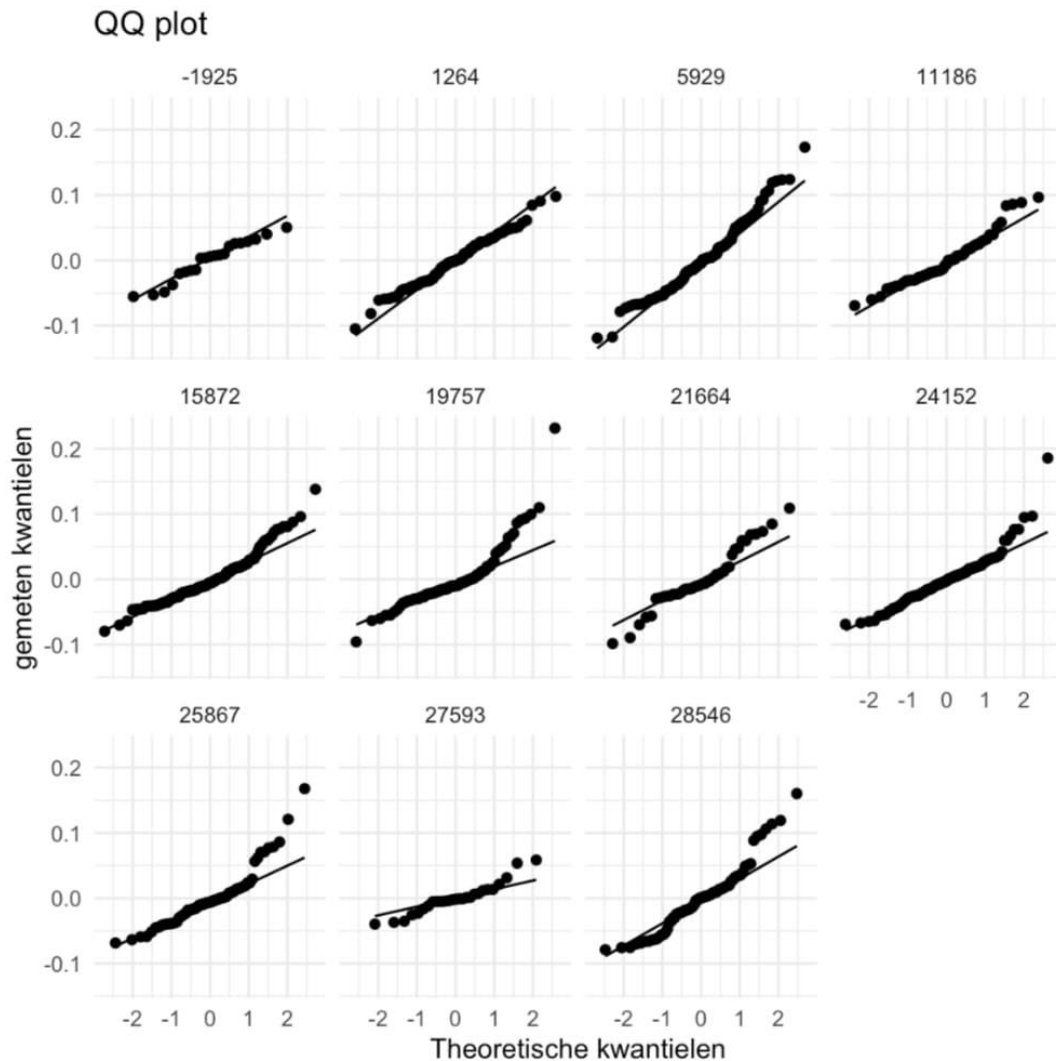
Figuur 25 Restwaarden modellering

Bron: eigen werk

Een QQplot wordt gebruikt om te beoordelen of een dataset een normale verdeling volgt. Figuur 26 vergelijkt de kwantielen van de restwaarden met de kwantielen van een theoretisch normale verdeling. Zo kan bekeken worden of de restwaarden normaal verdeeld zijn. De referentielijn helpt om visueel te beoordelen hoe goed de restwaarden een normale verdeling volgen. Hoe dichterbij de lijn hoe meer waarschijnlijk dat de restwaarden normaal verdeeld zijn. Als er zich een systematische afwijking voordoet, zal het plot een duidelijke kromming of patroon laten zien. Punten die ver van de referentielijn liggen kunnen als uitschieters worden beschouwd. Verder worden de normaliteit van restwaarden tussen de verschillende zones vergeleken.

De theoretische kwantielen worden berekend op een standaard normale verdeling, weergegeven in Figuur 26 als een diagonaal. Dit vertegenwoordigt de verwachte verdeling als de restwaarden perfect normaal verdeeld zouden zijn. Het gemiddelde is 0, de standaarddeviatie [1, -1]. Twee maal de standaarddeviatie, zoals weergegeven in Figuur 26, stelt 95% van de (theoretische) data voor. De gemeten kwantielen komen voort uit de restwaarden. De schaal is dus afhankelijk van de variantie van de restwaarden. De waarden liggen in elke zone tussen -0,12 en 0,22. Dit suggereert dat de spreiding klein is in vergelijking met de standaard normale verdeling. De spreiding onder het gemiddelde zou 12% zijn van een normale spreiding en de spreiding boven het gemiddelde 22% van een normale verdeling.

Over het algemeen volgen de restwaarden in sommige zones redelijk goed de theoretische normaalverdeling. In andere zones zijn er duidelijke afwijkingen, vooral bij de hogere kwantielen. Dit kan vooral opgemerkt worden in de zones Arcelor Mittal, Langerbrugge, het Sifferdok en de binnenwateren te Gent.



Figuur 26 QQplots van restwaarden per zone

Bron: eigen werk

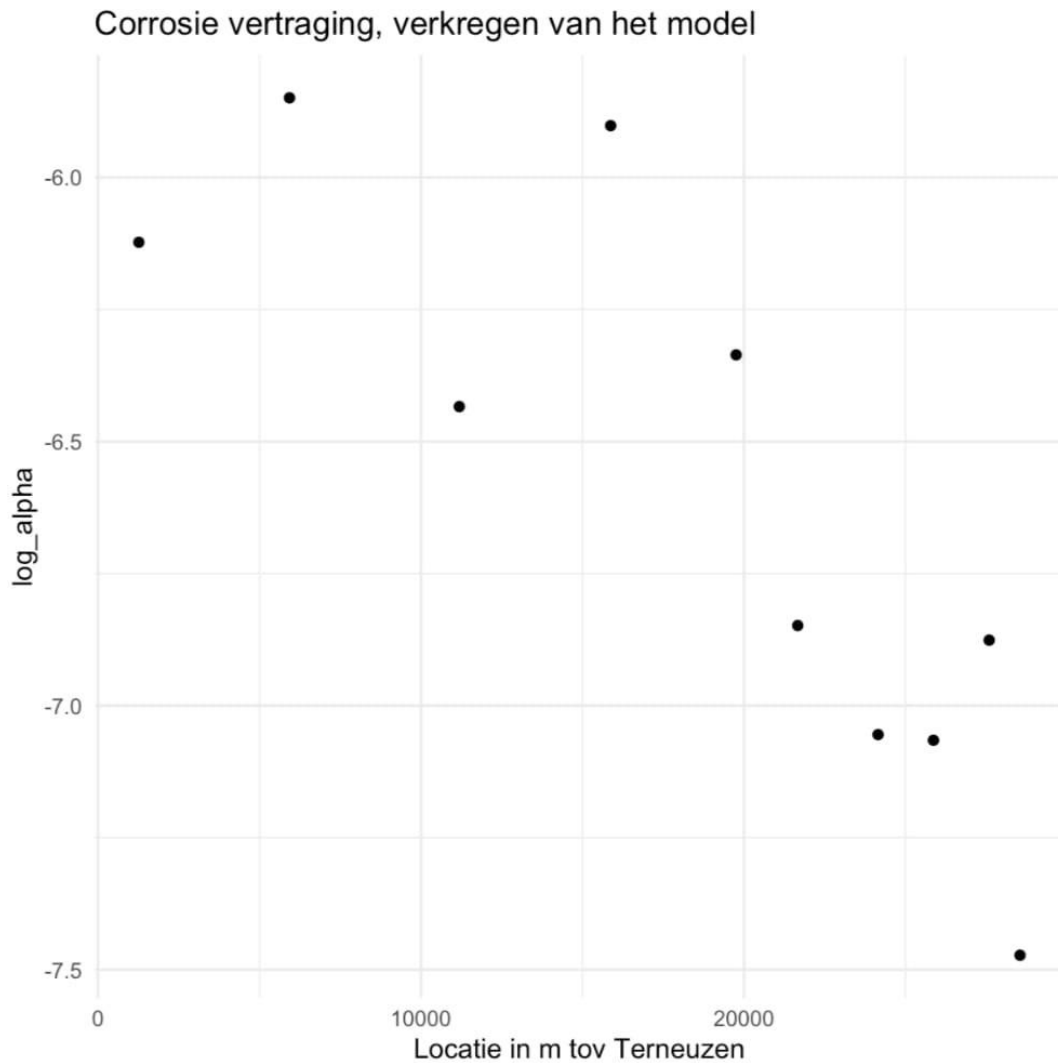
5.2.2.4 Corrosie vertraging

Figuur 27 geeft inzicht in hoe de snelheid van corrosieafname van elke zone varieert langs het kanaal van Terneuzen naar Gent. De x-as geeft de locatie ten opzichte van Terneuzen weer. De Y-as geeft de natuurlijke logaritme van de schaafactor of vervalconstante, $\log \alpha$ weer. Hoe hoger de schaafactor, hoe sneller de asymptoot bereikt wordt. Het model geeft aan hoe snel de corrosie afneemt na de initiële corrosieperiode en wordt hier beschreven als de “corrosievertraging, verkregen van het model”. Een hogere waarde van de vervalconstante (minder negatieve $\log(\alpha)$) betekent dat de corrosiesnelheid sneller afneemt over de tijd en dat de corrosiesnelheid dus ook sneller stabiliseert. Een lagere

waarde van de vervalconstante (meer negatieve $\log(\alpha)$) suggereert dat er een langzamere afname van corrosiesnelheid is en dat er een langzamere stabilisatie van corrosiesnelheid is.

Locaties dicht bij Terneuzen, tussen 0 en 20 000 meter, hebben een hogere vervalconstante. In deze gebieden zal de corrosiesnelheid dus sneller afnemen na de initiële periode. Locaties verder van Terneuzen, tussen 20 000 en 30 000 meter, hebben een lagere vervalconstante. Dit suggereert dat de corrosiesnelheid in deze gebieden langzamer afneemt.

Een algemeen dalende trend in $\log \alpha$ kan waargenomen worden met de toenemende afstand van Terneuzen. Men zou dus kunnen stellen dat de omgevingsinvloed op corrosie verandert in functie van de locatie. Er zou een afnemende agressiviteit zijn van de omgeving in de initiële fases op de coupons naarmate men verder van Terneuzen komt. Er moet echter wel toegevoegd worden dat er enige variatie is tussen de verschillende zones. De punten vertonen een te grote spreiding om van een resoluut dalende trend te spreken.



Figuur 27 Vervalconstante van corrosiesnelheid in functie van afstand van Terneuzen

Bron: eigen werk

5.2.2.5 Asymptoot

In Figuur 28 worden verwachte corrosiesnelheden op lange termijn voor de verschillende zones weergegeven. 'yf', of de asymptotische waarde, geeft de gestabiliseerde corrosiesnelheid weer nadat de initiële, snelle corrosiefase volgens het model is gestabiliseerd. Inzicht wordt geboden in hoe de geschatte asymptotische corrosiesnelheden over het algemeen variëren langs de lengte van het kanaal.

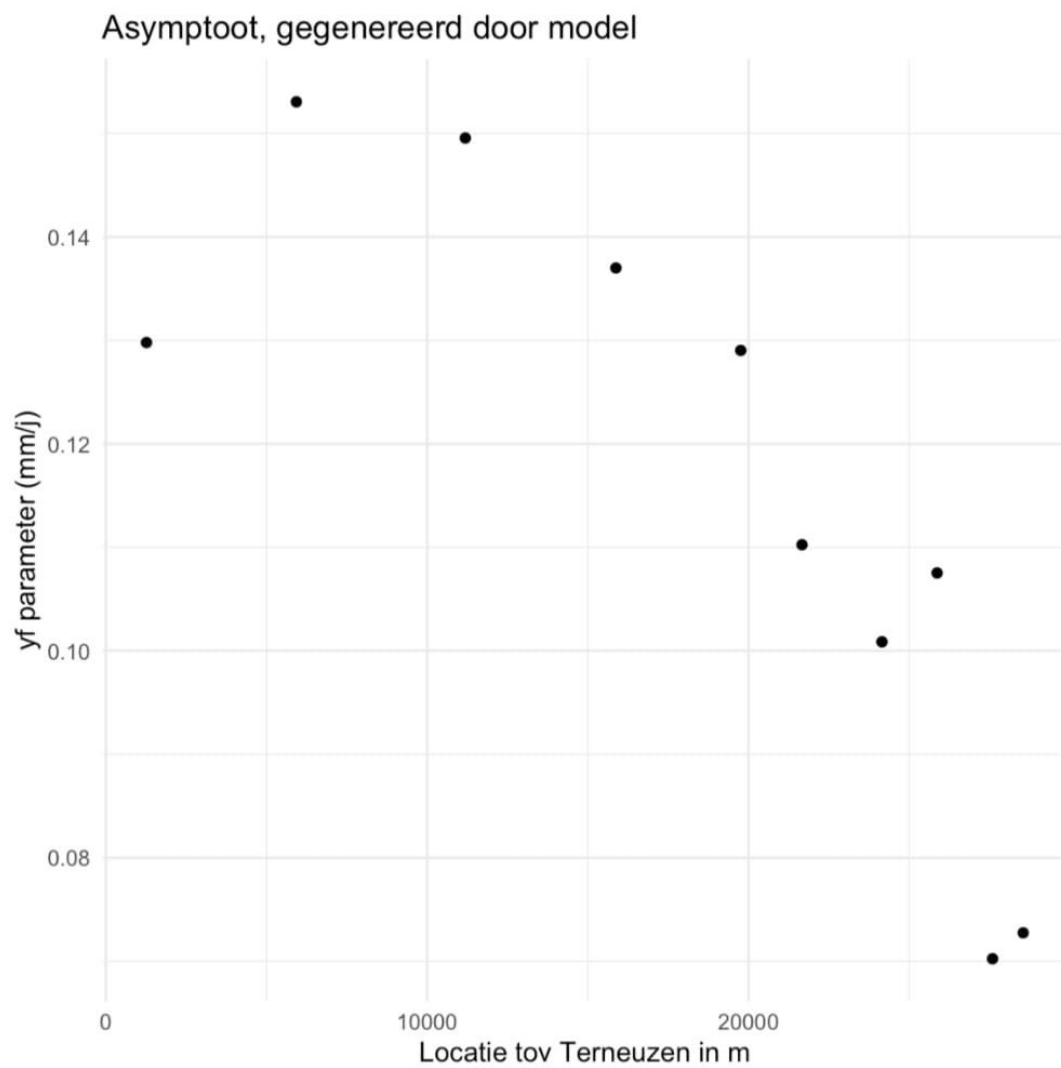
In Figuur 28 lijkt de langetermijncorrosiesnelheid een bergparabool volgen, waarbij de asymptotische waarde aanvankelijk toeneemt met de afstand van Terneuzen, een piek

bereikt in Sluiskil, en daarna weer afneemt richting Gent. De waardes liggen tussen 0,07 en 0,15 millimeter per jaar.

Locaties dicht bij Terneuzen, van 0 tot 10 000 meter tonen een hogere asymptotische waarde tot ongeveer 0,15 millimeter per jaar. Dit suggereert dat de uiteindelijke corrosiesnelheid in deze gebieden hoger is. De zones tussen 0 en 10 000 meter zijn Terneuzen en Sluiskil.

Tussen 10 000 en 20 000 meter van Terneuzen neemt de asymptotische waarde af naar 0,13 millimeter per jaar. Dit kan wijzen op een minder agressieve corrosieomgeving. De zones tussen 10 000 en 20 000 meter zijn Sas van Gent, Zelzate en Arcelor Mittal.

Wanneer men verder kijkt dan 20 000 meter van Terneuzen, blijven de asymptotische waarden verder afnemen, tot 0,07 millimeter per jaar. Dit wijst op een lagere uiteindelijke corrosiesnelheid in de binnenwateren van Gent. Deze waardes kunnen wijzen op stabielere corrosieomstandigheden. De zones verder dan 20 000 meter zijn de Moervaart, Langerbrugge, het Sifferdok, het Grootdok en de binnenwateren van Gent.



Figuur 28 Asymptoot van de vervalconstante in functie van de afstand tot Terneuzen

Bron: eigen werk

6 Discussie

De resultaten van de analyse langs het kanaal Gent-Terneuzen laten aanzienlijke variaties zien in de corrosiesnelheid. Dit betekent dat de corrosiesnelheid niet uniform is over het gehele kanaal. Deze bevindingen benadrukken de noodzaak van verder onderzoek om de invloed van microbiële geïncubeerde corrosie (MIC) en andere omgevingsparameters te bevestigen of uit te sluiten, aangezien de huidige analyse beperkt is tot geografische variaties.

Uit de modellering blijkt dat de initiële corrosiesnelheid in sommige zones snel afneemt, terwijl deze in andere zones langzamer afneemt. Deze variaties kunnen worden toegeschreven aan verschillende lokale omgevingsfactoren zoals industriële invloeden, waterparameters, en mogelijke biologische activiteiten. Het meest geaccepteerde model voor de meting van corrosie in laaggelegeerd koolstofstaal is het bi-modaal model van Melchers. Dit model kan echter niet worden gebruikt in deze analyse, omdat het zich richt op langdurig massaverlies door corrosie en ontwikkeld is voor periodes langer dan drie jaar. Dit experiment duurde in totaal acht maanden. Daarom werd het machtsmodel gebruikt, dat zich richt op de corrosiesnelheid in de initiële fase van het bi-modaal model en geschikt is voor kortere tijdsperiodes. De keuze voor het model dat het beste past bij de waargenomen metingen is de nls-functie in R.

Hoewel sommige zones redelijk goed de theoretische normaalverdeling volgen, wijzen afwijkingen in andere zones op mogelijke modelproblemen of niet-gemodelleerde effecten. Dit kan erop wijzen dat er aanvullende variabelen nodig zijn om de corrosiepatronen beter te begrijpen. De restwaardenanalyse in Figuur 25 toont clustering van restwaarden in sommige zones, wat kan wijzen op meetfouten of variabiliteit in lokale omgevingsomstandigheden zoals industriële activiteit, hydrografische veranderingen of omgevingsparameters. Verder onderzoek is nodig om een duidelijke conclusie te trekken en de betrouwbaarheid van de modellering te verbeteren.

De variaties in de vervalconstante per zone, zoals weergegeven in Figuur 27, wijzen op verschillen in de snelheid waarmee de corrosiesnelheid afneemt. Hogere vervalconstanten zijn te zien in gebieden dicht bij Terneuzen, terwijl lagere vervalconstanten verder weg te vinden zijn. De asymptotische waarden per zone, zoals weergegeven in Figuur 28,

suggereren dat de uiteindelijke gestabiliseerde corrosiesnelheid aanvankelijk toeneemt met de afstand van Terneuzen, een piek bereikt, en daarna afneemt richting Gent. Dit patroon kan wijzen op verschillende omgevingsinvloeden langs het kanaal.

De bevindingen suggereren dat de corrosiedynamiek langs het kanaal sterk variabel is en afhankelijk van lokale omgevingsfactoren. Dit heeft implicaties voor het beheer en de preventie van corrosie. Het identificeren van "hotspots" voor corrosie kan helpen bij het richten van onderhoud en preventieve maatregelen. Bovendien kunnen de resultaten bijdragen aan een beter begrip van de invloed van industriële activiteiten en waterkwaliteit op de corrosiesnelheid.

Een sterke kant van deze studie is de gedetailleerde ruimtelijke analyse die variaties in corrosie over een groot geografisch gebied identificeert. Door het gebruik van niet-lineaire regressiemodellen wordt een diepgaand inzicht verkregen in de corrosiedynamiek. Echter, er zijn ook enkele zwakke punten. Een belangrijke beperking is het gebrek aan rekening houden met andere mogelijke invloedrijke factoren zoals temperatuur, pH-waarde, zuurstofgehalte, diepte, de stroomsnelheid van elektrolyten en microbiële activiteit. De focus lag op een ruimtelijke analyse, zonder deze aanvullende parameters mee te nemen, wat de volledigheid van de conclusies kan beperken. Verder is er een mogelijkheid dat de modellering niet alle variaties en patronen in de data volledig heeft kunnen vangen, zoals blijkt uit de clustering van restwaarden in sommige zones. Verder zijn ook enkele fouten gemaakt in het praktisch werk tijdens de meetcampagnes en in het labo. Op de luchtdichte zakjes werd soms met een verkeerde alcoholstift geschreven waardoor na enkele maanden, wanneer het tijd werd om de coupons te verwerken, sommige coupons moeilijk te identificeren waren. Ook werd de Curver opbergbox niet als de meest efficiënte manier geacht om meer dan 1000 coupons te verwerken. Voor verder onderzoek is een efficiëntere manier van verwerken aangeraden.

Voor toekomstige studies wordt aanbevolen om meer omgevingsparameters zoals temperatuur, pH-waarde, zuurstofgehalte, en microbiële activiteit op te nemen in de analyse om een vollediger beeld te krijgen van de factoren die corrosie beïnvloeden. Diepgaande studies op geïdentificeerde corrosie-hotspots zijn noodzakelijk om de specifieke oorzaken van hoge corrosiesnelheden te bepalen en gerichte maatregelen te ontwikkelen. Langetermijnstudies zijn essentieel om de effecten van seizoensgebonden

variaties en langetermijnveranderingen in de omgevingscondities op de corrosiesnelheid te begrijpen. Het huidige model moet verder worden gevalideerd en verfijnd door aanvullende data te verzamelen en verschillende modelleringstechnieken te vergelijken om de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid te verbeteren. Het toepassen van multivariabele regressie- en machine learning-technieken kan helpen om complexe interacties tussen verschillende omgevingsfactoren en corrosiesnelheid beter te modelleren. Toekomstig onderzoek dat rekening houdt met een breder scala aan omgevingsfactoren en langere tijdsperioden, zal bijdragen aan een dieper inzicht in de mechanismen die corrosie beïnvloeden. Dit zal uiteindelijk leiden tot betere strategieën voor het beheer en de preventie van corrosie, wat cruciaal is voor het behoud en de bescherming van infrastructuur langs het kanaal.

De studie naar de corrosiedynamiek langs het kanaal van Terneuzen naar Gent heeft significante variaties in de corrosiesnelheid en de uiteindelijke gestabiliseerde corrosiesnelheid blootgelegd. De resultaten benadrukken het belang van lokale omgevingsfactoren en industriële invloeden op de corrosieprocessen. Hoewel de ruimtelijke analyse waardevolle inzichten biedt, is het duidelijk dat aanvullende parameters en een bredere benadering nodig zijn om een volledig begrip van de corrosiedynamiek te verkrijgen.

In het bijzonder moet verder onderzoek zich richten op de oorzaken van de uitschieters, het verbeteren van de modellering en het ontwikkelen van preventieve maatregelen tegen corrosie. Een model dat de normaliteit van de restwaarden verbetert en past voor elke zone, is van groot belang voor het verkrijgen van nauwkeurige en betrouwbare resultaten. Verdere studies naar de invloed van MIC en andere omgevingsparameters zijn cruciaal voor het ontwikkelen van effectieve strategieën voor corrosiebeheer en -preventie langs het kanaal Gent-Terneuzen.

7 Conclusie

Deze thesis heeft bepaalde inzichten geleverd in de corrosiedynamiek langs het kanaal Gent-Terneuzen. De belangrijkste punten worden als volgt samengevat:

1. Variabiliteit in Corrosiesnelheid:

Het onderzoek heeft aangetoond dat de corrosiesnelheid niet uniform is over het gehele kanaal. Er zijn aanzienlijke variaties tussen verschillende zones, wat suggereert dat lokale omgevingsfactoren een belangrijke rol spelen in de corrosieprocessen.

2. Belang van Lokale Omgevingsfactoren:

Factoren zoals industriële invloeden, waterparameters en mogelijke biologische activiteiten blijken een factor te zijn in het bepalen van de corrosiesnelheid. Deze factoren veroorzaken variaties in de initiële corrosiesnelheid en de snelheid waarmee deze afneemt.

3. Effectiviteit van het Machtsmodel:

Het gebruik van het machtsmodel in plaats van het bi-modaal model van Melchers was effectief voor deze studieperiode van acht maanden. Het machtsmodel bleek beter geschikt voor het beschrijven van de initiële corrosiefases.

4. Modelvaliditeit en Restwaarden:

De analyse van de restwaarden heeft inzicht gegeven in de validiteit van de gebruikte modellen. Hoewel sommige zones een goede fit vertoonden met de theoretische normaalverdeling, waren er in andere zones afwijkingen die wijzen op mogelijke modelproblemen of niet-gemodelleerde effecten.

5. Asymptotische Corrosiesnelheid:

De uiteindelijke gestabiliseerde corrosiesnelheid varieert aanzienlijk langs het kanaal, met een bergparabolisch patroon dat suggereert dat de corrosiesnelheid aanvankelijk toeneemt met de afstand van Terneuzen, een piek bereikt en vervolgens afneemt richting Gent.

6. Identificatie van Corrosie Hotspots:

Het onderzoek heeft geholpen bij het identificeren van zones met hoge corrosiesnelheden. Deze hotspots zijn van cruciaal belang voor gericht onderhoud en preventieve maatregelen.

7. Beperkingen van de Studie:

Een belangrijke beperking van deze studie is het gebrek aan rekening houden met andere mogelijk invloedrijke factoren zoals temperatuur, pH-waarde, zuurstofgehalte, en microbiële activiteit. Deze factoren kunnen aanzienlijk bijdragen aan de corrosieprocessen en moeten in toekomstige studies worden meegenomen.

8. Aanbevelingen voor Verder Onderzoek:

Er zijn duidelijke aanbevelingen gedaan voor toekomstige studies, waaronder het opnemen van meer omgevingsparameters, diepgaande analyse van hotspots, langetermijnstudies en verdere validatie en verfijning van de modellen.

Deze thesis heeft aangetoond dat corrosie langs het kanaal van Terneuzen naar Gent variabel is en waarschijnlijk beïnvloed wordt door lokale omgevingsfactoren.

8 Bibliografie

A Review of Trends for Corrosion Loss and Pit Depth in Longer-Term Exposures. (z.d.).

Geraadpleegd 27 mei 2024, van <https://www.mdpi.com/2624-5558/1/1/4#B11-cmd-01-00004>. Geraadpleegd 2 mei 2024

Antea Group. (2021). Bronnenonderzoek en -analyse kanaal Gent-Terneuzen

(4774503000). <https://www.zeeland.nl/>. Rijkswaterstaat Zee en Delta. Geraadpleegd 6 maart 2024, van

https://www.zeeland.nl/sites/default/files/digitaalarchief/IB22_f5ff6ace.pdf

ASTM, Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens

[standard G1-03], in: ASTM Int. ASTM Handbook 3.02 Corrosion of Metals, Wear and Erosion, West Conshohocken, PA, 2011, 20-28. Geraadpleegd 2 februari 2024

Atanasov, A. T. (2016). Possible determination of the physical parameters of the first living cells based on the fundamental physical constants. AIP Conference Proceedings, 1790(1), 140003. doi:10.1063/1.4968732. Geraadpleegd 15 februari 2024

Beijerinck, M.W. (1895) 'Über Spirillum desulfuricans als Ursache von Sulfat-reduktion', Zentralblatt für Bakteriologie, Parasitenkunde, Infektionskrankheiten und Hygiene, Section I, Vol. 1, 104 – 114. Geraadpleegd 17 februari 2024

Bertrand, J.-C., Brochier-Armanet, C., Gouy, M., & Westall, F. (2015). For Three Billion Years, Microorganisms Were the Only Inhabitants of the Earth. In J.-C. Bertrand, P. Caumette, P. Lebaron, R. Matheron, P. Normand, & T. Sime-Ngando (Red.), Environmental Microbiology: Fundamentals and Applications: Microbial Ecology (pp. 75-106). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-017-9118-2_4. Geraadpleegd 15 februari 2024

Booth, G. H., Cooper, A. W., & Tiller, A. K. (1963). Corrosion of mild steel in the tidal waters of the thames estuary I. Results of six-months' and one year's immersion. Journal of Applied Chemistry, 13(5), 211-220. Geraadpleegd 17 februari 2024

Booth, G. H., Cooper, A. W., & Tiller, A. K. (1967). Corrosion of mild steel in the tidal waters of the Afon Dyfi and a comparison with the River Thames. British corrosion journal, 2(1), 21-24. Geraadpleegd 17 februari 2024

Carlucci, A. F. (1974). Nutrients and microbial response to nutrients in seawater. Effect of the Ocean Environment on Microbial Activities, eds. RR Colwell, RY Morita (Baltimore, MD: University Park Press, 1974), 245-248. Geraadpleegd 17 februari 2024

Clapp WF. 1948. Macro-organisms in seawater and their effect on the corrosion. In: Uhlig HH, editor. Corrosion handbook. New York: John Wiley & Sons Inc. pp 433 – 441.

Geraadpleegd 12 maart 2024

Crolet, J. L. (1992). From biology and corrosion to biocorrosion. *Oceanologica acta*, 15(1), 87-94. Geraadpleegd 24 februari 2024

Culture parameters regulating stalk formation and growth rate of *Gallionella ferruginea* | Microbiology Society. (z.d.). Geraadpleegd 21 mei 2024, van

https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/micro/10.1099/00221287-136-9-1675;jsessionid=f_yxj8qAbKGYKGPMewYyMA_rGSuKH-Dx602yvcj-.mbslive-10-240-10-108

De Brito, L. V. R., Coutinho, R., Cavalcanti, E. H. S., & Benchimol, M. (2007). The influence of macrofouling on the corrosion behaviour of API 5L X65 carbon steel. *Biofouling*, 23(3), 193–201. doi:10.1080/08927010701258966. Geraadpleegd 11 mei 2024

De Charleroi, D. D. C., & Denayer, B. D. (1992). Macro-fouling. *Procestechnieken En -engineering*, 33442(1). Geraadpleegd, 8 mei 2024, van

https://purews.inbo.be/ws/portalfiles/portal/12699664/DeCharleroy_Denayer_1992_Macro_fouling.PDF

Effects of Carbon Content and Microstructure on Corrosion Property of New Developed Steels in Acidic Salt Solutions | *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. (z.d.).

Geraadpleegd 27 mei 2024, van <https://link.springer.com/article/10.1007/s40195-013-0007-1>

Guedes Soares, C., Garbatov, Y., & Zayed, A. (2011). Effect of environmental factors on steel plate corrosion under marine immersion conditions. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 46, 524-541. doi:10.1179/147842209X12559428167841. Geraadpleegd 16 mei 2024

Hanert, H. H. (1981). *The Prokaryotes*, pp. 509–515. Geraadpleegd 16 mei 2024

Hasson, D. F., & Crowe, C. R. (1988). *Materials for Marine Systems and Structures*.

Geraadpleegd 18 mei 2024

Hasson, D. F., & Crowe, C. R. (2013). *Materials for Marine Systems and Structures: Treatise on Materials Science and Technology*, Vol. 28. Geraadpleegd 16 mei, van Elsevier.

Het Kanaal Gent-Terneuzen: varen tussen Gent en Zelzate. (2022). *Op Sleeptouw 2022* |

THEMA 9, 9–1. Geraadpleegd 3 mei, van

https://www.milieuboot.be/downloads/sleeptouw-kleur/werkbl-9-LKR_Gent-Zelzate_PRINT.pdf

hkv, Universiteit Gent, Bureau Waardenburg, & Antea Group. (2023). *Verzilting Kanaal Gent-Terneuzen: Rapportage oppervlaktewatermodellering* (pr4146.12, pr4728.10).

Geraadpleegd 11 mei 2024, van Schelde in Beeld.

Impact of sea surface temperature on the metallic marine materials | 1. (z.d.).

Geraadpleegd 22 mei 2024, van

<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003330165-109/impact-sea-surface-temperature-metallic-marine-materials-wen-kai-zhang-lin-zhou-xia-zhang-xue-hong-li-zi-ying-li-di-wu-yu-wei-sui-zhen-yu-zheng-da-zhang-guo-jie-chen-de-chuan-yu>

International Marine Coatings (z.d.). *Coatings Technology: What is Corrosion*.

Geraadpleegd 7 mei 2024, van www.international-marine.com

Jia, R., Unsal, T., Xu, D., Lekbach, Y., & Gu, T. (2019). Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: A state of the art review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 137, 42-58. doi:10.1016/j.ibiod.2018.11.007. Geraadpleegd 23 februari 2024.

Jin S Chung Award Lecture. (2012). *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 22(4). Geraadpleegd 23 februari 2024.

Jones, D. A. (1996). *Principles and prevention of corrosion* (2. ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. Geraadpleegd 7 mei 2024.

Koch, G. K., Varney, J. V., Thompson, N. T., Gould, M. G., & Payer, J. P. (2016). Strategic observation and control of outlier risk in corrosion. *NACE International IMPACT*.

Geraadpleegd 7 mei 2024, van <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>

Kucera, S., & Wolfe, R. S. (1957). A SELECTIVE ENRICHMENT METHOD FOR GALLIONELLA FERRUGINEA. *Journal of Bacteriology*, 74(3), 344-349. doi:10.1128/jb.74.3.344-349.1957. Geraadpleegd 12 februari 2024.

LaQue FL. 1982. Topics for research in marine corrosion. *Mater Perf* 21:13 – 18. Geraadpleegd 12 maart 2024

Li, Y., & Ning, C. (2019). Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling. *Bioactive Materials*, 4, 189-195. doi:10.1016/j.bioactmat.2019.04.003. Geraadpleegd 12 februari.

Liengen, T., Basseguy, R., Feron, D., Beech, I., & Birrien, V. (2014). *Understanding Biocorrosion: Fundamentals and Applications*. Geraadpleegd 13 mei 2024, van Elsevier.

Major, M., Nawrot, J., & Major, I. (2019). Structural S235 and S355 Steels – Numerical Analysis of Selected Rods Connection. *IOP Conference Series. Materials Science And Engineering*, 585(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/585/1/012007>. Geraadpleegd 18 mei 2024

Marshakov, A. I., & Rybkina, A. A. (2022). Effect of Cathodic Protection Potential Fluctuations on the Corrosion of Low-Carbon Steels and Hydrogen Absorption by the Metal in Chloride Solutions with Nearly Neutral pH. *Materials*, 15(23), 8279. <https://doi.org/10.3390/ma15238279>. Geraadpleegd 18 mei 2024

Melchers, RE (2003a). "Modeling of Marine Immersion Corrosion for Mild and Low Alloy Steels—Part 1: Phenomenological Model," *Corrosion*, Vol 59, No 4, pp 319–334. Geraadpleegd 12 maart 2024

Melchers, R.E. (2014). *Modelling long term corrosion of steel infrastructure in natural marine environments*. The University of Newcastle , Newcastle, NSW, Australia. Geraadpleegd 14 februari 2024

Melchers , R.E. and Jeffrey , R. (2008a) ‘ The critical involvement of anaerobic bacterial activity in modelling the corrosion behaviour of mild steel in marine environments ’, *Electrochimica Acta* , 54 , 80 – 85 . Geraadpleegd 14 februari 2024

Melchers, R. (2018). A Review of Trends for Corrosion Loss and Pit Depth in Longer-Term Exposures. *Corrosion And Materials Degradation*, 1(1), 42–58.
<https://doi.org/10.3390/cmd1010004> Geraadpleegd 14 mei 2024

Melchers, R. E. (2008). Development of new applied models for steel corrosion in marine applications including shipping. *Ships and Offshore Structures*, 3(2), 135–144.
[doi:10.1080/17445300701799851](https://doi.org/10.1080/17445300701799851). Geraadpleegd 15 mei 2024

Melchers, R. E. (2002). Effect of Temperature on the Marine Immersion Corrosion of Carbon Steels. *Corrosion*, 58(09). Geraadpleegd 20 mei 2024

Melchers, R. E. (2005). Effect of Immersion Depth on Marine Corrosion of Mild Steel. *Corrosion*, 61(9), 895-906. [doi:10.5006/1.3280659](https://doi.org/10.5006/1.3280659). Geraadpleegd 20 mei 2024

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2023, 24 november). Kanaal van Gent naar Terneuzen - informatie en waterdata. Geraadpleegd 11 mei 2024, van
<https://www.rijkswaterstaat.nl/water/vaarwegenoverzicht/kanaal-van-gent-naar-terneuzen>

Nace-International-Report.pdf. (z.d.). Geraadpleegd 3 maart 2024, van
<http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>

Nalin, R., Simonet, P., Vogel, T. M., & Normand, P. (1999). *Rhodanobacter lindaniclasticus* gen. nov., sp. nov., a lindane-degrading bacterium. *International Journal Of Systematic And Evolutionary Microbiology*, 49(1), 19–23. <https://doi.org/10.1099/00207713-49-1-19>
Geraadpleegd 16 mei 2024

Ning, C., Mingyan, L., & Weidong, Z. (2012). Fouling and Corrosion Properties of SiO₂ Coatings on Copper in Geothermal Water. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(17), 6001–6017. Geraadpleegd 3 maart 2024

NiNa.Az. (2024, 14 februari). Geschiedenis van de Aarde. [Www.wikidata.nl-nl.nina.az](http://www.wikidata.nl-nl.nina.az). Geraadpleegd 22 mei 2024, van https://www.wikidata.nl-nl.nina.az/Ontstaan_van_de_Aarde.html

Oyedotun, T. D. T. (2018). X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: A review and an overview. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(2), 148-154. Taylor & Francis. doi:10.1080/24749508.2018.1452459. Geraadpleegd 3 maart 2024

Pfaff-Wagenaar, M. & Lynyrd de Wit (Svašek Hydraulics). (2015). Deelrapport MER Water. In Rapport Vlaams Nederlandse Scheldecommissie (VNZT-R-127-7; pp. 1–155). <https://nieuwesluisterneuzen.eu/sites/default/files/downloads/28%20Deelrapport%20MER%20Water.pdf> Geraadpleegd 11 mei 2024

Salgar-Chaparro, S. J., Lepkova, K., Pojtanabuntoeng, T., Darwin, A., & Machuca, L. L. (2020). Nutrient Level Determines Biofilm Characteristics and Subsequent Impact on Microbial Corrosion and Biocide Effectiveness. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(7), e02885-19. American Society for Microbiology. doi:10.1128/AEM.02885-19. Geraadpleegd 6 maart 2024

Schäfer, H., Küpper, K., Wollschläger, J., Kashaev, N., Hardege, J., Walder, L., Mohsen Beladi-Mousavi, S., e.a. (2015). Oxidized Mild Steel S235: An Efficient Anode for Electrocatalytically Initiated Water Splitting. *ChemSusChem*, 8(18), 3099-3110. doi:10.1002/cssc.201500666. Geraadpleegd 10 februari 2024

Scheldecommissie, V.-N. (z.d.). Postbus 299—4600 AG Bergen op Zoom + 31 (0)164 212 800 nieuwesluisterneuzen@vnsc.eu. Geraadpleegd 17 mei 2024, van www.nieuwesluisterneuzen.eu.

Seckbach, J. (1996). Biological Aspects of the Origin of Life: Open Questions in Eukaryogenesis. In J. Chela-Flores & F. Raulin (Red.), *Chemical Evolution: Physics of the Origin and Evolution of Life: Proceedings of the Fourth Trieste Conference on Chemical Evolution, Trieste, Italy, 4–8 September 1995* (pp. 197-213). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-009-1712-5_17. Geraadpleegd 15 februari 2024.

Sharland, S., & Tasker, P. (1988). A mathematical model of crevice and pitting corrosion—I. The physical model. *Corrosion Science*, 28(6), 603–620. [https://doi.org/10.1016/0010-938x\(88\)90027-3](https://doi.org/10.1016/0010-938x(88)90027-3) Geraadpleegd 14 mei 2024

Shaw, B.A. & Kelly, R.G. (2006) What is corrosion. Geraadpleegd op 27 mei 2024, van The Electrochemical Society Interface

SOCORRO. (z.d.). Geraadpleegd 22 mei 2024, van <https://www.socorro.eu/>

Stoops, F. S. (2023). Microbiologisch geïnduceerde corrosie in de jachthaven van Zelzate [Masterscriptie]. Antwerp Maritime Academy. Geraadpleegd 3 Januari 2024

Sun, F., Li, X. & Cheng, X. Effects of Carbon Content and Microstructure on Corrosion Property of New Developed Steels in Acidic Salt Solutions. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)* 27, 115–123 (2014). <https://doi.org/10.1007/s40195-013-0007-1>. Geraadpleegd 13 mei 2024

Tanaporn, Tanupabrunsun., Bruce, Brown., Srdjan, Nesic. (2013). Effect of pH on CO₂ Corrosion of Mild Steel at Elevated Temperatures. *Corrosion*, Geraadpleegd 12 mei 2024

Tammann, G. (1923). *Lehrbuch der metallographie: chemie und physik der metalle und ihrer legierungen*. Voss. Geraadpleegd 16 mei 2024

The Genus *Gallionella* | SpringerLink. (z.d.). Geraadpleegd 22 mei 2024, van https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-13187-9_40

Understanding Biocorrosion: Fundamentals and Applications—T Liengen, R Basseguy, Damien Feron, I Beech, V Birrien—Google Boeken. (z.d.). Geraadpleegd 22 mei 2024, van https://books.google.be/books?hl=nl&lr=&id=UpiuAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA213&dq=Modelling+long+term+corrosion+of+steel+infrastructure+in+natural+marine+environments+&ots=EdNrpdeus9&sig=6dawdKtbzfkXA-oGqvyWSUr_4Hc#v=onepage&q=Modelling%20long%20term%20corrosion%20of%20steel%20infrastructure%20in%20natural%20marine%20environments&f=false

Van Chi, N., Van Kien, N. D., Quan, N. L. H., Linh, N. C. N., Quang, N. N. Q., Anh, N. N. D., Hung, N. L. Q. (2022). Biological macrofouling and electrochemical corrosion properties of structural steel AH36 in natural seawater at Hon Tre island, Nha Trang. *Vietnam Journal Of*

Science And Technology/Science And Technology, 60(6), 1044–1055.

<https://doi.org/10.15625/2525-2518/16473>. Geraadpleegd 8 mei 2024

Ventanilla, M. G., Ongpeng, J., Takahiro, N., & Kawaai, K. (2022). Reduction of dissolved oxygen in minimizing corrosion. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 33, 624–630.

<https://doi.org/10.14311/app.2022.33.0624>. Geraadpleegd 13 mei 2024

Vlaanderen geeft een half miljoen euro aan onderzoek ijzeretende bacterie in kanaal

Gent-Terneuzen | VRT NWS: nieuws. (z.d.). Geraadpleegd 21 mei 2024, van

<https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2022/08/09/vlaanderen-geeft-een-half-miljoen-euro-aan-onderzoek-ijzeretende/>

Wade, Scott & Lizama, Y. (2015). CLARKE'S SOLUTION CLEANING USED FOR CORROSION PRODUCT REMOVAL: EFFECTS ON CARBON STEEL SUBSTRATE. Geraadpleegd 16 december 2024

watermanagementcentrum Nederland. (2023). Operationeel Watermanagement Kanaal Gent-Terneuzen. In

www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/watermanagementcentrum-nederland.

Rijkswaterstaat. Geraadpleegd 3 mei 2024, van <https://watersystemen-kanaal-gent-terneuzen.pdf>

Waterstaat, M. van I. en. (z.d.). Kanaal van Gent naar Terneuzen—Informatie en waterdata. webpagina, . Geraadpleegd 23 mei 2024, van

<http://www.rijkswaterstaat.nl/water/vaarwegenoverzicht/kanaal-van-gent-naar-terneuzen>

Zhang, W., Zhou, L., Zhang, X., Li, X., Li, Z., Wu, D., Sui, Y., e.a. (2022). Impact of sea surface temperature on the metallic marine materials. *Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering Volume 1*. CRC Press. Geraadpleegd 3 maart 2024