



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

**De verticale distributie van corrosie en
fouling op scheepsrompen en damplanken**

Sarah Willems

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

Promotor: Geert Potters
Copromotor: Raf Meskens
Academiejaar: 2020 - 2021

WOORD VOORAF

Vanuit de literatuurstudie wordt er dieper ingegaan op corrosie en wordt er onderzocht hoe corrosie beïnvloed wordt in functie van de diepte. Het is een onderzoek dat deel uitmaakt van een groter project genaamd ‘Praktijklab Corrosie & Isolatie’.

Wat mij tot dit onderwerp heeft gebracht is mijn interesse in de verschillende soorten organismen die in staat zijn zich te hechten op onderwater liggende oppervlakten en hoe deze evolueren in functie van tijd. Alsook de impact die deze organismen kunnen hebben en in welke mate ze bijdragen tot het versnellen van de corrosie.

Hierbij wil ik nog enkele personen bedanken. Eerst en vooral mijn promotor Geert Potters en copromotor Raf Meskens, die mij doorheen het schrijven van deze scriptie hebben begeleid en bijgestuurd waar nodig. Daarnaast wil ik ook mijn familie bedanken voor de nodige steun en om mijn thesis volledig te doorlezen.

SAMENVATTING

Fouling is een probleem waaraan mariene structuren worden blootgesteld indien ze ondergedompeld zijn in water. De mate waarin fouling organismen zich ontwikkelen hangt af van verschillende parameters. Factoren zoals licht, temperatuur, pH en geografische locatie maken dat grote verschillen in de biologische aangroei ontstaan. Mariene structuren zijn niet alleen onderhevig aan fouling maar zijn ook onderhevig aan corrosie. Corrosie is een chemisch proces dat leidt tot de degradatie van mariene structuren. De chemische reacties die optreden zijn afhankelijk van het soort staal dat gebruikt wordt en de omgeving waaraan dat staal is blootgesteld. In deze thesis tracht men te achterhalen of de diepte een parameter is die de corrosiesnelheid van het staal beïnvloed. Hiervoor werden tien rekken opgehangen in de haven van Oostende op vier verschillende diepten. Maandelijks werden van elk rek drie plaatjes weggenomen voor verder onderzoek. De corrosiesnelheid werd bepaald aan de hand van het gewichtsverlies van de plaatjes. De resultaten toonden aan dat een diepte tot vier meter geen bepalende factor is voor de corrosiesnelheid.

ABSTRACT

Fouling is a problem which is encountered by every marine structure when submerged in seawater. The development of these organisms is affected by many parameters. Large differences in biological growth come into existence due to factors such as light, temperature, pH and geographical location. Marine structures are not only subjected to fouling but also to corrosion. Corrosion is a chemical process that leads to the degradation of marine structures. The chemical reactions that occur are depending on the type of steel that is being used and the environment to which the steel is being exposed. In this thesis we try to find an answer on whether the depth is a factor influencing the corrosion rate. For this experiment 10 grids were hung up at four different depths in the port of Ostend. On a monthly basis three steel samples were taken from each grid for further research. The corrosion rate is determined by the weight loss of the steel samples. The results show that a depth until four meters is not a deciding factor for the corrosion rate.

INHOUDSOPGAVE

Woord vooraf	ii
Samenvatting	ii
Abstract	iii
Lijst van figuren	vi
Lijst van tabellen	vii
Lijst van afkortingen	viii
Inleiding	1
1 Aangroei van organismen op schepen en maritieme infrastructuur	3
1.1 <i>Biologische aangroei</i>	3
1.2 <i>Verschillende stadia biologische aangroei</i>	4
1.3 <i>Factoren die de biologische aangroei beïnvloeden</i>	6
1.3.1 Factoren bepaald door het milieu	7
1.3.2 Parameters bepaald door het schip	12
1.4 <i>Gevolgen van de biologische aangroei</i>	13
1.4.1 Gevolgen op scheepsrompen	13
1.4.2 Gevolgen voor de productieplatformen	14
2 De distributie van organismen	15
2.1 <i>Verticale distributie van organismen</i>	15
2.1.1 Noordzee	16
2.1.2 Drijvende energie-installaties	20
3 Corrosiemechanismen	22
3.1 <i>Wat is corrosie?</i>	22
3.2 <i>Elektrochemische corrosie</i>	22
3.3 <i>Microbiologisch geïnduceerde corrosie</i>	23
3.3.1 Accelerated low water corrosion (ALWC)	24
3.4 <i>Zonering havenstructuren</i>	24
4 Onderzoeksdoelstelling	27
5 Materiaal en methoden	29

5.1	<i>Staalsoorten</i>	29
5.2	<i>Beschrijving locatie</i>	31
5.2.1	Locatie Oostende	31
5.2.2	Diepte Oostende	32
5.2.3	Locatie North Sea Port Vlissingen	33
5.3	<i>Rekken North Sea Port</i>	36
5.4	<i>Codering plaatjes Oostende</i>	38
5.5	<i>Installatie rekken Oostende</i>	39
5.6	<i>Praktische uitvoering</i>	40
5.6.1	Procedure	41
5.6.2	Reinigen plaatjes	42
5.7	<i>Gewichtsverlies en corrosiesnelheid</i>	45
5.8	<i>data-analyse</i>	47
6	Resultaten	48
6.1	<i>Optimalisatie reinigingsprocedure</i>	48
6.2	<i>Visuele inspectie van de plaatjes</i>	51
6.2.1	Grade A	51
6.2.2	S355	52
6.2.3	316L	53
6.3	<i>Experiment</i>	57
6.3.1	Corrosiesnelheid Grade A	57
6.3.2	Corrosiesnelheid S355	59
6.3.3	Corrosiesnelheid 316L	61
6.4	<i>Statistische analyse</i>	62
6.4.1	Grade A	62
6.4.2	S355	64
6.4.3	316L	65
	Discussie	66
	Bibliografie	67
	Lijst van bijlagen	76

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1	Biologische aangroei	3
Figuur 2	Ontwikkeling biologische aangroei.....	4
Figuur 3	Zonatie oceaan in functie van licht invalBron:	11
Figuur 4	Blauwe mossel	16
Figuur 5	Hydroïde	17
Figuur 6	Zachte koralen.....	18
Figuur 7	Plumose anemoon	18
Figuur 8	Kokerwormen	19
Figuur 9	Golfenergie installatie, Pelamis	21
Figuur 10	Schematische weergave van het corrosie proces van ijzer	23
Figuur 11	Zonering stalen havenstructuren	25
Figuur 12	Locatie statisch platform Oostende	31
Figuur 13	Schematische voorstelling diepten rondom statisch platform	32
Figuur 14	Locatie kademuur VK0801.....	33
Figuur 15	Visuele voorstelling ophanging rekken VK0801.....	34
Figuur 16	Locatie kademuur VK0101.....	35
Figuur 17	Visuele voorstelling ophanging rekken VK0101.....	36
Figuur 18	Kleurcodering en nummering plaatjes	38
Figuur 19	Te water laten rekken	39
Figuur 20	Opstelling rekken Oostende.....	40
Figuur 21	Coupons na reinigingsproces	42
Figuur 22	S355 + 326L coupons in oplossing met beperkte schuimvorming	44
Figuur 23	Dimensie plaatje.....	46
Figuur 24	Ontwikkeling van luchtbellen bij de plaatjes in de oplossing azijn	49
Figuur 25	Gezandstraalde plaatjes	50
figuur 26	Geëtste plaatjes – NaOH oplossing.....	50
Figuur 27	Variatie in corrosiesnelheid i.f.v. diepte voor Grade A met uitschieter.....	57
Figuur 28	Variatie in corrosiesnelheid i.f.v. diepte voor Grade A zonder uitschieter	57
Figuur 29	Variatie in corrosiesnelheid i.f.v. diepte voor staalsoort S355	59
Figuur 30	Variatie in corrosiesnelheid i.f.v. diepte voor staalsoort 316L.....	61

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1	Overzicht van micro- en macro-organismen op oppervlakte van schepen	6
Tabel 2	Chemische compositie staalsoorten	30
Tabel 3	Schematische weergave diepte rekken	37
Tabel 4	Foto's van Grade A plaatjes op verschillende tijdstippen en diepten	54
Tabel 5	Foto's van S355 plaatjes op verschillende tijdstippen en diepten	55
Tabel 6	Foto's van 316L plaatjes op verschillende tijdstippen en diepten	56
Tabel 7	Variantieanalyse Grade A één meter diep	63
Tabel 8	Variantieanalyse Grade A drie meter diep	63
Tabel 9	Variantieanalyse Grade A voor de vier diepten	63
Tabel 10	Post hoc test Grade A voor één en drie meter diep	63
Tabel 11	Variantieanalyse S355 drie meter diep	64
Tabel 12	Variantieanalyse S355 voor de vier diepten	64
Tabel 13	Post hoc test S355 voor drie meter diep	65
Tabel 14	Variantieanalyse 316L voor de twee diepten	65

LIJST VAN AFKORTINGEN

ALWC:	Accelerated low water corrosion
ANOVA:	Variantieanalyse
ASTM:	American Society for Testing and Materials
DIN:	Dissolved inorganic nitrogen
EPS:	Extracellulaire polysachariden
G.H.W.:	Gemiddelde hoog water
G.L.W.:	Gemiddelde laag water
KMW:	Kademuurwand
MIC:	Microbiologisch geïnduceerde corrosie
NAP:	Normaal Amsterdams Peil
NIMS:	Niet inheemse mariene soorten

INLEIDING

Het eerste hoofdstuk bespreekt de aanhechting van organismen op de onderwater liggende delen van mariene structuren. Deze aangroei staat beter gekend als fouling en de ontwikkeling ervan gebeurt in verschillende fasen. Er vormt zich eerst een laag micro-organismen alvorens zich een laag macro-organismen kan ontwikkelen. De mate waarin deze organismen zich ontwikkelen is afhankelijk van verschillende parameters. Zo wordt de aangroei niet alleen beïnvloed door de locatie, het seizoen, de lichtinval en de temperatuur maar ook door de snelheid van het schip en de statische- en dynamische periode van het schip. Bovendien brengt deze aangroei heel wat gevolgen met zich mee. Zo verhoogt fouling de scheepsweerstand, creëert het extra gewicht en spanningen en leidt het tot de verspreiding van organismen naar nieuwe habitats.

Het tweede hoofdstuk bespreekt de verticale distributie van organismen op platformen en energie-installaties in verschillende geografische gebieden. Zo wordt er een onderscheid gemaakt tussen organismen die leven in ondiep water, de mid-water zone of in diep water.

Hoofdstuk drie bespreekt de verschillende types corrosie relevant voor deze thesis. Daarnaast wordt er ook gekeken naar de manier waarop damplanken onderverdeeld kunnen worden in zones waarbij elke zone gekenmerkt wordt door een andere corrosiesnelheid.

In hoofdstuk vier wordt de centrale onderzoeksvraag die deze thesis behandelt uitgelegd namelijk of de diepte een invloed heeft op de corrosiesnelheid.

In het vijfde hoofdstuk wordt er aangehaald met welke staalsoorten men te werk ging, waar het onderzoek plaatsvond en hoe de plaatjes werden geïdentificeerd. Daarnaast zal aan de hand van een procedure uitgelegd worden hoe de plaatjes werden verzameld, gefotografeerd, luchtdicht werden verpakt en werden geëetst. Ook zal in dit hoofdstuk kort worden aangehaald hoe de corrosiesnelheid bepaald werd en welke data-analyse werd uitgevoerd.

Hoofdstuk zes behandelt hoe de ets methodes werden verbeterd. Bovendien wordt er gekeken naar hoe de plaatjes evolueren in functie van tijd en wordt er ook een vergelijking gemaakt

tussen de plaatjes van op éénzelfde tijdstip. Vervolgens worden de resultaten van het experiment besproken en statistisch geanalyseerd.

1 AANGROEI VAN ORGANISMEN OP SCHEPEN EN MARITIEME INFRASTRUCTUUR

In dit hoofdstuk zal het ontstaan en de ontwikkeling van foulingorganismen worden aangehaald.

1.1 BIOLOGISCHE AANGROEI

Biologische aangroei wordt beschreven als de ongewenste aanhechting en accumulatie van organismen op onderwater liggende structuren (International Maritime Organization, 2020). Het is een natuurlijk fenomeen dat zich voordoet in zowel zoet-, brak- als in zeewater (De Charleroy & Denayer, 1992). Niet alleen zijn scheepsrompen, pieren en damplanken onderhevig aan de aangroei van biologische organismen, maar ook de onderwater liggende oppervlakten van productieplatformen vormen een ideale basis voor de ontwikkeling van fouling gemeenschappen. Deze platformen worden beschouwd als een kunstmatig rif dat voldoende plaats ter beschikking stelt voor de vestiging van sessiele organismen en planten (Robert & Philip, 1979; Van Der Stap, Coolen, & Lindeboom, 2016).

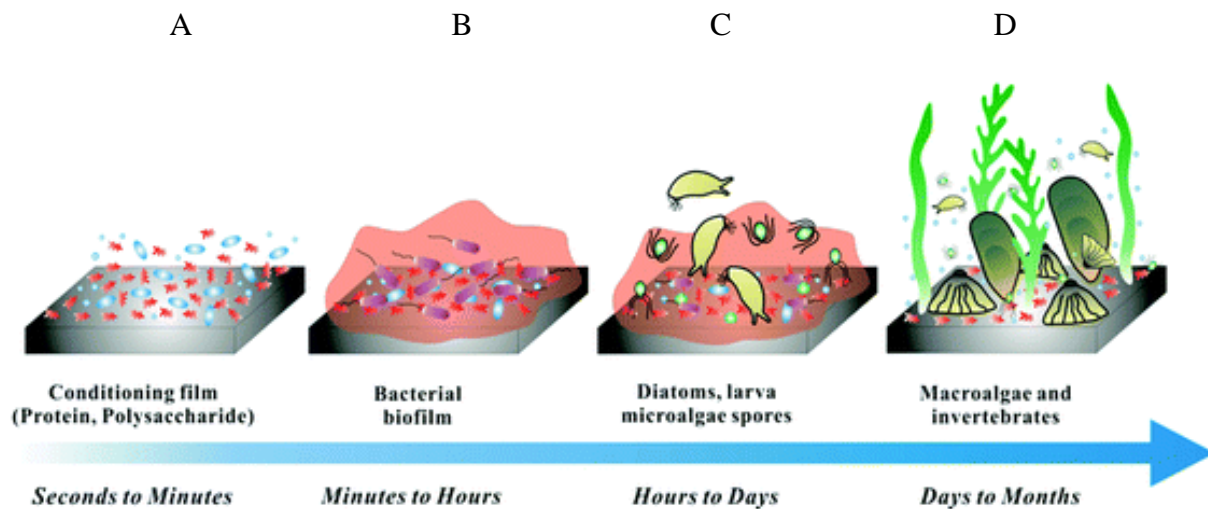
De aangroei van organismen biedt op zijn beurt beschutting en voedsel voor allerlei grotere organismen zoals vissen, krabben, vlokreeften en zeepissebedden (Robert & Philip, 1979)



Figuur 1 Biologische aangroei

Bron: Lamers System Care, z.d.

1.2 VERSCHILLENDE STADIA BIOLOGISCHE AANGROEI



Figuur 2 Ontwikkeling biologische aangroei

Bron: Xie et al., 2019

De ontwikkeling van foulingorganismen op mariene structuren verloopt over het algemeen op dezelfde manier. Biofouling ontstaat door een reeks van opeenvolgende processen waarbij het einde van het ene stadium het begin is van het volgende. Hoewel deze processen voor micro- en macro-organismen verschillen, vertonen deze twee processen gelijkenissen in de volgorde waarin bepaalde gebeurtenissen plaatsvinden. Zo worden ze beide gekenmerkt door vier verschillende fasen namelijk de vestiging, de aanhechting gevolgd door de ontwikkeling van organismen en een groeiproces (Dharmalingam, 2018; Ogunola & Onada, 2016). Vanaf het eerste contact met water, wordt er door de adsorptie van proteïnen en kleine organische moleculen een *conditioning film* gevormd die de romp voorbereidt op verdere kolonisatie (figuur 2A) (Callow & Callow, 2002; Xie et al., 2019).

Na enkele uren wordt het oppervlakte gekoloniseerd door bacteriën evenals door eencellige algen en cyanobacteriën, beter gekend als de blauwgroene algen (figuur 2B). Deze vastgehechte cellen vormen een biofilm die opgebouwd is uit glycoproteïnen en polysacchariden, ook slijm laag of microfouling genoemd (Callow & Callow, 2002).

De kolonisatie door deze bacteriën bestaat uit twee delen namelijk een omkeerbare adhesie gevolgd door een onomkeerbare aanhechting. Bij de omkeerbare adhesie wordt er verwezen naar het eerste stadium van contact tussen het organisme en het substraat. De cellen worden vastgehouden met behulp van fysische krachten. Dat maakt dat ze makkelijk verwijderd

kunnen worden van de scheepsromp en van onderwater installaties. Dit in tegenstelling tot de onomkeerbare aanhechting waarbij de organismen zich permanent aan het substraat vasthechten. Hierbij worden de cellen vastgehouden door waterstofbruggen, kationbindingen en door de productie van extracellulaire polymere substanties (EPS) (Dharmalingam, 2018; Richmond & Seed, 1991; Wahl, 1989).

De EPS zijn natuurlijke polymeren die geproduceerd worden door micro-organismen. De productie van zulke biopolymeren is van groot belang bij de ontwikkeling van de biofilm. De EPS vormt namelijk een matrix die de cellen bijeen houdt en kan daarom beschouwd worden als bescherm laag rondom de bacteriën. Naast polysachariden bevatten ze ook DNA en proteïnen. Overigens kunnen ze door hun adsorptie eigenschappen de biofilm voorzien van nutriënten. De chemische samenstelling van de EPS bepaalt de stevigheid en de materiële eigenschappen van de biofilm (Flemming, Murthy, Venkatesan, & Cooksey, 2009; Fusetani & Clare, 2006).

Na de ontwikkeling van de eerste biofilm volgt de kolonisatie van de eencellige eukaryoten zoals onder meer de diatomeeën en de sporen van micro-algen (figuur 2C). Dit proces begint een aantal dagen na de onderdompeling van het harde substraat en blijft zich verder ontwikkelen samen met de biofilm. De eencellige eukaryoten voorzien de biofilm van nutriënten (Xie e.a., 2019). De vastgehechte cellen vermenigvuldigen zich waardoor snel groeiende kolonies ontstaan die naderhand in elkaar vloeien (Callow & Callow, 2002). Na verloop van tijd ontwikkelen meercellige organismen zich op het substraat (figuur 2D). Hierbij wordt er verwezen naar macrofouling. Ze bestaan uit enerzijds zachte fouling en anderzijds uit harde fouling. Macrofouling is in staat zich over de microfouling te ontwikkelen. Algen en ongewervelden zoals sponzen, anemonen en hydroïden behoren tot de niet kalkrijke organismen, de zachte fouling. Mosselen, kokerwormen en zeepokken daarentegen behoren tot harde fouling (Callow & Callow, 2002).

Het groeiproces is het laatste stadium in het kolonisatieproces van harde oppervlakten. De groei wordt zowel gekenmerkt door een toename aan biomassa bij micro- en macro-organismen als door een talrijke vermeerdering van micro-organismen. Eens macro-organismen klaar zijn voor reproductie, wordt heel het kolonisatieproces herhaald wat leidt tot een uitbreiding van de kolonie (Railkin, 2004).

Door verschillende ecologische processen zoals concurrentie, opvolging en predatie vormt zich zo een gemeenschap van macro-organismen. De aangroei van foulingorganismen op onderwaterstructuren is een continu proces in tijd dat geen einde kent. De samenstelling van een volwaardige gemeenschap kan wel veranderen door onder meer de seizoenen, predatie en de grootschalige oceaan processen die de ontwikkeling van de larven beheersen (Fusetani & Clare, 2006).

Tabel 1 Overzicht van micro- en macro-organismen op oppervlakte van schepen

Bron: Railkin, 2004; Richmond & Seed, 1991

Micro-organismen	Macro-organismen	
	Plantaardig	Dierlijk
- Diatomeeën		
- Microscopische fungi	- Groene algen	- Sponzen
- Eencellige algen	- Rode algen	- Hydroïden
- Blauwgroene algen	- Bruine algen	- Zeeanemonen
		- Mosselen
		- Zeepokken
		- Kokerwormen
		- Bryozoa (mosdieren)

1.3 FACTOREN DIE DE BIOLOGISCHE AANGROEI BEÏNVLOEDEN

Meer dan vierduizend foulingvormende organismen werden geïdentificeerd op mariene structuren (Dam-Johansen, Meseguer Y, & Kiil, 2004; Xie e.a., 2019). Echter is dit nog maar een kleine percentage onder de gekende mariene organismen. Vele organismen kunnen zichzelf vasthechten aan het harde substraat zonder weggespoeld te worden en weten zich aan te passen aan nieuwe milieus. (Dam-Johansen e.a., 2004). Wereldwijde verschillen in soort en samenstelling ontstaan doordat mariene milieus onderling aanzienlijk variëren door verschillen in watertemperatuur, zoutgehalte, lichtinval, zuurstofconcentratie en de hoeveelheid nutriënten die aanwezig zijn (Xie et al., 2019).

De geografische locatie en de tijd van het jaar dragen ook bij tot de verscheidenheid aan organismen op de scheepswanden (Callow & Callow, 2002). Opdat organismen kunnen

overleven in andere mariene milieus, moeten ze een structurele of functionele verandering ondergaan die het gevolg is van natuurlijke selectie ('Aquatic Life Lab', 2017). Zo zijn niet-inheems mariene soorten (NIMS) organismen die door toedoen van de mens in een nieuw leefgebied zijn terecht zijn gekomen, daar waar ze oorspronkelijk niet thuis horen. Vele soorten kunnen zich snel aanpassen en zich succesvol vestigen ('Natuurbescherming in het Belgische deel van de Noordzee', 2016). Zo werden in 2020 in het Belgische deel van de Noordzee 79 NIMS geïdentificeerd die zich succesvol hadden gevestigd. Krabben, zeepokken, aasgarnalen en weekdieren behoren tot deze groep ('VLIZ', 2021).

Naast de verschillende parameters die de fysicochemie van het omliggende zeewater beschrijven, zijn er andere parameters die ook een cruciale rol hebben. De mate waarin een schip onderhevig is aan biologische aangroei is afhankelijk van de regio waarin het zich bevindt, de snelheid waarmee het vaart, de verhouding tussen de tijd op zee en de statische periode, welke antifouling is aangebracht op de romp en hoe vaak het schip naar het droogdok moet (Railkin, 2004). Deze parameters worden uitvoerig besproken in 1.3.2.

1.3.1 FACTOREN BEPAALD DOOR HET MILIEU

Dit deel van de thesis bespreekt de abiotische factoren die de ontwikkeling van de organismen beïnvloeden zoals onder andere de temperatuur, lichtinval en zuurtegraad.

A. GEOGRAFISCHE LOCATIE EN SEIZOENSINVLOEDEN

De hoeveelheid biologische aangroei op schepen varieert naargelang het vaarpatroon van het schip en het geografisch gebied waarin het werkzaam is (Dam-Johansen e.a., 2004). Bij regio's die gepaard gaan met grote seizoenveranderingen, worden de voortplanting en groei volledig onderbroken tijdens de winterperiode. In het algemeen mag aangenomen worden dat fouling het frequentste voorkomt in tropische wateren. In deze gebieden zijn er weinig seizoenonderbrekingen waardoor het voorplantingssysteem niet stilvalt. Ook onder deze condities kunnen maandelijkse verschillen optreden tussen de individuele soorten die blootgesteld zijn aan het substraat (Hole, 1952).

Het reproductieproces is afhankelijk van de tijd die nodig is voor het rijpingsproces van de organismen, de ontwikkeling van de larven en het groeiproces wat maakt dat ze in staat zijn

om een volgende generatie voort te brengen. De omgeving beïnvloedt deze verschillende processen en bepaalt al dan niet of cycli onderbroken worden. Met andere woorden bij sommige organismen vindt er een continue aanhechting plaats ongeacht het seizoen en bij andere organismen verschilt de talrijkheid per seizoen (Hole, 1952).

B. TEMPERATUUR

De temperatuur is een van de belangrijkste parameters die de mate van de biologische aangroei op schepen bepaalt. Ook de limieten van de geografische distributie worden hierdoor beïnvloed (Hole, 1952). De temperatuur heeft een effect op de snelheid waarmee chemische reacties plaatsvinden, wat op zijn beurt de reproductie beïnvloedt. Zo kan bijvoorbeeld bij bruinwieren de ontwikkeling van de gameten versneld worden. De temperatuursveranderingen van zeewater kunnen direct geassocieerd worden met de hoeveelheid licht dat de zee bereikt. Dit licht zorgt voor de opwarming van het zeewater. De lichtinval bepaalt de snelheid van de fotosynthese van de planten en verifieert de hoeveelheid nutriënten aanwezig voor de organismen (Hurd, Harisson, Bischof, & Lobban, 2014).

Regio's met een gematigd klimaat worden gekenmerkt door temperatuurschommelingen en veranderingen in de lichthoeveelheid. Dit resulteert in een gestratificeerde waterkolom wat betekent dat er andere omstandigheden heersen in het bovenste deel dan in het onderste deel van de waterkolom. Naargelang het seizoen, kunnen verschillen optreden. Tijdens de zomermaanden zijn de oppervlaktewateren warm en is er een zeer lage concentratie aan nutriënten. In de winterperiode daarentegen zijn deze wateren koud en is er een overvloed aan nutriënten (Hurd e.a., 2014).

In polaire gebieden varieert de temperatuur van het wateroppervlakte van -1,8 tot +2,2°C. Tropische gebieden worden gekenmerkt door warmere wateren met temperaturen boven 22°C (Hurd e.a., 2014). In beide regio's blijft de temperatuur van het wateroppervlak tijdens het jaar vrijwel stabiel, in tegenstelling tot gematigde streken waar temperatuurverschillen tussen de 10 en 18 °C optreden. Dit zijn gebieden zoals de Middellandse Zee waar de impact van het continent eromheen duidelijk voelbaar is (Dam-Johansen et al., 2004).

C. ZOUTGEHALTE

Zeewater wordt gekenmerkt door een hoog zoutgehalte, wat een oplossing is van allerlei gekende elementen. Het zoutgehalte wordt beschreven als “*the total of solid materials in grams in 1 kg of sea water when all the carbonate has been converted to oxide, the bromine and iodine replaced by chlorine, and all organic material completely oxidised*”¹ (Dam-Johansen e.a., 2004). Ver van de kust blijft het zoutgehalte van zeewater opmerkelijk constant en varieert de massafractie tussen 33 en 38 g/kg. Wereldwijd wordt een gemiddelde van 35 g/kg aanvaard. In bepaalde kustgebieden kan het zoutgehalte in de oppervlakte wateren aanzienlijk variëren door smeltende ijskappen, neerslag, verdamping en de monding van rivieren (Dam-Johansen e.a., 2004; ‘Integraal Waterbeleid’, z.d.)

De meeste fouling organismen verdragen geen laag zoutgehalte. De groeisnelheid en de grootte van de organismen wordt erdoor beïnvloed. Het kan zelfs leiden tot misvormingen. Anderzijds zijn er organismen zoals de algen en de bryozoa die net enkel lage zoutgehaltes tolereren (Dam-Johansen e.a., 2004). Grondels (*Gobius*) en slijmvissen (familie: Blennidae) hebben een wereldwijde distributie en kunnen grote afstanden afleggen doordat ze grote variaties in zoutgehalte kunnen tolereren. Hierdoor zijn het twee vissoorten die geassocieerd worden met fouling op zowel scheepsrompen als platformen (Rilov & Crooks, 2009).

D. PH

In normale omstandigheden is zeewater licht alkalisch en varieert de pH aan de oppervlakte tussen de 8,0 en 8,3 (Dam-Johansen e.a., 2004; Marion e.a., 2011). Door de opname van grote concentraties koolstofdioxide uit de atmosfeer, is het zeewater de afgelopen jaren beginnen verzuren, wat een gevaar vormt voor het ecosysteem. De samenstelling van biofouling gemeenschappen kan drastisch veranderen en bepaalde gemeenschappen kunnen in aantal sterk verminderen (Peck e.a., 2015). Ook neemt daardoor de biodiversiteit in getijgevoelige gebieden af (McIntosh, Manikowski, Wong, Taylor, & Bolton, 1979). Veranderingen in pH beïnvloeden de chemische reacties, evenwichtscondities en kunnen toxisch zijn voor een groot aantal organismen (Peck e.a., 2015).

¹ Het totaal aantal vaste stoffen in gram per 1 kg zeewater op het moment dat alle carbonaten omgezet zijn in oxiden, chloor gevormd is uit broom en jood en wanneer alle anorganische stoffen volledig geoxideerd zijn.

In het zeewater bevinden zich carbonaat-ionen die als buffer werken en schommelingen in de zuurtegraad tegengaan. Dit heeft als effect dat de pH nagenoeg constant blijft, wat goed is. Plaatselijk kunnen variaties optreden in pH door de productie van waterstofsulfide door micro-organismen en door het onttrekken van koolstofdioxide door algen. Een modificatie van de pH kan ook tot stand komen door veranderingen in temperatuur. Hogere temperaturen leiden tot een verlaging van de pH (Dam-Johansen e.a., 2004).

E. NUTRIËNTEN EN ZUURSTOF

Een tekort aan een bepaald voedingselement kan het de algen onmogelijk maken om te groeien of om de reproductiecyclus te vervolledigen tenzij ze dit tekort kunnen opvangen door andere voedingselementen. (Hurd e.a., 2014) . Naast koolstof, zuurstof en waterstof zijn algen en fytoplankton verplicht om zowel stikstof, nitraat als fosfor en fosfaat op te nemen om te overleven. Bij dit proces wordt ook ijzer ingenomen. Deze elementen worden beschreven als anorganische nutriënten ('Fondriest Environmental', 2020; Kaiser e.a., 2011).

Wateren gekenmerkt door lage concentraties aan essentiële elementen worden oligotroof of voedselarm genoemd en zijn gebieden met een lage primaire productiviteit. Eutrofische wateren daarentegen zijn wateren die gepaard gaan met hoge concentraties aan nutriënten en een hoge primaire productiviteit. De primaire productie wordt bepaald door de toevoer van organisch materiaal. Eutrofiëring wordt ook wel beschouwd als de ongewenste toevoer van nutriënten aan het ecosysteem wat resulteert in een overvloed aan algengroei. Deze overvloedige algengroei leidt ook tot een tekort aan zuurstof wat resulteert in sterfte bij vissen. Dit is te wijten aan een stijging van de anorganische elementen zoals fosfor en stikstof, afkomstig van landbouw (bemesting) en industrieel afval ('ISECA', 2007; Kaiser e.a., 2011).

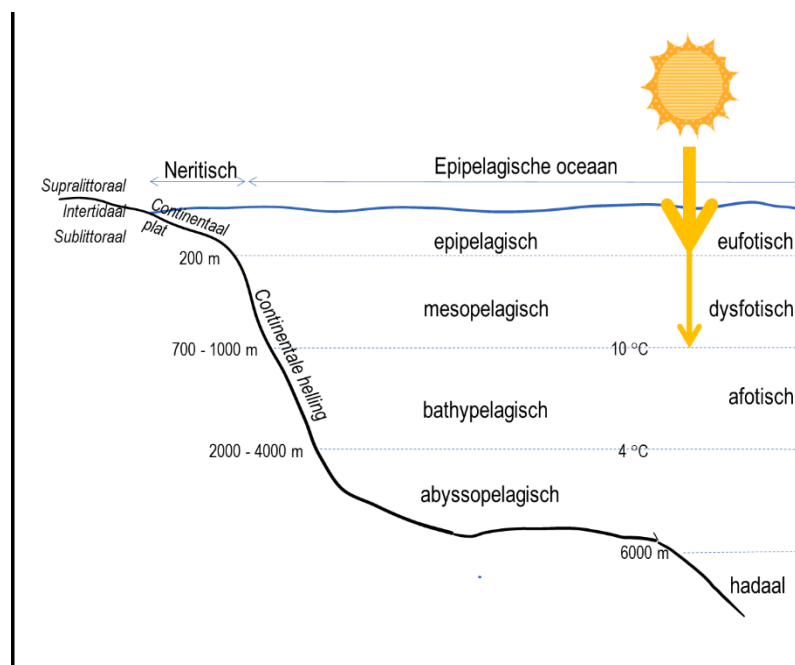
Op volle zee is de groei van fytoplankton beperkt door een tekort aan ijzer. Ook stikstof en fosfor kunnen limiterende nutriënten zijn vanaf een bepaalde afstand tot kust ('Fondriest Environmental', 2020; Kaiser e.a., 2011).

F. LICHTINVAL EN FOTOSYNTHESE

Licht is de overheersende factor die de snelheid en de mate waarin fotosynthese voorkomt, bepaalt. Deze reacties worden gecontroleerd door de kwaliteit en de kwantiteit van het licht

dat de chloroplasten in de cellen bereikt (Kaiser e.a., 2011). Een groot deel van het licht dat de wateroppervlakte bereikt, wordt gereflecteerd. De mate waarin lichtdiffusie plaatsvindt, is afhankelijk van de distributie van opgeloste organische stoffen, bacteriën en plankton in het water. Ook is de ondergrond een bepalende factor ('Fondriest Environmental', 2020; Kaiser e.a., 2011). De hoeveelheid licht vermindert exponentieel met de diepte doordat het licht wordt geabsorbeerd door water, fotosynthetische organismen en andere deeltjes. Dit fenomeen wordt attenuatie genoemd (Kaiser e.a., 2011). De turbiditeit van het zeewater is een sterk bepalende factor voor de beschikbaarheid van licht. In troebel water vindt de fotosynthese voornamelijk plaats aan de oppervlakte van het water ('Fondriest Environmental', 2020; Hurd e.a., 2014).

Fytoplankton en algen zijn terug te vinden in de eufotische zone, meer bepaald de regio tot waar het zonlicht kan reiken (figuur 3). De lichtstralen kunnen tot een diepte van 200 meter reiken in de oceaan. Er is een lineair verband tussen de fotosynthese die plaatsvindt en de hoeveelheid zonnestraling aanwezig (Kaiser e.a., 2011). De fotosynthetische productie bereikt een piek overdag terwijl ze 's nachts enorm afneemt door de afwezigheid van de zon. 's Nachts vindt alleen de verbranding plaats waarbij algen en wieren beroep doen op hun overdag opgebouwde reserves ('Fondriest Environmental', 2020; Kaiser e.a., 2011).



Figuur 3 Zonatie oceaan in functie van licht inval

Bron: MENS, 2019

Er zijn drie verschillende pigmenten die direct betrokken zijn in de fotosynthese van algen en fytoplankton. Deze zijn chlorofyl, fycobiline en carotenoiden. Er bestaan zes verschillende vormen van chlorofyl waarbij chlorofyl a het belangrijkste pigment is voor fotosynthese. Dit maakt dat het aanwezig is in alle algen. De andere pigmenten voegen namelijk energie toe aan de reactie-kernen en zijn verantwoordelijk voor de gele, bruine en rode verkleuring van de algen. De andere vormen van chlorofyl worden beschouwd als aanvullend en zijn ook belangrijk voor de fotosynthese. Ze staan onder andere in voor de verbetering van de lichtadsorptie ('Fondriest Environmental', 2020; Hurd e.a., 2014). Fotosynthese kan alleen maar plaatsvinden in het zichtbare lichtspectrum met andere woorden gaande van het blauwe tot het rode licht ('Fondriest Environmental', 2020). Chlorofyl en de andere pigmenten absorberen fotosynthetische actieve straling wat wordt beschreven als golflengten tussen de 400 en 700 nanometer die dus binnen het lichtspectrum vallen (Hurd e.a., 2014). Chlorofyl a absorbeert voornamelijk blauw en rood licht en reflecteert het groene licht. Het blauwe licht is zeer energierijk en wordt efficiënt gebruikt tijdens de fotosynthese. Daarbij reikt het ook het diepst. Dat is de reden waarom fytoplankton en cyanobacteriën tot in de laagste punten van de eufotische zone te vinden zijn ('Fondriest Environmental', 2020)

1.3.2 PARAMETERS BEPAALD DOOR HET SCHIP

Naast abiotische factoren, zijn er ook nog andere parameters die bepalen in welke mate biofouling zich ontwikkelt op schepen. Deze factoren worden door het schip zelf bepaald.

De eerste factor die de biologische aangroei beïnvloed, is de snelheid van het schip. De snelheid wordt beschouwd als de belangrijkste factor wat betreft de overlevingskansen van fouling organismen (Coutts et al., 2010). De snelheid beïnvloedt de diversiteit en de grootte van de fouling gemeenschappen op de scheepsromp. (Dam-Johansen e.a., 2004; Mittleman, Elliott, & Quirk, 2011). Bij hoge snelheden zijn de krachtige bewegingen van het water langsheen de romp en turbulenties rondom het schip de reden waardoor macro-organismen zich moeilijker gaan vasthechten. De minst robuuste organismen kunnen worden verdreven en voor hen is het moeilijk om vastgehecht te blijven doorheen de reis. Ook het aantal nutriënten dat door de biofilm kan worden opgenomen, wordt sterk verminderd (Dam-Johansen e.a., 2004; Mittleman e.a., 2011). Indien de scheepsnelheid groter is dan zes knopen, wordt er gesteld dat de biologische aangroei zich niet meer beduidend voordoet (Dam-Johansen e.a.,

2004). Bij een lage snelheid daarentegen, kan er een continue hechting plaatsvinden, wat maakt dat fouling zich dikker kan ophopen. Daarnaast kan het ook bijdragen tot grotere overlevingskansen van invasieve soorten waardoor ze zich in nieuwe gebieden kunnen vestigen (Mittleman e.a., 2011). Bij de productieplatformen spelen de stromingssnelheid en de waterturbulenties een belangrijke rol bij de aangroei van mariene organismen. Een sterke stroming zorgt voor de dispersie van organismen. De turbulenties bemoeilijken de vestiging van de bio-organismen (Hardy, 1981; Joschko et al., 2008). De hoeveelheid fouling op een schip wordt niet alleen bepaald door de snelheid maar ook door de statische periode van het schip met andere woorden de tijd dat het schip in de haven doorbrengt. Hoe langer het schip aangemeerd blijft hoe groter de accumulatie van organismen (Mittleman e.a., 2011). Een derde factor die de mate van biologische aangroei bepaald is de duur van de reis. Vastgesteld is dat de biologische aangroei frequenter voorkomt bij schepen die kortere reizen doen. Het is daarbij voordeliger voor de biofouling te overleven (Mittleman e.a., 2011). De lange blootstelling aan slechte weersomstandigheden op volle zee is zeer nadelig voor fouling organismen daar ze hierdoor te lijden krijgen aan voedseltekorten (Mittleman e.a., 2011).

1.4 GEVOLGEN VAN DE BIOLOGISCHE AANGROEI

De biologische aangroei op schepen en platformen blijft niet zonder gevolgen. Om de ernst van de gevolgen te verminderen, wordt er gebruik gemaakt van aangroeiwerende verf die wordt aangebracht in het droogdok.

1.4.1 GEVOLGEN OP SCHEEPSROMPEN

Om de biologisch aangroei te onderdrukken worden er dezer dagen niet alleen toxische verven gebruikt maar voornamelijk antifouling verven. Een gevolg van de aangroei is dat de ruwheid van de scheepsromp geleidelijk aan toe neemt wat leidt tot een verhoging van de hydrodynamische weerstand van het schip en een verlaging van de snelheid. Bovendien veroorzaakt ze een stijging in de emissie van broeikasgassen maar ook een kostenverhoging omwille van de toename van het brandstofverbruik (Demirel e.a., 2017). Het verbruik kan tot 40 % stijgen (Dam-Johansen e.a., 2004; Mittleman e.a., 2011). Het leidt daarbij ook tot een verlies aan geld en tijd doordat additionele maatregelen genomen moeten worden zoals het reinigen van de schepen (Callow & Callow, 2002; Hole, 1952; Mittleman et al., 1975).

De scheepvaart wordt beschouwd als de belangrijkste vector voor de verspreiding van de NIMS. Dit probleem wordt versterkt door de grote toename aan zeeroutes en aan verkeersdensiteit. De verspreiding van NIMS naar nieuwe gebieden gebeurt via verschillende mechanismen onder meer de boegschroef, propeller en onvermijdelijk ook via de scheepsromp. De NIMS vormen een populatie die in staat is zich voort te planten in het nieuwe milieu ('IMO', 2020; Rilov & Crooks, 2009; Roberts & Tsamenya, 2008). De organismen worden als invasief beschouwd wanneer ze om plaats en nutriënten vechten. Kustwateren gekenmerkt door de aanwezigheid van exotische invasieve soorten, ondergaan een verlies aan biodiversiteit wat kan leiden tot permanent schade (Roberts & Tsamenya, 2008). Ze veroorzaken er echter ook niet alleen schade aan het mariene milieu maar ook aan de mens en economische schade aan de mariene voorzieningen door aantasting van de onderwaterinfrastructuur. Hierdoor kunnen de kosten hoog oplopen (Roberts & Tsamenya, 2008).

1.4.2 GEVOLGEN VOOR DE PRODUCTIEPLATFORMEN

De productieplatformen worden ook aangetast door de aangroei van biologische organismen. Hierdoor wordt de veilige werking van de platformen bedreigd. De onderwaterstructuren nemen toe in omvang door de aanwezigheid van macro-organismen. Dit resulteert in extra gewicht en in een opmerkelijke stijging van de spanningen. Overigens wordt corrosie veroorzaakt door chemische stoffen die worden vrijgelaten door de micro-organismen (Hardy, 1981; Richmond & Seed, 1991). Op onbeschermd staal ontstaat door de aangroei van mariene organismen lokale putcorrosie (Hardy, 1981).

Door een verhoogde stromingsweerstand kunnen er complicaties optreden tijdens inspecties, onderhoud en herstellingswerken. Offshore structuren worden in open zee geplaatst, vele kilometers verwijderd van land. Ze zijn blootgesteld aan extremere mariene condities zoals hogere golven en een sterkere stroming (Bozov, 2021). Dit maakt dat reinigingsprocedures gevaarlijk en zeer kostelijk zijn. Afhankelijk van de overheersende organismen, is het al dan niet moeilijker om de onderwaterinfrastructuur te reinigen (Hardy, 1981; Richmond & Seed, 1991).

2 DE DISTRIBUTIE VAN ORGANISMEN

Oppervlaktewateren worden gekenmerkt door een grote verscheidenheid aan fouling-gemeenschappen. Hoewel ze talrijker zijn in kustwateren, zijn ze ook te vinden in diepe wateren waar ze zich verspreiden van de oppervlakte tot op de zeebodem. Oceaanprocessen zijn verantwoordelijk voor het transport van larven en sporen naar geschikte locaties waar ze de mogelijkheid hebben om zich verder te ontwikkelen als sessiele organismen (Richmond & Seed, 1991).

Zowel scheepswrakken, windmolens als productieplatformen zijn de perfecte leefgebieden voor de ontwikkeling van sessiele organismen. Ze spelen daarbij een significante rol in het voeden van vissen en andere beweegbare organismen en vormen een schuilplaats voor inheemse soorten (Lengkeer, Coolen, Gittenberger, & Schrieken, 2013; Wolfson, Van Blaricom, Davis, & Lewbel, 1979). Artificiële riffen compenseren het verlies aan natuurlijke riffen ten gevolge van de bouw van windmolenparken. 90% van de mariene soorten aanwezig op de harde substraten zijn afwezig in de omliggende omgeving. Dit heeft een groot effect op de lokale biodiversiteit die sterk kan uitbreiden (Van Der Stap e.a., 2016).

2.1 VERTICALE DISTRIBUTIE VAN ORGANISMEN

Als men kijkt naar de verticale distributie van fouling organismen dan is het zeer duidelijk dat de compositie met de diepte volledig verandert. Platformen gelegen in hetzelfde geografisch gebied vertonen gelijkenissen omtrent deze verticale verdeling (Robert & Philip, 1979; Sell, 1992). De mate waarin fouling zich ontwikkelt, varieert wel naargelang de geografische locatie.

Wateren kunnen opgedeeld worden in drie bathymetrische zones namelijk het ondiepe water, gevolgd door de mid-water zone en het diepe water. Kenmerkend voor de bovenste laag is de aanwezigheid van mosselen en algen. Naarmate de diepte toeneemt, zijn de zachte koralen, zeeanemonen en hydroïden de meest voorkomende organismen. Kokerwormen en zeepokken zijn twee soorten die doorgaans de diepte terug te vinden zijn. Er is ook sprake van een overlapping van verschillende organismen over de diepte (Robert & Philip, 1979; Sell, 1992). In dit hoofdstuk zal besproken worden hoe groepen van organismen zich naargelang de diepte verspreiden in de verschillende geografische gebieden.

2.1.1 NOORDZEE

A ONDIEP WATER

Zowel in het zuidelijke als in het noordelijke deel van de Noordzee bevinden zich gasproductieplatformen. Door het feit dat ze op verschillende locaties en diepten zijn gebouwd, maakt dat de biologische aangroei en de talrijkheid ervan sterk kan verschillen. Kenmerkend voor het grootste deel van de platformen is dat tot een diepte van 20 meter de blauwe mossel (*Mytilus edulis*) een van de dominante organismen is (Joschko e.a., 2008; Sell, 1992; Van Der Stap e.a., 2016). In dit ondiepe water zijn op recent gebouwde productieplatformen mosselbanken te vinden tot een diepte van 12 meter. Op oudere platformen daarentegen komt mossel aangroei frequenter voor op grotere diepten, namelijk tot 15 meter diep (Sell, 1992). Dit is deels te wijten aan de weinige reinigingsoperaties doorheen de jaren (Sell, 1992).



Figuur 4 Blauwe mossel

Bron: CAB International, 2020

Ondiepe wateren en kustgelegen gebieden zijn typische gebieden die gekenmerkt worden door de aanwezigheid van de blauwe mossel. Deze organismen zijn sterk afhankelijk van de beschikbaarheid aan voedsel (Van Der Stap e.a., 2016). Platformen gelegen in die regio, zijn zeer onderhevig aan de ontwikkeling van de blauwe mossel, omdat ze zijn blootgesteld aan hogere voedselconcentraties. Ze groeien er snel en kunnen een grootte van 20 cm krijgen. De blauwe mossel is een organisme dat zich in normale omstandigheden niet ontwikkelt op verafgelegen productieplatformen. Maar ze vertoeven er toch door het feit dat ze door de stroming daarginds worden getransporteerd (Robert & Philip, 1979; Van Der Stap e.a., 2016). Naast de stroming heeft de temperatuur ook een grote impact op de ontwikkeling van

mosselen. Zo wordt het zuiden van de Noordzee gekenmerkt door hogere watertemperaturen. Dit heeft als effect dat de onderwater liggende structuren voor een groot deel begroeid zijn met mosselen in een tijdspanne van twee jaar. In tegenstelling tot het noordelijke deel van de Noordzee waar koudere watertemperaturen heersen. Dit maakt dat het een viertal jaar duurt vooraleer een significante aangroei van mosselen op de staketsels kan worden waargenomen (Sell, 1992).

Algen groei komt ook voor in het ondiepe water, voornamelijk op onderwateroppervlakten die onderworpen zijn aan zonlicht. Schaduwrijke oppervlakten worden gekenmerkt door de volledige afwezigheid van algen op meer dan 10 meter diep (Forteath, Picken, Ralph, & Williams, 1982). Algen worden er voornamelijk vervangen door de hydroïde *Tubularia* (figuur 5) (Hardy, 1981a; Ralph & Robert, 1980). Het is een organisme dat over de hele Noordzee aanwezig is. Daarom zijn ze er ook te vinden op alle platformen. Ze zijn gekend als organismen die zeer competitief zijn met de blauwe mossel om de beschikbare ruimte (Ralph & Robert, 1980).



Figuur 5 Hydroïde

Bron: Wikipedia, 2014

B MID-WATER ZONE

De mid-water zone die van 20 meter reikt tot een diepte van ongeveer 75 meter, is een zone die gekenmerkt wordt door de aangroei van kokerwormen, oesters en kleine zeepokken (Ralph & Robert, 1980). Dit zijn organismen die de onderwater liggende structuren op deze diepte initieel koloniseren. Na enkele jaren wordt deze initiële kolonisatie overgroeid door een

meer complexe tweede laag organismen, die voornamelijk uit ongewervelden bestaat (Hardy, 1981; Ralph & Robert, 1980). Een frequent terugkerend patroon is dat de bovenste laag van de mid-water zone overheerst wordt door zachte koralen zoals de *Alcyonium digitatum* (figuur 6). Het middelste deel wordt voornamelijk gedomineerd door sponzen en anemonen zoals de plumose anemoon (figuur 7) (Hardy, 1981; Sell, 1992). Onderaan de zone op een diepte van 67 meter worden de platformen overheerst door de hydroïde *Bougainvillea muscoides* M. Sars (Sell, 1992).



Figuur 6 Zachte koralen

Bron: The marine life information network, 2008



Figuur 7 Plumose anemoon

Bron: The marine life information network, 2007

C DIEP WATER

Diepe wateren gaande van 70 meter diep tot ongeveer 150-200 meter diep, gaan gepaard met een veel minder sterke aangroei van fouling (Forteath e.a., 1982; Ralph & Robert, 1980). Op deze diepten vindt men voornamelijk harde fouling organismen terug. Er zijn twee verschillende soorten organismen die in dichtheid overheersen namelijk de *Belanus hameri* die tot de familie van de zeepokken behoort en de *Filograna implexa* die onder de familie van de kokerwormen valt (figuur 8) (Forteath et al., 1982; Hardy, 1981; Ralph & Robert, 1980). Naast deze organismen, zijn ook verschillende soorten van bryozoa op deze diepten terug te vinden en deze worden er niet groter dan één cm (Ralph & Robert, 1980).

Elke individuele kokerworm produceert een koker met een diameter van minder dan één mm. Als een kolonie uitgroeit dan worden al deze kokers met elkaar verbonden wat maakt dat ze een diameter van 20-25 cm kunnen krijgen (Ralph & Robert, 1980). Op een diepte van 71 meter en meer is de talrijkheid van deze organismen het grootste (Forteath e.a., 1982; Ralph & Robert, 1980).

De *belanus hameri* zijn grote zeepokken die een diameter van 3-4 cm en een hoogte van 5-6 cm kunnen krijgen (Ralph & Robert, 1980). Deze zeepokken overheersen vooral vanaf een diepte van 71 meter (Forteath e.a., 1982).



Figuur 8 Kokerwormen

Bron: The marine life information network, 2008

2.1.2 DRIJVENDE ENERGIE-INSTALLATIES

Net zoals productieplatformen zijn drijvende energie-installaties ook beïnvloed door biologisch aangroei. Het onderwater liggende gedeelte vormt een unieke leefomgeving voor de ontwikkeling van mariene organismen zolang er geen gebruik wordt gemaakt van anti-fouling strategieën zoals antifouling en reinigingsmethoden. De biologische aangroei die niet in toom wordt gehouden, heeft een positieve impact op het lokale milieu. Het leidt tot een verhoging van de voedsel beschikbaarheid en een verrijking aan macro-organismen (Nall, Schlappy, & Guerin, 2017). De biofouling gemeenschappen die op deze installaties te vinden zijn, vertonen zowel gelijkenissen als verschillen met de gemeenschappen die zich ontwikkelen op productieplatformen. Verschillen treden op doordat de drijvende installaties onderworpen zijn aan een ander abiotisch² milieu (Nall e.a., 2017).

Aangezien de diameter van deze installaties rond de drie meter schommelt, is het niet exceptioneel dat bijna de hele oppervlakte van de onderwater structuren overdekt is met biofouling (Langhamer, Wilhelmsson, & Engström, 2009). Op Pelamis, een drijvende energie-installatie, zijn twee verschillende biotopen te onderscheiden namelijk de ondiepe zone net onder de waterlijn gaande van 0 tot 0,25 cm en een diepere zone die gaat van 0,5 tot 2 meter (Nall e.a., 2017). Opmerkelijk is dat de grootste diversiteit aan organismen aan de wateroppervlakte waargenomen wordt. Zowel groene, rode als bruine algen domineren de oppervlakten aan de waterlijn. De algen op deze installaties zijn ook te vinden op de bovenste delen van de onderwater liggende structuren van productieplatformen in de Noordzee (Nall e.a., 2017).

Op een diepte van een halve meter tot twee meter en aan de onderkant van de drijvende installaties zijn geen algen aanwezig. Wel worden deze oppervlakten gedomineerd door verschillende fouling organismen zoals de zeeanemonen (*metridium dianthus*), zachte koralen, mosselen (*mytilus edulis*) en zeepokken (*balanus crenatus*). Het zijn organismen die gekend staan om zich in gebieden met sterkere stromingen te gedijen (Nall e.a., 2017).

De transitie van algen-dominerende oppervlakten in ondiepe wateren naar door ongewervelden overheerste gemeenschappen in diepere wateren is een typische verticale verdeling die ook voorkomt op productieplatformen. Nadat deze installaties geplaatst zijn,

² Abiotisch verwijst naar een externe milieufactor die geen biologische oorsprong heeft zoals de temperatuur, lichtinval en pH.

duurt het ongeveer twee tot vijf jaar vooraleer de biofoulinggemeenschappen de maturiteit bereiken. Wat ook mogelijk is, is dat de compositie op deze installaties over een veel langere periode kan veranderen (Nall e.a., 2017).



Figuur 9 Golfenergie installatie, Pelamis

Bron: The European marine energy centre LTD, 2017

3 CORROSIEMECHANISMEN

3.1 WAT IS CORROSIE?

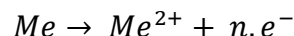
Corrosie wordt beschreven als een fysische- en chemische interactie die plaatsvindt tussen het metaal en zijn omgeving. Zowel de eigenschappen als de functie van het metaal worden hierbij aangetast (Duret-Thual, 2014). Dit resulteert in de geleidelijke vernietiging van het metaal. Verschillende soorten corrosie zijn terug te vinden op mariene constructies. De corrosie types relevant voor deze paper worden in volgende paragrafen beschreven.

3.2 ELEKTROCHEMISCHE CORROSIE

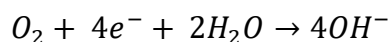
De metaallegeringen die gebruikt worden voor de constructie van damplanken, schepen en offshore structuren bevinden zich in een onstabiele toestand wanneer ze worden blootgesteld aan een waterig milieu. Bij elektrochemische corrosie wordt het metaal terug omgezet in zijn stabiele, geoxideerde vorm (Duret-Thual, 2014; Gellings, 2006). Opdat elektrochemische corrosie tot stand komt, is de aanwezigheid van volgende elementen essentieel: een anode, een kathode en een elektrolytoplossing. In deze reactie treedt er een uitwisseling van elektrische ladingen op namelijk door middel van elektronen in het metaal en ionen in de elektrolytoplossing ('Corrosiemechanismen', 2016).

Op het metaaloppervlak ontstaan er plaatsen met een verschillend elektrochemisch potentiaal waarbij een onderscheid gemaakt wordt tussen de anode en de kathode. De anode heeft een negatief potentiaal door het feit dat het elektronen produceert terwijl de kathode een positief potentiaal bezit doordat het elektronen verbruikt ('Corrosiemechanismen', 2016; Mertens & Beladjal, z.d.). Zowel de productie als de consumptie van elektronen treedt op aan het grensvlak tussen het metaal en het elektrolyt ('Corrosiemechanismen', 2016). Twee deelreacties kunnen daarbij worden opgesteld.

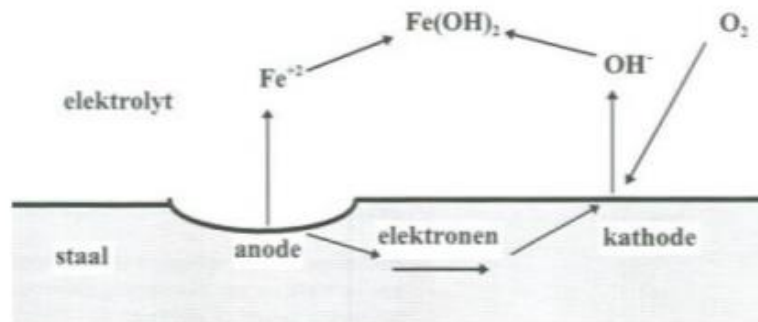
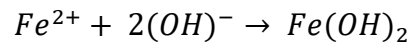
Bij de anodische reactie worden elektronen vrijgegeven wat resulteert in materiaal verlies.



Bij de kathodische reactie wordt zuurstof gereduceerd door het opnemen van de vrijgekomen elektronen. Dit leidt tot de vorming van hydroxide ionen.



Ijzerhydroxide, ook wel roest genoemd wordt gevormd door de anodische en katodische reacties die plaatsvinden en door de toevoer van zuurstof.



Figuur 10 Schematische weergave van het corrosie proces van ijzer

Bron: Corrosiemechanismen, 2016

3.3 MICROBIOLOGISCH GEÏNDUCEERDE CORROSIE

Zoals reeds uitgelegd in 1.2 initieert de blootstelling van maritieme constructies aan het mariene milieu een reeks van chemische reacties die leidt tot de ontwikkeling van biofouling. Eens het oppervlak gekoloniseerd is door micro-organismen wordt er verwezen naar de biofilm, een laag cellen die bijeen wordt gehouden door de productie van EPS.

Microbiologisch geïnduceerde corrosie (MIC) of biocorrosie is een gevolg van schade aan het staal veroorzaakt door het aanhechtingsmechanisme van deze micro-organismen (Mertens & Beladjal, z.d.). De micro-organismen voeren metabole reacties uit die kunnen leiden tot de achteruitgang van het onderliggende substraat. Microscopische openingen ontstaan op de beschermlaag van het substraat met als gevolg dat het substraat en de elektrolytoplossing met elkaar in contact komen en de corrosiesnelheid nog verder zal toenemen. (De Baere, Verstraelen, & Potters, 2011; Geesey, 1991). Door het feit dat micro-organismen zich niet uniform koloniseren op het oppervlak, ontstaan er plaatselijk grote concentraties cellen (Juzeliūnas e.a., 2007). Door hun zuurstof consumptie ontstaan er anaerobe zones onder de microkolonie terwijl de aangrenzende oppervlakten zonder microkolonies aerob blijven. Een anode wordt gevormd daar waar de kolonie zich bevindt en een kathode wordt gevormd aan

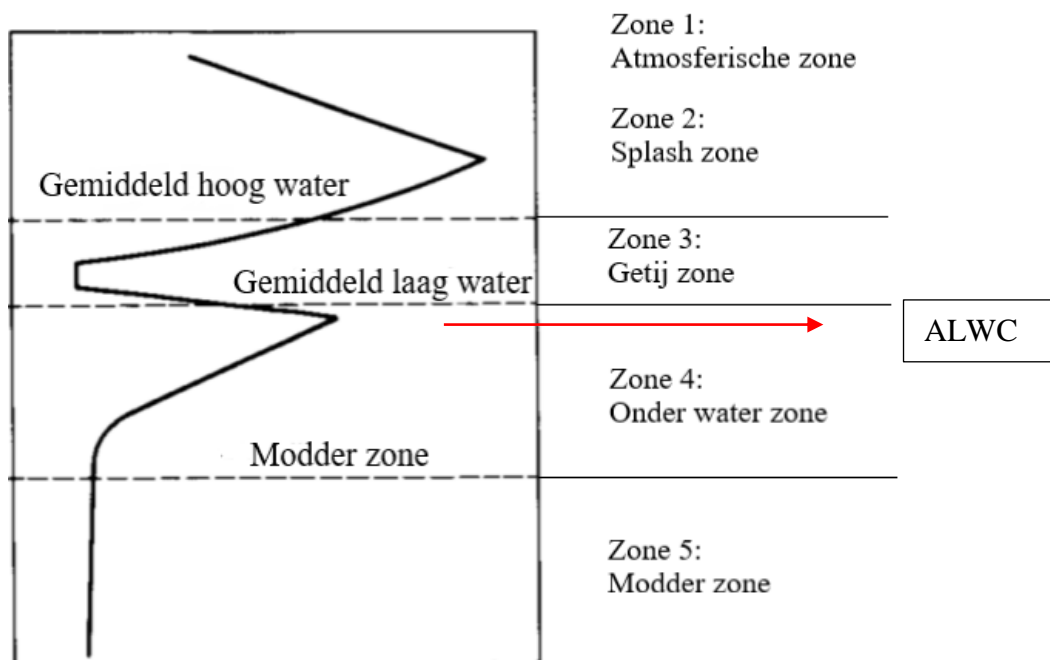
de aangrenzende oppervlakten (Sand & Gehrke, 2003). Als gevolg ontstaat er lokale corrosie, zoals put corrosie (De Baere e.a., 2011; Juzeliūnas e.a., 2007).

3.3.1 ACCELERATED LOW WATER CORROSION (ALWC)

Accelerated low water corrosion (ALWC) is een agressieve vorm van MIC. Het gaat gepaard met de degradatie van mariene structuren ter hoogte van het laag water niveau (Phan, Wade, & Blackall, 2019). De corrosiesnelheid bij ALWC kan oplopen tot 1 mm/ jaar terwijl de normale waarden voor corrosie variëren tussen de 0,1 en 0,5 mm/jaar (Melchers & Jeffrey, 2013; Smith e.a., 2019). Dit type corrosie kan worden geobserveerd tijdens het laag tij. ALWC gaat gepaard met de vorming van oranje roest. Indien deze roest wordt genegeerd, kan dit resulteren in zeer uitgebreide en dure herstellingswerken (Melchers & Jeffrey, 2013; Mertens & Beladjal, z.d.). Sulfaat reducerende- en zwavel oxiderende bacteriën dragen bij tot het falen van stalen structuren. Ook spelen de concentraties stikstof een rol. Vaak komen ze voor onder de vorm van nitraten, ammonia en nitrieten waarbij ze beter bekend staan onder de naam *dissolved inorganic nitrogen* (DIN). Zij dragen bij tot de microbiologisch geïnduceerde corrosie onder het laag water niveau (Melchers & Jeffrey, 2013).

3.4 ZONERING HAVENSTRUCTUREN

Damwanden zijn structuren die opgebouwd zijn uit geprofileerde stalen damplanken, die aan elkaar gekoppeld zijn en een aaneengesloten constructie vormen. De damplanken zijn Z of U vormig en worden gebruikt bij de bouw van zowel tijdelijke als permanente kademuren. Daarnaast hebben ze ook een waterremmende functie ('Wtcb', 2014). Deze damwanden kunnen in functie van diepte worden onderverdeeld in vijf verschillende zones, namelijk de atmosferische, *splash*, getij, water en modder zone (Mertens & Beladjal, z.d.). Elke zone wordt gekenmerkt door een specifieke corrosiesnelheid. Deze corrosiesnelheid is afhankelijk van het type fouling en het type corrosie dat er plaatsvindt (De Baere e.a., 2011).



Figuur 11 Zonering stalen havenstructuren

Bron: bewerkt van López-Ortega et al., 2019

De eerste zone is de atmosferische zone (figuur 11 zone 1). De ernst van de atmosferische corrosie hangt samen met de blootstellingstijd aan vocht en het moment waarop het elektrochemisch proces kan plaatsvinden. Bovendien speelt de hoeveelheid zout en zwavel een grote rol. In deze zone is de corrosiesnelheid relatief laag in vergelijking met plaatsen die continue ondergedompeld zijn. De atmosferische corrosiesnelheid is minder dan 0,1mm/jaar (Mertens & Beladjal, z.d.; Verichev e.a., 2014). De *splash* zone is de zone gelegen net boven het hoog water niveau (figuur 11 zone 2) (Mertens & Beladjal, z.d.). Deze zone is een belucht milieu waarbij de stalen structuren nagenoeg continue nat zijn. De corrosie snelheid in de splash zone is ongeveer 0,3 mm/jaar (De Baere e.a., 2011; Mertens & Beladjal, z.d.; Verichev e.a., 2014). De corrosie in de *splash* zone is de meest agressieve. Doordat havenstructuren zich in deze zone niet continue onderwater bevinden, is kathodische bescherming ineffectief. Indien er geen contact is met het zeewater (elektrolyt), kan er geen constante stroom gecreëerd worden (Verichev e.a., 2014). De derde zone is de getij zone, de zone tussen het gemiddelde hoog en laag water (figuur 11, zone 3) (Verichev e.a., 2014). Door de afwisselende getijhoogten worden havenstructuren alternerend ondergedompeld en blootgesteld aan de atmosfeer (Mertens & Beladjal, z.d.). Zowel zeewieren als zeepokken

vestigen zich in deze zone. De stalen structuren worden op deze manier afgeschermd van golven. In deze zone varieert de corrosiesnelheid tussen de 0,1-0,3 mm/jaar (De Baere e.a., 2011; Verichev e.a., 2014). De vierde zone is een zone dat gekenmerkt wordt door een continue onderdompeling (figuur 11, zone 4). Het milieu in de onderwaterzone verschilt volledig van het milieu aan het oppervlak van het zeewater. De corrosiesnelheid is afhankelijk van de tijd, temperatuur, zoutgehalte, pH en het zuurstofgehalte. Daarnaast spelen factoren zoals zeestromingen, organisch materiaal, opgeloste sulfieten en carbonaten een rol (De Baere e.a., 2011; Verichev e.a., 2014). Het zuurstofgehalte daalt met diepte. Hierdoor daalt de corrosiesnelheid naarmate de diepte toeneemt (López-Ortega e.a., 2019). Helemaal onderaan, daar waar het sediment zich opstapelt wordt de modderzone genoemd (figuur 11, zone 5). In de modderzone is de corrosie verwaarloosbaar door het zeer lage zuurstofgehalte. Een gemiddelde corrosiesnelheid van 0,03 mm/jaar vindt er plaats (López-Ortega e.a., 2019). Plaatselijk kan de corrosiesnelheid hoger zijn door de aanwezigheid van waterstofsulfide (López-Ortega e.a., 2019).

4 ONDERZOEKSDOELSTELLING

De grensregio Vlaanderen-Nederland wordt gekenmerkt door één van de grootste concentraties aan procesindustrie ter wereld. Deze regio is voorzien van vele natte infrastructuur en installaties die al relatief oud zijn. Doordat corrosie één van de belangrijke factoren is in het degradatieproces van deze infrastructuur en installaties, is het van groot belang dat deze installaties optimaal, veilig en storingvrij kunnen functioneren. Om innovaties te kunnen ontwikkelen omtrent de preventie, detectie en de reparatie van corrosie, moet er onderzoeksinfrastructuur beschikbaar zijn ('Hogere Zeevaartschool', z.d.; 'Interreg', z.d.).

De Hogere Zeevaartschool heeft een onderzoeksponton gerealiseerd in de haven van Oostende om onderzoek te kunnen uitvoeren naar deze natte infrastructuur. Hierbij zijn 10 rekken opgehangen en verspreid over vier verschillende diepten. Aan elk rek werden 27 stalen plaatjes vastgemaakt. Op bepaalde tijdstippen werden er telkens 3 plaatjes weggenomen voor verder onderzoek. Hoe dit onderzoek juist in zijn werk ging, wordt besproken in hoofdstuk 5. Voor dit experiment werd gebruik gemaakt van drie verschillende staalsoorten namelijk Grade A, S355 en 316L. In 5.1 wordt er meer uitleg gegeven over deze staalsoorten.

Naast het onderzoek dat is opgestart in Oostende, zal er ook een onderzoek van start gaan in de North Sea Port te Vlissingen. Het havengebied van North Sea Port is een gebied dat zich uitstrekt van Gent tot de buitenhaven in Vlissingen. Het havengebied heeft een zeer grote diversiteit aan natte infrastructuur, ook wel assets genoemd. Hieronder vallen de ligplaatsen, vaarwegen, meerboeien, steigers en kademuren. Deze kademuren strekken zich uit over een afstand van 55,6 km. Doordat de havens in Vlissingen zeer sterk beïnvloed worden door de getijdewerking en het zoutere zeewater, heeft dit een grote impact op de degradatie van de watergebonden infrastructuur. Bovendien heeft het een rechtstreekse invloed op het onderhoud en het beheer van de verschillende assets ('Praktijklab Corrosie & Isolatie', 2020).

Kortom, de Hogere Zeevaartschool heeft twee locaties toegewezen gekregen om onderzoek uit te voeren aan de kademuren in North Sea Port te Vlissingen. VK0101 is een kademuur dat gelegen is in de buitenhaven van Vlissingen en de andere kademuur VK0801 is gelegen in de Sloehaven in Vlissingen-Oost. In totaal zullen er over de twee locaties 22 rekken worden opgehangen met twee verschillende staalsoorten namelijk Grade A en S355. Al de plaatjes

zijn vastgemaakt aan de rekken en elk plaatje kan ook herkend worden aan de hand van een tagnummer.

Dit onderzoek behoort tot een groter project, 'Praktijklab Corrosie & isolatie'. De Hogere Zeevaartschool te Antwerpen is één van de onderzoeksinstellingen die hieraan meewerkt. Zo wordt er zowel onderzoek uitgevoerd in de haven van Oostende als in North Sea Port in Vlissingen.

Vanuit de literatuurstudie over de verticale distributie van organismen, tracht deze thesis een antwoord te zoeken op volgende onderzoeksvraag: "Is de diepte een bepalende factor voor de corrosiesnelheid"?

5 MATERIAAL EN METHODEN

5.1 STAALSOORTEN

De *American Society for Testing and Materials* (ASTM) maakt gebruik van een codesysteem waarbij elk metaal wordt gekenmerkt door een letter en een nummer. De letter verwijst naar de categorie waar het staal toebehoort en het getal duidt op de specifieke metaal eigenschappen (Rothstein, 2019). Grade A is de eerste staalsoort die men in het onderzoek gebruikt. De A in Grade A verwijst naar een ijzerhoudend metaal ('Reliance Foundry', 2021). Grade A is een staalsoort die zeer veel gebruikt wordt in de scheepsbouw en *offshore* industrie vanwege zijn eigenschappen en relatief lage kost. Het staal heeft een goede taaierheid, een zekere corrosie-resistentie en goede laseigenschappen ('BBN', 2012).

De tweede staalsoort is S355. S355 is een samenvatting van een aantal eigenschappen die het staal bezit. De S staat voor "*structural*", waarbij men verwijst naar constructiestaal. Het getal geeft de reksterkte aan van het metaal bij een specifieke plaatdikte van 16 mm. Op het moment dat een trekkracht van 355 MPa wordt bereikt, dan zal het staal gaan vloeien en permanent vervormen. S355 wordt frequenter gebruikt bij zwaardere constructies ('Staalhandel Vaesen NV', z.d.; 'Tosec', 2013). S355 is een roestvaste staalsoort.

De derde staalsoort waar men voor die onderzoek beroep op doet is 316L. 316L is een variant van het type 316 roestvaste staal. De L betekent dat dit staaltype minder koolstof bezit dan het staaltype 316. Het type 316L staat gekend om zijn hoge resistentie tegen corrosie, ook biedt deze staalsoort meer weerstand wanneer ze blootgesteld wordt aan hoge temperaturen (Bell, 2020).

Deze drie staalsoorten beschikken over een zekere chemische compositie. Deze chemische samenstelling wordt weergegeven in onderstaande tabel (tabel 2). In de tabel wordt er frequent gebruik gemaakt van de minimale- en maximale concentratie van de stoffen aanwezig in het materiaal.

Tabel 2 Chemische compositie staalsoorten

Molaire percentages van de elementen aanwezig in het staal

Bron: Inspection certificate 3.1, 2019; Inspection certificate 3.1, 2020; Mill Test Certificate, 2019

Molaire percentage (%)			
	Grade A	S355	316L
C	0,141	0,174-0,177	0,022-0,025
Mn	0,722	1,500-1,530	1,70-1,80
P	0,017	0,014-0,015	0,041-0,045
S	0,010	0,0070-0,0100	0,003-0,005
Si	0,015	0,011-0,016	0,24-0,28
Al	0,071	0,033-0,044	/
Cu	0,018	0,016-0,020	/
Cr	0,035	0,034-0,041	16,60-16,70
Ni	0,033	0,021-0,025	10,04
Mo	0,005	0,004-0,005	2,03-2,04
Nb	0,000	0,001	/
V	0,003	0,001-0,002	/
N	0,0041	/	0,060-0,063
P	/	0,014-0,015	/
B	0,000	0,0002	/
Sn	0,001	/	/
Ti	0,001	0,016	/

5.2 BESCHRIJVING LOCATIE

Het onderzoek naar corrosie vindt plaats op twee locaties, meer bepaald in de haven van Oostende als in de haven van Vlissingen³.

5.2.1 LOCATIE OOSTENDE

Het statisch platform is gelegen aan brug 4 van de ro-ro terminal in de voorhaven van Oostende, ter hoogte van de Slijkensesteenweg.



Figuur 12 Locatie statisch platform Oostende

De zwarte pijl duidt de locatie aan van het statisch platform in Oostende

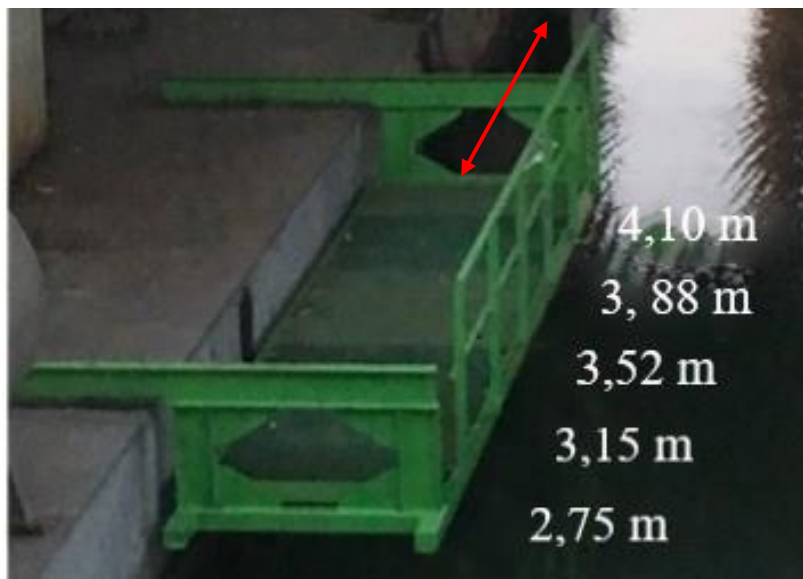
Bron: Bewerkt van Port Oostende, 2021

³ Wegens Covid-19 is het onderzoek in Vlissingen niet van start kunnen gaan en is alleen de praktische voorbereiding uitgewerkt geweest.

5.2.2 DIEPTE OOSTENDE

Op 4/12/2020 is de diepte rondom het statisch platform bepaald aan de hand van een manuele peiling. De diepten zijn bepaald tijdens het laag water op het moment dat er een getij van 40 cm was. Het tijdstip waarop de diepten zijn bepaald is 0936 LT.

Uit figuur 13 kan worden afgeleid dat het niet overal even diep is rondom het statisch platform. Hierdoor moest er rekening gehouden worden met de manier waarop de 10 rekken werden opgehangen. Links van het platform is er een diepte van 4,10 meter beschikbaar terwijl rechts van het platform een diepte van slechts 2,75 meter wordt bereikt. Het is vanzelfsprekend dat de rekken die werden voorzien voor een diepte van 4,0 meter alleen links konden worden opgehangen. De rekken werden volgens afnemende diepte bevestigd aan het platform met andere woorden eerst de rekken voor op vier meter diep gevolgd door de rekken voor op 3,2 en 1 meter diep. Belangrijk is dat alleen de linkerhelft van het platform gebruikt werd voor dit onderzoek.



Figuur 13 Schematische voorstelling diepten rondom statisch platform

De rode pijl geeft aan waar de 10 rekken werden opgehangen

Bron: Eigen werk

5.2.3 LOCATIE NORTH SEA PORT VLISSINGEN

In North Sea port zijn twee kademuren toegekend geweest aan de Hogere Zeevaartschool om onderzoek uit te voeren naar corrosie.

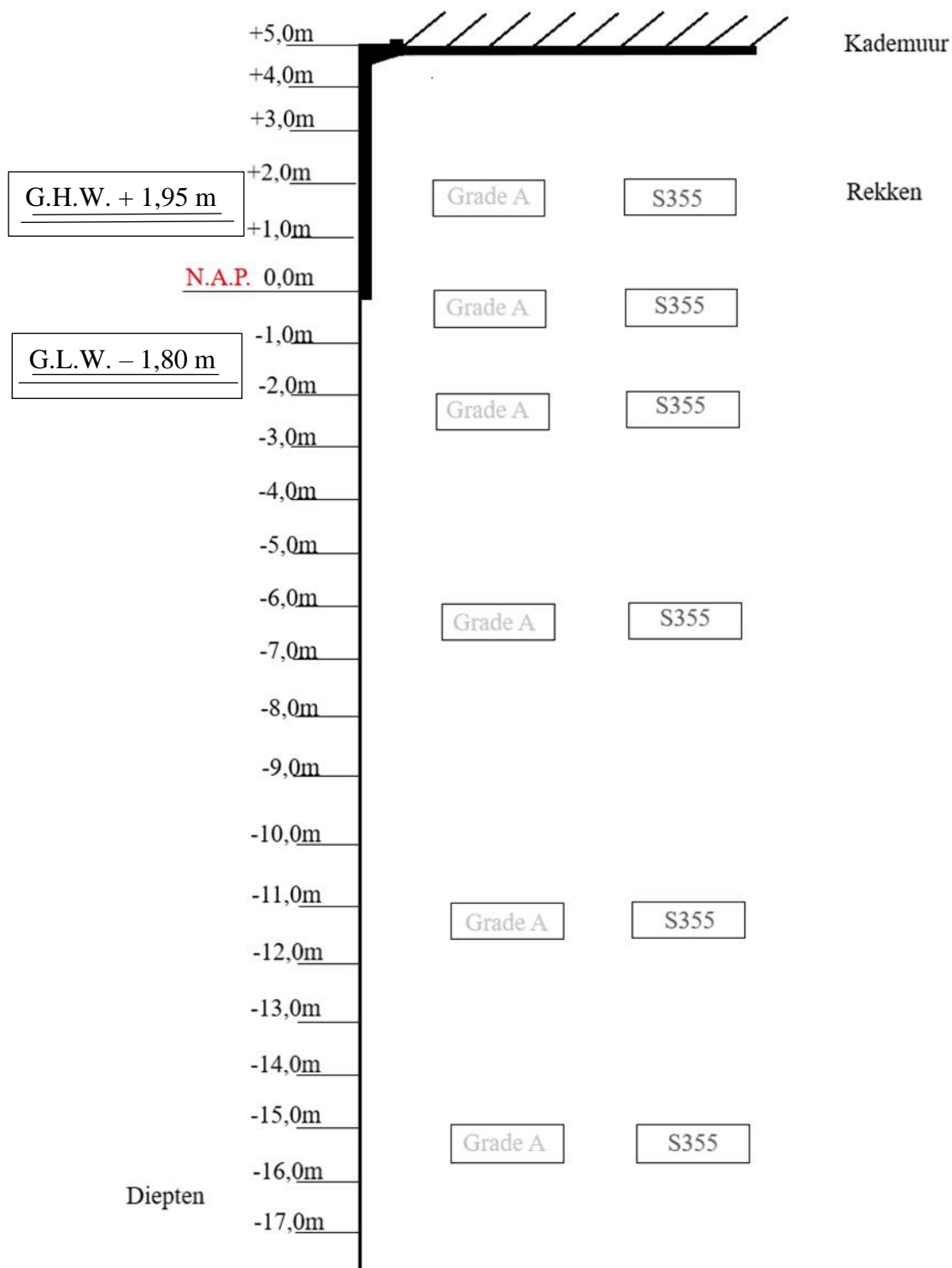
Kademuur **VK0801** is gelegen in de Sloehaven te Vlissingen-Oost. Op deze locatie is de constructiediepte gelijk aan 17,55 meter en heeft men als doelstelling de rekken te verspreiden over 6 diepten. Figuur 14 toont de locatie van de kademuur binnen het havengebied en figuur 15 geeft een visueel beeld van de mogelijke ophanging van de verschillende rekken.



Figuur 14 Locatie kademuur VK0801

De zwarte pijl duidt de locatie aan van de kademuur

Bron: Bewerkt van Praktijklab Corrosie & Isolatie, 2020



Figuur 15 Visuele voorstelling ophanging rekken VK0801

Bron: Eigen werk

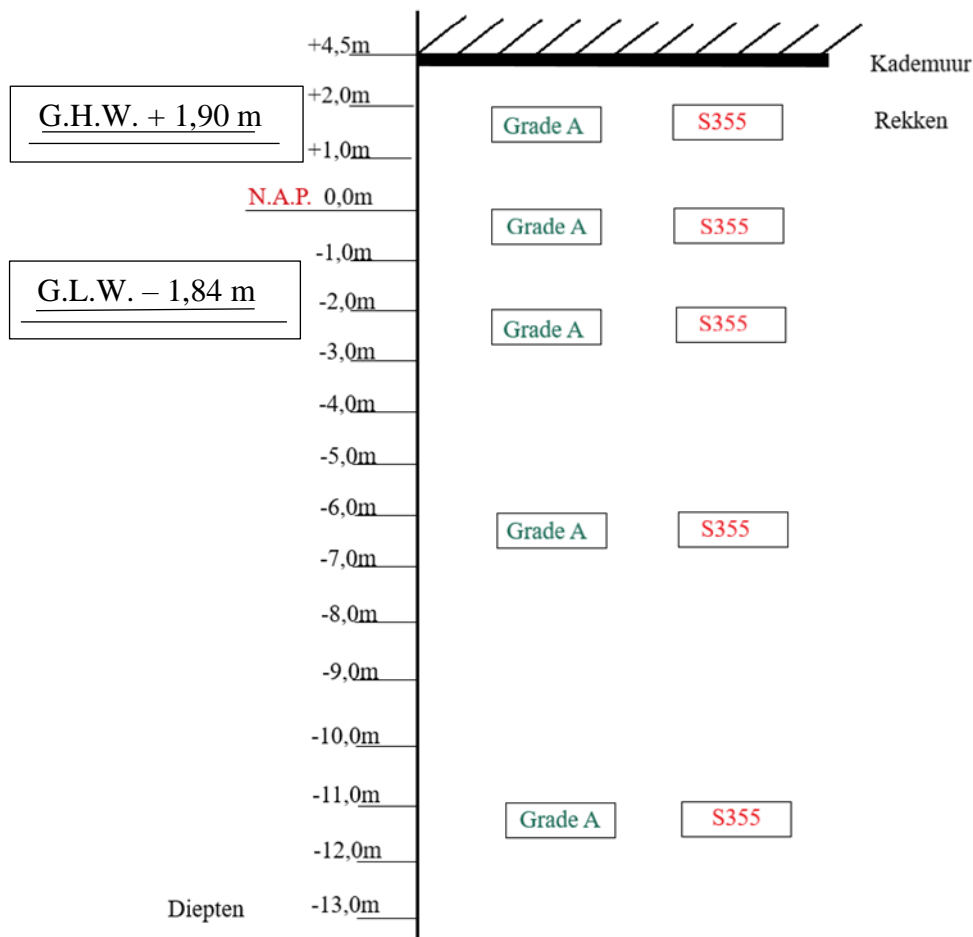
Kademuur **VK0101** is gelegen in de Buitenhaven van Vlissingen. Op deze locatie is een diepte van 13 meter beschikbaar wat minder is dan de constructiediepte bij kademuur VK0801. De rekken zullen worden verspreid over vijf verschillende diepten. Figuur 16 geeft de locatie van de kademuur weer en figuur 17 geeft de mogelijke ophanging weer van de rekken.



Figuur 16 Locatie kademuur VK0101

De zwarte pijl geeft de exacte locatie aan van de kademuur

Bron: Bewerkt van Praktijklab Corrosie & Isolatie, 2020



Figuur 17 Visuele voorstelling ophanging rekken VK0101

Bron: Eigen werk

5.3 REKKEN NORTH SEA PORT

Bij kademuur VK0101 zullen in totaal tien rekken worden opgehangen. Vijf daarvan behoren tot staalsoort Grade A en vijf tot staalsoort S355. Elk plaatje heeft een tagnummer met een specifieke kleur waarbij groen werd gebruikt om Grade A te kunnen identificeren en rood om S355 te onderscheiden (figuur 17). Door een beschikbare diepte van 17,55 meter kunnen er bij kademuur VK0801 extra rekken worden opgehangen. Hierbij zullen twaalf rekken worden bevestigd waarbij er zes onder Grade A vallen en zes onder S355. Deze rekken hebben een andere kleurcodering dan de plaatjes van VK0101. De identificatie van Grade A werd gedaan met behulp van witte tagnummers en die van S355 met grijze tagnummers (figuur 15).

De zonering van havenstructuren werd in acht genomen om de hoogte van de rekken te bepalen. Zoals op figuur 15 en 17 wordt weergegeven, worden de eerste twee rekken opgehangen op een hoogte die gelijk is aan het N.A.P. + 2m. Dit komt ongeveer overeen met het gemiddelde hoog water (G.H.W.), de plaats waar de *splash* zone zich bevindt en waar de meest intense corrosie voorkomt. Een andere belangrijke hoogte is het N.A.P - 2m. Dit stemt ongeveer overeen met het gemiddelde laag water (G.L.W). Hier treedt ALWC op, een hevige vorm van corrosie.

2 referenties kunnen gebruikt worden om de hoogte van de rekken te bepalen, enerzijds het Normaal Amsterdams Peil (N.A.P.) en anderzijds de kademuurwand (KMW). In Nederland worden alle hoogtes gemeten ten opzichte van éénzelfde niveau namelijk het N.A.P. Dit wordt beschouwd als het nulpunt, anders gezegd 0,0 m. Vaak wordt het vergeleken met het gemiddelde zeeniveau in de Noordzee ('Rijkswaterstaat', z.d.). Vermits de hoogte van de kademuurwand gekend is, kan men hieruit ook de hoogtes van de rekken gaan bepalen. De hoogte van kademuur VK0101 is 4,5 m en die van kademuur VK0801 is 5,0 m. Deze twee hoogtes zijn bepaald ten opzichte van het N.A.P. In tabel 3 worden de hoogtes weergegeven zowel t.o.v. het N.A.P. als t.o.v. de kademuurwand.

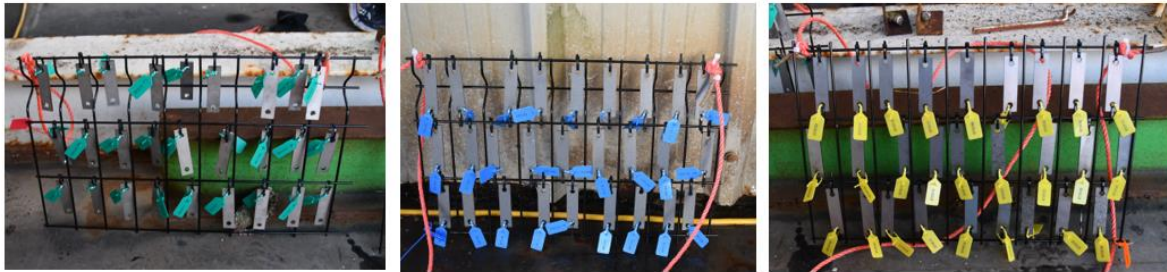
Tabel 3 Schematische weergave diepte rekken

Bron: Eigen werk

<i>Hoogte t.o.v. N.A.P.</i>	<i>Hoogte t.o.v. kademuur</i>	
	Kademuur VK0101	Kademuur VK0801
<i>N.A.P. + 2,0m</i>	KMW - 2,5m	KMW - 3,0m
<i>N.A.P. + 0,0m</i>	KMW - 4,5m	KMW - 5,0m
<i>N.A.P. - 2,0m</i>	KMW - 6,5m	KMW - 7,0m
<i>N.A.P. - 6,0m</i>	KMW - 10,5m	KMW - 11,0m
<i>N.A.P. - 11,0m</i>	KMW - 15,5m	KMW - 16,0m
<i>N.A.P. - 15,0m</i>	/	KMW - 20,0m

5.4 CODERING PLAATJES OOSTENDE

Tijdens het vervaardigen van de plaatjes werden er twee gaten in geboord. Deze werden gebruikt om de plaatjes aan het rek te bevestigen. Volgens de ASTM G1 moet er een code systeem worden toegepast indien er in het plaatje gaten zijn geboord. Elk plaatje kan afzonderlijk geïdentificeerd worden aan de hand van een tag-nummer. Ook werden drie verschillende kleuren gebruikt om de staalsoort aan te duiden. Zo werd blauw gebruikt ter identificatie van staalsoort Grade A, groen werd gebruikt om staalsoort 316L te onderscheiden en staalsoort S355 kan geïdentificeerd worden aan de hand van de gele tag. Aan elk rek hingen 27 plaatjes wat overeen kwam met negen tijdstippen. Maandelijks werden van elk rek drie coupons weggehaald voor verder onderzoek.



Figuur 18 Kleurcodering en nummering plaatjes

Bron: Eigen werk

Het gewichtsverlies van elk plaatje werd bepaald ten opzichte van een gemiddelde gewicht, bepaald aan de hand van 30 plaatjes. De weegschaal (Kern KB 650-2N) die gebruikt werd, heeft een nauwkeurigheid van 0,01 gram. De massa's van de plaatjes worden weergegeven in bijlage A.

5.5 INSTALLATIE REKKEN OOSTENDE

Op vrijdag 18 december 2020 werden tien rekken opgehangen aan het statisch platform. Aan weerszijde van het statisch platform zijn er haken beschikbaar die gebruikt werden voor het vastmaken van de rekken. Figuur 19 toont de manier waarop de rekken in het water werden geplaatst.



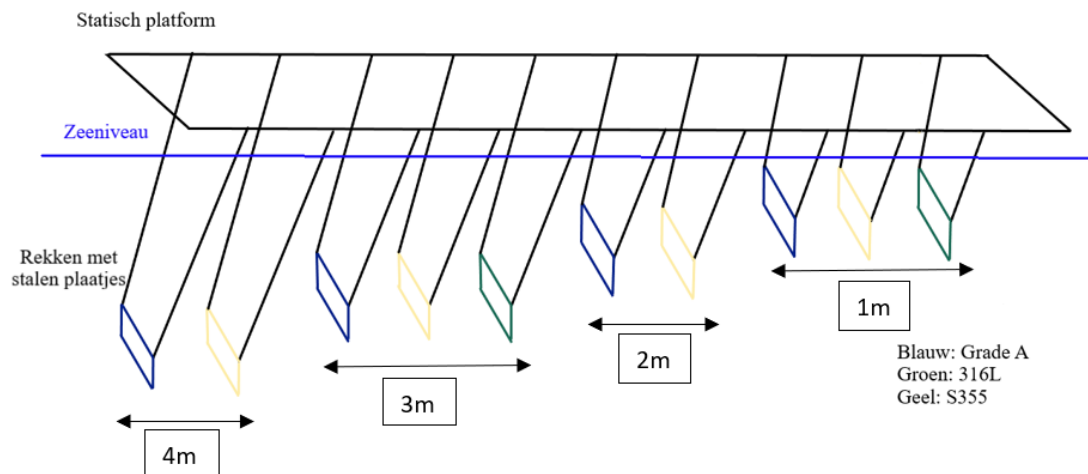
Figuur 19 Te water laten rekken

De rode vierhoek verwijst naar de haken waaraan de rekken werden bevestigd

Bron: Eigen werk

De tien rekken zijn verdeeld over vier diepten, respectievelijk 1,2,3 en 4 meter diep. Zoals uitgelegd in 5.2.2 werd enkel gebruik gemaakt van de linkerzijde van het platform. Dit doordat daar een grotere diepte beschikbaar is. De rekken voor op 4 meter diep, werden links aan het platform opgehangen. Deze rekken werden gevolgd door de rekken voor op 3 meter diep, daarna de rekken voor op 2 meter diep en tot slot de rekken voor op 1 meter diep. De rekken moesten in deze volgorde worden opgehangen om te vermijden dat de rekken van 4 meter diep op de grond komen te liggen. Figuur 20 geeft een visueel beeld van de ophanging van de verschillende rekken.

De rekken waaraan de Grade A en S355 plaatjes bevestigd zijn, bevinden zich op de vier verschillende diepten terwijl de rekken met de plaatjes van staalsoort 316L, zich maar op twee diepten bevinden namelijk een diepte van 1 en 3 meter. Naast het feit dat ze zijn opgehangen volgens diepte, is het ook evident dat een bepaalde volgorde zichtbaar is in de ophanging van deze rekken. Beginnende van links hangt er op elke diepte eerste een rek met Grade A plaatjes, gevolgd door het rek met S355 plaatjes en dan een rek met 316 L plaatjes.



Figuur 20 Opstelling rekken Oostende

Bron: Eigen werk

De plaatjes die bevestigd zijn geweest aan het statische platform in Oostende bestaan uit drie staalsoorten namelijk Grade A, S355 en 316L. De verschillende plaatjes hebben elks een dimensie van 3 X 20 X 80mm³. Deze dimensie werd ook gebruikt voor de berekeningen in verband met de corrosiesnelheid.

5.6 PRAKTISCHE UITVOERING

Het is belangrijk dat een procedure uitgeschreven wordt voor het maandelijks inspecteren van de plaatjes. Vooraleer de plaatjes onderzocht kunnen worden, moeten de rekken uit het water gehaald worden, gereinigd worden en visueel geïnspecteerd worden. In de volgende paragrafen zal worden beschreven hoe men te werk ging. De eerste keer dat de procedure volledig is uitgevoerd geweest, was op 23 januari 2021.

Bij het uitvoeren van de procedure wordt er veel belang gehecht aan de veiligheid van de persoon. Bijgevolg dient zowel een reddingsvest als fluoehesje gedragen te worden indien men tewerk gaat op het statische platform.

5.6.1 PROCEDURE

De eerste stap van de procedure was de verschillende rekken uit het water halen. De rekken werden één voor één uit het water gehaald, beginnende met de rekken van op 4 meter diep en eindigend met de rekken van op 1 meter diep. Nadat een rek uit het water was gehaald, werd deze tegen de muur geplaatst en in zijn geheel gefotografeerd. Belangrijk is dat de rekken in de zelfde volgorde als ze in het water hingen tegen de muur werden geplaatst. Dit vergemakkelijkte het nemen van de coupons, alsook het terug plaatsen van de rekken nadat al de plaatjes werden verzameld. Eens de tien rekken naast elkaar geplaatst waren, werden de rekken afzonderlijk goed bekeken zodat de evolutie van de plaatjes in functie van tijd beoordeeld kon worden. Er werd hierbij gekeken in welke mate de plaatjes geroest waren, de snelheid waarmee de roest afbrokkelde en de aangroei dat zich op de plaatjes had ontwikkelt. Dit werd ook neergeschreven. In 6.2 wordt de evolutie van de roest en aangroei beschreven per staalsoort en diepte. Nadat de rekken in hun geheel waren gefotografeerd en geïnspecteerd, kon men beginnen met het afknippen van de gewenste plaatjes. Per rek werden drie plaatjes weggenomen. Deze plaatjes werden drooggemaakt en vervolgens ingewikkeld in papier of keukenrol. Op de keukenrol werd nadien zowel de diepte als de staalsoort van de plaatjes geschreven. Per staalsoort werden ze vervolgens in een luchtdichte doos bijgehouden voor verder onderzoek. Eens de gewenste plaatjes waren verzameld, ingewikkeld in keukenrol en in een luchtdichte doos waren geplaatst, konden de rekken terug worden opgehangen. De volgorde die gevolgd werd voor de ophanging van de rekken was afhankelijk van de richting van de stroming. Zo werd vermeden dat de rekken in elkaar verstrengeld raakten. Indien er een ENE stroming was, dan begon men met het plaatsen van de rekken op een diepte van vier meter. Dit werd vervolgd door de rekken van op een diepte van drie meter enz. De laatste stap van de procedure was het afzonderlijk fotograferen van de verzamelde plaatjes. Men maakte gebruik van een witte muur als achtergrond. Bij elke foto dat genomen werd, moest het tagnummer zichtbaar zijn. Men ging tewerk per diepte en per staalsoort. Om een voorbeeld te geven: Eerst werden drie afzonderlijke foto's genomen van de S355 stalen plaatjes vanop één meter diep, vervolgd door drie foto's van de plaatjes vanop twee meter diep, drie meter en tot slot de plaatjes vanop vier meter diep. Deze methode werd herhaald bij de andere staalsoorten. Na het fotograferen van de plaatjes, werden de plaatjes terug per staalsoort ingewikkeld in nieuw papier of keukenrol. Zo vermeid men de blootstelling van de plaatjes aan een vochtige omgeving gedurende een bepaalde tijd en dat het corrosieproces verder kon plaatsvinden.

5.6.2 REINIGEN PLAATJES

Het reinigen van de plaatjes werd gedaan volgens de ASTM G1 standaarden. Na het reinigen werd het gewichtsverlies en de corrosiesnelheid van de plaatjes te bepaald. Afhankelijk van de staalsoort, werden er verschillende reinigingsmethoden toegepast:

- i. 50g natriumhydroxide (NaOH), 1000 ml gedemineraliseerd water met 200g zinkkorrels, temperatuur 80-90°C, tijd 30-40 minuten
- ii. 200g NaOH, 1000 ml gedemineraliseerd water met 20g zinkkorrels, temperatuur 80-90°C, tijd 30-40 minuten
- iii. 200g NaOH, 1000 ml gedemineraliseerd water met 50 g zinkkorrels, kooktemperatuur, tijd 20 minuten
- iv. Azijn, tijd 30 minuten, gevolgd door het zandstralen van de plaatjes



Figuur 21 Coupons na reinigingsproces

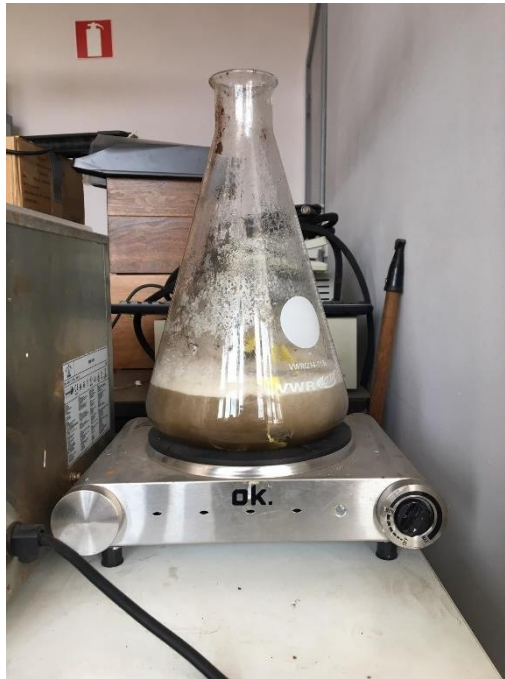
Bron: Eigen werk

- ii De Grade A plaatjes die verzameld zijn geweest na een periode van twee maanden, zijn in een oplossing geplaatst van 1000 ml gedemineraliseerd water, 200g NaOH en 20g zinkkorrels. De 12 plaatjes werden verdeeld over vier bekersglazen waar telkens $\frac{1}{4}$ van de oplossing in aanwezig was. Deze vier bekersglazen werden geplaatst in een bak gevuld met water, die op continue basis warm werd gehouden. De bak werd afgedekt waardoor de warmte niet kon ontsnappen en waardoor de temperatuur stabiel bleef. Een gemiddelde temperatuur van 80°C werd bereikt. De coupons werden gedurende een periode van 40 minuten in de verwarmde oplossing gehouden. Het was evident dat eens de oplossing in de bekersglazen de gevraagde temperatuur bereikt had, dat de

reactie tussen de roest en de oplossing op gang kwam. Na een periode van 40 minuten werden enkele plaatjes uit de oplossing gehaald om visueel te bepalen hoeveel roest was weg gereageerd. Na een tijdsverdubbeling, werden verscheidene plaatjes uit de oplossing gehaald en visueel nagekeken. Op verschillende plaatjes was de roest al verdwenen. De 12 plaatjes zijn vervolgens allemaal uit de oplossingen gehaald, afgespoeld met water en drooggedept. Nadien werden de plaatjes gewogen.

- iii De derde methode werd toegepast voor het reinigen van de 316L en S355 plaatjes. Hierbij werd een erlenmeyer gebruikt met een capaciteit van 3 liter. Voor het reinigen van 18 plaatjes werd een oplossing gebruikt van 300g NaOH, 75g zinkkorrels en 1500ml gedemineraliseerd water. Het is een anderhalve keer de oplossing die vermeld staat in 5.6.2. Door het feit dat de oplossing aan kooktemperatuur gehouden moest worden, werd beroep gedaan op een elektronische kookplaat. Het was zeer duidelijk dat eens de temperatuur bereikt was, de reactie tussen de roest en het metaal zeer hevig was. Na verloop van tijd vond er ook schuimvorming plaats. Dit was het moment waarop de kookplaat afgezet werd. Eens de schuimvorming was afgenomen, kon de kookplaat weer op het maximum gezet worden. Om na een periode van 20 minuten te plaatjes te inspecteren, werd de oplossing over gegoten in drie bekersglazen.

Vermits met het blote oog geen roest te detecteren was op de 316L plaatjes, zijn deze na een periode van 20 minuten uit de oplossing gehaald, afgespoeld en afgedroogd geweest. Vervolgens zijn deze gewogen. De S355 plaatjes daarentegen, werden terug in de oplossing geplaatst in de erlenmeyer aangezien niet alle roest was verdwenen. De oplossing werd terug verwarmd tot kooktemperatuur. De plaatjes zijn nog gedurende een periode van 40 minuten in de oplossing gebleven. Na drie periodes van 20 minuten, zijn de plaatjes uit de oplossing gehaald aangezien de meeste roest was verdwenen. Daarna werden ze afgespoeld en afgedroogd en tot slot werden ze gewogen.



Figuur 22 S355 + 326L coupons in oplossing met beperkte schuimvorming

Bron: Eigen werk

De schuimontwikkeling bij de plaatjes van tijdstip twee en drie bleef beperkt zoals zichtbaar op figuur 22. Bij de coupons van tijdstip vier was dit absoluut niet het geval. Opvallend aan de plaatjes van het vierde tijdstip was de ontwikkeling van zeepokken. Dit kan een rede zijn dat de schuimvorming zodanig toenam dat de oplossing overkookte. Hierdoor werd de kookplaat verscheidene keren afgezet om te voorkomen dat de oplossing terug overliep.

5.7 GEWICHTSVERLIES EN CORROSIESNELHEID

Om de corrosiesnelheid van de plaatjes te bepalen, werd telkens na verloop van ongeveer één maand de roest van de plaatjes verwijderd. Alvorens de plaatjes blootgesteld werden aan zeewater, werd voor elke staalsoort aan de hand van 30 plaatjes een gemiddeld gewicht bepaald. Zoals eerder vermeld, werden per diepte drie plaatjes onderzocht. Het gewicht van deze plaatjes werd telkens bepaald nadat de plaatjes gereinigd zijn geweest. Per diepte werd vervolgens voor elke staalsoort een gemiddeld gewicht bepaald. Het gewichtsverlies werd nadien bepaald ten opzichte van het gemiddeld gewicht bepaald voor de blootstelling aan zeewater. Deze gemiddelde gewichtsaftnames werden omgerekend naar gemiddelde corrosiesnelheden met behulp van volgende vergelijking:

$$\text{Corrosie snelheid (g/m}^2\text{.h)} = (K * W) / (A * T_1 * D)$$

$$\begin{aligned} \text{Corrosie snelheid (g/m}^2\text{.j)} &= (1,00 * 10^4 * \cancel{D} * W * 365) / (A * T_2 * \cancel{D}) \\ &= (1,00 * 10^4 * W * 365) / (A * T_2) \end{aligned}$$

Waarbij:

- K = een constante in de corrosie snelheid vergelijking
- W = gewichtsverlies in gram
- A = oppervlakte in cm²
- T₁ = blootstellingstijd in uren
- T₂ = blootstellingstijd in dagen
- D = dichtheid in g/cm³

Belangrijk is dat indien de corrosie snelheid wordt vastgesteld aan de hand van het gewichtsverlies, dat men er van uit gaat dat het gewichtsverlies een gevolg is van algemene corrosie en niet van lokale corrosie zoals put corrosie (ASTM G31).

1,00 X 10⁴ X D is de constante die gebruikt wordt in de vergelijking. Door deze waarde als constante te gebruiken, wordt de corrosie snelheid bijgevolg uitgedrukt in volgende eenheden: gram per vierkante meter per uur (g/m².h). In verdere berekeningen zal de corrosie snelheid worden uitgedrukt in gram per vierkante meter per jaar (g/m².j).

De densiteit wordt geïntegreerd in de constante, wat maakt dat ze zich zowel in de teller als in de noemer bevindt waardoor deze ten opzichte van elkaar wegvallen. De densiteit wordt niet in acht genomen met de uiteindelijke berekeningen.

$$\text{Gewichtsverlies (W)} = \text{gem gewicht 30 plaatjes} - \text{gem gewicht na reiniging}$$

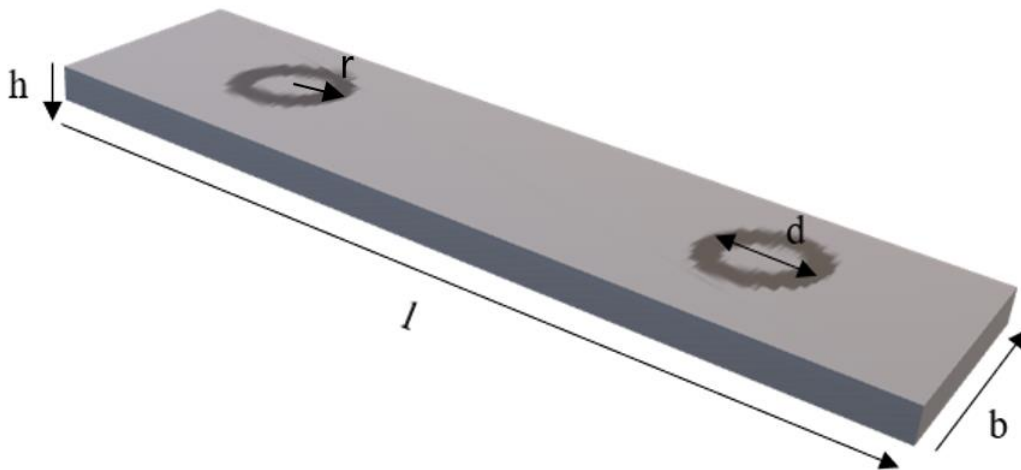
$$\text{Oppervlakte (A)} = \text{opp. balk} + 2 * \text{opp mantel cilinder} - 4 * \text{opp cirkel}$$

$$= 2(l * b) + 2(b * h) + 2(l * h) + 2\pi(d * h) - 4\pi(r^2)$$

$$= 2(8,0 * 2,0) \text{ cm}^2 + 2(2,0 * 0,3) \text{ cm}^2 + 2(8,0 * 0,3) \text{ cm}^2 + 2\pi(0,4 * 0,3) \text{ cm}^2 - 4\pi(0,4^2) \text{ cm}^2$$

$$= 38,75 \text{ cm}^2 - 2,01 \text{ cm}^2$$

$$= 36,74 \text{ cm}^2$$



Figuur 23 Dimensie plaatje

Bron: Eigen werk

5.8 DATA-ANALYSE

De resultaten bekomen bij het experiment worden statistisch geanalyseerd aan de hand van de variantieanalyse (ANOVA). De ANOVA is een test die bepaalt of er statistisch significante verschillen zijn tussen de gemiddelde van drie of meer onafhankelijke groepen. Indien de ANOVA test gebruikt wordt om gemiddelden te vergelijken, dan stelt de nulhypothese dat de verschillende groep gemiddelden gelijk zijn ($\alpha > 0,05$). In tegenstelling tot de alternatieve hypothese, deze zegt dat er minstens één gemiddelde verschilt van de andere gemiddelden ($\alpha < 0,05$). De ANOVA test geeft niet aan welke groepen significant verschillen. Om dit te achterhalen wordt er beroep gedaan op een post hoc test namelijk de Bonferroni test. Deze test stelt vast dat α gedeeld moet worden door het aantal vergelijkingen die men test. Dit geldt ook voor de P-waarde die als statistisch significant wordt beschouwd.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_k$$

$$H_a = \text{Minstens één gemiddelde verschilt van de andere gemiddelden}$$

$$\text{Bonferonni } \alpha = \frac{\alpha}{\text{aantal vergelijkingen}} = 0,0083$$

Twee nulhypothese worden in deze thesis onderzocht:

- De tijd heeft geen invloed op de corrosiesnelheid
- De diepte heeft geen invloed op de corrosiesnelheid

6 RESULTATEN

6.1 OPTIMALISATIE REINIGINGSPROCEDURE

De Grade A plaatjes zijn op twee verschillende manieren gereinigd geweest namelijk volgens de eerste en de tweede methode opgesomd in 5.6.2. Deze twee methoden worden specifiek gebruikt voor ijzer of staal.

De eerste methode geeft aan dat de Grade A plaatjes gedurende een periode van 40 minuten in een oplossing van 50 g NaOH en 200 g zinkkorrels geplaatst moest worden. Hierbij werd er rekening gehouden met de gevraagde temperatuur. De oplossing is op een temperatuur van 80°C gehouden. Nadat 40 minuten waren verstreken, was weinig roest verdwenen. Dit kwam doordat er nauwelijks een reactie plaatsvond tussen de roest en de oplossing. Eveneens na een tijdsverdubbeling, was er weinig verschil op te merken. De eerste reinigingsmethode voorgeschreven door ASTM bleek ineffectief te zijn en is niet herbruikt geweest voor de volgende tijdstippen. Om de plaatjes van de drie volgende tijdstippen te reinigen is de tweede methode gebruikt geweest. De oplossing bevatte 200 g NaOH, 1000 ml gedemineraliseerd water met 20 g zinkkorrels. In vergelijking met de eerste methode was het duidelijk dat meer roest was weg gereageerd. Dit komt doordat er vier keer zoveel NaOH gebruikt geweest is in vergelijking met de eerste methode. Hierdoor was de reactie veel effectiever.

Het is belangrijk dat men bij de reinigingsprocedure rekening houdt met het aantal plaatjes er in de oplossing geplaatst worden. Bij Grade A, wordt er gesproken over twaalf plaatjes per 1000 ml gedemineraliseerd water. Dit betekent dat wanneer er vier bekers gebruikt worden dat elk bekers gevuld wordt met $\frac{1}{4}$ van de oplossing en dat in elk bekers slechts drie plaatjes aanwezig mogen zijn. Indien er één coupon meer in ligt, dan heeft dit als gevolg dat één van de plaatjes minder reageert met de oplossing dan in vergelijking met de andere drie plaatjes. Dit resulteert in een plaatje dat langer in de oplossing zal moeten blijven en dit is niet gewild.

De vierde methode die is aangehaald in 5.6.2 is een methode dat niet is voorgeschreven door de ASTM. Deze methode is de enige methode die gebruikt kan worden voor het reinigen van de drie verschillende staalsoorten gebruikt in dit onderzoek. Bij deze methode heeft men zes Grade A plaatjes in 300 ml azijn geplaatst gedurende een periode van 30 minuten. Door de

ontwikkeling van luchtbellen, kon afgeleid worden dat ook azijn met de roest van op de plaatjes reageert (figuur 24). Na een periode van een half uur werden de plaatjes met water gereinigd, afgedroogd en gewogen. Er was nog zeer veel corrosieproduct aanwezig. Vervolgens zijn deze zes plaatjes gezandstraald om zo de overige roestvlekken te kunnen verwijderen. Hierna werden deze plaatjes terug gewogen.



Figuur 24 Ontwikkeling van luchtbellen bij de plaatjes in de oplossing azijn

Bron: Eigen werk

Figuur 25 geeft de plaatjes weer die werden gezandstraald. Op figuur 26 worden de plaatjes weergegeven die geëtst werden met de NaOH oplossing. Een duidelijk verschil is op te merken tussen de twee groepen plaatjes. De gezandstraalde plaatjes lijken zeer hard op de oorspronkelijke plaatjes. De plaatjes voelen egaal aan en het corrosieproduct is volledig verdwenen. De plaatjes vanop figuur 25 daarentegen vertonen veel kleurschakeringen alsook is het oppervlak oneffen en er is nog enige slijmlaag of corrosieproduct aanwezig. Wat ook op te merken is, is dat er vrijwel geen verschil is in gewichtsverlies tussen de geëtste plaatjes in NaOH of de gezandstraalde plaatjes. Deze beide reinigingsmethoden worden aangeraden.



Figuur 25 Gezandstraalde plaatjes

Bron: Eigen werk



figuur 26 Geëtste plaatjes – NaOH oplossing

De rode vierhoeken verwijzen naar de resterende slijmlaag of corrosieproduct

Bron: Eigen werk

6.2 VISUELE INSPECTIE VAN DE PLAATJES

6.2.1 GRADE A

Op één meter diep zijn plaatjes van de drie eerste tijdstippen zeer gelijkend (tabel 4, 1 meter). Ze vertonen alle drie een dikke roest laag, die zeer gemakkelijk afbrokkelt. De coupons zijn onderhevig aan een uniforme corrosie daar ze helemaal onder geroest zijn. De coupon van het vierde tijdstip ziet er lichtjes anders uit. Hoewel er nog altijd enkele dikke roestvlekken aanwezig zijn, maken deze plaats voor een dunne roestlaag. Bij een groot deel van het oppervlak is de roest al egaler. Op deze diepte zijn er nog geen macro-organismen te zien. Op een diepte van twee meter is het plaatje van het eerste tijdstip volledig geroest en heeft het op vele plaatsen een dikke roest laag. Deze brokkelde zeer gemakkelijk af in kleine stukjes. Naarmate de tijd vordert, vertonen de plaatjes een vermindering in roestdikte en neemt de frequentie van dikke roestvlekken af. Zo heeft het derde plaatje er minder dan op tijdstip één en twee. Bijzonder aan tijdstip vier is de ontwikkeling van macro-organismen. Op het vierde plaatje zijn zeepokken in de ontwikkelingen en zijn deze al sterk aanwezig (tabel 4, 2 meter). Op een diepte van drie meter vertonen de plaatjes van de eerste en tweede maand enkele gelijkenissen (tabel 4, 3 meter). Zo worden beide oppervlaktes gekenmerkt door enkele dikkere roestvlekken en een zeer dunne roestlaag die op vele plaatsen aanwezig is. Het plaatje van de derde maand daarentegen vertoont een dikkere roestlaag over vrijwel het hele oppervlak. Uit de foto kan worden afgeleid dat de roest zeer los is en gemakkelijk afbrokkelt. Wat goed op te merken is bij tijdstip vier, is dat de dikkere roestlaag plaats maakt voor een dunne roestlaag en de ontwikkeling van zeepokken. Deze pokken nemen meer dan de helft van het oppervlak in beslag (tabel 4, 3 meter). Het is een geconcentreerde aangroei. Op vier meter diep vertoont de coupon van de eerste maand over vrijwel het hele oppervlak dikkere roestvlekken. De plaatjes van tijdstip twee en drie daarentegen, vertonen slechts enkele dikke roestvlekken. Een deel van het oppervlak is al egaal. Ook hier is sprake van uniforme corrosie, aangezien roestvorming plaats vind over het hele oppervlak. Het plaatje van het vierde tijdstip wordt gekenmerkt door een verspreide aangroei aan zeepokken (tabel 4, 4 meter).

Naast het vergelijken van de plaatjes per diepte, kunnen de plaatjes ook vergeleken worden per tijdstip. Na de eerste maand worden de plaatjes van de vier verschillende diepten gekenmerkt door een dikke roestvorming en plaatselijk dikke roestvlekken. Na een periode

van twee maanden zijn er enkele verschillen op te merken tussen de plaatjes op de vier diepten. De dikke roestlaag en de vele roestvlekken maken plaats voor een dunnere roestlaag en slechts enkele roestvlekken naarmate de diepte toeneemt. Met andere woorden het plaatje van op vier meter diep wordt gekenmerkt door een egaler oppervlakte dan het plaatje van op één meter diep en heeft slechts enkele roestvlekken. Na een periode van drie maanden is duidelijk dat de dikke roestvlekken op één meter diep plaats maken voor een egaler oppervlakte op vier meter diep. Ook hier maakt de dikke roestlaag plaats voor een egalere roestlaag naarmate de diepte toeneemt. Op tijdstip vier zijn de plaatjes onderhevig aan de ontwikkeling van zeepokken met uitzondering van het plaatje op een diepte van één meter.

6.2.2 S355

Op een diepte van één meter is het zeer opvallend dat plaatjes van de eerste drie maanden worden gekenmerkt worden door plaatselijke corrosie (tabel 5, 1 meter). De roestvlekken op deze diepte zijn ook dikker dan de roestvlekken bij Grade A. Bovendien is de roestvorming zeer los en brokkelt deze zeer gemakkelijk af. Na een periode van vier maanden beginnen zeepokken zicht te ontwikkelen, enkele zijn al zichtbaar (tabel 5, 1 meter).

Op twee meter diep zijn de plaatjes van de eerste drie maanden onderhevig aan lokale corrosie. De eerste twee plaatjes zijn zeer gelijkend namelijk door het feit dat de roestvorming voornamelijk plaatsvindt rond de openingen en aan de zijkanten van de plaatjes. Ook is de biofilm duidelijk zichtbaar (tabel 5, 2 meter). Het derde plaatje daarentegen vertoont veel dikkere roestvlekken. Daarnaast is het plaatje meer bedekt. In tegenstelling tot de drie eerste plaatjes is vierde plaatje volledig geroest en vindt er zich een geconcentreerde ontwikkeling plaats van zeepokken (tabel 5, 2 meter).

Op een diepte van drie meter vertonen de plaatjes van de eerste drie tijdstippen gelijkenissen. Ze worden gekenmerkt door plaatselijke roestvorming met dikkere roestvlekken. De roestvlekken zijn minder uitgesproken dan de plaatjes van dezelfde staalsoort op één en twee meter diep. Wat ook duidelijk zichtbaar is, is de biofilm. Meer dan de helft van het oppervlak wordt gekenmerkt door filmvorming, beige kleur (tabel 5, 3 meter). Op het plaatje van de vierde maand zijn de roestvlekken voornamelijk geconcentreerd rond de openingen. Op de rest van het oppervlak is de biofilm aanwezig, ook zijn er zeepokken in ontwikkeling. Ze zijn meer verspreid over het oppervlak (tabel 5, 3 meter).

Op een diepte van vier meter worden de vier plaatjes gekenmerkt door lokale roestvorming en deze is voornamelijk zichtbaar rond de openingen (tabel 5, 4 meter). Het plaatje van de eerste maand verschilt lichtjes van de andere plaatjes wanneer de biofilm in acht wordt genomen. De

biofilm is ook plaatselijk terwijl bij de plaatjes van de drie andere maanden de biofilm over het hele oppervlak aanwezig is (tabel 5, 4 meter). Op het vierde plaatje zijn zeepokken in ontwikkeling. Er zijn er enkele zichtbaar.

















Er kan ook een vergelijking gemaakt worden tussen de plaatjes genomen op éénzelfde tijdstip. Na een periode van één maand worden de vier plaatjes gekenmerkt door plaatselijke corrosie. De frequentie van de roestvlekken neemt af naarmate de diepte toeneemt. Zo wordt het plaatje van op één meter gekenmerkt door meerdere roestvlekken verspreid over het hele plaatje terwijl het plaatje van op vier meter gekenmerkt wordt door enkele roestvlekken rond de openingen. Ook na een periode van twee en drie maand is deze trend zichtbaar. Het aantal roestvlekken neemt af in functie van diepte en deze roestvlekken zijn op grotere diepte meer geconcentreerd rond de openingen. De plaatjes die weggenomen zijn na een periode van vier maanden vertonen heel wat verschillen met de plaatjes van de vorige tijdstipen. Het grootste verschil is de ontwikkeling van zeepokken. Op één en vier meter diep zijn er enkele in ontwikkeling terwijl op twee en drie meter diep deze al zeer geconcentreerd aanwezig zijn op het oppervlak. Op de meeste plaatjes is de biofilm ook sterk aanwezig.

6.2.3 316L

Op één meter diep vertonen de plaatjes van de verschillende tijdstipen geen roestvorming, ook is er geen biofilm ontwikkeling met het blote oog te zien (tabel 6, 1 meter). Ook de plaatjes van op drie meter diep vertonen geen roestvorming. Wat wel opmerkelijk is dat het plaatje van op tijdstip vier onderhevig is aan de ontwikkeling van zeepokken (tabel 6, 3 meter).

Tabel 4 Foto's van Grade A plaatjes op verschillende tijdstippen en diepten

















Bron Eigen werk

	Maand 1	Maand 2	Maand 3	Maand 4
1 meter				
2 meter				
3 meter				
4 meter				

Tabel 5 Foto's van S355 plaatjes op verschillende tijdstippen en diepten









De rode vierhoek duidt op de ontwikkeling van enkele zeepokken

Bron: Eigen werk

	Maand 1	Maand 2	Maand 3	Maand 4
1 meter				
2 meter				
3 meter				
4 meter				

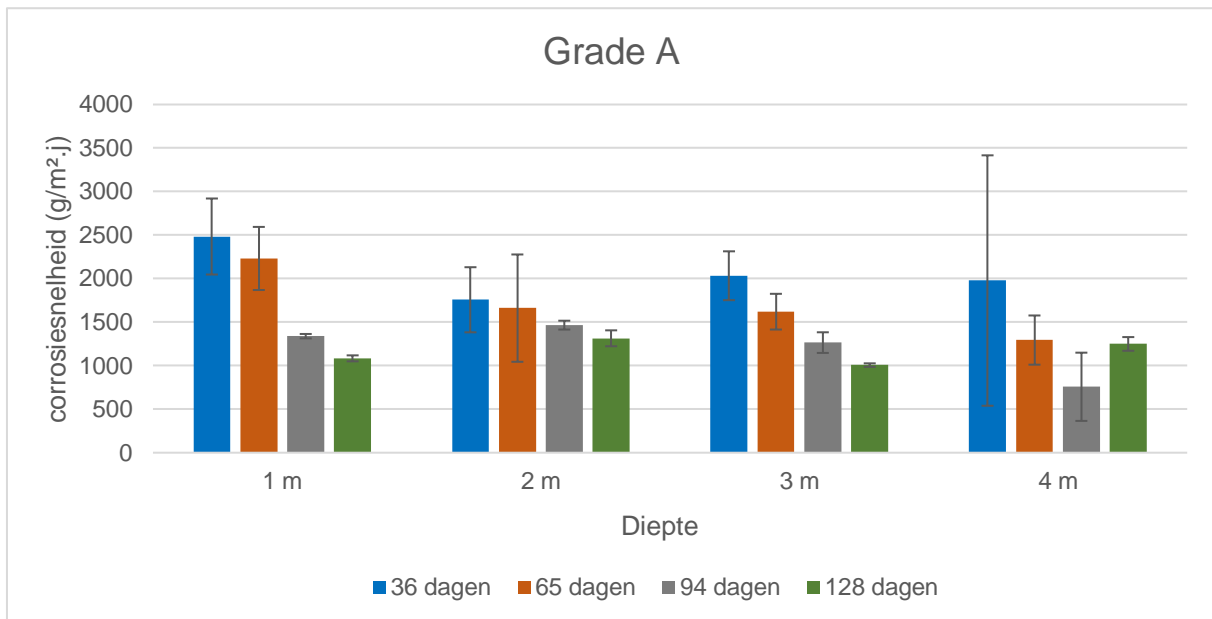
Tabel 6 Foto's van 316L plaatjes op verschillende tijdstippen en diepten

Bron: Eigen werk

	Maand 1	Maand 2	Maand 3	Maand 4
1 meter	 A rectangular 316L stainless steel plate with a green tag attached to a hole at the top. The plate is relatively clean and shows minimal discoloration.	 The plate shows more significant yellowish-brown discoloration and some surface corrosion compared to Month 1.	 The plate is heavily discolored with a dark, mottled appearance, indicating advanced corrosion.	 The plate is almost entirely covered in a dark, dense layer of corrosion, with very little of the original metal surface visible.
3 meter	 The plate is clean and shows no signs of corrosion.	 The plate shows some light yellowish discoloration, particularly around the hole where the tag is attached.	 The plate is heavily discolored with a dark, mottled appearance, indicating advanced corrosion.	 The plate is almost entirely covered in a dark, dense layer of corrosion, with very little of the original metal surface visible.

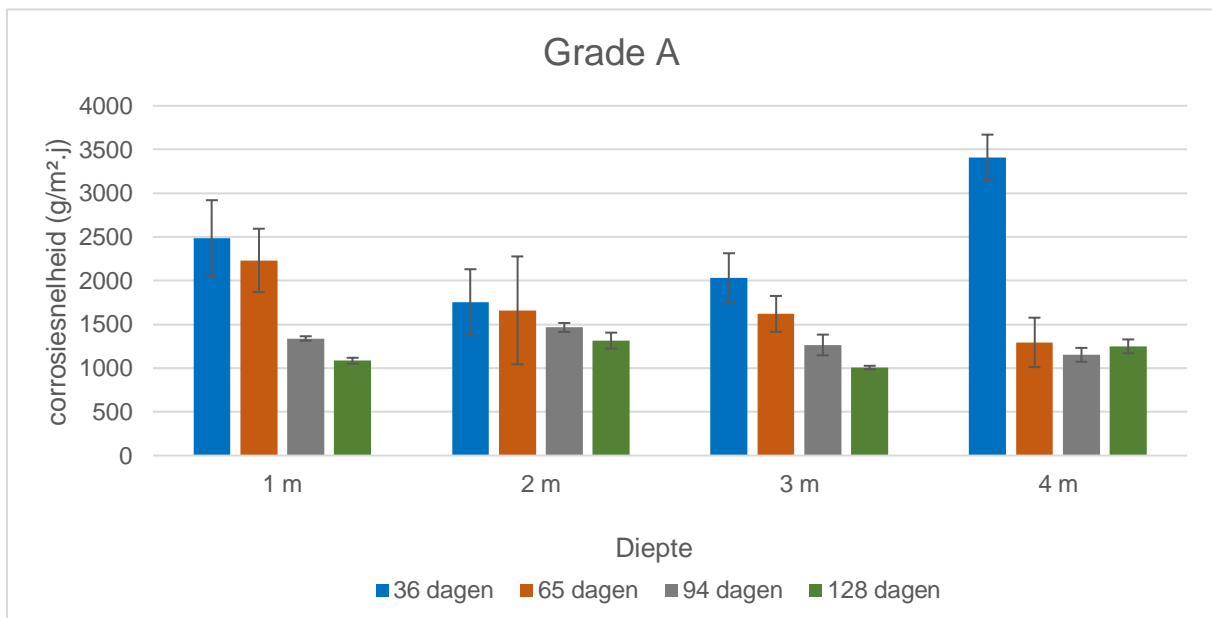
6.3 EXPERIMENT

6.3.1 CORROSIESNELHEID GRADE A



Figuur 27 Variatie in corrosiesnelheid i.f.v. diepte voor Grade A met uitschieter

Bron: Eigen werk



Figuur 28 Variatie in corrosiesnelheid i.f.v. diepte voor Grade A zonder uitschieter

Bron: Eigen werk

Uit figuur 27 is af te leiden dat zowel op één, twee als drie meter diep dezelfde trend waar te nemen is namelijk dat de eerste maand wordt gekenmerkt door de hoogste corrosiesnelheid gevolgd door een daling in functie van tijd. Op twee meter diep is de afname in corrosiesnelheid het meest stabiel wat betekent dat het verschil in afname tussen de verschillende tijdstippen niet veel van elkaar verschilt. De corrosiesnelheden op deze diepte zijn $1756,9 \pm 373,7 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$; $1660,8 \pm 616,5 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$; $1465,5 \pm 50,8 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$ en $1314,2 \pm 91,4 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$ respectievelijk. Door de kleine verschillen in corrosiesnelheid resulteert dit in een gemiddeld hogere corrosiesnelheid over de vier maanden. Ook op drie meter diep is een stabielere daling op te merken. Deze daling wordt gekenmerkt door een sterkere afname in corrosiesnelheid tussen de vier verschillende tijdstippen. Bovendien neemt de snelheid waarmee de corrosiesnelheid afneemt, geleidelijk aan af naarmate de tijd vordert. Zo is het verschil in corrosiesnelheid tussen tijdstip één en twee $412,8 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$; tussen tijdstip twee en drie $355,3 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$; en tussen tijdstip drie en vier $258,3 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$.

De plaatjes van op één meter diep worden gekenmerkt door een hogere corrosiesnelheid op tijdstippen één en twee. Deze zijn namelijk $2483,6 \pm 436,6 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$ en $2231,4 \pm 362,4 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$. De afname in corrosiesnelheid is het grootste tussen maand twee en maand drie en de corrosiesnelheid neemt vervolgens trager af tussen maand drie en maand vier. De plaatjes van op één meter diep hebben gemiddeld de hoogste corrosiesnelheid.

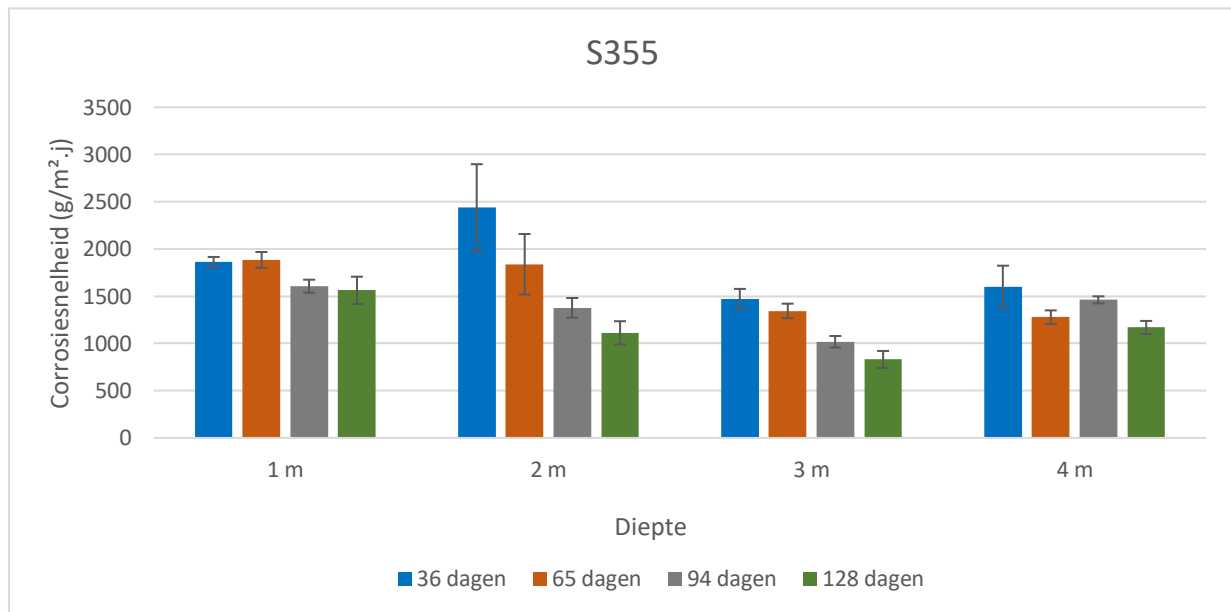
Op vier meter diep is er een schommeling waar te nemen (figuur 27). De eerste maand wordt gekenmerkt door de hoogste corrosiesnelheid, deze wordt gevolgd door een daling in corrosiesnelheid na een periode van twee en drie maanden. Vervolgens vindt er een stijging plaats na een periode van vier maanden. Ook hier kan niet uitgesloten worden dat een dalende trend zich niet kan voordoen op volgende tijdstippen.

Wat zeer opvallend is op vier meter diep, is dat de foutbalk op tijdstip één ontzettend groot is. Dit is te wijten aan een plaatje dat niet beschikte over twee openingen maar één opening. Dit resulteert automatisch in een hoger gewicht. In de bijlage is duidelijk dat men een gewichtstoename heeft ten opzichte van het gemiddelde gewicht dat bepaald werd aan de hand van 30 plaatjes. Indien de uitschieter mee in acht wordt genomen dan is de uiteindelijke corrosiesnelheid op tijdstip één gelijk aan $1977,7 \pm 1438,3 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$. Deze waarde is terug te vinden op figuur 27. Anderzijds, indien de uitschieter niet in acht wordt genomen met de berekeningen dan kan worden afgeleid uit figuur 28 dat de corrosiesnelheid op tijdstip één gelijk wordt gesteld aan $3408,1 \pm 266,3 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$. De foutbalk daarentegen is 5,4 keer kleiner

dan wanneer de uitschieter wel in beschouwing wordt genomen. Op tijdstip drie van deze diepte had ook één van de drie plaatjes maar één opening. Indien deze uitschieter buiten beschouwing wordt gelaten dan kan worden afgeleid uit figuur 28 dat de corrosiesnelheid hoger ligt dan wanneer deze wel in acht wordt genomen zoals in figuur 27.

Bij Grade A variëren de gemiddelde corrosiesnelheden rond de 1500 g/m².j.

6.3.2 CORROSIESNELHEID S355



Figuur 29 Variatie in corrosiesnelheid i.f.v. diepte voor staalsoort S355

Bron: Eigen werk

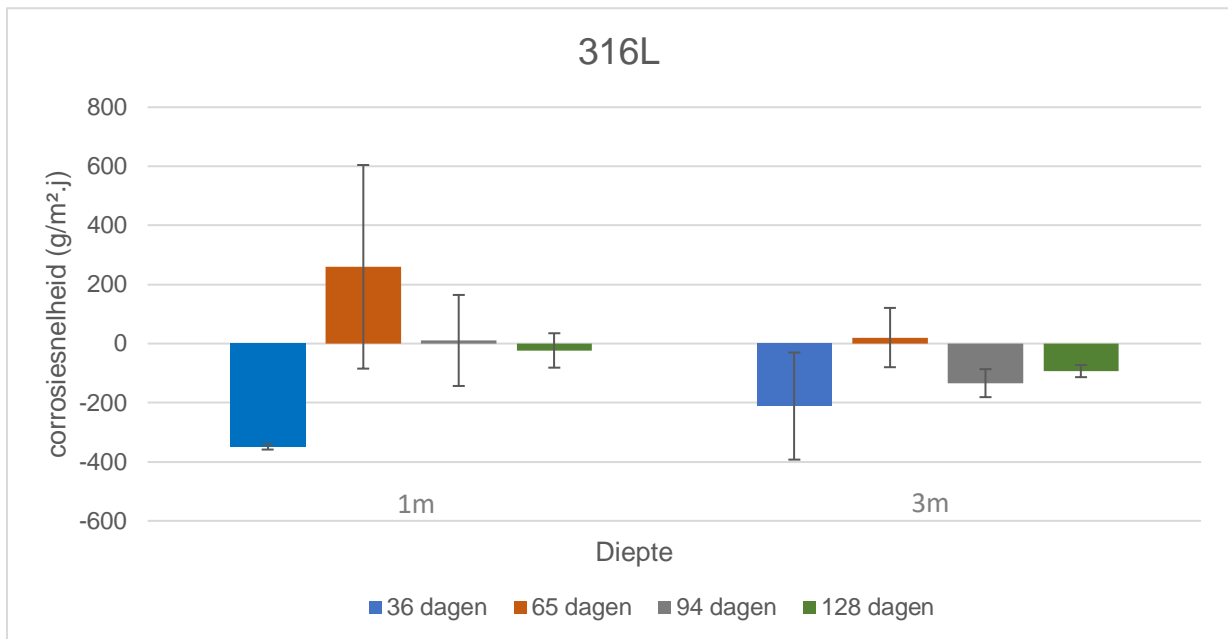
Figuur 29 vertoont hoe de corrosiesnelheid voor roestvast staal S355 verandert in functie van diepte over vier verschillende tijdstippen. Opmerkelijk is dat zowel de plaatjes van op twee meter diep als de plaatjes van op drie meter diep worden gekenmerkt door een gelijkaardig patroon namelijk een bijna evenwichtige afname in corrosiesnelheid naarmate de tijd vordert. De afname van de corrosiesnelheid op drie meter diep is vrijwel lineair. Wat ook af te leiden is, is dat deze snelheidsafname over de vier tijdstippen niet zo groot als de afname in corrosiesnelheid op twee meter diep. Alsook hebben de plaatjes van op drie meter diep, de laagste corrosiesnelheid over de vier tijdstippen. Wat zeer duidelijk zichtbaar is op figuur 29, is dat de plaatjes van op twee meter diep na een periode van één maand de hoogste corrosiesnelheid hebben met name $2437,6 \pm 460,2$ g/m².j. Bovendien neemt de

corrosiesnelheid op deze diepte ook het snelste af in functie van tijd met andere woorden het verschil in corrosiesnelheid tussen twee opeenvolgende tijdstippen is groter dan de afname in corrosiesnelheid bij de andere diepten. Hoewel deze diepte gekenmerkt wordt door een sterkere afname in corrosiesnelheid, wordt het verschil in afname kleiner naarmate de tijd vordert. Zo is het verschil tussen tijdstip één en tijdstip twee 598,4 g/m².j; tussen tijdstip twee en tijdstip drie 461,7 g/m².j en tussen tijdstip drie en tijdstip vier 264,9 g/m².j. Hoewel op één meter diep ook een dalende trend is waar te nemen, valt deze veel minder hard op dan die twee en drie meter diep. Dit komt enerzijds doordat de corrosiesnelheid na twee maanden lichtjes hoger is dan na één maand en anderzijds doordat de afname in corrosiesnelheid tussen de derde en vierde maand zeer beperkt is. De toename en afname zijn 17,6 g/m².j en 43,8 g/m².j respectievelijk. Doordat de verschillen in corrosiesnelheden op deze diepte zeer klein zijn, worden de plaatjes op deze diepte blootgesteld aan een gemiddeld hogere corrosiesnelheid.

Op vier meter is er een schommeling in corrosiesnelheid waar te nemen net zoals bij de Grade A. Zo is de corrosiesnelheid na twee maanden afgenomen terwijl deze na drie maanden terug stijgt en uiteindelijk terug daalt na een periode van vier maanden. Al bij al zijn de corrosiesnelheden op tijdstippen twee, drie en vier lager dan de corrosiesnelheid op tijdstip één. De dalende trend die zich voordoet op twee en drie meter diep is nog niet op deze diepte waargenomen, doch is het niet uit te sluiten dat deze trend zich niet kan voordoen op verdere tijdstippen.

Ook bij S355 schommelen de gemiddelde corrosiesnelheden per diepte rond de 1500 g/m².j.

6.3.3 CORROSIESNELHEID 316L



Figuur 30 Variatie in corrosiesnelheid i.f.v. diepte voor staalsoort 316L

Bron: Eigen werk

Figuur 30 geeft de veranderingen in corrosiesnelheden weer in functie van twee diepten namelijk één en drie meter diep. Dit voor vier verschillende tijdstippen. Het is duidelijk dat op beide diepte de corrosiesnelheid zeer laag ligt. Op één meter diep is de maximale corrosiesnelheid $259,8 \pm 344,5 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$. Na een periode van drie maanden is de corrosiesnelheid vrijwel nul namelijk $10,56 \pm 154,0 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$. Daarbij zijn er ook twee negatieve waarden wat overeenkomt met een gewichtstoename, wat niet mogelijk is. Op drie meter diep kan een positieve corrosiesnelheid worden waargenomen na een periode van twee maanden. deze toont een gewichtsverlies van $20,3 \pm 100,3 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$, wat ontzettend weinig is. Bij de drie andere tijdstippen is ook weer sprake van een kleine gewichtstoename, die ook niet mogelijk is.

De reden waarom een gewichtstoename wordt waargenomen is omdat de plaatjes waar het gewichtsverlies is van bepaald meer wogen dan het gemiddelde gewicht bepaald aan de hand van 30 plaatjes.

De gemiddelde corrosiesnelheid voor zowel op één meter diep als op drie meter diep varieert rond de $0 \text{ g/m}^2\cdot\text{j}$.

6.4 STATISTISCHE ANALYSE

De eerste ANOVA test wordt uitgevoerd om te kunnen achterhalen of de corrosiesnelheid in functie van tijd verandert of gelijk blijft. De rede om dit te onderzoeken is omdat de grafieken die in 6.3 werden besproken vaak een daling in corrosiesnelheid vertonen in functie van tijd als een schommeling in corrosiesnelheid. Dit wordt onderzocht per diepte. Daarna zal een tweede ANOVA test worden uitgevoerd om te achterhalen of de diepte effectief een invloed heeft op de corrosiesnelheid.

6.4.1 GRADE A

De ANOVA test geeft aan dat bij Grade A er een significant verschil is tussen de gemiddelde waarden van de vier verschillende tijdstippen op één en drie meter diep, ($F(3,8) = 5.673$, $P = 0.022$) en ($F(3,7) = 5.870$, $P = 0.020$) (tabel 7; tabel 8). Beide nulhypoteses worden verworpen. De post hoc test die vervolgens is uitgevoerd, stelt dat op één meter diep één vergelijking statistisch significant verschilt (tabel 10). Deze vergelijking is 94*128 en heeft een P waarde van 0.0039. Op een diepte van drie meter zijn er geen enkele vergelijkingen die aangeven dat er een significant verschil is (tabel 10).

De ANOVA test geeft aan dat er geen significant verschil is tussen de corrosiesnelheden van de vier verschillende tijdstippen op twee meter diep ($F(3,8) = 0.296$, $P = 0.827$) en op vier meter diep ($F(3,8) = 0.435$, $P = 0.733$). Uit de statistische analyse blijkt dat de gemiddelde corrosiesnelheden op deze diepte niet dalen of schommelen naarmate de tijd vordert zoals werd verondersteld in 6.3.1. De gemiddelde corrosiesnelheden blijven gelijk en veranderen niet met de tijd.

Uit de ANOVA test is gebleken dat er geen significant verschil is tussen de gemiddelde corrosiesnelheden op de vier diepten ($F(3,8) = 0.627$, $P = 0.610$) (tabel 9). Aangezien dat de P waarde groter is dan 0.05, kan de nulhypothese geaccepteerd worden. Dit betekent dat de gemiddelde corrosiesnelheden gelijk geacht kunnen worden. Anders gezegd, er kan geconcludeerd worden dat de diepte geen invloed heeft op de corrosiesnelheid voor Grade A.

Tabel 7 Variantieanalyse Grade A één meter diep

Bron: Eigen werk

Variantie-analyse						
Bron van variatie	Kwadratensom	Vrijheidsgraden	Gemiddelde kwadraten	F	P-waarde	Kritische gebied van F-toets
Tussen groepen	4134085,389	3	1378028,463	5,673993976	0,022170068	4,066180551
Binnen groepen	1942939,621	8	242867,4526			
Totaal	6077025,01	11				

Tabel 8 Variantieanalyse Grade A drie meter diep

Bron: Eigen werk

Variantie-analyse						
Bron van variatie	Kwadratensom	Vrijheidsgraden	Gemiddelde kwadraten	F	P-waarde	Kritische gebied van F-toets
Tussen groepen	1787976,586	3	595992,1954	5,870553092	0,020278224	4,066180551
Binnen groepen	812178,5951	8	101522,3244			
Totaal	2600155,181	11				

Tabel 9 Variantieanalyse Grade A voor de vier diepten

Bron: Eigen werk

Variantie-analyse						
Bron van variatie	Kwadratensom	Vrijheidsgraden	Gemiddelde kwadraten	F	P-waarde	Kritische gebied van F-toets
Tussen groepen	446797,702	3	148932,5673	0,627838442	0,610780163	3,490294819
Binnen groepen	2846577,54	12	237214,795			
Totaal	3293375,242	15				

Tabel 10 Post hoc test Grade A voor één en drie meter diep

Bron: Eigen werk

Vergelijking	P(T<t) tweezijdig	Significant ja/nee	P(T<t) tweezijdig	Significant ja/nee
	1 meter diep		3 meter diep	
36*65	0,6797	Nee	0,6121	Nee
36*94	0,0589	Nee	0,0652	Nee
36*128	0,0330	Nee	0,0218	Nee
65*94	0,0699	Nee	0,2081	Nee
65*128	0,0344	Nee	0,0409	Nee
94*128	0,0039	Ja	0,0982	Nee

6.4.2 S355

De ANOVA test geeft op een diepte van drie meter aan dat er een statistisch significant verschil is tussen de gemiddelde corrosiesnelheden voor de vier verschillende tijdstippen ($F(3,8) = 11.934$, $P = 0.002$) (tabel 11). Met een P waarde kleiner dan 0,05 kan de nulhypothese die stelt dat de gemiddelde waarden gelijk zijn, verworpen worden. Na een post hoc test is gebleken dat geen van de vergelijkingen een significant verschil aantoont (tabel 13). Uit de ANOVA test is gebleken dat op de drie andere diepten geen significant verschil is in corrosiesnelheid in functie van tijd. Dit betekent dat de nulhypothese wordt geaccepteerd. De resultaten van de ANOVA test zijn op één meter ($F(3,8) = 3.295$, $P = 0.078$); op twee meter ($F(3,8) = 3.968$, $P = 0.052$) en op vier meter ($F(3,8) = 2.397$, $P = 0.143$). Het feit dat de P waarden groter zijn dan 0.05 wijst erop dat de gemiddelde corrosiesnelheden in functie van tijd gelijk zijn. Met andere woorden de veronderstellingen die gemaakt zijn in 6.3.2 over de schommeling en de dalingen in corrosiesnelheden in functie van tijd, zijn niet juist.

Indien men kijkt naar de corrosiesnelheid in functie van diepte dan geeft de ANOVA test aan dat er hier geen significant verschil is ($F(3,12) = 2.351$, $P = 0,123$) (tabel 12). Dit betekent dat de gemiddelde corrosiesnelheden over de vier diepten als gelijk beschouwd kunnen worden en dat de diepte geen invloed heeft op de corrosiesnelheid.

Tabel 11 Variantieanalyse S355 drie meter diep

Bron: Eigen werk

Variantie-analyse						
Bron van variatie	Kwadratensom	Vrijheidsgraden	Gemiddelde kwadraten	F	P-waarde	Kritische gebied van F-toets
Tussen groepen	779997,6359	3	259999,212	11,9364008	0,00252837	4,066180551
Binnen groepen	174256,3551	8	21782,04438			
Totaal	954253,991	11				

Tabel 12 Variantieanalyse S355 voor de vier diepten

Bron: Eigen werk

Variantie-analyse						
Bron van variatie	Kwadratensom	Vrijheidsgraden	Gemiddelde kwadraten	F	P-waarde	Kritische gebied van F-toets
Tussen groepen	863256,2311	3	287752,077	2,351215295	0,123735712	3,490294819
Binnen groepen	1468612,82	12	122384,4016			
Totaal	2331869,051	15				

Tabel 13 Post hoc test S355 voor drie meter diep

Bron: Eigen werk

vergelijking	P(T<t) tweezijdig 3 meter diep	Significant ja/nee
36*65	0,3870	Nee
36*94	0,0207	Nee
36*128	0,0100	Nee
65*94	0,0288	Nee
65*128	0,0122	Nee
94*128	0,1611	Nee

6.4.3 316L

Het resultaat van de ANOVA test geeft aan dat zowel op een diepte van één meter ($F(3,8) = 1.715$, $P = 0,240$) als op een diepte van drie meter ($F(3,8) = 0.820$, $P = 0.518$) de verschillen in corrosiesnelheid in functie van tijd niet significant zijn. De nulhypothese wordt aanvaard en er kan gezegd worden dat de gemiddelde corrosiesnelheden in functie van tijd gelijk zijn en niet veranderen.

Ook stelt de ANOVA test vast dat de diepte geen invloed heeft op de corrosiesnelheid ($F(1,6) = 0.346$, $P = 0.577$). De P-waarde is groter dan 0.05 dus kan de nulhypothese worden geaccepteerd. De gemiddelde corrosiesnelheden zijn dezelfde op een diepte van één en drie meter.

Tabel 14 Variantieanalyse 316L voor de twee diepten

Bron: Eigen werk

Variantie-analyse						
Bron van variatie	Kwadratensom	Vrijheidsgraden	Gemiddelde kwadraten	F	P-waarde	Kritische gebied van F-toets
Tussen groepen	12463,28976	1	12463,28976	0,346554642	0,577543447	5,987377607
Binnen groepen	215780,5132	6	35963,41887			
Totaal	228243,803	7				

DISCUSSIE

Het doel van dit onderzoek was om na te gaan of de diepte een invloed heeft op de corrosiesnelheid van drie verschillende staalsoorten. Uit de statistische analyse is gebleken dat een diepte tot vier meter geen effect heeft op de corrosiesnelheid van staalsoort Grade A, S355 en 316L. De resultaten kwamen overeen met de verwachtingen daar de tien rekken permanent waren ondergedompeld, niet onderhevig waren aan het getij en waren blootgesteld aan eenzelfde milieu.

In Vlissingen daarentegen worden deze resultaten niet verwacht. De rekken die er zullen worden opgehangen, zullen worden verspreid over een grotere diepte en zullen worden blootgesteld aan een ander milieu. De haven van Vlissingen is onderhevig aan het getij wat maakt dat sommige rekken alternerend ondergedompeld zullen worden en andere rekken permanent. Dit heeft een rechtstreekse impact op de corrosiesnelheid. Naast het getij zijn er andere factoren die een sterkere invloed zullen hebben op de corrosiesnelheid, zoals het hogere zoutgehalte. Het heeft als effect dat de corrosiesnelheid hoger zal liggen dan in Oostende. Wat in Vlissingen ook een invloed zal hebben op de corrosiesnelheid is de differentiële aeratie. Dit is een type corrosie dat optreedt wanneer het oppervlak van de plaatjes onderworpen wordt aan een verschillend zuurstofgehalte. Het deel van het plaatje dat ondergedompeld is, heeft minder toegang tot de zuurstof, waardoor het als anode werkt en zal corroderen terwijl het oppervlakte dat is blootgesteld aan lucht als kathode fungeert en niet zal corroderen. Dit type corrosie vindt plaats daar waar het oppervlakte is bedekt met waterdruppels.

Het is belangrijk dat de invloed van de diepte op de corrosiesnelheid verder wordt onderzocht. Vele schepen hebben dezer dagen een diepgang van 15 meter of meer en de antifouling die aangebracht wordt op de schepen wordt steeds maar getest tot op een diepte van 10 voet. Het is van belang om te bepalen of de diepte relevant is voor het onderzoeken van antifouling.

BIBLIOGRAFIE

- Aquatic Life Lab. (2017). *Adaptation of marine organisms to live in the sea*. Geraadpleegd 16 mei 2021, van <http://www.aquaticlifelab.eu/1-9-adaptation-of-marine-organisms-to-live-in-the-sea/>
- BBN. (2012). *Grade A shipbuilding steel plate*. Geraadpleegd 1 mei 2021, van <http://www.shipbuilding-steel.com/Products/A.html>
- Bell, T. (2020, 2 maart). ThoughtCo. *Type 316 and 316L stainless steels*. Geraadpleegd 30 april 2021, van <https://www.thoughtco.com/type-316-and-316l-stainless-steel-2340262>
- Bozov, N. (2021, 15 april). Offshore oil platforms. Automation and controls engineer, . Geraadpleegd 16 mei 2021, van [http://nbozov.com/how/post/57/Offshore-oil-platforms-\(rigs\)](http://nbozov.com/how/post/57/Offshore-oil-platforms-(rigs))
- CAB International. (2020). *Mytilus edulis*. Geraadpleegd 4 mei 2020, van <https://www.cabi.org/isc/datasheet/73755>
- Callow, M. E., & Callow, J. A. (2002a). Marine biofouling: A sticky problem. *Biologist*, 49(1), 10–14.
- Corrosiemechanismen. (2016 maart). Clusta. Geraadpleegd van <https://www.corrosie.info/documents/2016/03/448.pdf/>
- Coutts, A. D. M., Piola, R. F., Taylor, M. D., Hewitt, C. L., & Gardner, J. P. A. (2010). The effect of vessel speed on the survivorship of biofouling organisms at different hull locations. *The journal of bioadhesion and biofilm research*, 26(5), 539–553. doi:10.1080/08927014.2010.492469
- Dam-Johansen, K., Meseguer Y, D. Y., & Kiil, S. (2004). Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling

- coatings. *Progress in organic coatings*, Volume 50, 50(2), 75–104.
doi:10.1016/j.porgcoat.2003.06.001
- De Baere, K., Verstraelen, H., & Potters, G. (2011 december). Corrosion control on steel sheet piles in harbor waters. HZS.
- De Charleroy, D., & Denayer, B. (1992). Macro-fouling (pp. 1–4). Geraadpleegd van https://pureportal.inbo.be/portal/files/12699664/DeCharleroy_Denayer_1992_Macro_fouling.PDF
- Demirel, Y. K., Uzun, D., Zhang, Y., Fang, H. C., Day, A. H., & Turan, O. (2017). Effect of barnacle fouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, 33(10), 819–834. Taylor & Francis. doi:10.1080/08927014.2017.1373279
- Dharmalingam, S. (2018). Biofouling- Bioadhesion of micro-organisms and its prevention: A Review. *International journal of engineering research and reviews*, 6(3), 11–21.
- Duret-Thual, C. (2014). Understanding corrosion: Basic principles. *Understanding Biocorrosion* (pp. 3–32). Elsevier. doi:10.1533/9781782421252.1.3
- Flemming, H.-C., Murthy, P. S., Venkatesan, R., & Cooksey, K. (2009). *Marine and Industrial Biofouling*. Heidelberg, Duitsland: Springer. doi:10.1007/978-3-540-69796-1
- Fondriest Environmental. (2020). *Algae, Phytoplankton and Chlorophyll*. Geraadpleegd 2 mei 2020, van <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/algae-phytoplankton-chlorophyll/>
- Forteach, G. N. R., Picken, G. B., Ralph, R., & Williams, J. (1982). Marine growth studies on the North sea oil platform Montrose Alpha. *Marine ecology Progress series*, 8, 61–68.
- Fusetani, N., & Clare, A. S. (Red.). (2006). *Antifouling compounds*. Marine molecular biotechnology (Vol. 42). Heidelberg, Duitsland: Springer Berlin Heidelberg.

- Geesey, G. (1991). What is Biocorrosion? In H.-C. Flemming & G. G. Geesey (Red.), *Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems* (pp. 155–164). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-76543-8_8
- Gellings, P. J. (2006). *Inleiding tot corrosie en corrosiebestrijding*. Enschede: PPI Uitgeverij.
Geraadpleegd van
http://www.lbs.be/cs/cursus_materiaal/01L_Basiskennis/Corrosie_Gellings.pdf
- Hardy, F. G. (1981a). Fouling on North sea platforms. *Botanica Marina* (Vol. XXIV, pp. 173–176). Berlin, Duitsland: De Gruyter.
- Hogere Zeevaartschool. (z.d.). *Interreg Vlaanderen-Nederland*. Geraadpleegd 12 mei 2021, van <https://www.hzs.be/nl/2-nl/297-praktijklab-corrosie-en-isolati>
- Hole, W. (1952). Marine fouling and its prevention, Contribution No. 580 from the Woods Hole Oceanographic Institution, (580), 1–388. doi:10.1575/1912/191
- Hurd, C. L., Harisson, P. J., Bischof, K., & Lobban, C. S. (2014). *Seaweed Ecology and Physiology* (tweede editie.). U.K.: Cambridge University Press.
- IMO. (2020). *IMO*. Geraadpleegd van
<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Biofouling/Pages/default.aspx>
- Inspection certificate 3.1. (2019, 12 augustus). Tata Steel Ijismuiden BV.
- Inspection certificate 3.1. (2020, 5 februari). Thyssenkrupp Steel Europe.
- Integraal Waterbeleid. (z.d.). *De Schelde: Levensader*. Geraadpleegd 16 mei 2021, van <https://sgbp.integraalwaterbeleid.be/bekkens/benedenscheldebekken/kennismaking/bijzonder-in-het-bekken/gebied-1>
- Interreg. (z.d.). *Praktijklab Corrosie & Isolatie*. Geraadpleegd 12 mei 2021, van <https://www.grensregio.eu/projecten/praktijklab-corrosie-isolatie>
- ISECA. (2007). *Wat is eutrofiëring*. Geraadpleegd 25 april 2020, van <http://www.vliz.be/projects/iseca/nl/2012-09-20-09-08-30/2012-09-20-09-07-43.html>

- Joschko, T. J., Buck, B. H., Gutow, L., & Schröder, A. (2008). Colonization of an artificial hard substrate by *Mytilus edulis* in the German Bight. *Marine Biology Research*, 4, 350–360. doi:10.1080/17451000801947043
- Juzeliūnas, E., Ramanauskas, R., Lugauskas, A., Leinartas, K., Samulevičienė, M., Sudavičius, A., & Juškėnas, R. (2007). Microbially influenced corrosion of zinc and aluminium – Two-year subjection to influence of *Aspergillus niger*. *Corrosion Science*, 49(11), 4098–4112. doi:10.1016/j.corsci.2007.05.004
- Kaiser, M. J., Attrill, J. M., Thomas, D. N., Barnes, D. K. A., Brierley, A. S., Hiddink, J. G., Kaartokallio, H., e.a. (Red.). (2011). *Marine ecology* (tweede editie.). New York U.S.A.: Oxford University Press.
- Lamers System Care. (z.d.). *Biologische fouling*. Geraadpleegd 20 april 2020, van <https://lscare.nl/nl/biologische-fouling/>
- Langhamer, O., Wilhelmsson, D., & Engström, J. (2009). Artificial reef effect and fouling impacts on offshore wave power foundations and buoys – a pilot study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82(3), 426–432. doi:10.1016/j.ecss.2009.02.009
- Lengkeer, W., Coolen, J., Gittenberger, A., & Schrieken, N. (2013). Ecological relevance of shipwrecks in the North Sea. *Nederlandse faunistische mededelingen*, 41, 49–58.
- López-Ortega, A., Bayón, R., & Arana, J. L. (2019). Evaluation of Protective Coatings for High-Corrosivity Category Atmospheres in Offshore Applications. *Materials*, 12(8), 1325. doi:10.3390/ma12081325
- Marion, G. M., Millero, F. J., Camões, M. F., Spitzer, P., Feistel, R., & Chen, C.-T. A. (2011). PH of seawater. *Marine Chemistry*, 126(1–4), 89–96. doi:10.1016/j.marchem.2011.04.002
- McIntosh, A. R., Manikowski, H., Wong, S. K., Taylor, C. P., & Bolton, J. R. (1979). CIDEP observations in photosystem I of green plant and algal photosynthesis. *Biochemical*

- and Biophysical Research Communications*, 87(2), 605–612. doi:10.1016/0006-291x(79)91837-0
- Melchers, R. E., & Jeffrey, R. J. (2013). Accelerated low water corrosion of steel piling in harbours. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 48(7), 496–505. doi:10.1179/1743278213Y.0000000103
- MENS. (2019, 7 december). *Ecosysteemdiensten 2: Water als habitat*. Geraadpleegd 22 mei 2021, van <http://www.biomens.eu/?p=viewarticle&id=129>
- Mertens, J., & Beladjal, L. (z.d.). Biocorrosion, sacrificial anodes and the environment. universiteit Gent. Geraadpleegd van <https://onedrive.live.com/?cid=F2E253A22257D282&id=F2E253A22257D282%215541&parId=F2E253A22257D282%215273&o=OneUp>
- Mill Test Certificate. (2019, 28 april). Jindal Stainless Limited.
- Mittleman, J., Elliott, R., & Quirk, J. (2011). Underwater ship husbandry discharges. *Environmental Protection Agency Office of Wastewater Management*. Geraadpleegd 14 april 2020, van https://www3.epa.gov/npdes/pubs/vgp_hull_husbandry.pdf
- Nall, C., Schlappy, M.-L., & Guerin, A. (2017). Characterisation of the biofouling community on a floating wave energy device. *Biofouling*, 33, 379–396. doi:10.1080/08927014.2017.1317755
- Natuurbescherming in het Belgische deel van de Noordzee. (2016 december). Natuurpunt. Geraadpleegd van https://www.natuurpunt.be/sites/default/files/images/inline/2016-visiedocument-natuurbescherming_in_het_belgische_deel_van_de_noordz.pdf
- Ogunola, S. O., & Onada, O. (2016). Anti-Biofouling Defence Mechanism of Basibionts (A Chemical Warfare)—A Critical Review. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 6(4), 1–6. doi:10.4172/2161-0525.1000380

- Peck, L. S., Clark, M. S., Power, D., Reis, J., Batista, F. M., & Harper, E. M. (2015). Acidification effects on biofouling communities: Winners and losers. *Global Change Biology*, 21(5), 1907–1913. doi:10.1111/gcb.12841
- Phan, H. C., Wade, S. A., & Blackall, L. L. (2019). Is marine sediment the source of microbes associated with accelerated low water corrosion? *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(1), 449–459. doi:10.1007/s00253-018-9455-x
- Port Oostende. (2021). *Haventerreinen in Oostende*. Geraadpleegd 24 april 2021, van <https://www.portofoostende.be/nl/haventerreinen-in-oostende>
- Praktijklab Corrosie & Isolatie. (2020, 22 september). North Sea Port.
- Railkin, A. (2004). *Marine biofouling—Colonization processes and defenses*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Ralph, R., & Robert, P. (1980). Marine growth on north sea oil and gas platforms. *Offshore Technology Conference*, 49–51.
- Reliance Foundry. (2021). *Steel grading: Chemistry and Properties*. Geraadpleegd 1 mei 2021, van <https://www.reliance-foundry.com/blog/steel-grades>
- Richmond, M. D., & Seed, R. (1991). Review of marine macrofouling communities with special reference to animal fouling. *The journal of bioadhesion and biofilm research*, 3(2), 151–168.
- Rijkswaterstaat. (z.d.). *Normaal Amsterdams Peil (NAP)*. Geraadpleegd 1 mei 2021, van <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/open-data/normaal-amsterdams-peil>
- Rilov, G., & Crooks, J. A. (2009). Marine bioinvasions in the Brazilian coast: Brief report on history of events, vectors, ecology, impacts and managements of no-indigenous species. *Biological Invasions in Marine Ecosystems* (p. 470). Heidelberg, Duitsland: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

- Robert, G. Y., & Philip, T. J. (1979). Biofouling community dynamics in Louisiana shelf oil platforms in the gulf of Mexico. *Rice University Studies*, 65, 553–574.
- Roberts, J., & Tsamenya, M. (2008). International legal options for the control of biofouling on international vessels. *Marine Policy*, 32(4), 559–569.
doi:10.1016/j.marpol.2007.10.002
- Rothstein, B. (2019, 25 juli). Mead Metals, inc. *What are the different grades of steel*. Geraadpleegd 1 mei 2021, van <https://www.meadmetals.com/blog/steel-grades>
- Sand, W., & Gehrke, T. (2003). Microbially Influenced Corrosion of Steel in Aqueous Environments. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2(2–4), 169–176. doi:10.1023/B:RESB.0000040468.88570.4e
- Sell, D. (1992). Marine fouling, 100, 169–184. doi:10.1017/S026972700001112X
- Smith, M., Bardiau, M., Brennan, R., Burgess, H., Caplin, J., Ray, S., & Urios, T. (2019). Accelerated low water corrosion: The microbial sulfur cycle in microcosm. *Npj Materials Degradation*, 3(1), 37. doi:10.1038/s41529-019-0099-9
- Staalhandel Vaesen NV. (z.d.). Handelsstaal: wat zijn de verschillen tussen de staalsoorten?, . Geraadpleegd 30 april 2021, van <https://vaesenstaalhandel.be/handelsstaal-wat-zijn-de-verschillen-tussen-de-staalsoorten/#:~:text=Staalsoort%3A%20s355,voordat%20er%20ongewenste%20verorming%20optreedt>).
- The European marine energy centre LTD. (2017, 6 juli). *The European marine energy centre LTD Press release: Council takes ownership of pelamis device*. Geraadpleegd 7 mei 2020, van <http://www.emec.org.uk/press-release-council-takes-ownership-of-pelamis-device/>
- The marine life information network. (2007, 11 juni). *Plumose anemone (metridium dianthus)*. Geraadpleegd 5 mei 2020, van <https://www.marlin.ac.uk/species/detail/1185>

- The marine life information network. (2008a, 8 mei). *Dead man's fingers (Alcyonium digitatum)*. Geraadpleegd 5 mei 2020, van <https://www.marlin.ac.uk/species/detail/1187>
- The marine life information network. (2008b, 17 april). *A filigree worm (Filograna implexa)*. Geraadpleegd 5 mei 2020, b van <https://www.marlin.ac.uk/species/detail/20>
- Tosec. (2013, 15 maart). *Metaalnummers/Materiaalnummers*. Geraadpleegd 30 april 2021, van <https://www.tosec.nl/wiki/metaalnummers/>
- Van Der Stap, T., Coolen, J. W. P., & Lindeboom, H. J. (2016). Marine Fouling Assemblages on Offshore Gas Platforms in the Southern North Sea: Effects of Depth and Distance from Shore on Biodiversity. (A. Davies, Red.) *PLOS ONE*, *11*(1), e0146324. doi:10.1371/journal.pone.0146324
- Verichev, S., Lavaleye, M., Morales, F., Duineveld, G., Jong, A., Boomsma, W., & Smit, M. G. (2014). *DEEP CORR ON SITE: Study of deep sea corrosion near hydrothermal vents. Deployment of 5 x 37 construction materials for in-situ long-term exposure*. Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/publication/296706487_DEEP_CORR_ON_SITE_Study_of_deep_sea_corrosion_near_hydrothermal_vents_Deployment_of_5_x_37_construction_materials_for_in-situ_long-term_exposure/citation/download
- VLIZ. (2021, 19 januari). *Aantal niet-inheemse soorten doorheen de tijd*. Geraadpleegd 16 mei 2021, van <https://www.vliz.be/niet-inheemse-soorten/nl/samenvattende-situatieschets>
- Wahl, M. (1989). Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling some basic aspects. *Marine ecology-Progress series*, *58*, 175–189. doi:10.3354/meps058175
- Wikipedia. (2014, 12 maart). *Tubularia*. Geraadpleegd 6 mei 2020, van <https://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Tubularia-indivisa.jpg>

Wolfson, A., Van Blaricom, G., Davis, N., & Lewbel, G. S. (1979). The marine life of an offshore oil platform. *Marine Ecology Progress Series*, 1, 81–89.

Wtcb. (2014 juli). *Uitvoering van stalen damwanden*. Geraadpleegd 13 mei 2021, van <http://www.confederationconstruction.be/Portals/43/Uitvoering%20van%20stalen%20damwanden%20-%20NL.docx.pdf>

Xie, Q., Pan, J., Ma, C., & Zhang, G. (2019). Dynamic surface antifouling: Mechanism and systems. *Soft Matter*, 15(6), 1087–1107. doi:10.1039/c8sm01853g

LIJST VAN BIJLAGEN

- Bijlage A Gewicht van de plaatjes per tijds punt
- Bijlage B Gewichtsverlies van de plaatjes per tijds punt
- Bijlage C Digitale bijlage met alle resultaten

Bijlage A Gewicht van de plaatjes per tijdstip

Staalsoort	diepte (m)	gem. gewicht (30 plaatjes)	gewicht na 1 maand (gram)	gewicht na 2 maand (gram)	gewicht na 3 maand (gram)	gewicht na 4 maand (gram)	
GRADE A	1	35,84	35,25	34,84	34,56	34,36	
	1	35,84	34,84	34,25	34,54	34,51	
	1	35,84	34,73	34,05	34,62	34,46	
	2	35,84	35,46	35,56	34,48	34,37	
	2	35,84	35,15	34,34	34,52	33,97	
	2	35,84	35,00	34,36	34,36	34,10	
	3	35,84	35,08	34,53	34,43	34,50	
	3	35,84	34,94	34,82	34,81	34,59	
	3	35,84	35,29	34,99	34,69	34,54	
	4	35,84	36,16	35,32	35,86	34,16	
	4	35,84	34,70	34,98	34,83	34,43	
	4	35,84	34,51	34,68	34,68	34,10	
	S355	1	36,05	35,34	34,71	34,46	33,76
		1	36,05	35,38	34,89	34,47	33,96
		1	36,05	35,40	34,85	34,66	34,39
		2	36,05	34,99	34,43	34,84	34,62
2		36,05	35,01	35,02	34,85	34,89	
2		36,05	35,50	35,09	34,55	34,34	
3		36,05	35,46	35,12	35,01	35,06	
3		36,05	35,59	35,27	35,20	34,75	
3		36,05	35,50	35,12	35,05	35,13	
4		36,05	35,61	35,12	34,68	34,59	
4		36,05	35,47	35,27	34,72	34,67	
4		36,05	35,33	35,25	34,60	34,37	
316L		1	35,51	35,63	35,54	35,21	35,39
		1	35,51	35,64	34,89	35,62	35,62
		1	35,51	35,64	35,59	35,67	35,61
		3	35,51	35,46	35,37	35,66	35,62
	3	35,51	35,62	35,53	35,55	35,59	
	3	35,51	35,68	35,59	35,70	35,68	

Bijlage B Gewichtsverlies van de plaatjes per tijdstip

Staalsoort	Diepte (m)	Gewichtsverlies (g) na 36 dagen	Gewichtsverlies (g) na 65 dagen	Gewichtsverlies (g) na 94 dagen	Gewichtsverlies (g) na 128 dagen	
GRADE A	1	0,59	1	1,28	1,48	
	1	1	1,59	1,3	1,33	
	1	1,11	1,79	1,22	1,38	
	2	0,38	0,28	1,36	1,47	
	2	0,69	1,5	1,32	1,87	
	2	0,84	1,48	1,48	1,74	
	3	0,76	1,31	1,41	1,34	
	3	0,9	1,02	1,03	1,25	
	3	0,55	0,85	1,15	1,3	
	4	-0,32	0,52	-0,02	1,68	
	4	1,14	0,86	1,01	1,41	
	4	1,33	1,16	1,16	1,74	
	S355	1	0,71	1,34	1,59	2,29
		1	0,67	1,16	1,58	2,09
		1	0,65	1,2	1,39	1,66
		2	1,06	1,62	1,21	1,43
2		1,04	1,03	1,2	1,16	
2		0,55	0,96	1,5	1,71	
3		0,59	0,93	1,04	0,99	
3		0,46	0,78	0,85	1,3	
3		0,55	0,93	1	0,92	
4		0,44	0,93	1,37	1,46	
4		0,58	0,78	1,33	1,38	
4		0,72	0,8	1,45	1,68	
316L		1	-0,12	-0,03	0,3	0,12
		1	-0,13	0,62	-0,11	-0,11
		1	-0,13	-0,08	-0,16	-0,1
		3	0,05	0,14	-0,15	-0,11
	3	-0,11	-0,02	-0,04	-0,08	
	3	-0,17	-0,08	-0,19	-0,17	

Bijlage C Digitale bijlage met resultaten

In deze digitale bijlage bevinden zich 6 mappen met de resultaten van het onderzoek. Drie mappen bevatten de resultaten van de ANOVA testen voor de drie verschillende staalsoorten.



Annex
201703581.xlsx