

Praktisch onderzoek naar de invloed van diepte op corrosiesnelheid

Ruige Verfaillie

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

Promotor: Raf Meskens
Copromotor: dr. Geert Potters

Academiejaar 2023-2024

Woord vooraf en dankbetuiging

Het was een moeilijke bevalling, deze thesis. Het plan was initieel verder te werken op het onderwerp van de bachelorpaper, maar omstandigheden hebben dat helaas verhinderd.

Het onderwerp is bij aanvang van de master (2 jaar geleden ondertussen) geëvolueerd in het huidige onderwerp, *‘Praktisch onderzoek naar de invloed van diepte op corrosiesnelheid’*. Het niet-varende aspect van de maritieme wereld heeft me altijd meer aangetrokken dan het leven aan boord, dus ik ben blij dat hier ook aandacht aan besteed wordt, dan niet in de opleiding zelf, maar in een thesisonderzoek.

Waar externe factoren ons beloofd hadden te kunnen starten in december, is de startdatum pas maart/april geworden. Dat was helaas te laat om genoeg data te verzamelen tegen de deadline van mei of zelfs augustus.

Het academiejaar daarna werd mijn mogelijk tot afstuderen op de Hogere Zeevaartschool nogmaals belemmerd door volgtijdelijkheden, en ook op persoonlijk en professioneel vlak zijn er zaken gebeurd waardoor ik me niet kon concentreren op het schrijven van een thesis.

Ondertussen zijn alle vakken aan de Hogere Zeevaartschool, die ondertussen Antwerp Maritime Academy heet, ondertussen afgelegd. Al wat nog tussen mij en het afstuderen staat is deze thesis. De verzamelde data zijn ondertussen wel al 2 jaar oud, maar zijn nog steeds bruikbaar. Ondertussen is er zelfs meer data bijgekomen om mee te werken.

Ik wil dus zeker mijn promotoren bedanken voor het jarenlange geduld en begrip die ze gehad hebben. Ik begrijp goed dat dat geen sinecure is, zeker niet als ze zelf zoveel werk hebben in het wetenschappelijk onderzoek aan de Hogere Zeevaartschool. Duizendmaal dank.

Uiteraard bedank ik ook mijn vriendin, Saskia, voor het geduld en vooral voor het blijven motiveren en aanzetten tot het afwerken van de studies. Het is voornamelijk dankzij haar dat ik het niet opgegeven heb net voor de finishlijn.

Samenvatting

Corrosie blijft een persistente uitdaging waarmee talloze sectoren zich geconfronteerd zien. Dit chemisch fenomeen leidt tot een snel verlies van integriteit en functionaliteit van metalen.

Binnen de maritieme context is corrosie bijzonder pertinent, aangezien schepen en maritieme structuren veelal vervaardigd zijn uit staal die blootgesteld worden aan omgevingen waarin corrosieve invloeden vrij spel hebben. De snelheid van corrosie wordt bepaald door een veelheid aan factoren, die vaak worden aangeduid als corrosieparameters. Na een inleidende beschouwing van de voornaamste corrosieparameters, wordt in dit onderzoek de hypothese onderzocht of de locatie in het water, specifiek de onderdompeldiepte, een significant effect heeft op de corrosiesnelheid, en zo ja, in welke mate. Hiertoe werden testplaatjes van twee verschillende metalen geplaatst in de haven van Vlissingen op diverse diepten, zowel statisch als dynamisch. Op verschillende tijdstippen werden de plaatjes geïnspecteerd en aan de hand van gewichtsverlies werd geëvalueerd of de diepte daadwerkelijk een invloed uitoefende op de corrosiegraad. De resultaten van het onderzoek geven eenduidig aan dat de diepte geen significante invloed heeft op de snelheid van corrosie.

Abstract

Corrosion remains a persistent challenge faced by numerous sectors. It is a chemical phenomenon that leads to the rapid deterioration of metals, resulting in loss of integrity and functionality. Within the maritime context, corrosion is particularly relevant, as ships and maritime structures are often constructed from steel and are exposed to environments where corrosive influences are prevalent. The rate of corrosion is determined by a multitude of factors, often referred to as corrosion parameters. Following an introductory examination of the primary corrosion parameters, this study investigates the hypothesis that the location in the water, specifically the immersion depth, has a significant effect on corrosion rate, and if so, to what extent. To this end, test plates of two different metals were immersed in the port of Vlissingen at various depths, both statically and dynamically. At different intervals, the plates were inspected, and weight loss was used to assess whether depth indeed influenced corrosion rate. The results of the study unequivocally indicate that depth does not exert a significant influence on the corrosion rate.

Inhoudstafel

Woord vooraf en dankbetuiging	i
Samenvatting.....	ii
Abstract	iii
Inhoudstafel	iv
Lijst van figuren	vi
Lijst van tabellen.....	ix
Lijst van afkortingen	x
Verklarende woordenlijst.....	xi
Lijst van symbolen	xii
1 Corrosie	13
1.1 Chemisch proces	13
1.2 Uniforme corrosie	14
1.3 Spleetcorrosie.....	15
1.4 Putcorrosie	17
1.5 Vliegroeist.....	18
2 Factoren die corrosie beïnvloeden	19
2.1 Biologische aangroei bij schepen en maritieme structuren	19
2.1.1 Fouling in een maritieme context	20
2.1.2 Vormingsstadia van fouling.....	22
2.1.3 De vestiging	22
2.1.4 De aanhechting	23
2.1.5 De ontwikkeling.....	24
2.1.6 De groei	24
2.2 Externe factoren die de corrosie beïnvloeden.....	26
2.2.1 Temperatuur/locatie	26

2.2.2	Zoutgehalte/saliniteit	26
2.2.3	Zuurtegraad	27
2.2.4	Voedingsstoffen	27
2.2.5	Licht	28
3	Corrosie in havens en andere getijgeboden omgevingen	30
3.1	Verticale verdeling van de bovenste waterlagen in zones	30
4	SOCORRO.....	33
5	Onderzoeksdoelstelling.....	35
6	Materiaal en methoden	36
6.1	Staalsoorten	36
6.2	Codering van de plaatjes	36
6.3	Locatie	37
6.3.1	Vorbereiding en berekeningen voor de rekken aan de kaaimuur	40
6.3.2	Vorbereiding en berekeningen voor de rekken aan het ponton	41
6.4	Sensoren.....	43
6.5	Installatie van de rekken	44
6.5.1	Vorbereiding en Navitec	44
6.5.2	Installatie op de kaai	45
6.5.3	Installatie op het ponton.....	47
6.6	Gewichtsverlies en corrosiesnelheid.....	49
6.7	Praktische uitvoering.....	52
6.7.1	Procedure afnemen plaatjes	52
6.7.2	Reinigen plaatjes	53
6.8	Visuele inspectie.....	55
7	Resultaten experiment.....	60
7.1	Grade A.....	60
7.1.1	Corrosiesnelheid.....	60

7.1.2	Massaverlies.....	60
7.2	S 355.....	63
7.2.1	Corrosiesnelheid.....	63
7.2.2	Massaverlies.....	63
8	Statistische analyse van de resultaten	66
8.1	ANOVA.....	66
8.2	Grade A.....	67
8.2.1	Corrosiesnelheid.....	67
8.2.2	Massaverlies.....	68
8.3	S 355.....	76
8.3.1	Corrosiesnelheid.....	76
8.3.2	Massaverlies.....	77
8.4	Vergelijking Grade A en S 355 op gelijkaardige dieptes.....	85
8.5	Vergelijking onderzoek in Oostende en Vlissingen	87
9	Conclusie en discussie	89
	Bibliografie	90
	Bijlagen	97
Bijlage 1.	Stappenplan voor het opbouwen van het platform op de kaai.....	97
Bijlage 2.	Afmetingen en benodigde gewichten van het platform op de kaai	99
Bijlage 3.	R-script	101
Bijlage 4.	Overzicht rekken	102
Bijlage 5.	Berekeningen massa- en volumeverlies.....	105

Lijst van figuren

Figuur 1: Soorten corrosie.....	15
Figuur 2: Spleetcorrosie	15

Figuur 3: Putcorrosie	17
Figuur 4 Fouling op een scheepsromp	19
Figuur 5 Biofouling op een boei	21
Figuur 6 Vormingsstadia van fouling.....	22
Figuur 7 Zeepokken op een roer en schroef van een schip	25
Figuur 8 Bryozoa, het mosdiertje	25
Figuur 9 Fotosynthese in relatie met het lichtspectrum.....	29
Figuur 10: verticale verdeling van de waterlagen in zones.....	30
Figuur 11: onderverdeling van de getijdenzone	32
Figuur 12: Interreg en SOCORRO	34
Figuur 13: overzicht Vlissingen Sloe	37
Figuur 14: Detailkaart locatie Calamiteitensteiger	37
Figuur 15: Principedoorsnede van de kaaimuur	39
Figuur 16: Opstelling kaaimuur	41
Figuur 17: Opstelling ponton.....	42
Figuur 18: Voorbereidingen in Vlissingen	44
Figuur 19: Ligging van het zwaartepunt van het platform.....	45
Figuur 20: Driedimensionale voorstelling van het platform, vooraanzicht	45
Figuur 21: Driedimensionale voorstelling van het platform, achteraanzicht	46
Figuur 22: Vooraanzicht van het platform op de kaai na installatie	46
Figuur 23: Het ophangen van de rekken	47
Figuur 24: Het platform op het ponton.....	47
Figuur 25: Het platform op het ponton vanop de kaai gezien.....	48
Figuur 26: Corrosiesnelheidsconstanten volgens ASTM G31	50
Figuur 27: Dimensies testplaatje.....	51
Figuur 28: Bovenaanzicht van de rekken na een maand tijd	53
Figuur 29: Ophangrek na 39 dagen	55
Figuur 30: ophangrek na 161 dagen (1)	56
Figuur 31: ophangrek na 161 dagen (2)	56
Figuur 32: gemiddelde corrosiesnelheid Grade A ($\text{g/m}^2\text{j}$)	60
Figuur 33: Massaverlies Grade A.....	61
Figuur 34: Verloop massaverlies Grade A	62
Figuur 35: Massaverlies S 355	64

Figuur 36: verloop massaverlies S 355	65
Figuur 37: Massaverlies Grade A na 39 dagen	68
Figuur 38: Massaverlies Grade A na 134 dagen	70
Figuur 39: Massaverlies Grade A na 161 dagen	72
Figuur 40: Massaverlies Grade A na 559 dagen	74
Figuur 41: Massaverlies Grade S 355 na 39 dagen	77
Figuur 42: Massaverlies Grade S 355 na 134 dagen	79
Figuur 43: Massaverlies Grade S 355 na 151 dagen	81
Figuur 44: Massaverlies Grade S 355 na 559 dagen	83
Figuur 45: vergelijking massaverlies Grade A en S 355 op gelijkaardige dieptes	85
Figuur 46: Vergelijking corrosiesnelheden Grade A en S 355 op gelijkaardige dieptes	86
Figuur 47: Corrosiesnelheid Grade A: Oostende + Vlissingen	87
Figuur 48: Corrosiesnelheid S 355: Oostende + Vlissingen	88

Lijst van tabellen

Tabel 1 Zachte en harde fouling.....	24
Tabel 2: Getijhoogtes in Vlissingen tov LAT	38
Tabel 3: Gemiddelde corrosiesnelheid Grade A ($\text{g}/\text{m}^2\text{j}$)	60
Tabel 4: Massaverlies Grade A (g).....	60
Tabel 5: Gemiddelde corrosiesnelheid S 355 ($\text{g}/\text{m}^2\text{j}$).....	63
Tabel 6: Massaverlies S 355 (g)	63
Tabel 7: ANOVA-test Grade A na 39 dagen.....	69
Tabel 8: ANOVA-test Grade A na 134 dagen.....	71
Tabel 9: ANOVA-test Grade A na 161 dagen.....	73
Tabel 10: ANOVA-test Grade A na 559 dagen.....	75
Tabel 11: ANOVA-test S 355 na 39 dagen	78
Tabel 12: ANOVA-test S 355 na 134 dagen	80
Tabel 13: ANOVA-test S 355 na 151 dagen	82
Tabel 14: ANOVA-test S 355 na 559 dagen	84
Tabel 15: vergelijking Grade A en S 355 op gelijkaardige dieptes	85
Tabel 16: vergelijking corrosiesnelheden Grade A en S 355 op gelijkaardige dieptes	85
Tabel 17: Corrosiesnelheid Grade A: Oostende en Vlissingen	87
Tabel 18: Corrosiesnelheid S 355: Oostende en Vlissingen	88

Lijst van afkortingen

- **AMACORT**: Antwerp Maritime Academy CORrosion Team
- **ASTM**: American Society for Testing and Materials
- **BWM**: Ballast Water Management (Convention)
- **Cu-SPC**: Copper Self Polishing Coating
- **Cu-Abl**: Copper Ablative
- **DDT**: thiols dodecanethiol
- **EG₆OH**: hydroxy-hexa-(ethylene-glycol)-undecanethiolate
- **FR-coating**: Fouling releasing coating
- **HUDT**: 11-hydroxyundecanethiol
- **IMO**: International Maritime Organization
- **LAT**: Lowest Astronomical Tide
- **NAP**: Normaal Amsterdams Peil
- **PHAO**: Potentially Harmful Aquatic Organism
- **SAM(-surface)**: Self-assembled monolayer
- **TBT-SPC**: Tributyltin Self-Polishing Copolymer

Verklarende woordenlijst

- **Antifouling:** de verzameling van maatregelen die getroffen worden om fouling te vermijden.
- **Autokatalytisch:** versnelling (katalysatie) van een chemisch proces waarbij de reactieproducten zelf fungeren als katalysator. (Lide et al., 2005)
- **Bryozoa (mosdieren):** Kleine aquatische dieren die vaak in kolonies leven. Ze hebben een skelet uit calciumcarbonaat en planten zich hermafrodiet voort, ze bezitten namelijk beide geslachten (Schwaha et al., 2016).
- **Cyanobacteriën:** ‘cyano’-bacteriën. Cyano is een voorvoegsel afkomstig van het Latijn ‘cyaneus’, wat donkerblauw betekent. Cyanobacteriën zijn prokaryote organismen die in staat zijn tot fotosynthese; ze voeden zich niet enkel met voedingsstoffen, maar halen ook energie uit licht en koolstofdioxide. De voortplanting door ongeslachtelijke binaire deling. Synoniem: Blauwalgen of blauwwieren (Lurling, 2013).
- **Eufotische zone:** ‘Eu-photos’, afkomstig van het Grieks ‘eu’ wat goed betekent en ‘photos’ wat licht betekent. De oppervlaktelaag van zeewater waarin voldoende licht doordringt om aan fotosynthese te kunnen doen, meestal tot 200 meter diep. Synoniem: epipelagische zone. (Oceano, 2012)
- **Fytoplankton:** Plankton dat voor de energievoorziening afhankelijk is licht om aan fotosynthese te kunnen doen. Fytoplankton produceert dus zuurstof (US Department of Commerce).
- **Inerte stoffen:** Dit soort stoffen reageert niet of nauwelijks met vrijwel alle andere chemische stoffen (*Inerte gassen - definitie - Encyclo*).
- **Polysaccharidenmatrix:** een polymeer van fructose (= een soort van saccharide), komt in de natuur vaak voor als belangrijke structurele component van bacteriële biofilms (Benigar et al., 2014).

Lijst van symbolen

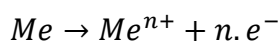
Symbool	Naam	Definitie/omschrijving	SI-eenheid
pH	Zuurtegraad	Een maat/getal om de zuurtegraad van een waterige oplossing aan te duiden; werkt via een logaritmische schaal: $\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$	dimensieloos

1 Corrosie

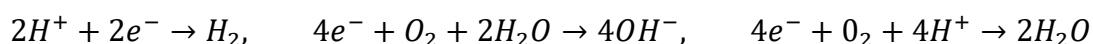
1.1 Chemisch proces

Corrosie is een natuurlijk proces dat een geraffineerd metaal omzet in een chemisch stabiel oxide. Het is de geleidelijke afbraak van materialen (meestal een metaal) door een chemische of elektrochemische reactie met de omgeving. Corrosie is het gevolg van een elektrochemische oxidatie van metaal door een oxidatiemiddel zoals zuurstof, waterstof of hydroxide. In een maritieme omgeving is water alom aanwezig, en dan vooral zout water. Corrosie heeft als eindproduct typisch oxide(n) of zout(en) van het originele metaal. Dit resulteert in een typisch oranje verkleuring. Corrosie verslechtert de eigenschappen van materialen en structuren, waaronder sterkte, uiterlijk en doorlaatbaarheid voor vloeistoffen en gassen. Door verlies van de metaalionen is er dan ook verlies van massa van het metaal. Corrosie kan plaatselijk voorkomen en een put of scheur vormen, of het kan zich over een groot gebied uitstrekken en het oppervlak min of meer gelijkmatig aantasten (Heylbroeck, 2021).

De chemie van corrosie kan worden beschouwd als een elektrochemisch fenomeen. Tijdens corrosie vindt op een bepaalde plek op het oppervlak van een voorwerp van ijzer oxidatie plaats en die plek gedraagt zich als een anode (Vergelijking 1). De elektronen op deze plek die vrijkomen door een oxidatiereactie, gepaard met materiaalverlies bij het metaal op deze anodische plek bewegen door het metaal, vormen een anodische omgeving en gaan naar een andere plek op het metaal en verminderen daar de zuurstof (reductiereactie) op die plek doordat het aanwezige H^+ dan met het zuurstof reageert. Deze plek gedraagt zich als een kathodische omgeving (Vergelijking 2) (Heylbroeck, 2021).



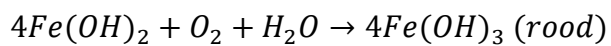
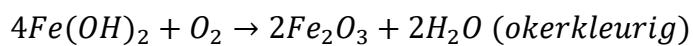
Vergelijking 1: anodische reactie van corrosie



Vergelijking 2: kathodische reacties bij corrosie

1.2 Uniforme corrosie

Er bestaan verschillende soorten corrosie. Tijdens dit onderzoek werd er met kleine, vlakke plaatjes gewerkt, dus er was enkel uniforme corrosie. Ter volledigheid worden de meest voorkomende soorten van corrosie in een maritieme omgeving vermeld. Mochten er andere soorten corrosie dan uniforme corrosie aanwezig zijn tijdens het onderzoek, dan was de invloed ervan te verwaarlozen. Bij uniforme corrosie ontstaan er over het hele oppervlakte van het metaal verschillende anodische en kathodische plaatsen die van plaats wisselen en de corrosie nagenoeg uniform laten gebeuren.

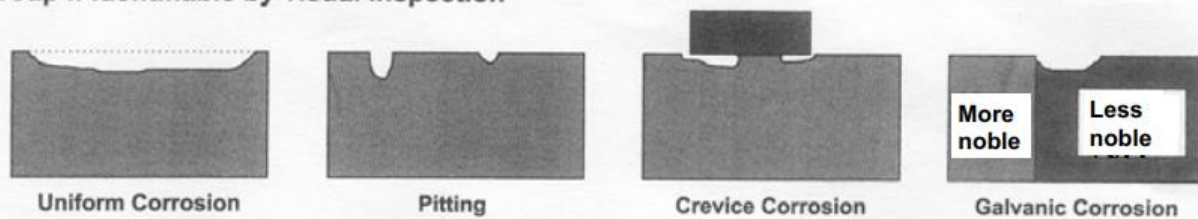


Deze corrosie kan alleen gebeuren wanneer er water aanwezig is en de snelheid ervan is afhankelijk van de omgeving. Bij zeewater zijn veel NaCl-ionen aanwezig, en deze versnellen het corrosieproces. (Heylbroeck, 2021)

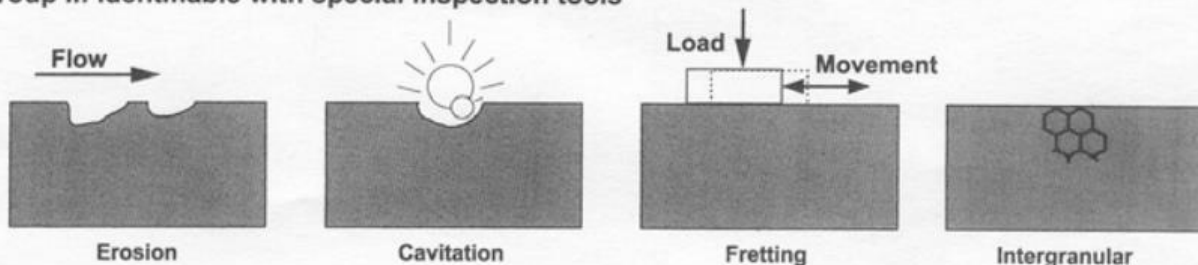
Soorten corrosie: (Heylbroeck, 2021)

1. Uniforme corrosie
2. Galvanische corrosie
3. Spleetcorrosie
4. Putvormige corrosie
5. Interkristallijne aantasting
6. Erosiecorrosie
7. Vermoeiingscorrosie
8. Spanningscorrosie

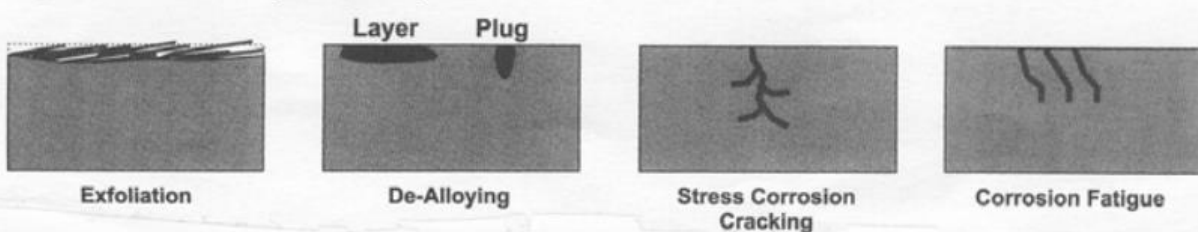
Group I: identifiable by visual inspection



Group II: identifiable with special inspection tools



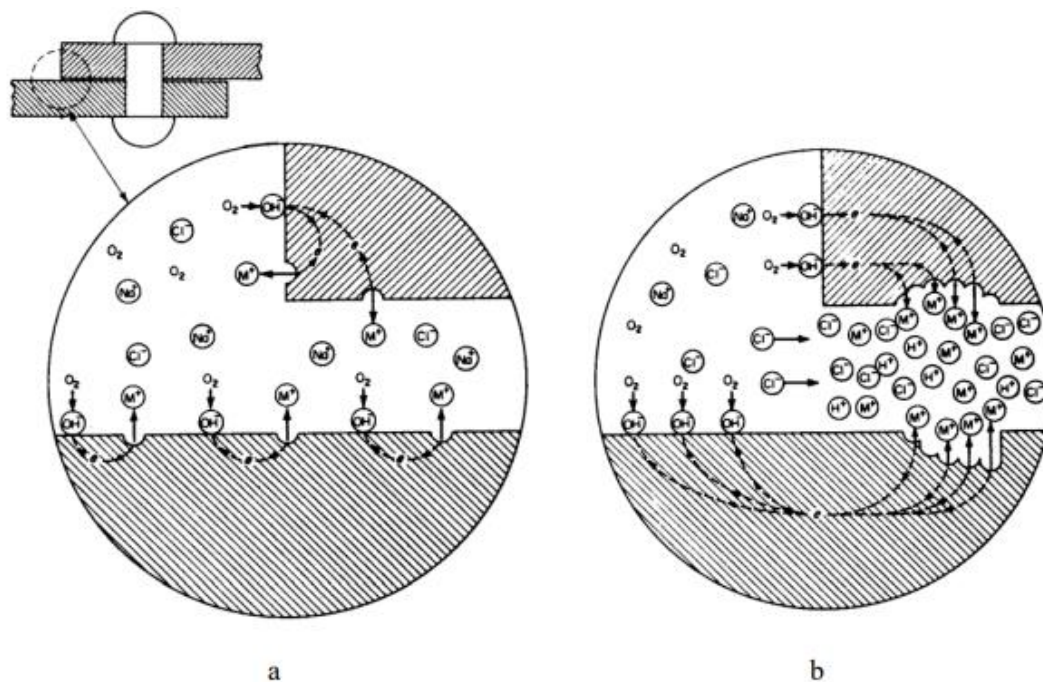
Group III: identifiable by microscopic examination



Figuur 1: Soorten corrosie

Bron: Bardal, 2004

1.3 Spleetcorrosie

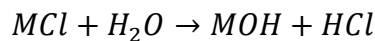


Figuur 2: Spleetcorrosie

Bron: Bardal, 2004

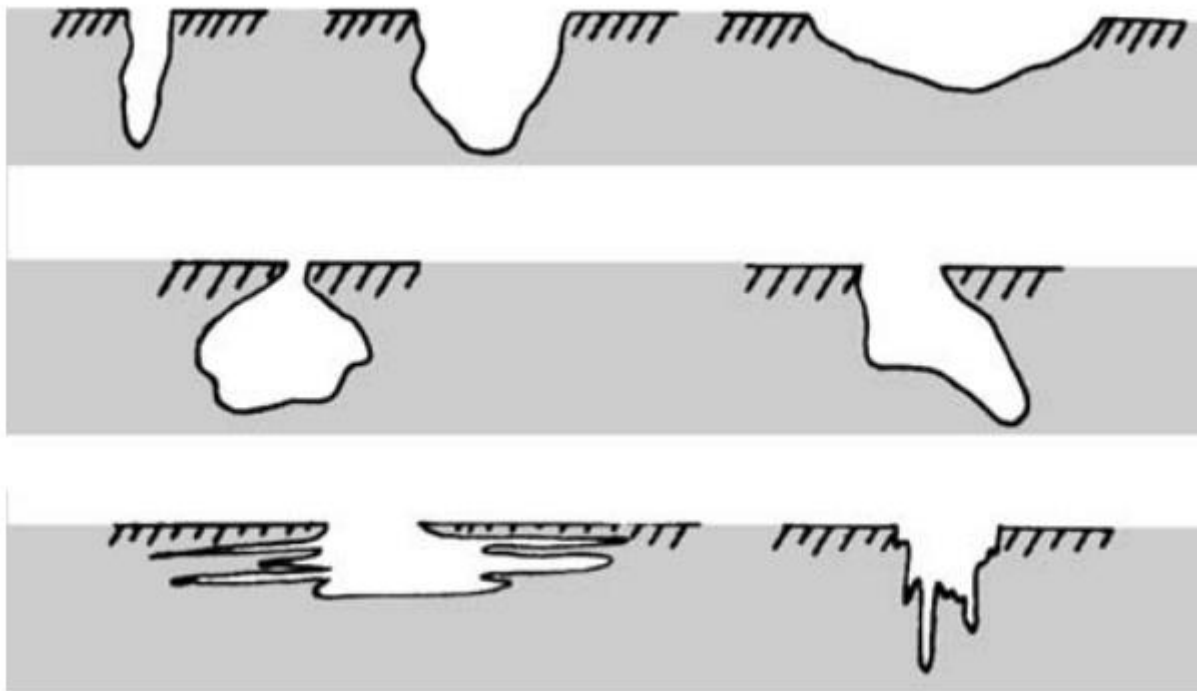
Spleetcorrosie (Engels: crevice corrosion) is mogelijk wanneer er een spleet is die breed genoeg is om vloeistoffen te laten binnenstromen, maar toch smal genoeg is om ervoor te zorgen dat de vloeistof stil blijft in de spleet, dat er stagnatie is. Dit komt dus bijvoorbeeld voor bij metalen die aan elkaar gelast worden en waarbij een overlapping ontstaat en er een nauwe spleet gevormd wordt. In de beginfase van deze corrosie verloopt het proces vrij normaal, vrij gelijk lopend met het algemene corrosieproces (1.1), maar door de oxidatie zal aan het oppervlak van het metaal de zuurstofconcentratie in de vloeistof geleidelijk afnemen. Vandaar dat de stagnatie belangrijk is, zodat er geen verversing van de vloeistof mogelijk is. Dit resulteert in een verhoging van het aantal metaalionen in de vloeistof, waardoor het vloeistof in de spleet geladen zal worden en zal functioneren als anode. De zuurstofrijkere vloeistof aan de buitenkant van de spleet functioneert dan als anode. Wanneer de vloeistof in de spleet zodanig zuurstofarm geworden is, zal de productie van OH^- ook stilvallen.

In zout water, waar de meeste schepen op varen, zal dit resulteren in een aantrekking van Cl^- atomen en er zal HCl gevormd worden.



HCl is een zuur en zal ervoor zorgen dat de vloeistof in de spleet een lagere pH-waarde zal krijgen. Een zuur milieu versnelt het corrosieproces (2.2.3), er komen meer geladen metaalionen in het water en zo ontstaan steeds meer Cl^- ionen in het water, dit tot het proces autokatalytisch wordt en zal blijven versnellen. (Bardal, 2004; Heylbroeck, 2021)

1.4 Putcorrosie



Figuur 3: Putcorrosie

Bron: Bardal, 2004

Putcorrosie (Engels: pitting corrosion) komt voor wanneer het metaal op een zeer kleine oppervlakte blootgesteld wordt aan een omgeving met anionische stoffen. Een voorbeeld is een plaatselijke beschadiging van de beschermende coatinglaag. De blootgestelde oppervlakte blijft bij putcorrosie zeer klein, maar intern kan het corrosieproces tot diep in het metaal verdergaan. De blootgestelde oppervlakte binnenin het metaal wordt immers steeds groter. Dit houdt dus ook in dat de corrosie niet of amper zichtbaar is en vaak pas opgemerkt wordt wanneer de schade te groot is geworden. Ook bij putcorrosie kan er stagnatie van de vloeistof voorkomen, wat de corrosie versnelt (zie spleetcorrosie: 1.3). Het is dus belangrijk de beschermlaag zo intact als mogelijk te houden om blootstelling te vermijden. (Bardal, 2004). Putcorrosie kan visueel niet altijd opgemerkt worden, maar via ultrasoon onderzoek is het vaak wel mogelijk om de putcorrosie te lokaliseren. (Heylbroeck, 2021)

1.5 Vliegroest

Vliegroest (Engels: flash corrosion) is verschillend van bovenstaande categorieën, daar het ook snel kan optreden bij blootstelling aan lucht. Vliegroest gebeurt net nadat staal (of een ander metaal) schoongemaakt is, zij het chemisch, zij het mechanisch. Het kan zeer snel gebeuren, soms zelfs binnen enkele minuten. Vliegroest is een zeer snelle en zeer oppervlakkige oxidatie van het oppervlak. Het belangrijkste kenmerk is vooral de verkleuring van het metaal in een oranje, bruine kleur. De fysische eigenschappen van het metaal worden niet aangetast wegens de oppervlakkigheid van de roest, maar er bevindt zich een zeer dunne laag gecorrodeerd materiaal op de oppervlakte, wat niet altijd wenselijk is. In de olie- en gasindustrie is vliegroest te vermijden, want het zorgt voor onnauwkeurigheden bij het opslaan van de cargo. Dit probleem kan dan opgelost worden door een bescherm laag aan te brengen in een zeer droge omgeving, dus alvorens vliegroest kan optreden (EonCoat, 2023; McKeen, 2006). Hoewel vliegroest dus niet direct voor een massaverlies zorgt bij metaal, wordt het in deze paper wel vermeld, want vliegroest trad zeer snel op na het schoonmaken van de testplaatjes (zie 6.7.2)

2 Factoren die corrosie beïnvloeden

2.1 Biologische aangroei bij schepen en maritieme structuren

Biologische aangroei is de aangroei van levende organismen op onder water liggende oppervlakten. Het is een natuurlijk fenomeen dat zich voordoet in zowel zoet, brak als in zout water (Xu et al., 2014). In de maritieme context wordt deze soort van aangroei vaak fouling genoemd. Fouling is vaak nadelig voor de stabiliteit, de manoeuvreerbaarheid van het schip, maar beïnvloedt vooral de levensduur van de scheepsromp (Deshner, 2018).



Figuur 4 Fouling op een scheepsromp

Bron: Paint & Coatings Industry, 2012

Biologische aangroei kan echter ook positief zijn. Men plaatst bijvoorbeeld doelmatig kunstmatige structuren onder water net om biologische aangroei te creëren. Op deze manier kan men bijvoorbeeld op een gecontroleerde manier mosselen kweken en wetenschappelijk onderzoek doen (Jonsson et al., 2018). De biologische aangroei start vaak als een slijmlaag (zie 0:

Vormingsstadia van fouling) wat een voedingsbron is voor grotere organismen om zich te vestigen op de structuur. De aangroei van dat soort organismen creëert dan weer beschutting en voedsel voor mobielere organismen zoals vissen, krabben, mosselen etc. Door het aanhechten van organismen aan de scheepsrompen is het mogelijk dat er transport plaatsvindt over zeer grote afstanden, en dat deze organisme invasief worden in de nieuwe plaatselijke wateren en de plaatselijke ecologie verstoren (*Common Hull Fouling Invasive Species*, z.d.).

2.1.1 Fouling in een maritieme context

De International Maritime Organization (IMO) hanteert deze definitie voor biofouling: *De ongewenste aanhechting en verzameling van (biologische) organismen op structuren die zich onder water bevinden* (Adamson & Brown, 2002). Dit verschilt met de algemene definitie van biologische aangroei daar fouling in maritieme context zo goed als steeds ongewenst is wegens de negatieve eigenschappen die het heeft op maritieme constructies. Het is zeker ook het vermelden waard dat de IMO het niet enkel heeft over fouling op schepen, maar ook op bijvoorbeeld offshore-installaties en drijvende platformen. Ook dit soort constructies verliest functionaliteit (bijvoorbeeld verlies van stabiliteit en slijtage van de onderwaterapparatuur) wanneer de fouling te sterk wordt. Fouling is dus duidelijk iets wat men probeert te vermijden in de scheepvaart, het kost de industrie veel geld met als logisch gevolg dat er zeer veel onderzoek gebeurt naar manieren om fouling tot een absoluut minimum te brengen of indien mogelijk compleet te vermijden (*Corrosion - Latest research and news / Nature*, z.d.). Men schat dat er jaarlijks ongeveer 150 miljard dollar verloren gaat door kosten veroorzaakt door de fouling, vooral vertragingen, reparaties en schoonmaak veroorzaken de grootste kosten (Maréchal & Hellio, 2009).



Figuur 5 Biofouling op een boei

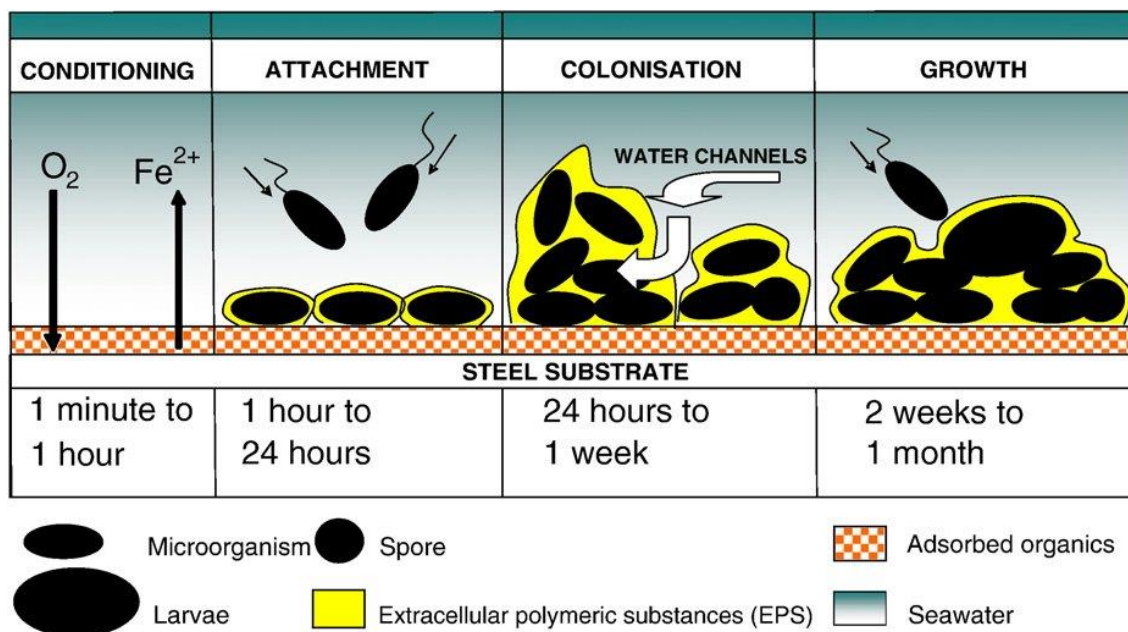
Bron: Haziful, 2019

De coating biedt een extra laag bescherming tussen het substraat en de water.

Wanneer coating door de fouling beschadigd wordt en scheuren vertoont of zelfs afgebroken wordt komt het water rechtstreeks tot aan de metalen structuur reiken en zo begint de metalen scheepsromp zeer snel te corroderen. Verf- en roestresten worden dan afgegeven aan het water, wat dan weer zorgt voor vervuiling en het verstoren van de ecologie (Berendsen, 1998). Ook bij het lossen van onbehandeld ballastwater worden en verf- en metaalresidu's van de ballasttanks mee gelost (Verstraelen et al., 2010). Hiervoor is in 2004 de Ballast Water Management Convention (BWM) georganiseerd, die op 8 september 2017 wereldwijd in voege gegaan is. Hierin staan bijvoorbeeld maatregelen en/of behandelingen die het schip moet doen om ervoor te zorgen dat pathogenen zoals verf- en metaalresten en Potentially Harmful Aquatic Organisms (PHAO) niet samen met het ballastwater in de zee gepompt worden bij het ballasten van een schip (IMO, 2004).

2.1.2 Vormingsstadia van fouling

Fouling ontstaat door een reeks van biochemische processen. Vaak worden de verschillende soorten fouling onderverdeeld in twee groepen: microfouling en macrofouling. Het onderscheid kan eenvoudig gemaakt worden: macrofouling is duidelijk zichtbaar voor het oog, zoals mosselen, kokerwormen, algen. Microfouling is vaak enkel een doorzichtige homogene slijmlaag waarin de verschillende onderdelen niet zichtbaar zijn voor het oog. Alhoewel er dus verschillende soorten fouling bestaan, zijn er toch ook veel gelijkenissen bij de vorming en ontwikkeling. De ontwikkeling van fouling bestaat uit vier fases, zoals geïllustreerd op Figuur 6.



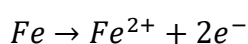
Figuur 6 Vormingsstadia van fouling

Bron: Chambers et al., 2006

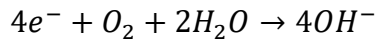
2.1.3 De vestiging

Zowel (zee-)water als metaal is geen inert materiaal, wat inhoudt dat er ionen uitgewisseld worden. Wanneer metalen zich bevinden in een zuurstofrijke en vochtige omgeving zoals water is corrosie nooit veraf. Dit veroorzaakt veranderingen van het materiaal op chemisch niveau en dit zorgt dan voor een minder goede structuur van het materiaal (Verstraeten et al., 2010).

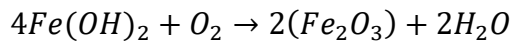
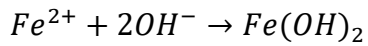
Wanneer ijzer in contact komt met water start een elektrochemisch proces (Gellings, 2006): het ijzer wordt geoxideerd tot ijzer(II)-ionen:



De vrijgekomen elektronen vormen samen met zuurstof en waterhydroxide-ionen:



De hydroxide-ionen reageren dan met de ijzer(II)-ionen om ijzeroxide (roest) te vormen:



Vergelijking 3: vorming van roest

2.1.4 De aanhechting

Deze roestplekken en de tijdelijk geladen oppervlaktes tijdens de chemische reacties zijn de ideale omgeving om een biofilm te vormen (Videla, 1989; Wahl, 1989). De biofilm begint met een microscopisch dunne laag (200 tot 800 Å) die bestaat uit een verzameling biotische elementen zoals bacteriën, cyanobacteriën en algen die samen een film vormen door middel van microbieel geproduceerde extracellulaire polysaccharidenmatrices. De chemische samenstelling van de deze laag varieert met de plaats en de fysicochemische eigenschappen van het water (Toleti, 2012).

2.1.5 De ontwikkeling

Na deze dunne laag vestigen zich meer micro-organismen en fytoplankton die zich voeden met opgeloste stoffen die zich in de omgeving bevinden, zoals eiwitten en koolhydraten. Hieruit worden polymeren geproduceerd (zie Figuur 6) die een matrix vormen die de biofilm bijeenhoudt. Deze polymeren hebben als extra eigenschap dat ze door adsorptie de biofilm kunnen voorzien van nutriënten, dus voedingsstoffen. Door de vorming van deze polymeren wordt de laag iets dikker en hierna kan de laag fungeren als aanhechtings- en voedingslaag voor grotere organismen zoals diatomeeën en micro-algen (Balqadi et al., 2017). Vanwege het slijmerige en doorzichtige uiterlijk wordt deze laag soms de 'slijmlaag' genoemd. (De Meyer, 2019). De chemische samenstelling van ook deze laag is afhankelijk van en varieert mee met de plaats en de eigenschappen van het water en bepaalt de stevigheid van de biofilm. (Flemming & Ridgway, 2009).

2.1.6 De groei

Als de eerste laag gevormd is, volgt na een paar dagen (zie Figuur 6) een kolonisatie en groei van de grotere organismen zoals diatomeeën en micro-algen. Ook de biofilm blijft zich verder ontwikkelen zodanig dat die steeds dikker en steviger wordt en blijft voedingsstoffen voorzien. Na verloop van tijd beginnen ook meercellige organismen zich te verzamelen op de fouling. Vanaf hier kan men dan beginnen spreken over macro-fouling. De groep van de macro-fouling wordt vaak nog eens onderverdeeld in zachte (kalkarme) fouling en harde fouling (Callow & Callow, 2002) (zie Tabel 1).

Tabel 1 Zachte en harde fouling

Bron: Callow & Callow, 2002

Zachte fouling	Harde fouling
Groene algen	Mosselen
Rode algen	Kokerwormen
Bruine algen	Zeepokken
Sponzen	Oester
Anemonen	Mosdieren (Bryozoa)
Hydroïden	



Figuur 7 Zeepokken op een roer en schroef van een schip

Bron: Hunsucker, 2017



Figuur 8 Bryozoa, het mosdiertje

Bron: Kool, 2021

2.2 Externe factoren die de corrosie beïnvloeden

2.2.1 Temperatuur/locatie

Biologische aangroei is afhankelijk van de temperatuur en dus rechtstreeks ook van de geografische locatie. De meeste soorten fouling groeien het best in een warme omgeving zonder teveel schommelingen in temperatuur. Logischerwijze hebben de seizoenen dan ook een grote invloed op fouling. Deze factor is het meest stabiel in de tropen, vandaar dat de meeste fouling daar het beste kan groeien. Desalniettemin zijn er soorten fouling die net liever kouder water hebben. De temperatuur van het water kan ook direct gelinkt worden aan de hoeveelheid zonlicht dat het opvangt. Regio's met een meer gematigd klimaat ondervinden grotere schommelingen in temperaturen en lichtinval door de seizoenen. Tijdens de warme zomermaanden is het water dan wel warm, maar er zijn weinig voedingsstoffen aanwezig in het water. Deze voedingsstoffen zijn nodig voor fouling om alle stadia van ontwikkeling te kunnen doorlopen. Tijdens de winter zijn er dan wel voldoende voedingsstoffen aanwezig, maar dan is de temperatuur te laag voor de meeste fouling om te groeien. In de polaire regio's is de temperatuur dan weer stabiel, maar vaak toch te koud voor fouling om te ontwikkelen (Hurd et al., 2014; Woods Hole Oceanographic Institution, 1952).

2.2.2 Zoutgehalte/saliniteit

De meeste fouling verdraagt lage zoutgehaltes zeer slecht. Enkel algen en bryozoa hebben een laag zoutgehalte nodig om goed te overleven (Woods Hole Oceanographic Institution, 1952; Yebra et al., 2003). Ook staat het zoutgehalte in relatie met seizoenen en andere natuurfenomenen door de regenval die het zoutgehalte kan beïnvloeden. In gebieden met langdurige en hevige regenval zoals Zuidoost-Azië met de moesson is duidelijk een val in het zoutgehalte meetbaar (Yuan et al., 2018).

2.2.3 Zuurtegraad

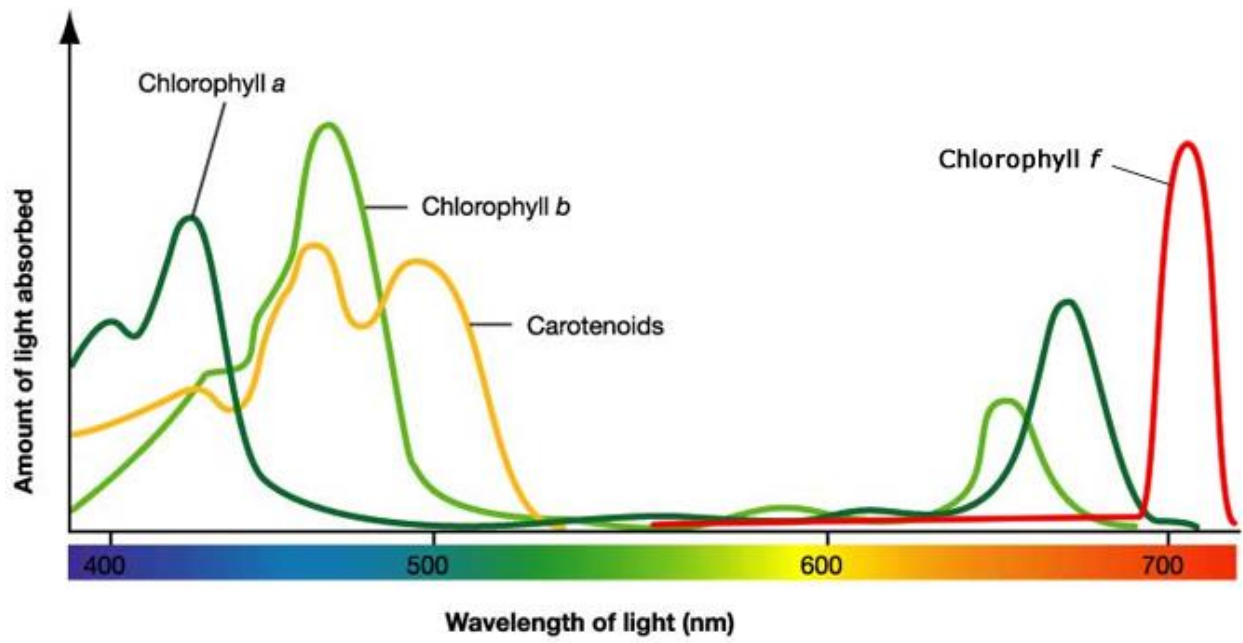
De pH van zeewater varieert tussen 8,0 en 8,3 (Marion et al., 2011). Zeewater heeft de eigenschap CO_2 uit de atmosfeer op te nemen, wat zorgt voor een verlaging van de pH, dus een verzuring van het zeewater. Ook de stijgende temperatuur zorgt voor een verlaging in pH. Veranderingen in pH en temperatuur veranderen de biochemische reacties en evenwichtscondities van het water en dit vormt een groot gevaar voor het ecosysteem en de biodiversiteit van de zee en fouling (Yebra et al., 2003).

2.2.4 Voedingsstoffen

Als er te weinig voedingsstoffen aanwezig zijn, kunnen de organismen in de foulinglaag zich niet goed voortplanten. Water met weinig voedingsstoffen en een lage primaire voorplantingsgraad noemt men oligotroof. Water met hoge concentraties voedingsstoffen en een hoge voortplantingsgraad heet dan eutroof. Eutrofisch is niet altijd goed: door de vele voedingsstoffen groeien algen daar zeer goed, maar dit leidt dan aan een tekort aan zuurstof en dus ongunstige omstandigheden voor vissen om in te leven. Deze overmaat aan voedingsstoffen is een van de gevolgen van het gebruik van meststoffen, een teveel aan afvalwater en gewoonweg een teveel aan afval (VLIZ, 2012). Algen moeten dus naast de organische voedingsstoffen ook de anorganische voedingsstoffen zoals koolstof, zuurstof, stikstof, nitraat, fosfor, fosfaat en ijzer opnemen om voldoende energie te hebben zich voort te kunnen planten (Fundamentals of Environmental Measurements, 2014).

2.2.5 Licht

De hoeveelheid licht die de chloroplasten bereikt bepaalt hoe snel en hoeveel fotosynthese mogelijk is. Een groot deel van het licht wordt immers gereflecteerd en gediffundeerd op het wateroppervlak. De locatie en de invalshoek van de zon op het aardoppervlak bepaalt ook mee hoeveel en hoe diep licht door de wateroppervlakte kan dringen (Kaiser et al., 2011). Het licht verzwakt exponentieel met de diepte omdat veel van het licht geabsorbeerd wordt door water, micro-organismen en anderen kleine deeltjes. Troebel water houdt dan ook meer licht tegen dan helder water, vooral door de vele diffusie die plaatsvindt in het water. Fotosynthese is enkel mogelijk bij genoeg licht, en gebeurt dus ook vaak enkel bij de oppervlakte. De oppervlaktelaag onder de waterspiegel waarin licht doordringt heet de eufotische zone. Algen en fytoplankton bevinden zich indien mogelijk in de zones waar fotosynthese kan plaatsvinden, overdag is er dus beduidend meer activiteit net onder de waterspiegel dan 's nachts, wanneer de organismen moeten terugvallen op hun opgebouwde reserve-energie. Fotosynthese is enkel mogelijk binnen het zichtbare lichtspectrum. Deze loopt van het blauwe licht van 400 nm tot het rode licht van 750 nm. Er bestaan drie verschillende soorten pigmenten die fotosynthese mogelijk maken bij algen en fytoplankton: chlorofyl, fycobiline en carotenoïde. Binnen de groep van chlorofyl zijn er nog 6 onderverdelingen, chlorofyl a tot en met chlorofyl f. Chlorofyl a is het belangrijkste pigment voor fotosynthese terwijl de rest vaak als aanvullend wordt beschouwd. In Figuur 9 wordt de hoeveelheid licht die geabsorbeerd wordt getoond in verhouding tot de golflengte van het licht. Chlorofyl a neemt veel licht op van het blauwe spectrum en ook wat van het rode, het groene wordt bijna volledig gereflecteerd. Het blauwe licht is het meest energetisch en geraakt in de meeste omstandigheden ook het diepst in het water, waardoor fytoplankton en cyanobacteriën tot in de laagste punten van de eufotische regio te vinden zijn (Fundamentals of Environmental Measurements, 2014; Hurd et al., 2014).



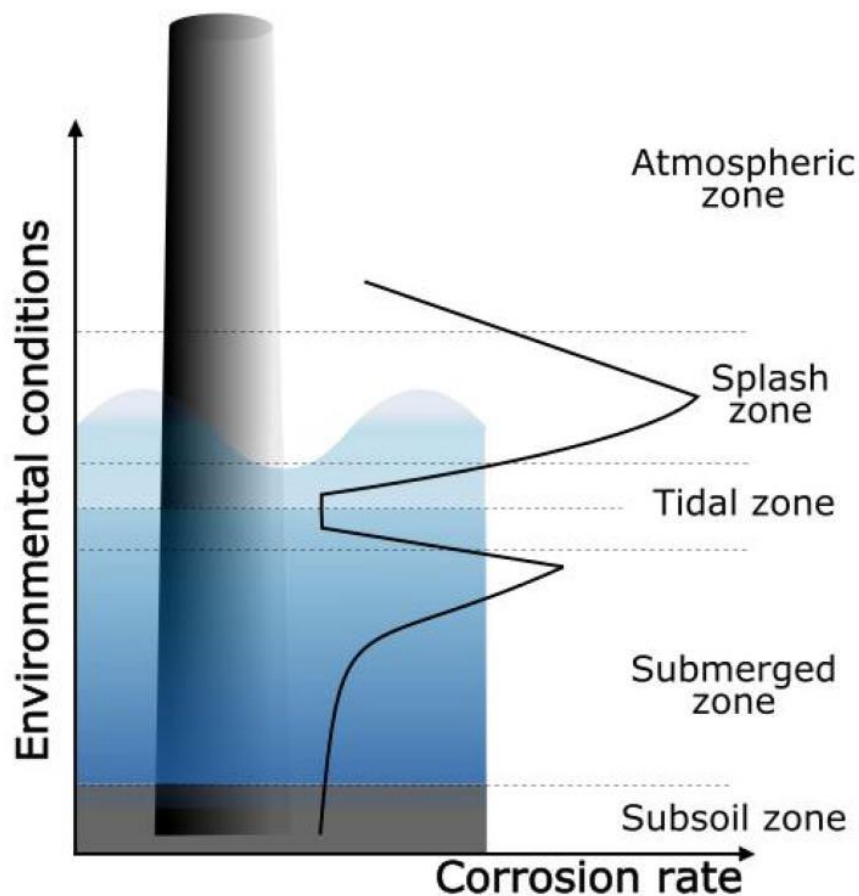
Figuur 9 Fotosynthese in relatie met het lichtspectrum

Bron: Adams (2010)

3 Corrosie in havens en andere getijgeboden omgevingen

3.1 Verticale verdeling van de bovenste waterlagen in zones

De bovenste laag van het water van de zee kan onderverdeeld worden in verschillende zones. Daarvoor is een referentievlak nodig, dit om de hoogtes (positief en negatief) te kunnen definiëren. In deze paper wordt als referentievlak voor waterdieptes steeds verwezen naar LAT. Er worden relatieve termen als gemiddeld zeeniveau en gemiddeld laag laag water gebruikt waarbij het referentievlak dan niet uitmaakt. Deze zijn altijd terug te brengen naar een afstand tegenover LAT, maar deze afstand is niet exact nodig om de termen uit te leggen.



Figuur 10: verticale verdeling van de waterlagen in zones

Bron: Lopez-Ortega et al., (2019)

De onderste laag is de bodemlaag (subsoil zone). Dit is waar de bodem start. Vaak is dit een zone met vrij minimale corrosie, tenzij er een verontreinigende stof aanwezig is die metaal kan aantasten. Men verwacht in deze zone een corrosiesnelheid van minder dan 0,05 mm/jaar. (PIANC, 2004)

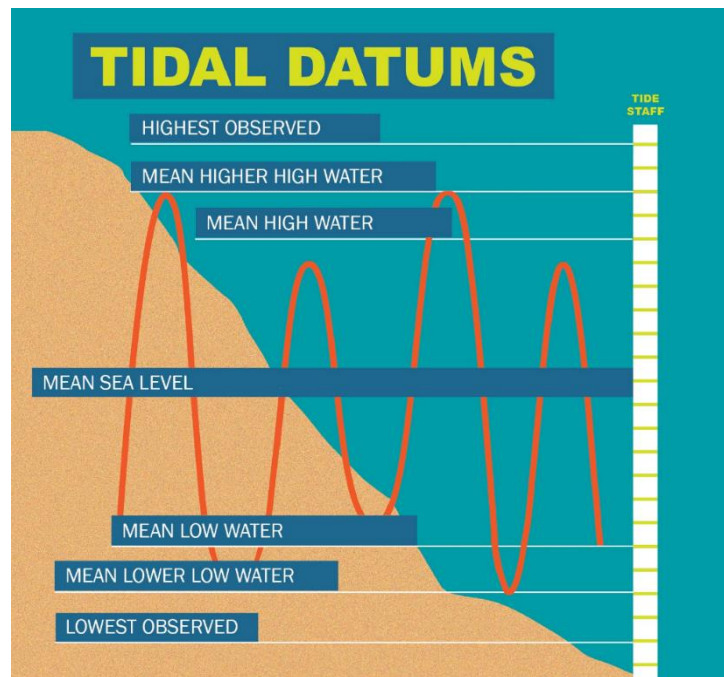
De laag daarboven heet de onderwaterzone (submerged zone). Die loopt van op de zeebodem tot het laagwaterpeil, wat inhoudt dat een voorwerp in deze zone steeds ondergedompeld is. In deze zone wordt een snellere corrosie verwacht, afhankelijk van onder andere de al aanwezige biologische aangroei, de totale beschikbare waterdiepte en het zuurstofgehalte in het water. De verwachte corrosiesnelheid ligt tussen 0,03 en 0,10 mm/jaar. (PIANC, 2004)

De getijdenzone (tidal zone) ligt tussen de gemiddeld laag waterlijn en de gemiddeld hoog waterlijn. Tussen deze twee niveaus in ligt het gemiddelde waterpeil (mean sea level). Deze zone is niet voortdurend ondergedompeld dankzij de getijden. Dit heeft een invloed op de verwachte corrosiesnelheden.

De zone tussen het laag-laagwater (mean lower low water) en het laag water (low water) gedraagt zich als een anode. Het is het meeste van de tijd ondergedompeld, maar komt toch af en toe droog te staan, waardoor de zuurstofconcentratie optimaal is voor corrosieconcentraties. De corrosiesnelheid in deze is dan ook vrij hoog, van 0,15 tot 0,30 mm/jaar.

De zone tussen het laag water en het gemiddelde zeeniveau gedraagt zich dan terug als kathode, door het plaatselijk gebrek aan zuurstof waardoor de corrosiesnelheden hier veel lager liggen: van 0,00 tot 0,10 mm/jaar. Deze laatste twee subzones gedragen zich dus samen zoals een anode en kathode in een galvanische cel (PIANC, 2004). Dit fenomeen is kwantitief getest in waterbassins waar het zeewater ook regelmatig vervangen werd. Er wordt soms gesproken over geconcentreerde corrosie in deze zones, omwille van de hogere corrosiesnelheden in de anodische zone. (PIANC, 2004)

Het bovenste gedeelte van de getijdenzone gedraagt zich anders, daar stijgt de corrosiesnelheid lineair vanaf het zeeniveau tot het (hoog) hoog waterniveau.



Figuur 11: onderverdeling van de getijdenzone

Bron: NOAA (2020)

4 SOCORRO

Het SOCORRO project is een internationale samenwerking met partners uit verschillende landen in de 2 Zeeën-regio. Het project is gesponsord door het Interreg 2 Zeeën-programma. SOCORRO (Seeking out corrosion) wordt uitgevoerd door een consortium van 15 partners, waaronder organisaties uit Engeland, Nederland, Noord-Frankrijk en Vlaanderen. De Antwerp Maritime Academy, heeft de coördinatie op zich genomen onder leiding van Dr. Geert Potters. Het project is officieel van start gegaan in maart 2020 en is tot op heden nog in volle gang. Het SOCORRO project richt zich op het verminderen van de kosten en het verbeteren van de bescherming van installaties en constructies tegen corrosie. Dit gebeurt aan de hand van een sensorisch systeem genaamd SOCORRO, dat de risico's op corrosie van staal onder water kan beoordelen. Het SOCORRO project wil bedrijven in staat stellen om onafhankelijk de corrosierisico's in hun installaties te evalueren en passende preventieve maatregelen te nemen. Het project omvat de ontwikkeling van een statistische methode om de verzamelde gegevens te analyseren en een algemene schatting van het corrosierisico te verkrijgen. Het SOCORROsysteem werd al geïmplementeerd en gedemonstreerd in verschillende industriële casestudies, waaronder waterzuiveringssystemen, havengebieden (zoals besproken in dit onderzoek) en ballasttanks aan boord van schepen. Het project ontwikkelt ook een intuïtief en praktisch dashboard-instrument om informatie over het corrosierisico aan de eindgebruikers te presenteren. Het SOCORRO project heeft al belangrijke stappen ondernomen. In het eerste deel van het project is gewerkt aan de ontwikkeling van een gegevensalgoritme om het corrosierisico van staal in water te voorspellen. Dit werd gedaan door een aantal fysieke en chemische kenmerken van het water te meten, zoals het zuurstofgehalte, de zuurgraad en de temperatuur, en door de hoeveelheid bacteriële slijmlagen op het staal te analyseren in een demonstratieve “test watertank”. In de tweede fase van het project werden verschillende industriële omgevingen betrokken, zoals ballasttanks, waterzuiveringssystemen en de havengebieden beschreven in dit onderzoek. Specifieke apparatuur werd ontwikkeld en geïnstalleerd op deze industriële locaties sinds vorig jaar. Hierdoor kon de projectgroep uitgebreid corrosierisico's en -snelheden vergelijken in verschillende sectoren en inzicht krijgen in de factoren die de snelheid van corrosie beïnvloeden. Met behulp van deze informatie kunnen ze gerichte maatregelen nemen op basis van metingen en economische prognoses om corrosieproblemen effectief aan te pakken. 57 Het project zal een totaal van 11 industriële demonstratiecases uitvoeren en een economische/haalbaarheidsstudie uitvoeren.

Door demonstraties in verschillende industriële omgevingen worden sectorspecifieke resultaten verzameld, wat bijdraagt aan een algehele haalbaarheidsstudie en business case. Kort samengevat: het SOCORRO project streeft naar het verminderen van de kosten van corrosie en het bevorderen van effectieve corrosiebeheersing in diverse sectoren, waaronder de maritieme sector, energieproductie en waterzuivering. Meer info over het SOCORRO project en de deelnemers kan gevonden worden via deze websites: <https://www.interreg2seas.eu/nl/SOCORRO>, <https://amacademy.be/nl/project/socorro> (Ramos et al., 2023; SOCORRO, 2023)



Figuur 12: Interreg en SOCORRO

Bron: SOCORRO (2023)

5 Onderzoeksdoelstelling

Het grensgebied Vlaanderen-Nederland, met name de Schelde en haar hinterland, wordt gekenmerkt door één van de grootste concentraties aan procesindustrie ter wereld. De infrastructuren en installaties zijn vaak al oud, sommigen ouder dan 50 jaar. Doordat corrosie één van de belangrijke factoren is in het degradatieproces van natte infrastructuur en installaties, is het van groot belang dat deze installaties optimaal, veilig en storingvrij kunnen blijven functioneren. Om innovaties te kunnen ontwikkelen omtrent de preventie, detectie en de reparatie van corrosie, moet er onderzoeksinfrastructuur beschikbaar zijn (Weemaes, 2020; Willems, 2021). De Hogere Zeevaartschool heeft om onderzoek te kunnen uitvoeren toestemming gekregen van North Sea Port om gebruik te maken van de locatie ‘Calamiteitensteiger’ om mobiele installaties te plaatsen voor wetenschappelijk onderzoek. Hierbij zijn rekken opgehangen vanaf de kaai en vanaf een drijvend ponton, telkens op verschillende dieptes. Aan elk rek werden 27 stalen plaatjes vastgemaakt telkens gecodeerd (zie 6.2). Regelmatig werden er 3 plaatjes van elk rek weggenomen om verder te onderzoeken. Voor dit experiment werd gebruik gemaakt van twee verschillende staalsoorten, Grade A en S355 (besproken in 6.1). In 5.1 wordt er meer uitleg gegeven over deze staalsoorten. Naast het onderzoek dat is opgestart in Oostende in 2021 door mevr. Willems, is dit het vervolg in North Sea Port te Vlissingen. Nadien worden beide onderzoeken vergeleken. Het havengebied van North Sea Port is een gebied dat zich uitstrekt van Gent tot de buitenhaven in Vlissingen. Het is in deze buitenhaven dat de Calamiteitensteiger zich bevindt. Net zoals in het onderzoek van mevr. Willems wordt een antwoord gezocht op deze onderzoeksvraag: “Is de diepte een bepalende factor voor de corrosiesnelheid”? (Willems, 2021)

6 Materiaal en methoden

6.1 Staalsoorten

Tijdens dit onderzoek zijn er twee verschillende soorten staal gebruikt om de testplaatjes van te maken: Grade A en S 355.

Grade A is eigenlijk de triviale naam van het metaal ASTM A 131, daar metalen volgens ASTM telkens een naam krijgen met een letter voor de categorie, gevolgd door een cijfer, soms zelfs nog gevolgd door een jaartal van fabricatie (McKinnon, 2008). Grade A is een staal soort die zeer veel gebruikt wordt in de maritieme industrie, vooral in de scheepsbouw om scheepsrompen en platformen te bouwen. Het is een ijzerhoudend metaal met een zeer goede taaiheid, een hoge corrosieresistentie en er kan vrij gemakkelijk op gelast worden. Het is ook relatief goedkoop staal is, wat het ideaal maakt voor de maritieme industrie, waar vaak grote hoeveelheden nodig zijn (McKinnon, 2008). Binnen de groep van Grade A-staal zijn er nog onderverdelingen, het specifiek staal dat gebruikt werd in deze test was S 235.

Het tweede staal is S 355, en ook hier is dit de triviale naam. De S staat voor 'structural steel' en 355 is een waarde van de minimum vloeigrenswaarde (World Material, 2019). Wanneer een trekkracht van 355 MPa bereikt wordt, zal het staal vloeien en zal er dus permanente vervorming optreden. Het staal is een variant van S 235 en S 275, maar heeft dus een hogere minimum vloeigrenswaarde. Het staal is niet ingedeeld volgens de ASTM nomenclatuur, maar zou zeer vergelijkbare eigenschappen hebben met ASTM A 572/709 (Devree, 2004; World Material, 2019). Het staal wordt zeer veel gebruikt in offshore structuren, windmolens en energiecentrales, dus ook bij zwaardere constructies (World Material, 2019).

6.2 Codering van de plaatjes

Ook hier zijn de richtlijnen van ASTM gevolgd, in dit geval de ASTM G 1 – 90, de standaard voor het voorbereiden, reinigen en evalueren van corrosietesten (ASTM, 1999). Elk plaatje wordt afzonderlijk voorzien van een nummer, dit door een plastic tag te bevestigen. Een overzicht van de tags is terug te vinden in de bijlagen. Hierbij werden ook de rekken zelf voorzien van een tag, maar dan met een ander kleur als de plaatjes, dit om fouten te vermijden. In dit onderzoek waren alle Grade A-plaatjes voorzien van een groene tag, en alle S 355-plaatjes van een grijze tag.

In Vlissingen werd de Calamiteitensteiger van North Sea Port gebruikt als locatie. Deze ligt in de getijhaven van Vlissingen Sloe in het Scaldiadok.



An aerial photograph of a harbor area. A yellow boat is docked at a pier. A red line is drawn on the pier, extending from the boat towards the top left. A location pin is visible on the right side of the image, labeled "Glamiteitensteiger Vlissingen Oost".

Figuur 14: Detailkaart locatie Calamiteitensteiger

Bron: Google Maps

37

Volgens de technische tekeningen van Zeeland Seaports zou er 12 meter zijn vanaf de kade tot de bodem. Op basis van deze gegevens werden de lengtes van de ophangkoorden vanaf de kade op voorhand berekend. Dit opdat ze te allen tijde ondergedompeld zouden blijven en tegelijk evenredig verdeeld zouden zijn over de hele beschikbare waterdiepte. Hiervoor werden de verwachte getijhoogtes gebruikt, deze zijn berekend en beschikbaar gesteld door de afdeling Kust van het agentschap Maritieme Dienstverlening van de Vlaamse Overheid (Vlaamse Hydrografie, 2022).

Deze waterstanden zijn echter berekend ten opzichte van LAT (Lowest Astronomic Tide) terwijl de gegevens die verkregen werden van North Seaports gebruik maakten van NAP (Normaal Amsterdams Peil).

Hiervoor dient een omzetting gemaakt te worden en er is gekozen om te werken met LAT. Dit omdat LAT een veel grotere geografische reikwijdte heeft dan NAP en er minder correcties dienen gebruikt te gebruiken, wat de kans op fouten vermindert. NAP wordt gedefinieerd als de middenstand van het getij in Amsterdam (Nautin, 2022). Vanuit Amsterdam dient er dan een extra correctie gedaan te worden om de correcte waarden te vinden in NAP te Vlissingen.

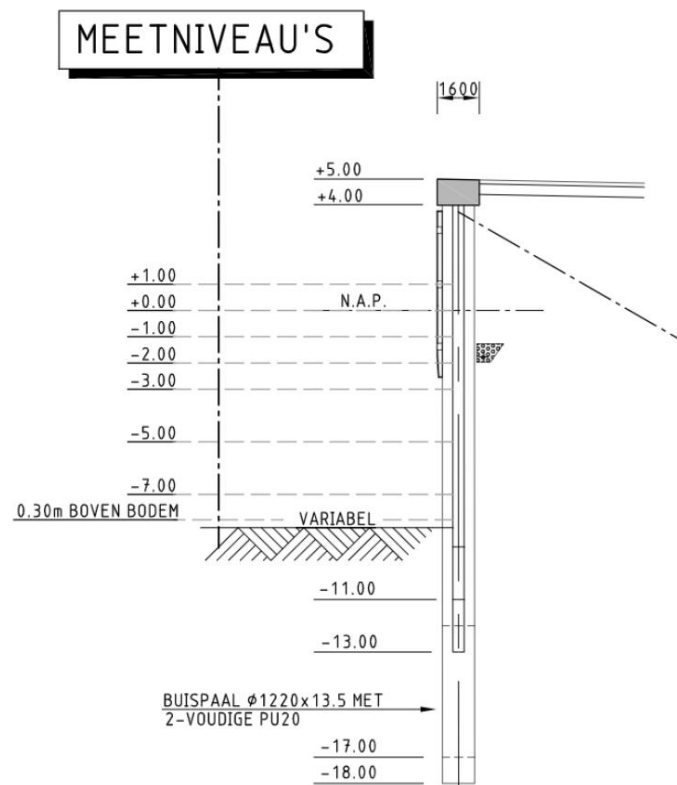
Tabel 2: Getijhoogtes in Vlissingen tov LAT

Bron: eigen werk (op basis van data van Vlaamse Hydrografie, 2022)

	Laag water (dm)	Hoog water (dm)
Gemiddelde	8,566239316	46,02881844
Minimum	2	35
Maximum	17	53

Mediaan	8	46
Modus	7	47
Standaarddeviatie	3,058876177	3,894765502

$$LAT = NAP (Vlissingen) - 256cm$$



PRINCIPEDOORSNEDE WAND 1

SCHAAL 1:200

Figuur 15: Principedoorsnede van de kaaimuur

Bron: Abdoel et al., 2011

Uit deze gegevens (Tabel 2) blijkt dat het verschil tussen het laagste laag water en het hoogste laag water 15 dm is. De standaarddeviatie is 3,0588. Er werd geopteerd dat de rekken te allen tijde zouden ondergedompeld blijven. Daarom is alles vanuit het laagste laag water berekend, dus ten opzichte van LAT + 2dm.

6.3.1 Voorbereiding en berekeningen voor de rekken aan de kaaimuur

Een overzicht van de nieuwe hoogtes in relatie tot de kaaimuur wordt getoond in Figuur 16.

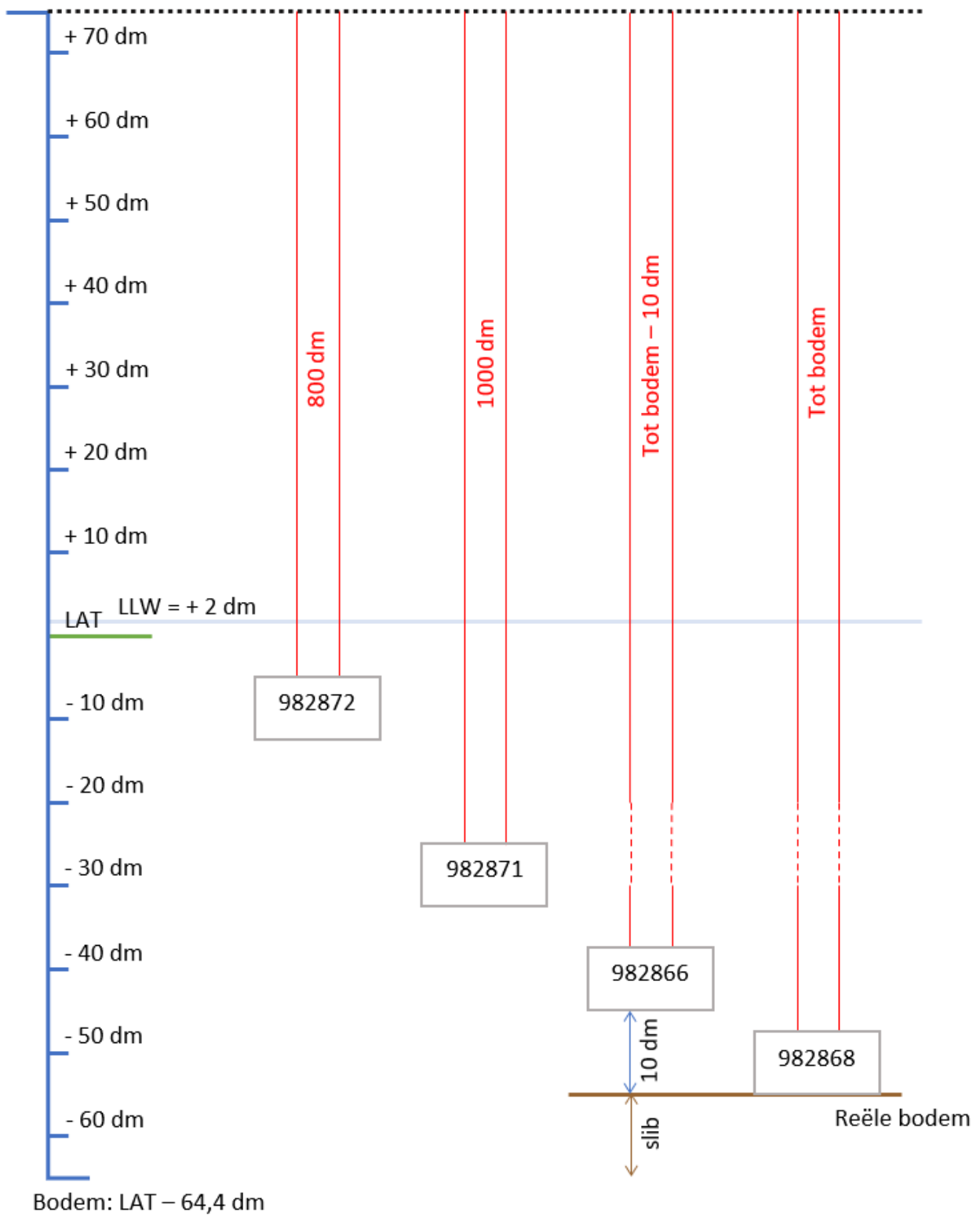
Links staan de referenties ten opzichte van LAT. Er hangen 2 rekken op met een koordlengte van 8 en 10 meter gemeten van de kaaimuur tot de knoop aan de bovenkant van het rek.

Gepland was de overige 2 rekken met 12 en 14 meter op te hangen, maar die lagen beiden op de bodem (op 25 maart 2022). Dit euvel heeft ervoor gezorgd dat de 2 rekken nu ophangen met een koordlengte opdat een rek net op de bodem zou rusten en de ander een meter hoger hangt.

De technische fiche die North Seaports gestuurd had hield geen rekening met slib en ander bezinsel die zich jaren opgestapeld heeft tegen de kaaimuur. Van de ruim 7 meter die op de technische gegevens af te lezen waren bleef er maar ongeveer 4 meter over. Om de exacte waardes te weten te komen, zou er gepeild moeten worden, wat niet gebeurd is.

De nieuwe opstelling garandeert wel dat alle rekken te allen tijde ondergedompeld zullen blijven, maar met de verandering van de bodemdiepte vanaf maart 2022 kon in dit onderzoek geen rekening gehouden worden, daar er geen nieuwe peilingen gebeurd zijn.

Kaaimuur = LAT + 75,6 dm



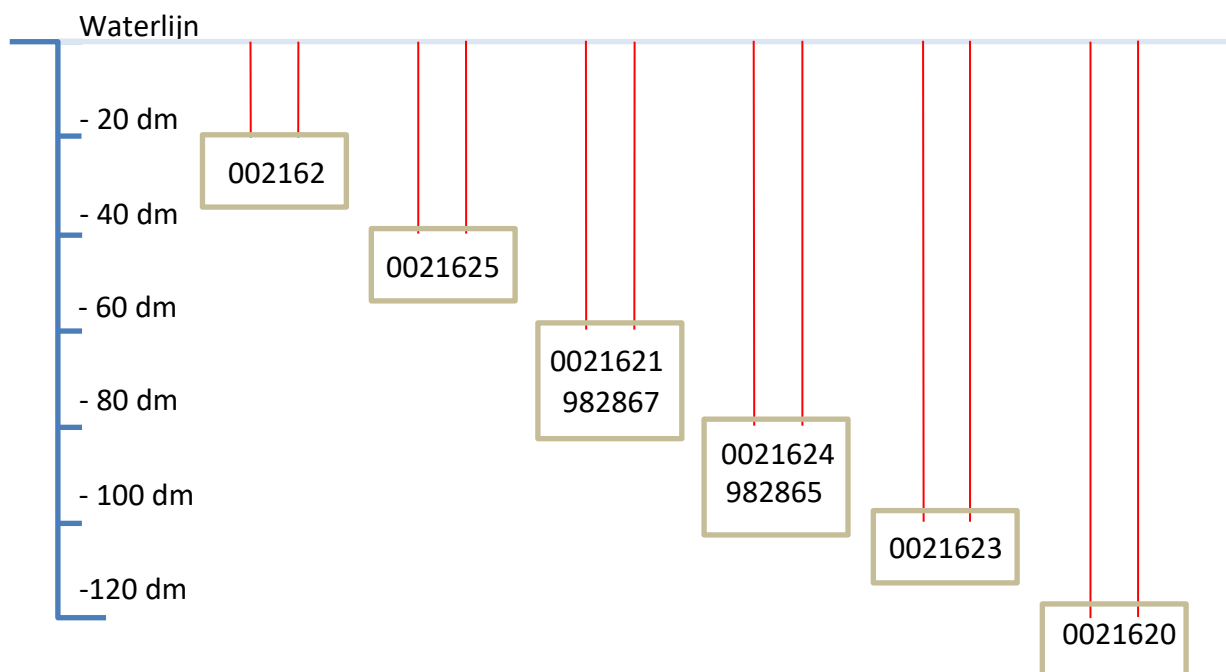
Figuur 16: Opstelling kaaimuur

Bron: eigen werk

6.3.2 Voorbereiding en berekeningen voor de rekken aan het ponton

In tegenstelling tot de opstelling aan de kaaimuur is deze opstelling niet of weinig afhankelijk van het getij, daar het ponton meegaat met het getij. Aangezien de reële diepte van het water niet gekend is, zullen ook hier veronderstellingen gemaakt worden vanuit data die ons geleverd zijn door North Seaports. De berekeningen zijn namelijk gedaan opdat de rekken steeds zouden hangen en niet op de bodem terechtkomen. De bodem ligt echter minder diep dan voorspeld, dus men gaat er dus ook van uit dat sommige rekken op de bodem zullen terechtkomen bij laag water, vandaar dat het ponton toch afhankelijk is van het getij.

Bij de rekken die ophangen aan het ponton zijn tussenliggende afstanden gebruikt van 2 meter.



Figuur 17: Opstelling ponton

Bron: Eigen werk

6.4 Sensoren

Tijdens het onderzoek zijn er in Vlissingen parallel met de rekken ook sensoren opgehangen. Deze twee sensoren meten de waarden van de parameters die corrosie beïnvloeden. Als dat deze gemeten data van de sensoren vergeleken worden met de gegevens verkregen via de plaatjes (het massaverlies in functie van de tijd), is het mogelijk correlaties te zoeken en bepalen welke parameters (zie 0) een grote invloed hebben gehad en welke een minder grote invloed. Dit wordt in deze paper niet verder onderzocht, maar wordt wel gedaan door SOCORRO (Zie hoofdstuk 0).

6.5 Installatie van de rekken

6.5.1 Voorbereiding en Navitec

Nadat de afmetingen van de relingen in Vlissingen zijn genomen (Figuur 18) en er afspraken zijn gemaakt met dhr. Weemaes van North Sea Port, heeft er in oktober 2021 een vergadering plaatsgevonden met Navitec. Tijdens deze vergadering is er samen met een ingenieur van Navitec een conceptontwerp gemaakt van de twee mobiele installaties die zouden gebruikt worden in Vlissingen om de rekken op te hangen..

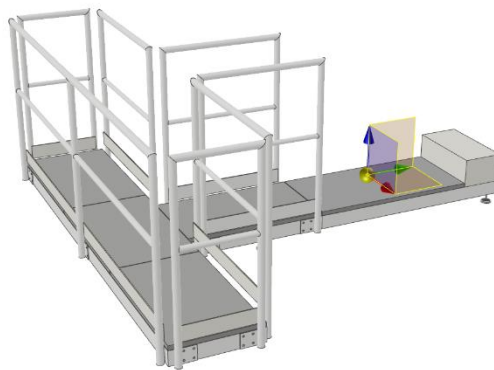


Figuur 18: Voorbereidingen in Vlissingen

Bron: Meskens, 2021

6.5.2 Installatie op de kaai

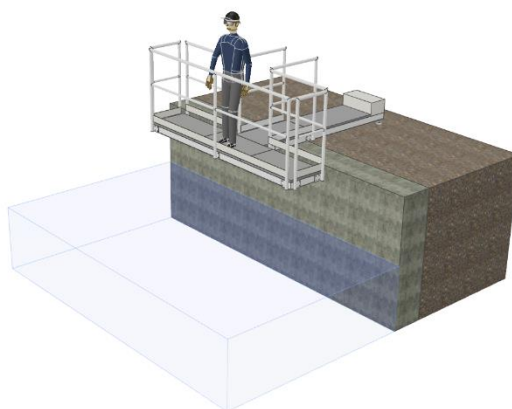
Navitec is een bedrijf gebaseerd in Antwerpen dat gespecialiseerd is in scheepsherstellingen (Navitec, 2021). In samenspraak met één van hun ingenieurs werden ideeën samengelegd en een plan opgesteld over hoe de platformen er zouden moeten uitzien. Het platform voor de kaai diende mobiel te zijn want het is niet toegestaan gaten te boren in de grond en/of aanpassingen te doen aan de kaai. Hierdoor is een platform ontworpen dat zou werken met een tegengewicht waardoor 2 personen veilig op het platform zouden kunnen staan. In Figuur 19 wordt dit ontwerp duidelijk gemaakt door de ligging van het zwaartepunt te tonen, zeer dicht tegen de contragewichten aan. De bijlagen tonen de opbouwmethode van het platform en de afmetingen en de gewichten die nodig zijn voor het platform.



Figuur 19: Ligging van het zwaartepunt van het platform

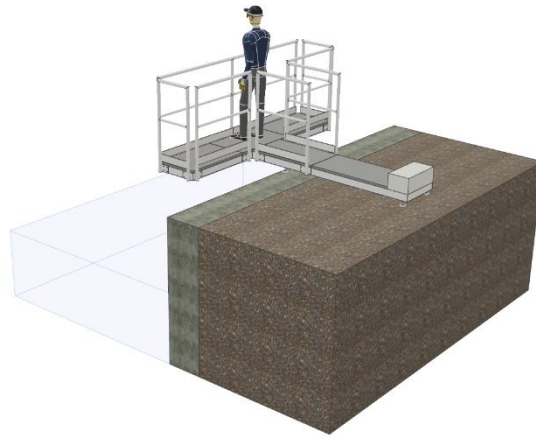
Bron: Navitec, 2021

Figuur 20 en Figuur 21 tonen een driedimensionale, vereenvoudigde voorstelling van het platform wanneer geïnstalleerd op de kaai.



Figuur 20: Driedimensionale voorstelling van het platform, vooraanzicht

Bron: Navitec, 2021



Figuur 21: Driedimensionale voorstelling van het platform, achteraanzicht

Bron: Navitec, 2021



Figuur 22: Vooraanzicht van het platform op de kaai na installatie

Bron: eigen werk

6.5.3 Installatie op het ponton

Ook voor het platform dat bevestigd werd op het ponton werd een ontwerp gemaakt door Navitec. Dat ontwerp werkt met haken die kunnen bevestigd worden op de al aanwezige relings op het ponton.



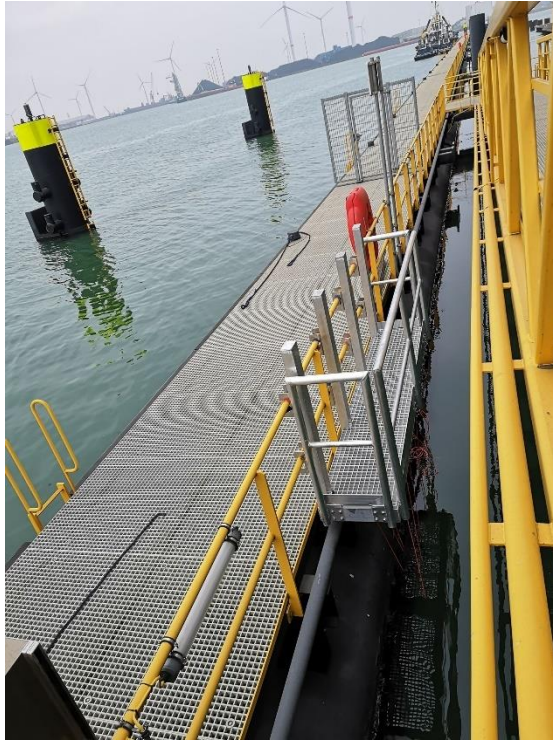
Figuur 23: Het ophangen van de rekken

Bron: eigen werk



Figuur 24: Het platform op het ponton

Bron: eigen werk



Figuur 25: Het platform op het ponton vanop de kaai gezien

Bron: eigen werk

6.6 Gewichtsverlies en corrosiesnelheid

Voordat alle plaatjes ondergedompeld werden in zeewater, was er een gemiddeld gewicht gemeten van zowel de Grade A als van de S355 (Willems, 2021). Gezien de voorbereiding al gedaan was en het dezelfde soort plaatjes, zijn deze waarden overgenomen. De plaatjes werden ook steeds gewogen nadat ze volledig gereinigd geweest zijn. Uiteindelijk gaat het onderzoek over de invloed van de waterdiepte op de corrosiesnelheid, en daar zal een miniem verschil in startgewicht niet zwaar doorwegen op de eindresultaten. Om de corrosiesnelheid te kunnen bepalen is het ook interessant niet enkel het gewichtsverlies te weten, maar ook de blootgestelde oppervlakte, zodat ook een volumeverlies kan bepaald worden. Er is wel vanuit gegaan dat de corrosie vrij verspreid gebeurt op het testplaatje, en niet enkel op een bepaalde plaats (zoals putcorrosie) (ASTM G31, 2004). Dit houdt dan ook in dat het volumeverlies in verhouding staat met de blootgestelde oppervlakte.

Corrosiesnelheid per uur:

$$\left(\frac{g}{m^2h}\right) = \frac{KW}{AT_h\rho}$$

Vergelijking 4: corrosiesnelheid per uur

Corrosiesnelheid per jaar:

$$\left(\frac{g}{m^2y}\right) = \frac{(1,00 \cdot 10^4 \cdot \rho) \left(24 \frac{\text{uur}}{\text{dag}} 365,25 \frac{\text{dagen}}{\text{jaar}}\right) W}{A(T_h \cdot 24 \frac{\text{uur}}{\text{dag}}) \rho} = \frac{(365,25 \cdot 10^4) W}{AT_d}$$

Vergelijking 5: corrosiesnelheid per jaar

- h = tijd in uur
- y = tijd in jaren
- W = gewichtsverlies in gram
- A = oppervlakte in cm^2
- T_h = blootstellingstijd in uren
- T_d = blootstellingstijd in dagen
- ρ = densiteit in g/cm^3

$K = 1,00 \cdot 10^4 \cdot \rho$ (Vergelijking 4 en Vergelijking 5) is een constante die gebruikt wordt in de corrosiesnelheidsvergelijking die gebruikt wordt in de ASTM (Figuur 26). Door deze waarde waarin de dichtheid inbegrepen is te gebruiken, kan de corrosiesnelheid uitgedrukt worden in gram per vierkante meter per uur ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$). De dichtheid is geïntegreerd in de corrosiesnelheidsconstante K, wat maakt dat de dichtheid geschrapt kan worden uit de vergelijking en dichtheid geen factor meer is in de corrosiesnelheid.

Corrosion Rate Units Desired	Constant (K) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	3.45×10^6
inches per year (ipy)	3.45×10^3
inches per month (ipm)	2.87×10^2
millimetres per year (mm/y)	8.76×10^4
micrometres per year ($\mu\text{m}/\text{y}$)	8.76×10^7
picometres per second (pm/s)	2.78×10^6
grams per square metre per hour ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	$1.00 \times 10^4 \times D^A$
milligrams per square decimetre per day (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D^A$
micrograms per square metre per second ($\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	$2.78 \times 10^6 \times D^A$

Figuur 26: Corrosiesnelheidsconstanten volgens ASTM G31

Bron: ASTM G31, (2004)

Het gewichtsverlies W is het verschil van het startgewicht van een testplaatje (gemeten vanuit een gemiddeld gewicht (Willems, 2021)) en het eindgewicht na reiniging.

De oppervlakte van het testplaatje A is vrij eenvoudig te berekenen als een balk met twee weggehaalde cilinders, waarbij de bloot gekomen gaten een oppervlakte creëren van een mantel van een cilinder:

$$\text{Oppervlakte (A)} = A_{\text{balk}} - 4A_{\text{cirkel}} + 2A_{\text{mantel}}$$

$$A_{\text{balk}} = 2(\text{lengte} \cdot \text{breedte}) + 2(\text{breedte} \cdot \text{hoogte}) + 2(\text{hoogte} \cdot \text{lengte})$$

$$A_{\text{cirkel}} = \pi \cdot (\text{straal}^2)$$

$$A_{\text{mantel}} = 2\pi \cdot (\text{straal} \cdot \text{hoogte})$$

Om deze formule overzichtelijker te maken, worden verder de afkortingen gebruikt voor lengte (L), breedte (B), hoogte (H) en straal (R), waarbij alle waarden in cm zijn:

- L = 8,0 cm
- B = 2,0 cm
- H = 0,3 cm
- R = 0,4 cm

$$\begin{aligned}
\text{Oppervlakte (A)} &= (2LB + 2BH + 2HL) - 4(\pi R^2) + 2(2\pi RH) \\
&= (2(8\text{cm} \cdot 2\text{cm}) + 2(2\text{cm} \cdot 0,3\text{cm}) + 2(0,3\text{cm} \cdot 8\text{cm}) - 4(\pi 0,4^2) + 2(2\pi \cdot 0,4\text{cm} \cdot 0,3\text{cm})) \\
&= 32\text{cm}^2 + 1,2\text{cm}^2 + 4,8\text{cm}^2 - 2,01062\text{cm}^2 + 1,50796\text{cm}^2 \\
&= 37,4973\text{cm}^2
\end{aligned}$$



Figuur 27: Dimensies testplaatje

Bron: eigen werk

De blootstellingstijd T is hier dus eigenlijk een veranderlijke, want de plaatjes zijn niet allemaal even lang ondergedompeld geweest. Er zijn periodiek drie maal drie plaatjes van hetzelfde rek gehaald, dus die drie plaatjes zijn dan wel even lang , even diep en onder dezelfde omstandigheden ondergedompeld geweest. Door het gemiddelde te nemen van de resultaten van die plaatjes kan er een veronderstelling genomen worden van wat er gebeurt met alle plaatjes die zich in dezelfde omstandigheden bevinden. Er is ook twee maal zes plaatjes van hetzelfde rek genomen, wat het gemiddelde van die testen dan eigenlijk nog nauwkeuriger maakt.

6.7 Praktische uitvoering

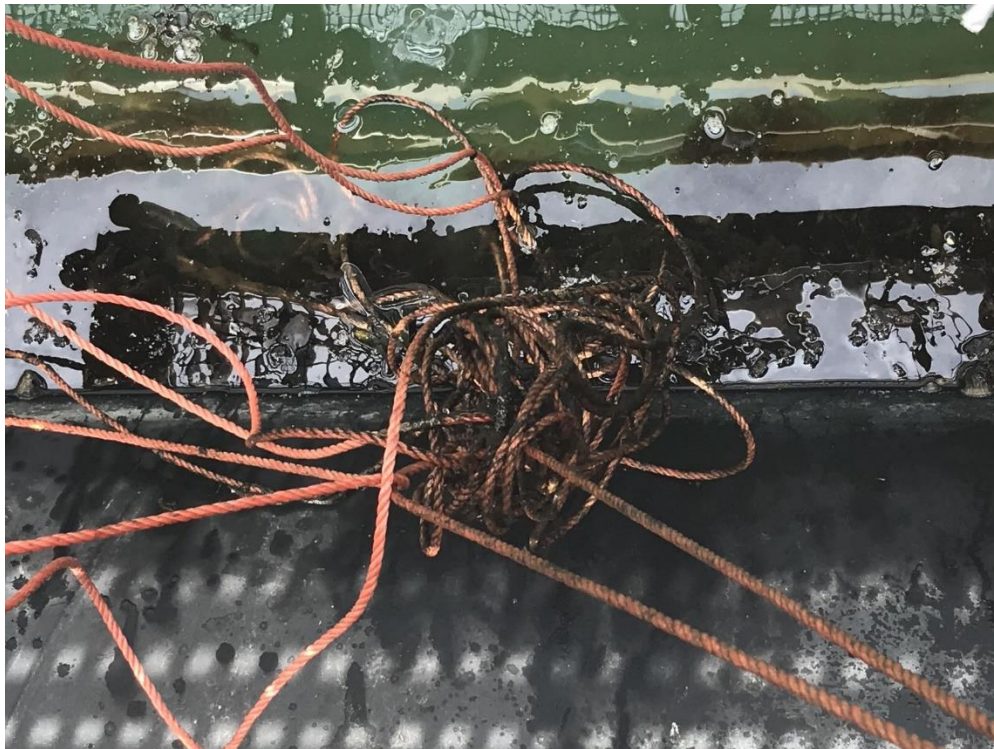
6.7.1 Procedure afnemen plaatjes

Het afnemen van de plaatjes diende telkens zo gelijk als mogelijk te gebeuren om fouten te vermijden. Daarom werd op voorhand telkens een stappenplan opgemaakt om zeker niets te vergeten. De rekken moesten uit het water gehaald worden om de plaatjes te kunnen afknippen. Om de plaatjes die niet afgeknipt werden zo weinig als mogelijk te beïnvloeden, is de tijd waarbij de rekken boven water gehouden werden steeds zo kort als mogelijk gehouden. Daarom is ook telkens maar één rek per keer uit het water gehaald. Dit ook steeds in dezelfde volgorde, alweer om fouten te vermijden.

Nadat een rek uit het water gehaald werd, werd een foto van het gehele rek genomen, en werd het reknummer genoteerd (af te lezen van de tag). Daarna werden 3 testplaatjes die naast elkaar hingen afgeknipt en werd het rek teruggeplaatst.

De plaats en de diepte van de rekken en dus van de testplaatjes was op voorhand al genoteerd, dus het was niet nodig de nummers van de testplaatjes te noteren. Wel werd elk plaatje direct na het afknippen gefotografeerd, dit om de algemene toestand en de aangroei te kunnen zien. De plaatjes werden zo snel als mogelijk afgedroogd om verdere corrosie te vermijden en in keukenpapier gewikkeld en per drie (van hetzelfde rek en dezelfde positie) in luchtdichte zakjes gestoken.

Tijdens deze procedures dienden de veiligheidsvoorschriften en afspraken met North Sea Port natuurlijk nageleefd te worden.



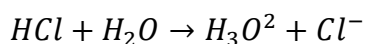
Figuur 28: Bovenaanzicht van de rekken na een maand tijd

De eerste keer (na een maand) is het ook niet gelukt om 2 rekken alleen naar boven te hijsen wegens een te groot kluwen en slecht weer. Dit verstrengelen van de touwen is waarschijnlijk te wijten aan de mindere kwaliteit van de touwen want de touwen draaiden bij het ophangen van de rekken al snel in wijzerzin rond, wat vermoedelijk te wijten is aan interne krachten bij het rechtsgeslagen touw. Daarom, om verdere risico's te vermijden, is het weghalen van de plaatjes nadien telkens met twee personen gebeurd. Dit verklaart dan de afwezigheid van 2 dieptes bij de resultaten in hoofdstuk 7.

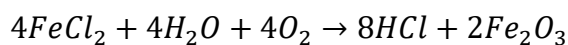
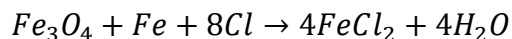
Bron: eigen werk

6.7.2 Reinigen plaatjes

Het reinigen van de plaatjes kon niet in Vlissingen gebeuren want het is een chemische reactie waar giftige gassen vrijkomen (Vergelijking 7) (Greenwood & Earnshaw, 1997). Het reinigen gebeurde volgens de al vermelde ASTM-standaard G1 ((ASTM, 1999). Het reinigen gebeurde bij beide soorten staal op dezelfde manier. Zoals in de ASTM aangegeven wordt is het belangrijk dat er bij de procedure geen metaalverlies optreedt, anders zouden de resultaten beïnvloed worden. De plaatjes werden eerst zeer grondig mechanisch proper gemaakt met keukenpapier, dit tot alle aangroei verwijderd was. Dit werd dan direct gevolgd door een chemische procedure, het beitsen met het zoutzuur. Hiervoor is het zoutzuur gebruikt dat vrij in de markt te vinden was, wat een oplossing was van 23%. Zoutzuur is de triviale naam van een oplossing in water van waterstofchloride. Het is een chemisch zeer zure stof met een pH-waarde van -1 (Lide, 1996).



Vergelijking 6: chemische vorming zoutzuur



Vergelijking 7: reactievergelijking beitsen

De testplaatjes werden in kleine hoeveelheden samen ondergedompeld in de zoutzuuroplossing. De reactie was zeer exotherm en de zoutzuuroplossing werd snel zeer vervuild door de reactie en de minieme resten van de aangroei, waardoor de zoutzuuroplossing om te paar onderdompelingen vervangen diende te worden om de reactie bij alle testplaatjes even goed te kunnen laten verlopen. Na de onderdompeling werden de plaatjes met veiligheidshandschoenen kort in vers water ondergedompeld om het zoutzuur te kunnen afspoelen en de plaatjes te kunnen afdrogen en wegen. Net voordat de plaatjes gewogen konden worden, bleek dat veel van de plaatjes terug een groene gloed kregen. Dit bleek na verder onderzoek vliegroeist te zijn (0).

Flitsroeist na het reinigen verandert het gewicht van de plaatjes niet meer, dus de plaatjes zijn met de flitsroeist er nog op gewogen. Net voor het wegen werden de tags van de plaatjes geknipt. Dit gebeurde zo laat in het proces om foute identificaties te vermijden. De weegschaal die gebruikt werd is een Kern KB 650-2N en heeft een nauwkeurigheid van 0,01 gram. Na het wegen waren de plaatjes niet meer te onderscheiden van elkaar wegens het gebrek aan tags en waren ze dus niet meer bruikbaar.

6.8 Visuele inspectie

Zowel de plaatjes van Grade A en S 355 vertonen een uniforme corrosie, al na de eerste staalname. Ook is er zeer veel biologische aangroei. Het is echter niet mogelijk hier veel te differentiëren tussen de verschillende metaalsoorten en dieptes.

In functie van de onderdompeltijd is er wel een evolutie zichtbaar in de hoeveelheid aangroei en corrosie. De corrosie is initieel vrij oppervlakkig (Figuur 29), maar neemt steeds meer volume in beslag. Dit is te zien aan de steeds groter wordende bruine oppervlakte op de plaatjes. De aangroei evolueert ook met de tijd en wordt steeds dikker en verscheidener. Bij de derde staalname waren sommige plaatjes al helemaal bedekt met aangroei, zoals getoond in Figuur 30. Deze is wel lichtjes weggenomen bij het fotograferen om de vorm van de plaatjes toch zichtbaar te houden. Ook waren er steeds meer zeepokken zichtbaar, die zeer goed gehecht waren aan de plaatjes. Het was pas bij het etsen dat deze los lieten.

Bij de plaatjes die (soms) op de bodem terechtkwamen, was er een enorme biologische activiteit zichtbaar. Een voorbeeld daarvan is Figuur 31. De plaatjes waren nagenoeg compleet bedekt met aangroei.



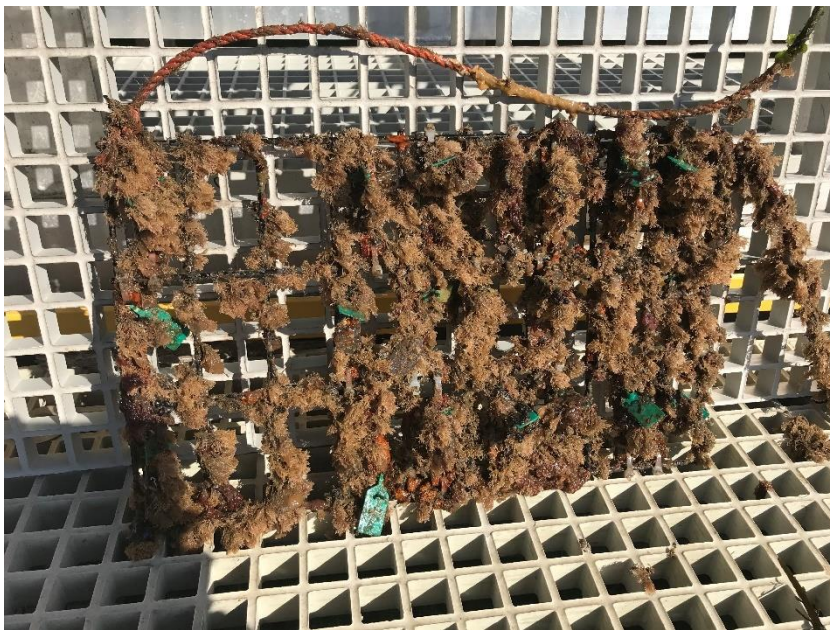
Figuur 29: Ophangrek na 39 dagen

Bron: eigen werk



Figuur 30: ophangrek na 161 dagen (1)

Bron: eigen werk



Figuur 31: ophangrek na 161 dagen (2)

Bron: eigen werk

Grade A	39 dagen	134 dagen	161 dagen
4 meter			
6 meter			
8 meter	/		
10 meter	/		
12 meter			

S355	39 dagen	134 dagen	161 dagen
8K			
10K			
B-10			
B			

S 355	39 dagen	134 dagen	161 dagen
6 meter	/		
8 meter	/		

7 Resultaten experiment

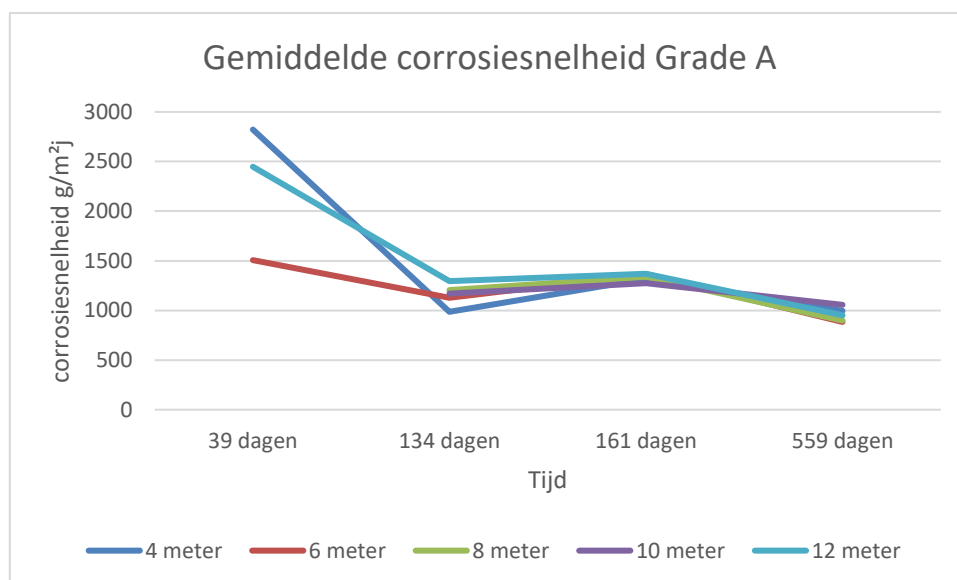
7.1 Grade A

7.1.1 Corrosiesnelheid

Tabel 3: Gemiddelde corrosiesnelheid Grade A ($\text{g}/\text{m}^2\text{j}$)

Bron: eigen werk

	39 dagen	134 dagen	161 dagen	559 dagen
4 meter	2822,3 $\pm$ 533,9	986,2 $\pm$ 105,4	1316,9 $\pm$ 37,0	996,5 $\pm$ 74,2
6 meter	1506,9 $\pm$ 84,5	1129,1 $\pm$ 25,6	1365,3 $\pm$ 40,5	883,7 $\pm$ 84,9
8 meter	/	1205,5 $\pm$ 75,9	1339,1 $\pm$ 21,1	897,4 $\pm$ 31,7
10 meter	/	1169,1 $\pm$ 40,1	1274,6 $\pm$ 59,1	1056,3 $\pm$ 42,2
12 meter	2447,7 $\pm$ 124,9	1293,9 $\pm$ 223,9	1369,3 $\pm$ 47,4	951,1 $\pm$ 89,4



Figuur 32: gemiddelde corrosiesnelheid Grade A ($\text{g}/\text{m}^2\text{j}$)

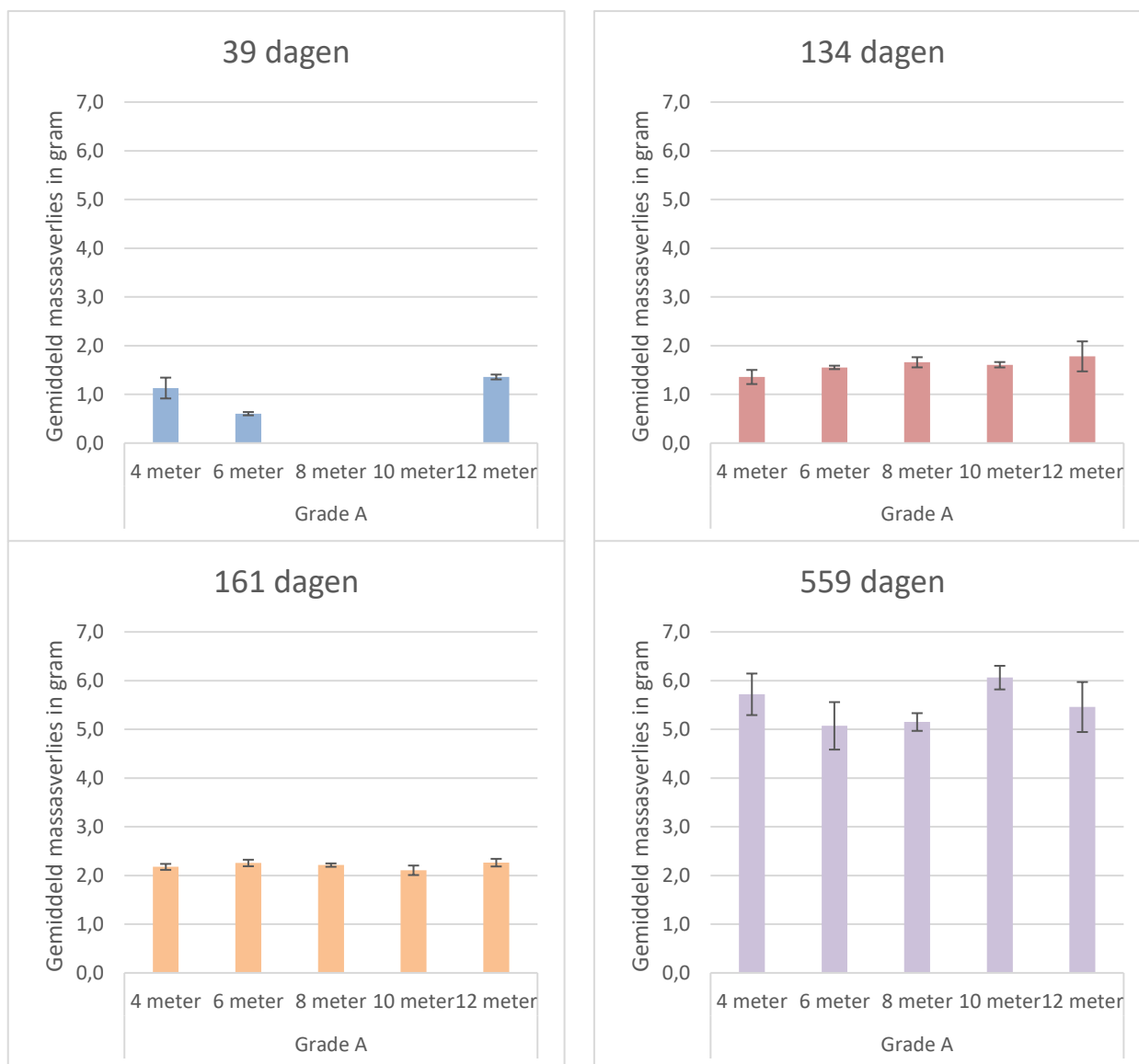
Bron: eigen werk

7.1.2 Massaverlies

Tabel 4: Massaverlies Grade A (g)

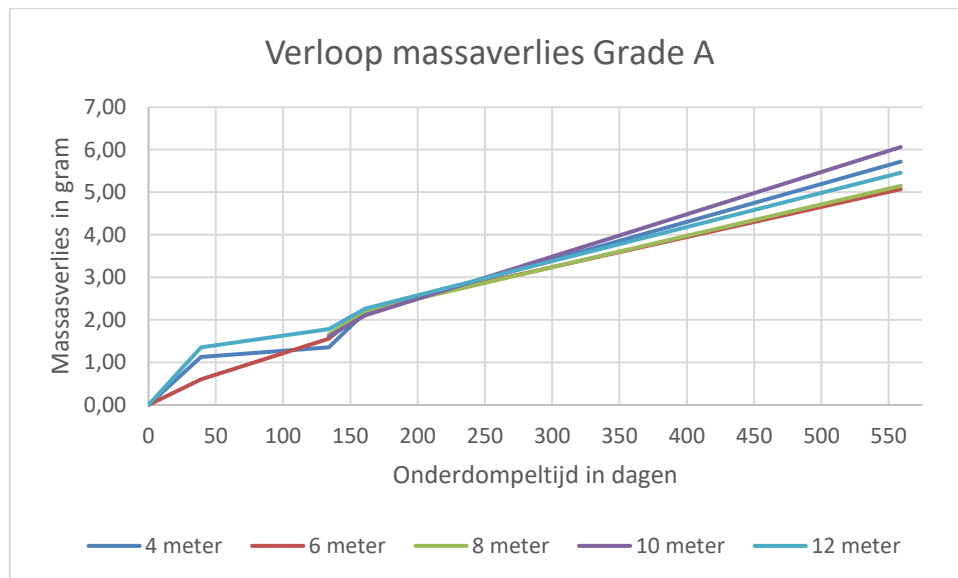
Bron: eigen werk

	39 dagen	134 dagen	161 dagen	559 dagen
4 meter	1,13±0,21	1,36±0,14	2,18±0,06	5,72±0,43
6 meter	0,60±0,03	1,55±0,04	2,26±0,07	5,07±0,49
8 meter	/	1,66±0,11	2,21±0,03	5,15±0,18
10 meter	/	1,61±0,06	2,11±0,10	6,06±0,24
12 meter	0,98±0,05	1,78±0,31	2,26±0,08	6,46±0,51



Figuur 33: Massaverlies Grade A

Bron: eigen werk



Figuur 34: Verloop massaverlies Grade A

Bron: eigen werk

7.2 S 355

7.2.1 Corrosiesnelheid

Tabel 5: Gemiddelde corrosiesnelheid S 355 (g/m²j)

Bron: eigen werk

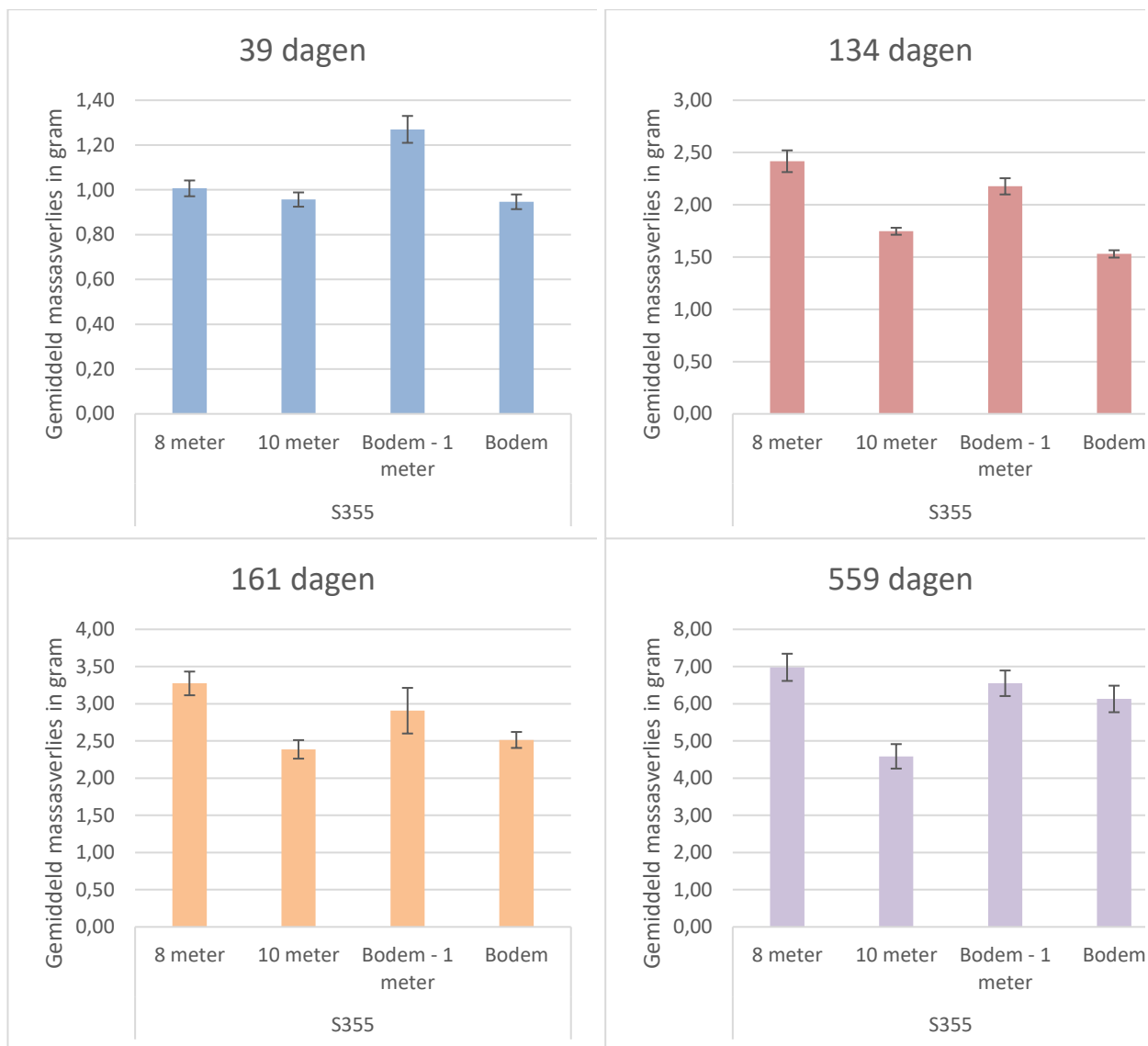
	39 dagen	134 dagen	161 dagen	559 dagen
8 meter	2514,3±88,1	1756,7±75,6	1980,4±96,4	1216,2±63,7
10 meter	2389,4±79,4	1269,7±24,2	1444,0±75,3	799,0±57,3
Bodem - 2 meter	3172,0±149,9	1582,3±56,4	1758,6±185,5	1141,4±59,9
Bodem	2365,4±82,0	1112,2±25,5	1520,6±64,9	1068,0±62,2

7.2.2 Massaverlies

Tabel 6: Massaverlies S 355 (g)

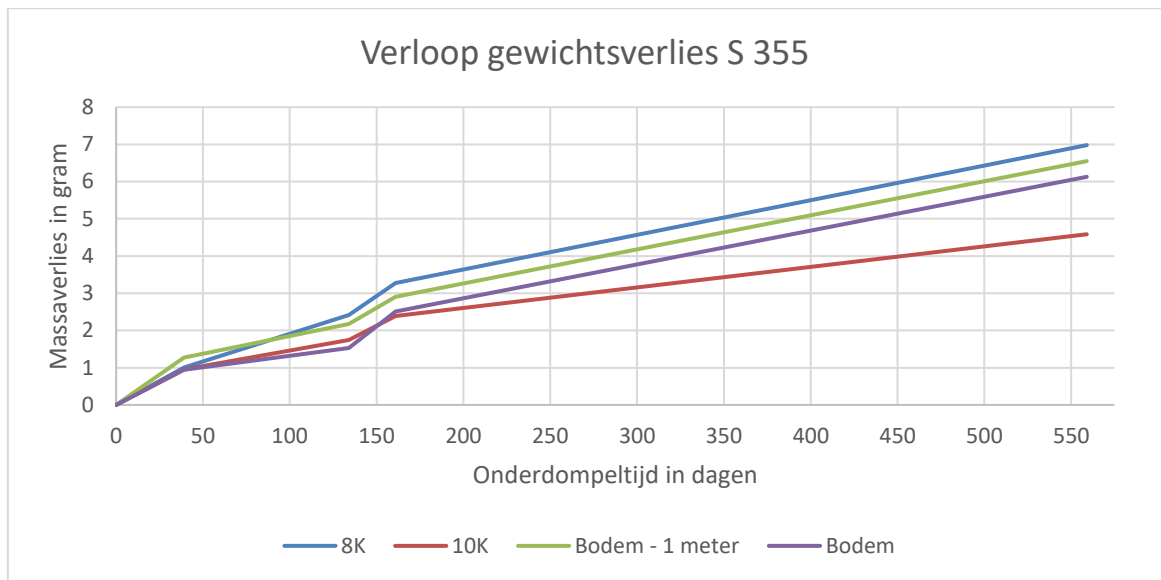
Bron: eigen werk

	39 dagen	134 dagen	161 dagen	559 dagen
8 meter	1,01±0,04	2,42±0,10	3,27±0,16	6,98±0,37
10 meter	0,96±0,03	1,75±0,03	2,39±0,13	4,59±0,33
Bodem - 2 meter	1,27±0,06	2,18±0,08	2,91±0,31	6,55±0,34
Bodem	0,95±0,03	1,53±0,03	2,51±0,11	6,13±0,36



Figuur 35: Massaverlies S 355

Bron: eigen werk



Figuur 36: verloop massaverlies S 355

Bron: eigen werk

8 Statistische analyse van de resultaten

8.1 ANOVA

ANOVA staat voor "Analysis of Variance" en is een statistische techniek die wordt gebruikt om te bepalen of er significante verschillen zijn tussen de gemiddelden van drie of meer groepen (dieptes). Het beantwoordt de vraag of er variabiliteit in de steekproefgegevens wordt veroorzaakt door verschillen tussen de groepen of dat deze variabiliteit het gevolg is van willekeurige variatie. In dit onderzoek is de onveranderlijke factor de waterdiepte en de veranderlijke het massaverlies.

ANOVA gebruikt een F- en een p-waarde.

De F-waarde geeft de verhouding van de variaties tussen de gevonden waarden binnen de verschillende groepen (de variatie tussen de gevonden gemiddeldes van massaverlies over de verschillende waterdieptes) en de gevonden waarden binnen één groep (de verschillende massaverliezen binnen één waterdiepte). Een hoge F duidt op een groot verschil tussen de groepsgemiddelden en kan erop wijzen dat er significante verschillen zijn tussen de verschillende groepen.

De p-waarde is een maat voor de waarschijnlijkheid van het verkrijgen van die F-waarde. Het geeft aan hoe waarschijnlijk het is om de waargenomen variabiliteit tussen de groepen te verkrijgen als er in werkelijkheid geen verschil tussen de groepsgemiddelden bestaat. Een lage p-waarde geeft aan dat de waargenomen verschillen tussen de groepsgemiddelden zeer onwaarschijnlijk zijn onder de nulhypothese. Dit suggereert dat er voldoende bewijs is om de nulhypothese te verwerpen en te concluderen dat er significante verschillen zijn tussen ten minste twee groepen.

Bij het interpreteren van de p-waarde werd in dit onderzoek een significantieniveau gebruikt van 0,05 (5%). Als de p-waarde lager is dan dit niveau, geeft dit aan dat er significante verschillen zijn tussen groepsgemiddelden. In statistische termen worden dan de nulhypothese verworpen ten gunste van de alternatieve hypothese.

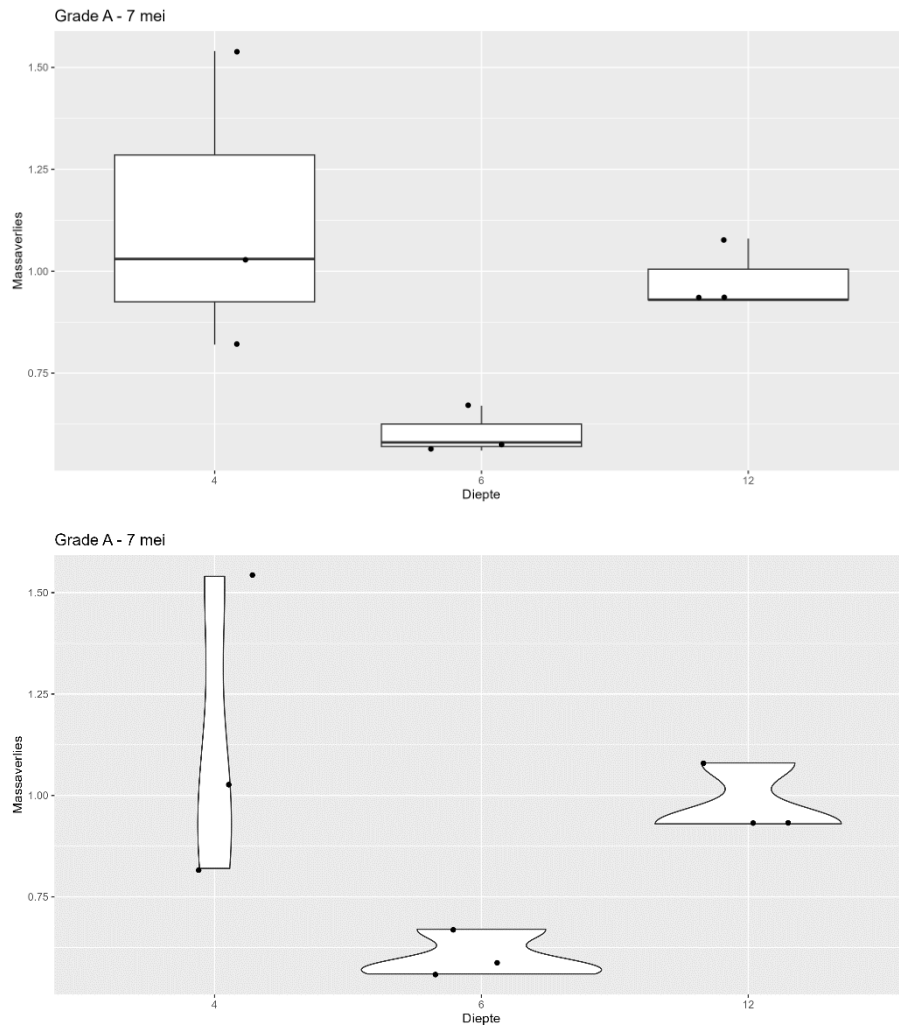
8.2 Grade A

8.2.1 Corrosiesnelheid

De resultaten in Tabel 3 zijn berekend via de methode die uitgewerkt staat in 0. Uit de resultaten getoond in de tabel, nogmaals grafisch voorgesteld in Figuur 32 blijkt dat de hoogste corrosiesnelheid voor elke diepte te vinden is in de eerste kolom, na 39 dagen. Nadien is er voor alle dieptes een daling zichtbaar, gevolgd door een stabilisering van de corrosiesnelheid. Dit is te interpreteren als een afname in corrosiesnelheid over de tijd. Ook is duidelijk dat de diepte initieel wel een invloed had op de corrosiesnelheid, maar dat dat verschil na verloop van tijd afneemt. Initieel hadden de verschillende corrosiesnelheden een bereik van $2822,3 \pm 533,9$ tot $2447,7 \pm 124,9$ g/m²j. Na 161 dagen situeren alle waargenomen corrosiesnelheden zich tussen $1369,4 \pm 47,4$ en $1274,6 \pm 59,1$ g/m²j, en het verschil tussen het maximum en het minimum is nog kleiner na 559 dagen.

Niet alleen de gemeten waardes stabiliseren, maar ook de standaardafwijkingen. Dit kan te verklaren zijn door de langere meetperiode, waarbij de bijdrage van kleinere, corrosie beïnvloedende factoren wat afgeplat wordt over de tijd. De hoogste corrosiesnelheid ($2822,3 \pm 533,9$ op 4 meter na 39 dagen) is ook de waarde met de grootste standaardafwijking. Dit komt omdat de waarde 2822,3 berekend is uit het gemiddelde van 3 waarden die ver uiteen liggen, zijnde 1,54; 0,82 en 1,03 gram gewichtsverlies. Dit grote verschil zou kunnen te wijten zijn aan een verschillend corrosieproces tussen de plaatjes. Ondanks de kleine afstand tussen de plaatjes, kan het ene plaatje lokaal een andere corrosieomgeving ondervinden en dus een ander corrosieproces ondergaan ten opzicht van een ander. Het kan als logisch beschouwd worden dat over tijd deze verschillen in corrosieprocessen weggewerkt worden gezien de gemiddelde corrosieomgevingen van de plaatjes als gelijk kunnen beschouwd worden.

8.2.2 Massaverlies



Figuur 37: Massaverlies Grade A na 39 dagen

Bron: eigen werk

Dit zijn de waarden van het massaverlies gevonden uit de eerste staalname na 39 dagen onderdompeling. Het massaverlies bij 4 meter varieert tussen 0,83 en 1,54 gram, wat de brede boxplot verklaart. Het gemiddelde van de 3 waarden is 1,13 gram met een standaardfout van 0,21.

Het massaverlies bij 6 meter varieert tussen 0,56 en 0,67 gram, deze waarden liggen beduidend dicht bij elkaar dan bij 4 meter. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 0,60 gram met een standaardfout van 0,03. Dit is bijna de helft van de waardes gevonden bij 4 meter.

Het massaverlies bij 12 meter varieert tussen 0,93 en 1,08 gram. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 0,98 gram met een standaardfout van 0,03. Dit ligt tussen de waarden gevonden bij 4 en 6 meter. De violin-plots hebben vrij onregelmatige vormen, dat is te wijten aan het feit dat er maar 3 waardes zijn.

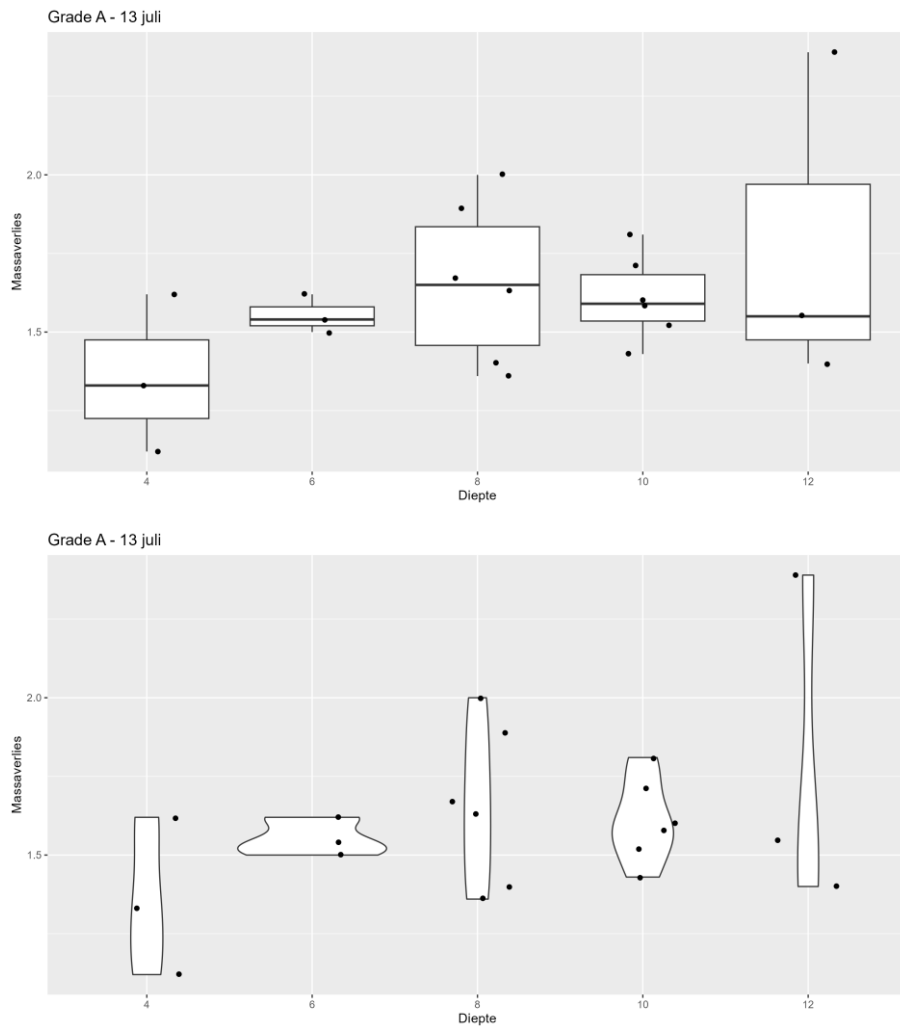
ANOVA-test: $F = 4,476$ en $\Pr(>F) = 0,065$

Zowel de F-waarde als de p-waarde zijn hoog ($p > 0,05$), in dit geval kan de nulhypothese niet verworpen worden, en is er bijgevolg geen significant verschil tussen de verschillende groepen (dieptes). Dit houdt niet in dat er absoluut geen verschil is, maar het kan zijn dat de hoeveelheid plaatjes te klein was om een verschil te kunnen aantonen, of dat andere factoren zijn die het resultaat beïnvloedden. In dit geval waren er maar 3 dieptes met telkens 3 plaatjes, wat de uitleg kan zijn voor deze resultaten. Op statistische basis is er in elk geval geen basis om te concluderen dat er een significant verschil is tussen de massaverliezen.

Tabel 7: ANOVA-test Grade A na 39 dagen

Diepte	p-waarde
4 ↔ 6	0,061
4 ↔ 12	0,701
6 ↔ 12	0,175

Alle p-waarden zijn groter dan 0,05, wat enkel bevestigt dat er geen significante verschillen zijn tussen de verschillende groepen.



Figuur 38: Massaverlies Grade A na 134 dagen

Bron: eigen werk

Dit zijn de waarden van het massaverlies gevonden uit de tweede staalname na 134 dagen. Hier komen de dieptes 8 en 10 meter bij, wat het totaal aantal dieptes op 5 brengt.

Het massaverlies bij 4 meter varieert tussen 1,12 en 1,62 gram, deze waarden liggen beduidend dicht bij elkaar dan bij de eerste staalname. De waardes zijn ook hoger, wat logisch is want corrosie is additief. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 1,36 gram met een standaardfout van 0,15. Dit geeft een extra massaverlies van $1,36 - 1,13 = 0,23$ gram vergeleken met de eerste staalname.

Het massaverlies bij 6 meter varieert tussen 1,50 en 1,62 gram. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 1,55 met een standaardfout van 0,04. Dit geeft een extra massaverlies van $1,55 - 0,60 = 0,95$ gram vergeleken met de eerste staalname.

Het massaverlies bij 8 meter varieert tussen 1,36 en 2,00 gram. Het gemiddelde van deze 6 waarden is 1,66 met een standaardfout van 0,10. Hier is geen extra massaverlies te berekenen, gezien er geen waarden waren voor de eerste staalname.

Het massaverlies bij 10 meter varieert tussen 1,43 en 1,81 gram. Het gemiddelde van deze 6 waarden is 1,61 met een standaardfout van 0,05. Ook hier is geen extra massaverlies te berekenen, gezien er geen waarden waren voor de eerste staalname.

Het massaverlies bij 12 meter varieert tussen 1,40 en 2,39 gram. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 1,78 met een standaardfout van 0,30. De standaardfout is vrij groot, dit is te wijten aan de uitschieter van 2,39 gram, wat bijna 1 gram meer is dan de laagste gemeten waarde hier (1,40 gram). Dit geeft een extra massaverlies van $1,78 - 0,98 = 0,80$ gram vergeleken met de eerste staalname.

Het verloop van de massaverliezen is in een grafiek geplaatst, zie Figuur 34.

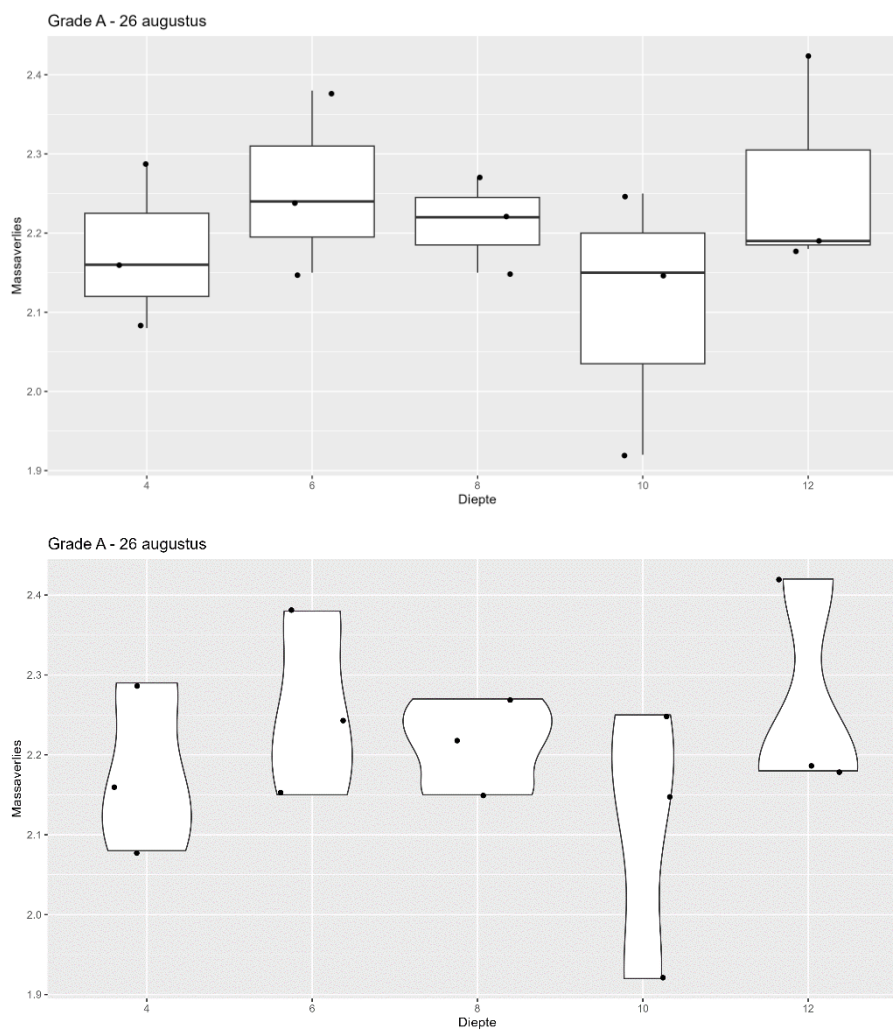
ANOVA-test: $F = 1,077$ en $\Pr(>F) = 0,4$

Opnieuw is er een hoge p-waarde ($0,4 > 0,05$). In dit geval kan de nulhypothese niet verworpen worden, en is er bijgevolg geen significant verschil tussen de verschillende groepen (dieptes).

Tabel 8: ANOVA-test Grade A na 134 dagen

Diepte	p-waarde
4 ↔ 6	0,889
4 ↔ 8	0,511
4 ↔ 10	0,669
4 ↔ 12	0,328
6 ↔ 8	0,979
6 ↔ 10	0,998
6 ↔ 12	0,829
8 ↔ 10	0,997
8 ↔ 12	0,964
10 ↔ 12	0,886

Opnieuw zijn alle p-waarden zijn groter dan 0,05; wat enkel bevestigt dat er geen significante verschillen zijn tussen de verschillende groepen.



Figuur 39: Massaverlies Grade A na 161 dagen

Bron: eigen werk

Dit zijn de waarden van het massaverlies gevonden uit de derde staalname na 161 dagen. Ook hier is geen eenduidig lineair verband zichtbaar tussen de gevonden gemiddelde waarden, al lijken alle gemiddeldes nu rond de 2,2 gram te hangen.

Het massaverlies bij 4 meter varieert tussen 2,08 en 2,29 gram. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 2,18 gram met een standaardfout van 0,06.

Het massaverlies bij 6 meter varieert tussen 2,15 en 2,38 gram. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 2,26 gram met een standaardfout van 0,07.

Het massaverlies bij 8 meter varieert tussen 2,15 en 2,27 gram. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 2,21 gram met een standaardfout van 0,03.

Het massaverlies bij 10 meter varieert tussen 1,92 en 2,25 gram. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 2,11 gram met een standaardfout van 0,10.

Het massaverlies bij 12 meter varieert tussen 2,18 en 2,42 gram. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 2,26 gram met een standaardfout van 0,08.

ANOVA-test: $F = 0,826$ en $\Pr(>F) = 0,538$

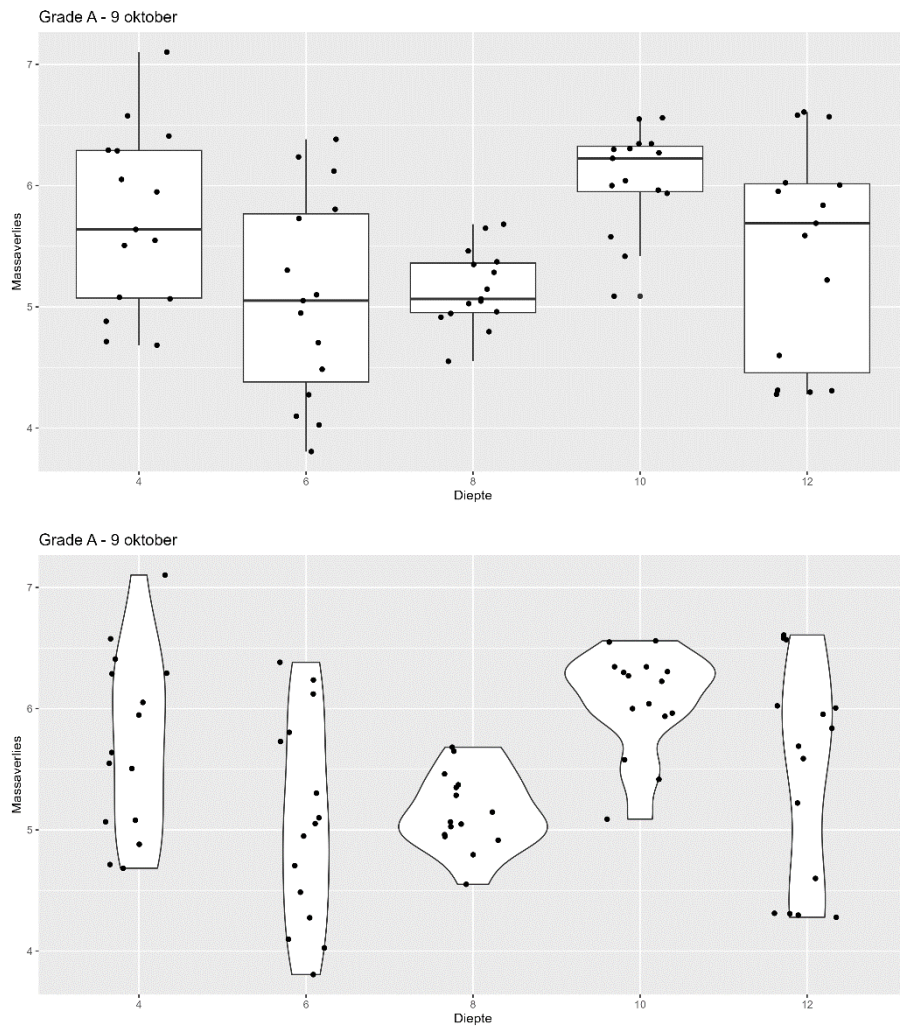
Opnieuw is er een hoge p-waarde ($0,4 > 0,05$). in dit geval kan de nulhypothese niet verworpen worden, en is er bijgevolg geen significant verschil tussen de verschillende groepen (dieptes).

De F-waarde is ook vrij laag, dus er is ook steeds minder een verschil tussen de variantie tussen de groepen en de variantie binnen één groep.

Tabel 9: ANOVA-test Grade A na 161 dagen

Diepte	p-waarde
4 ↔ 6	0,925
4 ↔ 8	0,996
4 ↔ 10	0,952
4 ↔ 12	0,903
6 ↔ 8	0,996
6 ↔ 10	0,587
6 ↔ 12	0,999
8 ↔ 10	0,820
8 ↔ 12	0,986
10 ↔ 12	0,549

Opnieuw zijn alle p-waarden zijn groter dan 0,05; wat enkel bevestigt dat er geen significante verschillen zijn tussen de verschillende groepen.



Figuur 40: Massaverlies Grade A na 559 dagen

Bron: eigen werk

Dit zijn de waarden van het massaverlies gevonden uit de vierde en laatste staalname na 559 dagen. De onderdompeltijd is hier beduidend langer, en ook zijn er hier veel meer waardes (15) gevonden dan bij de vorige staalnames. Ondanks de lange onderdompeltijd en de mogelijkheid om alle extreme waarden af te vlakken, blijft de standaardfout toch vrij groot, soms tot 0,51 bij 12 meter.

Het massaverlies bij 4 meter varieert tussen 4,68 en 7,10 gram. Het gemiddelde van deze 15 waarden is 5,72 gram met een standaardfout van 0,43.

Het massaverlies bij 6 meter varieert tussen 3,81 en 6,38 gram. Het gemiddelde van deze 15 waarden is 5,07 gram met een standaardfout van 0,49.

Het massaverlies bij 8 meter varieert tussen 4,55 en 5,68 gram. Het gemiddelde van deze 15 waarden is 5,15 gram met een standaardfout van 0,18.

Het massaverlies bij 10 meter varieert tussen 5,08 en 6,56 gram. Het gemiddelde van deze 15 waarden is 6,06 gram met een standaardfout van 0,24.

Het massaverlies bij 12 meter varieert tussen 4,27 en 6,61 gram. Het gemiddelde van deze 15 waarden is 5,46 gram met een standaardfout van 0,51. Dit is 9,3% van de gemiddelde waarde.

ANOVA-test: $F = 5,416$ en $\Pr(>F) = 0,001$

De ANOVA-test geeft aan door de hoge waarde van F en de lage p -waarde ($0,000739 < 0,05$) dat er wel degelijk een significant verschil is tussen de gemiddelden van de gegevens, dus dat er een significant verschil is in (gemiddeld) massaverlies tussen de verschillende dieptes.

Tabel 10: ANOVA-test Grade A na 559 dagen

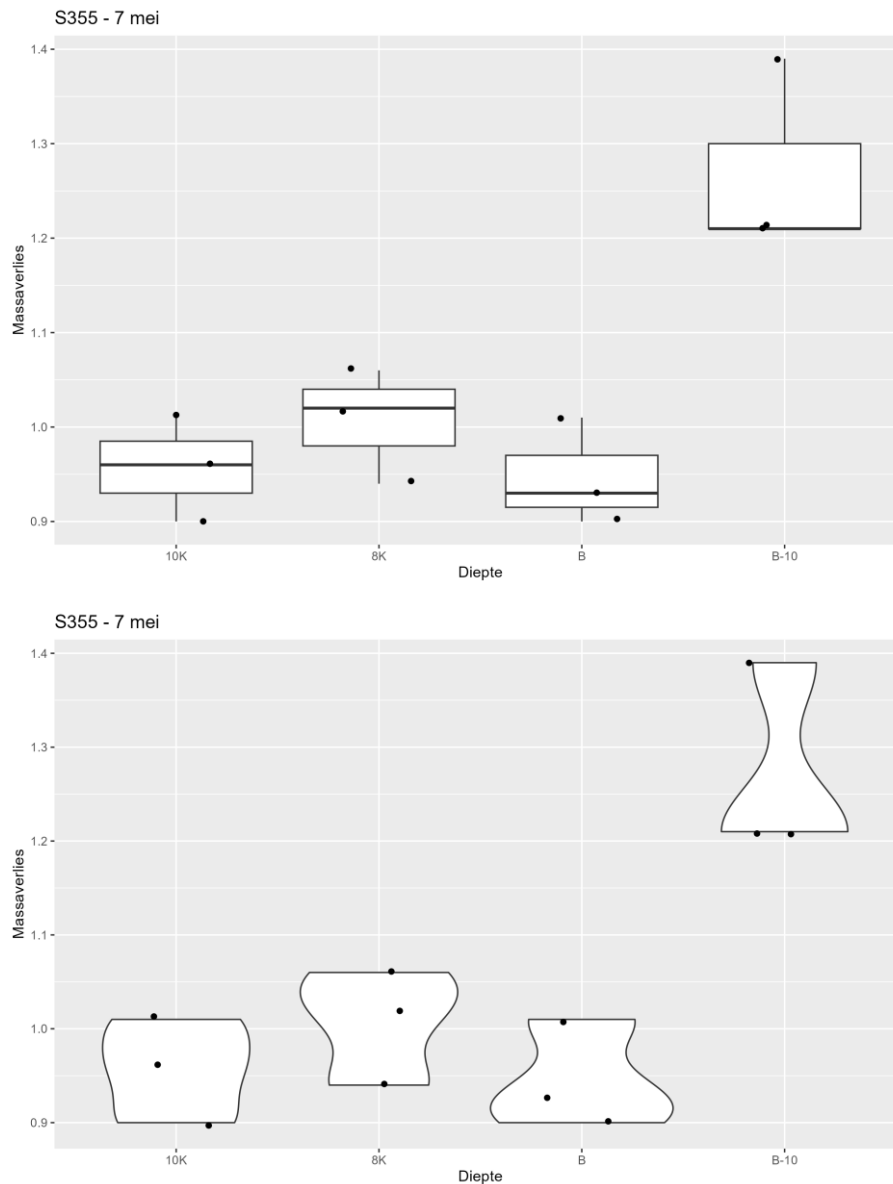
Diepte	p-waarde
4 ↔ 6	0,081
4 ↔ 8	0,162
4 ↔ 10	0,644
4 ↔ 12	0,832
6 ↔ 8	0,998
6 ↔ 10	0,002
6 ↔ 12	0,532
8 ↔ 10	0,004
8 ↔ 12	0,730
10 ↔ 12	0,121

8.3 S 355

8.3.1 Corrosiesnelheid

De resultaten in Tabel 5 zijn berekend via de methode die uitgewerkt staat in 0. Uit de resultaten getoond in de tabel, nogmaals grafisch voorgesteld in Figuur 36, blijkt dat de hoogste corrosiesnelheid voor elke diepte te vinden is in de eerste kolom, na 39 dagen. Nadien is er voor alle dieptes een daling zichtbaar, gevolgd door een stabilisering van de corrosiesnelheid. Dit is te interpreteren als een afname in corrosiesnelheid over de tijd. Ook is duidelijk dat de diepte initieel wel een invloed had op de corrosiesnelheid, maar dat dat verschil na verloop van tijd afneemt. Initieel hadden de verschillende corrosiesnelheden een bereik van $2365,4 \pm 82,0$ tot $3172,0 \pm 149,9$ g/m²j. Na 161 dagen situeren alle waargenomen corrosiesnelheden zich tussen $1112,2 \pm 25,5$ en $1756,7,6 \pm 75,6$ g/m²j, en het verschil tussen het maximum en het minimum is nog kleiner na 559 dagen.

8.3.2 Massaverlies



Figuur 41: Massaverlies Grade S 355 na 39 dagen

Bron: eigen werk

Dit zijn de waarden van het massaverlies gevonden uit de eerste staalname na 39 dagen onderdompeling. Direct valt op dat er 3 dieptes gelijkaardige massaverlies ondergingen, en dat de waardes bij B-10 hoger liggen.

Het massaverlies bij 8K (8 meter vanop de vaste kaai) varieert tussen 0,94 en 1,06 gram. Het gemiddelde van de 3 waarden is 1,01 gram met een standaardfout van 0,04.

Het massaverlies bij 10K (10 meter vanop de vaste kaai) varieert tussen 0,90 en 1,01 gram. Het gemiddelde van de 3 waarden is 0,96 gram met een standaardfout van 0,03.

Het massaverlies bij B-10 (10 decimeter boven de bodem) varieert tussen 1,21 en 1,39 gram. Het gemiddelde van de 3 waarden is 1,27 gram met een standaardfout van 0,06. Het massaverlies bij B (op de bodem) varieert tussen 0,90 en 1,01 gram. Het gemiddelde van de 3 waarden is 0,95 gram met een standaardfout van 0,03. Het verloop van de massaverliezen is zichtbaar gemaakt in Figuur 36.

ANOVA-test: $F = 13,28$ en $\Pr(>F) = 0,002$

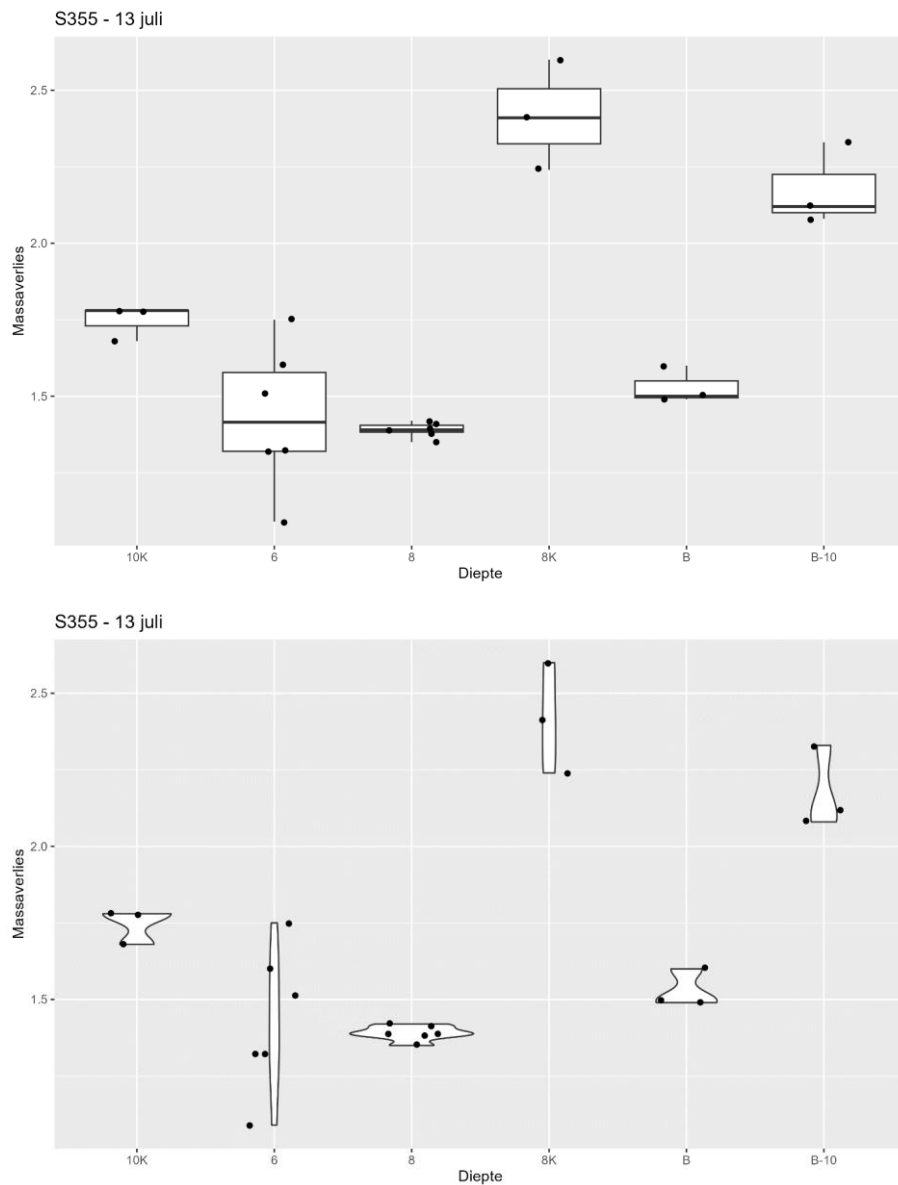
De ANOVA-test geeft aan door de hoge waarde van F en de lage p -waarde ($0,002 < 0,05$) dat er wel degelijk een significant verschil is tussen de gemiddelden van de gegevens, dus dat er een significant verschil is in (gemiddeld) massaverlies tussen de verschillende dieptes.

Tabel 11: ANOVA-test S 355 na 39 dagen

Diepte	p-waarde
8K $\leftrightarrow$ 10K	0,830
B $\leftrightarrow$ 10K	0,998
B-10 $\leftrightarrow$ 10K	0,003
B $\leftrightarrow$ 8K	0,744
B-10 $\leftrightarrow$ 8K	0,009
B-10 $\leftrightarrow$ B	0,003

Bij het vergelijken van de verschillende combinaties, zijn er 3 p -waarden lager dan 0,05.

Dit betekent dat bij deze waarden het verschil tussen de gemiddeldes significant is. Dit is niet toevallig bij elke vergelijking met de diepte B-10. B-10 verschilt dus significant van 8K, 10K en B.



Figuur 42: Massaverlies Grade S 355 na 134 dagen

Bron: eigen werk

Dit zijn de waarden van het massaverlies gevonden uit de tweede staalname na 134 dagen. Hier komen de dieptes '6' en '8' mee in de grafieken, deze worden hier niet besproken, maar worden wel gebruikt in 8.4.

Het massaverlies bij 8K meter varieert tussen 2,24 en 2,60 gram. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 2,42 gram met een standaardfout van 0,11.

Het massaverlies bij 10K varieert tussen 1,68 en 1,78 gram. Het gemiddelde van de 3 waarden is 1,75 gram met een standaardfout van 0,03.

Het massaverlies bij B-10 varieert tussen 2,08 en 2,33 gram. Het gemiddelde van de 3 waarden is 2,08 gram met een standaardfout van 0,08.

Het massaverlies bij B varieert tussen 1,49 en 1,60 gram. Het gemiddelde van de 3 waarden is 1,53 gram met een standaardfout van 0,04.

Hier valt op dat opnieuw B-10 hoge waardes heeft, maar ook 8K.

ANOVA-test: $F = 30,23$ en $\Pr(>F) = 3,71 \cdot 10^{-8}$

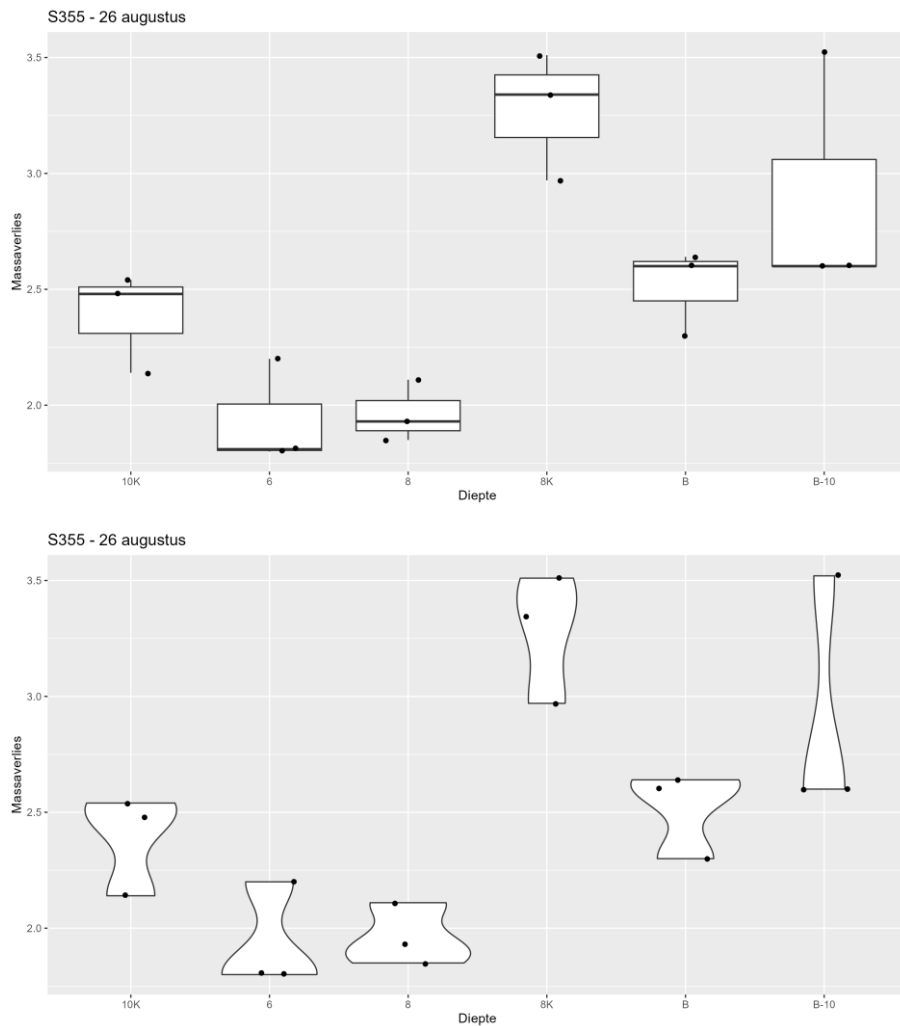
De ANOVA-test geeft aan door de hoge waarde van F en de lage p-waarde (bijna 0) dat er wel degelijk een significant verschil is tussen de gemiddelden van de gegevens, dus dat er een significant verschil is in (gemiddeld) massaverlies tussen de verschillende dieptes.

Tabel 12: ANOVA-test S 355 na 134 dagen

Diepte	p-waarde
8K ↔ 10K	0,001
B ↔ 10K	0.496
B-10 ↔ 10K	0,023
B ↔ 8K	0,001
B-10 ↔ 8K	0.389
B-10 ↔ B	0,001

Bij het vergelijken van de verschillende combinaties, zijn er 4 p-waarden lager dan 0,05.

Dit is ook wat uit de boxplots bleek, B-10 en 8K zijn significant verschillend van 10K en B, maar niet van elkaar.



Figuur 43: Massaverlies Grade S 355 na 151 dagen

Bron: eigen werk

Dit zijn de waarden van het massaverlies gevonden uit de tweede staalname na 151 dagen.

Het massaverlies bij 8K meter varieert tussen 2,97 en 3,51 gram. Het gemiddelde van deze 3 waarden is 3,27 gram met een standaardfout van 0,16.

Het massaverlies bij 10K varieert tussen 2,14 en 2,54 gram. Het gemiddelde van de 3 waarden is 2,39 gram met een standaardfout van 0,12.

Het massaverlies bij B-10 varieert tussen 2,60 en 3,52 gram. Het gemiddelde van de 3 waarden is 2,91 gram met een standaardfout van 0,31.

Het massaverlies bij B varieert tussen 2,30 en 2,64 gram. Het gemiddelde van de 3 waarden is 2,51 gram met een standaardfout van 0,11.

Hier valt op dat opnieuw 8K en B-10 hoge waardes heeft.

ANOVA-test: $F = 9,769$ en $\Pr(>F) = 0,001$

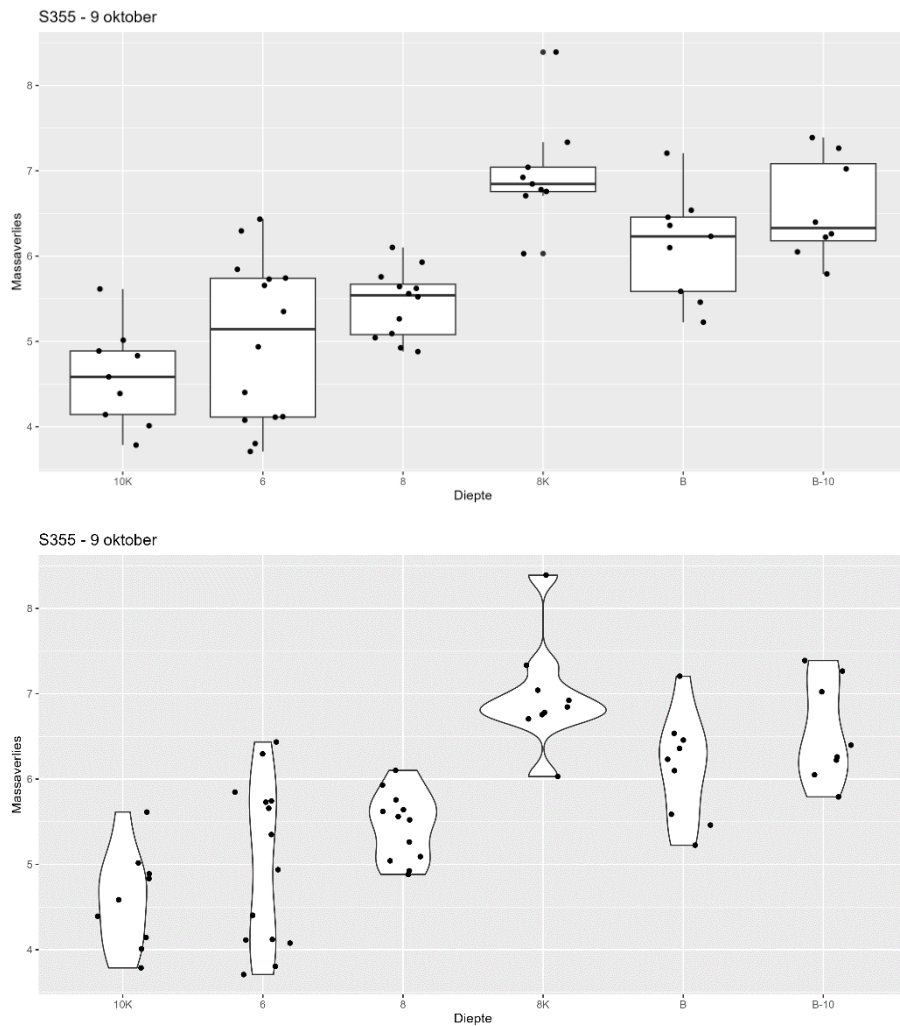
De ANOVA-test geeft aan door de hoge waarde van F en de lage p-waarde ($0,000 < 0,05$) dat er wel degelijk een significant verschil is tussen de gemiddelden van de gegevens, dus dat er een significant verschil is in (gemiddeld) massaverlies tussen de verschillende dieptes.

Tabel 13: ANOVA-test S 355 na 151 dagen

Diepte	p-waarde
8K ↔ 10K	0,027
B ↔ 10K	0,994
B-10 ↔ 10K	0,311
B ↔ 8K	0,066
B-10 ↔ 8K	0,647
B-10 ↔ B	0,583

Bij het vergelijken van de verschillende combinaties, zijn er 1 p-waarde lager dan 0,05.

8K verschilt dus significant met 10K, maar met geen van de andere dieptes. Ook verschillende de andere dieptes niet significant van elkaar.



Figuur 44: Massaverlies Grade S 355 na 559 dagen

Bron: eigen werk

Dit zijn de waarden van het massaverlies gevonden uit de tweede staalname na 559 dagen.

Het massaverlies bij 8K meter varieert tussen 6,03 en 8,39 gram. Het gemiddelde van deze 9 waarden is 6,98 gram met een standaardfout van 0,37.

Het massaverlies bij 10K varieert tussen 4,01 en 5,61 gram. Het gemiddelde van de 9 waarden is 4,59 gram met een standaardfout van 0,33.

Het massaverlies bij B-10 varieert tussen 5,79 en 7,39 gram. Het gemiddelde van de 9 waarden is 6,55 gram met een standaardfout van 0,34.

Het massaverlies bij B varieert tussen 5,22 en 7,21 gram. Het gemiddelde van de 3 waarden is 2,51 gram met een standaardfout van 0,11.

ANOVA-test: $F = 17,85$ en $\Pr(>F) = 1,78 \cdot 10^{-10}$

De ANOVA-test geeft aan door de hoge waarde van F en de lage p -waarde (bijna 0) dat er wel degelijk een significant verschil is tussen de gemiddelden van de gegevens, dus dat er een significant verschil is in (gemiddeld) massaverlies tussen de verschillende dieptes.

Tabel 14: ANOVA-test S 355 na 559 dagen

Diepte	p-waarde
8K $\leftrightarrow$ 10K	0,000
B $\leftrightarrow$ 10K	0,001
B-10 $\leftrightarrow$ 10K	0,001
B $\leftrightarrow$ 8K	0,098
B-10 $\leftrightarrow$ 8K	0,779
B-10 $\leftrightarrow$ B	0,793

Bij het vergelijken van de verschillende combinaties, zijn er 3 p -waarde lager dan 0,05.

Hier is 10K significant verschillend van de andere dieptes.

8.4 Vergelijking Grade A en S 355 op gelijkaardige dieptes

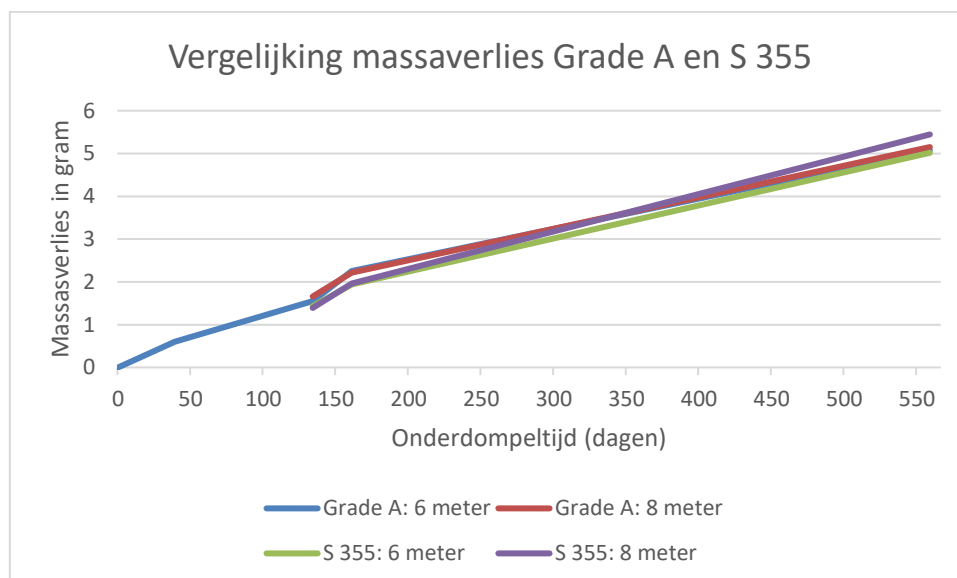
Gezien er plaatjes ophingen van zowel Grade A als S 355 op 6 en 8 meter van de kaai, is het interessant de corrosiesnelheden van beide metalen te vergelijken. De plaatjes hingen in dezelfde omgeving en waren even lang ondergedompeld.

Figuur 45 en Figuur 46 geven respectievelijk het massaverlies en de corrosiesnelheden van de beide metalen weer. Hoewel hier geen ANOVA-test op gedaan is, is wel duidelijk dat de beide metalen bij de beide dieptes een zeer gelijkaardig corrosiekarakter hebben ondergaan. Dit bevestigt dus de bevindingen gevonden in Hoofdstuk 8, waarbij gesteld werd dat de diepte geen invloed heeft op de corrosiesnelheid.

Tabel 15: vergelijking Grade A en S 355 op gelijkaardige dieptes

Bron: eigen werk

	Grade A 39 dagen	S 355 39 dagen	Grade A 134 dagen	S 355 134 dagen	Grade A 161 dagen	S 355 161 dagen	Grade A 559 dagen	S 355 559 dagen
6 meter	0,60± 0,03	/	1,55± 0,03	1,43± 0,10	2,26± 0,07	1,94± 0,13	5,07± 0,49	5,02± 0,55
8 meter	/	/	1,66± 0,10	1,39± 0,01	2,21± 0,10	1,96± 0,08	5,15± 0,18	5,45± 0,23



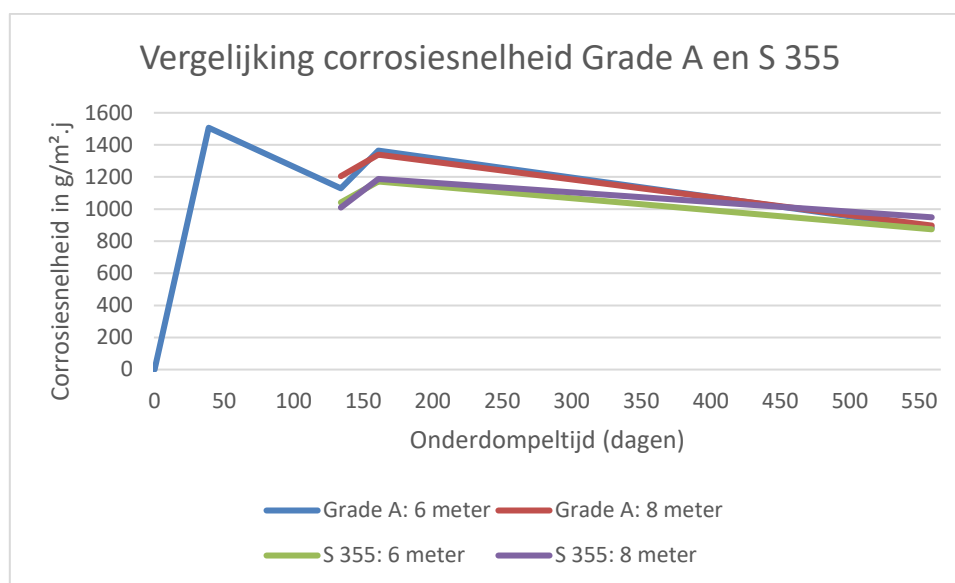
Figuur 45: vergelijking massaverlies Grade A en S 355 op gelijkaardige dieptes

Bron: eigen werk

Tabel 16: vergelijking corrosiesnelheden Grade A en S 355 op gelijkaardige dieptes

Bron: eigen werk

	Grade A 39 dagen	S 355 39 dagen	Grade A 134 dagen	S 355 134 dagen	Grade A 161 dagen	S 355 161 dagen	Grade A 559 dagen	S 355 559 dagen
6 meter	1506,9± 84,5	/	1129,1± 25,6	1040,7± 69,9	1365,3± 40,5	1171,7± 79,7	883,7± 84,9	874,0± 948,8
8 meter	/	/	1205,5± 75,9	1010,4± 7,3	1339,1± 21,1	1187,8± 46,5	897,4± 31,7	96,5± 40,2



Figuur 46: Vergelijking corrosiesnelheden Grade A en S 355 op gelijkaardige dieptes

Bron: eigen werk

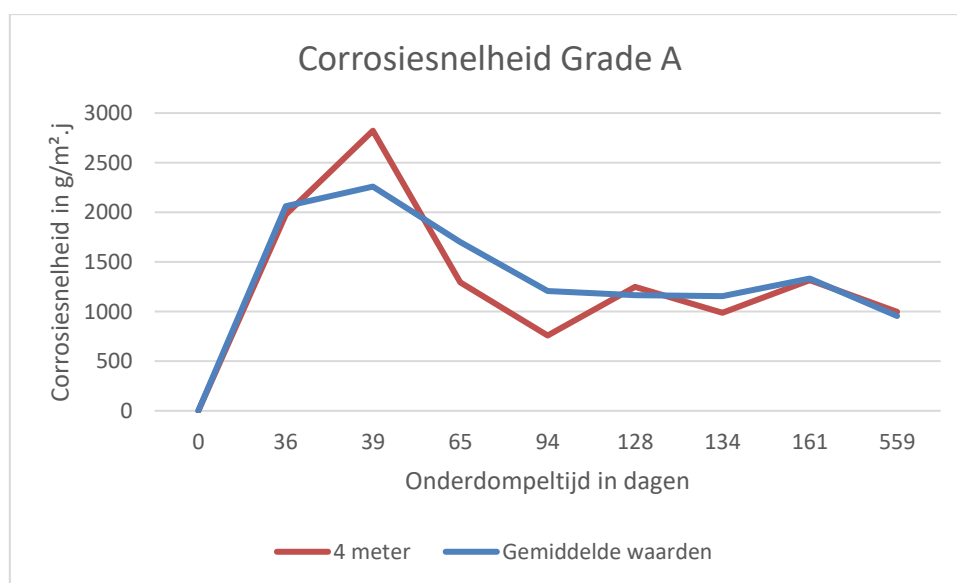
8.5 Vergelijking onderzoek in Oostende en Vlissingen

De waarden en bevindingen die in het gelijkaardig onderzoek in Oostende (Willems, 2021) gevonden zijn, kunnen worden vergeleken met die in Vlissingen. De testplaatjes hingen in Oostende weliswaar veel minder diep dan in Vlissingen, maar alsnog kan vergeleken worden of de bevindingen die Willems (2021) had nog steek houden als de data van Vlissingen naast die date gelegd worden en vergeleken worden, het zijn immers extra gegevens die meer informatie kunnen geven. De waarden in het cursief in Tabel 17 komen uit het onderzoek van Willems (2021).

Tabel 17: Corrosiesnelheid Grade A: Oostende en Vlissingen

Bron: Willems (2021) en eigen werk

Grade A	36 dagen	39 dagen	65 dagen	94 dagen	128 dagen	134 dagen	161 dagen	559 dagen
1 meter	2483,9		2231,5	1338,7	1084,0			
2 meter	1757,0		1660,9	1465,5	1314,3			
3 meter	2032,9		1620,1	1264,7	1006,4			
4 meter	1977,7	2822,3	1294,1	757,4	1249,6	986,2	1316,9	996,7
6 meter		1506,9				1129,1	1365,3	883,7
8 meter						1205,5	1339,1	897,4
10 meter						1169,1	1274,6	1056,3
12 meter		2447,7				1293,9	1369,3	951,1
Gemiddelde	2062,9	2259,0	1701,7	1206,6	1163,6	1156,8	1333,0	957,0



Figuur 47: Corrosiesnelheid Grade A: Oostende + Vlissingen

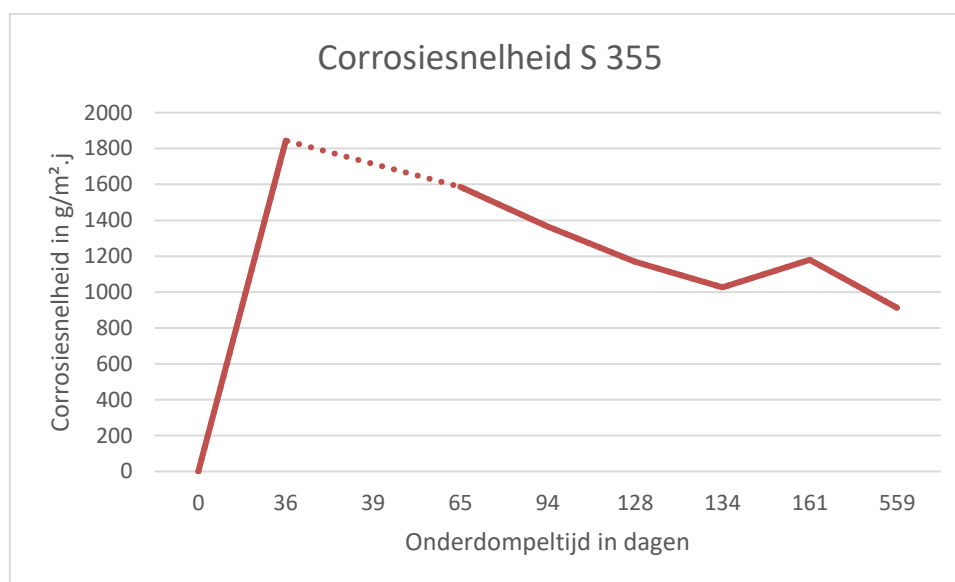
Bron: Willems (2021) en eigen werk

In Figuur 47 is te zien dat zowel de waarden op 4 meter diepte als de gemiddelde waarden van alle dieptes naar een ongeveer gelijke waarde evolueren. Dit bevestigt dus het vermoeden dat de diepte geen invloed heeft op de corrosiesnelheid. Figuur 47 toont de waarden van Grade A, waar Figuur 48 de waarden geeft van S 355. Hoewel hier minder getest is in Vlissingen, evolueert ook deze waarde naar een corrosiesnelheid bijna gelijk aan die van Grade A (rond de 1000 g/m²j). Dit bevestigt dus de bevindingen gevonden in Hoofdstuk 8, waarbij gesteld werd dat de diepte geen invloed heeft op de corrosiesnelheid.

Tabel 18: Corrosiesnelheid S 355: Oostende en Vlissingen

Bron: Willems (2021) en eigen werk

S 355	36 dagen	39 dagen	65 dagen	94 dagen	128 dagen	134 dagen	161 dagen	559 dagen
1 meter	1867,4		1885,0	1606,5	1562,6			
2 meter	2437,7		1839,2	1377,5	1112,5			
3 meter	1471,8		1345,0	1018,1	830,5			
4 meter	1600,6		1278,8	1462,0	1169,4			
6 meter						1040,7	1171,7	874,0
8 meter						1010,4	1187,8	948,8
Gemiddelde								



Figuur 48: Corrosiesnelheid S 355: Oostende + Vlissingen

Bron: Willems (2021) en eigen werk

9 Conclusie en discussie

Het doel van dit onderzoek was een antwoord te geven op de vraag of de diepte een invloed heeft op de corrosiesnelheid. Bij beide metalen is gebleken dat dit niet het geval is, althans onder de omstandigheden die er in Vlissingen heersen. Hoewel de omstandigheden in Oostende niet dezelfde waren, kwam Willems in 2021 ook tot een gelijke conclusie in haar onderzoek dat tot 4 meter diep testte. Zij voorspelde in haar discussie echter andere resultaten in Vlissingen, gezien daar grotere dieptes mogelijk waren en er ook dynamisch getest zou worden. Die voorspelling blijken dus niet correct te zijn, gezien ook in Vlissingen de waterdiepte geen significante invloed heeft op de corrosiesnelheid. Het was dus zeker interessant beide onderzoeken met elkaar te vergelijken.

Eens volledig ondergedompeld lijkt het corrosieproces blijkbaar gelijk te zijn voor alle plaatjes. Nochtans spreekt men in de literatuur vaak over het ontstaan van corrosie ter hoogte van de waterlijn. Het niet constant ondergedompeld zijn creëert een constant veranderende omgeving met een steeds wisselde blootstelling aan zeewater en zuurstof. Dit werd in Vlissingen dan wel gesimuleerd door plaatjes te laten droogvallen door het getij, maar het gewenste resultaat is hiermee niet bereikt. Een getijdengolf is door haar langere periode niet te vergelijken met het passeren van kleine golven langs de waterlijn en het creëren van opspattend water en het creëren van natte plekken op de scheepsromp.

Het blijft dus belangrijk onderzoek te doen naar corrosie en vooral om te blijven zoeken naar nieuwe testmethodes. De ASTM-standaarden bieden dan wel een goede start en goede richtlijnen, maar het zijn niet altijd de beste methodes om aan diepgaand onderzoek te doen.

Bibliografie

- Abdoel, H. M., Broeken, M. L., & Pacejka, H. (2011). *VK0805 Calamiteitensteiger Vlissingen.pdf—Alle documenten*. Gemeente Rotterdam.
- Adams, J. (2010, augustus 23). *Chlorophyll F, a newly discovered photosynthetic pigment uses infrared light*. <https://reefbuilders.com/2010/08/23/chlorophyll-f-a-newly-discovered-photosynthetic-pigment-uses-infrared-light/>
- Adamson, L., & Brown, N. (2002). *Anti-fouling systems*. International Maritime Organization.
- ASTM. (1999). *ASTM G1-90, Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*.
- ASTM G31. (2004). *Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*. ASTM.
- Balqadi, A. A., Salama, A. J. S., & Satheesh, S. (2017). Microfouling development on artificial substrates deployed in the central Red Sea. *ScienceDirect*.
<https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.10.006>
- Bardal, E. (2004). *Corrosion and Protection*. Springer.
- Benigar, E., Dogsa, I., Stopar, D., Jamnik, A., Cigić, I. K., & Tomšič, M. (2014). Structure and Dynamics of a Polysaccharide Matrix: Aqueous Solutions of Bacterial Levan. *Langmuir*, 30(14), 4172-4182. <https://doi.org/10.1021/la500830j>
- Berendsen, A. (1998). Ship Painting: Current Practice and Systems in Europe. *PCE Magazine*, September 1998, 33.
- BIPM. (2019). *The international System of units (SI)*. Bureau International des Poids et Mesures.
- Callow, M. E., & Callow, J. A. (2002). Marine biofouling: A sticky problem. *Marine Biofouling*, 49(1), 5.
- Chambers, L. D., Stokes, K. R., Walsh, F. C., & Wood, R. J. K. (2006). Modern approaches to marine antifouling coatings. *Coatings Technology*, 2. <https://doi.org/10.1016>

- Common Hull Fouling Invasive Species*. (z.d.). Geraadpleegd 26 april 2021, van <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Common-Hull-Fouling-Invasive-Species.aspx>
- Corrosion—Latest research and news | Nature*. (z.d.). Geraadpleegd 26 april 2021, van <https://www.nature.com/subjects/corrosion>
- De Meyer, E. (2019). *De antifoulingactiviteit van scheepsverven* [Thesis]. Hogere Zeevaartschool Antwerpen.
- Definition of ANTIFOULING*. (z.d.). Geraadpleegd 27 april 2021, van <https://www.merriam-webster.com/dictionary/antifouling>
- Deshler, A. A. (2018). *Biofouling impacts on the environment and ship energy efficiency*. World Maritime University.
- Devree, J. (2004). *S 355 European Standard Steel*.
- EonCoat. (2023). *The Problem of Flash Rust in the Oil & Gas Industry*. <https://eoncoat.com/the-problem-of-flash-rust-in-the-oil-gas-industry/>
- Flemming, H.-C., & Ridgway, H. (2009). Biofilm Control: Conventional and Alternative Approaches. In H.-C. Flemming, P. S. Murthy, R. Venkatesan, & K. Cooksey (Red.), *Marine and Industrial Biofouling* (pp. 103-117). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69796-1_5
- Fundamentals of Environmental Measurements. (2014, oktober 22). *Algae, Phytoplankton and Chlorophyll*. Environmental Measurement Systems. <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/algae-phytoplankton-chlorophyll/>
- Gellings, P. J. (2006). *Inleiding tot Corrosie en Corrosiebestrijding*.
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the Elements* (2de dr.). Butterworth-Heinemann.

Haziful, I. (2019). *Photo of the biofouled buoi in Rio de Janeiro—Brazil*.

https://www.researchgate.net/figure/PHOTO-OF-THE-BIOFOULED-BUOY-IN-RIO-DE-JANEIRO-BRAZIL-IN-APRIL-2019-THE-FOULING_fig2_343788598

Heylbroeck, B. (2021). *Corrosie* [Syllabus].

Hunsucker, K. (2017, april 1). *The slime and grime that stick to ships*.

<https://www.asbmb.org/asbmb-today/science/040117/the-slime-and-grime-that-stick-to-ships>

Hurd, C., Harrison, P. J., Bischof, K., & Lobban, C. (2014). *Seaweed Ecology and Physiology*.

IMO. (2004). *2004 International convention for the control and management of ships' ballast water and sediments*.

Inerte gassen—Definitie—Encyclo. (z.d.). Geraadpleegd 27 april 2021, van

https://www.encyclo.nl/begrip/inerte_gassen

Jonsson, P. R., Wrangé, A.-L., Lind, U., Abramova, A., Ogemark, M., & Blomberg, A. (2018).

The Barnacle *Balanus improvisus* as a Marine Model—Culturing and Gene Expression. *Journal of Visualized Experiments*, 11. <https://doi.org/10.3791/57825>

Kaiser, M. J., Attrill, M. J., Jennings, S., Thomas, D., Barnes, D. K. A., Brierley, A. S., Graham, N. A., Hiddink, J. G., Howell, K., & Kaartokallio, H. (2011). *Marine ecology: Processes, systems and Impacts*. 2.

Kool, R. (2021). Bryozoa. In *Simple English Wikipedia, the free encyclopedia*.

[http://www.kooltiel.nl/Pagina's/Duiken/Leven%20onder%20water/Biologie%20in%20Be](http://www.kooltiel.nl/Pagina's/Duiken/Leven%20onder%20water/Biologie%20in%20Beldert/Extra%20pagina/soort%20groot%20mosdiertje.html)
[ldert/Extra%20pagina/soort%20groot%20mosdiertje.html](http://www.kooltiel.nl/Pagina's/Duiken/Leven%20onder%20water/Biologie%20in%20Be)

Lide, D. R. (1996). *CRC Handbook of Chemistry and Physics: Special Student Edition (77th edition)* (77ste dr.).

Lide, D. R., Baysinger, G., Chemistry, S., Berger, L. I., Goldberg, R. N., & Kehiaian, H. V. (2005). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 2661.

- Lopez-Ortega, A., Bayon, R., & Arana, J. L. (2019). *Evaluation of Protective Coatings for High-Corrosivity Category Atmospheres in Offshore Applications*. 12(8).
<https://doi.org/10.3390/ma12081325>
- Lurling, M. (2013, juli 31). *Wat zijn blauwalgen?* <https://www.wur.nl/nl/show/Wat-zijn-blauwalgen.htm>
- Maréchal, J.-P., & Hellio, C. (2009). Challenges for the development of New Non-toxic Antifouling solutions. *International Journal of Molecular Sciences*, 10(11), 4623-4627.
<https://doi.org/10.3390>
- Marion, G. M., Millero, F. J., Camões, M. F., Spitzer, P., Feistel, R., & Chen, C.-T. A. (2011). pH of seawater. *Marine Chemistry*, 126(1), 89-95.
<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2011.04.002>
- McKeen, L. W. M. (2006). *The Handbook of Fluorinated Coatings and Finishes: The Definitive User's Guide*.
- McKinnon, D. (2008, maart 20). *ASTM Letter Designations—Portland Bolt*.
<https://www.portlandbolt.com/technical/faqs/astm-letter-designations/>,
<https://www.portlandbolt.com/technical/faqs/astm-letter-designations/>
- Nautin. (2022, juli 21). *LAT of NAP*. Nederlandstalige handleiding.
<https://www.nautin.nl/handleidingen/opencpn/LATofNAP.html>
- Navitec. (2021). *Stappenplan bordes*. Navitec.
- New Paints Prevent Fouling of Ships' Hulls*. (2012, juli 2).
<https://www.pcimag.com/articles/96647-new-paints-prevent-fouling-of-ships--hulls?v=preview>
- NOAA. (2020). *NTDE - NOAA Tides & Currents*. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/datum-updates/ntde/>
- Oceano. (2012). *Open Ocean*. Oceana. <https://oceana.org/marine-life/marine-science-and-ecosystems/open-ocean>

- PIANC. (2004). *Inspection, Maintenance and Repair of Maritime Structures Exposed to Damage and Material Degradation caused by a Salt Water Environment*.
- Ramos, G., van Geffen, G., & Van Horebeek, R. (2023). *Corrosieanalyse van S355, S235 en 316L staal in een havenomgeving* [Masterthesis]. Antwerp Maritime Academy.
- Schwaha, T., Hirose, M., & Wanninger, A. (2016). The life of the freshwater bryozoan *Stephanella hina* (Bryozoa, Phylactolaemata)—A crucial key to elucidating bryozoan evolution. *Zoological Letters*, 2(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s40851-016-0060-5>
- SOCORRO. (2023). *SOCORRO* | Antwerp Maritime Academy.
<https://amacademy.be/nl/project/socorro>
- Toleti, S. R. (2012). *Operational and Environmental Consequences of Large Industrial Cooling Water Systems*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1698-2_6
- US Department of Commerce, N. O. and A. A. (z.d.). *What are phytoplankton?* Geraadpleegd 27 april 2021, van <https://oceanservice.noaa.gov/facts/phyto.html>
- Verstraelen, H., De Baere, K., & Potters, G. (2010). *Het schip gaat zolang te water tot het doorroest*. VLIZ, Antwerpen.
- Videla, H. A. (1989). Biological Corrosion and Biofilm Effects on Metal Biodeterioration. *Biodeteriation Research*, 2, 39-50.
- Vlaamse Hydrografie. (2022). *Getijtafels 2022*. Vlaamse Hydrografie.
- VLIZ. (2012). *Wat is eutrofiëring?* <http://www.vliz.be/projects/iseca/nl/2012-09-20-09-08-30/2012-09-20-09-07-43.html>
- Wahl, M. (1989). Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: Some basic aspects. *Marine Ecology Progress Series*, 58, 175-189. <https://doi.org/10.3354/meps058175>

Weemaes, J. (2020). *North Sea Port—Praktijklab Corrosie & Isolatie.pdf—Alle documenten*.

North Sea Port.

<https://hzsbe.sharepoint.com/sites/AMACORT/Gedeelde%20documenten/Forms/AllItems.aspx?id=%2Fsites%2FAMACORT%2FGedeelde%20documenten%2FScripties%2FRuige%2FNorth%20Sea%20Port%20%2D%20Praktijklab%20Corrosie%20%26%20Isolatie%2Epdf&parent=%2Fsites%2FAMACORT%2FGedeelde%20documenten%2FScripties%2FRuige>

Willems, S. (2021). *De verticale distributie van corrosie en fouling op scheepsrompen en damplanken*. Hogere Zeevaartschool Antwerpen.

Woods Hole Oceanographic Institution. (1952). *Marine fouling and its prevention*. United States Naval Institute, Annapolis, MD, U.S.A.

World Material. (2019, december 14). Material S355 Steel Properties, Equivalent Grade, EN 10025-2. *World Material*. <https://www.theworldmaterial.com/material-s355-steel-en-10025/>

Xu, J., Wenjie, Z., Peng, S., Zeng, Z., Zhang, X., Wu, X., & Xue, Q. (2014). Investigation of the biofouling properties of several algae on different textured chemical modified silicone surfaces. *Applied Surface Science*, 311, 703-708.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.140>

Yebra, D. M., Kiil, S., & Dam-Johansen, K. (2003). *Antifouling technology—Past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings*. Department of Chemical Engineering, Technical University Denmark.

Yuan, X., Salama, Mhd. S., & Su, Z. (2018). An observational perspective of sea surface salinity in the southwestern indian ocean and its role in the South Asia summer Monsoon. *Remote Sensing*, 10(12), 1930. <https://doi.org/10.3390/rs10121930>

Bijlagen

Bijlage 1. Stappenplan voor het opbouwen van het platform
 op de kaai



Stappenplan:

1. Bevestig de framedelen aan elkaar met 20x M12 bout.
Bevestig de steipoten aan het frame (6x), zodat het frame
→ 70mm vanaf de grond staat.
Bevestig rondom de frames M10 oogbouten naar eigen inzicht.
2. Bevestig de looproosters naar eigen inzicht met roosterklemmen.
3. Bevestig de zijwaartse steunen met 12x M12 bout.
Bevestig de steipoten (2x) op de uiteinden.
4. Bevestig de leuningen met 60x M12 bout.
5. Zet het bordes op de juiste plaats en zet het, indien mogelijk,
vast aan de grond om schuiven te voorkomen.
Leg de contragewichten in de daarvoor bestemde vakken.

22	18	Stelvoet Ø100 - M20	RVS 316L	1,9 kg		MS1101-Ø7-01-30006
22	10	Plaat 15 mm	S235JR	10,2 kg		MS1101-Ø7-01-30005
20	15	Plaat 15 mm	S235JR	20,4 kg		MS1101-Ø7-01-30004
19	1	Rocofer 695x595	Kunststof	6,5 kg		MS1101-Ø7-01-30003
6	1	Rocofer 995x595	Kunststof	7,2 kg		MS1101-Ø7-01-30001
17	2	Leuning		7,4 kg		MS1101-Ø7-01-20111
16	2	Leuning		8,1 kg		MS1101-Ø7-01-20010
15	2	Leuning		6,1 kg		MS1101-Ø7-01-20009
14	1	Leuning		17,0 kg		MS1101-Ø7-01-20008
13	2	Steenbalk		3,4 kg		MS1101-Ø7-01-20007
12	1	Steenbalk		11,8 kg		MS1101-Ø7-01-20006
9	1	Steenbalk		11,8 kg		MS1101-Ø7-01-20005
10	1	Bordesvloer		32,1 kg		MS1101-Ø7-01-20004
9	1	Bordesvloer		23,1 kg		MS1101-Ø7-01-20003
8	1	Bordesvloer		23,1 kg		MS1101-Ø7-01-20002
7	1	Bordesvloer		28,9 kg		MS1101-Ø7-01-20001
6	16	Zeskantmoer	RVS A4-70	0,1 kg		DIN 934 - M20
5	92	Zeskantmoer	SL 8 Th.zv.	0,0 kg		DIN 934 - M12
4	92	Zeskantlapbout	SL 8,6 Th.zv.	0,1 kg		DIN 933 - M12 x 40
3	12	Verenig.	Verenig. Th.zv.	0,0 kg		DIN 932 - M12
2	16	Sluitring	RVS A4	0,1 kg		DIN 125 - A - M12
1	184	Sluitring	ST Th.zv.	0,0 kg		DIN 125 - A - M12
Sub.Nr.		Omschrijving	Materiaal	Gewicht	Opmerkingen	Tekening nr.



Parqueweg 4 Tel. +31 (0) 113 - 695552 E-mail info@marino-systems.nl
4602 HF Goes Website www.marino-systems.nl

[Home](#)
[About Us](#)
[Contact Us](#)
[Privacy Policy](#)
[Terms of Service](#)

Navitec

MS1101P07

+ Mobil borders

© 2000 Blackwell Science Ltd

Overzicht

Schaal:	1 : 20	
Formaat:	A1	
W/schaalheid:	mm	

Massa:	0/0,0 kg
--------	----------

Engineering: FL	Date: 16-12-2021
-----------------	------------------

Geleken:	FL	Datum:	31-1-2022
Gesien:	RvD	Datum:	1-3-2022

Bladent:	2	Blad nr.: 2
----------	---	-------------

State: **MISSISSIPPI**

VOOR UITVOERING

Teilnehmer nr.:	Beurteilung:
-----------------	--------------

MS1101-07-01-15001

MS1101-07-01-15001

Bijlage 2. Afmetingen en benodigde gewichten van het platform op de kaai

Bijlage 3. R-script

```
library(readxl)
library(ggplot2)
library(DescTools)

dataset <- read_excel("DataRVVlissingen.xlsx", sheet = "S 355 26 augustus")

ggplot(dataset, aes(x = diepte, y = massaverlies)) +
  geom_boxplot() + geom_jitter(width = 0.2) +
  labs(x = "Diepte", y = "Massaverlies") +
  ggtitle("S355 - 26 augustus")
ggsave("S355 - 26 augustus - boxplot.png")

ggplot(dataset, aes(x = diepte, y = massaverlies)) +
  geom_violin() + geom_jitter(width = 0.2) +
  labs(x = "Diepte", y = "Massaverlies") +
  ggtitle("S355 - 26 augustus")
ggsave("S355 - 26 augustus - violin.png")

# ONE-WAY ANOVA
# -----
one.way <- aov(massaverlies ~ diepte, data = dataset)
summary(one.way)
TukeyHSD(one.way)

#check 1 - Homogeneity of variances
plot(one.way, 1)
LeveneTest(massaverlies ~ diepte, data = dataset)

#check 2 - Normality
plot(one.way, 2)

# KRUSKAL-WALLIS NON-PARAMETRIC
# -----
kruskal.test(massaverlies ~ diepte, data = dataset)
pairwise.wilcox.test(dataset$massaverlies, dataset$diepte,
                      p.adjust.method = "BH")
```

Bijlage 4. Overzicht rekken

0021620

0023081	0023080	0023079	105366	105365	105364
0023078	0023077	0023076	105363	105362	105361
0023075	0023074	0023073	105360	105359	105358
0023072	0023071	0023070	105357	105356	105355
0023069	0023068	0023067	105354	105353	105352
0023066	0023065	0023064	105351	105350	105349
0023063	0023062	0023061	105348	105347	105346
0023060	0023059	0023058	105345	105344	105343
0023057	0023056	0023055	105342	105341	105340

982860

0021621

0023135	0023134	0023133	105338	105337	105336
0023132	0023131	0023130	105335	105334	105333
0023129	0023128	0023127	105332	105331	105330
0023126	0023125	0023124	105329	105328	105327
0023123	0023122	0023121	105326	105325	105324
0023120	0023119	0023118	105323	105322	105321
0023117	0023116	0023115	105320	105319	105318
0023114	0023113	0023112	105317	105316	105315
0023111	0023110	0023109	105314	105313	105312

982861

0021622

976647	976646	976645	105257	105256	105255
976644	976643	976642	105254	105253	105252
976641	976640	976639	105251	105250	105249
976638	976637	976636	105248	105247	105246
976635	976634	976633	105245	105244	105243
976632	976631	976630	105242	105241	105240
976629	976628	976627	105239	105238	105237
976626	976625	976624	105236	105235	105234
976623	976622	976621	105233	105232	105231

982862

0021623

0023054	0023053	0023052	105284	105283	105282
0023051	0023050	0023049	105281	105280	105279
0023048	0023047	0023046	105278	105277	105276
0023045	0023044	0023043	105275	105274	105273
0023042	0023041	0023040	105272	105271	105270
0023039	0023038	0023037	105269	105268	105267
0023036	0023035	0023034	105266	105265	105264
0023033	0023032	0023031	105263	105262	105261
0023030	0023029	0023028	105260	105259	105258

982863

0021624

0023027	0023026	0023025
0023024	0023023	0023022
0023021	0023020	0023019
0023018	0023017	0023016
0023015	0023014	0023013
0023012	0023011	0023010
0023009	0023008	0023007
0023006	0023005	0023004
0023003	0023002	0023001

982864

105311	105310	105309
105308	105307	105306
105305	105304	105303
105302	105301	105300
105299	105298	105297
105296	105295	105294
105293	105292	105291
105290	105289	105288
105287	105286	105285

0021625

0023108	0023107	0023106
0023105	0023104	0023103
0023102	0023101	0023100
0023099	0023098	0023097
0023096	0023095	0023094
0023093	0023092	0023091
0023090	0023089	0023088
0023087	0023086	0023085
0023084	0023083	0023082

982865

801374	801373	801372
801371	801370	801369
801368	801367	801366
801365	801364	801363
801362	801361	801360
801359	801358	801357
801356	801355	801354
801353	801352	801351
801350	801349	801348

0021626

976728	976727	976726
976725	976724	976723
976722	976721	976720
976719	976718	976717
976716	976715	976714
976713	976712	976711
976710	976709	976708
976707	976706	976705
976704	976703	976702

982866

801428	801427	801426
801425	801424	801423
801422	801421	801420
801419	801418	801417
801416	801415	801414
801413	801412	801411
801410	801409	801408
801407	801406	801405
801404	801403	801402

0021628

976755	976754	976753
976752	976751	976750
976749	976748	976747
976746	976745	976744
976743	976742	976741
976740	976739	976738
976737	976736	976735
976734	976733	976732
976731	976730	976729

982867

801347	801346	801345
801244	801343	801342
801141	801340	801339
801038	801337	801336
800935	801334	801333
800832	801331	801330
800729	801328	801327
800626	801325	801324
800523	801322	801321

0021629

976674	976673	976672
976671	976670	976669
976668	976667	976666

982868

801401	801400	801399
801398	801397	801396
801395	801394	801393

976665	976664	976663	801392	801391	801390
976662	976661	976660	801389	801388	801387
976659	976658	976657	801386	801385	801384
976656	976655	976654	801383	801382	801381
976653	976652	976651	801380	801379	801378
976650	976649	976648	801377	801376	801375

0021630

976807	976806	976805
976804	976803	976802
976801	976800	976799
976798	976797	976796
976795	976794	976793
976792	976791	976790
976789	976788	976787
976786	976785	976784
976783	976782	976781

982871

801787	801876	801785
801784	801783	801782
801781	801690	801779
801778	801597	801776
801775	801504	801773
801772	801411	801770
801769	801318	801767
801766	801225	801764
801763	801132	801761

Bijlage 5. Berekeningen massa- en volumeverlies

Grade A

Plaatnummer	diepte (m)	startgewicht (g)	gewicht 7 mei (g)	Gewichtsverlies (g)	gemiddeld gewichtsverlies (g)	Standaardfout (g)
0023085	4	35,84	34,30	1,54		
0023086	4	35,84	35,02	0,82	1,13	0,213775583
0023087	4	35,84	34,81	1,03		
0023130	6	35,84	35,17	0,67		
0023131	6	35,84	35,26	0,58	0,60	0,033829639
0023132	6	35,84	35,28	0,56		
0023076	12	35,84	34,91	0,93		
0023077	12	35,84	34,76	1,08	0,98	0,05
0023078	12	35,84	34,91	0,93		

Plaatnummer	diepte (m)	startgewicht (g)	gewicht 13 juli (g)	Gewichtsverlies (g)	gemiddeld gewichtsverlies (g)	Standaardfout (g)
0023088	4	35,84	34,22	1,62		
0023089	4	35,84	34,51	1,33	1,36	0,144952099
0023090	4	35,84	34,72	1,12		
0023127	6	35,84	34,30	1,54		
0023128	6	35,84	34,34	1,50	1,55	0,035276684
0023129	6	35,84	34,22	1,62		
0023019	8	35,84	34,21	1,63		
0023020	8	35,84	33,84	2,00	1,66	0,104416367
0023021	8	35,84	33,95	1,89		
0023022	8	35,84	34,44	1,40		
0023023	8	35,84	34,17	1,67		
0023024	8	35,84	34,48	1,36		
0023046	10	35,84	34,32	1,52		
0023047	10	35,84	34,26	1,58	1,61	0,055221775
0023048	10	35,84	34,13	1,71		
0023049	10	35,84	34,41	1,43		
0023050	10	35,84	34,24	1,60		
0023051	10	35,84	34,03	1,81		

Plaatnummer	diepte (m)	startgewicht (g)	gewicht 26 aug (g)	Gewichtsverlies (g)	gemiddeld gewichtsverlies (g)	Standaardfout (g)
0023091	4	35,84	33,68	2,16		
0023092	4	35,84	33,55	2,29	2,18	0,061191866
0023093	4	35,84	33,76	2,08		
0023124	6	35,84	33,69	2,15		
0023125	6	35,84	33,46	2,38	2,26	0,0669162
0023126	6	35,84	33,60	2,24		
0023016	8	35,84	33,57	2,27		
0023017	8	35,84	33,62	2,22	2,21	0,034801022
0023018	8	35,84	33,69	2,15		
0023043	10	35,84	33,59	2,25		
0023044	10	35,84	33,92	1,92	2,11	0,097695673
0023045	10	35,84	33,69	2,15		
0023070	12	35,84	33,42	2,42		
0023071	12	35,84	33,65	2,19	2,26	0,078386507
0023072	12	35,84	33,66	2,18		

Plaatnummer	diepte (m)	startgewicht (g)	gewicht 09 okt (g)	Gewichtsverlies (g)	gemiddeld gewichtsverlies (g)	Standaardfout (g)
0023094	4	35,84	29,55	6,29		
0023095	4	35,84	31,13	4,71	5,7191	0,426545836
0023096	4	35,84	30,77	5,07		
0023097	4	35,84	29,26	6,58		
0023098	4	35,84	29,55	6,29		
0023099	4	35,84	30,20	5,64		
0023100	4	35,84	29,89	5,95		
0023101	4	35,84	30,76	5,08		
0023102	4	35,84	30,29	5,55		
0023103	4	35,84	30,33	5,51		
0023104	4	35,84	28,74	7,10		
0023105	4	35,84	29,79	6,05		
0023106	4	35,84	30,96	4,88		
0023107	4	35,84	29,43	6,41		
0023108	4	35,84	31,16	4,68		
0023109	6	35,84	30,89	4,95		
0023110	6	35,84	30,11	5,73	5,0715	0,487286422
0023111	6	35,84	29,60	6,24		
0023112	6	35,84	30,54	5,30		
0023113	6	35,84	31,57	4,27		
0023114	6	35,84	29,46	6,38		
0023115	6	35,84	30,03	5,81		
0023116	6	35,84	30,79	5,05		
0023117	6	35,84	31,14	4,70		
0023118	6	35,84	29,72	6,12		
0023119	6	35,84	31,74	4,10		
0023120	6	35,84	32,03	3,81		
0023121	6	35,84	30,74	5,10		
0023122	6	35,84	31,35	4,49		
0023123	6	35,84	31,81	4,03		
		35,84				
0023001	8	35,84	30,93	4,91		
0023002	8	35,84	30,81	5,03	5,15	0,181778943
0023003	8	35,84	30,79	5,05		
0023004	8	35,84	30,49	5,35		
0023005	8	35,84	30,47	5,37		
0023006	8	35,84	31,29	4,55		
0023007	8	35,84	30,77	5,07		
0023008	8	35,84	30,89	4,95		
0023009	8	35,84	30,88	4,96		
0023010	8	35,84	30,69	5,15		
0023011	8	35,84	30,19	5,65		
0023012	8	35,84	31,05	4,80		
0023013	8	35,84	30,56	5,28		
0023014	8	35,84	30,38	5,46		
0023015	8	35,84	30,16	5,68		

0023028	10	35,84	30,75	5,09		
0023029	10	35,84	29,57	6,27	6,06	0,242048437
0023030	10	35,84	29,49	6,35		
0023031	10	35,84	29,88	5,96		
0023032	10	35,84	30,42	5,42		
0023033	10	35,84	29,49	6,35		
0023034	10	35,84	29,90	5,94		
0023035	10	35,84	29,54	6,30		
0023036	10	35,84	30,26	5,58		
0023037	10	35,84	29,61	6,23		
0023038	10	35,84	29,29	6,55		
0023039	10	35,84	29,84	6,00		
0023040	10	35,84	29,28	6,56		
0023041	10	35,84	29,53	6,31		
0023042	10	35,84	29,80	6,04		
0023055	12	35,84	30,25	5,59		
0023056	12	35,84	29,27	6,57	5,46	0,513312457
0023057	12	35,84	29,83	6,01		
0023058	12	35,84	30,15	5,69		
0023059	12	35,84	29,26	6,58		
0023060	12	35,84	29,23	6,61		
0023061	12	35,84	31,53	4,31		
0023062	12	35,84	30,62	5,22		
0023063	12	35,84	29,89	5,95		
0023064	12	35,84	31,53	4,31		
0023065	12	35,84	31,56	4,28		
0023066	12	35,84	31,54	4,30		
0023079	12	35,84	30,00	5,84		
0023080	12	35,84	29,82	6,02		
0023081	12	35,84	31,24	4,60		

39 dagen	gemiddelde corrosiesnelheid (gram/m ² .j)	standaardfout (g/m ² .j) (39)
4 meter	2822,31	533,93
6 meter	1506,89	84,49
8 meter		
10 meter		
12 meter	2447,66	124,88
134 dagen		
4 meter	986,19	105,37
6 meter	1129,15	25,64
8 meter	1205,47	75,90
10 meter	1169,13	40,14
12 meter	1293,91	223,93
161 dagen		
4 meter	1316,91	37,02
6 meter	1365,31	40,49
8 meter	1339,09	21,06
10 meter	1274,56	59,11
12 meter	1369,34	47,42
559 dagen		
4 meter	996,57	74,33
6 meter	883,72	84,91
8 meter	897,43	31,68
10 meter	1056,30	42,18
12 meter	951,11	89,45

S 355

Plaatnummer	diepte (m)	startgewicht (g)	gewicht 7 mei (g)	Gewichtsverlies (g)	gemiddeld gewichtsverlies (g)	Standaardfout (g)
801809	8K	36,05	35,03	1,02		
801810	8K	36,05	35,11	0,94	1,01	0,035276684
801811	8K	36,05	34,99	1,06		
801782	10K	36,05	35,15	0,90		
801783	10K	36,05	35,04	1,01	0,96	0,031797973
801784	10K	36,05	35,09	0,96		
801423	B-10	36,05	34,66	1,39		
801424	B-10	36,05	34,84	1,21	1,27	0,06
801425	B-10	36,05	34,84	1,21		
801378	B	36,05	35,04	1,01		
801379	B	36,05	35,15	0,90	0,95	0,032829526
801380	B	36,05	35,12	0,93		

Plaatnummer	diepte (m)	startgewicht (g)	gewicht 13 juli (g)	Gewichtsverlies (g)	gemiddeld gewichtsverlies (g)	Standaardfout (g)
801806	8K	36,05	33,45	2,60		
801807	8K	36,05	33,81	2,24	2,42	0,103976493
801808	8K	36,05	33,64	2,41		
801779	10K	36,05	34,37	1,68		
801780	10K	36,05	34,27	1,78	1,75	0,033333333
801781	10K	36,05	34,27	1,78		
801420	B-10	36,05	33,93	2,12		
801421	B-10	36,05	33,97	2,08	2,18	0,077531356
801422	B-10	36,05	33,72	2,33		
801381	B	36,05	34,45	1,60		
801382	B	36,05	34,56	1,49	1,53	0,035118846
801383	B	36,05	34,55	1,50		
801324	6	36,05	34,30	1,75		
801325	6	36,05	34,73	1,32	1,43	0,096174032
801326	6	36,05	34,96	1,09		
801327	6	36,05	34,45	1,60		
801328	6	36,05	34,54	1,51		
801329	6	36,05	34,73	1,32		
801354	8	36,05	34,70	1,35		
801355	8	36,05	34,67	1,38	1,39	0,01
801356	8	36,05	34,64	1,41		
801357	8	36,05	34,63	1,42		
801358	8	36,05	34,66	1,39		
801359	8	36,05	34,66	1,39		

Plaatnummer	diepte (m)	startgewicht (g)	gewicht 26 aug (g)	Gewichtsverlies (g)	gemiddeld gewichtsverlies (g)	Standaardfout (g)
801803	8K	36,05	32,71	3,34		
801804	8K	36,05	32,54	3,51	3,27	0,159408629
801805	8K	36,05	33,08	2,97		
801776	10K	36,05	33,57	2,48		
801777	10K	36,05	33,91	2,14	2,39	0,124543611
801778	10K	36,05	33,51	2,54		
801417	B-10	36,05	32,53	3,52		
801418	B-10	36,05	33,45	2,60	2,91	0,306666667
801419	B-10	36,05	33,45	2,60		
801384	B	36,05	33,45	2,60		
801385	B	36,05	33,75	2,30	2,51	0,107289846
801386	B	36,05	33,41	2,64		
801330	6	36,05	33,85	2,20		
801331	6	36,05	34,25	1,80	1,94	0,131698308
801332	6	36,05	34,24	1,81		
801360	8	36,05	34,20	1,85		
801361	8	36,05	33,94	2,11	1,96	0,076883751
801362	8	36,05	34,12	1,93		

Plaatnummer	diepte (m)	startgewicht (g)	gewicht 09 okt (g)	Gewichtsverlies (g)	gemiddeld gewichtsverlies (g)	Standaardfout (g)
801788	8K	36,05	29,13	6,92		
801789	8K	36,05	27,66	8,39	6,98	0,365663698
801790	8K	36,05	28,71	7,34		
801791	8K	36,05	29,20	6,85		
801792	8K	36,05	29,27	6,78		
801793	8K	36,05	30,02	6,03		
801794	8K	36,05	29,29	6,76		
801795	8K	36,05	29,01	7,04		
801796	8K	36,05	29,34	6,71		
801761	10K	36,05	31,66	4,39		
801762	10K	36,05	31,91	4,14	4,59	0,328974592
801763	10K	36,05	32,04	4,01		
801764	10K	36,05	31,03	5,02		
801765	10K	36,05	31,22	4,83		
801766	10K	36,05	31,16	4,89		
801767	10K	36,05	32,26	3,79		
801768	10K	36,05	31,47	4,58		
801769	10K	36,05	30,44	5,61		
801408	B-10	36,05	30,00	6,05		
801409	B-10	36,05	29,79	6,26	6,55	0,343708905
801410	B-10	36,05	30,26	5,79		
801411	B-10	36,05	29,03	7,02		
801412	B-10	36,05	29,83	6,22		
801413	B-10	36,05	29,65	6,40		
801415	B-10	36,05	28,66	7,39		
801416	B-10	36,05	28,78	7,27		
801387	B	36,05	30,59	5,46		
801388	B	36,05	30,46	5,59	6,13	0,357058177
801390	B	36,05	29,51	6,54		
801391	B	36,05	29,95	6,10		
801393	B	36,05	29,59	6,46		
801394	B	36,05	28,84	7,21		
801396	B	36,05	29,69	6,36		
801397	B	36,05	29,82	6,23		
801399	B	36,05	30,83	5,22		
801333	6	36,05	30,20	5,85		
801334	6	36,05	31,11	4,94	5,02	0,553805577
801335	6	36,05	31,93	4,12		
801336	6	36,05	29,76	6,30		
801337	6	36,05	30,32	5,73		
801338	6	36,05	31,97	4,08		
801339	6	36,05	29,62	6,43		
801340	6	36,05	30,31	5,74		
801341	6	36,05	31,94	4,11		

801343	6	36,05	30,70	5,35		
801344	6	36,05	32,25	3,80		
801345	6	36,05	30,39	5,66		
801346	6	36,05	31,65	4,40		
801347	6	36,05	32,34	3,71		
801364	8	36,05	30,41	5,64		
801365	8	36,05	30,12	5,93	5,45	0,230907608
801366	8	36,05	30,49	5,56		
801367	8	36,05	30,53	5,52		
801368	8	36,05	30,29	5,76		
801369	8	36,05	31,13	4,92		
801370	8	36,05	31,01	5,04		
801371	8	36,05	30,43	5,62		
801372	8	36,05	30,79	5,26		
801373	8	36,05	31,17	4,88		
801374	8	36,05	30,96	5,09		
X	8	36,05	29,95	6,10		

39 dagen	gemiddelde corrosiesnelheid (gram/m ² .j)	standaardfout (g/m ² .j) (39)
8K	2514,27	88,11
10K	2389,39	79,42
B-10	3171,97	149,86
B	2364,41	82,00
6 meter		
8 meter		
134 dagen		
8K	1756,72	75,58
10K	1269,68	24,23
B-10	1582,26	56,36
B	1112,18	25,53
6 meter	1040,70	69,91
8 meter	1010,42	7,27
161 dagen		
8K	1980,41	96,44
10K	1443,96	75,35
B-10	1758,57	185,54
B	1520,60	64,91
6 meter	1171,71	79,68
8 meter	1187,84	46,52
559 dagen		
8K	1216,16	63,72
10K	799,04	57,32
B-10	1141,39	59,89
B	1067,99	62,22
6 meter	873,99	96,50
8 meter	948,81	40,24