

Corrosie in Scrubbers

Lambrechts Stanislas

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

Promotor: Wikke Witteveen
Copromotor: Geert Potters

Academiejaar 2023-2024

Woord vooraf

Deze scriptie overloopt de werking van scrubbers en hoe corrosie aanwezig is in scrubbers. Voordat ik aan deze scriptie begon, had ik niet veel kennis over corrosie. De studie van de AMACORT-groep trok mijn interesse en wekte mijn nieuwsgierigheid over dit onderwerp. Gedurende mijn onderzoek is mijn interesse in corrosie gegroeid en ben ik erachter gekomen hoe groot de impact van corrosie is. Ik hoop dat mijn scriptie een bijdrage zal leveren aan toekomstig onderzoek op dit gebied.

Ik wil graag mijn dank uitspreken aan mijn promotor, Wikke Witteveen, en mijn copromotor, Dr. Geert Potters, voor het introduceren van dit onderwerp en voor hun begeleiding en ondersteuning gedurende het schrijven van deze scriptie. Daarnaast wil ik ook Dr. Joeri Horvath bedanken voor zijn waardevolle uitleg en het delen van zijn expertise. Tot slot wil ik mijn ouders bedanken voor het geven van de opportuniteit om op de Antwerp Maritime Academy te kunnen studeren en voor hun ondersteuning gedurende het schrijven van deze scriptie.

Samenvatting

Corrosie vormt een belangrijke uitdaging binnen de maritieme industrie, vooral in de context van scrubbersystemen die worden ingezet om uitlaatgassen van schepen te reinigen. Deze systemen, ontworpen om te voldoen aan de strenge emissienormen van de Internationale Maritieme Organisatie (IMO), opereren onder omstandigheden die bijzonder bevorderlijk zijn voor corrosie. Het complexe samenspel van factoren zoals temperatuurvariaties, lage pH-waarden, hoog zoutgehalte, hoge zuurstofconcentraties, de aanwezigheid van chloriden en een hoge redoxpotential, maakt scrubbers tot een unieke en uitdagende omgeving voor materiaalbehoud.

Deze scriptie onderzoekt de centrale onderzoeksvraag: Hoe beïnvloeden de operationele omstandigheden in scrubbers de corrosiesnelheid van metalen, en welke maatregelen kunnen worden genomen om deze corrosie te beheersen en de levensduur van scrubbers te verlengen? Door middel van experimenteel onderzoek en uitgebreide data-analyse streven we ernaar om een diepgaand inzicht te krijgen in de mechanismen die bijdragen aan corrosie in scrubbers en om praktische aanbevelingen te doen voor het verbeteren van de efficiëntie en duurzaamheid van deze systemen.

Abstract

Corrosion is a major challenge within the maritime industry, especially in the context of scrubber systems used to clean exhaust gases from ships. These systems, designed to meet strict International Maritime Organisation (IMO) emission standards, operate under conditions that are particularly conducive to corrosion. The complex interplay of factors such as temperature variations, low pH, high salinity, high oxygen concentrations, the presence of chlorides and high redox potential makes scrubbers a unique and challenging environment for material preservation.

This thesis investigates the central research question: How do the operational conditions in scrubbers influence the corrosion rate of metals, and what measures can be taken to control this corrosion and extend the life of scrubbers? Through experimental research and extensive data analysis, we aim to gain an in-depth understanding of the mechanisms that contribute to corrosion in scrubbers and make practical recommendations for improving the efficiency and durability of these systems.'

Inhoud

Woord vooraf.....	ii
Samenvatting.....	iii
Abstract.....	iv
Inhoud	v
Lijst van tabellen	viii
Lijst van Figuren	ix
Lijst van afkortingen	xi
1. Corrosie in scrubbers is een probleem.....	1
1.1 Wat is corrosie?	1
1.2 Voorwaarden voor het ontstaan van corrosie.....	1
1.3 Belang van corrosie	3
2. Scrubbers.....	4
2.1 Wat is een scrubber.....	4
2.2 Wet versus dry scrubbers?.....	4
2.3 Open loop scrubbers	5
2.3.1 Proces	5
2.3.2 Voor- en nadelen	5
2.4 Closed loop scrubbers.....	6
2.4.1 Proces	6
2.4.2 Voor- en nadelen	7
2.5 Hybride scrubbers	7
2.5.1 Voor- en nadelen	8
2.6 Voor- en nadelen van het gebruik van scrubbers	8
2.7 Discharge limits.....	9
3. Samenstelling waswater	12
3.1 Sulfaten	12
3.2 Polycyclische aromatische koolwaterstoffen	13
3.3 Metalen	14
3.4 Nitraten	15
3.5 PH	16
3.6 Temperatuur.....	17
4. Link met corrosie	18
4.1 Effect van temperatuur.....	18
4.2 Effect van pH.....	19

4.3 Effect van opgeloste zuurstof	19
4.4 Effect van zoutgehalte	21
4.5 Effect van oxidatiereductiepotentiaal	21
4.6 Effect van chloride.....	21
5. Onderzoeksdoelstelling.....	23
6. Methode	25
6.1 Opstelling	25
6.2 Sensoren.....	29
6.2.1 Scuba 90.....	29
6.2.2 COSASCO 9030 Plus.....	34
6.2.3 C-Cube	37
6.3 Verwerking gegevens.....	38
7. Resultaten.....	41
7.1 Water zonder zout.....	41
7.1.1 Temperatuur	41
7.1.2 Opgeloste zuurstof.....	42
7.1.3 Geleidbaarheid	43
7.1.4 pH.....	45
7.1.5 Oxidatie reductie potentiaal	46
7.1.6 Zoutgehalte	47
7.1.7 Correlatie tussen de verschillende fysicochemische parameters	49
7.2 Water met toevoeging van zout	52
7.2.1 Temperatuur	52
7.2.2 Opgeloste zuurstof.....	53
7.2.3 Geleidbaarheid	54
7.2.4 pH.....	56
7.2.5 Oxidatie reductie potentiaal	57
7.2.6 Zoutgehalte	58
7.2.7 Verbanden tussen de verschillende fysicochemische parameters.....	60
7.3 Corrosiedata	63
7.3.1 Verloop corrosiesnelheid.....	63
7.3.2 Correlaties met corrosiesnelheid.....	65
8. Discussie	70
9. Conclusie.....	73
Bibliografie.....	75

Lijst van tabellen

Tabel 1 - Debiet (t/MWh), Grenswaarde lozingsconcentratie ($\mu\text{g/L}$ PAKphe-equivalenten) en Meettechnologie	10
---	----

Lijst van Figuren

Figuur 1- De corrosielevenscyclus van een staalproduct	1
Figuur 2 - Beschrijving van corrosie - elektrochemische corrosie cel.....	2
Figuur 3 – Open loop scrubber	5
Figuur 4 – Closed loop scrubber.....	7
Figuur 5 - PAKphe in scrubber waswater	13
Figuur 6 - Lozingen van zware metalen ($\mu\text{g}/\text{MWh}$) voor gesloten (CL) en open (OL) wassers.....	14
Figuur 7 – Nitraten in scrubber waswater.....	15
Figuur 8 – pH in scrubber waswater	16
Figuur 9 - Vloeistof karakteristiek bereik over scrubber	17
Figuur 10 – Corrosiesnelheid voor verschillende temperaturen	18
Figuur 11 - Effect van de pH op de corrosiesnelheid.....	19
Figuur 12 - Voorspelde corrosiesnelheid als functie van temperatuur en opgeloste zuurstof bij minimale, gemiddelde en maximale waarden van het zoutgehalte en ORP-waarden bij de gemiddelde pH-waarde (7.77)	20
Figuur 13 - Effect van de chlorideconcentratie op de corrosiesnelheid	22
Figuur 14 - Grundfos CRNE 5 pomp	25
Figuur 15 - HDPE buizen met polyethyleen T-verbinding	26
Figuur 16 - De Scuba 90 (links), de C-Cube (midden) en de COSASCO (rechts).....	27
Figuur 17 - DN80 gietijzeren pijp.....	28
Figuur 18 - De Scuba 90.....	29
Figuur 19 - Temperatuur sensor.....	30
Figuur 20 - Opgeloste zuurstof sensor	31
Figuur 21 - Geleidbaarheid sensor	31
Figuur 22 - pH sensor	32
Figuur 23 - ORP sensor	33
Figuur 24 - COSASCO 9030 Plus	35
Figuur 25 - Lineaire Polarisatieweerstand.....	36
Figuur 26 - C-Cube LPR-sensor.....	37
Figuur 27 - Boxplot temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) van water.....	41
Figuur 28 - Verloop temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) in functie van tijd (dagen)	42
Figuur 29 - Boxplot opgeloste zuurstofconcentratie (mg/L) van water.....	42
Figuur 30 - Verloop opgeloste zuurstofconcentratie (mg/L) in functie van tijd (dagen)	43
Figuur 31 - Boxplot geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$) van water	43
Figuur 32 - Verloop geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$) in functie van tijd (dagen)	44
Figuur 33 - Boxplot pH van water.....	45
Figuur 34 - Verloop pH in functie van tijd (dagen)	46
Figuur 35 - Boxplot ORP (mV) van water.....	46
Figuur 36 - Verloop ORP (mV) in functie van tijd (dagen)	47
Figuur 37 - Boxplot zoutgehalte (PSU) van water	47
Figuur 38 - Verloop zoutgehalte (PSU) in functie van tijd (dagen).....	48
Figuur 39 - Paarsgewijze correlatie matrix van omgevingsparameters.....	51
Figuur 40 - Boxplot temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) van zoute water	52
Figuur 41 - Verloop temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) in functie van tijd (dagen)	53
Figuur 42 - Boxplot opgeloste zuurstofconcentratie (mg/L) van zoute water	53
Figuur 43 - Verloop opgeloste zuurstofconcentratie (mg/L) in functie van tijd (dagen)	54

Figuur 44 - Boxplot geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$) van zoute water	55
Figuur 45 - Verloop geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$) in functie van tijd (dagen)	56
Figuur 46 - Boxplot pH van zoute water	56
Figuur 47 - Verloop pH in functie van tijd (dagen)	57
Figuur 48 - Boxplot ORP (mV) van zoute water	57
Figuur 49 - Verloop ORP (mV) in functie van tijd (dagen)	58
Figuur 50 - Boxplot zoutgehalte (PSU) van zoute water	59
Figuur 51 - Verloop zoutgehalte (PSU) in functie van tijd (dagen)	59
Figuur 52 - Paarsgewijze correlatie matrix van omgevingsparameters zoute water	62
Figuur 53 - Boxplot van corrosiesnelheid van S235-staal (links) en S355-staal (rechts)	63
Figuur 54 - Verloop corrosiesnelheid (mm/jaar) in functie van tijd (dagen) voor S235-staal	65
Figuur 55 - Verloop corrosiesnelheid (mm/jaar) in functie van tijd (dagen) voor S355-staal	65
Figuur 56 - Paarsgewijze correlatie matrix van corrosiesnelheid en omgevingsparameters van S235-staal	68
Figuur 57 - Paarsgewijze correlatie matrix van corrosiesnelheid en omgevingsparameters van S355-staal	69

Lijst van afkortingen

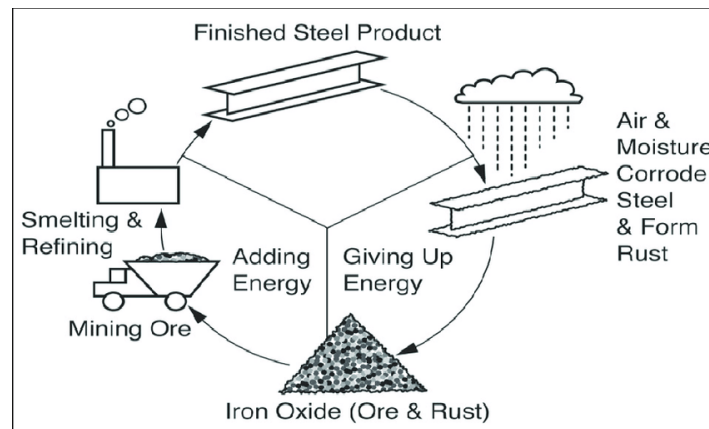
CZV:	Chemisch zuurstofverbruik
ECA:	Emission control area
EGC:	Exhaust gas cleaning
FNU:	Formazin nephelometric units
IMO:	International Maritime Organization
MCR:	Maximum continuous rating
ORP:	Oxidatiereductiepotentiaal
NOx:	Stikstofoxiden
NTU:	Nephelometric turbidity units
SOx:	Zwaveloxiden
PAK:	Polycyclische aromatische koolwaterstoffen
LPR:	Lineaire polarisatieweerstand
PSU:	Praktische saliniteitseenheden
HDPE:	Hogedichtheidpolyethyleen

1. Corrosie in scrubbers is een probleem

1.1 Wat is corrosie?

Corrosie is een natuurlijk verschijnsel waarbij materialen, vaak metalen, geleidelijk achteruitgaan door chemische reacties met hun omgeving. Net zoals water naar het laagste punt stroomt, neigen alle natuurlijke processen naar de laagst mogelijke energietoestand. Zo hebben ijzer en staal de natuurlijke neiging om te reageren met zuurstof en water. Deze reactie resulteert in de vorming van gehydrateerde ijzeroxiden, beter bekend als roest, die een soortgelijke chemische samenstelling hebben als het oorspronkelijke ijzererts (Davis, 2000). Er zijn verschillende factoren die de snelheid van corrosie beïnvloeden, waaronder diffusie, temperatuur, geleidbaarheid, type ion, pH en elektrochemisch potentieel (Seal, 2017).

Figuur 1 illustreert de corrosielevenscyclus van een staalproduct.



Figuur 1- De corrosielevenscyclus van een staalproduct

Bron: Davis, 2000

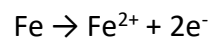
1.2 Voorwaarden voor het ontstaan van corrosie

Inzicht in het corrosieproces is essentieel voor de ontwikkeling van doeltreffende preventie- en beheersingsstrategieën. Metaalcorrosie is een complex proces dat hoofdzakelijk optreedt als gevolg van een elektrochemische reactie.

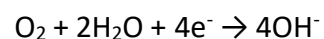
De elektrochemische corrosie cel bestaat uit vier onderdelen, zijnde de anode, de kathode, de elektronenbaan en de ionenbaan. Alle vier de componenten moeten aanwezig zijn om het corrosieproces te laten plaatsvinden.

Wanneer metaal in een elektrolyt wordt geplaatst, zorgt de anodische reactie ervoor dat het metaal oxideert, wat zal resulteren in massaverlies oftewel corrosie. De elektronen die door deze reactie worden geproduceerd, verplaatsen zich langs de metaalbaan naar het kathodische gebied, waar ze worden verbruikt in de reactie, waardoor verdere corrosie wordt voorkomen.

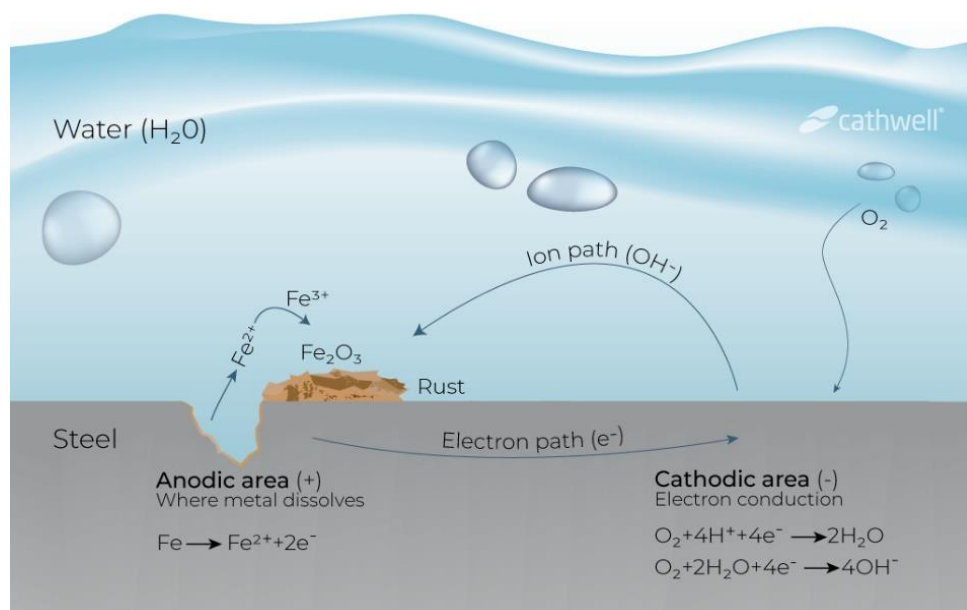
De anodische reactie kan worden voorgesteld door de oxidatie van een metaal, zoals ijzer



Zuurstof is een gebruikelijke elektronenacceptor bij corrosie en de reductie ervan in neutrale of basische media leidt tot de vorming van hydroxide-ionen



De reactie leidt tot de vorming van metaaloxide of roest aan de kathodische zijde, waar zuurstof wordt gereduceerd en reageert met het geoxideerde metaal ('What is corrosion?', 2019).



Figuur 2 - Beschrijving van corrosie - elektrochemische corrosie cel

Bron: 'What is corrosion?', 2019

1.3 Belang van corrosie

Corrosie is een belangrijke uitdaging voor verschillende industrieën. Het corrosieproces kan leiden tot enorme economische verliezen, milieuschade en veiligheidsrisico's. In een studie van de NACE International werd onderzoek gedaan naar de economische impact van corrosie. Hierin werd vastgesteld dat de wereldwijde kosten van corrosie werden geschat op 2.5 biljoen dollar, wat overeenkomt met 3.4% van het wereldwijde BNP. Er wordt geschat dat 15 tot 35% van deze kosten zouden kunnen worden bespaard indien optimale corrosiebeheerspraktijken worden toegepast (Koch et al., 2016).

In de maritieme industrie alleen worden de totale kosten van corrosie geschat op 50 tot 80 miljard dollar per jaar.

Corrosie is ook problematisch voor het milieu. Een voorbeeld hiervan is het zinken van de MV Erika. Op 8 december 1999, in de Golf van Biskaje, zonk de onder Maltese vlag varende tanker Erika met ongeveer 31 000 ton zware stookolie aan boord. De olievervuiling trof ongeveer 400km kustlijn waarbij ook bijna 42 000 vogels omkwamen. De oorzaak van deze ramp was dat het schip in twee was gebroken door een combinatie van een verzwakte structuur van het schip door corrosie en het zware weer ('Learn from the Past', 2018).

Ook op gebied van veiligheid speelt corrosie een gevaarlijke rol. Op 14 augustus 2018 stortte het viaduct van Polcevera in Italië in; hierbij kwamen 43 mensen om het leven. De bouw van de brug werd voltooid in 1967, en de instorting ervan, 51 jaar later, was grotendeels te wijten aan de slechte staat van de brug, wat een gevolg was van corrosie (Morgese et al., 2020).

2. Scrubbers

2.1 Wat is een scrubber

Milieuvervuiling vormt tegenwoordig een groot probleem in de scheepvaart. De Internationale Maritieme Organisatie (IMO) heeft berekend dat zeeschepen in 2007 1,12 miljard ton koolstofdioxide hebben uitgestoten. Dit komt overeen met de jaarlijkse broeikasgasemissies van meer dan 205 miljoen auto's (*Shipping Pollution*, z.d.). Koolstofdioxide is echter niet het enige schadelijke gas dat wordt uitgestoten door schepen, andere uitstootgassen zijn o.a. koolstofmonoxide, zwaveloxiden, stikstofoxiden, koolwaterstoffen en waterdamp (Tran, 2017).

‘Exhaust gas cleaning systems’, of scrubbers, zijn apparaten die worden geïnstalleerd in het uitlaatgassysteem van de motor en de boiler. Het wordt gebruikt om het uitlaatgas te behandelen met verschillende stoffen, waaronder zeewater, chemisch behandeld zoet water of droge stoffen om het grootste deel van de zwaveloxiden (SO_x) uit de uitlaat te verwijderen. Na het scrubben worden de propere uitlaatstoffen terug in de atmosfeer gestuurd (Tran, 2017).

2.2 Wet versus dry scrubbers?

Bij wet scrubbers wordt water gebruikt als het primaire absorptiemiddel voor het was proces. Het is de meest gebruikte keuze voor het verwijderen van verontreinigende stoffen uit gasstromen. Water heeft het vermogen om verschillende gassen en deeltjes op te vangen en op te lossen, waardoor verontreinigende stoffen doeltreffend kunnen worden verwijderd.

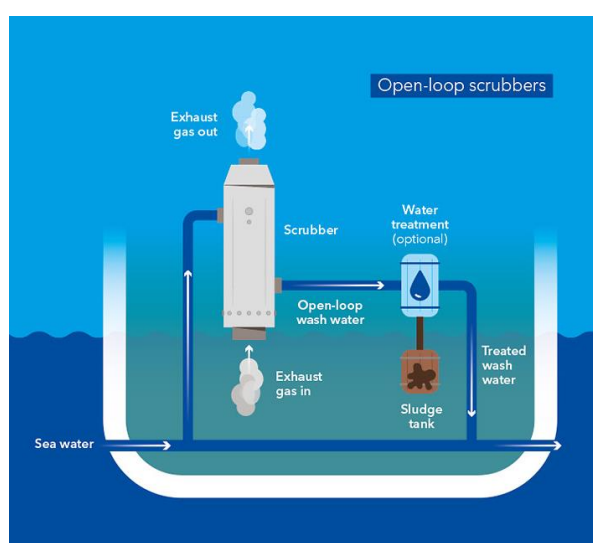
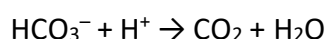
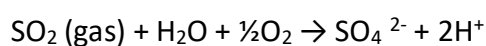
Anderzijds wordt bij droge reiniging een droog poeder of een halfdroge slurry als absorptiemiddel gebruikt. Deze absorptiemiddelen zijn ontworpen om te reageren met de in de gasstroom aanwezige verontreinigende stoffen en deze op te vangen. Droge gaswassing wordt meestal toegepast wanneer water niet geschikt of niet praktisch is voor het was proces, of wanneer specifieke verontreinigende stoffen een speciale behandeling vereisen (L. K. Wang et al., 2004).

2.3 Open loop scrubbers

2.3.1 Proces

Open loop scrubbers gebruiken zeewater voor het scrubben van de uitlaatgassen. Bij dit proces komen de uitlaatgassen via de onderkant de scrubber binnen, het zeewater wordt vanaf de bovenkant van de scrubber door sproeiers ingebracht. Het sproeien van het zeewater resulteert in een gelijkmatig verdeeld sproeipatroon in de hele scrubber. Onder de juiste temperatuur en procesomstandigheden hechten de aanwezige zwaveldeeltjes zich aan de waterdruppels. Het gereinigde uitlaatgas verlaat vervolgens de scrubber via de bovenkant, terwijl het zeewater via de onderkant overboord wordt gegoid (*Open loop scrubbers*, z.d.).

De volgende reacties (Sethi, 2021) treden op tijdens het proces:



Figuur 3 – Open loop scrubber

Bron: Mundal, 2020

2.3.2 Voor- en nadelen

Het gebruik van dit systeem voor de behandeling van uitlaatgassen heeft verschillende voordelen. Ten eerste is het ontwerp van het systeem eenvoudig, met zeer weinig bewegende delen, waardoor het gemakkelijk aan boord van schepen kan worden geïnstalleerd. Ten tweede heeft het systeem zeer weinig onderhoud nodig, behalve regelmatige inspectie en

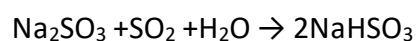
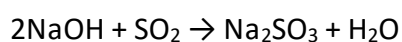
reiniging. Dit vermindert de tijd en moeite die nodig zijn om het systeem te onderhouden, waardoor het een kosteneffectieve oplossing is. Bovendien vereist het systeem geen opslagruimte voor afvalstoffen, waardoor er minder behoefte is aan extra infrastructuur en exploitatiekosten (Sethi, 2021).

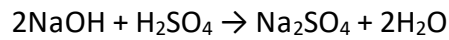
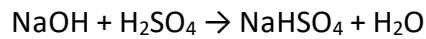
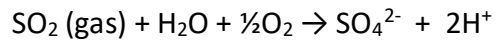
Het systeem heeft echter ook enkele nadelen. Een van de belangrijkste uitdagingen is het koelen van het uitlaatgas, wat een probleem kan zijn voor natte gaswassers. Bovendien hangt de werking van het systeem af van de alkaliteit van het beschikbare water en is het niet voor alle omstandigheden geschikt. Een ander nadeel is dat het systeem een zeer grote hoeveelheid zeewater verbruikt om een efficiënte reiniging te bereiken, wat leidt tot een hoog energieverbruik. Tenslotte vereist het systeem in emission control areas (ECA) en havens een duurder brandstofverbruik (Sethi, 2021).

2.4 Closed loop scrubbers

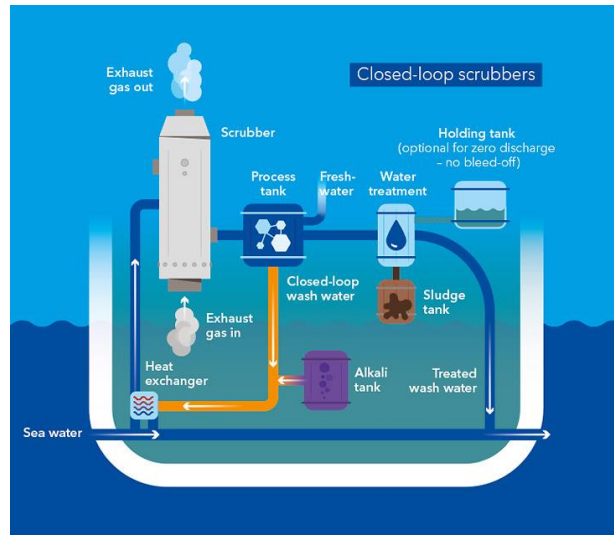
2.4.1 Proces

De closed loop scrubber werkt in verschillende fasen. Eerst komt het uitlaatgas via de onderkant de scrubber binnen. Vervolgens wordt zeewater door sproeiers aan de bovenkant van de scrubber gesproeid, waardoor een uniform sproeipatroon ontstaat. Hierdoor hechten de zwaveldeeltjes in het uitlaatgas zich aan de waterdruppels onder specifieke temperatuur- en procesomstandigheden. Het proceswater wordt vervolgens naar de circulatietank gestuurd, waar NaOH wordt toegevoegd om een eventuele zuurtegraad te neutraliseren. Het gereinigde proceswater wordt vervolgens weer naar boven gepompt. Het vervuilde water wordt afgetapt en door een afscheider geleid, die vaste stoffen en olie verwijdt om slib te vormen. Het slib wordt vervolgens naar de slibopslagtank op het schip gepompt. Hoewel dit systeem niet zoveel zeewater nodig heeft als open-loop-wassers, zijn er wel chemicaliën nodig zoals NaOH om het proceswater te neutraliseren, wat de exploitatiekosten kan verhogen (*Closed loop scrubbers*, z.d.).





(Sethi, 2021)



Figuur 4 – Closed loop scrubber

Bron: Mundal, 2020

2.4.2 Voor- en nadelen

Closed loop scrubbers hebben verschillende voordelen, zoals weinig onderhoud en onafhankelijkheid van de werkomgeving van het schip.

De koeling van het uitlaatgas kan echter een uitdaging vormen voor natte wassers. Een nadeel van closed loop scrubbers is de noodzaak van een opslagruimte, zoals een buffertank, om het afvalwater vast te houden totdat het kan worden geloosd. Bovendien kan de montage van het systeem complex zijn, vooral voor motoren met twee brandstoffen (Sethi, 2021).

2.5 Hybride scrubbers

De hybride scrubber is ontworpen om zowel in de open als in de gesloten lus te werken, waardoor het waswater kan worden hergebruikt of rechtstreeks in zee kan worden geloosd. De omschakeling tussen deze modes werkt via op afstand bediende kleppen. Dit systeem wordt vooral gebruikt door schepen die op open zee opereren, maar ook in havens en gebieden varen waar overboord lozen niet is toegestaan (*Hybrid scrubbers*, z.d.).

2.5.1 Voor- en nadelen

De hybride scrubber heeft verschillende voordelen ten opzichte van andere systemen. Een belangrijk voordeel is dat het geschikt is voor zowel lange als korte reizen, waardoor het ideaal is voor schepen die wereldwijd reizen. Schepen die zijn uitgerust met hybride wassers kunnen meer tijd doorbrengen in ECA-zones en havens waar strenge voorschriften gelden. Bovendien kunnen hybride gaswassers altijd gebruik maken van minder dure zware stookolie (Sethi, 2021).

De hybride scrubber heeft echter ook enkele nadelen. Het vereist meer structurele aanpassingen om een dergelijk apparaat op een schip te installeren, waardoor de installatietijd en -kosten toenemen. Bovendien heeft het systeem een grote opslagruimte nodig voor chemicaliën en additieven, waardoor de kosten en de benodigde ruimte toenemen (Sethi, 2021).

2.6 Voor- en nadelen van het gebruik van scrubbers

Scrubbers worden aan boord gebruikt om de schadelijke stoffen zoals zwaveloxiden en fijn stof die vrijkomen bij de verbranding van zware stookolie, te verminderen. Dit zorgt ervoor dat schepen zware stookolie, die goedkoop en ruim beschikbaar is, kunnen blijven gebruiken. Het gebruik van scrubbers helpt schepen ook om de regelgeving van de IMO inzake zwavelemissies na te leven.

Er zijn echter ook enkele nadelen aan het gebruik van scrubbers. Het afgevoerde waswater wordt als schadelijk voor het milieu beschouwd. Volgens World Wildlife Fond is het grote probleem met scrubbers dat ze de luchtvervuiling niet elimineren, maar slechts omzetten in waterverontreiniging (Davin, 2020). In een studie van het Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen wordt geschat dat indien 15% tot 35% van de schepen die in het Engelse Kanaal en de zuidelijke Noordzee vaart, zou worden uitgerust met een open loop of hybride scrubber, de pH elk jaar met 0,004 tot 0,010 pH-eenheden zou dalen, ongeveer evenveel als de oceaan in twee tot vier jaar verzuurt ten gevolge van de klimaatverandering (Dulière et al., 2020).

Door de aanwezigheid van SO_x in combinatie met het zure zeewater is corrosie ook een groot probleem bij scrubbers (Arrieta, 2021). In 2019 verspreidde een video van een falende open loop scrubber zich op sociale media. De clip laat zien hoe grote hoeveelheden waswater op de hoofdmotor van het schip worden gegoten. De oorzaak hiervan was corrosie in de scrubber (Bajic, 2019).

2.7 Discharge limits

Zeewater wordt aan boord gepompt en na het scrubben weer afgevoerd. Het afgevoerde water moet voldoen aan de 'IMO's scrubber wash water discharge limits'.

De scheepvaartsector moet voldoen aan een pH-limiet en een maximumtemperatuur voor geloosd waswater. Er zijn twee mogelijkheden om hieraan te voldoen. De eerste optie vereist dat de pH van het waswater niet lager is dan 6.5, met als uitzondering bij het uitvoeren van manoeuvres, en een maximumverschil van 2 pH-eenheden tussen de inlaat en de uitlaat. De tweede optie schrijft voor dat de pH van het waswater extern van het schip wordt gemeten. Ze moet binnen een grens liggen die overeenkomt met een pH-waarde van 6.5 of hoger dan 4 meter van het schip, dit is het punt waar het geloosde water en het omringende zeewater zich beginnen te vermengen (*What Are the Wash Water Discharge Regulations?*, z.d.).

De IMO-regelgeving schrijft voor dat de polycyclische aromatische koolwaterstoffenconcentratie (PAK) in het waswater een bepaalde grenswaarde niet mag overschrijden. Deze grenswaarde wordt bepaald op basis van de maximale continue PAK-concentratie in het waswater en mag niet meer dan 50 µg/L PAK_{phe} (fenantreen-equivalent) boven de PAK-concentratie in het inlaatwater bedragen. De grenswaarde van 50 µg/L is gebaseerd op een waswaterdebiet van 45 t/MWh door de Exhaust Gas Cleaning (EGC) installatie, wat overeenkomt met de Maximum Continuous Rating (MCR) of 80% van het vermogen van de stookinstallatie. Indien het waswaterdebiet per MWh lager of hoger is dan dit, moet de grenswaarde overeenkomstig worden aangepast, zoals aangegeven in de tabel 1 (*10.1 Washwater discharge criteria footnote*, 2009).

Tabel 1 - Debiet (t/MWh), Grenswaarde lozingsconcentratie ($\mu\text{g/L}$ PAH_{phe}-equivalenten) en Meettechnologie

Bron: 10.1 Washwater discharge criteria footnote, 2009

Flow Rate (t/MWh)	Discharge Concentration Limit($\mu\text{g/L}$ PAH _{phe} equivalents)	Measurement Technology
0 – 1	2250	Ultraviolet Light
2.5	900	– ” –
5	450	Fluorescence ^{footnote}
11.5	200	– ” –
22.5	100	– ” –
45	50	– ” –
90	25	– ” –

Het turbiditeitsniveau in het waswater mag niet hoger zijn dan 25 formazin nephelometric units (FNU) of 25 nephelometric turbidity units (NTU) boven de turbiditeit van het inlaatwater op continue basis. Tijdens periodes van hoge inlaatturbiditeit kan de meting van het verschil tussen de inlaat- en de uitlaatturbiditeit echter onbetrouwbaar zijn. Daarom moeten alle metingen van het verschil in turbiditeit een gemiddelde zijn over een periode van 15 minuten, met een maximum van 25 FNU (10.1 Washwater discharge criteria footnote, 2009).

Het waswaterbehandelingssysteem gebruikt in scrubbers moet zodanig zijn ontworpen dat de lozing van nitraten boven een bepaalde grenswaarde wordt voorkomen. De grenswaarde is gebaseerd op het niveau van stikstofoxiden-verwijdering (NO_x) dat in de uitlaatgassen van het schip wordt bereikt. De maximale nitraatconcentratie in de lozing moet overeenkomen met een verwijdering van 12% NO_x uit de uitlaatgassen. Bovendien mag de grenswaarde niet hoger zijn dan 60 mg/L, waarbij een waswaterlozing van 45 ton/MWh de grootste is (10.1 Washwater discharge criteria footnote, 2009).

Om ervoor te zorgen dat het water voldoet aan deze limieten wordt er heel veel zeewater aan boord genomen, dit zorgt voor lagere concentraties schadelijke stoffen, lagere temperatuur en lagere PH. Door de grote hoeveelheid zeewater, ontstaat er ook een grote hoeveelheid waswater. Dit waswater is schadelijk voor het milieu en vereist een grote pompcapaciteit.

Het waswater aanwezig in de scrubbers is vanwege zijn specifieke eigenschappen een ideale omgeving voor het ontstaan van corrosie.

3. Samenstelling waswater

3.1 Sulfaten

Het waswater bevat zwaveloxiden die ontstaan bij het verbranden van brandstoffen met een hoog zwavelgehalte. Scrubbers zorgen ervoor dat de atmosferische SO_x-emissies verminderen tot een niveau dat gelijkwaardig is aan de vereiste zwavelgrenswaarde voor stookolie. Tijdens dit proces zetten open loop en hybride scrubbers de luchtvervuiling om in directe zeevervuiling, wat resulteert in zwaveloxiden in het waswater (Comer et al., 2020).

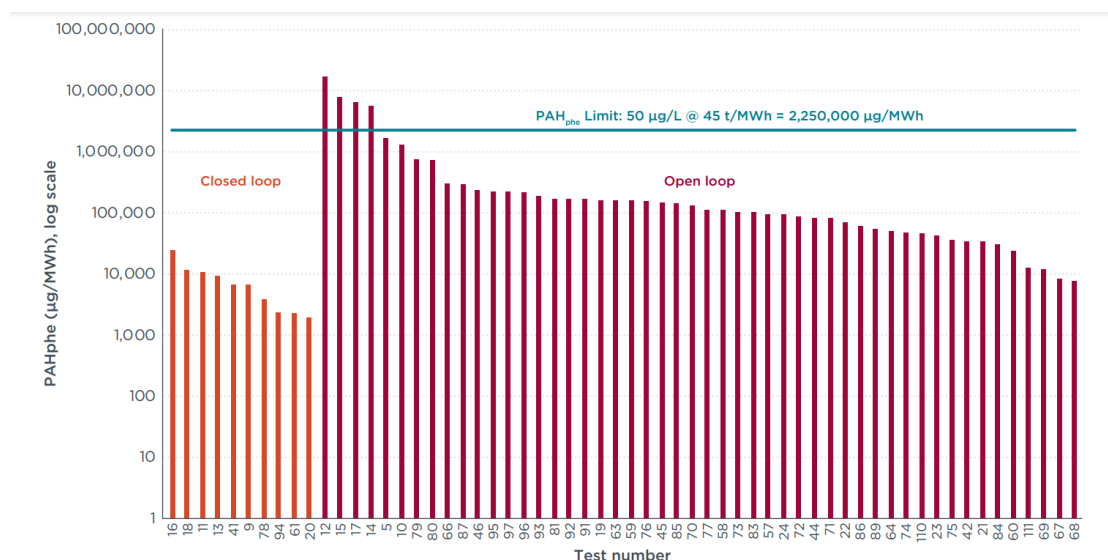
Wanneer zwaveldioxide in water wordt opgelost, ondergaat het een reactie die resulteert in de ionisatie van zwaveldioxide in bisulfiet- en sulfietionen. Door de aanwezigheid van zuurstof in zeewater worden deze ionen gemakkelijk geoxideerd tot sulfaat. Dit chemische oxidatieproces draagt bij tot een verhoging van het chemisch zuurstofverbruik (CZV) van het water. Het CZV is een maat voor de theoretische hoeveelheid zuurstof die door de organische en anorganische stoffen in een watermonster wordt verbruikt. De toename van het CZV als gevolg van de oxidatie van sulfiet- en bisulfietionen kan nadelige gevolgen hebben voor aquatische systemen, aangezien dit een grotere vraag naar zuurstof met zich meebrengt, wat kan leiden tot zuurstofdepletie en negatieve gevolgen kan hebben voor de organismen en het ecologisch evenwicht van het aquatisch milieu (Albert & Fan, 2011).

In een studie van het Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen werd een model gebruikt om de emissies van zwaveloxiden in de atmosfeer en hun daaropvolgende inbreng in het zeewater te beoordelen. Het model houdt rekening met het effect van deze emissies op het oppervlak van het zeewater. Wanneer SO_x in contact komt met zeewater, reageert het met de in het water aanwezige alkaliteit, wat resulteert in neutralisatie. Het oplossen van SO₂ in zeewater resulteert in de vorming van zwavelzuur, wat de concentratie van H⁺ ionen verhoogt. Dit proces kan de pH van het zeewater verlagen, waardoor de zuurtegraad wordt beïnvloed (Dulière et al., 2020).

3.2 Polycyclische aromatische koolwaterstoffen

Het waswater bevat ook polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK). PAK's vormen een belangrijke groep stoffen die bekend staan om hun kankerverwekkende eigenschappen. Zij bestaan uit verschillende chemische verbindingen met twee of meer gesmolten aromatische ringen. Hoewel PAK's van nature voorkomen in aardolie, worden zij voornamelijk geproduceerd als bijproducten bij de verbranding van brandstoffen. Deze verbindingen worden beschouwd als milieuverontreinigende stoffen en kunnen zich in de loop der tijd in ecosystemen accumuleren. Wegens hun mogelijke schadelijke effecten zijn de aanwezigheid en de accumulatie van PAK's in het milieu zowel uit ecologisch oogpunt als uit het oogpunt van de menselijke gezondheid zorgwekkend (Albert & Fan, 2011).

Tijdens een onderzoek van de International Council on Clean Transportation werden bij 60 schepen testen gedaan naar de PAK's in het waswater. Hiervan lagen er 4 boven de toegelaten waardes opgesteld door de IMO. De overige studies die open-loop lozingen registreerden vonden PAK-emissies variërend van 7.000 tot 1.600.000 µg/MWh, met een gemiddelde van 900.000 µg/MWh. Het grote bereik wijst erop dat de PAK-emissies in het waswater niet consistent zijn (Comer et al., 2020).



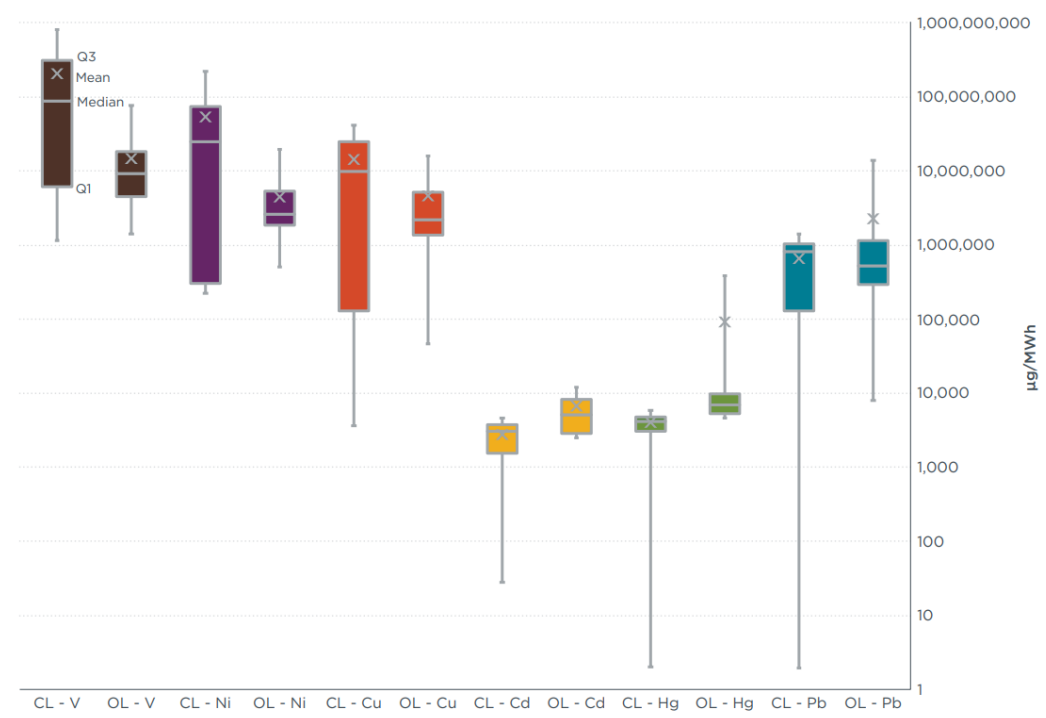
Figuur 5 - PAHphe in scrubber waswater

Bron: Comer et al., 2020

3.3 Metalen

De meest voorkomende metalen in waswater zijn vanadium, nikkel, koper, cadmium, kwik en lood. Van deze metalen zijn vanadium, nikkel en koper het sterkst vertegenwoordigd (Comer et al., 2020). Deze metalen komen terecht in het waswater door middel van verbranding van brandstoffen en smeermiddelen (Albert & Fan, 2011).

Metalen omvatten een breed pakket aan verontreinigende stoffen, en vele daarvan vormen een bedreiging voor zowel het waterleven als de menselijke gezondheid. Terwijl bepaalde metalen zoals koper, nikkel en zink noodzakelijk zijn voor het goed functioneren van organismen, zijn er verschillende andere, zoals thallium en arsenicum, die ofwel niet essentieel zijn of waarvan bekend is dat ze uitsluitend schadelijke effecten hebben. Zelfs essentiële metalen kunnen in hoge concentraties schadelijk worden en ernstige schade toebrengen aan het functioneren van organismen (Albert & Fan, 2011).



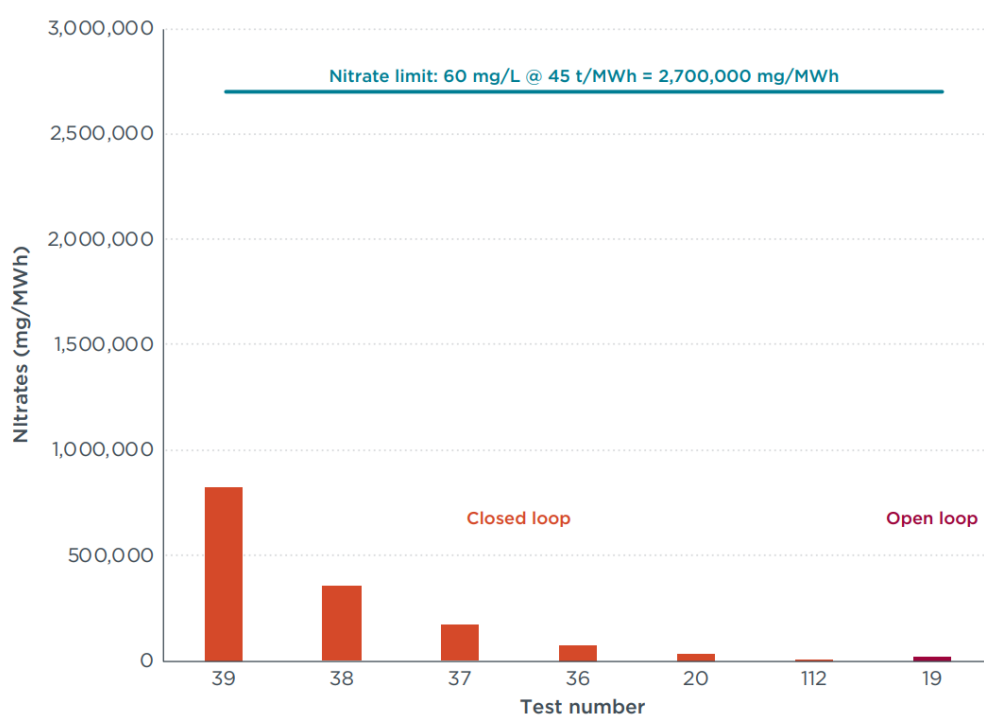
Figuur 6 - Lozingen van zware metalen (µg/MWh) voor gesloten (CL) en open (OL) wassers

Bron: Comer et al., 2020

3.4 Nitraten

Figuur 7 laat zien dat nitraten vooral een probleem zijn bij closed loop scrubbers. Het gemiddelde bij het closed loop waswater bedroeg ongeveer 125.000 mg/MWh, deze waarde ligt ver onder de IMO-regelgeving. Bij het zoeken naar nitraten in open loop scrubbers werden er weinig tot geen nitraten gevonden. Dit bewijst dat nitraten minder problematisch zijn in het onderzoek naar waswater (Comer et al., 2020).

Nitraat is een sterk geoxideerde vorm van stikstof, en wanneer het in te hoge concentraties in aquatische systemen aanwezig is, kan het schadelijke gevolgen hebben. Hoge concentraties van nitraat kunnen leiden tot een snelle groei van algen, met als gevolg algenbloei en eutrofiëring. Dit verstoort het evenwicht en de werking van het aquatische ecosysteem, met een reeks problemen tot gevolg. Een van de gevolgen is een daling van het zuurstofgehalte in het water, dat essentieel is voor het overleven van vissen en schelpdieren. Dit zuurstofgebrek kan leiden tot het sterven van vissen en een negatief effect hebben op de algemene biodiversiteit en gezondheid van het aquatisch milieu (Behrends & Liebezeit, 2003).



Figuur 7 – Nitraten in scrubber waswater

Bron: Comer et al., 2020

3.5 PH

Uit figuur 8 blijkt dat de gemiddelde pH van het waswater bij de uitlaat tussen 3 en 7 ligt. Voor de meeste schepen ligt deze waarde onder de door de IMO toegestane pH-waarde. Bij het buitengaan van de scrubber ligt de gemiddelde pH-waarde zelfs tussen 2.5 en 5.5. Voordat het waswater van boord wordt geloosd, wordt zeewater toegevoegd om de pH te neutraliseren (Comer et al., 2020)

Water met een lage pH-waarde kan schadelijke gevolgen hebben voor mariene organismen. Veel organismen zijn afhankelijk van stabiele milieuomstandigheden om te overleven, en een daling van de pH-waarde vormt een risico voor hun welzijn. De Internationale Maritieme Organisatie erkent dat kortstondige blootstelling aan zeewater met een pH-waarde van 6,5 over het algemeen geen significante milieuschade veroorzaakt. Het is echter belangrijk op te merken dat langdurige of chronische blootstelling aan lage pH-waarden ernstigere gevolgen kan hebben voor mariene organismen (Albert & Fan, 2011).



Figuur 8 – pH in scrubber waswater

Bron: Comer et al., 2020

3.6 Temperatuur

Zoals aangegeven in figuur 9 hebben gaswassers een groot temperatuurbereik. De begintemperatuur bij de gasinlaat in de scrubber is 380°C, waardoor de wanden van de scrubber tot ongeveer 200°C opwarmen. Vervolgens gaat het gas door een overgangsgebied waar de temperatuur snel daalt van 380°C tot de verzadigingstemperatuur van ongeveer 60°C. Door dit plotselinge afkoelingsproces condenseren zuren op de scrubber-wanden, waardoor zeer corrosieve omstandigheden ontstaan. Om het gas verder af te koelen wordt zeewater gebruikt, dat lichtjes wordt verwarmd en zuur wordt door de SO₂-opname. Daardoor worden de scrubberwanden voortdurend blootgesteld aan warm, zuur en reducerend zeewater (Aragon et al., 2009).

Fluid characteristic	Inlet scrubber	Outlet scrubber	Outlet ship
Seawater pH	7.6–8.3	2.5–5.5	5.0–6.5
Seawater temperature (°C)	0–25	15–60	<40
Exhaust gas temperature (°C)	240–380	26–60	26–60

Figuur 9 - Vloeistof karakteristiek bereik over scrubber

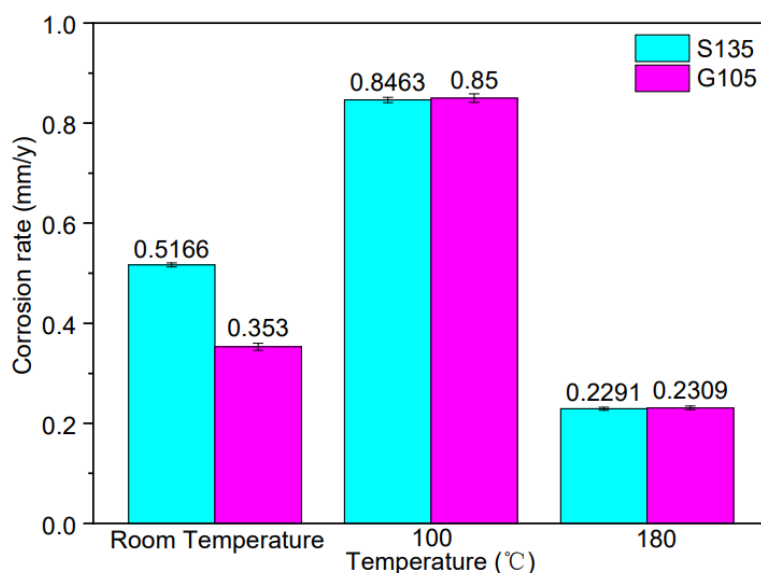
Bron: Aragon et al., 2009

4. Link met corrosie

4.1 Effect van temperatuur

In scrubberomgevingen is er een groot bereik aan temperaturen. Omdat scrubbers temperaturen kunnen bereiken van 15°C tot en met 380°C is het van belang te onderzoeken hoe deze verschillende temperaturen de corrosiesnelheid beïnvloeden.

Bij een recent onderzoek werd op twee soorten staal het gedrag van corrosie bij drie verschillende temperaturen getest. In de gesimuleerde condenswateromgeving met corrosieve CO₂- en H₂S-gassen vertoonden de corrosiesnelheden van S135- en G105-staal een patroon waarbij zij aanvankelijk toenamen en vervolgens afnamen met stijgende temperaturen. Meer bepaald bereikten de corrosiesnelheden bij 100°C hun hoogste punt, wat wijst op de belangrijkste corrosie voor beide staalsoorten. Omgekeerd werden bij kamertemperatuur relatief lage corrosieniveaus waargenomen. Interessant is dat bij 180°C de corrosiesnelheden voor beide staalsoorten het laagst waren, wat wijst op de minste corrosie onder deze omstandigheden (Gao et al., 2022).



Figuur 10 – Corrosiesnelheid voor verschillende temperaturen

Bron: Gao et al., 2022

4.2 Effect van pH

Omdat de zwaveloxiden in de scrubbers reageren met zeewater tot de vorming van zwavelzuur, resulteert dit in de gaswaster tot een milieu met een lage pH, tussen 2,5 en 5,5. Dit zure milieu zal de corrosiesnelheid beïnvloeden.

Figuur 11 geeft een grafische voorstelling van het verband tussen pH en corrosiesnelheid. Hieruit blijkt dat de corrosiesnelheid toeneemt naarmate de pH daalt; een dalende pH wijst op een toename van de zuurtegraad. Dit effect is te wijten aan het feit dat zure oplossingen met lage pH-waarden corrosie bevorderen door waterstofionen te leveren. Deze waterstofionen vallen het oppervlak van het staal aan en beschadigen het, waardoor het gewichtsverlies toeneemt. Bovendien speelt de pH een cruciale rol bij het versnellen van de corrosiesnelheid van metalen. Hogere pH komen overeen met hogere corrosiesnelheden, wat het effect van de pH op het corrosieproces benadrukt (Prawoto et al., 2008).

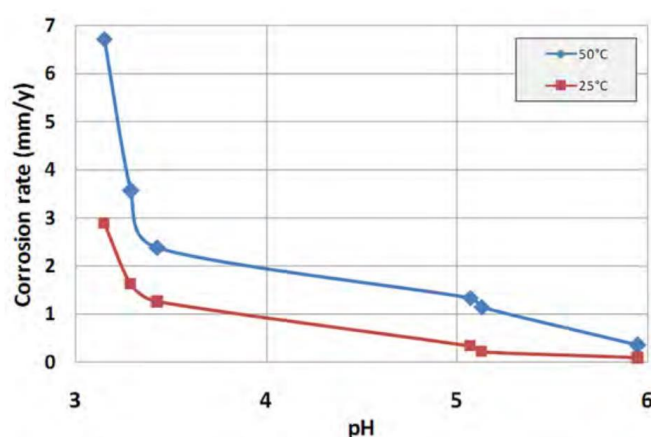


Figure 3. Effect of the pH on the corrosion rate

Figuur 11 - Effect van de pH op de corrosiesnelheid

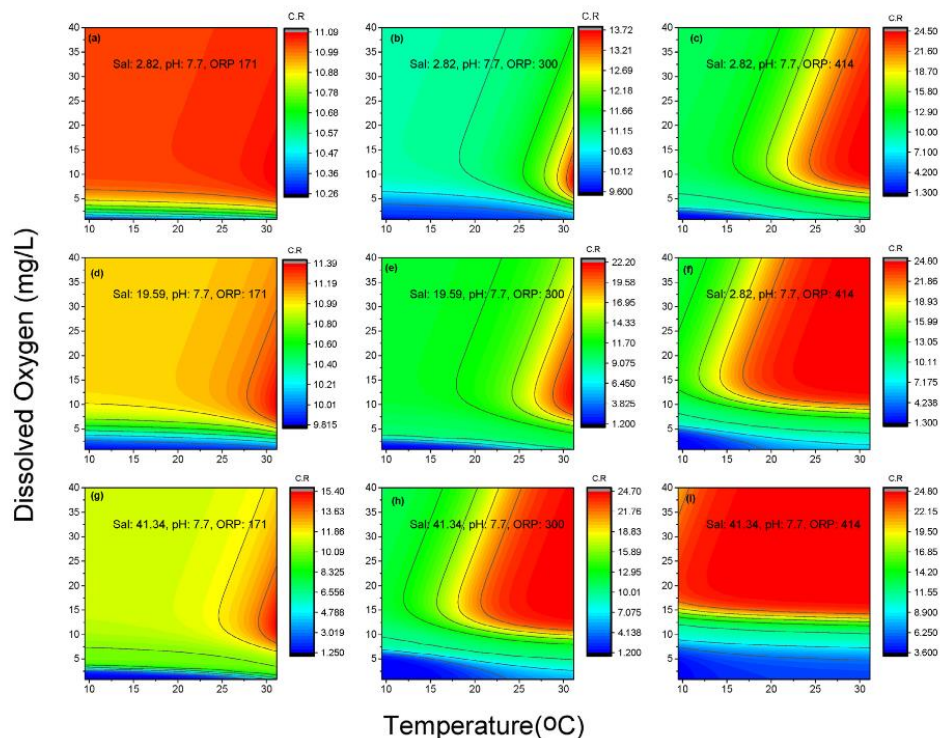
Bron: Prawoto et al., 2008

4.3 Effect van opgeloste zuurstof

De snelheid van het totale corrosieproces wordt bepaald door de langzaamste stap, in dit geval de reductiereactie. In neutrale of bijna neutrale oplossingen met een pH tussen 4 en 9 is de corrosiesnelheid van ijzer en staal bij kamertemperatuur verwaarloosbaar vanwege de

lage concentratie waterstofionen. In aanwezigheid van opgeloste zuurstof verloopt de reductiereactie op de kathodische oppervlakken van het metaal echter veel sneller: $2\text{H}^+ + 1/2 \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$. De aanwezigheid van zuurstof zorgt voor een snellere reactie dan bij afwezigheid van zuurstof. Om te kunnen reageren moet de opgeloste zuurstof echter het metaaloppervlak bereiken en dit gebeurt door diffusie in de oplossing. Daarom wordt de corrosiesnelheid beperkt door de diffusiesnelheid van de opgeloste zuurstof. Aangezien de diffusiesnelheid recht evenredig is met de opgeloste zuurstofconcentratie, volgt daaruit dat de corrosiesnelheid ook recht evenredig is met de opgeloste zuurstofconcentratie (Porte, 1967)

De Gyeongsang National University in Zuid-Korea ontwikkelde een model om het gecombineerde effect van milieufactoren (temperatuur, opgeloste zuurstof, zoutgehalte, pH-waarden en oxidatiereductiepotentiaal) op de corrosiesnelheid te simuleren. Dit model (figuur 12) bewijst onder andere dat naarmate het gehalte aan opgeloste zuurstof toeneemt, ook de corrosiesnelheid snel toeneemt (Lee et al., 2021).



Figuur 12 - Voorspelde corrosiesnelheid als functie van temperatuur en opgeloste zuurstof bij minimale, gemiddelde en maximale waarden van het zoutgehalte en ORP-waarden bij de gemiddelde pH-waarde (7.77)

Bron: Lee et al., 2021

4.4 Effect van zoutgehalte

Zoutgehalte is een maat voor de zoutconcentratie in water. Het is een maat voor het totale gehalte aan opgelost zout, meestal uitgedrukt in delen per duizend of als een percentage. Het zoutgehalte wordt bepaald door de hoeveelheid verschillende zouten, zoals natriumchloride, magnesiumchloride en calciumsulfaat, die in het water zijn opgelost.

Bij het model in figuur 12 werden minimum-, gemiddelde en maximumwaarden van het zoutgehalte gebruikt. De resultaten van dit model toonden aan dat voor de gemiddelde en maximale waarden de corrosiesnelheid gemiddeld hoger lag. Het zoutgehalte van zeewater ligt rond de 35 delen per duizend, wat verklaart dat de zoutconcentratie in scrubbers het corrosieproces bevordert (Lee et al., 2021).

4.5 Effect van oxidatiereductiepotentiaal

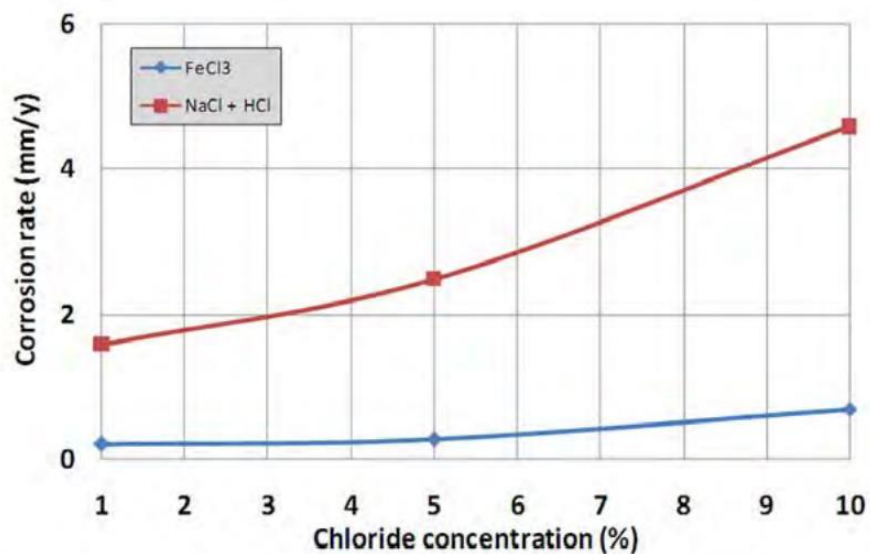
Oxidatiereductiepotentiaal, vaak ORP genoemd, is een maat die het vermogen van een stof om een andere stof te oxideren of te reduceren bepaalt. ORP wordt meestal gemeten met behulp van speciale elektroden in een ORP-meter. Wanneer de ORP-meter een positieve waarde aangeeft, betekent dit dat de gemeten stof oxideert en elektronen van andere stoffen kan opnemen. Omgekeerd geeft een negatieve ORP-meting aan dat de stof functioneert als een reductiemiddel, dat elektronen kan afstaan aan andere stoffen. De ORP-meting verschaft waardevolle inzichten in de redoxreacties en het gedrag van stoffen in chemische processen (Kremer, 2018).

De ORP in zeewater, dat in open loop scrubbers wordt gebruikt, ligt gewoonlijk tussen 300 en 450 mV. In figuur 12 wordt duidelijk dat bij deze hogere ORP-waarden de corrosiesnelheid ook toeneemt.

4.6 Effect van chloride

De aanwezigheid van chloride-ionen in zure oplossingen heeft een aanzienlijk effect op het corrosiegedrag van roestvrij staal, zoals blijkt uit figuur 13. De toevoeging van chloride-ionen

leidt tot een afbraak van de passiviteit, die optreedt boven een bepaalde potentiaal die afneemt met toenemende chlorideconcentratie. Door dit proces kunnen chloride-ionen langzaam het staaloppervlak binnendringen, waardoor de beschermende film wordt vernietigd en corrosie begint. Chloride-geïnduceerde corrosie toont zich typisch als uniforme putjes over het oppervlak van het staal, gekenmerkt door ondiepe, onregelmatig gevormde putjes met een vlakke bodem. Chloride-ionen dringen het metaal binnen via verschillende mechanismen, voornamelijk diffusie en capillaire absorptie (Prawoto et al., 2008).



Figuur 13 - Effect van de chlorideconcentratie op de corrosiesnelheid

Bron: Prawoto et al., 2008

5. Onderzoeksdoelstelling

Het hoofddoel van dit onderzoek is het begrijpen en kwantificeren van de corrosieprocessen die optreden in scrubbersystemen, waarbij we ons vooral richten op de impact van verschillende omgevingsparameters en chemische additieven op de corrosiesnelheid. Voor dit experiment willen we de corrosie meten zoals die optreedt in een omgeving waar ook scrubbersystemen aan worden blootgesteld en de omgevingsfactoren die hiermee gepaard gaan analyseren. Deze kennis is cruciaal voor het verbeteren van de levensduur en efficiëntie van scrubbers in maritieme omgevingen.

Om ons onderzoeksdoel te bereiken, hebben we een experimentele opstelling ontworpen om de operationele omstandigheden van een echt scrubbersysteem nauwkeurig na te bootsen. Het experiment bestaat uit een kubusvormige tank gevuld met 1000 liter water, dat continu door een gietijzeren pijp wordt gepompt. Door middel van enkele sensoren kunnen we zowel de corrosie meten die optreedt in de omgeving als de omgevingsparameters die de waterkwaliteit beïnvloeden.

De beginfase van het experiment bestaat uit het laten lopen van het systeem met gewoon water om een controle vast te stellen voor corrosie en omgevingsparameters zonder chemische toevoegingen. Tijdens deze fase meten we de corrosiesnelheden en registreren we omgevingsparameters zoals temperatuur, pH, opgeloste zuurstof, geleidbaarheid en redoxpotentiaal. Dit helpt ons om de natuurlijke corrosieprocessen te begrijpen in afwezigheid van externe invloeden.

Na het controle-experiment simuleren we de corrosieve omstandigheden die in maritieme omgevingen voorkomen door 24,53 kilogram zout aan de 1000 liter water toe te voegen om zeewater na te bootsen. Deze zoutconcentratie is gekozen om het zoutgehalte van natuurlijk zeewater weer te geven. Vervolgens meten we de corrosiesnelheden en omgevingsparameters opnieuw om te observeren hoe het verhoogde zoutgehalte de corrosieprocessen beïnvloedt.

In de laatste fase bestuderen we de invloed van zwaveloxiden op corrosie, vergelijkbaar met de omstandigheden in gaszuiveringsinstallaties. We voegen 1 kilogram natriumsulfiet toe aan het zoutwatermengsel om de aanwezigheid van zwaveloxiden te simuleren die vaak voorkomen in de uitlaatgassen van gaswassers. We blijven de corrosiesnelheden en

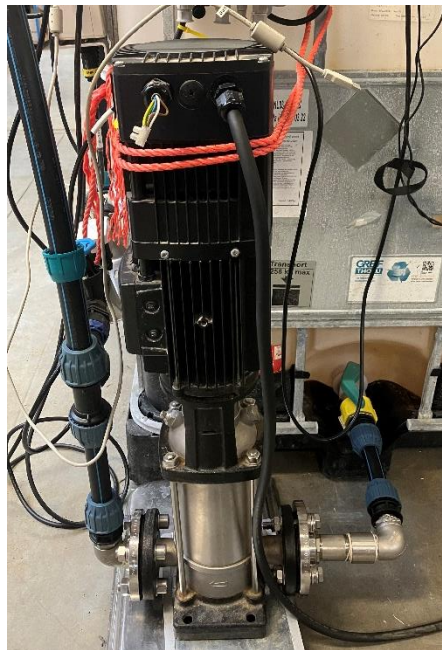
omgevingsparameters meten, waarbij we ons concentreren op de veranderingen die worden
teweeggebracht door de toevoeging van natriumsulfiet.

6. Methode

6.1 Opstelling

De experimentele opstelling die ontworpen is om de corrosieprocessen in gaswassers te onderzoeken is ontworpen zodat een nauwkeurige simulatie en meting van de werkelijke omstandigheden gegarandeerd is. De kern van het systeem is een Intermediate Bulk Container (IBC) van 1000 liter, die dient als hoofdreservoir voor het water dat gebruikt wordt in de experimenten. Deze container, die bekend staat om zijn duurzaamheid en robuuste structuur, vormt een stabiele basis voor de hele opstelling.

Om een consistente waterstroom door het hele systeem te handhaven, wordt een Grundfos CRNE 5 pomp gebruikt (Figuur 14). Deze hoogrendementspomp is specifiek gekozen vanwege zijn corrosiebestendige eigenschappen en zijn vermogen om water met verschillende zoutgehaltes en chemische samenstellingen te verwerken, wat cruciaal is voor het simuleren van de omstandigheden waaraan gaswassers worden blootgesteld in maritieme omgevingen.

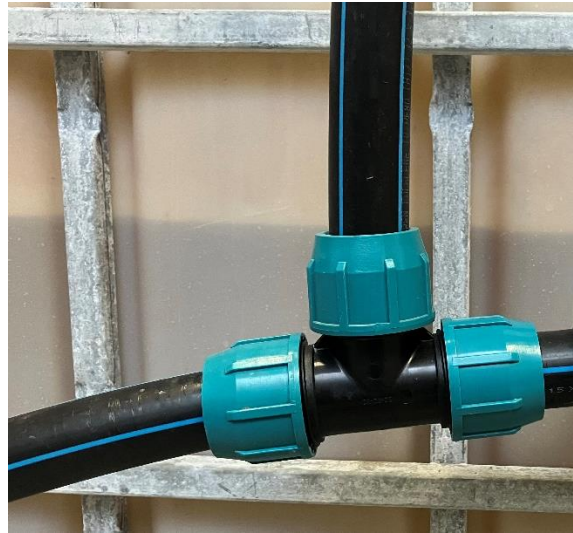


Figuur 14 - Grundfos CRNE 5 pomp

Bron: eigen werk

Het water wordt door het systeem getransporteerd met behulp van buizen van hogedichtheidpolyethyleen (HDPE) met een diameter van 32 mm (Figuur 15). Deze buizen zijn geselecteerd vanwege hun hoge duurzaamheid en corrosiebestendigheid, waardoor de

waterstroom ononderbroken en stabiel blijft. Er worden verschillende adapters en connectoren gebruikt om de verschillende onderdelen van het systeem te integreren. Een adapter verbindt de IBC-container met het hoofdleidingsysteem, via roestvrijstalen en polyethyleen fittingen voor veilige en lekvrije verbindingen.



Figuur 15 - HDPE buizen met polyethyleen T-verbinding

Bron: eigen werk

Concreeet verbindt een adapter de IBC-container met een 2-inch pijp, die vervolgens wordt gereduceerd tot een 1-inch pijp met behulp van een Inox-adapter. Verdere verbindingen worden gemaakt met polyethyleen koppelingen en ellebogen, die de noodzakelijke richtingsveranderingen en overgangen tussen verschillende pijpmaten mogelijk maken. Een roestvaststalen slangkoppeling maakt flexibele slangverbindingen binnen het systeem mogelijk, terwijl T-stukken en eindkappen van polyethyleen de aftakking en beëindiging van de leidingen regelen. Het waterdebiet wordt geregeld met een kogelkraan van 1 inch, waardoor het debiet nauwkeurig kan worden geregeld.

Het waterdebiet wordt gemeten met een digitale IOT-watmeter, zodat het waterdebiet nauwkeurig en in real-time wordt bewaakt. Corrosiesnelheden worden gemeten met twee geavanceerde sondes: de C-Cube LPR-sonde (lineaire polarisati weerstand) en de Cosasco LPR-sonde. Deze sondes leveren real-time gegevens over corrosiesnelheden en maken gebruik van de lineaire polarisati weerstandstechniek om nauwkeurige metingen te leveren (Figuur 16).

Omgevingsparameters zoals temperatuur, pH, opgeloste zuurstof en andere worden bewaakt met de Scuba 90 multi-parametersonde van Eijkelpomp. Deze sonde, uitgerust met verschillende sensoren, levert uitgebreide gegevens over de watercondities, wat essentieel is voor het begrijpen van de factoren die corrosiesnelheden beïnvloeden. Om een consistente en gelijkmatige waterstroom door de meetsensoren te garanderen, wordt een stromingscel gebruikt. Dit onderdeel houdt de sensoren op hun plaats en zorgt voor een constante waterstroom, waardoor nauwkeurige metingen gegarandeerd zijn.



Figuur 16 - De Scuba 90 (links), de C-Cube (midden) en de COSASCO (rechts)

Bron: eigen werk

Extra onderdelen zijn onder andere een DN80 gietijzeren pijp (Figuur 17) die fungeert als hoofdleiding voor de waterstroom waar een hoge duurzaamheid vereist is. Universele pijpconnectoren en flenzen zorgen voor veilige en lekvrije verbindingen tussen verschillende delen van het leidingsysteem, waardoor de integriteit en betrouwbaarheid van de opstelling behouden blijft.



Figuur 17 - DN80 gietijzeren pijp

Bron: eigen werk

Samengevat is de opstelling zorgvuldig ontworpen om de operationele omgeving van gaswassers te simuleren en om de verschillende parameters die corrosie beïnvloeden nauwkeurig te meten. Elk onderdeel is zorgvuldig geselecteerd en geïntegreerd om de betrouwbaarheid en precisie van de experimentele resultaten te garanderen. Deze uitgebreide aanpak maakt een gedetailleerde analyse mogelijk van de corrosieprocessen in gaswassers, wat waardevolle inzichten oplevert voor de maritieme industrie.

6.2 Sensoren

6.2.1 Scuba 90

Voor het meten van de omgevingsparameters werd een sensor van het type Scuba90 gebruikt, geproduceerd door Royal Eijkelkamp Soil & Water B.V (Figuur 18).

De Scuba 90 is een geavanceerde, draagbare sensor die gebruikt wordt om verschillende waterparameters over langere perioden te meten. Hij is uitgerust met een reinigingssysteem om de sensoren schoon te houden en de impact van biofouling, typisch voor langdurige toepassingen, te minimaliseren. De Scuba 90 beschikt over een set standaard sensoren waaronder temperatuur, pH, elektrische geleidbaarheid, turbiditeit en opgeloste zuurstof. Daarnaast zijn ORP- en dieptesensoren optionele uitbreidingen voor verdere aanpassingen.

De Scuba is 450 mm lang en heeft een diameter van 90 mm. De sensor kan worden gebruikt in water tot 50°C en 200 meter diep en heeft een geheugen voor 1.000.000 metingen (Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022).



Figuur 18 - De Scuba 90

Bron: Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022

Temperatuur

De temperatuursensor bestaat uit een thermistor, dit is een elektrische weerstand die zijn weerstand op een voorspelbare manier verandert naarmate de temperatuur schommelt. De thermistors, die ter bescherming in een roestvrijstalen buis zitten, vertonen een hoge stabiliteit in de loop van de tijd, waardoor ze niet vaak gekalibreerd hoeven te worden (Figuur 19)(Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022).



Figuur 19 - Temperatuur sensor

Bron: Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022

Opgeloste zuurstof

De optische opgeloste-zuurstofsensor bestaat uit drie hoofdonderdelen: een blauwlichtbron, een detectieoppervlak en een roodlichtontvanger (Figuur 20). Het detectieoppervlak bevat een zuurstof actieve verbinding in een zuurstof doorlatend polymeer zoals siliconen. Wanneer dit oppervlak in contact komt met water (of lucht), dringt er zuurstof uit het water doorheen, onder invloed van de partiële zuurstofdruk in het water. De zuurstof actieve verbinding reageert door te fluoresceren, blauw licht te absorberen en rood licht uit te zenden. Tijdens elke meting activeert en deactiveert de sensor het blauwe licht, terwijl de ontvanger van het rode licht meet hoelang het duurt voordat de fluorescentie vervaagt nadat het blauwe licht is uitgeschakeld. Deze duur komt overeen met de hoeveelheid opgeloste zuurstof in het water.

Bovendien past de sensor zijn output aan aan variaties in watertemperatuur en zoutgehalte, waardoor nauwkeurige metingen gegarandeerd zijn (Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022).



Figuur 20 - Opgeloste zuurstof sensor

Bron: Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022

Geleidbaarheid

De Scuba 90 gebruikt de vier-elektrode methode om de geleidbaarheid van water te bepalen (Figuur 21). Bij deze techniek worden twee sets grafietelektroden in een specifieke, stabiele configuratie in de geleidbaarheidssensor geplaatst.

Bij deze methode wordt op één elektrode van elk paar een constante spanning gezet en meet de sensor de stroom die nodig is om die spanning in stand te houden. Naarmate de geleidbaarheid van het water toeneemt, neemt ook de hoeveelheid stroom toe die nodig is om de spanning op peil te houden. Deze toename in stroom dient als indicator voor een hogere geleidbaarheid van het water (Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022).



Figuur 21 - Geleidbaarheid sensor

Bron: Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022

pH

Bij de pH-meting wordt de spanningsval over het glasmembraan van een pH-elektrode gemeten (Figuur 22). Om het spanningsmeetcircuit te voltooien, wordt een referentie-elektrode gebruikt. Het pH-glas is speciaal ontworpen om water te absorberen, waarbij ionen zoals H^+ en OH^- uit het water worden aangetrokken om tegenwicht te bieden aan de ionische samenstelling van de interne elektrolyt van de pH-elektrode. Dit resulteert in een ladingsscheiding over het glas, wat de spanning is die we meten.

Temperatuurcompensatie wordt automatisch meegenomen in pH-metingen. Het onderhoud van de pH-elektrode bestaat voornamelijk uit het periodiek reinigen van het glasoppervlak met een zachte doek en zeepwater, waarbij schurende materialen vermeden moeten worden. Het kritieke aspect van pH-onderhoud is het bijvullen van de referentie-elektrode (Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022).



Figuur 22 - pH sensor

Bron: Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022

ORP

Het oxidatie reductie vermogen wordt bepaald door de spanningsval over het platina membraan van een ORP-elektrode te meten. Als je de pH-sensor van bovenaf bekijkt, zie je de eigenlijke ORP-sensor als een zilverkleurige stip van 1 mm (Figuur 23).

Net als bij de pH-meting wordt een referentie-elektrode gebruikt om het spanningsmeetcircuit af te sluiten. Platina blijft inert ten opzichte van ionen in water, wat betekent dat het niet gemakkelijk elektronen met hen uitwisselt, tenzij er sprake is van aanzienlijke druk of invloed. De resulterende potentiaal (spanning) die voortvloeit uit deze stand off is wat je effectief meet als ORP (Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022).



Figuur 23 - ORP sensor

Bron: Scuba and Scuba Trimeter water quality probes, 2022

6.2.2 COSASCO 9030 Plus

De COSASCO 9030 Plus meet de onmiddellijke corrosiesnelheid van een metaal in een geleidende vloeistof door toepassing van de lineaire polarisati weerstand (LPR) meetmethode (Figuur 24).

Het 9030 Plus instrument is ontworpen voor on-site installatie als corrosiemonitor in verschillende watersystemen, zoals koel-, proces- of drinkwaterinstallaties. Het maakt directe en continue bewaking van corrosiesnelheid, verstoringen en temperatuur mogelijk zonder dat voortdurend handmatig toezicht nodig is. Het display van het apparaat is voorzien van een automatische schaalfunctie om de gevoeligheid te handhaven voor verschillende parameters die worden gemeten. Daarnaast zijn datalogging mogelijkheden beschikbaar bij gebruik van de COSASCO Plus software om het instrument te configureren en gegevens op te halen (9030 Plus™ Corratel® Instrument User Manual, 2002).

Het COSASCO systeem werkt volgens het principe dat metaalcorrosie een kleine elektrische stroom genereert door oxidatie en meet de corrosiesnelheid door de stroom te beoordelen die ontstaat bij een minimaal toegepast potentiaalverschil tussen twee elektroden. Het 9030 Plus-model breidt het praktische bereik voor lineaire polarisati weerstandsmetingen uit en maakt gebruik van een gepatenteerde AC-techniek om elektrochemische impedantie te meten, waarbij de oplossingsweerstand tussen de corrosie metende elektroden automatisch wordt gecompenseerd, zodat er geen derde elektrode of correctiecurves nodig zijn.

Er zijn zes 4-20 mA stroomlusdrivers beschikbaar om op afstand corrosiesnelheid, verstoringen en temperatuurmetingen te controleren (9030 Plus™ Corratel® Instrument User Manual, 2002).

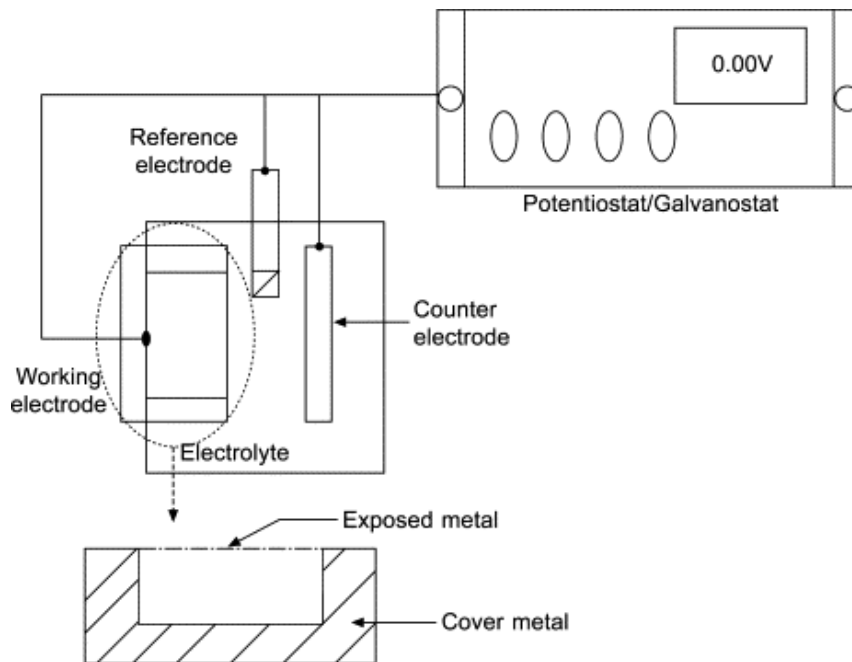


Figuur 24 - COSASCO 9030 Plus

Bron: eigen werk

6.2.2.1 De lineaire polarisati weerstand

LPR-sensoren en instrumenten bepalen de polarisati weerstand door een kleine spanning (meestal 10-30 mV) aan te leggen op een corroderende metaalelektrode en de resulterende corrosiestroom te meten die vloeit tussen de anode en kathode halve cellen of elektroden. Deze weerstand is omgekeerd evenredig met de corrosiesnelheid. LPR-sondes zijn verkrijgbaar in verschillende configuraties en materialen, waaronder twee en drie elektrode opties. Sondes met drie elektroden hebben als doel de oplossingsweerstand te minimaliseren door een referentie-elektrode naast de testelektrode te introduceren, die de relatieve bijdrage van de oplossingsweerstand aan het totale weerstandstraject vermindert. De meetelementen, gemaakt van verschillende materialen en configuraties zoals staafvormige of vlakke elektroden, vereisen een zorgvuldige afweging, vergelijkbaar met het selecteren van coupons of ER-sondes. Sondes worden gemaakt in verschillende ontwerpen en materialen om te voldoen aan systeemparemeters zoals druk, temperatuur en snelheid. Instrumenten zijn verkrijgbaar als draagbaar, datalogger of rack-mounted ontwerp op basis van budget en technische vereisten. Omdat LPR continu real-time resultaten oplevert, is het van cruciaal belang om de instrumenten continu aangesloten te houden, aangezien de meetwaarden fluctueren met de corrosiviteit van de vloeistof. LPR-sondes moeten ondergedompeld worden in een elektrolyt en zijn niet geschikt voor "droge" omgevingen (Singh, 2017).



Figuur 25 – Lineaire Polarisatieweerstand

Bron: Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015

Een van de belangrijkste voordelen van LPR-monitoring is de snelheid waarmee de corrosiesnelheid wordt gemeten. Veranderingen in corrosiesnelheid kunnen vaak binnen enkele minuten gedetecteerd worden, waardoor een bijna onmiddellijk meetsysteem ontstaat. Deze snelle respons stelt operators in staat om onmiddellijk procesvariatiën te beoordelen, waardoor het bijzonder waardevol is voor het monitoren van de doeltreffendheid van corrosiepreventieprogramma's. Daarnaast biedt LPR-monitoring het voordeel dat het kwalitatieve inzichten verschaft in pitting tendensen, door aan te geven of pitting waarschijnlijk oppervlakkig en sporadisch zal zijn of diep en frequent (*LPR-General-Information.pdf*, z.d.).

6.2.3 C-Cube

De C-Cube sensor, ontworpen voor het SOCORRO-project, dient als een speciaal meetsysteem voor corrosie en biedt mogelijkheden voor real-time monitoring (Figuur 26). Door gebruik te maken van micro-elektrochemische cellen meten deze sensoren de corrosiesnelheid van metalen oppervlakken door veranderingen in de elektrische weerstand te detecteren. Ze meten specifiek de corrosiesnelheid om de vier uur, waarbij elke meetcyclus ongeveer 10 minuten duurt. De C-Cube sensor bevat zowel de werk- als de referentie-elektroden in een waterdichte plastic behuizing, speciaal gemaakt voor installatie onder water (C-Cube International, 2024).



Figuur 26 - C-Cube LPR-sensor

Bron: eigen werk

6.3 Verwerking gegevens

Om de meetgegevens van de Scuba 90 te verwerken, werden de gegevens eerst geüpload naar de 'Scuba Control Software' voor eerste verwerking. In deze stap werden de ruwe sensoruitgangen omgezet in bruikbare gegevensformaten. Daarna werd R gebruikt om de gegevens verder om te zetten in visuele grafieken. De gebruikte code bestond uit verschillende stappen.

De nodige analysepakketten zoals readxl, ggplot2 en GGally werden geïmporteerd.

```
#import analysis packages
library(readxl)
library(plyr)
library(scales)
library(grid)
library(usethis)
library(devtools)
library(ggplot2)
library(ggbiplot)
library(GGally)
library(cowplot)
library(ggpubr)
library(gridExtra)
library(lubridate)
library(hms)
```

De gegevens werden vervolgens ingelezen vanuit een Excel-bestand in een dataframe en kolommen werden hernoemd voor de duidelijkheid.

```
#import and check data
corrosiondata <- read_excel("data_phi_0905.xlsx", sheet = "data_controle")
#ADAPT!!
corrdata<-corrosiondata #make working copy of full dataset
colnames(corrdata)<- c("Ddate", "Corrosionrate_mmPY", "Imbalance", "Date", "Time",
                      "Temperature", "DO_perc", "DO_mgL", "Conductivity", "pH",
                      "pH_mV",
                      "ORP", "Pressure", "Chlorophyll", "Chloride",
                      "Conductivity25",
                      "Conductivity20", "Resistivity", "Salinity", "SeawaterSG",
                      "TDS", "Turbidity", "Nitrate", "Chloride_mV")
# corrdata <- subset(corrdata, !is.na(corrdata$Corrosionrate_mmPY)) #remove
# datasets w/o corrosion #ADAPT !!
head(corrdata) #check if data were properly imported
```

Het was cruciaal om ervoor te zorgen dat de datum- en tijdformaten correct waren, dus deze werden geconverteerd naar POSIXct en HMS-formaten voor een goede tijdreeksanalyse.

```
#make sure date+time are in correct format, create Ddate column
corrdata$Time <- as_hms((corrdata$Time))
corrdata$Time <- as_hms(as.POSIXct(corrdata$Time))
corrdata$Date <- mdy((corrdata$Date))
corrdata$Date <- as.POSIXct((corrdata$Date))
corrdata$Ddate <- as.POSIXct(paste(corrdata$Date, corrdata$Time))
head(corrdata) #check if data were properly corrected
```

Verschillende waterkwaliteitsparameters, waaronder temperatuur, opgeloste zuurstof, pH, ORP en zoutgehalte, werden omgezet in numerieke formaten om nauwkeurige plotten mogelijk te maken.

```
#make sure data are in correct numeric format
corrdata$Temperature <-as.numeric(corrdata$Temperature)
corrdata$DO_perc <-as.numeric(corrdata$DO_perc)
corrdata$DO_mgL <-as.numeric(corrdata$DO_mgL)
corrdata$pH <-as.numeric(corrdata$pH)
corrdata$pH_mV <-as.numeric(corrdata$pH_mV)
corrdata$ORP <-as.numeric(corrdata$ORP)
corrdata$Chlorophyll <-as.numeric(corrdata$Chlorophyll)
corrdata$Chloride <-as.numeric(corrdata$Chloride)
corrdata$Conductivity25 <-as.numeric(corrdata$Conductivity25)
corrdata$TDS <-as.numeric(corrdata$TDS)
corrdata$Salinity <-as.numeric(corrdata$Salinity)
head(corrdata[,6:12])#check if data were properly corrected
```

Uitschieters als gevolg van sensorfouten werden verwijderd om de integriteit van de gegevens te behouden, waarbij de nadruk lag op pH-waarden onder 8,75 en ORP-waarden boven -250 mV.

```
#remove clear outliers due to sensor error
#corrdata <- corrdata[corrdata$Conductivity25 > 500,]
corrdata <- corrdata[corrdata$pH < 8.75,]
corrdata <- corrdata[corrdata$ORP > -250,]
#corrdata <- corrdata[corrdata$Salinity > 20,]
#corrdata <- corrdata[DO_mgL <10.5,]
```

Met ggplot2 werden tijdreeksplots gemaakt voor parameters zoals temperatuur, opgeloste zuurstof, geleidbaarheid, pH, ORP, zoutgehalte, TDS en corrosiesnelheid, en deze werden in een raster geplaatst voor een uitgebreide visualisatie.

```
# TIME SERIES
# =====
tp1 <- ggplot(corrdata, aes(Ddate, Temperature)) + geom_point() +
  xlab("Time (days)") + ylab("Temperature (C)") + theme(text = element_text(size = 8))
tp2 <- ggplot(corrdata, aes(Ddate, DO_mgL)) + geom_point() +
  xlab("Time (days)") + ylab("Dissolved oxygen (mg/L)") + theme(text =
element_text(size = 8))
tp3 <- ggplot(corrdata, aes(Ddate, Conductivity25)) + geom_point() +
  xlab("Time (days)") + ylab("Conductivity (uS/cm)") + theme(text =
element_text(size = 8))
tp4 <- ggplot(corrdata, aes(Ddate, pH)) + geom_point() +
  xlab("Time (days)") + ylab("pH") + theme(text = element_text(size = 8))
tp5 <- ggplot(corrdata, aes(Ddate, ORP)) + geom_point() +
  xlab("Time (days)") + ylab("Oxidoreduction potential (mV)") + theme(text =
element_text(size = 8))
tp6 <- ggplot(corrdata, aes(Ddate, Salinity)) + geom_point() +
  xlab("Time (days)") + ylab("Salinity (given as PSU)") + theme(text =
element_text(size = 8))
tp7 <- ggplot(corrdata, aes(Ddate, TDS)) + geom_point() +
  xlab("Time (days)") + ylab("TDS") + theme(text = element_text(size = 8))
tp8 <- ggplot(corrdata, aes(Ddate, Corrosionrate_mmPY)) + geom_point() +
  xlab("Time (days)") + ylab("Corrosion rate (mm/y)") + theme(text =
element_text(size = 8))
```

```
ggarrange(tp1, tp2, tp3, tp4, tp5, tp6, tp7, tp8, labels = c("A", "B", "C", "D",
"E", "F", "G", "H"), ncol = 2, nrow = 4)
ggsave("Overview timeplots Farys-Orion 9 mei 2024.png")
```

Bovendien werden boxplots gegenereerd om de verdeling van deze parameters samen te vatten en werd er een correlatieplot gemaakt om de onderlinge relaties te onderzoeken.

```
# BOXPLOTS and CORRELATIONS
# =====
# Boxplots
# -----
labels <- c("Temperature (oC)", "Dissolved oxygen (mg/L)",
"Conductivity (uS/cm)", "pH",
"ORP (mV)", "Turbidity (NTU)",
"Salinity (given as PSU)", "Corrosion rate (mm/y)")
bp1 <- ggplot(corrddata, aes(x = "", y = Temperature)) + geom_boxplot() +
ggtitle(labels[1]) + theme(axis.title.x = element_blank())
bp2 <- ggplot(corrddata, aes(x = "", y = DO_mgL)) + geom_boxplot() +
ggtitle(labels[2]) + theme(axis.title.x = element_blank())
bp3 <- ggplot(corrddata, aes(x = "", y = Conductivity25)) + geom_boxplot() +
ggtitle(labels[3]) + theme(axis.title.x = element_blank())
bp4 <- ggplot(corrddata, aes(x = "", y = pH)) + geom_boxplot() +
ggtitle(labels[4]) + theme(axis.title.x = element_blank())
bp5 <- ggplot(corrddata, aes(x = "", y = ORP)) + geom_boxplot() +
ggtitle(labels[5]) + theme(axis.title.x = element_blank())
bp6 <- ggplot(corrddata, aes(x = "", y = Salinity)) + geom_boxplot() +
ggtitle(labels[7]) + theme(axis.title.x = element_blank())
bp7 <- ggplot(corrddata, aes(x = "", y = Turbidity)) + geom_boxplot() +
ggtitle(labels[6]) + theme(axis.title.x = element_blank())
#bp8 <- ggplot(corrddata, aes(x = "", y = Corrosionrate_mmPY)) + geom_boxplot() +
# ggtitle(labels[8]) + theme(axis.title.x = element_blank())
ggarrange(bp1, bp2, bp3, bp4, bp5, bp6,
labels = c("A", "B", "C", "D", "E", "F"),
ncol = 3, nrow = 2)
ggsave("Overview boxplots Farys-Orion 9 mei 2023.png")

# Correlation plots
# -----
corrddata_pairs <- cbind(corrddata[,6], corrddata[,8], corrddata[,10],
corrddata[,12], corrddata[,16], corrddata[,19])
ggpairs(corrddata_pairs, columnLabels = c("Temperature (C)", "Dissolved oxygen
(mg/L)",
"pH", "ORP (mV)", "Conductivity
(uS/cm)",
"Salinity (PSU)")) #wayy cooler pairwise
plot
```

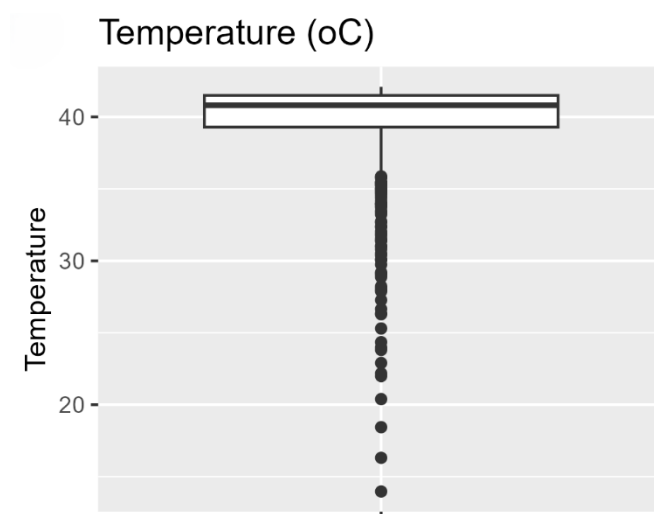
Dit R-script werd gebruikt om de gegevens te analyseren die door de Scuba-sensor waren verzameld, waardoor een uitgebreid en nauwkeurig inzicht werd verkregen in de waterkwaliteitsparameters en hun invloed op de corrosiesnelheden.

7. Resultaten

7.1 Water zonder zout

7.1.1 Temperatuur

Voor er zout werd toegevoegd in de opstelling varieerde de temperatuur van het water van 36°C tot 42°C, met een mediane temperatuur van 41°C (Figuur 27). Daarnaast zijn er enkele uitschieters die te wijten zijn aan het stilstaan van de pomp.

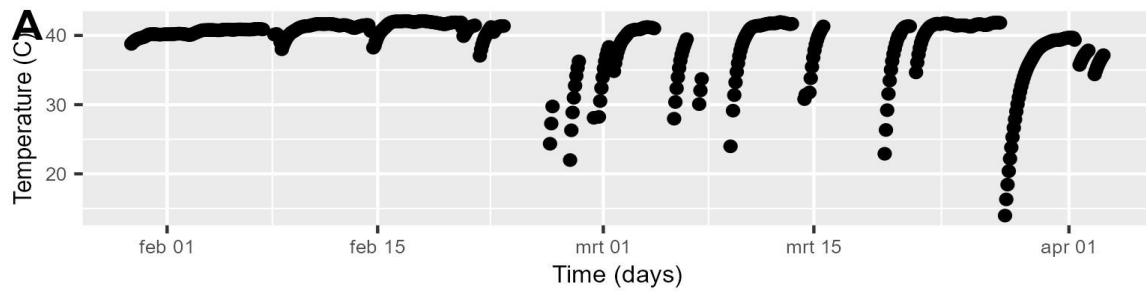


Figuur 27 - Boxplot temperatuur (°C) van water

Bron: eigen werk

Figuur 28 toont de temperatuur van het water over een bepaalde periode, van eind januari tot begin april. Gedurende het grootste deel van de waargenomen periode blijft de watertemperatuur constant rond 40°C. Deze verhoogde temperatuur is te wijten aan de continue werking van de pomp. Wanneer de pomp actief is, geeft deze hitte af aan het doorlopende water.

Wanneer de pomp actief is, blijft de temperatuur stabiel rond de 40°C. Er zijn echter onregelmatige temperatuurdalingen op specifieke punten. Deze dalingen vallen samen met momenten waarop de pomp werd uitgeschakeld. Als de pomp stopt, daalt de watertemperatuur snel. Na elke uitschakeling is er een snel herstel terug naar de basislijn van 40°C zodra de pomp weer in werking is.

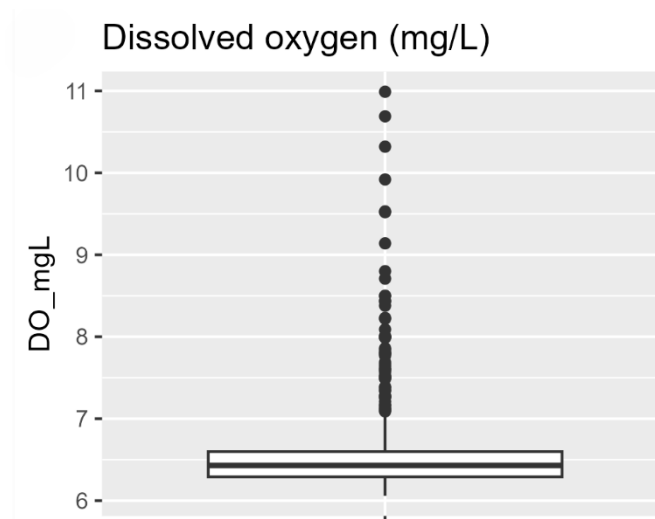


Figuur 28 - Verloop temperatuur (°C) in functie van tijd (dagen)

Bron: eigen werk

7.1.2 Opgeloste zuurstof

Figuur 29 geeft de verdeling weer van de opgeloste zuurstofniveaus (gemeten in milligram per liter). Het bereik ligt tussen 6,1 en 7 mg/L waarvan het middenvak loopt van ongeveer 6,3 tot 6,6 mg/L. De mediaan ligt rond 6,4 mg/L. Daarnaast zijn er verschillende uitschieters boven de 7 mg/L, wat duidt op incidentele hogere niveaus van opgeloste zuurstof.



Figuur 29 - Boxplot opgeloste zuurstofconcentratie (mg/L) van water

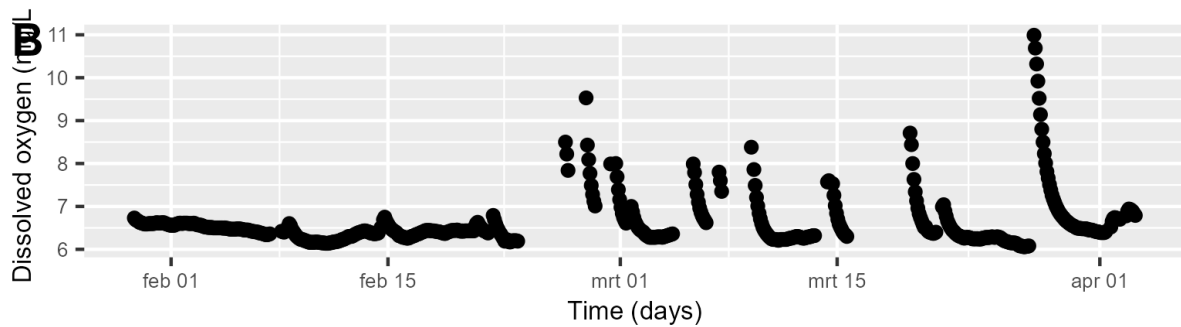
Bron: eigen werk

Op Figuur 30 is te zien dat het opgeloste zuurstofgehalte begin februari rond de 6,5 mg/L lag en ongeveer twee weken lang tussen 6 en 7 mg/L schommelde.

Er waren korte perioden van verhoogde zuurstofniveaus, tot bijna 9 mg/L midden februari en opnieuw begin maart. Deze pieken werden gevolgd door korte dalingen voordat ze terugkeerden naar een stabiel bereik rond 6,5 mg/L.

De grootste schommelingen deden zich eind maart en begin april voor. De grafiek laat scherpe stijgingen en dalingen in opgeloste zuurstof zien, waarschijnlijk als gevolg van korte

verstoringen door het afzetten van de pomp. Wanneer de pomp afstaat en de temperatuur zakt, zal het water meer zuurstof vasthouden wat leidt tot een hogere zuurstofconcentratie (Brundage, 2021).

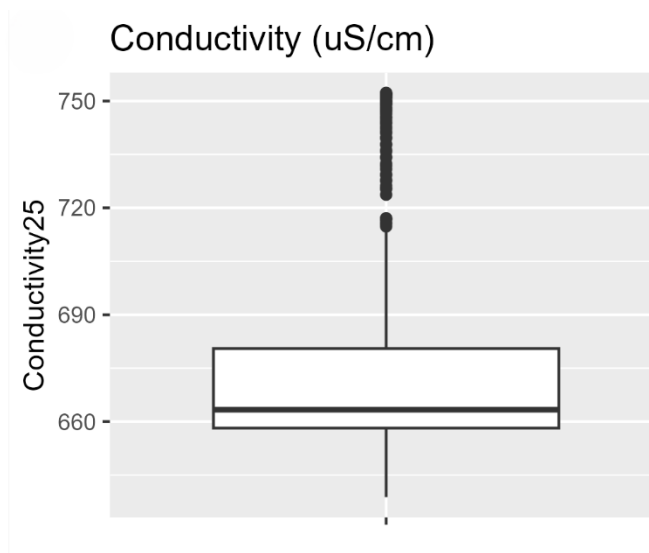


Figuur 30 - Verloop opgeloste zuurstofconcentratie (mg/L) in functie van tijd (dagen)

Bron: eigen werk

7.1.3 Geleidbaarheid

Uit de boxplot (Figuur 31) kunnen we concluderen dat de helft van de metingen een geleidbaarheid heeft die hoger is dan 665 $\mu\text{S}/\text{cm}$, terwijl de andere helft een lagere geleidbaarheid heeft. Opvallend is dat er meer variatie is in de metingen met een geleidbaarheid boven de 665 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dan in die onder de 665 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dit is te wijten aan de plotse piek die eind maart te zien is (Figuur 32).



Figuur 31 - Boxplot geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$) van water

Bron: eigen werk

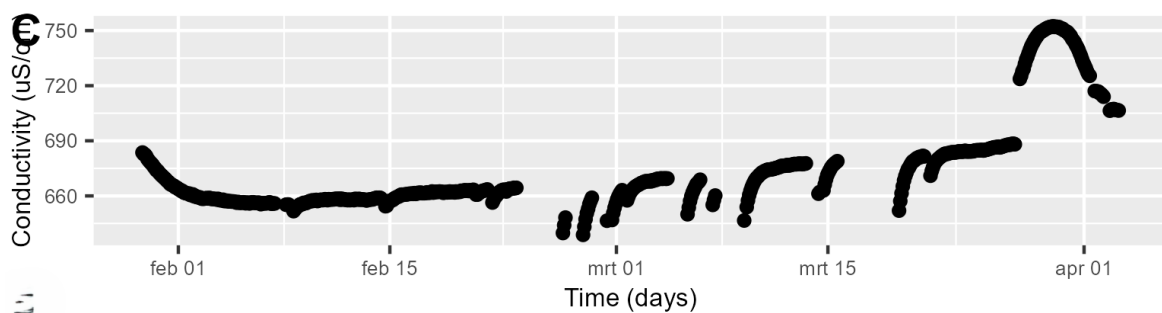
Figuur 32 toont de geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$) van het water in de tijd (dagen), van 1 februari tot 1 april.

Van 1 februari tot ongeveer half maart toont de grafiek een relatief stabiele basislijn geleidbaarheid. De waarde schommelt rond de $660 \mu\text{S}/\text{cm}$. Dit consistente geleidbaarheidsniveau suggereert dat de ionenconcentratie in het water in deze periode relatief onveranderd blijft.

De onregelmatige dalingen op de grafiek komen overeen met momenten waarop de pomp wordt uitgeschakeld. Wanneer de pomp stopt, neemt de waterstroom door het systeem af, wat leidt tot een lagere ionenconcentratie. Als gevolg daarvan daalt de geleidbaarheid.

Naarmate maart overgaat in april, blijft de basislijn geleidbaarheid onregelmatige dalingen vertonen. Er is echter een opmerkelijke verandering: de geleidbaarheid neemt geleidelijk toe. Dit suggereert dat ionen zich ophopen of in de loop van de tijd in het systeem worden gebracht. Mogelijke factoren zijn opgeloste mineralen zoals deeltjes ijzer uit de gietijzeren buis, chemische reacties of andere externe invloeden.

Het meest opvallende aspect van de grafiek is de plotselinge piek in geleidbaarheid rond 1 april, waar het van ongeveer $690 \mu\text{S}/\text{cm}$ naar bijna $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ springt. Zonder extra context is het moeilijk om de exacte oorzaak van deze onverwachte piek te achterhalen.

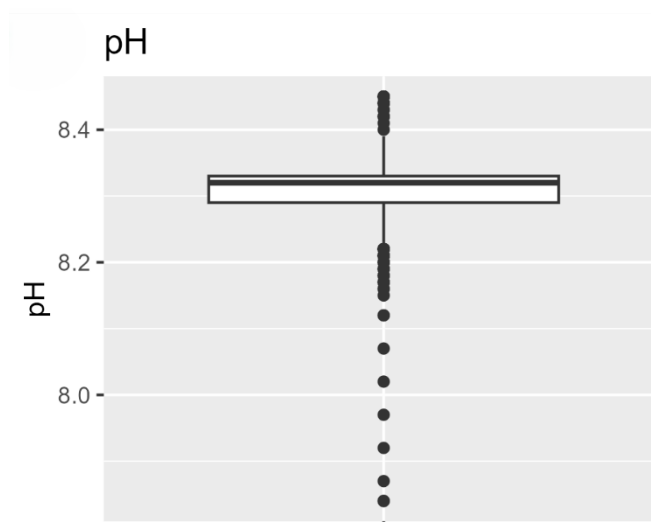


Figuur 32 - Verloop geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$) in functie van tijd (dagen)

Bron: eigen werk

7.1.4 pH

Uit Figuur 33 blijkt dat de pH-waarden van het water gelijkmatig verdeeld zijn rond een mediane waarde van pH 8,32.



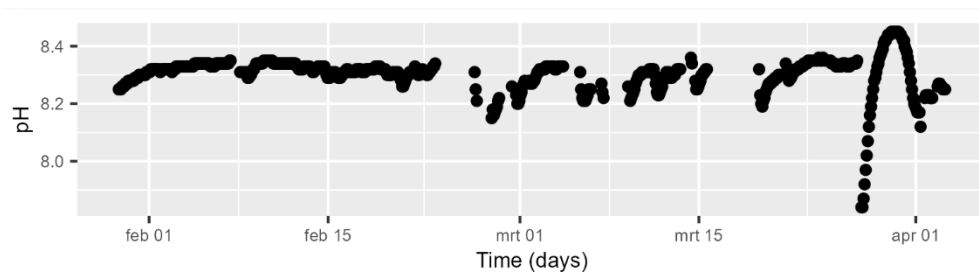
Figuur 33 - Boxplot pH van water

Bron: eigen werk

De grafiek (Figuur 34) toont de pH-waarde van het water over een periode van eind januari tot begin april.

Van 1 februari tot ongeveer half maart blijft de pH-waarde relatief stabiel, licht fluctuerend binnen het bereik van 8,2 tot 8,3.

Na half maart is er een duidelijke toename van de pH-schommelingen. Terwijl het algemene bereik hetzelfde blijft, worden de variaties meer uitgesproken. Dit kan te wijten zijn aan het aan- en uitzetten van de pomp. Op 1 april treedt er een significante piek op in de pH-waarden, tot 8,4. Deze plotselinge stijging suggereert een verstoring of een verandering in de samenstelling van het water.

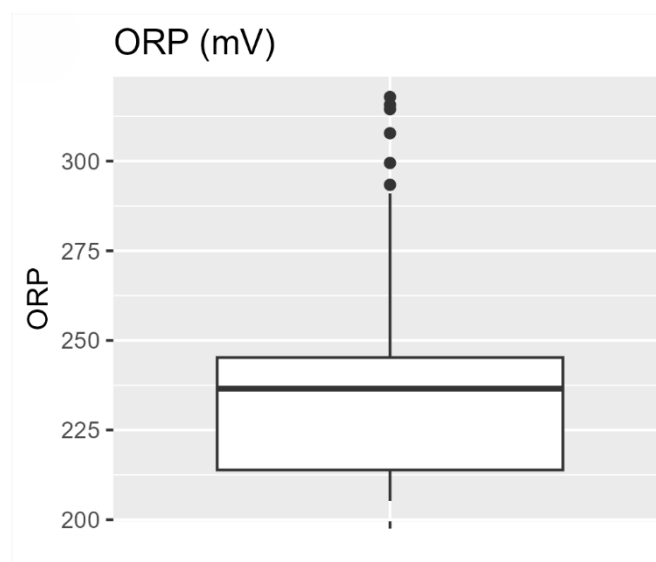


Figuur 34 - Verloop pH in functie van tijd (dagen)

Bron: eigen werk

7.1.5 Oxidatie reductie potentiaal

De boxplot (Figuur 35) geeft de verdeling weer van de oxidatie reductie potentiaal gemeten in millivolt. Het eerste kwartiel ligt op 213 mV en het derde kwartiel ligt op 245 mV, met de mediaan op 240 mV. Het minimum en maximum liggen respectievelijk op 210 mV en 290 mV. Daarnaast zijn er verschillende uitschieters tot 320 mV.



Figuur 35 - Boxplot ORP (mV) van water

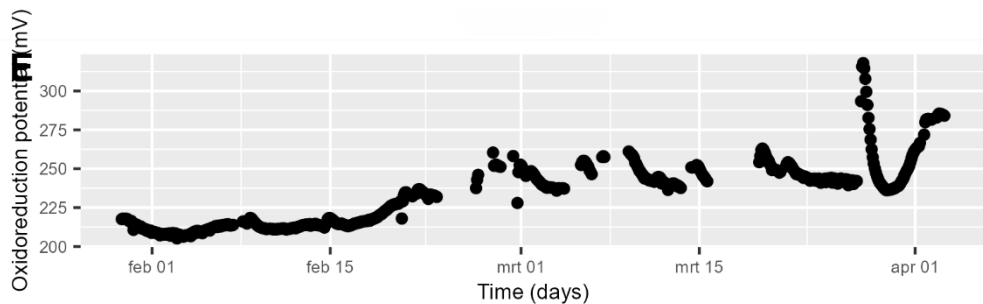
Bron: eigen werk

De grafiek van Figuur 36 zet de ORP-waarden van water in millivolt (mV) uit tegen de tijd, van februari tot april.

Van 1 februari tot ongeveer half maart blijft de ORP relatief stabiel, licht schommelend rond de 200 en 225 mV. Deze constante ORP duidt op een periode van evenwicht in de redoxpotentiaal van het water, noch sterk oxiderend, noch sterk reducerend.

Rond eind februari is er een significante stijging in ORP, met een piek rond 240 mV. Deze stijging suggereert een tijdelijke verschuiving naar oxidatie, mogelijk door toegenomen opgeloste zuurstof of andere oxidatieve processen.

Van 1 maart tot 15 maart treden er merkbare schommelingen op in de ORP, dit is vermoedelijk het gevolg van het aan- en uitschakelen van de pomp. Na 15 maart vertoont de grafiek een toegenomen volatiliteit. Twee scherpe stijgingen in ORP worden waargenomen. De ORP stijgt respectievelijk tot 325 en 280 mV.

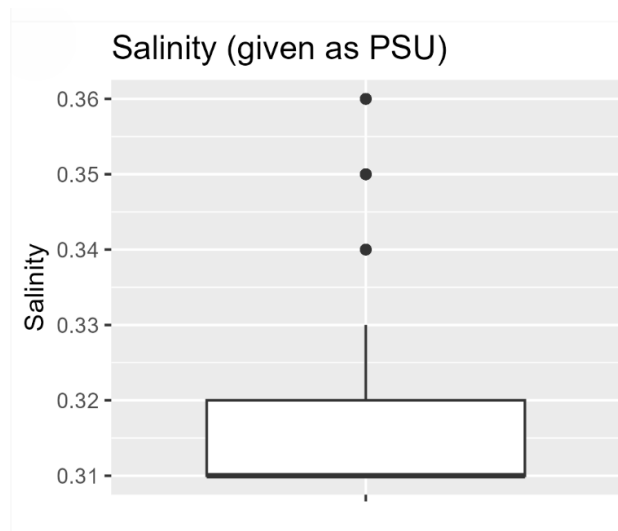


Figuur 36 - Verloop ORP (mV) in functie van tijd (dagen)

Bron: eigen werk

7.1.6 Zoutgehalte

De boxplot (Figuur 37) geeft gegevens weer over de saliniteit, uitgedrukt in praktische saliniteitseenheden (PSU). De meeste datapunten liggen tussen 0,31 en 0,32 PSU, zoals aangegeven door de box. De mediaan van de saliniteitswaarde ligt op 0,31 PSU. Daarnaast zijn er drie uitschieters boven dit bereik.



Figuur 37 - Boxplot zoutgehalte (PSU) van water

Bron: eigen werk

7.1.7 Correlatie tussen de verschillende fysicochemische parameters

In het vorige gedeelte hebben we een uitgebreid overzicht gegeven van de afzonderlijke waterkwaliteitsparameters die zijn gemeten. Een diepere analyse ligt echter in het onderzoeken van de relaties tussen deze parameters. Figuur 39 illustreert een paarsgewijze correlatiematrix, waarbij te zien is hoe veranderingen in één parameter veranderingen in een andere parameter kunnen beïnvloeden of erdoor beïnvloed kunnen worden. Door deze correlaties te identificeren, kunnen we waardevolle inzichten krijgen in de onderliggende processen die de dynamiek van het waterlichaam bepalen.

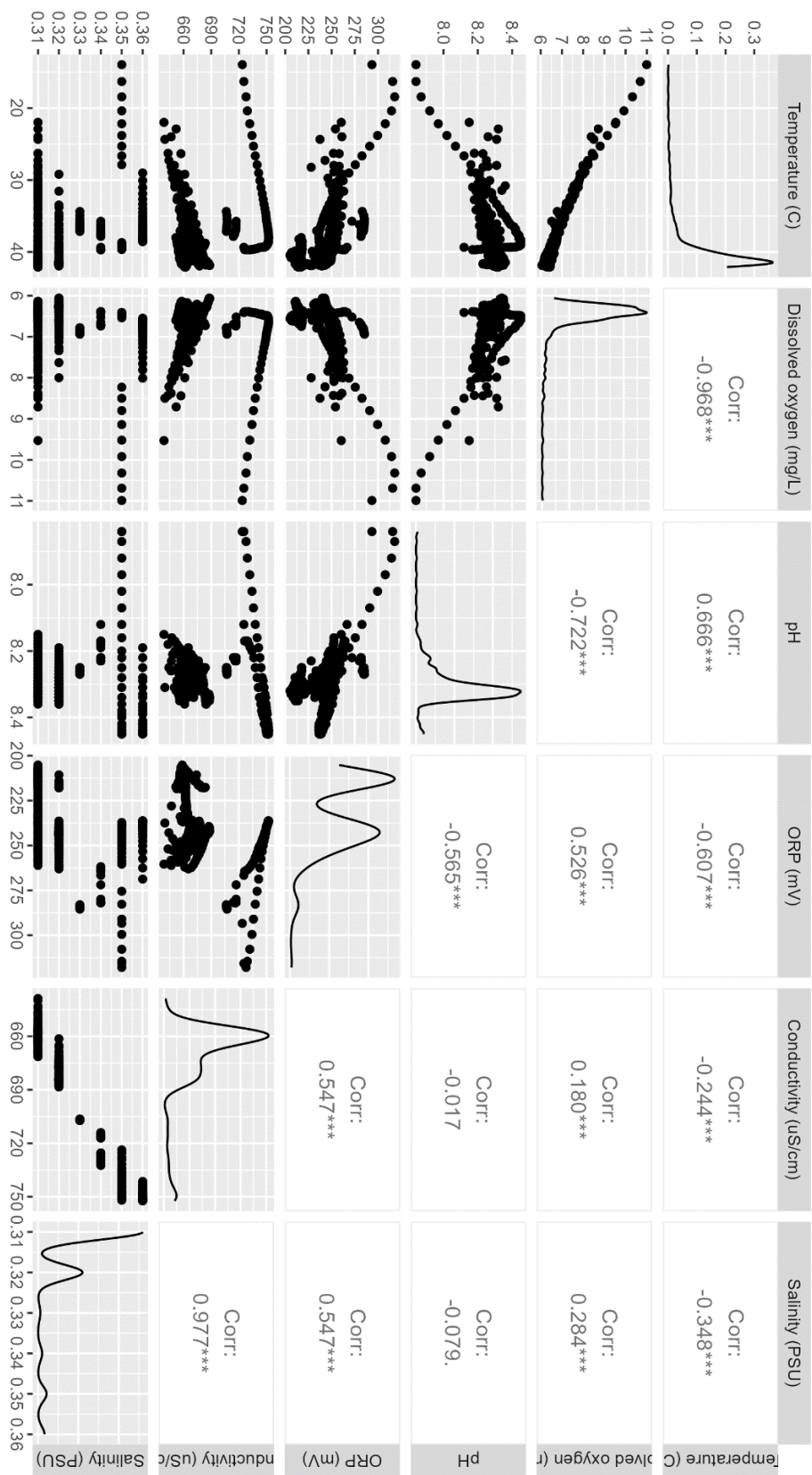
Zoals reeds vermeld (7.1.2 Opgeloste zuurstof), is er een sterke negatieve correlatie (-0,968) tussen de watertemperatuur en het niveau van opgeloste zuurstof. Dit betekent dat naarmate de temperatuur steeg, de gemeten zuurstofniveaus daalden. Een mogelijke verklaring voor deze waarneming is de invloed van de temperatuur op de oplosbaarheid van gas. Warmer water houdt minder gas vast, inclusief zuurstof, in vergelijking met koeler water. Dit kan leiden tot een afname van de opgeloste zuurstofconcentratie, zelfs als de totale hoeveelheid zuurstof in het systeem constant blijft (Brundage, 2021).

Onze gegevensanalyse onthulde ook een sterke positieve correlatie (0,977) tussen het zoutgehalte en het geleidingsvermogen in het waterlichaam. Dit betekent dat het geleidingsvermogen toenam naarmate het zoutgehalte steeg. Deze relatie is logisch omdat opgeloste zouten in water elektriciteit geleiden. Als er meer opgeloste zouten zijn (hoger zoutgehalte), zijn er meer ionen aanwezig in het water, waardoor elektriciteit gemakkelijker kan stromen, wat resulteert in hogere geleidbaarheidswaarden (*Why Measure Conductivity or Salinity?*, z.d.).

Opvallend is dat onze gegevensanalyse een sterke negatieve correlatie (-0,722) aantoonde tussen de pH en het opgeloste zuurstofgehalte in het waterlichaam. Dit betekent dat naarmate de pH steeg (meer basisch werd), de gemeten zuurstof niveaus daalden.

Onze correlatieanalyse onthulde een verrassend positieve correlatie (0,666) tussen pH en temperatuur. Dit betekent dat als de watertemperatuur steeg, de pH ook steeg. Hoewel een

direct verband tussen deze parameters ongebruikelijk is in natuurlijke wateren, zou deze waarneming verklaard kunnen worden door indirecte factoren die beide beïnvloeden.



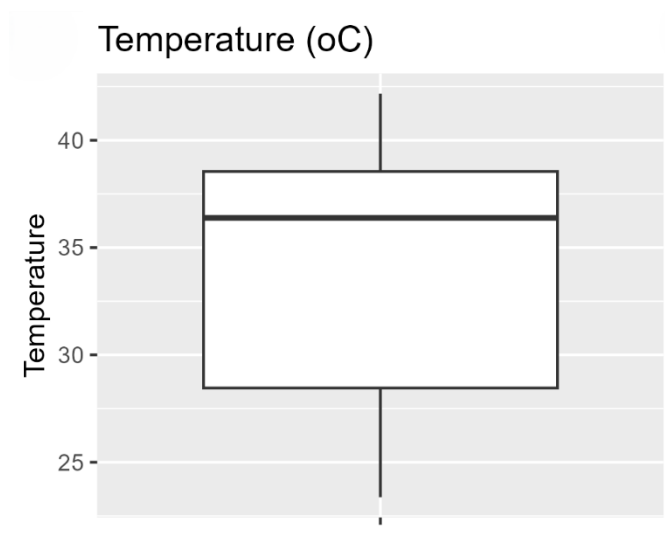
Figuur 39 - Paarsgewijze correlatie matrix van omgevingsparameters

Bron: eigen werk

7.2 Water met toevoeging van zout

7.2.1 Temperatuur

De boxplot (Figuur 40) geeft gegevens weer over de temperatuur in graden Celsius. De mediane temperatuur, aangegeven door de lijn in het kader, ligt rond 35°C. Het interkwartiel bereik, weergegeven door de box, loopt van 28°C tot 38°C, wat aangeeft dat de middelste 50% van de temperaturen binnen dit bereik valt.



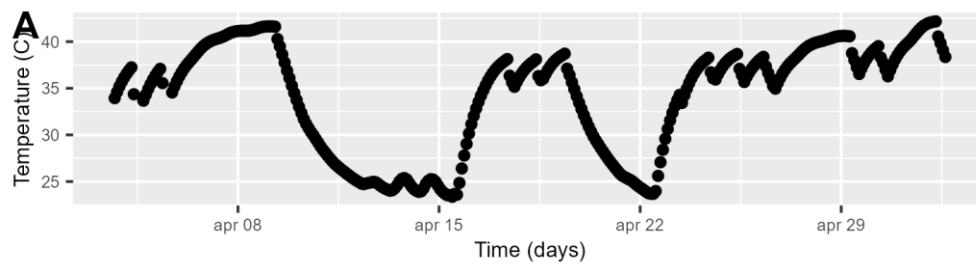
Figuur 40 - Boxplot temperatuur (°C) van zoute water

Bron: eigen werk

De grafiek in Figuur 41 toont de temperatuur in graden Celsius over een periode van 1 april tot 30 april.

Van 1 april tot ongeveer 8 april blijft de temperatuur relatief hoog en stabiel. De datapunten liggen tussen ongeveer 35°C en 40°C. Rond 10 en 20 april is er een scherpe daling van de temperatuur. De datapunten dalen aanzienlijk tot ongeveer 25°C. Deze temperatuurdalingen zijn waarschijnlijk het gevolg van het uitschakelen van de pomp in deze periode.

Het is moeilijk om de precieze oorzaak van de lagere gemiddelde temperatuur vast te stellen, omdat deze niet kan worden toegeschreven aan de toevoeging van zout of natriumsulfiet. De onregelmatige werking van de pomp, die met wisselende intervallen in- en uit- wordt geschakeld, is de voornaamste factor die bijdraagt aan de waargenomen schommelingen.

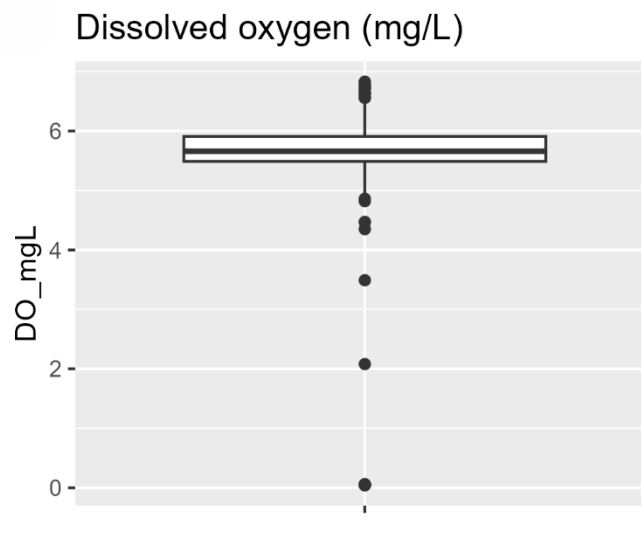


Figuur 41 - Verloop temperatuur (°C) in functie van tijd (dagen)

Bron: eigen werk

7.2.2 Opgeloste zuurstof

Figuur 42 illustreert via een boxplot de verdeling van de opgeloste zuurstofniveaus, gemeten in milligram per liter (mg/L). De grafiek laat een concentratiebereik zien van ongeveer 5,6 tot 6 mg/L, met een uitschieter rond 6,8 mg/L en verschillende onder de 5 mg/L. De mediaan is duidelijk gemarkeerd en ligt dicht bij het onderste kwartiel, wat aangeeft dat een aanzienlijk deel van de datapunten zich binnen dit concentratiebereik bevindt.



Figuur 42 - Boxplot opgeloste zuurstofconcentratie (mg/L) van zoute water

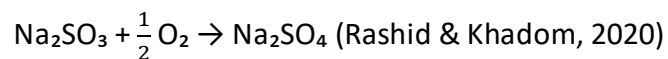
Bron: eigen werk

Figuur 43 toont de opgeloste zuurstofniveaus in de loop van de tijd, van 1 april tot 30 april.

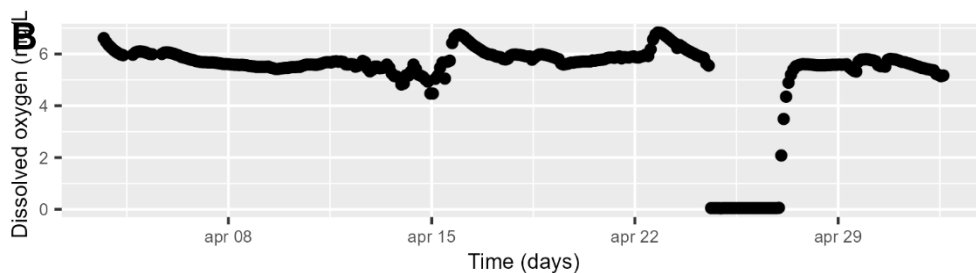
Van 1 april tot ongeveer 22 april blijft het niveau van opgeloste zuurstof relatief stabiel rond 5-6 mg/L. Er zijn kleine schommelingen, maar geen significante veranderingen. Op de datum waarop natriumsulfiet werd toegevoegd (24 april), is er echter een duidelijke daling in het opgeloste zuurstofgehalte.

De datapunten na deze toevoeging stijgen na enkele dagen weer en keren terug naar hun eerdere niveau (6mg/L).

De daling van het opgeloste zuurstofgehalte na toevoeging van natriumsulfiet kan worden toegeschreven aan een chemische reactie tussen het natriumsulfiet en opgeloste zuurstof. Natriumsulfiet (Na_2SO_3) is een reductiemiddel, wat betekent dat het elektronen kan opnemen. Wanneer natriumsulfiet aan water wordt toegevoegd, reageert het met opgeloste zuurstof (O_2) volgens de volgende vergelijking:



In deze reactie reageert natriumsulfiet met zuurstof tot natriumsulfaat (Na_2SO_4). Als gevolg hiervan daalt het gehalte aan opgeloste zuurstof omdat een deel van de zuurstofmoleculen tijdens de reactie wordt verbruikt (Rashid & Khadom, 2020).

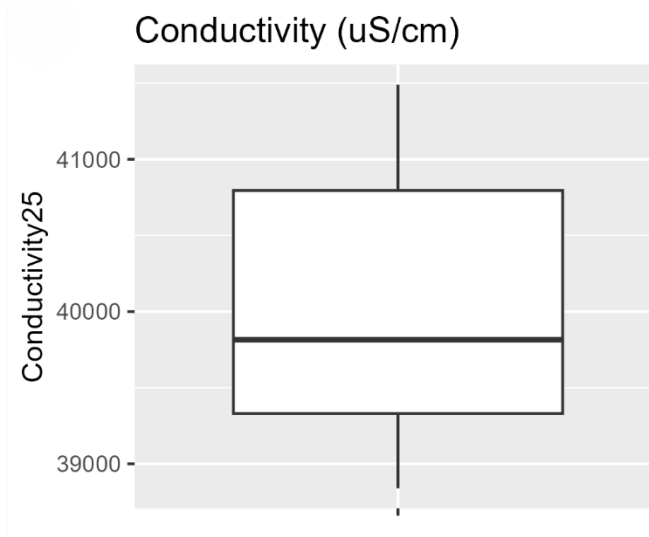


Figuur 43 - Verloop opgeloste zuurstofconcentratie (mg/L) in functie van tijd (dagen)

Bron: eigen werk

7.2.3 Geleidbaarheid

De boxplot (Figuur 44) illustreert de verdeling van het geleidingsvermogen gemeten in microsiemens per centimeter ($\mu\text{S}/\text{cm}$). De centrale box strekt zich uit van ongeveer 39.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (eerste kwartiel) tot 40.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (derde kwartiel), met de mediane geleidbaarheidswaarde rond 40.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Er zijn geen uitschieters of extreme waarden in deze grafiek.



Figuur 44 - Boxplot geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$) van zoute water

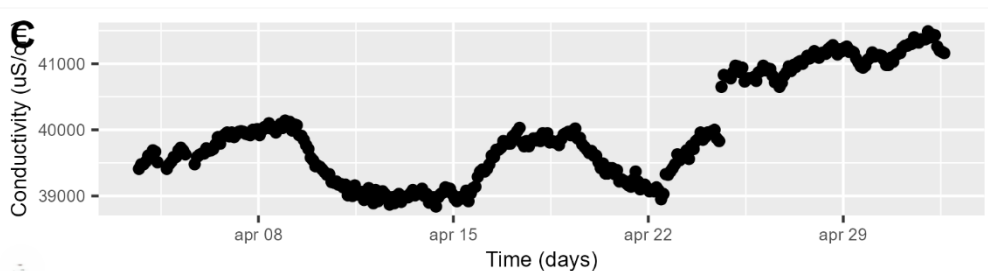
Bron: eigen werk

De grafiek in Figuur 45 toont de variaties in geleidbaarheid, gemeten in $\mu\text{S}/\text{cm}$, gedurende de hele maand april en geeft een gedetailleerd inzicht in de fluctuaties die gedurende deze periode zijn waargenomen.

Aanvankelijk, van 3 april tot ongeveer 8 april, vertoont de geleidbaarheid een opmerkelijke piek. Gedurende deze periode stijgen de datapunten snel en bereiken een piek van iets boven de 41000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Deze eerste piek komt overeen met de toevoeging van 25 kilo zout aan het water op 3 april. Als zout, of natriumchloride (NaCl), oplost in water, valt het uiteen in ionen (Na^+ en Cl^-), waardoor de geleidbaarheid van het water toeneemt doordat het beter elektriciteit kan geleiden (Kamcev et al., 2018).

Na midden april, rond 20 april, wordt een scherpe daling van de geleidbaarheid waargenomen, met datapunten die aanzienlijk dalen tot een minimumwaarde van ongeveer 39000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Factoren zoals verdunning of andere processen die de ionenconcentratie beïnvloeden, kunnen bijdragen aan deze daling. Vervolgens, na 22 april, is er weer een stijging in geleidbaarheid, zij het minder sterk dan de eerste piek.

Hoewel er niet direct een significante verandering in geleidbaarheid zichtbaar is na de toevoeging van 1 kg natriumsulfiet op 24 april, stijgt de geleidbaarheid geleidelijk tot net boven de 41000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tegen het einde van de maand.

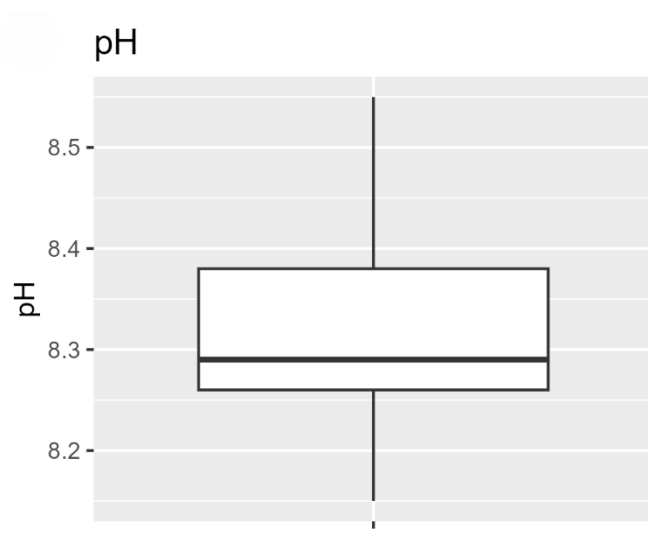


Figuur 45 - Verloop geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$) in functie van tijd (dagen)

Bron: eigen werk

7.2.4 pH

Figuur 46 illustreert de verdeling van pH-waarden. De meeste gegevenspunten liggen tussen 8,26 en 8,38 pH. De mediaan van de pH-waarde ligt op 8,29. Er zijn geen uitschieters in deze grafiek en de grafiek toont een relatief compacte verdeling van pH-waarden rond de mediaan.



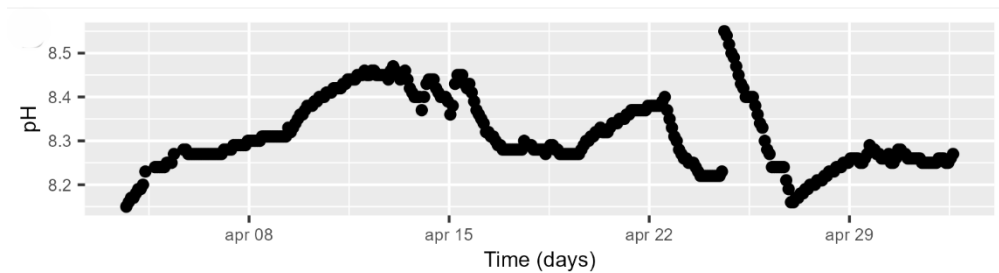
Figuur 46 - Boxplot pH van zoute water

Bron: eigen werk

Figuur 47 illustreert de pH-veranderingen gedurende de maand april. Vanaf 3 april tot ongeveer halverwege de maand is er een lichte toename van de pH, van ongeveer 8,2 tot 8,5. Tussen 13 en 24 april vertonen de pH-waarden schommelingen, maar over het algemeen is er een daling tot ongeveer 8,2. Op 24 april wordt echter natriumsulfiet toegevoegd, wat resulteert in een significante toename van de pH tot ongeveer 8,6, gevolgd door een snelle daling terug naar 8,2. Daarna stabiliseert de pH zich rond dit niveau.

Bij de toevoeging van natriumsulfiet aan water kan de pH in eerste instantie stijgen vanwege de aanwezigheid van natriumionen (Na^+) en de alkalische aard van sulfietionen (SO_3^{2-}).

Echter, wanneer natriumsulfiet reageert met zuurstof, wordt het omgezet in sulfaat (SO_4^{2-}), waarbij de basische componenten verdwijnen. Dit proces verlaagt de pH omdat sulfaat een zwakkere base is dan sulfiet, wat leidt tot een afname van de basische eigenschappen van de oplossing. Dus, hoewel de pH aanvankelijk stijgt door de basische eigenschappen van natriumsulfiet, zal deze uiteindelijk weer dalen door de omzetting van sulfiet naar sulfaat (Rashid & Khadom, 2020).

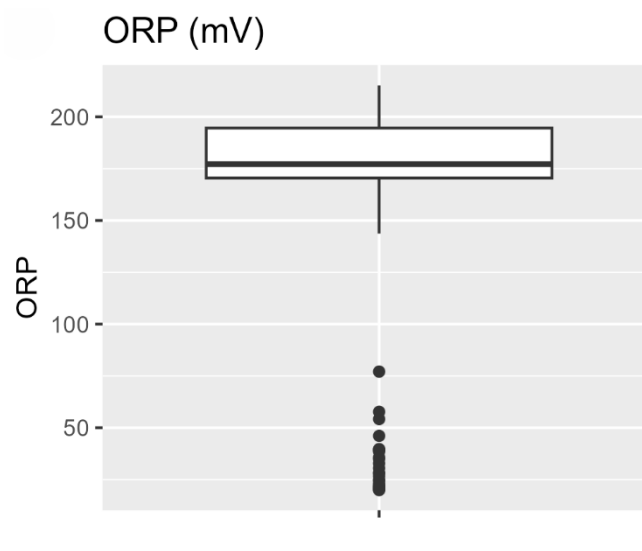


Figuur 47 - Verloop pH in functie van tijd (dagen)

Bron: eigen werk

7.2.5 Oxidatie reductie potentiaal

De boxplot (Figuur 48) illustreert de verdeling van de oxidatiereductiepotentiaal gemeten in millivolt (mV). De centrale box strekt zich uit van 170 mV tot 190 mV. De mediaan ORP-waarde ligt op 180 mV. Het is belangrijk op te merken dat er een cluster van individuele gegevenspunten onder de hoofdgroep ligt, met waarden variërend van 10 mV tot 750 mV.



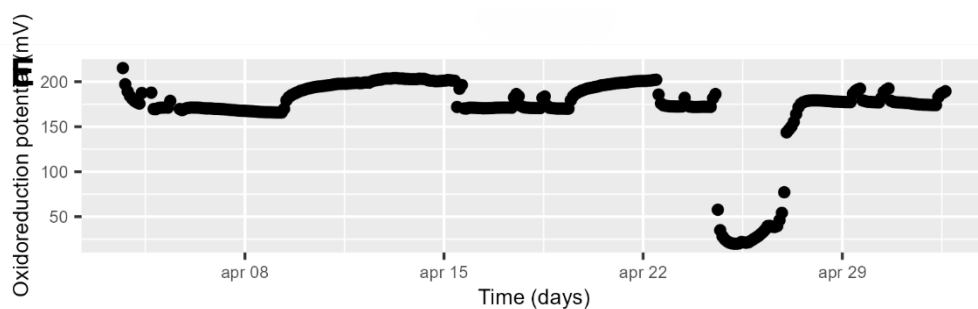
Figuur 48 - Boxplot ORP (mV) van zoute water

Bron: eigen werk

De grafiek in Figuur 49 toont de veranderingen in oxidatie reductie potentiaal (mV) in de loop van de tijd in april.

Van 3 april tot ongeveer 23 april blijft het oxidatie reductie potentiaal relatief stabiel rond 150 tot 200 mV. Er zijn kleine fluctuaties, maar geen significante veranderingen tijdens deze periode. Op 23 april is er een plotselinge daling in de oxidatie reductie potentiaal tot bijna nul. Kort na deze daling stijgt de ORP terug scherp tot ongeveer 200 mV waar het zich stabiliseert.

De plotselinge daling van de ORP zou een gevolg kunnen zijn van de daling van het opgeloste zuurstofgehalte (zoals te zien is in figuur 38), waardoor er minder zuurstofmoleculen beschikbaar zijn voor redoxreacties. Als gevolg daarvan heeft de ORP de neiging te dalen omdat er minder mogelijkheden zijn voor zuurstof om als elektronenacceptor te fungeren.

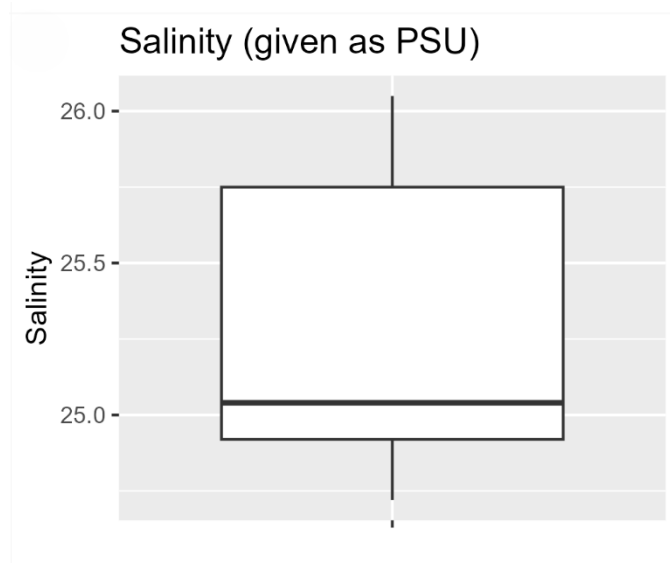


Figuur 49 - Verloop ORP (mV) in functie van tijd (dagen)

Bron: eigen werk

7.2.6 Zoutgehalte

De boxplot (Figuur 50) illustreert de verdeling van de saliniteit gemeten in 'Practical Salinity Units'. Binnen deze dataset liggen de meeste saliniteitswaarden tussen 24,9 en 25,75 PSU, wat duidt op een relatief lage variatie. De mediaan van de zoutgehaltes ligt op 25,1 PSU.

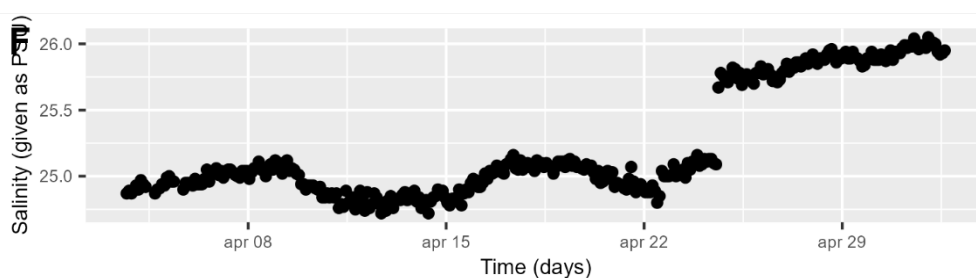


Figuur 50 - Boxplot zoutgehalte (PSU) van zoute water

Bron: eigen werk

In Figuur 51 is te zien dat na het toevoegen van 25 kilo zout aan het water op 3 april het zoutgehalte steeg tot ongeveer 25,0 PSU. Van 3 april tot ongeveer 23 april blijft het zoutgehalte relatief constant op deze waarde.

Op 23 april, toen er 1 kilo natriumsulfiet werd toegevoegd, is er een duidelijke verandering merkbaar. Natriumsulfiet (Na_2SO_3) draagt ook bij aan het zoutgehalte, maar het effect is anders dan dat van zout. De toevoeging van natriumsulfiet verhoogt het zoutgehalte tot ongeveer 26,0 PSU. Na deze piek stabiliseert het zoutgehalte zich weer en blijft relatief onveranderd tot het einde van de maand.



Figuur 51 - Verloop zoutgehalte (PSU) in functie van tijd (dagen)

Bron: eigen werk

7.2.7 Verbanden tussen de verschillende fysicochemische parameters

Figuur 52 illustreert een paarsgewijze correlatie matrix waarbij te zien is hoe veranderingen in één parameter veranderingen in een andere parameter kunnen beïnvloeden. Hierbij zijn er verschillende opmerkelijke correlaties tussen de gemeten parameters na de toevoeging van 25 kg zout op 3 april en 1 kg natriumsulfiet op 24 april.

Een van de significante waarnemingen is de sterke positieve correlatie (0,795) tussen temperatuur en geleidbaarheid. Deze relatie suggereert dat als de temperatuur stijgt, de geleidbaarheid van het water ook neigt te stijgen. Dit kan te wijten zijn aan de verhoogde ionenmobiliteit bij hogere temperaturen. De toevoeging van zout, waardoor het zoutgehalte steeg, versterkte dit effect waarschijnlijk door het aantal ionen in het water te verhogen (Barron & Ashton, 2005).

De sterke negatieve correlatie tussen pH en temperatuur (-0,703) die werd waargenomen na het toevoegen van zout, geeft aan dat als de watertemperatuur stijgt, de pH daalt. Dit fenomeen kan worden verklaard door de invloed van temperatuur op de mobiliteit en dissociatie van ionen in een oplossing. Een verhoging van de temperatuur kan leiden tot een verhoogde dissociatie van moleculen, vooral in het geval van zwakke zuren en basen, wat resulteert in meer waterstofionen in de oplossing. Aangezien pH een maat is voor de waterstofionenconcentratie, leidt deze toename in H^+ -concentratie bij hogere temperaturen tot een afname van pH (Ashton & Geary, 2011). Bovendien kan een hogere temperatuur de viscositeit in de oplossing verlagen, waardoor de mobiliteit van ionen toeneemt.

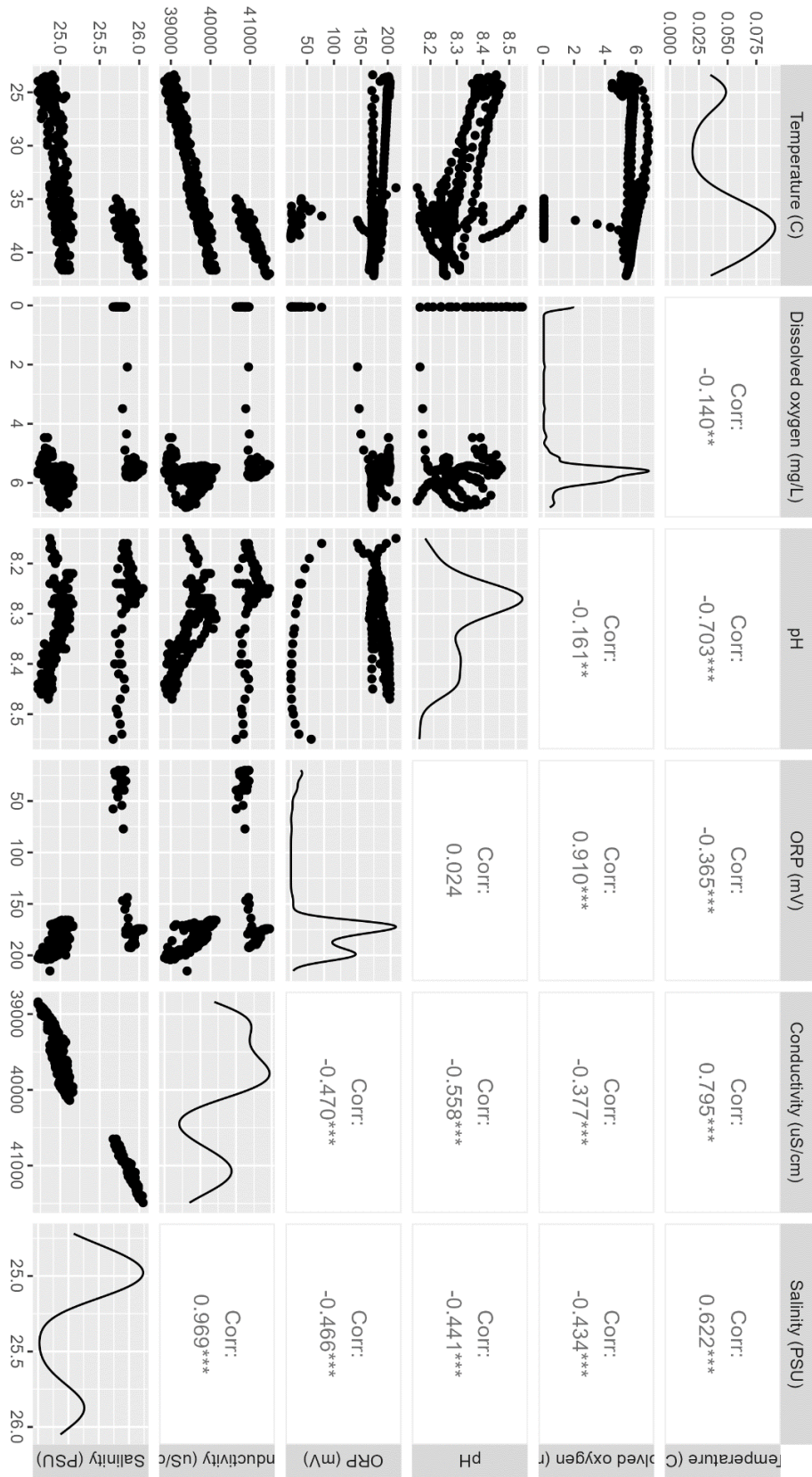
De sterke positieve correlatie tussen opgeloste zuurstof en oxidatiereductiepotentiaal (0,910) suggereert dat hogere niveaus van opgeloste zuurstof resulteren in hogere ORP-waarden. Opgeloste zuurstof werkt als een belangrijk oxidatiemiddel, waardoor de oxidatieve capaciteit van het water toeneemt en daardoor de ORP stijgt. De toevoeging van zout beïnvloedt de redoxdynamiek door de introductie van ionen die deelnemen aan redoxreacties, waardoor het effect van opgeloste zuurstof op de ORP wordt versterkt.

Tenslotte werd er net zoals bij Figuur 39 een extreem sterke positieve correlatie (0,969) gevonden tussen geleidbaarheid en zoutgehalte. De toevoeging van 25 kilogram zout verhoogde direct zowel het zoutgehalte als de geleidbaarheid. Geleidbaarheid is een maat voor het ionengehalte van het water, dat direct gerelateerd is aan zoutgehalte. Daarom

resulteerde de verhoging van het zoutgehalte door de toevoeging van zout in een overeenkomstige verhoging van het geleidingsvermogen, wat leidde tot de waargenomen zeer sterke positieve correlatie (*Why Measure Conductivity or Salinity?*, z.d.).

Na toevoeging van zout aan het water zou er nog steeds een sterke negatieve correlatie verwacht worden tussen temperatuur en opgeloste zuurstof, evenals tussen temperatuur en ORP, vergelijkbaar met de correlaties die waargenomen werden voor de toevoeging van het zout (7.1.7 Correlatie tussen de verschillende fysicochemische parameters. Deze verwachting is gebaseerd op de vastgestelde relatie waarbij hogere temperaturen over het algemeen de oplosbaarheid van opgeloste zuurstof verminderen en de ORP-waarden verlagen als gevolg van verhoogde metabolische activiteit en verminderde gasoplosbaarheid. De correlatiewaarden (-0,140 voor temperatuur en opgeloste zuurstof en -0,365 voor temperatuur en ORP) komen echter niet overeen met deze verwachting. Nadere bestudering van de grafieken laat zien dat deze relaties blijven bestaan, maar dat de totale correlatiewaarden niet kloppen. De toevoeging van natriumsulfiet veroorzaakte een plotselinge en significante daling van het zuurstofgehalte, waardoor de natuurlijke correlatiepatronen werden verstoord en de correlatiewaarden niet representatief waren. Deze plotse daling in opgeloste zuurstof introduceerde een afwijking die de berekende correlaties beïnvloedde en de onderliggende consistente negatieve relaties die duidelijk waren in de visuele gegevens maskeerde.

Deze verklaringen benadrukken de impact van het toevoegen van aanzienlijke hoeveelheden zout en natriumsulfiet aan het water. De ingrepen verhoogden het ionengehalte, wat de geleidbaarheid en het zoutgehalte beïnvloedde, terwijl het natriumsulfiet de opgeloste zuurstof en pH beïnvloedde. Deze veranderingen dragen bij aan de waargenomen sterke correlaties tussen de verschillende waterkwaliteitsparameters.



Figuur 52 - Paarsgewijze correlatie matrix van omgevingsparameters zoute water

Bron: Eigen werk

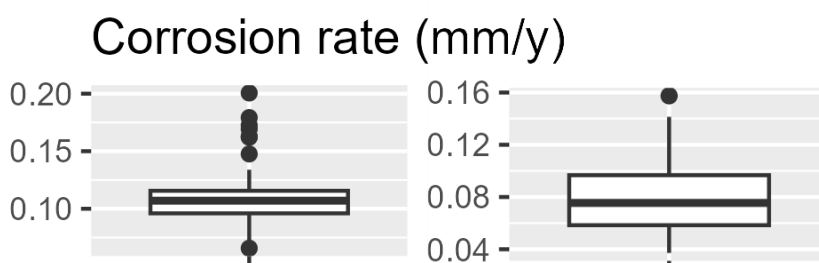
7.3 Corrosiedata

7.3.1 Verloop corrosiesnelheid

De twee boxplots in Figuur 53 vergelijken de corrosiesnelheden voor S235- en S355-staal tijdens de periode van februari tot mei. Voor S235-staal is de mediaan van de corrosiesnelheid ongeveer 0,10 mm/jaar. De interkwartielafstand, die de middelste 50% van de gegevens weergeeft, loopt van ongeveer 0,10 mm/jaar tot 0,15 mm/jaar. De whiskers lopen van ongeveer 0,10 mm/jaar tot 0,20 mm/jaar en geven het bereik van de gegevens aan, uitschieters niet meegerekend. Er zijn een aantal uitschieters boven de bovengrens, variërend van ongeveer 0,15 mm/jaar tot 0,20 mm/jaar, wat duidt op hogere corrosiesnelheden.

Daartegenover toont de boxplot voor S355-staal een lagere mediane corrosiesnelheid van ongeveer 0,08 mm/jaar. De interkwartielafstand voor S355-staal is breder, variërend van ongeveer 0,06 mm/jaar tot 0,12 mm/jaar, wat duidt op een grotere variabiliteit in de corrosiesnelheden vergeleken met S235-staal. De whiskers voor S355-staal reiken van ongeveer 0,04 mm/jaar tot 0,16 mm/jaar, wat een breder bereik van gegevens dekt. Er is één uitschieter boven de bovenste whisker op ongeveer 0,16 mm/jaar.

Bij vergelijking van de twee boxplots, vertoont S235-staal een hogere mediaan corrosiesnelheid en meer uitschieters bij hogere snelheden dan S355-staal. S355-staal vertoont een betere algemene corrosieweerstand met een lagere mediaanwaarde en minder uitschieters. Bovendien suggereert de bredere interkwartielafstand van S355-staal meer variabiliteit in de corrosiesnelheden, maar het behoudt over het algemeen lagere snelheden vergeleken met S235-staal. Deze vergelijking laat zien dat S355-staal beter presteert in termen van corrosieweerstand onder dezelfde experimentele omstandigheden.



Figuur 53 - Boxplot van corrosiesnelheid van S235-staal (links) en S355-staal (rechts)

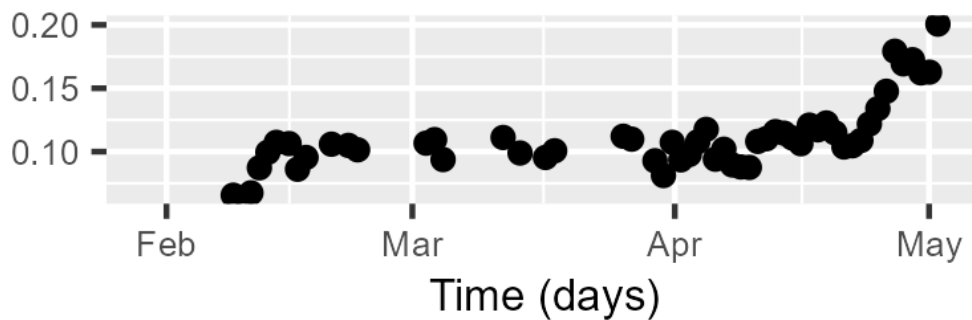
Bron: eigen werk

Figuur 54 toont de corrosiesnelheid, gemeten in millimeters per jaar, over een periode van februari tot mei. Aanvankelijk, in februari, begint de corrosiesnelheid bij ongeveer 0,10 mm/jaar. Een lichte toename wordt waargenomen in begin februari, waar de snelheid stijgt tot ongeveer 0,11 mm/jaar, mogelijk door stabilisatie van het systeem of initiële blootstelling aan basiscondities. Van midden februari tot midden maart stabiliseert de corrosiesnelheid zich rond 0,10 mm/jaar, zonder significante fluctuaties, wat duidt op een stabiele conditie onder de initiële opstelling.

Eind maart treedt een merkbare toename van de corrosiesnelheid op, tot ongeveer 0,12 mm/jaar. Deze toename correleert met de toevoeging van zout aan het systeem, wat de zeewateromstandigheden simuleert. Het hogere zoutgehalte versnelt waarschijnlijk het corrosieproces. Gedurende de hele maand april vertoont de corrosiesnelheid schommelingen maar behoudt een algemene opwaartse trend, schommelend rond 0,12 tot 0,13 mm/jaar. Deze schommelingen zouden te wijten kunnen zijn aan verschillende niveaus van omgevingsfactoren zoals temperatuur en zuurstofniveau in wisselwerking met de zoute omstandigheden.

Een significante toename in de corrosiesnelheid wordt waargenomen vanaf eind april, deze bereikt 0,20 mm/jaar begin mei. Deze sterke stijging van de corrosiesnelheid kan worden toegeschreven aan de toevoeging van natriumsulfiet, dat sulfietionen in het systeem introduceert. Deze ionen, in combinatie met de bestaande chloride-ionen uit het zout, creëren waarschijnlijk een zeer corrosieve omgeving, waardoor de corrosiesnelheid aanzienlijk versnelt.

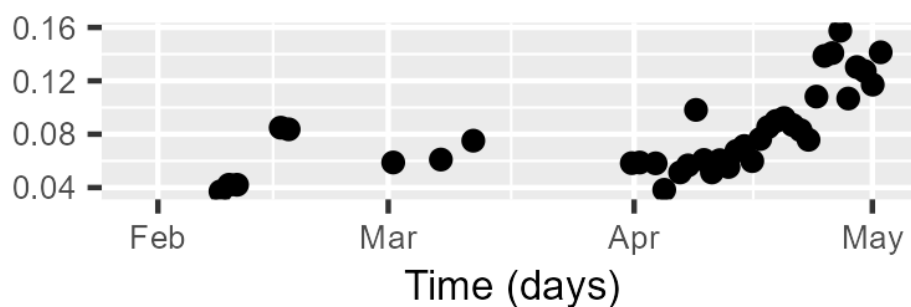
De trends in de grafiek geven duidelijk aan dat zowel de toevoeging van zout als natriumsulfiet de corrosiesnelheid significant beïnvloeden. Aanvankelijk stabiele condities worden steeds corrosiever met elke toevoeging, wat het synergetische effect aantoont van zoutgehalte en sulfietionen in het bevorderen van corrosie.



Figuur 54 - Verloop corrosiesnelheid (mm/jaar) in functie van tijd (dagen) voor S235-staal

Bron: eigen werk

De grafiek van de corrosiesnelheid voor S355-staal (Figuur 55) vertoont vergelijkbare trends als die van S235-staal, met in beide gevallen een initiële stabilisatie, gevolgd door stijgingen die gecorreleerd zijn met de toevoeging van zout eind maart en natriumsulfiet eind april. De corrosiesnelheden voor S355-staal zijn echter over het algemeen lager. Voor S355 is de initiële snelheid in februari ongeveer 0,04 mm/jaar, stijgt tot 0,08 mm/jaar eind maart en bereikt een piek van 0,16 mm/jaar begin mei. S235-staal daarentegen begint bij 0,10 mm/jaar, bereikt 0,12 mm/jaar eind maart en 0,20 mm/jaar begin mei. Dit geeft aan dat beide staalsoorten dezelfde trend volgen, maar dat S355-staal een betere algemene corrosieweerstand heeft.



Figuur 55 - Verloop corrosiesnelheid (mm/jaar) in functie van tijd (dagen) voor S355-staal

Bron: eigen werk

7.3.2 Correlaties met corrosiesnelheid

De gegevens tonen een positieve correlatie tussen de geleidbaarheid van het water en de corrosiesnelheden voor zowel S235- als S355-staal (0,517 voor S235 en 0,426 voor S355) (Figuur 56 en Figuur 57). Deze correlatie geeft aan dat wanneer de geleidbaarheid van het water toeneemt, de corrosiesnelheid ook toeneemt. Geleidbaarheid meet het vermogen van water om een elektrische stroom te geleiden, wat afhangt van de concentratie opgeloste

zouten en ionen. Een hogere geleidbaarheid betekent een grotere aanwezigheid van ionen, wat elektrochemische reacties bevordert die corrosie aandrijven. Bijgevolg verhoogt de verhoogde ionische activiteit de snelheid waarmee corrosie optreedt op de metaaloppervlakken (J. Wang et al., 2016).

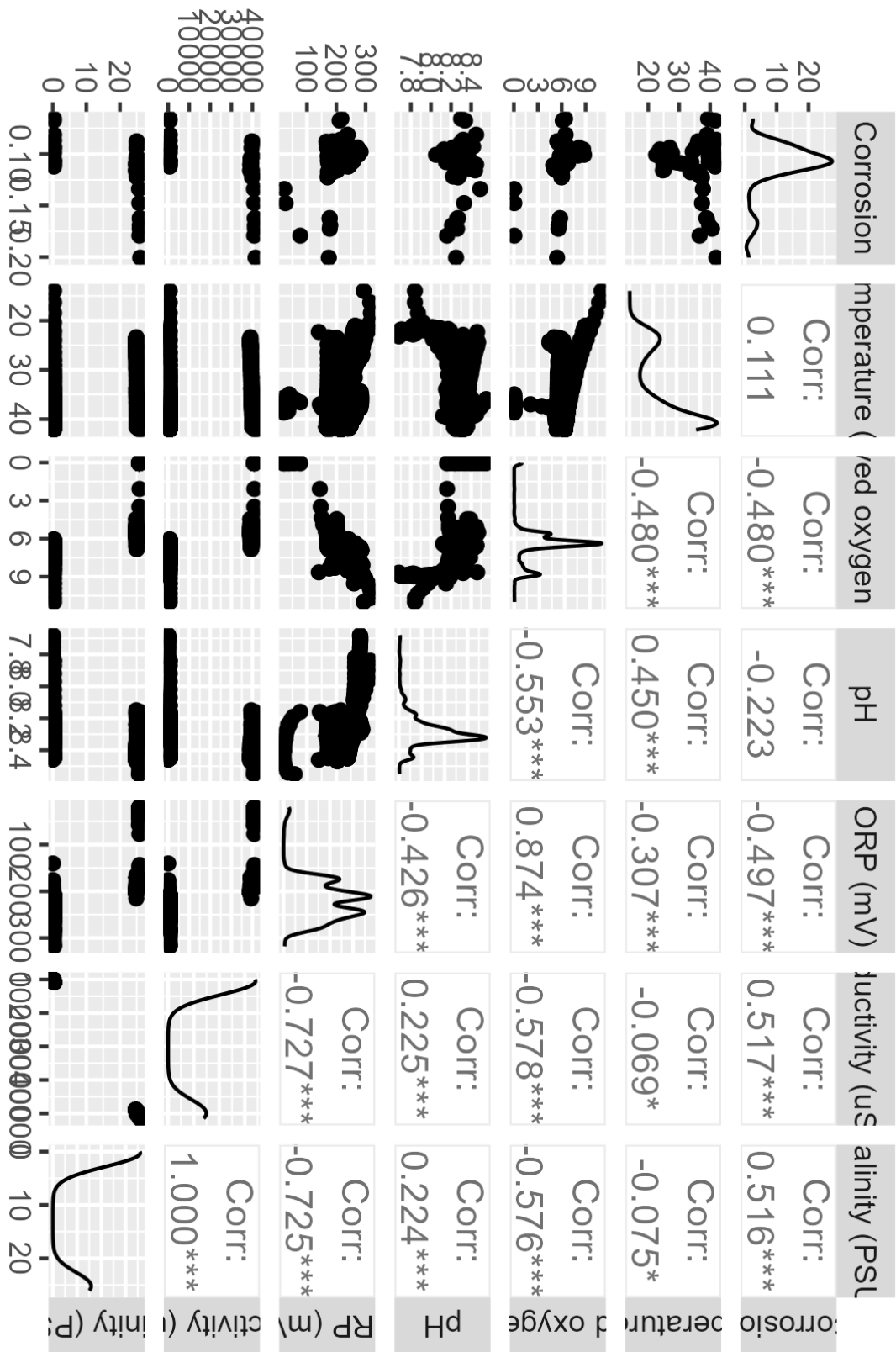
Op dezelfde manier wordt een positieve correlatie waargenomen tussen zoutgehalte en corrosiesnelheid voor beide staaltypes (0,516 voor S235 en 0,423 voor S355). Zoutgehalte verwijst naar de concentratie opgeloste zouten in het water. Een hoger zoutgehalte introduceert meer chloride-ionen in het water, die zeer agressief zijn en de beschermende oxidelagen op metaaloppervlakken kunnen verstoren. Deze verstoring versnelt de elektrochemische reacties die tot corrosie leiden, waardoor de corrosiesnelheid toeneemt (Malik et al., 1992).

De relatie tussen zoutgehalte en geleidbaarheid verklaart waarom beide parameters gelijkaardige patronen vertonen in hun correlatie met corrosiesnelheden. Het zoutgehalte heeft een directe invloed op de geleidbaarheid van water; een hoger zoutgehalte verhoogt de concentratie opgeloste zouten, wat op zijn beurt de geleidbaarheid van het water verhoogt. Als zowel het zoutgehalte als de geleidbaarheid toenemen, zijn er meer ionen beschikbaar om deel te nemen aan elektrochemische reacties, waardoor de corrosiesnelheid toeneemt. Deze directe relatie onderstreept de onderling verbonden aard van deze parameters en hun gezamenlijke invloed op de corrosieprocessen van S235- en S355-staal.

Voor zowel S235- als S355-staal, is er een sterke negatieve correlatie tussen opgeloste zuurstof en de corrosiesnelheid (-0.480 voor S235 en -0.636 voor S355). Dit suggereert dat wanneer het opgeloste zuurstofgehalte toeneemt, de corrosiesnelheid afneemt. Deze bevinding is in tegenspraak met de resultaten van veel andere studies, die meestal een positieve correlatie rapporteren, waarbij hogere opgeloste zuurstofconcentraties leiden tot hogere corrosiesnelheden (Lee et al., 2021). De discrepantie kan worden toegeschreven aan specifieke experimentele omstandigheden die de corrosie negatief beïnvloeden zoals de pH-waarden.

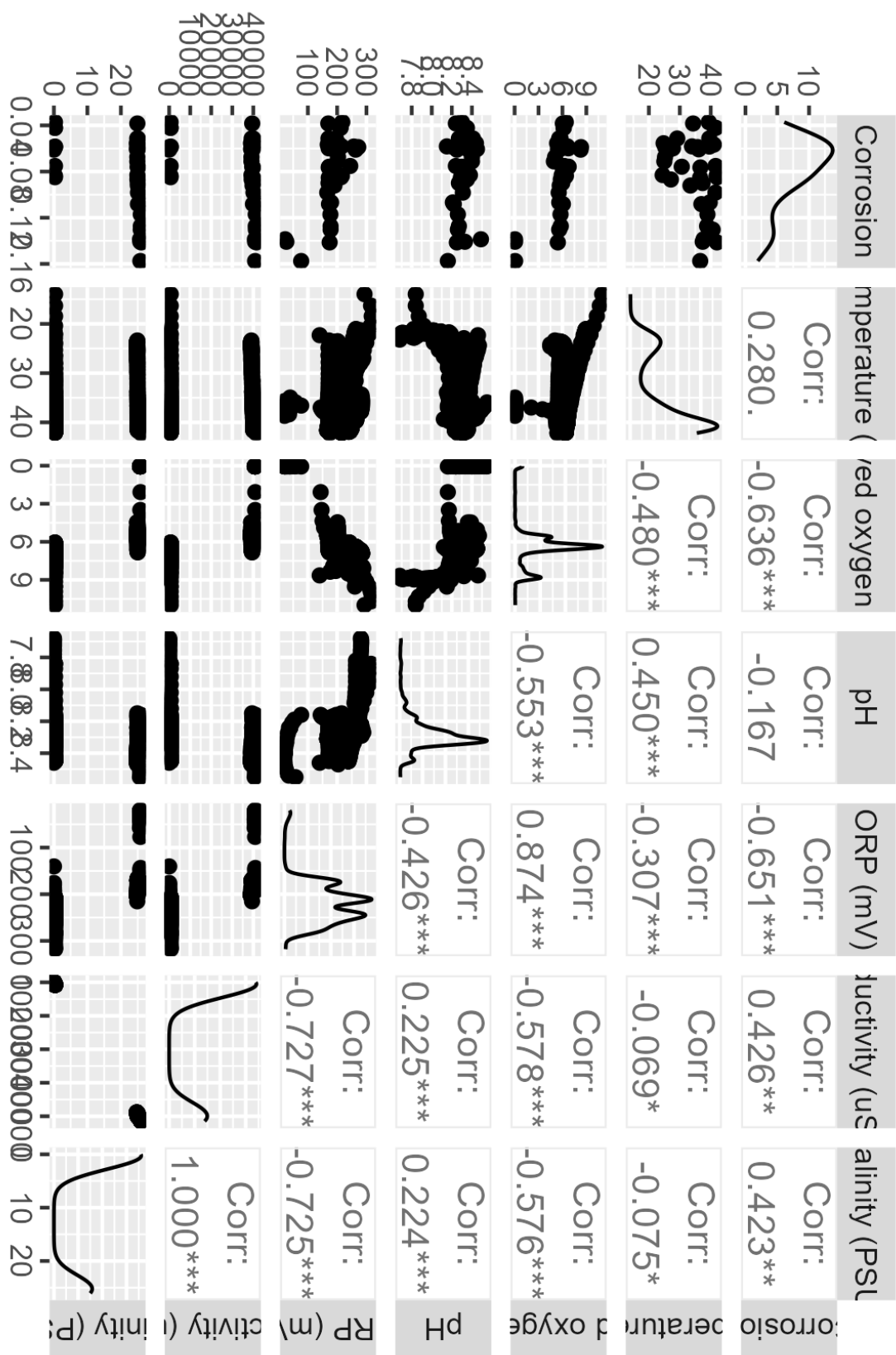
Een vergelijkbare situatie wordt waargenomen voor de correlatie tussen het oxidatie-reductie potentiaal en de corrosiesnelheid. Er is ook een sterke negatieve correlatie gevonden tussen ORP en de corrosiesnelheid (-0.497 voor S235 en -0.651 voor S355). Dit suggereert dat hogere

ORP-waarden, die duiden op een meer oxiderende omgeving, geassocieerd zijn met lagere corrosiesnelheden. Ook deze bevinding is tegenstrijdig met de resultaten van veel andere studies, die doorgaans een positieve correlatie rapporteren tussen ORP en corrosiesnelheid. Deze studies tonen aan dat hogere ORP-waarden meestal leiden tot hogere corrosiesnelheden door versterkte oxidatiereacties aan het metaaloppervlak (Lee et al., 2021).



Figuur 56 - Paarsgewijze correlatie matrix van corrosiesnelheid en omgevingsparameters van S235-staal

Bron: eigen werk



Figuur 57 - Paarsgewijze correlatie matrix van corrosiesnelheid en omgevingsparameters van S355-staal

Bron: eigen werk

8. Discussie

De experimenten uitgevoerd in deze thesis hebben waardevolle inzichten opgeleverd in de corrosieve aard van gaswasser-omgevingen en hebben de sleutelfactoren geïdentificeerd die bijdragen aan versnelde corrosiesnelheden. De resultaten benadrukken het belang van het begrijpen van de wisselwerking tussen verschillende omgevingsparameters en hun invloed op de levensduur en het onderhoud van gaswassers.

Op basis van de experimentele bevindingen kunnen verschillende maatregelen worden genomen om corrosie in gaswassers onder controle te houden en hun operationele levensduur te verlengen. Het gebruik van corrosiebestendige materialen is cruciaal. Legeringen zoals duplex roestvast staal of titanium zijn beter bestand tegen corrosieve omgevingen. Regelmatig onderhoud en controle zijn essentieel om corrosie effectief te beheersen. Het implementeren van een schema voor periodieke inspecties en reiniging kan helpen bij het identificeren en aanpakken van vroege tekenen van corrosie. Het gebruik van geavanceerde sensoren om continu omgevingsparameters zoals temperatuur, pH, opgeloste zuurstof en zoutgehalte te controleren kan real-time gegevens opleveren voor tijdige interventie.

Het optimaliseren van de operationele parameters van gaswassers kan corrosie verminderen. Zo kan het regelen van het debiet en de temperatuur van het waswater de thermische stress minimaliseren en de reactiviteit van corrosieve stoffen verminderen. Het systeem regelmatig spoelen met vers water kan helpen om opgehoopte zouten en andere verontreinigingen te verwijderen.

Ontwerpaanpassingen die de blootstelling van kritische componenten aan corrosieve stoffen minimaliseren, kunnen de duurzaamheid van gaswassers verbeteren. Het gebruik van opofferingsanoden om meer kwetsbare onderdelen te beschermen of het aanbrengen van corrosiebestendige bekledingen in kritieke gebieden kunnen bijvoorbeeld effectieve strategieën zijn.

Het handhaven van een optimale redoxpotentiaal in het gaswassersysteem kan helpen om corrosie onder controle te houden. Dit kan worden bereikt door de chemische samenstelling

van het gaswasserswater aan te passen en redox-actieve middelen te gebruiken om een evenwichtige ORP te handhaven.

Om de nauwkeurigheid van de experimentele bevindingen verder te verbeteren en hun toepasbaarheid op echte omstandigheden te garanderen, is het van cruciaal belang om de werkelijke operationele omgevingen waarmee gaswassers te maken krijgen, na te bootsen.

Om het experiment nauwkeuriger te maken, is het belangrijk om de echte omstandigheden waar scrubbers mee te maken hebben na te bootsen. Een van die belangrijke factoren zijn de temperatuurveranderingen. In echte scrubbers kunnen de temperaturen enorm schommelen, van meer dan 300°C in de uitlaatgassen tot ongeveer 25°C tot 60°C in het waswater. Het nabootsen van deze snelle temperatuurschommelingen in het lab zou een beter beeld geven van hoe thermische stress corrosie kan beïnvloeden. Daarnaast zouden we de wisselende drukcondities moeten simuleren die in echte gaswassers voorkomen, omdat deze ook van invloed zijn op hoe gassen en vloeistoffen zich gedragen en een bijdrage leveren aan corrosie.

Een ander belangrijk aspect is de chemische samenstelling van de uitlaatgassen. Echte gaswassers hebben te maken met een mix van verontreinigende stoffen zoals zwaveloxiden, stikstofoxiden, koolstofmonoxide, deeltjes en vluchtige organische stoffen. Om nauwkeurige resultaten te krijgen, moet het experiment een gasmengsel gebruiken dat deze samenstelling in de praktijk goed benadert. Het is ook belangrijk om andere chemicaliën op te nemen die in gaswassers worden gebruikt, zoals natriumhydroxide in gesloten systemen, die corrosie kunnen beïnvloeden. In ons experiment bleek dat het effect van sulfiet slechts een paar dagen aanhield. Het zou beter zijn geweest als er een constant effect van het sulfiet zou zijn geweest, omdat dit nauwkeuriger de continue blootstelling aan chemicaliën zou weerspiegelen die in echte scrubbers optreedt. Door deze omstandigheden nauwkeurig na te bootsen, zou het experiment resultaten opleveren die beter toepasbaar zijn op praktijksituaties.

De kwaliteit van het water dat gebruikt wordt in de scrubbers is een andere cruciale factor. Echte gaswassers gebruiken meestal zeewater met een hoog zoutgehalte, een specifieke pH-waarde en verschillende opgeloste mineralen en verontreinigende stoffen. Het gebruik van echt zeewater of een meer nauwkeurig gesimuleerde versie zorgt ervoor dat het experiment

de echte omstandigheden weerspiegelt. Deze aanpak zou helpen om te begrijpen hoe deze watereigenschappen corrosie in gaswassers beïnvloeden.

Voor nauwkeurigere resultaten moeten de materialen die gebruikt worden in het experiment overeenkomen met de materialen in echte gaswassers, zoals specifieke kwaliteiten van roestvrij staal of andere corrosiebestendige legeringen. Dit zou ervoor zorgen dat het waargenomen corrosiegedrag realistisch is. Bovendien zou het simuleren van de slijtage die componenten in de loop van de tijd ondergaan inzicht verschaffen in de langetermijneffecten van corrosie. Echte gaswassers ondervinden continue stress en blootstelling aan de omgeving, wat leidt tot geleidelijke degradatie. Het opnemen van deze factoren in het experiment zou een duidelijker beeld geven van de duurzaamheid en levensduur van scrubber componenten.

Door te focussen op deze aspecten - realistische bedrijfsomstandigheden, chemische samenstelling, waterkwaliteit en materiaaloverwegingen - zou het experiment de werkelijke omgeving in gaswassers beter weerspiegelen. Dit zou leiden tot nauwkeurigere en bruikbaarere resultaten, die zouden helpen om effectievere corrosiepreventiestrategieën voor maritieme gaswassers te ontwikkelen.

9. Conclusie

Het onderzoek naar corrosie in scrubbers heeft een uitgebreid antwoord geboden op de centrale onderzoeksvraag. Onze bevindingen bevestigen dat scrubbers opereren in een uiterst corrosieve omgeving, wat significant bijdraagt aan de snelle afbraak van materialen. De resultaten van de experimenten tonen aan dat temperatuurvariaties, lage pH-waarden, hoge saliniteit, verhoogde zuurstofconcentraties, en de aanwezigheid van chloriden allemaal afzonderlijk en in combinatie de corrosiesnelheden aanzienlijk verhogen.

De hoge en fluctuerende temperaturen in scrubbers versnellen de corrosieprocessen door thermische spanningen te creëren en de reactiviteit van de corrosieve elementen te verhogen. De aanwezigheid van zwaveloxiden en de resulterende lage pH-waarden in het scrubberwater creëren een sterk zuur milieu dat de corrosie van metalen bevordert. De verhoogde niveaus van opgeloste zuurstof in de scrubbers stimuleren elektrochemische reacties die de corrosie van metalen versnellen. Het hoge zoutgehalte en de aanwezigheid van chloriden in zeewater dragen bij aan de vorming van putcorrosie en spleetcorrosie, wat leidt tot diepgaande schade aan metaaloppervlakken.

Op basis van deze bevindingen kunnen we enkele belangrijke aanbevelingen doen om de corrosie in scrubbers te beheersen en hun levensduur te verlengen. Het gebruik van corrosiebestendige materialen zoals specifieke legeringen en coatings is cruciaal om de duurzaamheid van scrubbers te verbeteren. Regelmatige monitoring van omgevingsparameters zoals temperatuur, pH, zuurstofgehalte, en saliniteit, gecombineerd met tijdig onderhoud, kan de progressie van corrosie vertragen. Aanpassingen in de operationele procedures, zoals periodieke spoeling met zoet water om zoutaccumulatie te verminderen en het gebruik van neutraliserende middelen om de pH te stabiliseren, kunnen de corrosieve impact minimaliseren.

Vooruitblikkend zou toekomstig onderzoek zich kunnen richten op het testen van nieuwe materialen en coatings onder gesimuleerde scrubberomstandigheden om hun effectiviteit tegen corrosie te evalueren. Bovendien kan het ontwikkelen van geavanceerde sensortechnologieën voor real-time monitoring bijdragen aan een beter beheer van corrosie in maritieme toepassingen. In het geheel heeft deze scriptie niet alleen aangetoond dat

scrubbers zeer corrosieve omgevingen zijn, maar ook praktische oplossingen voorgesteld om deze uitdaging aan te pakken, waarmee een belangrijke bijdrage wordt geleverd aan de duurzaamheid en efficiëntie van maritieme scrubbersystemen.

Bibliografie

10.1 Washwater discharge criteria footnote. (2009, juli 17). imorules.com.

<https://www.imorules.com/GUID-39E9C2EA-B67B-4547-959D-CD62F522BE9E.html>

9030 PlusTM Corrat[®] Instrument User Manual (p. 55). (2002). [Manual]. Rohrback Cosasco Systems, Inc. https://assets-global.website-files.com/615499fb78247e406279d3ab/615499fb78247e3b1179d91b_9030_Plus_Corrosion_Rate_Instrument_Manual.pdf

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY WASHINGTON DC. (2011). Exhaust Gas Scrubber Washwater Effluent (p. 0047).

Aragon, E., Woillez, J., Perice, C., Tabaries, F., & Sitz, M. (2009). Corrosion resistant material selection for the manufacturing of marine diesel exhausts scrubbers. *Materials & Design*, 30(5), 1548-1555. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.053>

Arrieta, A. (2021, mei 18). *Vessels experiencing scrubber corrosion issues*. Wencon.

<https://wencon.com/vessels-experiencing-scrubber-corrosion-issues/>

Ashton, J., & Geary, L. (2011). The effects of temperature on pH measurement. *Tsp*, 1(2), 1-7.

Bajic, A. (2019, september 18). *Scrubber failure floods engine room | Project Cargo Journal*. Project Cargo Journal.

<https://www.projectcargojournal.com/shipping/2019/09/18/scrubber-failure-floods-engine-room/>

Barron, J. J., & Ashton, C. (2005). The effect of temperature on conductivity measurement. *TSP*, 7(3), 1-5.

Behrends, B., Liebezeit, G., & Gregory, D. (2003). Reducing SO₂ and NO_x emissions from Ships by a seawater scrubber. BP Marine Report, 34.

Brundage, R. (2021, januari 7). Factors Affecting Dissolved Oxygen. *pHionics*.

<https://www.phionics.com/2021/01/07/factors-affecting-dissolved-oxygen/>

Campos-Silva, I. E., & Rodríguez-Castro, G. A. (2015). 18—Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. In E. J. Mittemeijer & M. A. J. Somers (Red.), *Thermochemical Surface Engineering of Steels* (pp. 651-702). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096524.5.651>

C-Cube International / Home. (z.d.). c-cube-international.com. Geraadpleegd 22 mei 2024, van <https://www.c-cube-international.com/>

Closed loop scrubbers. (z.d.). VDL AEC Maritime. Geraadpleegd 21 mei 2023, van <https://www.vdlaecmaritime.com/sox-scrubbing/closed-loop-scrubbers>

Comer, B., Georgeff, E., & Osipova, L. (2020). Air emissions and water pollution discharges from ships with scrubbers. Consult. Rep. Int. Counc. Clean Transp, 12-13.

Davin, S. (2020, juli 14). *The trouble with scrubbers: Shipping “solution” creates new pollution*. WWF.CA. <https://wwf.ca/stories/scrubbers-creates-new-pollution/>

Davis, J. R. (2000). *Corrosion: Understanding the Basics*. ASM International.

Dulière, V., Baetens, K., & Lacroix, G. (2020). Potential impact of wash water effluents from scrubbers on water acidification in the southern North Sea. FPS Mobility and Transport: Brussels, Belgium.

Gao, K., Shang, S., Zhang, Z., Gao, Q., Ma, J., & Liu, W. (2022). Effect of Temperature on Corrosion Behavior and Mechanism of S135 and G105 Steels in CO₂/H₂S Coexisting System. *Metals*, 12(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/met12111848>

Hybrid scrubbers. (z.d.). VDL AEC Maritime. Geraadpleegd 21 mei 2023, van <https://www.vdlaecmaritime.com/sox-scrubbing/hybrid-scrubbers>

Kamcev, J., Sujanani, R., Jang, E.-S., Yan, N., Moe, N., Paul, D. R., & Freeman, B. D. (2018). Salt concentration dependence of ionic conductivity in ion exchange membranes. *Journal of Membrane Science*, 547, 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.10.024>

Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., & Payer, J. (2016). *International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study*. NACE International. <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>

Kremer, M. (2018, oktober 4). *Water Quality 101: What Is ORP in Water Testing?* JENCO. <https://blog.jencoi.com/what-is-orp-in-water-testing>

Learn from the past: Erika oil spill, Europe’s environmental disaster. (2018, december 12). *SAFETY4SEA*. <https://safety4sea.com/cm-learn-from-the-past-erika-oil-spill-europes-environmental-disaster/>

Lee, S., Narayana, P. L., Seok, B. W., Panigrahi, B. B., Lim, S.-G., & S. Reddy, N. (2021). Quantitative estimation of corrosion rate in 3C steels under seawater environment.

- Journal of Materials Research and Technology*, 11, 681-686.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.039>
- LPR-General-Information.pdf*. (z.d.). Geraadpleegd 2 mei 2024, van
<https://www.caproco.com/catalog/pdf/Probes-Instruments/Linear-Polarization-Resistance/LPR-General-Information.pdf>
- Malik, A. U., Mayan Kutty, P. C., Siddiqi, N. A., Andijani, I. N., & Ahmed, S. (1992). The influence of pH and chloride concentration on the corrosion behaviour of AISI 316L steel in aqueous solutions. *Corrosion Science*, 33(11), 1809-1827.
[https://doi.org/10.1016/0010-938X\(92\)90011-Q](https://doi.org/10.1016/0010-938X(92)90011-Q)
- Morgese, M., Ansari, F., Domaneschi, M., & Cimellaro, G. P. (2020). Post-collapse analysis of Morandi's Polcevera viaduct in Genoa Italy. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(1), 69-85. <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00370-7>
- Mundal, S. (2020, oktober 18). *Scrubbers at a glance—DNV*. DNV GL.
<https://www.dnv.com/expert-story/DigitalMagazineDefault>
- Open loop scrubbers*. (z.d.). VDL AEC Maritime. Geraadpleegd 21 mei 2023, van
<https://www.vdlaecmaritime.com/sox-scrubbing/open-loop-scrubbers>
- Porte, H. A. (1967). The effect of environment on the corrosion of metals in sea water—a literature survey. Technical Note N-907, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, CA, USA.
- Prawoto, Y., Ikeda, M., Manville, S., & Nishikawa, A. (2008). Design and failure modes of automotive suspension springs. *Engineering Failure Analysis - ENG FAIL ANAL*, 15, 1155-1174. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.11.003>
- Rashid, K. H., & Khadom, A. A. (2020). Sodium sulfite as an oxygen scavenger for the corrosion control of mild steel in petroleum refinery wastewater: Optimization, mathematical modeling, surface morphology and reaction kinetics studies. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 129(2), 1027-1046.
<https://doi.org/10.1007/s11144-020-01738-3>
- Scuba and Scuba Trimeter water quality probes*. (2022). Royal Eijkelpark.
<https://www.royaleijkelpark.com/media/jljdf531/m-scuba-water-quality-probes.pdf>
- Seal, A. (2017, mei 15). Factors influencing Rate of Corrosion—Sealxpert. *Sealxpert*.
<https://www.sealxpert.com/factors-influencing-rate-of-corrosion>

- Sethi, S. (2021, maart 22). *A Guide To Scrubber System On Ship*. Marineinsight.com.
<https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/>
- Shipping Pollution*. (z.d.). Oceana Europe. Geraadpleegd 21 mei 2023, van
<https://europe.oceana.org/shipping-pollution-1/>
- Singh, R. (2017). 6—Corrosion and Corrosion Protection. In R. Singh (Red.), *Pipeline Integrity Handbook (Second Edition)* (pp. 241-270). Gulf Professional Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813045-2.00017-X>
- Tran, T. A. (2017). Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships. *Journal of Marine Science Research and Development*, 7.
<https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000243>
- Wang, J., Wang, J., & Han, E.-H. (2016). Influence of Conductivity on Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel in High Temperature Aqueous Environment. *Journal of Materials Science & Technology*, 32(4), 333-340. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2015.12.008>
- Wang, L. K., Taricska, J. R., Hung, Y.-T., Eldridge, J. E., & Li, K. H. (2004). Wet and Dry Scrubbing. In L. K. Wang, N. C. Pereira, & Y.-T. Hung (Red.), *Air Pollution Control Engineering* (pp. 197-305). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-59259-778-9_5
- What Are the Wash Water Discharge Regulations?* (z.d.). LIQTECH. Geraadpleegd 21 mei 2023, van <https://liqtech.com/water-treatment-solutions/marine-filtration/marine-scrubber-water-treatment-system/what-are-the-wash-water-discharge-regulations/>
- What is corrosion? (2019, september 19). *Cathwell*. <https://cathwell.com/what-is-corrosion/>
- Why Measure Conductivity or Salinity?* (z.d.). Geraadpleegd 13 mei 2024, van
<https://www.montclair.edu/water-science/environmental-services/conductivity-salinity/>