Antwerp Maritime Academy

X-ray Computertomografie als analysetechniek voor macro-aangroeiorganismen en corrosieschade op S235 staal

Nathan Bekaert

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Nautische Wetenschappen
aan de Antwerp Maritime Academy

Promotor: Wikke Witteveen

Copromotor: Prof. Dr. Geert Potters

Academiejaar 2024-2025

Woord vooraf

Deze thesis is geschreven in het kader van het behalen van mijn masterdiploma in de Nautische Wetenschappen aan de Antwerp Maritime Academy, en maakt deel uit van het COROXI-project. Deze scriptie had niet tot stand kunnen komen zonder de steun en begeleiding van verschillende mensen en hulpmiddelen.

In het bijzonder wil ik mijn promotor, Wikke Witteveen, bedanken voor het aanreiken van dit boeiende onderwerp, de waardevolle begeleiding en de constructieve feedback gedurende het schrijfproces. Mijn oprechte dank gaat ook uit naar mijn copromotor, Prof. Dr. Geert Potters, voor zijn inzichten en ondersteuning met betrekking tot de aangroeiorganismen die in deze thesis aan bod komen.

Daarnaast wil ik Marc Mariën bedanken voor het aanleveren van talrijke bronnen die de basis vormden voor mijn literatuurstudie over corrosie en de bestrijding ervan.

Eveneens ben ik Prof. Dr. Joaquim Sanctorum bijzonder erkentelijk voor de aangename samenwerking en de kennis die hij met mij deelde over X-ray Computertomografie.

Tot slot wil ik mijn ouders, Frank Bekaert en Katrien de Pillecyn, bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun, hun wijze raad en hun aanmoedigingen tijdens het schrijven van deze thesis en gedurende mijn volledige studieperiode. Ook wil ik hen en mijn vriendin, Britt Vanmolle, bedanken om mij te vergezellen tijdens de lange autoritten doorheen België en Nederland voor de opvolging van coupons.

Ten slotte wil ik vermelden dat ik gebruik heb gemaakt van artificiële intelligentie, chat GPT, tijdens het schrijfproces van deze scriptie. Het heeft mij geholpen met het herwerken/verbeteren van mijn eigen geschreven teksten, zonder extra informatie toe te voegen en ik heb steeds de herwerkte teksten kritisch herlezen. Hoewel chat GPT een waardevolle ondersteuning heeft geboden, blijft de inhoud geheel mijn eigen werk en verantwoordelijkheid.

Samenvatting

Corrosie vormt een wijdverspreid probleem met aanzienlijke economische gevolgen. Deze masterthesis onderzoekt het gebruik van X-ray Computertomografie (XCT) als niet-destructieve analysemethode om zowel aangroeiorganismen als onderliggende corrosieschade op stalen S235-coupons in beeld te brengen. Na een literatuurstudie over spleetcorrosie en de rol van macro-aangroeiorganismen werd er een veldonderzoek uitgevoerd waarbij de onderzochte coupons visueel en via XCT-scans geanalyseerd werden.

Hoewel spleetcorrosie in dit experiment niet werd vastgesteld, werd putcorrosie wel waargenomen. De XCT-analyse toonde zich bijzonder waardevol in het detecteren van kalkhoudende aangroeiorganismen zoals zeepokken en schaaldieren, evenals bij het lokaliseren van schadezones. De techniek maakt nauwkeurige ruimtelijke analyses mogelijk zonder fysieke aantasting van de monsters.

Toch zijn er beperkingen in dit veldonderzoek: de verwerking van hoge-resolutiegegevens vereist veel data, en de resultaten zijn minder representatief door het beperkte aantal onderzochte coupons.

Desalniettemin toont dit onderzoek aan dat XCT een veelbelovende methode is binnen maritieme corrosiestudies en biedt het een basis voor verder onderzoek en praktische toepassingen in dit vakgebied.

Abstract

Corrosion is a widespread issue with significant economic impact. This master's thesis explores the use of X-ray Computed Tomography (XCT) as a non-destructive analytical method to visualize both biofouling organisms and underlying corrosion damage on S235 steel coupons. Following a literature review on crevice corrosion and the role of macrofouling organisms, a field study was conducted in which the coupons were analyzed visually and through XCT imaging.

Although crevice corrosion was not observed in this experiment, pitting corrosion was detected. XCT proved to be a valuable technique for identifying calcareous biofouling organisms such as barnacles and crustaceans, as well as for locating and examining corrosion zones. The technique enables detailed spatial analysis without physically altering the samples.

Nonetheless, some limitations were identified: processing high-resolution data demands substantial computing power, and due to the limited number of analyzed coupons, the findings cannot be considered widely representative.

Despite these restrictions, the study demonstrates that XCT is a promising tool in maritime corrosion analysis and provides a solid foundation for future research and practical applications in the field.

Inhoudstafel

Lijst van figuren xi

Lijst van tabellen xvii

Lijst met afkortingen xix

Inleiding 1

1 Corrosie 3

2 Spleetcorrosie 5

2.1 Het verschijnsel spleetcorrosie 5

2.2 Mechanisme van spleetcorrosie 6

2.3 Invloed van factoren 9

2.3.1 Samenstelling van de legering 9

2.3.1.1 Ongelegeerd staal 9

2.3.1.2 Gelegeerd staal 10

2.3.1.3 Roestvrijstaal 11

2.3.2 Geometrie van de spleet 12

2.3.3 Spleettype 13

2.3.4 Effect van temperatuurstijging 13

2.3.5 Zuurstof 13

2.3.6 Karakteristieken van de passieve laag 14

2.4 Theorie voor spleetcorrosie 14

2.4.1 Kritische spleetoplossingstheorie 15

2.4.2 *IR* drop theorie 15

3 Spleetcorrosie onder aangroeiorganismen 17

3.1 De aangroei 17

3.2 Soorten aangroeiorganismen 18

3.2.1 Zeepokken 18

3.2.2 Oesters 21
3.2.3 Mosselen 23
3.2.4 Sulfaat reducerende bacteriën 25
3.2.5 Bacterieel slijm 26
3.2.6 Zakpijp 27
3.2.7 Kalkkokerworm 28
3.3 Structuren met spleetcorrosie onder aangroei 30
3.3.1 Scheepsromp 30
3.3.2 Haveninfrastructuur 31
3.3.3 Offshore windturbines 31
3.3.4 Olie- en gasboorplatformen. 32
4 Analysetechnieken 35
4.1 X-ray Diffractie 35
4.2 Potentiostaat 35
4.3 Scanning elektronenmicroscopie 37
4.4 EIS 39
4.5 Digitale microscoop 41
4.6 XCT 42
4.6.1 Conventionele/circulaire XCT 42
4.6.2 Samengevoegde XCT 44
4.6.3 XCT laminografie 45
5 Veldonderzoek 47
5.1 Materialen en methode 47
5.1.1 Verkennende scans 48
5.1.2 Bespreking verkennende scans 57
5.1.3 Scans datacoupons 60

5.1.4 Verwerking datacoupons 61
5.2 Vlissingen 64
5.2.1 Eén Maand blootstelling te Vlissingen (augustus 2024) 65
5.2.2 Twee Maanden blootstelling te Vlissingen (september 2024) 69
5.2.3 Vier Maanden blootstelling te Vlissingen (november 2024) 73
5.2.4 Zeven Maanden blootstelling te Vlissingen (februari 2025) 75
5.3 Oostende 77
5.3.1 Eén Maand blootstelling te Oostende (augustus 2024) 78
5.3.2 Twee Maanden blootstelling te Oostende (september 2024) 80
5.3.3 Vier Maanden blootstelling te Oostende (november 2024) 83
5.3.4 Zeven Maanden blootstelling te Oostende (februari 2025) 87
5.4 Zelzate 90
5.4.1 Eén Maand blootstelling te Zelzate (augustus 2024) 91
5.4.2 Twee Maanden blootstelling te Zelzate (september 2024) 92
5.4.3 Vier Maanden blootstelling te Zelzate (november 2024) 93
5.4.4 Zeven Maanden blootstelling te Zelzate (februari 2025) 94
5.5 Resultaten XCT-scanner 95
5.5.1 Vlissingen twee maanden (september 2024) 95
5.5.2 Vlissingen zeven maanden (februari 2025) 98
5.5.3 DYPLA twee maanden (september 2024) 104
5.5.4 DYPLA zeven maanden (februari 2025) 109
5.5.5 STAPLA twee maanden (september 2024) 116
5.5.6 STAPLA zeven maanden (februari 2025) 119
5.5.7 Zelzate twee maanden (september 2024) 125
5.5.8 Zelzate zeven maanden (februari 2025) 128
5.5.9 Resultatentabel 132

5.6 Vergelijking blootstellingslocaties 134

6 Algemene discussie 139

Besluit 143

Bibliografie 145

Lijst van figuren

Figuur 1 Voorstelling van spleetcorrosie tussen een metaal en inert materiaal 6
Figuur 2 Beginstadium van spleetcorrosie 7
Figuur 3 Verder stadium van spleetcorrosie 8
Figuur 4 Effect spleetopening op de voorspelde tijd tot initiatie van spleetcorrosie 12
Figuur 5 Geïdealiseerd kinetisch corrosiediagram voor een passief metaal 16
Figuur 6 Schematische voorstelling van de aanhechtingslaag 18
Figuur 7 De Chelonibia testudinaria, een zeepokkensoort 19
Figuur 8 Zeepokken op een roer en schroefbladen 20
Figuur 9 Oesterschelp 21
Figuur 10 Ontwikkeling van spleetcorrosie onder een oester 22
Figuur 11 Byssusdraad van een mossel 24
Figuur 12 Spleetcorrosie in zeewater met SRB 26
Figuur 13 De ronde zakpijp 27
Figuur 14 Kalkkokerworm uit zijn koker 29
Figuur 15 Plaatsen waar aanhechting wordt verwacht 30
Figuur 16 Zones op een monopile met de aangroeiorganismen 33
Figuur 17 3-Elektrodenconfigratie in een elektrochemische cel 36
Figuur 18 S355 platen voor blootstelling 38
Figuur 19 Monsters van S355 platen in de vacuüm kamer 39
Figuur 20 EIS van een weerstand in een Bode en Nyquist-plot 40
Figuur 21 FleXCT mogelijkheden 43
Figuur 22 verschil conventionele XCT en samengevoegde XCT 44
Figuur 23 Lineaire laminografie setup 45
Figuur 24 Overzicht van de drie locaties, aangeduid met een ster 47
Figuur 25 Voor en achterkant coupon R548959 voor verkennende scans 49
Figuur 26 FleXCT scanner Campus Drie Eiken 49
Figuur 27 Overzichtsscherm Dragonfly 50
Figuur 28 XYZ assenstelsel 51
Figuur 29 Voor- en achterkant coupon na verkennende scans 53
Figuur 30 Opstelling coupon in CT-scanner voor scan 1 54

Figuur 31 Röntgenbron met koperfilter die aangeduid is met een witte cirkel 55
Figuur 32 Sea Chest van een schip 56
Figuur 33 Coupon sea chest links en coupon Socorro rechts..... 56
Figuur 34 Afmetingen 3D-reconstructie 20 µm..... 57
Figuur 35 Afmetingen 3D-reconstructie 7,5 µm..... 58
Figuur 36 Verschil met (links) of zonder (rechts) koperfilter 3D-reconstructie..... 59
Figuur 37 Rek voor blootstelling te Vlissingen 64
Figuur 38 Coupons na 1 maand blootstelling te Vlissingen 65
Figuur 39 Verschil grote coupons na 1 maand blootstelling te Vlissingen..... 66
Figuur 40 Close-up grote coupon na 1 maand blootstelling te Vlissingen..... 67
Figuur 41 Derde grote coupon na 1 maand blootstelling te Vlissingen 68
Figuur 42 Coupons na 2 maanden blootstelling te Vlissingen waarop zeewier met rode pijlen is aangeduid..... 69
Figuur 43 Verschil grote coupons na 2 maanden blootstelling te Vlissingen..... 70
Figuur 44 Close-up grote coupon na 2 maanden blootstelling te Vlissingen..... 71
Figuur 45 Derde grote coupon na 2 maanden blootstelling te Vlissingen 72
Figuur 46 Coupons na 4 maanden blootstelling te Vlissingen 73
Figuur 47 Grote coupon na 4 maanden blootstelling te Vlissingen 74
Figuur 48 Coupons na 7 maanden blootstelling te Vlissingen 75
Figuur 49 Grote coupon na 7 maanden blootstelling te Vlissingen 76
Figuur 50 STAPLA-rek links en DYPLA-rek rechts voor blootstelling te Oostende..... 77
Figuur 51 Coupons STAPLA na 1 maand blootstelling te Oostende 78
Figuur 52 Coupons DYPLA na 1 maand blootstelling te Oostende 79
Figuur 53 Coupons STAPLA-rek na 2 maanden blootstelling te Oostende..... 80
Figuur 54 Coupons DYPLA-rek na 2 maanden blootstelling te Oostende 81
Figuur 55 Grote coupons DYPLA rek na 2 maanden blootstelling te Oostende waarop zakpijpen met witte cirkel zijn aangeduid 82
Figuur 56 Grote coupon STAPLA rek na 2 maanden blootstelling te Oostende waarop zakpijpen met witte cirkel zijn aangeduid 82
Figuur 57 Coupons DYPLA-rek na 4 maanden blootstelling te Oostende waarop zakpijpen met witte cirkel zijn aangeduid en oesterschelp met rode pijlen..... 83
Figuur 58 DYPLA-rek na 4 maanden blootstelling te Oostende 84

Figuur 59 Coupons STAPLA-rek na 4 maanden blootstelling te Oostende waarop zakpijpen met witte cirkel zijn aangeduid 85
Figuur 60 Grote coupon DYPLA-rek links en STAPLA-rek rechts na 4 maanden blootstelling te Oostende waarop zakpijpen met witte cirkel zijn aangeduid 86
Figuur 61 Coupons DYPLA-rek na 7 maanden blootstelling te Oostende waarop oesterschelp aangeduid is met rode pijlen en extra schaaldier met gele pijl 87
Figuur 62 Coupons STAPLA-rek na 7 maanden blootstelling te Oostende 88
Figuur 63 Grote coupon DYPLA-rek links en STAPLA-rek rechts na 7 maanden blootstelling te Oostende 89
Figuur 64 Rek voor blootstelling te Zelzate 90
Figuur 65 Coupons na 1 maand blootstelling te Zelzate 91
Figuur 66 Coupons na 2 maanden blootstelling te Zelzate 92
Figuur 67 Coupons na 4 maanden blootstelling te Zelzate 93
Figuur 68 Coupons na 7 maanden blootstelling te Zelzate 94
Figuur 69 Achterzijde Vlissingen 2 maanden coupon scan versus afbeelding 95
Figuur 70 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding 96
Figuur 71 Samenvattende vergelijken tussen corrosieproducten en onderliggende corrosieschade op achterzijde 97
Figuur 72 Voorzijde Vlissingen 7 maanden coupon scan versus afbeelding 98
Figuur 73 Corrosie-accumulatie aangeduid met rode cirkel 99
Figuur 74 Doorsnede corrosie accumulatie, aangeduid met rode cirkel, in het transversale vlak (boven) en longitudinale vlak (onder) 99
Figuur 75 Achterzijde Vlissingen 7 maanden coupon scan versus afbeelding 100
Figuur 76 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding 101
Figuur 77 Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade voorzijde 102
Figuur 78 Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade achterzijde 103
Figuur 79 Voorzijde DYPLA 2 maanden coupon scan versus afbeelding 104
Figuur 80 Achterzijde DYPLA 2 maanden coupon scan versus afbeelding 105
Figuur 81 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding 106

Figuur 82 Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade voorzijde 107
Figuur 83 samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade achterzijde 108
Figuur 84 Doorsnede oester in het transversale valk (boven) en longitudinale vlak (onder) 109
Figuur 85 Voorzijde DYPLA 7 maanden coupon scan versus afbeelding 110
Figuur 86 Voorzijde DYPLA 7 maanden coupon zonder oester 111
Figuur 87 Achterzijde DYPLA 7 maanden coupon scan versus afbeelding 112
Figuur 88 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding 113
Figuur 89 Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade voorzijde 114
Figuur 90 Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade achterzijde 115
Figuur 91 Geloste laag aangroeiorganismen 116
Figuur 92 Voorzijde STAPLA 2 maanden coupon scan versus afbeelding 117
Figuur 93 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding 118
Figuur 94 Voorzijde STAPLA 7 maanden coupon scan versus afbeelding 119
Figuur 95 Achterzijde STAPLA 7 maanden coupon scan versus afbeelding 120
Figuur 96 Dorsnede transversale vlak met oesterschelp, aangeduid met rode cirkel, op achterzijde coupon 121
Figuur 97 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding 122
Figuur 98 Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen en corrosieschade voorzijde 123
Figuur 99 Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade achterzijde 124
Figuur 100 Voorzijde Zelzate 2 maanden coupon scan versus afbeelding 125
Figuur 101 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding 126
Figuur 102 Samenvattende vergelijking tussen corrosieproducten en onderliggende corrosieschade op voorzijde 127
Figuur 103 Voorzijde Zelzate 7 maanden coupon scan versus afbeelding 128
Figuur 104 Achterzijde Zelzate 7 maanden coupon scan versus afbeelding 129

Figuur 105 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding 129
Figuur 106 Samenvattende vergelijking tussen corrosieproducten en corrosieschade voorzijde 130
Figuur 107 Samenvattende vergelijking tussen corrosieproducten en corrosieschade achterzijde 131
Figuur 108 Vergelijking vier coupons zeven maanden blootstelling voorzijde met A) Vlissingen, B) DYPLA, C) STAPLA en D) Zelzate 134
Figuur 109 Vergelijking vier coupon zeven maanden blootstelling achterzijde met A) Vlissingen, B) DYPLA, C) STAPLA en D) Zelzate 136

Lijst van tabellen

Tabel 1 Legeringselement in relatie met het eigenschap 11
Tabel 2 Bepaalde zones en het type corrosie 32
Tabel 3 Verkennende scans..... 52
Tabel 4 Overzicht corrosiesnelheid per onderzochte coupon 132

Lijst met afkortingen

	Nederlands	***Engels***
AISI:		*American Iron and Steel institute*
MIC:	microbiologische geïnduceerde corrosie	
SRB:	sulfaat reducerende bacteriën	
SEM:	Scanning Elektronenmicroscopie	
XRD:	X-ray Diffractie	
Cm:	centimeter	
Mm:	millimeter	
µm:	micrometer	
EIS:	Elektrochemische Impedantiespectroscopie	
AC:		*alternating current*
DC:		*direct current*
STAPLA:	statisch platform	
DYPLA:	dynamisch platform	
XCT:	X-ray Computertomografie	
ASTM:		*American Society for Testing and Materials*
GB:		*Gigabyte*

Inleiding

Corrosie is een alomtegenwoordig fenomeen waarmee iedereen vroeg of laat in aanraking komt, hetzij bewust, hetzij onbewust. Het berekenen van de kosten die gepaard gaan met corrosie en de bescherming ertegen is vaak een complexe taak. Desondanks wordt geschat dat deze kosten in geïndustrialiseerde landen tussen de 2,5% en 3,5% van het bruto nationaal product bedragen. Het is duidelijk dat preventieve maatregelen tegen corrosie in de meeste gevallen voordeliger zijn dan het simpelweg laten voortduren van het proces. Volgens diverse schattingen kan 20 tot 25% van de huidige corrosiekosten worden bespaard door het effectief toepassen van bestaande kennis over het voorkomen en bestrijden van corrosie (Gellings, 2006).

Deze masterthesis onderzoekt de mogelijkheden van X-ray Computertomografie (XCT) om zowel aangroeiorganismen als onderliggende corrosieschade op stalen coupons (S235-staal) in beeld te brengen. Het voornaamste doel van dit onderzoek is het evalueren van deze analysetechniek en het onderzoeken of deze methode geschikt is om zowel de aangroeiorganismen als de corrosieschade op een accurate en gedetailleerde wijze in beeld te brengen. Het is voornamelijk een vergelijkende studie waarin visuele vergelijkingen worden teruggezocht tussen visuele afbeeldingen van de coupon en de overeenkomstige XCT-scan.

Het onderzoek start met een literatuurstudie waarin eerst het begrip corrosie wordt toegelicht, gevolgd door een focus op spleetcorrosie als vorm van lokale aantasting. Hierbij komen het mechanisme, relevante theorieën en beïnvloedende factoren uitgebreid aan bod.

Hoofdstuk 3 behandelt spleetcorrosie veroorzaakt door aangroeiorganismen. Hierin wordt ingegaan op de soorten organismen die dit type lokale corrosie kunnen veroorzaken en de structuren waarop ze zich kunnen hechten. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 de verschillende analysetechnieken besproken waarmee de schade door deze organismen kan worden geëvalueerd. Er wordt gekeken naar de werking en hun voor- en nadelen. De nadruk ligt in dit hoofdstuk op de toepassing van X-ray Computertomografie.

Hoofdstuk 5 presenteert het uitgevoerde veldonderzoek en de bijhorende resultaten. De gebruikte materialen, de werking van de XCT-scanner, de verwerking van de stalen coupons en de bepaling van het massaverlies en de corrosiesnelheid worden hierbij uiteengezet.

Hierna wordt de evolutie van aangroeiorganismen op de coupons tijdens de blootstellingsperiode op verschillende locaties meer in detail besproken.

Ten slotte worden de bekomen XCT-beelden van de onderzochte coupons vergeleken met visuele observaties van de aangroeiorganismen, met als doel om correlaties te vinden. Enkele opvallende aangroeiorganismen worden aangeduid op de afbeelding en hun overeenkomstige contouren worden aangeduid op de scandoorsnede. Hierna wordt er een resultante coupon gecreëerd op basis van afbeelding, scandoorsnede en scandoorsnede van de schade. Er wordt gezocht naar de zwaarste schade en de aangroeiorganismen die zich hierboven bevinden. Tot slot wordt het gewichtsverlies van de coupons bepaald en de bijhorende corrosiesnelheid wordt berekend.

De thesis sluit af met een kritische bespreking die zich grotendeels focust op de gebruikte analysemethode, XCT, aangezien dit de eerste keer is dat deze techniek wordt gebruikt in een onderzoek aan de Antwerp Maritime Academy.

1 Corrosie

De Corrosion Education Manual (1974) van de Europese Federatie voor Corrosie geeft de volgende definitie voor corrosie: corrosie is de aantasting van een materiaal door reactie met de omgeving met een daardoor veroorzaakte achteruitgang van de eigenschappen. Wanneer het materiaal niet expliciet wordt genoemd is meestal een metaal bedoeld en de waardigheid daarvan wordt door de corrosie verhoogd. Het woord corrosie kan zowel slaan op het proces van de aantasting als op de schadelijke gevolgen daarvan. Impliciet in het begrip corrosie als proces is de aantastingssnelheid per eenheid van oppervlak; impliciet in de veroorzaakte schade is de omvang en de aard van de schade gerelateerd aan de functie van het onderdeel in kwestie.

De algemene corrosie van staal leidt tot de omzetting van grote hoeveelheden van dit metaal in corrosieproducten, wat resulteert in een geleidelijke achteruitgang van de materiaaleigenschappen. De gecombineerde effecten van inwendige spanning en corrosie kunnen ertoe leiden dat het metaal breekt bij belastingen die aanzienlijk lager zijn dan de normale breuksterkte. Dit kan catastrofale gevolgen hebben wanneer vitale onderdelen worden aangetast (Gellings, 2006).

Chemische corrosie treedt op in alle gevallen waarin een directe chemische reactie plaatsvindt tussen het metaal en componenten van de omgeving. Hierbij komen op elk punt van het oppervlak oxidatieverschijnselen van het metaal voor, wat per definitie gepaard gaat elektronenverlies, zonder dat er elektrische stroom bij betrokken is. Het andere type corrosie is elektrochemische corrosie. Metaaloppervlakken bestaan uit een netwerk van voortdurend verplaatsende, kortgesloten elektroden, bekend als lokaalelementen. Zolang het metaal zich in een droge omgeving bevindt, treden er geen corrosie of lokale stromen op. Echter, in een waterige omgeving kunnen deze lokaalelementen actief worden doordat de stroomkring wordt gesloten via de elektrisch geleidende oplossing. Deze elektrische stroom leidt tot de oplossing van het metaal, wat resulteert in corrosie (Gellings, 2006).

De elektrochemische reactie is de meest voorkomende corrosiereactie. De reactie bestaat uit een uitwisseling tussen elektronen in het metaal en ionen uit een geleidende elektrolyt oplossing (Hilti Belgium, 2015).

Chemische corrosie wordt ook wel droge corrosie genoemd. Voor droge corrosie zijn er geen anode en kathode gebieden er is er geen elektrolyt nodig. De corrosie wordt bepaald door diffusie. Dit proces verloopt sneller bij hogere temperaturen en/of erosieve omstandigheden (Brak, 2000; Erdtsieck, 2006).

Om elektrochemische corrosie te laten plaatsvinden, is de vorming van een corrosie cel essentieel. Een corrosie cel bestaat uit 4 delen, namelijk (Ahmad, 2006):

- De anode,
- De kathode,
- De elektrolyt oplossing,
- Een metalen oppervlak.

Als één van deze componenten ontbreekt of inactief is zal het elektrochemische corrosieproces stoppen. Op de anode vindt de oxidatie plaats, dit wil zeggen dat hier de elektronen worden geproduceerd. Op de kathode treedt er reductie op, hier worden de elektronen verbruikt (Gellings, 2006). De elektrolyt oplossing zorgt voor het ionentransport en het metalen oppervlak dient als elektronengeleider (Ahmad, 2006).

Zeewater is een van de meest complexe en agressieve omgevingen voor metalen. Maritieme corrosie wordt beïnvloed door talrijke onderling afhankelijke paramaters en omvat een combinatie van chemische, biologische en mechanische factoren. Het begrijpen van de invloed van elk van deze parameters is cruciaal voor het optimaliseren van het ontwerp van metalen structuren en apparaten die in mariene omgevingen gebruikt worden. Daarnaast is dit inzicht essentieel voor de optimalisatie van anti-corrosiemethoden en het verhogen van materiaalefficiëntie (Refait et al., 2020).

2 Spleetcorrosie

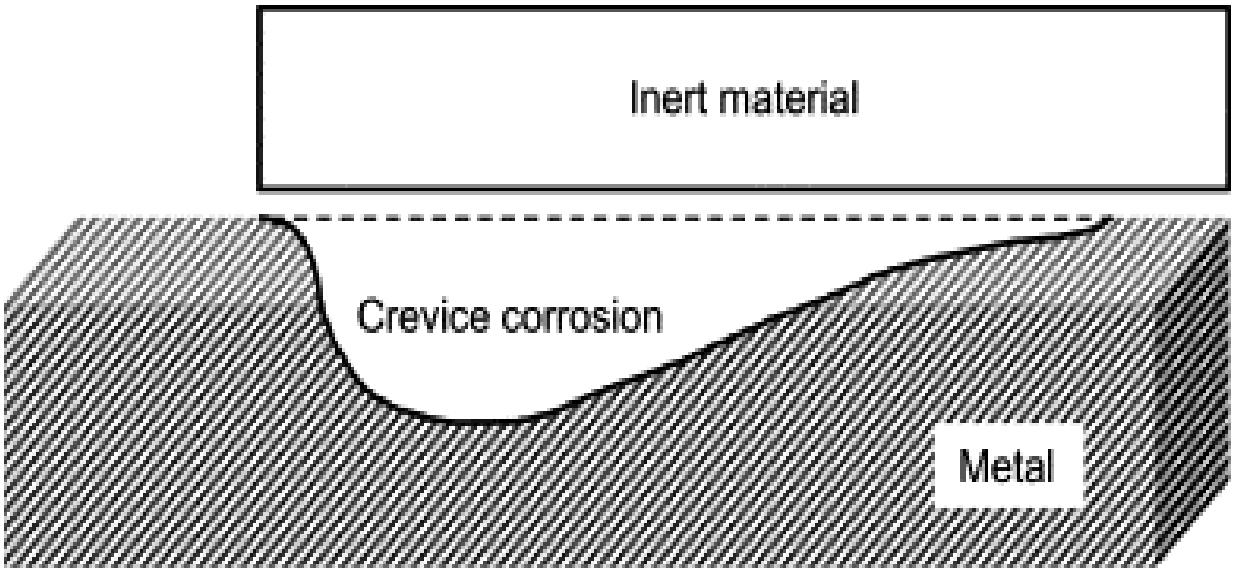
2.1 Het verschijnsel spleetcorrosie

Spleetcorrosie is een vorm van lokale corrosie geconcentreerd in spleten waarbij de opening voldoende breed is om de vloeistof in de spleet te laten doordringen en voldoende smal zodat de vloeistof in de spleet kan stagneren (Bardal, 2007). Lokale corrosie is een bijzonder verraderlijk degradatiefenomeen dat een aanzienlijke bedreiging vormt voor de integriteit van metalen structuren. Deze vorm van corrosie kan leiden tot ernstige degradatie op specifieke locaties, terwijl er slechts een zeer kleine hoeveelheid materiaal wordt aangetast. Verder is deze vorm zeer moeilijk te ontdekken door de nauwe openingen waarin het proces plaatsvindt (Refait et al., 2020).

De spleet zit tussen twee oppervlakken van hetzelfde metaal, van twee verschillende metalen of tussen een metaal en een niet-metaal (Hilti Belgium, 2015). Figuur 1 stelt de spleet tussen twee materialen voor. Ervaring toont dat de corrosie het meest intens is in het geval van metaal-metaal contact (Vargel, 2020).

Deze vorm van corrosie heeft meestal betrekking op ingesloten delen van mechanische of gelaste constructies, zoals boutkoppen, draad of geklonken connecties, sluitringen, kleppen, lapverbindingen en poreuze lassen (Vargel, 2020). Niettemin, kan spleetcorrosie zich ook ontwikkelen onder afzettingen van corrosieproducten, vuil, zand, stof en mariene organismen (Bardal, 2007).

Welk mechanisme er ook wordt ingeroepen om deze vorm van corrosie te verklaren, de oorsprong ervan hangt vaak, zo niet altijd, af van het ontwerp van de constructies waar ontoegankelijke gaten bestaan. Zelfs smalle spleten van enkele µm kunnen leiden tot spleetcorrosie (Vargel, 2020).



Figuur 1 Voorstelling van spleetcorrosie tussen een metaal en inert materiaal

Bron: Popov, 2015

2.2 Mechanisme van spleetcorrosie

Het mechanisme van spleetcorrosie is veel complexer dan het gegeven algemene mechanisme hieronder. Dit fenomeen is zeer onvoorspelbaar vanwege de vele ontwerp-, metallurgische en omgevingsfactoren die ermee samenhangen (Ahmad, 2006).

Een flensverbinding van een metaal M wordt blootgesteld aan neutraal water dat zuurstof en NaCL, natriumchloride, bevat. Figuur 2 en Figuur 3 illustreren de ontwikkeling die overigens onderverdeeld kan worden in de volgende 4 fases (Bardal, 2007):

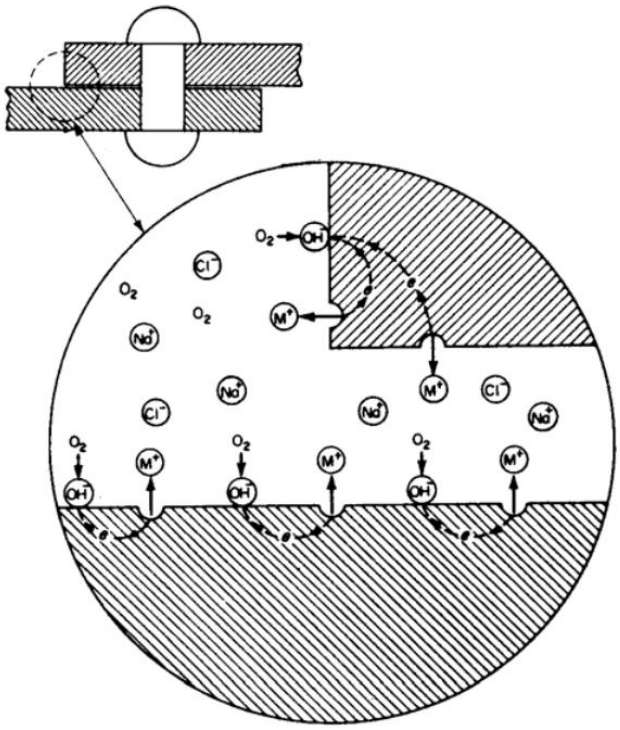
1 In de eerste frase corrodeert het metaal zowel binnen als buiten de spleet met dezelfde snelheid. De zuurstof in de spleet wordt gradueel geconsumeerd. De anodische reactie:

$$M \rightarrow M^{+} + e^{-} \qquad (2.1)$$

en de kathodische reactie:

$$O_2 + 2H_20 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-} \qquad (2.2)$$

vinden plaats op gebieden die gelijkmatig over het gehele oppervlak zijn verdeeld, wat resulteert in een uniforme aantasting (Bardal, 2007). De spleet zelf fungeert als anode, de gebieden buiten de spleet vormen de kathode (Ahmad, 2006).



Figuur 2 Beginstadium van spleetcorrosie

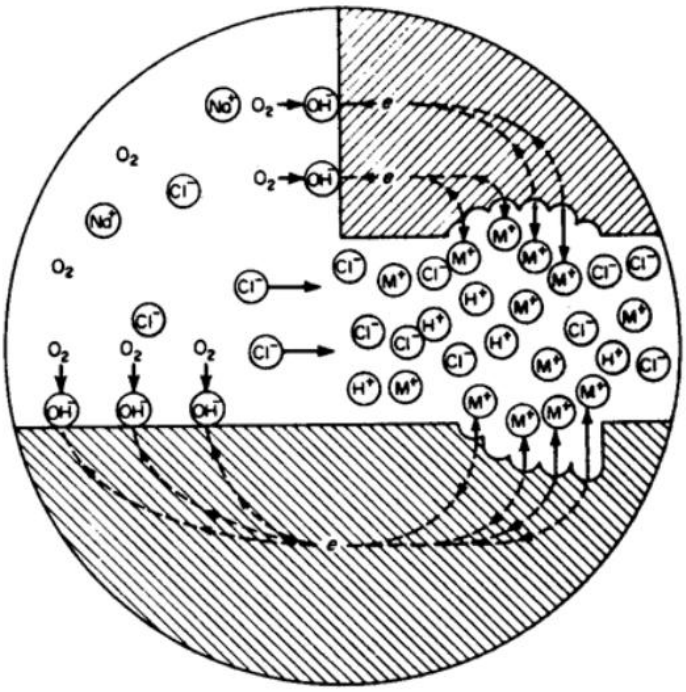
Bron: Bardal, 2005

2 Wanneer de zuurstof in de spleet volledig geconsumeerd is, kan OH^-, het hydroxide, niet langer geproduceerd worden (Bardal, 2007). Bovendien kan er door de nauwe spleet onvoldoende nieuwe zuurstof worden aangevoerd (Brak, 2000). Ondertussen gaat het oplossen van het metaal in de spleet door, ondersteund door de zuurstofreductie buiten de spleet. De concentratie van metaalionen in de spleet neemt toe, en door het ontbreken van OH^- productie in de spleet wordt het ladingsevenwicht gehandhaafd door migratie van Cl^-, chloride-ionen, naar de spleet. Op deze manier wordt er in de spleet een toenemende hoeveelheid gedissocieerd metaalchloride, MCl^-, geproduceerd. Het metaal chloride reageert met het water volgens de reactie (Bardal, 2007):

$$M + Cl^- + H_2O \rightarrow MOH + H^+Cl^- \qquad (2.3)$$

De reactie kan door blijven gaan doordat het zuurstof niveau bij de kathode onveranderd blijft (Ahmad, 2006).

Metaalhydroxide wordt afgezet en zoutzuur wordt gevormd in de spleet, wat leidt tot een geleidelijke verlaging van de pH-waarde. Dit proces resulteert in een kritische corrosietoestand (Bardal, 2007).



Figuur 3 Verder stadium van spleetcorrosie

Bron: Bardal, 2005

3 Wanneer het milieu voldoende agressief is geworden, wordt de zuurstoflaag op het oppervlak aangevallen. De spleetoppervlakken komen in een actieve toestand en de snelheid van de corrosie versnelt (Bardal, 2007). De oppervlakken worden actief doordat de passieve film afbreekt (Ahmad, 2006).

4 Dit is de groeifase, ook wel propagatie genoemd. Naarmate de corrosiesnelheid toeneemt, neemt ook de migratie van Cl^- toe, wat zorgt voor een verdere versnelling van het corrosieproces (Bardal, 2007). De propagatiefase eindigt wanneer het materiaal geperforeerd is. Het proces is autokatalytisch: eenmaal het begonnen is, zal het doorgaan tot het einde (Ahmad, 2006).

De tijd alvorens de spleet actief wordt, zoals beschreven in fases 1-3, noemt men de incubatieperiode. Deze periode kan enkele maanden tot jaren duren. Na de incubatieperiode kan echter in extreme gevallen binnen enkele dagen een volledige doorboring van platen met een dikte van enkele millimeters optreden. De duur van de incubatieperiode is moeilijk te voorspellen (Bardal, 2007). Schade door spleetcorrosie wordt in vele industrieën als een groot probleem beschouwd (Jafarzadeh et al., 2022).

2.3 Invloed van factoren

Er zijn verschillende factoren verantwoordelijk voor de initiatie van spleetcorrosie. Deze kunnen van ecologische aard alsook geometrisch alsook karakteristiek zijn (Etor, 2009).

2.3.1 Samenstelling van de legering

De elementaire samenstelling is de belangrijkste factor die invloed heeft op alle aspecten van staal. De fysische en mechanische eigenschappen zijn volledig afhankelijk van de chemische samenstelling. Mechanische eigenschappen omvatten taaiheid, hardheid, stijfheid, vloeigrens en treksterkte. Van deze vijf eigenschappen zijn de vloeigrens en de treksterkte de meest significante eigenschappen (Ahmad, 2006; YENA Engineering, 2024).

De vloeigrens is de minimale hoeveelheid kracht dat een materiaal kan weerstaan voordat er onomkeerbare plastische vervorming begint op te treden. Materialen met een relatief lage vloeigrens kunnen een statische belasting niet al te lang weerstaan. De treksterkte geeft de maximale spanningswaarde aan die een materiaal kan weerstaan. De vloeigrens is een nog belangrijker mechanisch eigenschap dan de treksterkte. Eenmaal de vloeigrens is overschreden, is het materiaal plastisch vervormd en onbruikbaar voor constructies (YENA Engineering, 2024).

2.3.1.1 Ongelegeerd staal

Voor veel constructies is ongelegeerd staal, mede door zijn lage prijs, een aantrekkelijk materiaal. Verder spelen de gunstige mechanische eigenschappen, de goede verwerkbaarheid, de goede lasbaarheid en de grote beschikbaarheid ervan een belangrijke rol (Gellings, 2006). Bij ongelegeerd staal is het koolstofgehalte bepalend voor de eigenschappen. Als het koolstofpercentage toeneemt, neemt ook de hoeveelheid cementiet toe. Dit resulteert in veranderingen van zowel de mechanische als de technologische eigenschappen (Ingels, 2001).

Ondanks dat koolstof voor grote wijzigingen van de mechanische eigenschappen van staal kan zorgen, wordt het niet als een legeringselement beschouwd (Tosec, 2024).

S235 is een ongelegeerd type constructiestaal met beperkte chemische elementen zoals ijzer, koolstof, fosfor, mangaan en zwavel (De redactie, 2022).

De naam is een samenvatting van een aantal eigenschappen die het materiaal heeft. De “S” duidt op constructiestaal en 235 geeft de waarde van de vloeigrens aan, 235MPa (N/mm^2) bij een plaatdikte van 16 mm (YENA Engineering, 2024).

S235 structureel staal wordt voornamelijk gebruikt in gebieden zoals industriële gebouwen, treinsporen en bruggen, golfbrekers, schepen en olie- en gasboorplatformen. Dit type staal wordt gekozen vanwege de lage kosten, die voortvloeien uit het lage gehalte aan legeringselementen (Başyiğit et al., 2023). Voor constructieprojecten waarbij geen hoge eisen worden gesteld aan de sterkte en stijfheid van het staal, is S235 een goedkope en duurzame optie (De redactie, 2022).

2.3.1.2 Gelegeerd staal

Door één of meerdere legeringselementen toe te voegen aan staal, met als doel de eigenschappen ervan te veranderen, verkrijgt men gelegeerd staal. Door de toegevoegde legeringselementen verandert de structuur, wat resulteert in verbeterde eigenschappen. Gelegeerd staal heeft een hoger koolstofgehalte, wat leidt tot een hogere treksterkte en vloeigrens in vergelijking met ongelegeerd staal. Enkel door staal te legeren met mangaan, nikkel en vanadium, kan de combinatie van grote sterkte en taaiheid bereikt worden. Ongelegeerd staal kan deze combinatie niet bereiken (Ingels, 2001).

Laag gelegeerd staal bevat hoogstens 5% legeringselementen, het legeringselement koolstof behoort hier niet toe. Hoog gelegeerd staal, waartoe roestvrij staal behoort, bevat als gevolg minstens 5% aan legeringselementen of meer (Ingels, 2001).

“De juiste invloed van elk legeringselement afzonderlijk beschrijven zou een boek op zich kunnen zijn” (Ingels, 2001). Tabel 1 geeft enkele eigenschappen en de invloed van een bepaald legeringselement op dit eigenschap weer.

Chroom, Molybdeen, ijzer en nikkel kunnen aan staalsoorten worden toegevoegd om ze beter bestand te maken tegen spleetcorrosie. Spleetcorrosie is ongebruikelijk bij 6% Molybdeen. Chroom kan wel gevaarlijk zijn als het de zuurtegraad in de spleet verhoogt

door hydrolyse. Bij hogere concentraties chroom verbetert de stabiliteit van de passieve film, verlaagt de pH tot onder de kritische drempel en vermindert de passieve stroomdichtheid. Als gevolg hiervan neemt de snelheid waarmee de chroomionen de spleet binnendringen af, evenals de hydrolyse, die de zure omstandigheden in de spleet veroorzaakt (Hussain et al., 2023).

S355 is een type laag gelegeerd staal. Dankzij de superieure sterkte-gewichtsverhouding wordt S355-staal steeds aantrekkelijker voor diverse structurele toepassingen zoals balken, verstijvingen, hoeken en windmolentorens (Balakrishnan et al., 2022). Voor constructieprojecten die een hoge sterkte en stijfheid van staal vereisen, is S355 een geschikte optie (De redactie, 2022).

Tabel 1 Legeringselement in relatie met het eigenschap

Bron: bewerkt van Ingels, 2001

1) Heel versterkend 2) Versterkend 3) Verzwakkend 4) Heel verzwakkend																
	C	N	P	S	Si	Al	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Ti	V	W
Vloeigrens	**2**		**2**		**2**			**2**	**2**	**2**	**2**	**2**			**2**	**2**
Taaiheid	**3**		**4**		**3**	**3**	**3**	**3**	**2**		**2**	**1**			**2**	
Elasticiteit					**2**					**2**						
Hardheid	**1**		**2**		**2**		**2**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**		**2**		**2**
Vermoeiingssterkte	**2**				**2**		**2**	**2**			**1**	**2**			**1**	**2**
Smeltpunt	**3**															
Corrosievastheid		**3**	**2**	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**		**2**	**2**		**3**	**2**	

2.3.1.3 Roestvrijstaal

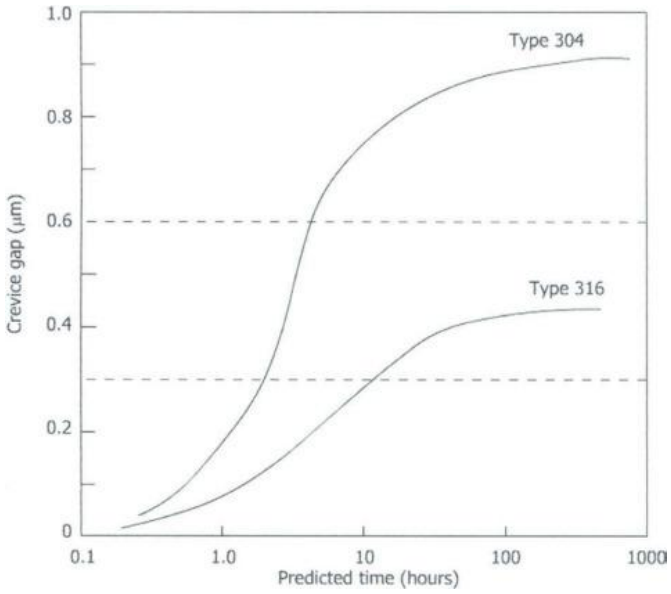
De enige manier om roestvrijstaal te produceren, is door het staal te legeren (Ingels, 2001). Roestvrijstaal zijn legeringen op ijzerbasis die 10% of meer chroom bevatten, wat het metaal corrosiebestendige eigenschappen verleent waarvoor roestvrijstaal zo gegeerd is. Het chroomgehalte kan verhoogd worden en andere legeringselementen kunnen worden toegevoegd of aangepast om aan specifieke productievereisten te voldoen. Momenteel zijn er 57 AISI roestvrijstaal soorten beschikbaar (Hadzihafizovic, 2023).

Studies met roestvrijstaal 304, Incoloy (legering 825), Hastelloy (legering G) en Inconel (625) gaven aan dat deze laatste 2 legeringen uitzonderlijk resistent waren tegen spleetcorrosie in zeewater bij zowel omgevings- als verhoogde temperaturen (Ahmad, 2006).

2.3.2 Geometrie van de spleet

De omvang van spleetcorrosie wordt beïnvloed door de diepte en de breedte van de spleet, het aantal spleten en de verhouding tussen de oppervlakken binnen en buiten de spleet. Over het algemeen geldt dat hoe groter het oppervlak buiten de spleet, de kathode, en hoe kleiner het spleetoppervlak, de anode, hoe groter de kans op spleetcorrosie (Ahmad, 2006). Een spleet die ofwel te groot ofwel te klein is, waardoor de vloeistof niet kan stagneren, zal geen gunstige omgeving bieden voor de ontwikkeling van spleetcorrosie (Hussain et al., 2023).

Voor type 316 en 304 roestvrijstaal is aangetoond dat hoe smaller de spleetopening, hoe korter de voorspelde tijd voor de initiatie van spleetcorrosie. Figuur 4 illustreert de uitkomst van dit onderzoek. Dit komt doordat een kleinere verhouding tussen het volume van de spleetoplossing tegenover het spleetoppervlak leidt tot een snellere toename van de zuurtegraad, waardoor de kritische waarde voor initiatie sneller wordt bereikt (Ahmad, 2006).



Figuur 4 Effect spleetopening op de voorspelde tijd tot initiatie van spleetcorrosie

Bron: Ahmad, 2006

2.3.3 Spleettype

Het type spleet kan variëren afhankelijk van of de spleet zich bevindt tussen metaal-op-metaal, metaal-op-niet-metaal, of tussen het metalen oppervlak en mariene aangroeiorganismen zoals zeepokken of andere organismen. Het is belangrijk om te weten of de factoren die de spleet beïnvloeden door de mens zijn gemaakt of natuurlijk zijn, zodat de geschikte preventiemethoden kunnen worden gekozen (Ahmad, 2006).

2.3.4 Effect van temperatuurstijging

In natuurlijk zeewater neemt de snelheid waarmee spleetcorrosie zich voortplant af wanneer de temperatuur stijgt van omgevingstemperatuur tot 70°C. De neiging tot het ontstaan van spleetcorrosie wordt echter niet beïnvloed door een temperatuurstijging. Een hogere temperatuur vermindert de oplosbaarheid van zuurstof, wat op zijn beurt de eigenschappen van de passieve film beïnvloedt die op het metalen oppervlak gevormd wordt (Ahmad, 2006).

2.3.5 Zuurstof

Naarmate zuurstof in de spleet wordt verbruikt, ontstaat er een potentiaalverschil tussen de spleet en de vrij blootgestelde gebieden buiten de spleet die aan zuurstof zijn blootgesteld. Als gevolg hiervan ontstaat er een concentratieverschil waardoor de zuurstof versnelt. Echter, naarmate de temperatuur stijgt, neemt de oplosbaarheid van zuurstof af, waardoor het spleetcorrosieproces wordt vertraagd. De exacte relatie tussen zuurstof en temperatuur is nog niet volledig begrepen (Ahmad, 2006; Hussain et al., 2023).

De vorming van de passieve laag is afhankelijk van de aanwezigheid van zuurstof, daarom beïnvloedt de zuurstofconcentratie de mate van spleetcorrosie en wanneer het start (Hussain et al., 2023).

2.3.6 Karakteristieken van de passieve laag

Het begin van spleetcorrosie is nauw verbonden met de eigenschappen van de passieve film op het metalen oppervlak, aangezien de afbraak van deze laag resulteert in de initiatie van spleetcorrosie. Een zeer stabiele passieve film kan spleetcorrosie voorkomen (Ahmad, 2006; Hussain et al., 2023).

Zuurstof speelt een cruciale rol bij de vorming van deze passieve film op het metaal, waardoor het een grote invloed heeft op het moment waarop spleetcorrosie begint (Ahmad, 2006). Wanneer het metaal al passief is, zal de corrosiesnelheid in fase 1, zie 2.2, laag zijn, evenals het bijhorende zuurstofverbruik (Bardal, 2007).

De afbraak van de passieve film is grotendeels afhankelijk van de agressiviteit van het elektrolyt. Chloride-gebaseerde oplossingen zijn bijzonder agressief en dragen bij aan het begin van spleetcorrosie. Het transportproces van chloride ionen in de spleet verhoogt de chloride concentratie in de spleet waardoor de agressiviteit van het elektrolyt in de spleet toeneemt. De oplossing bereikt een zeer hoge zuurtegraad en de pH daalt. Zowel zeewater als brak water zijn zeer agressieve milieus die de spleetcorrosie van staal bevorderen (Ahmad, 2006).

Door het lagere zuurstofgehalte wordt herpassivatie in de spleet bij passieve metalen bemoeilijkt. Dit zorgt ervoor dat spleetcorrosie aanzienlijke gevolgen kan hebben bij voornamelijk passieve metalen (Gellings, 2006).

2.4 Theorie voor spleetcorrosie

Er zijn 2 fundamentele theorieën voor spleetcorrosie. De kritische spleetoplossingstheorie en de IR drop theorie. Beide proberen een uitleg te voorzien omtrent de initiatie en de propagatie van de spleetcorrosie van passieve metalen in contact met een elektrolyt (Etor, 2009).

2.4.1 Kritische spleetoplossingstheorie

Oorspronkelijk werd het mechanisme dat het ontstaan van spleetcorrosie verklaarde, geïntroduceerd als het verzuringsmechanisme. Dit staat ook bekend als de theorie van de kritische spleetoplossing. Deze theorie stelt dat veranderingen in de chemische samenstelling van het elektrolyt, met name de vorming van een kritische spleetoplossing met hoge concentraties waterstof-en chloride-ionen, verantwoordelijk zijn voor de afbraak van de passieve laag op het metalen oppervlak. Deze verandering in de lokale chemie binnen de spleet leiden tot depassivering van de passieve laag (Hussain et al., 2023).

Wanneer een lage pH en een hoge concentratie chloride-ionen de passieve laag in de spleet verstoren, bereikt de oplossing zijn kritische staat en begint het actieve spleetcorrosieproces. Dit proces wordt gekenmerkt door de hoge corrosiesnelheden in de spleet. De theorie berust op verzuring, hydrolyse van metaalionen, en het massatransport van opgeloste ionen, zoals chloride-ionen, in en uit de spleet. Echter, deze benadering houdt geen rekening met het elektrodepotentiaal (*E*) en de verdeling ervan (*Ex*) binnen de lokale cel. Er wordt wel rekening gehouden met de stroom in de spleet die ontstaat als gevolg van het massatransport van ionen (Hussain et al., 2023).

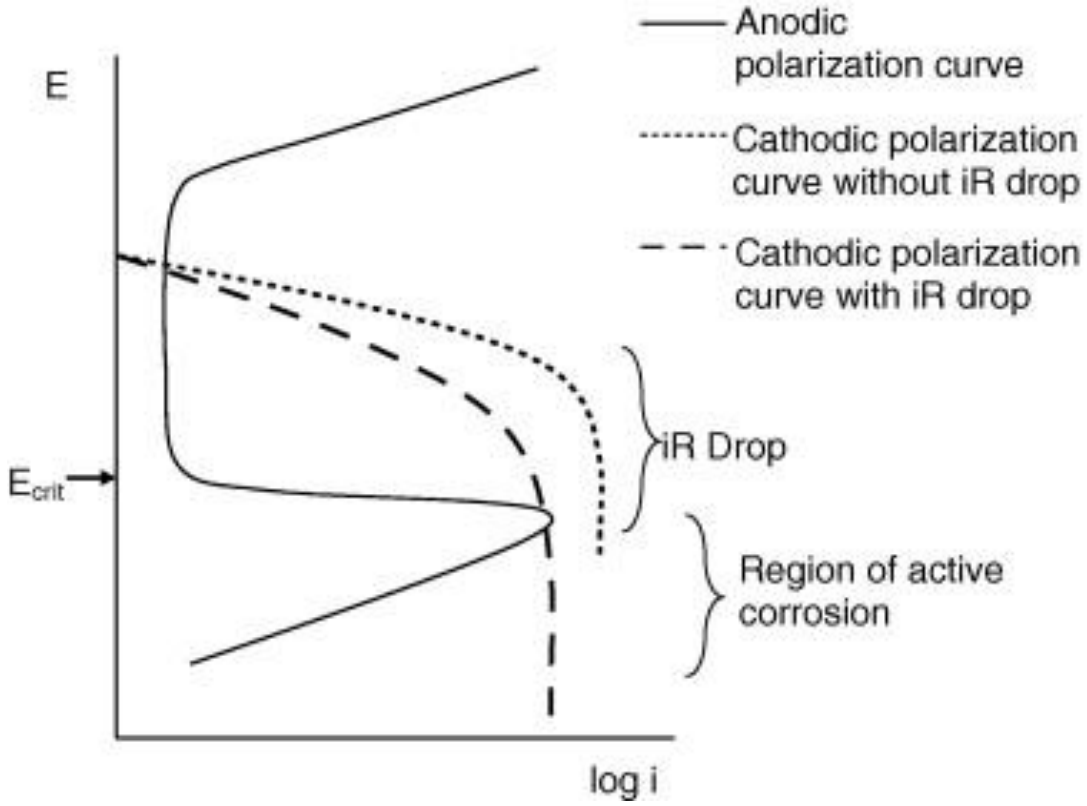
Om deze beperking aan te pakken, werd er een aanvullende theorie voorgesteld die rekening houdt met de verdeling van het potentiaal in de spleet tijdens het ontstaan van spleetcorrosie (Etor, 2009; Hussain et al., 2023).

2.4.2 *IR* drop theorie

Deze theorie stelt dat spleetcorrosie abrupt kan beginnen wanneer het potentiaalverschil tussen de binnenkant en de mond van de spleet voldoende groot is om anodische potentiëlen te activeren. Dit potentiaalverschil wordt veroorzaakt door de *IR* drop in de oplossing, waarbij *I* de stroom van de ionen uit de spleet is en *R* de weerstand van het elektrolyt in de spleet vertegenwoordigt. De grootte en de samenstelling van de oplossing zijn de factoren die de reactiekinetica van de *IR* drop beïnvloeden (Hussain et al., 2023; Kennell et al., 2008).

Figuur 5 illustreert het effect van de *IR* drop op de reactiekinetiek. De kathodische polarisatiecurve wordt getoond zonder *IR* effecten, waarbij deze curve de anodische polarisatiecurve alleen in het passieve gebied kruist, wat resulteert in een zeer lage corrosiestroom(Kennell et al., 2008).

Experimenten hebben aangetoond dat de aanwezigheid van *IR* effecten de kathodische polarisatiecurve naar beneden verschuift, onder het kritische potentiaal en in het actieve gebied. Dit leidt tot aanzienlijk hogere corrosiestromen (Kennell et al., 2008).



Figuur 5 Geïdealiseerd kinetisch corrosiediagram voor een passief metaal

Bron: Kennel, 2008

3 Spleetcorrosie onder aangroeiorganismen

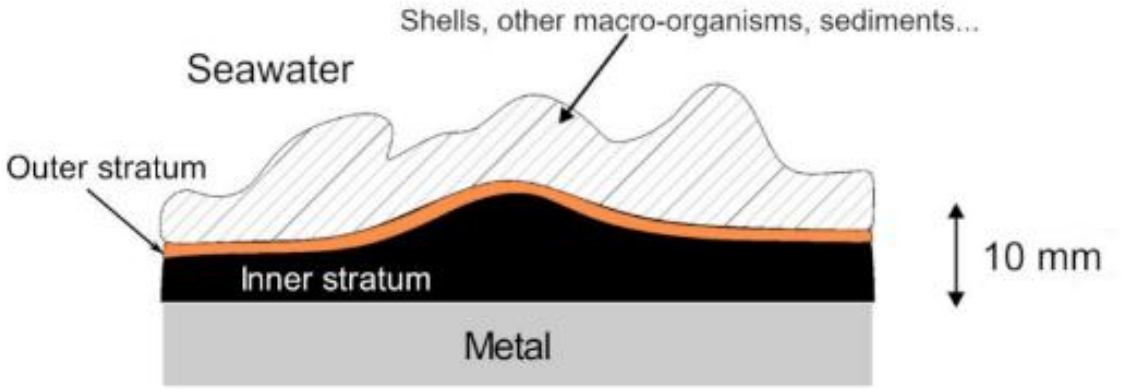
3.1 De aangroei

Aangroei is een complex proces waarbij sprake is van kolonisatie veroorzaakt door micro-organismen zoals: virussen, bacteriën, fungi, microalgen en protozoën en macro-organismen zoals: zeepokken, sponzen, oesters, mosselen, algen en hydroïden. Ze koloniseren en groeien op het oppervlak van het materiaal en vervolledigen hun levenscyclus en vormen aangroeiorganismen die zich aanpassen aan de omgeving (Wang et al., 2022). De aangroeiorganismen geven de voorkeur aan het hechten op een blank metalen oppervlak en vormen zo een spleetstructuur. Hoewel een uniforme aanhechting een fysieke barrière vormt, en dit de corrosiesnelheid kan verlagen, is het versnellende effect dat het kan hebben op lokale corrosie, door een niet-uniforme aanhechting, niet onbelangrijk. De aanhechting van deze aangroeiorganismen op het metaal kan de geschikte omstandigheden scheppen voor het ontstaan van spleetcorrosie. De ingesloten gebieden, gevormd door de aangroeiorganismen, kunnen verschillende bacteriegroei ondersteunen en kunnen microbiologische geïnduceerde corrosie, MIC afgekort, bevorderen (Zhang et al., 2022).

Hoewel er meer dan duizend verschillende maritieme organismen zijn ontdekt die schadelijke gevolgen hebben voor een structuur, hebben de meeste studies over bio-corrosie zich gericht op micro-organismen. In het geval van macro-organismen is de corrosiesnelheid en de aangroei zeer afhankelijk van de specifieke geografische locatie en de samenstelling van het plaatselijke mariene milieu. Hierdoor falen de meeste laboratoriumonderzoeken aangezien ze de omgeving niet exact kunnen nabootsen (Wang et al., 2022).

De deels/volledig gesloten omgeving is niet makkelijk te controleren en is vaak corrosiever dan traditioneel open zeewater. Hierdoor staat het onderzoek naar spleetcorrosie van staal in natuurlijk zeewater voor veel uitdagingen (Zhang et al., 2022). Figuur 6 illustreert een schematische voorstelling van de voornaamste kenmerken van de gevormde laag op een stalen coupon die gedurende 6 tot 11 jaar ondergedompeld was in zeewater. De corrosieproductenlaag kan enkele millimeters dik zijn en kan lokaal een dikte van zelfs 1

centimeter of meer bereiken. Onder de aanhechtingslaag van mineralen en macro-aanhechtingsorganismen bevindt zich doorgaans een oranje-bruine corrosieproductenlaag, die bekend staat als het *outer stratum*. Deze laag bestaat voornamelijk uit Fe(III)-oxyhydroxiden (FeOOH). De zwarte laag, het *inner stratum*, is in contact met het stalen oppervlak. Deze bestaat voornamelijk uit Fe(II) gebaseerde corrosieproducten, gemengd met magnetiet Fe3O4 (Refait et al., 2020).



Figuur 6 Schematische voorstelling van de aanhechtingslaag

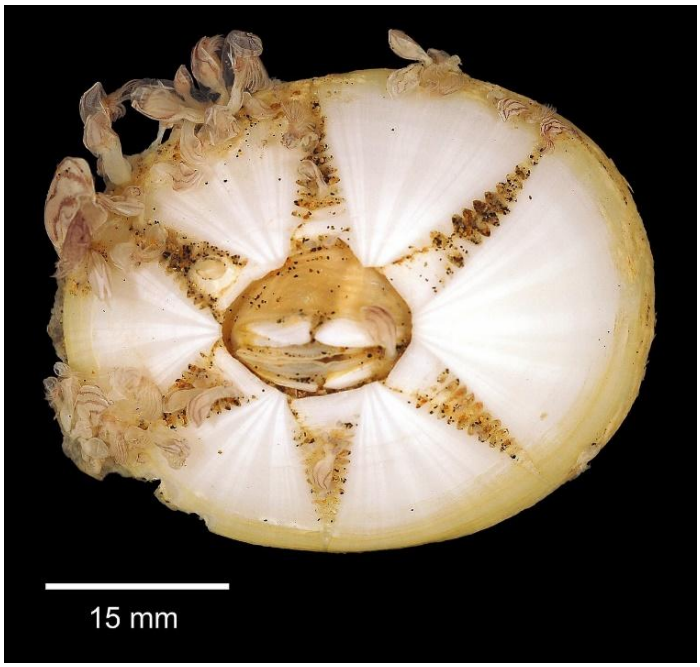
Bron: Refait, 2020

3.2 Soorten aangroeiorganismen

Om spleetcorrosie veroorzaakt door deze aangroeiorganismen te onderzoeken hebben onderzoekers zich voornamelijk gericht op organismen met harde kalkschelpen (Zhang et al., 2022).

3.2.1 Zeepokken

Zeepokken, voorgesteld in Figuur 7, zijn één van de meest problematische aangroei-organismen en komen wereldwijd wijdverspreid voor. Zeepokken vestigen zich typisch in grote groepen op ondergedompelde structuren, wat een ernstige bedreiging vormt. Dit vestigingsgedrag is cruciaal voor de voortplanting (Wu et al., 2024). Het vestigingsgedrag wordt getoond op Figuur 8. Onder de kreeftachtigen is de zeepok het enige organisme dat een permanente hechting vertoont aan oppervlakken (Propspeed, 2024).



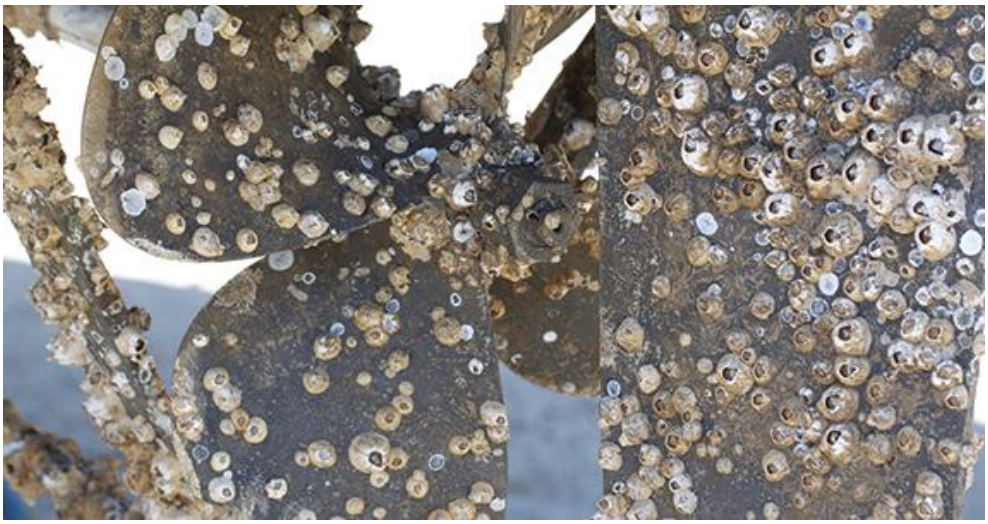
Figuur 7 De Chelonibia testudinaria, een zeepokkensoort

Bron: bewerkt van Wikimedia Commons, 2019

Door middel van een cementachtige substantie, afgescheiden door zeepokken, verankert het organisme zich stevig op het metalen oppervlak. Dit leidt tot uitgebreide corrosieproblemen en een verhoogde aandacht van onderzoekers (Zhang et al., 2022).

Eashwar (1992) suggereerde oorspronkelijk dat de dood van zeepokken een vereiste was voor de initiatie van spleetcorrosie. Na de dood van een zeepok zorgen bederf bacteriën voor de afbraak van het organisme, resulterend in een daling van de Ph waarde binnen de schaal van de zeepok. Deze zure oplossing dringt de schelp binnen, wat leidt tot de vorming van spleetcorrosie nabij de rand van de schelp, gevolgd door een voortplanting naar binnen. Ondanks deze theorie ontdekte Sangeetha (2010) echter dat de aanvang van spleetcorrosie niet noodzakelijk gerelateerd was aan de dood van zeepokken en zelfs kon optreden in de aanwezigheid van levende exemplaren (Zhang et al., 2022).

Eerder onderzoek suggereerde dat de diameter van een zeepok minimaal 10 mm moest zijn om een invloed te hebben op het corrosieproces. Echter, onderzoek door Blackwood et al. (2017) onthulde dat zelfs bij dode zeepokken met een diameter zo klein als 4,2 mm spleten konden worden waargenomen. Dit suggereert dat er geen kritische drempel bestaat voor de diameter van een zeepok voor de initiatie van spleetcorrosie.



Figuur 8 Zeepokken op een roer en schroefbladen

Bron: Arsnt, 2017

In hetzelfde veldexperiment door Blackwood et al. (2017) werd geconstateerd dat de meeste spleetcorrosie werd aangetroffen onder dode zeepokken. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat levende zeepokken over het algemeen een kleinere diameter hebben, vaak als gevolg van hun jeugd, in vergelijking met hun dode tegenhangers. Bovendien waren de spleten onder levende zeepokken, met een gemiddelde grootte van circa 1 mm, relatief kleiner dan die onder dode zeepokken, waarbij sommige spleten tot 0,5 mm in grootte waren. Aangezien slechts een klein aantal levende zeepokken spleetcorrosie veroorzaakten, lijkt het onwaarschijnlijk dat veel van de spleten die werden aangetroffen onder dode zeepokken waren ontstaan toen de zeepok nog in leven was. De observatie dat de spleten ook relatief groter waren bij dode zeepokken ondersteunt de veronderstelling dat spleetcorrosie niet noodzakelijk start na de dood van het organisme, maar eerder het corrosieproces versnelt.

De groeisnelheid van zeepokken varieert sterk afhankelijk van de omgevingscondities. De groei is het grootst in schoon water met sterke stroming, terwijl deze aanzienlijk afneemt bij trage stroming, en met name in omstandigheden met een hoge hoeveelheid slib (H. Barnes & Bagenal, 1951). Zeepokken vertonen over het algemeen een snelle groei, met uitzondering van de wintermaanden. Individuen die zich in april vestigen, kunnen in juli al larven afzetten en hun uiteindelijke grootte bereiken voor de eerste winter. Exemplaren die zich later in het seizoen vestigen, bereiken hun maximale omvang doorgaans pas aan het eind van de daaropvolgende lente (Rainbow, 1984).

3.2.2 Oesters

Oesters hechten zich zowel omhoog als zijwaarts aan structuren, waardoor rifstructuren ontstaan die een habitat bieden voor kreeftachtigen en andere weekdieren. Oesters zijn gevoelig voor veranderende omgevingsomstandigheden, met name toenames in temperatuur en zuurtegraad. Ze tolereren watertemperaturen tot 30°C en Ph-niveaus tussen 6,75 en 8,75. Veranderingen in deze voorkeursomstandigheden kunnen de groei van oesters vertragen. Ook golfslag, stromingen en diepte kunnen de overleving van oesters beïnvloeden. Dit heeft invloed op hun vermogen om te filteren, aangezien oesters filtervoeders zijn (Roncolato et al., 2024).



Figuur 9 Oesterschelp

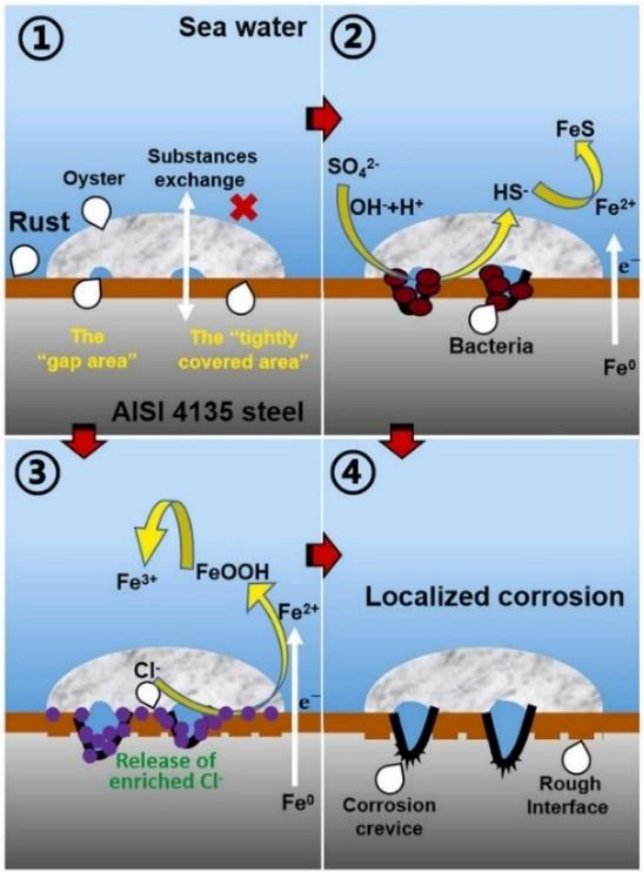
Bron: National Geographic, 2024

De oesterschelp is vaak ovaal of peervormig, maar varieert sterk in vorm afhankelijk van het oppervlak waarop ze groeien. De grootte van oesters varieert van 7,62 cm (3 inches) tot en met 35,56 cm (14 inches) (National Geographic, 2024). Figuur 9 toont een oesterschelp.

De omgeving heeft een grote invloed op de groei van de oester en de vorming van de oesterschelp. Eenmaal oesters zich hebben aangehecht, bewegen ze niet meer in hun leven. Hierdoor zijn plaatsen die een rustige stroming hebben een ideale omgeving voor oesters (Wang et al., 2022).

Aangehechte oesters kunnen complexe corrosie veroorzaken op stalen oppervlakken, waarbij lokale spleetcorrosie de ernstigste is. Oesters kunnen de zwaarste spleetcorrosie veroorzaken op maritieme staalstructuren, vergeleken met zeepokken en mosselen (Wang et al., 2023).

Het optreden van spleetcorrosie is waarschijnlijk te wijten aan de vorming van openingen tussen de oester, die een onregelmatige vorm heeft, en het staal, resulterend in de aanwezigheid van verschillende zuurstofcellen op het metalen oppervlak, wat het algemeen geaccepteerde mechanisme voor het ontstaan van spleetcorrosie is (Wang et al., 2022). Figuur 10 illustreert de ontwikkeling van spleetcorrosie onder een oesterschelp.



Figuur 10 Ontwikkeling van spleetcorrosie onder een oester

Bron: bewerkt van Wang, 2023

Een mogelijke verklaring voor de meer uitgebreide corrosie onder oesters is dat de schelp over een breder oppervlak vastzit terwijl een mossel zich enkel via een byssusdraad vasthecht aan het metaal. De aanhechting van een oester is ook verschillend van die van een zeepok (Blackwood et al., 2017). De sterkere aanhechting van een oester betekent waarschijnlijk een strakkere spleet en dus agressievere corrosie (Wang et al., 2022).

In aanvulling, heeft Alberts et al. (2015) gevonden dat oesters een verhoogd chloorgehalte hebben in hun aanhechtingslijm, vermoedelijk in de vorm van chlorine waardoor het kan bijdragen aan het ontstaan van plaatselijke corrosie.

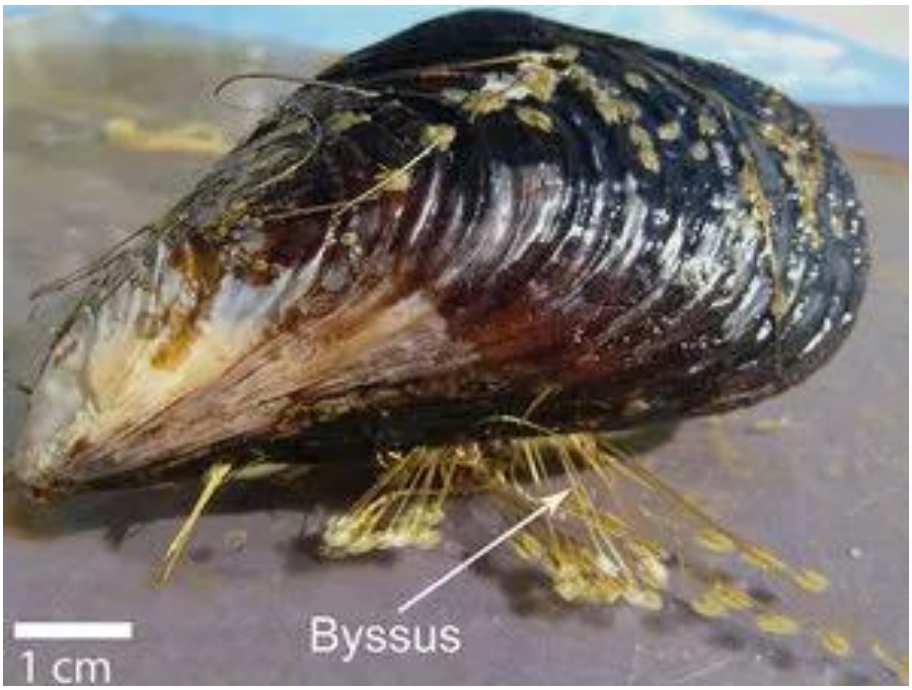
Wang et al. (2022) constateerde in zijn veldexperiment dat onder de strakke oesterbedekking de oesterafscheidingen de mate van losheid van de corrosieproductenlaag veranderden, waardoor deze dichter werd en de hechting toenam. Oesterafscheidingen worden beschouwd als een viskeus mengsel van organische en anorganische stoffen, waardoor oesters zich stevig aan metalen oppervlaken kunnen hechten. Er wordt daarom aangenomen dat de oesterlijm in de losse corrosieproductenlaag doordrong en fungeerde als een stabilisator voor deze laag, wat de corrosie van het staal tot op zekere hoogte vertraagde.

3.2.3 Mosselen

Mosselen zijn tweekleppige weekdieren die wereldwijd verspreid zijn in kustgebieden en spelen een cruciale ecologische rol in mariene ecosystemen. Ze vormen mosselbedden op verschillende substraten, waarbij ze voedsel en habitat bieden aan diverse organismen. Hierdoor vergroten mosselen de biomassa en soortenrijkdom binnen deze bedden aanzienlijk (Wang et al., 2024).

De byssusdraad, zie Figuur 11, is een cruciale structuur in mosselen, die hen in staat stelt om hydrodynamische krachten door golfwerking en stromingen te weerstaan en zich aan het substraat te hechten. De byssusdraad is een gespecialiseerde structuur die bestaat uit drie verschillende componenten die elk verschillende functies vervullen tijdens de hechting. De byssusdraden zijn samengevoegd op een steel aan de onderzijde van de voet (Wang et al., 2024).

Het proximale gebied, dichtst bij het mosselweefsel, van de byssus wordt gekenmerkt door flexibiliteit en elasticiteit, waardoor het kan uitrekken tijdens de hechting. Het distale deel van de byssus is stijf en glad, wat zorgt voor een sterke en veerkrachtige anker voor de mossel. De hechtende byssusplaat fungeert als een structurele basis die de byssus met het substraat verbindt en zorgt voor het vermogen om zich te hechten (Wang et al., 2024).



Figuur 11 Byssusdraad van een mossel

Bron: Greenfieldboyce, 2010

Uit veldonderzoek door Neville & Hodgkiess (2000) werd aangetoond dat sulfide corrosieproducten gerelateerd zijn met de aanhechtingspunten van de byssusdraad op het metalen oppervlak onder omstandigheden van anodische polarisatie. Hoewel er geen bewijs werd gevonden van putvorming onder deze byssusdraden, geeft de aanwezigheid van zwavel aan dat de omstandigheden agressief genoeg kunnen worden om een plaatselijke aantasting te bevorderen.

In het veldexperiment door Blackwood et al. (2017) werd er geen bewijs van corrosie onder groene mosselen gevonden. Zij stelden vast dat de aanwezigheid ervan zelfs gewild kan zijn aangezien ze de aanhechting van meer agressieve aanhechtingsorganismen kunnen voorkomen.

De groei van mosselen, zowel in termen van schelplengte als vleesgewicht, wordt in belangrijke mate bepaald door de hoeveelheid en kwaliteit van het beschikbare voedsel. Naast voedselkwantiteit en -kwaliteit beïnvloeden ook omgevingsfactoren zoals watertemperatuur, zoutgehalte, stromingssnelheid, golfslag, de grootte en leeftijd van de mossel, evenals interspecifieke en intraspecifieke competitie, bijvoorbeeld met andere (schelp)organismen of door de aanwezigheid van zeepokken op de schelp, de groei. Daarnaast kan het getijdenregime van invloed zijn, aangezien de duur van blootstelling aan

de lucht bepaalt hoe lang mosselen in staat zijn voedsel uit het water op te nemen, wat direct de groeisnelheid beïnvloedt. Dit verklaart waarom mosselen in de getijdenzone doorgaans kleiner zijn dan soortgenoten in het sublitoraal, het gebied onder de laagste waterlijn dat nooit droog valt (Schelpdieren, 2023).

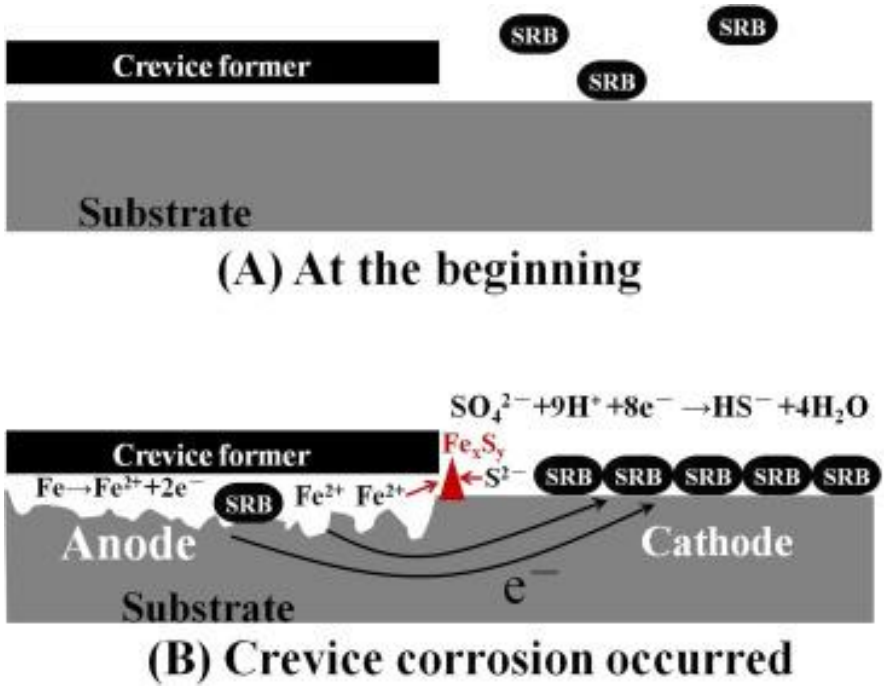
De verhouding tussen schelplengte en vleesgewicht wordt mede bepaald door de voedselbeschikbaarheid. Mosselen met toegang tot voldoende en kwalitatief goed voedsel vertonen doorgaans een relatief hoog vleesgewicht ten opzichte van hun schelplengte. De lengtegroei van de schelp vindt hoofdzakelijk plaats in de periode van april tot augustus, wanneer de voedselbeschikbaarheid het grootst is. De voor onderhoud en groei benodigde energie neemt exponentieel toe met stijgende temperatuur. Na de zomer daalt het lichaamsgewicht van mosselen, hoofdzakelijk als gevolg van een verminderede voedselbeschikbaarheid. Deze afname kan zich vanaf augustus voortzetten en in de winter leiden tot een gewichtsverlies tot wel 50% (Schelpdieren, 2023).

3.2.4 Sulfaat reducerende bacteriën

Het laboratoriumexperiment van Permeh et al. (2021) toonde aan dat de sulfaat reducerende bacteriën, afgekort SRB, activiteit zich kan ontwikkelen onder spleetomstandigheden met fysieke modaliteiten die harde en zachte aangroeiorganismen vertegenwoordigen. De toegevoegde activiteit van de sulfaat reducerende bacteriën kan corrosie in de spleet bevorderen. Wel zijn de omgevingsfactoren in de spleet van belang, vooral de interactie met de bulk oplossing. De SRB activiteit was hoger in een ontluchte omgeving, zoals men verwacht in een spleetomgeving.

De resultaten van het labo experiment door Zhang et al. (2021) kwamen tot dezelfde bevindingen. De sulfaat reducerende bacteriën hadden voor een groot galvanisch effect gezorgd tussen de binnenkant en de buitenkant van de spleet. Dit galvanische effect was veroorzaakt door het verschil in ontwikkeling van de SRB biofilms in de spleet en erbuiten. Tijdens het corrosieproces absorbeert de SRB biofilm buiten de spleet de door de anode vrijgegeven elektronen. IJzerionen geproduceerd door de oplossing van het staal in de spleet ontmoeten bij de spleetopening de sulfide-ionen. Gecombineerd vormen deze een onoplosbaar corrosieproduct dat zich opstapelt rond de spleetopening. Dit proces is

weergegeven in Figuur 12. Naarmate de breedte van de spleet toenam, verminderde de spleetcorrosie. Een wijdere spleet verminderde ook het verschil in biofilms, dat op zijn beurt zorgde voor een lager galvanisch effect. Maar door de verstopping van het corrosieproduct rond de spleetopening, was de corrosie in de spleet nog steeds ernstig.



Figuur 12 Spleetcorrosie in zeewater met SRB

Bron: Zhang, 2021

3.2.5 Bacterieel slijm

Bacterieel slijm vormt zich doorgaans binnen de eerste 1-2 dagen na onderdompeling van een metaal in water. Het slijm creëert een gedeeltelijke barrière tussen het oppervlak en de omringende zeewateromgeving (Cemmedo, 2015).

Het bacterieel slijm heeft als eigenschap dat het de aangroei bevordert aangezien het een voedingsbron biedt voor zeepokken. Bovendien maakt het oppervlakken donkerder en ruwer, wat de aanhechting van organismen bevordert. Chlorofylhoudende organismen zoals fytoplankton verrijken de zuurstofniveaus in de oppervlaktelagen van het water, waardoor het de corrosieprocessen vergemakkelijkt (Imbert et al., 1999).

Een metaal dat normaal gesproken een relatief lage corrosiesnelheid vertoont in zeewater, kan door de aanwezigheid van bacterieel slijm, dat de lokale omgeving aanpast, plots een verhoogde corrosiesnelheid vertonen (Cemmedo, 2015).

3.2.6 Zakpijp

De zakpijp is lid van de ongewervelde klasse Ascidia zeedieren met enkele primitieve gewervelde kenmerken (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2025).

Zakpijpen zijn voornamelijk sessiele organismen, wat betekent dat ze permanent gevestigd zijn op een oppervlak. Ze hebben doorgaans de vorm van een aardappel en komen voor in alle zeeën, van de getijdenzone tot op grote diepten. Gewoonlijk bevinden ze zich op pierpalen, scheepsrompen, rotsen, grote schelpen en de ruggen van grote krabben. Sommige soorten leven solitair, terwijl andere in groepen of kolonies voorkomen (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2025).

De larven van een zakpijp lijken op kikkervisjes. Ze voeden zich niet, maar zoeken naar een geschikte plek op de zeebodem of op een oppervlak en vestigen zich vervolgens met hun kop naar beneden. Met behulp van specifieke kleefklieren aan de voorkant van hun kop hechten ze zich vast aan het oppervlak. Eenmaal gevestigd ondergaan ze een gedaanteverwisseling waarbij ze hun staart en zwemvermogen verliezen. Daarbij draait de rest van hun lichaam 180 graden, waarna ze zich ontwikkelen tot een kleine zakpijp. De meeste zakpijpen leven ongeveer één jaar als volwassen organisme (Marine Education Society of Australasia, 2015).



Figuur 13 De ronde zakpijp

Bron: Haarsma, 2019

Het veldonderzoek van Chen et al. (2023) stelt dat de bedekking door zakpijpen de plaatselijke corrosie veroorzaakt door zeepokken zou kunnen verzachten. De corrosie op het onderzochte staal van het veldonderzoek werd voornamelijk veroorzaakt door de zeepokken. De zakpijpen veroorzaakten op zichzelf geen lokale corrosie, maar konden enkel de door de zeepokken veroorzaakte corrosie verzachten.

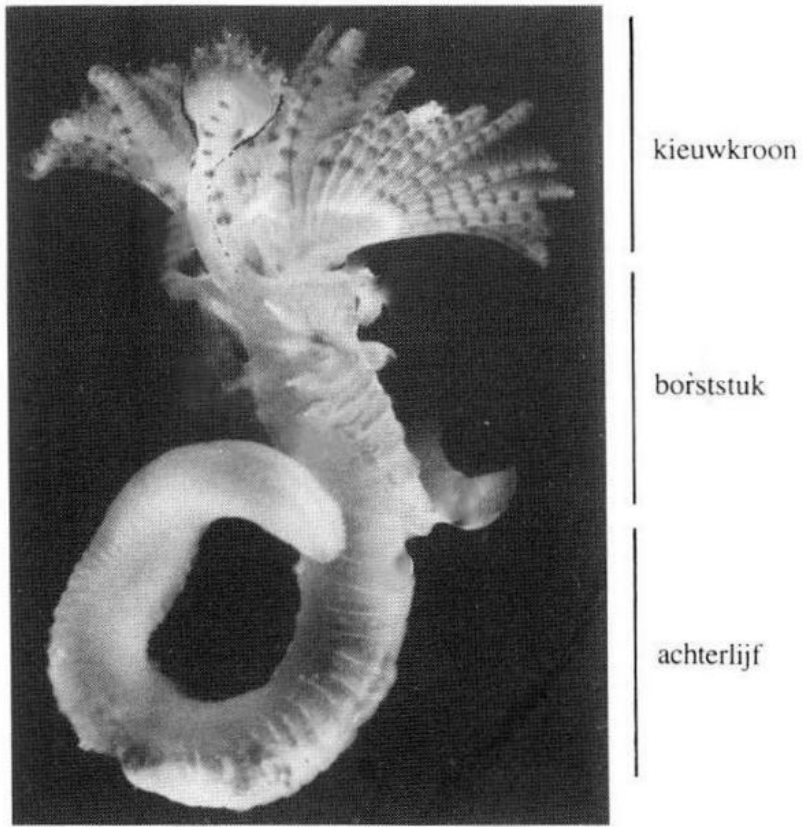
De bedekking door de zakpijpen kan de degradatie van de passieve film vertragen. Verder zou de groei van de zakpijpen op het staaloppervlak de hoeveelheid aangehechte zeepokken kunnen minimaliseren en tot slot zouden de zakpijpen de absorptiecapaciteit van de zeepokken kunnen verminderen (Chen et al., 2023).

Figuur 13 toont de ronde zakpijp. Deze soort komt voor in Europese wateren van Bergen (Noorwegen) tot Galicië (Spanje), evenals op enkele locaties in de Middellandse Zee. In Nederland (Grevelingen en Delfzijl), België (Oostende) en Frankrijk (Le Havre) is de soort via moleculaire analyses geïdentificeerd. De ronde zakpijp heeft een grijze tot groenblauwe kleur. De grootste individuen bereiken een lengte en hoogte van 2 tot 5 cm, hoewel de meeste exemplaren een afmeting van circa 1 tot 3 cm hebben. De soort is tolerant ten opzichte van brede variaties in temperatuur, zoutgehalte en verontreinigingsniveaus (Hiscock, 2008; Smithsonian Environmental Research Center, 2025).

3.2.7 Kalkkokerworm

Een kalkkokerworm is een ringworm die bestaat uit meerdere segmenten en kan in twee lichaamsdelen worden opgedeeld: de thorax (het borststuk) en het achterlijf. Dit is weergegeven op Figuur 14, dat een kalkkokerworm toont die uit zijn koker is gehaald (Ten Hove & Lucas, 1996).

Het borststuk bevat doorgaans zeven segmenten, terwijl het achterlijf minstens tweemaal zoveel segmenten heeft, en dit aantal neemt toe naarmate het dier ouder wordt. Kalkkokerwormen groeien hun hele leven door, wat ook geldt voor hun kokers. De uiteindelijke maximale grootte wordt beïnvloed door omgevingsfactoren zoals temperatuur, zoutgehalte en beschikbaarheid van voedsel (Ten Hove & Lucas, 1996).



Figuur 14 Kalkkokerworm uit zijn koker

Bron: Bewerkt van Ten Hove & Lucas, 1996

Aan de voorkant van het dier bevindt zich de kieuwkroon. Deze bestaat meestal uit twee halfcirkelvormige ingeplante reeksen kieuwdraden. Deze structuur wordt niet alleen gebruikt voor ademhaling, maar speelt ook een belangrijke rol bij het filteren van voedsel uit het water. Dit gefilterde voedsel bestaat voornamelijk uit fijn organisch afval of eencellige algen (Ten Hove & Lucas, 1996).

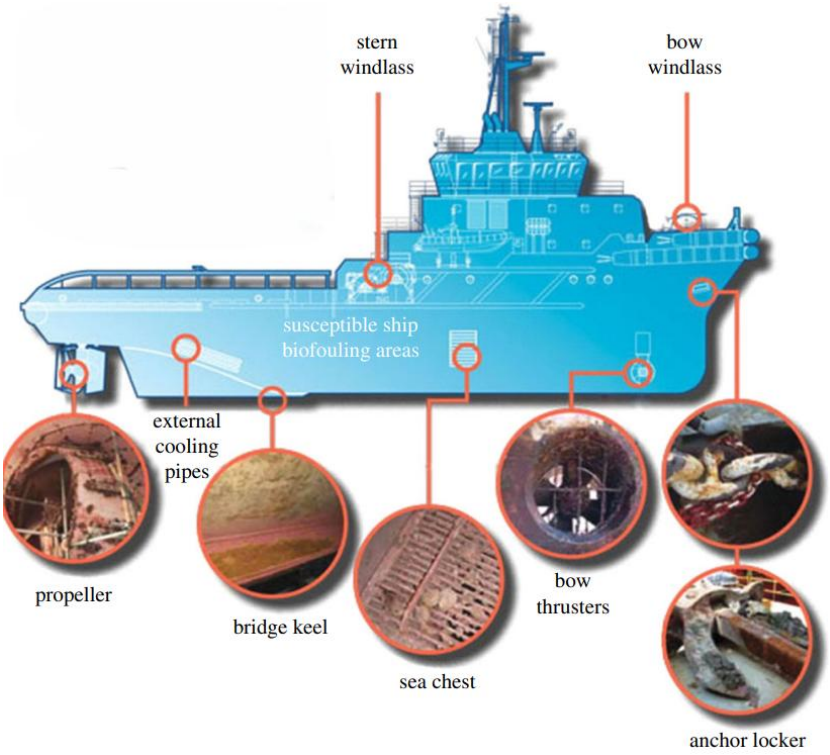
De trompetkalkkokerworm komt voor in diverse wateren en havens, waaronder Vlissingen, het Veerse Meer en het Noordzeekanaal, en vertoont een goede vestiging in gebieden met een zoutgehalte tussen de 6 en 38 promille, met een voorkeur voor brak water. Na vestiging ontwikkelt de larve zich tot een kalkbuis, met een groeisnelheid van circa 4 tot 6 cm per jaar. Binnen 2 tot 3 maanden na vestiging is het organisme in staat om zelf larven af te zetten. Vermoedelijk vindt de eerste larvale afzetting plaats in het voorjaar rond eind maart of begin april. Schepen die in de haven overwinteren of reeds vroeg in het seizoen te water worden gelaten, vormen daardoor een aantrekkelijk substraat voor larvale vestiging (Watersportvereniging Noord-Beveland, 2025).

3.3 Structuren met spleetcorrosie onder aangroei

3.3.1 Scheepsromp

De corrosie van een metalen oppervlak dat permanent in contact staat met zeewater, zoals de romp van een schip, wordt voornamelijk veroorzaakt door de opstapeling van aanhechtingsorganismen. Hierdoor is het onderwatergedeelte van een schip het meest vatbaar voor corrosie (Valdez et al., 2016).

De gebieden met de beste beluchting, zoals de waterlijn, de propeller en het roerblad, ervaren de meeste aangroei. Deze locaties zijn ook te zien op Figuur 15, die de gevoelige gebieden voor aangroei weergeeft op een standaard petroleumschip. De aanhechting veroorzaakt een toename van het hydrodynamische volume, een verhoging van de wrijvingseffecten, een afname van de snelheid van het schip en een stijging in het brandstofverbruik (Bixler & Bhushan, 2012).



Figuur 15 Plaatsen waar aanhechting wordt verwacht

Bron: bewerkt van Bixler & Bhushan, 2012

3.3.2 Haveninfrastructuur

Veel rivier- en maritieme constructies, zoals havens, stalen keermuren, scheepswerven en boeien, worden ook getroffen door corrosie. De fysisch-chemische eigenschappen van de oppervlakken spelen een belangrijke rol bij de aanhechting van organismen tijdens hun ontwikkeling. De hevigste corrosie wordt teruggevonden in de stalen keermuren van havens. De keermuur verliest plaatdikte, totdat perforatie van de plaat optreedt (Valdez et al., 2016).

Corrosie en vervuiling zijn twee onderling verbonden onderwerpen die beide schadelijk zijn voor de kwaliteit van maritieme constructies. Vervuild zeewater in een haven versnelt de corrosie aanval op staal aanzienlijk. De kwaliteit van het rivierwater dat naar de haven stroomt, wordt beïnvloed door een scala aan fysische, chemische, biologische en thermische karakteristieken. Deze watervervuiling wordt veroorzaakt door industriële, agrarische en stedelijk activiteiten in de regio. Biologische en chemische processen transformeren dit afval in giftige en corrosieve stoffen (Garcia et al., 2010; Valdez et al., 2016).

3.3.3 Offshore windturbines

Vaak worden offshore windturbines vergeleken met offshore olie- en gasboorplatformen. Hoewel ze in sommige opzichten vergelijkbaar zijn, zijn er toch fundamentele verschillen, met name op het gebied van toegankelijkheid. Windturbines zijn onbemande constructies met zeer beperkte toegangsmogelijkheden. Dit maakt de onderhoudsstrategie ingewikkelder. Bovendien is het moeilijker om de evolutie van corrosie op deze offshore windturbines nauwkeurig te meten vanwege deze beperkte toegang en monitoringsmogelijkheden (Khodabux et al., 2020).

Op offshore windturbines ontstaan zware korstvormingen van organismen met een harde schelp op het metalen oppervlak (Price & Figueira, 2017). In Tabel 2 worden de verschillende zones van een offshore windturbine weergegeven, samen met het verwachte type corrosie. Hieruit blijkt dat spleetcorrosie voornamelijk optreedt in de getij- en onderwaterzone. De hoogste corrosiesnelheid wordt waargenomen in de getijzone

(Khodabux et al., 2020). Figuur 16 verduidelijkt waar deze zones en de bijhorende aangroeiorganismen zich bevinden.

Tabel 2 Bepaalde zones en het type corrosie

Bron: bewerkt van Price en Figueira, 2017

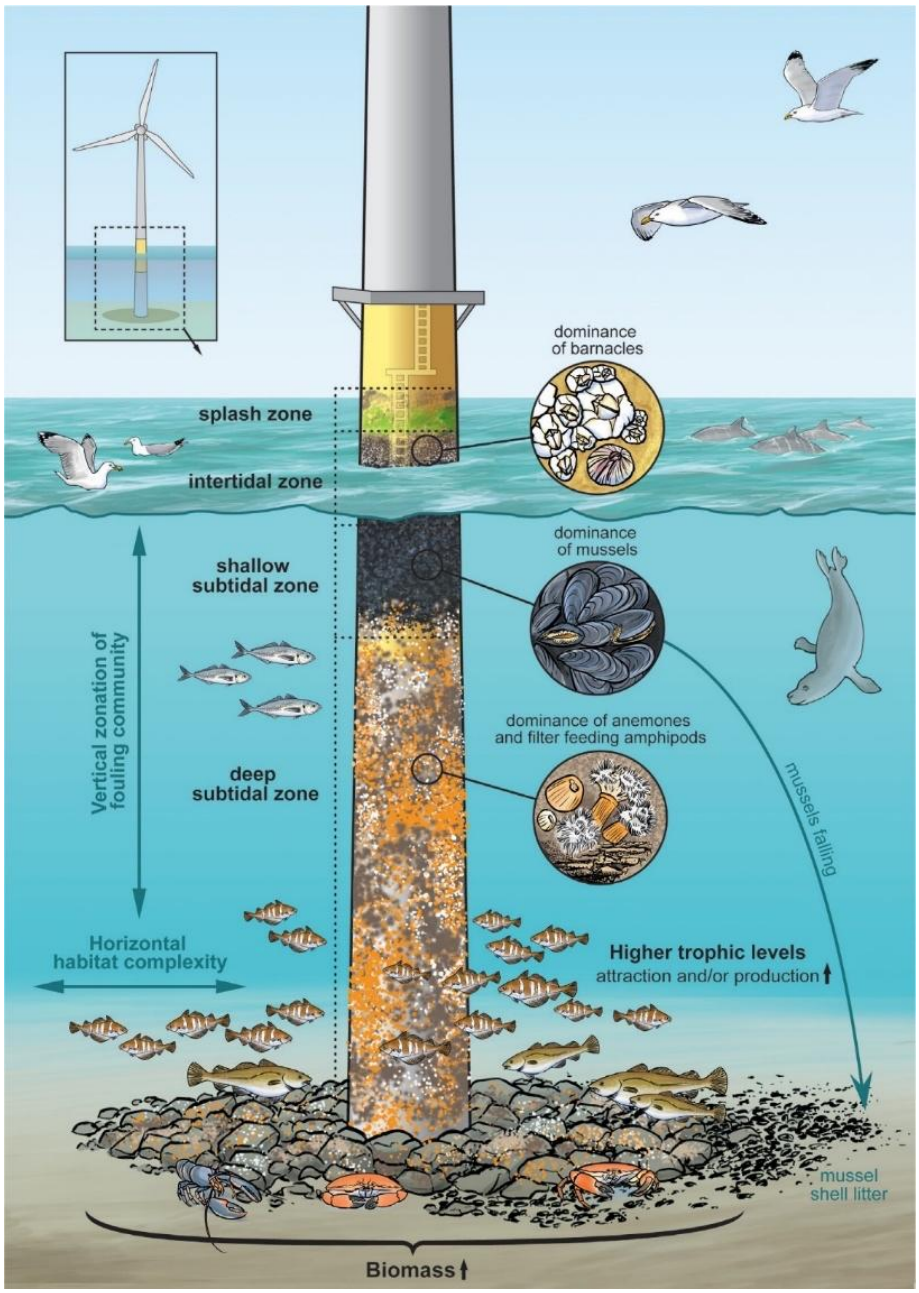
Corrosie zones	Type corrosie
Atmosferische zone	
Externe en interne gebieden van de stalen constructie	Uniforme en erosie corrosie, stress corrosie
Interne oppervlakken zonder controle van de vochtigheidsgraad	Uniforme en putcorrosie
Interne oppervlakken van structurele onderdelen	Uniforme en putcorrosie
Getijzone	
Externe en interne gebieden van de stalen constructie	Uniforme, spleet-, putcorrosie en MIC
Interne oppervlak van kritieke structuren	Uniforme, spleet- en putcorrosie
Componenten onder gemiddelde water niveau	Uniforme, spleet- en putcorrosie
Componenten 1.0 meter onder gemiddelde water niveau	Uniforme corrosie en MIC
Externe oppervlakken in de getijzone onder gemiddelde water niveau	Uniforme corrosie en MIC
Onderwater zone	
Externe en interne gebieden van de stalen constructie	Uniforme en erosiecorrosie en MIC
Interne oppervlakken van de stalen constructie	Uniforme, spleet-, putcorrosie en MIC
Kritieke onderdelen en componenten	Uniforme, MIC en/of putcorrosie

3.3.4 Olie- en gasboorplatformen.

De accumulatie van mariene organismen op offshore constructies kan aanzienlijke problemen veroorzaken, zowel op het gebied van corrosie als op het gebied van mechanische stress. Hierdoor vereisen deze offshore platformen regelmatig onderhoud waarbij de aanhechtingsorganismen verwijderd worden (Relini et al., 1998).

De mate van aangroei is sterk afhankelijk van de waterdiepte (Venugopalan & Wagh, 1990). Offshore platformen kunnen zich bevinden op locaties met waterdieptes van meer dan 305 meter, terwijl windturbines meestal op ondiepere locaties worden geplaatst, met waterdieptes tot ongeveer 60 meter (Al-Janabi, 2020; Port of Rotterdam, 2021).

De zones van een offshore platform komen overeen met die van de offshore windturbines, zoals weergeven in Figuur 16. Over het algemeen wordt de hoogste corrosiesnelheid ook hier meestal aangetroffen in de getijzone (Al-Janabi, 2020).



Figuur 16 Zones op een monopile met de aangroeiorganismen

Bron: Bewerkt van Degraer, 2020

4 Analysetechnieken

4.1 X-ray Diffractie

X-ray Diffractie, afgekort als XRD, is een niet-destructieve analytische techniek die gedetailleerde informatie biedt over de interne roosterstructuur van kristallijne stoffen in de vorm van een diffractiepatroon. Het toont structuren die niet zichtbaar zijn aan het oppervlak. Bijna alle kristallijne vaste stoffen vertonen een uniek röntgendiffractiepatroon, waardoor het mogelijk is om de samenstellingen van het monster te karakteriseren (Siggelkow, 2012). XRD is de meest accurate analytische techniek voor het identificeren van de samenstelling op een stalen oppervlak (Fytianos et al., 2016).

XRD is een techniek gebaseerd op de constructieve interferentie van een monochromatische röntgenstraal en een kristallijn monster. Deze methode maakt gebruik van röntgenstraling, vaak afkomstig van koper. De röntgenbundel wordt gefilterd om een monochromatische straling te produceren en vervolgens gecollimeerd om de stralingsbundel uit te lijnen en te richten op het te onderzoeken monster. De afgebogen röntgenstralen worden gedetecteerd, verwerkt en geteld, wat resulteert in een uniek diffractiepatroon. (Siggelkow, 2012).

Het veldonderzoek door Wang et al. (2023) maakte gebruik van de XRD-analysemethode om de kristalstructuur van de corrosieproducten te bestuderen die zich hadden gevormd op AISI 4135 stalen coupons. Deze coupons waren gedurende 6 maanden volledig ondergedompeld in zeewater in China.

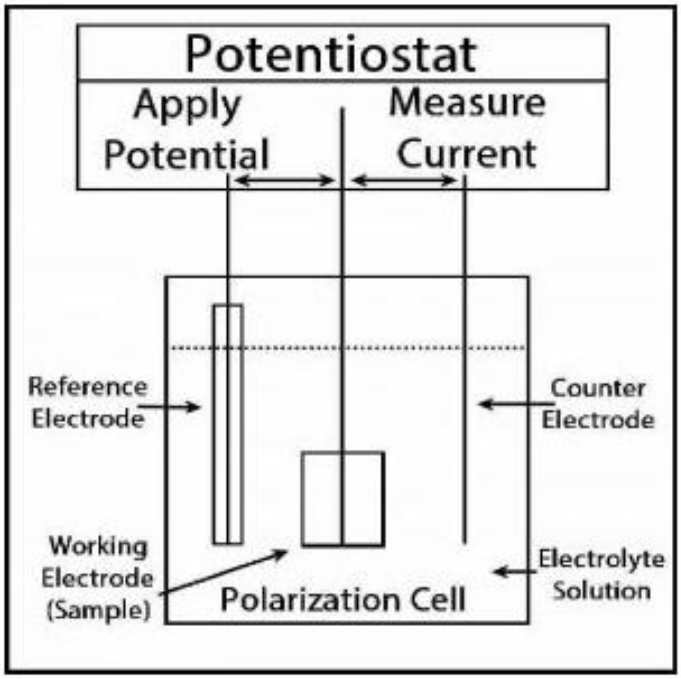
Het veldexperiment van Wang et al. (2022) maakte ook gebruik van XRD om de invloed van oesters op corrosie te analyseren op de zone waar de oester op het staal zit aangehecht.

4.2 Potentiostaat

Elektrochemische experimentele methoden kunnen gebruikt worden om de corrosie eigenschappen van metalen te karakteriseren in combinatie met verschillende elektrolytoplossingen. Potentiodynamische experimenten kunnen uitgebreide gegevens opleveren die relevant zijn voor zowel put- als spleetcorrosie. De monsters voor een

elektrochemische corrosietest moeten goede geleiders zijn om een nauwkeurige meting mogelijk te maken (Materials Evaluation and Engineering, Inc, 2016).

Een elektrochemische cel bestaat uit een elektrolytoplossing en een 3-elektrodenconfiguratie, bestaande uit een referentie elektrode, een counter elektrode en een werkelektrode, zoals weergegeven in Figuur 17. De werkelektrode is het metaalmonster dat wordt onderzocht. Deze elektroden zijn verbonden met een elektronisch instrument genaamd de potentiostaat. De elektroden zijn ondergedompeld in de elektrolytoplossing, een oplossing die het meest lijkt op de daadwerkelijke omgeving van het geteste materiaal. In de oplossing wordt er een elektrochemisch potentiaal (spanning) gegenereerd tussen de elektroden. Het corrosiepotentiaal wordt gemeten door de potentiostaat als een energieverschil tussen de werkelektrode en de referentie elektrode (Materials Evaluation and Engineering, Inc, 2016). Hoe meer stroom er door het circuit vloeit, des te meer corrosie zal optreden (Atria, 2024).



Figuur 17 3-Elektrodenconfigratie in een elektrochemische cel

Bron: Materials Evaluation and Engineering, Inc, 2014

4.3 Scanning elektronenmicroscopie

De scanning elektronenmicroscopie, kortweg SEM, is een krachtige analytische techniek die wordt gebruikt voor het analyseren van een breed scala aan materialen en het produceren van afbeeldingen met een hoge resolutie van het oppervlak (TWI, 2024). SEM-onderzoek verschaft gedetailleerde informatie over het oppervlak van het monster, met name over de morfologie en het type corrosie (Fytianos et al., 2016). De geproduceerde afbeelding is zwart-wit, wat nadelig kan zijn aangezien kleuren vaak helpen bij het duidelijker onderscheiden van kenmerken in wetenschappelijke en educatieve contexten (Marya, 2024). Verder is de afbeelding uitsluitend tweedimensionaal (Swapp, 2007).

In een SEM wordt het proefplaatje gescand met een hoogenergetische bundel elektronen, die gegenereerd worden door het verhitten van een gloeidraad. Deze elektronenbundel bombardeert het oppervlak van het monster, waardoor het oppervlak gevisualiseerd wordt. Tijdens het bombarderen wordt het monster continu gescand en gereconstrueerd. Een elektronendetector meet het aantal elektronen dat vanuit elk punt op het monster wordt uitgestraald. Het uitgangssignaal van de detector, dat proportioneel is aan het aantal gedetecteerde elektronen, wordt omgezet in een digitaal signaal. Dit signaal wordt vervolgens door signaalmodulatie en versterking verwerkt om een afbeelding van het monster op te bouwen (Delft Solid Solutions, 2024; Siggelkow, 2012).

De afmetingen van monsters die door een scanning elektronenmicroscopie kunnen worden geanalyseerd, zijn beperkt. De meeste SEM-kamers hebben een beperkte capaciteit, waardoor grotere monsters moeten worden ingekort, wat kan resulteren in verlies van relevante informatie. Dit vormt een groot probleem in onderzoeksgebieden zoals geologie en materiaalkunde, waar de context van een groot monster essentieel is (Marya, 2024). De maximale dimensies van monsters die de SEM kan analyseren zijn vaak rond de 10 cm horizontaal, terwijl de verticale dimensies zelden groter zijn dan 40 mm (Swapp, 2007).

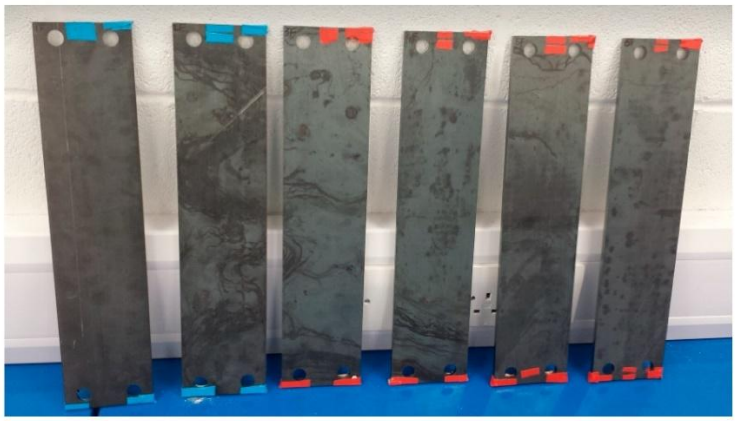
Een ander nadeel is de voorbereiding van de monsters. Het monster moet volledig droog zijn aangezien de aanwezigheid van vocht op het oppervlak de elektronenbundel kan verstoren. Daarnaast moet het monster gecoat worden met een dunne laag goud of platina, wat een geleidend materiaal is. Deze geleiding is nodig om oplading onder de

elektronenbundel te voorkomen. Deze voorbereiding vereist zeer precieze technieken en extra materialen (Marya, 2024).

Het laatste vermeldenswaardige nadeel is de vereiste vacuümomgeving. SEM vereist een hoog vacuüm om de verstrooiing van elektronen door luchtmoleculen te voorkomen. Deze vereiste limiteert de types monsters die onderzocht kunnen worden. Bijvoorbeeld, een monster dat ontgast onder vacuümomstandigheden is niet geschikt voor deze analysetechniek (Marya, 2024).

Het veldonderzoek van Wang et al. (2022) maakte gebruik van SEM om de morfologie van de corrosieproducten te observeren, evenals de gecorrodeerde oppervlakken na het verwijderen van de corrosieproducten. Verder werd deze analysetechniek gebruikt in dit onderzoek om morfologisch bewijs te verkrijgen van spleetcorrosie bij de zone waar de oester zich heeft aangehecht op het staal. De afbeeldingen om dit te bewijzen werden genomen na het verwijderen van de oesters van de stalen coupon.

De gelimiteerde dimensies zijn zichtbaar in het veldonderzoek van Khodabux et al. (2020). In dit experiment werden er S355 stalen platen met afmetingen 400 x 90 x 6 mm gebruikt. Deze platen worden weergegeven in Figuur 18. SEM werd toegepast om een overzicht te krijgen van de microstructuur van de corrosieproductenlaag. Corrosieproductenclusters werden op een zelfklevende drager geplaatst die later in de vacuümkamer van de SEM werd geplaatst voor analyse. Dit wordt weergegeven in Figuur 19. Het is hier duidelijk dat enkel een klein monster van de gehele plaat geanalyseerd kan worden door de SEM en dat de afmetingen van het monster gelimiteerd zijn.



Figuur 18 S355 platen voor blootstelling

Bron: Khodabux, 2020



Figuur 19 Monsters van S355 platen in de vacuüm kamer

Bron: Bewerkt van Khodabux, 2020

4.4 EIS

Elektrochemische Impedantiespectroscopie, bekend als EIS, is een krachtige, niet-destructieve analysetechniek die gebruikt wordt om het corrosiegedrag van metalen en hun legeringen te bestuderen (Abubakr et al., 2024).

Deze analysetechniek wordt erkend als één van de meest betrouwbare kwantitatieve methoden om het mechanisme van elektrochemische reacties op oppervlakken te onderzoeken en corrosie te diagnosticeren. Door de karakterisering van de ionische weerstand in metalen kunnen EIS-metingen op een korte testperiode betrouwbare gegevens leveren die corrosieprestaties op lange termijn kunnen voorspellen (Ikani et al., 2024).

Terwijl weerstand de verhouding is tussen de spanning en de stroom voor een DC-systeem, ook wel gelijkstroom genoemd, is impedantie de verhouding tussen de spanning en de stroom in een AC-systeem, bekend als wisselstroom (PalmSens, 2023).

EIS meet de impedantieresponse van een metalen oppervlak op een AC-signaal met een kleine amplitude. Door het impedantiespectrum te analyseren wordt informatie verkregen over de verschillende processen die optreden op het metalen oppervlak, zoals ladingsoverdracht, diffusie en adsorptie (Abubakr et al., 2024).

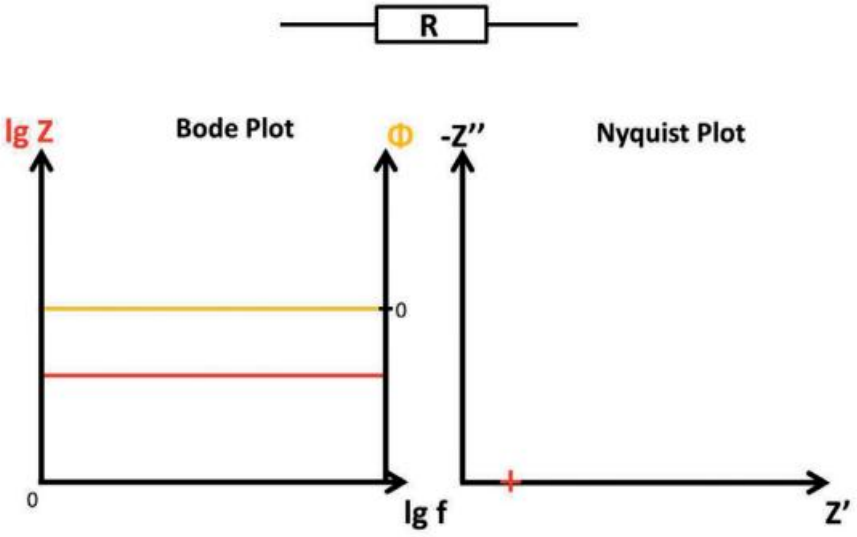
EIS is om verschillende redenen populair. Een belangrijke reden is dat EIS het mogelijk maakt om de invloeden van verschillende componenten binnen een systeem te scheiden.

Bovendien is EIS zeer gevoelig voor oppervlaktedetails en onthult het vele veranderingen die andere technieken niet detecteren. Bijvoorbeeld, EIS kan veranderingen in de polymeerlagen als gevolg van zwelling, oppervlakteveranderingen door eiwitadsorptie of de penetratie van corrosiebeschermingslagen detecteren. Hierdoor is deze analysetechniek interessant voor de analytische elektrochemie, omdat moleculen gedetecteerd kunnen worden zonder de noodzaak van een redoxactieve marker (PalmSens, 2023).

Er zijn twee manieren om het impedantiespectrum weer te geven: de Bode-plot en de Nyquist-plot (PalmSens, 2023).

De Bode-plot combineert twee verschillende plots in één. De horizontale as is een logaritmische schaal van de frequentie, terwijl de eerste verticale as het logaritme van de impedantie Z weergeeft en de tweede verticale as de faseverschuiving Φ toont. Het voordeel van de Bode-plot is dat deze alle relevante info duidelijk zichtbaar maakt. De spectra van één enkele component kunnen makkelijker begrepen worden in de Bode-plot dan in de Nyquist-plot (PalmSens, 2023).

De Nyquist-plot is complexer om te interpreteren, maar is vanwege enkele praktische redenen populairder binnen de elektrochemie. Een belangrijke reden hiervoor is dat de Nyquist-plot zeer gevoelig is voor veranderingen in het systeem. Daarnaast kunnen voor de meeste veelvoorkomende schakelingen enkele parameters direct uit de plot worden afgeleid (PalmSens, 2023).



Figuur 20 EIS van een weerstand in een Bode en Nyquist-plot

Bron: Palmsens, 2023

Het grootste probleem bij de analyse van de impedantiegegevens is het correct toewijzen van een fysieke betekenis aan de waargenomen kenmerken. Het correct modelleren van deze gegevens is de meest uitdagende stap in het analyseproces. Allereerst is het essentieel om de stroompotentiaal karakteristieken goed te begrijpen. Vervolgens kunnen aanvullende experimenten nodig zijn, waarbij variabelen zoals concentratie, partiele druk, temperatuur, hydrodynamische omstandigheden, elektrodeoppervlak en morfologie worden aangepast. Tot slot, zodra een passend fysicochemisch model is ontwikkeld en de bijhorende parameters bepaald zijn, kan men overgaan tot het bepalen van de kinetische parameters van het systeem (Lasia, 2014).

4.5 Digitale microscoop

De digitale microscoop is een type microscoop dat een digitale camera gebruikt in plaats van een traditioneel oculair. Deze camera is verbonden met een computerscherm, waardoor de beelden in real-time kunnen worden weergegeven. Bovendien kunnen sommige digitale microscopen aanzienlijk hogere vergrotingen bieden dan de meeste conventionele optische microscopen (Bellinger, 2019; Evident Corporation - NDT, 2019).

Digitale microscopie wordt veelvuldig gebruikt voor micro structurele studies en coatingmetingen, omdat het beelden van zeer hoge kwaliteit levert, die tot in het µm bereik reiken. De 3D-functie biedt bovendien uitstekende topografische informatie, waarmee verschillende oppervlakte- en volumetrische parameters kunnen worden berekend. De beelden zijn van hogere kwaliteit omdat de digitale microscoop het beeld direct naar de camera projecteert, wat resulteert in een scherpere en gedetailleerde weergave (Bellinger, 2019; Materiex, z.d.).

In het onderzoek door Zhao & Jin (2016) werd de digitale microscoop gebruikt voor het meten van de dikte van de corrosieproductenlaag. De digitale microscoop, wanneer gekoppeld aan een computer, maakte het mogelijk om de corrosieproductenlaag duidelijk te onderscheiden in kleurbeelden, wat resulteerde in zeer nauwkeurige metingen van de dikte van deze laag. Daarnaast werd ook het oppervlak van de corrosieproductenlaag met behulp van de digitale microscoop bepaald.

4.6 XCT

X-ray Computertomografie, afgekort XCT, is een gevestigde techniek voor de niet-destructieve inspectie van de interne structuur van materialen. Op basis van röntgenfoto's van het gescande object kan een driedimensionale afbeelding worden gereconstrueerd uit de verzamelde röntgenbeelden (De Samber et al., 2021).

Monsters met een hoge dichtheid, zoals bot of kalkstructuren, absorberen de straling in grotere mate. Dit resulteert in helderdere gebieden op de CT-beelden (S. Barnes & Quach, 2024).

Eén van de voornaamste voordelen van XCT ten opzichte van andere destructieve en tweedimensionale visualisatietechnieken, zoals scanning elektronenmicroscopie en optische microscopie, is het vermogen om interne structuren in drie dimensies in beeld te brengen. Bovendien zijn andere niet-destructieve methoden, zoals ultrasone C-scan en infraroodthermografie, niet in staat om schademechanismen met dezelfde hoge resolutie te detecteren als XCT (Naresh et al., 2020).

4.6.1 Conventionele/circulaire XCT

Een conventionele scanmethode binnen XCT is het plaatsen van het object op een rotatieplatform tussen een statische röntgenbron en een detector, waarbij het object wordt geroteerd terwijl opeenvolgende röntgenbeelden worden vastgelegd (De Samber et al., 2021).

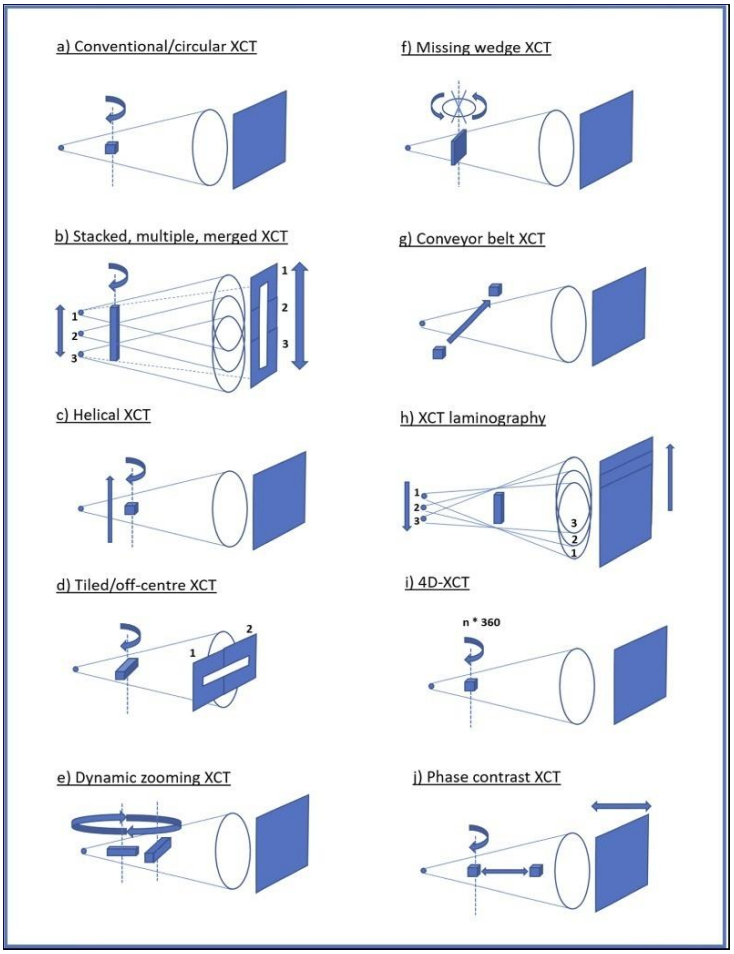
Tijdens de acquisitie van één enkele röntgenprojectie blijft het object volledig stil, waarna het naar een nieuwe hoek wordt gedraaid. De reconstructie-algoritmen die worden gebruikt bij een *step-and-shoot* acquisitieschema veronderstellen dat het object en de beeldopstelling volledig gestabiliseerd zijn tijdens elke afzonderlijke projectie (Huyge et al., 2024).

Hoewel circulaire kegelbundelscanning een veelgebruikte en praktische scanmethode is, vereist deze techniek de acquisitie van honderden röntgenfoto's die gelijkmatig over een rotatie van 360 graden zijn verdeeld. De scan wordt telkens onderbroken wanneer het object opnieuw wordt gepositioneerd, wat de totale scantijd aanzienlijk verlengt. Hierdoor

is deze acquisitietechniek vaak te tijdrovend en te beperkend voor grootschalige industriële toepassingen (De Samber et al., 2021; Huyge et al., 2024).

De overgrote meerderheid van de commerciële tomografische X-ray systemen is ontworpen voor circulaire kegelbundelscans en beschikt over slechts twee vrijheidsgraden: een rotatiefase en een lineaire translatie in de richting van de detector voor zoomfunctionaliteit.

In het artikel van De Samber et al. (2021) wordt de FleXCT voorgesteld, een geavanceerd tomografisch X-ray systeem dat extra vrijheidsgraden biedt. Dit systeem beschikt over tien gemotoriseerde assen, die zorgen voor de onafhankelijke beweging van het object, de detector en de röntgenbron. Hierdoor wordt een breed scala aan scangeometrieën mogelijk, waardoor het systeem kan worden aangepast aan specifieke beeldvormingsbehoeften en beperkingen die bij conventionele kegelbundelscans optreden. Deze FleXCT mogelijkheden worden weergegeven in Figuur 21.



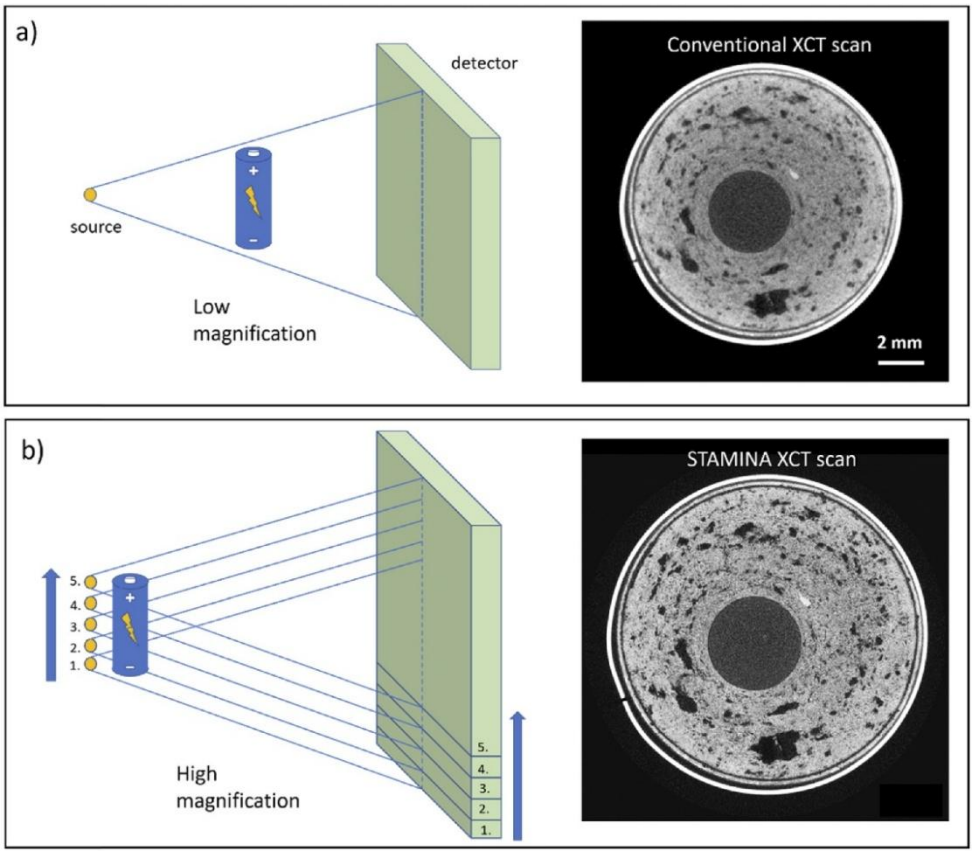
Figuur 21 FleXCT mogelijkheden

Bron: De Samber, 2021

4.6.2 Samengevoegde XCT

Wanneer een hoge-resolutiebeeldvorming vereist is voor een object dat niet volledig binnen de röntgenkegelbundel en/of het gezichtsveld van de detector past, kan dit worden bereikt door meerdere gedeeltelijke XCT-scans uit te voeren. Dit proces omvat het scannen van opeenvolgende, gedeeltelijk overlappende hoogtes van het object, waarbij zowel de röntgenbron als de detector synchroon in verticale richting worden verplaatst. Deze methode maakt het mogelijk om een volledige driedimensionale reconstructie van het object te verkrijgen zonder in te boeten aan beeldresolutie (De Samber et al., 2021).

Figuur 22 illustreert het verschil tussen een conventionele XCT-scan en een samengevoegde XCT-scan. Op de afbeelding linksboven (a) wordt een schematische weergave getoond van een batterij die volledig binnen het gezichtsveld van het detectorpaneel is geplaatst, met de bijhorende gereconstrueerde dwarsdoorsnede aan de rechterzijde. In deze configuratie wordt de zoomfactor-en daarmee de resolutie-beperkt door de hoogte van het object (De Samber et al., 2021).



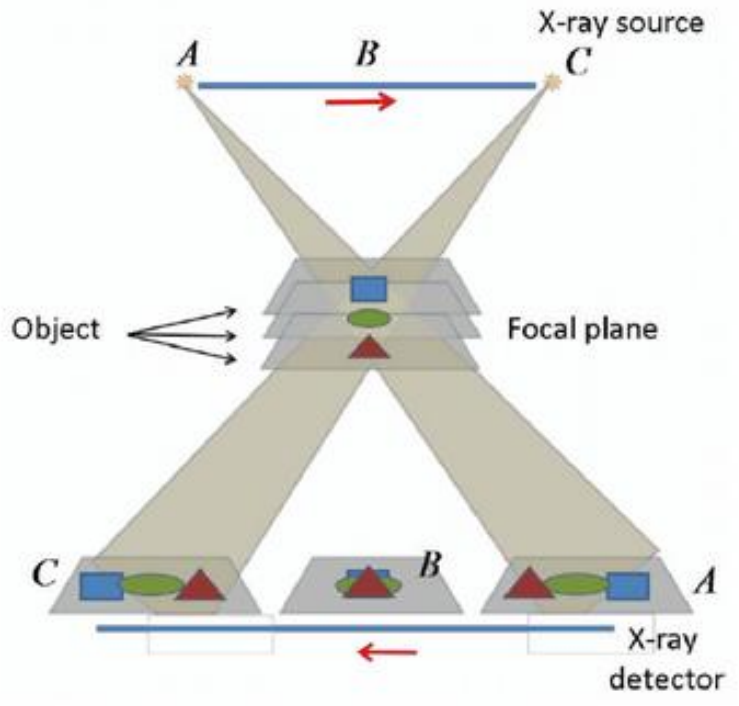
Figuur 22 verschil conventionele XCT en samengevoegde XCT

Bron: De Samber, 2021

De onderste afbeelding (b) toont daarentegen een schematische weergave van een samengevoegde XCT-scan en de resulterende dwarsdoorsnede. Hierbij worden vijf afzonderlijke XCT-scans uitgevoerd, die gedeeltelijk overlappen in de verticale richting. Dit wordt gerealiseerd door de röntgenbron en de detector na elke scan verticaal te verplaatsen. Door deze techniek kan de resolutie aanzienlijk worden verhoogd, wat leidt tot een gedetailleerdere visualisatie van de interne morfologie van de batterij (De Samber et al., 2021).

4.6.3 XCT laminografie

Digitale X-Ray laminografie is een techniek waarmee doorsnee-afbeeldingen van een object worden gegenereerd met behulp van een röntgenbron en een detector. De bron en de detector bewegen in tegengestelde richtingen in vlakken boven en onder het object. Deze beweging veroorzaakt echter onscherpte in de projectiebeelden, wat op zijn beurt leidt tot wazige reconstructies. Om deze bewegingsartefacten te vermijden, moeten zowel de bron als de detector stilstaan tijdens de röntgenpuls, wat leidt tot langere acquisitietijden (Cant et al., 2016).



Figuur 23 Lineaire laminografie setup

Bron: Cant, 2016

Alleen de structuren die op het brandvlak liggen worden op dezelfde locatie geprojecteerd, terwijl andere structuren tijdens de relatieve beweging van het systeem onscherp worden in het projectiebeeld. Dit wordt weergegeven op Figuur 23, waarbij punt A, B en C telkens een andere samenstelling van het object vertegenwoordigen (Cant et al., 2016).

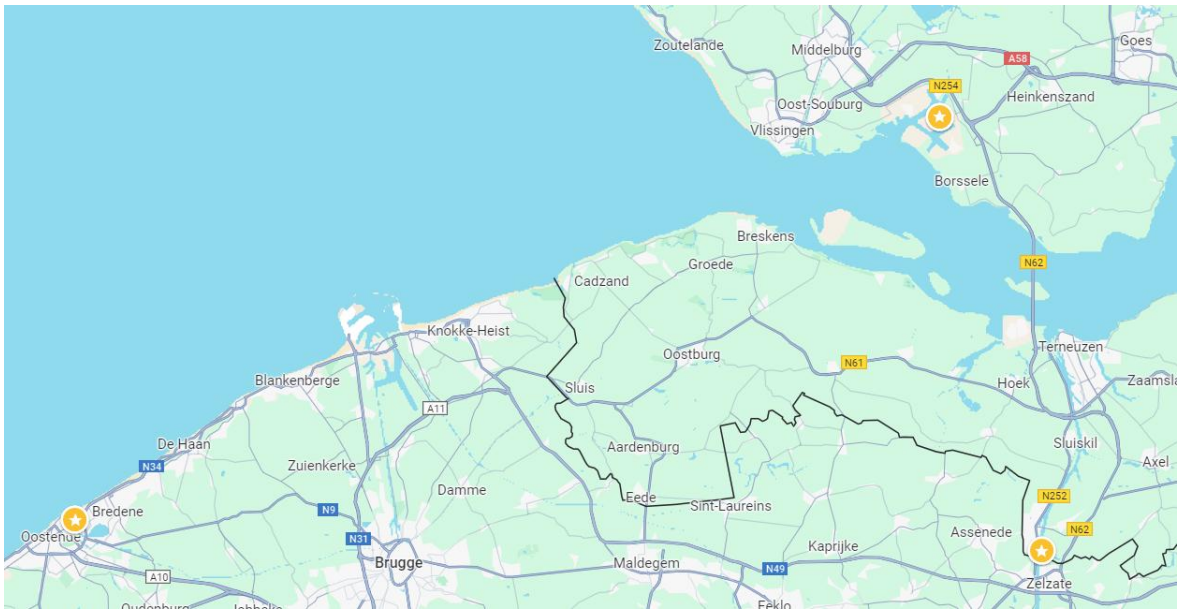
Aangezien de röntgenbron uitsluitend boven het object beweegt en de bestraling plaatsvindt vanuit een beperkt hoekbereik, hebben laminografische reconstructies een beperkte diepteresolutie. Desalniettemin blijft deze techniek in bepaalde toepassingen, zoals bij objecten die te groot zijn voor een conventionele CT-scan of in medische beeldvorming, de voorkeur genieten voor driedimensionale beeldvorming (Cant et al., 2016).

De andere FleXCT mogelijkheden die op Figuur 21 worden weergegeven, worden niet verder besproken, aangezien in het verdere verloop van deze thesis uitsluitend de drie aangehaalde technieken worden toegepast. In de volgende hoofdstukken ligt de focus enkel op deze geselecteerde methoden binnen het onderzoek.

5 Veldonderzoek

5.1 Materialen en methode

Voor dit veldonderzoek werden er vier rekken met stalen coupons op drie verschillende locaties blootgesteld. De plaatsen werden geselecteerd op basis van verschillende waterkwaliteiten. Oostende voor brak water, Vlissingen voor zout water en Zelzate, onderdeel van het kanaal Gent-Terneuzen, voor zoet water. De drie locaties zijn op Figuur 24 aangeduid met een witte ster in een gele cirkel.



Figuur 24 Overzicht van de drie locaties, aangeduid met een ster

Bron: Bewerkt van Google Maps, 2025

De gebruikte staalsoort voor dit onderzoek is S235. Dit is een type ongelegeerd staal en werd al besproken in onderdeel 2.3.1.1.

Verder werden er drie verschillende formaten coupons gebruikt, elk met verschillende afmetingen. Elk rek bevatte 8 kleine, 8 middelgrote en 3 grote coupons:

- Kleine coupon: 2,5 cm x 8,0 cm,
- Middelgrote coupon: 6,0 cm x 6,0 cm,
- Grote coupon: 10,0 cm x 15,0 cm.

In de grote coupons werden er op 17/7/2024 twee extra gaatjes geboord, om een betere bevestiging op het rek mogelijk te maken. Op 17/7/2024 en 18/7/2024 werden alle coupons

gereinigd met aceton, direct afgespoeld met gedestilleerd water en vervolgens gedroogd met keukenrolpapier. Hierna werden de coupons op de rekken bevestigd. Op 19/7/2024 werden alle vier de rekken in het water geplaatst. Twee rekken te Oostende, één rek te Vlissingen en één rek te Zelzate.

Elke coupon werd voorzien van een uniek tagnummer, zodat tijdens de analyse de locatie van blootstelling en het initiële gewicht van elke coupon eenvoudig konden worden herleid. De kleine en middelgrote coupons werden gewogen met behulp van een analytische weegschaal, met een nauwkeurigheid van drie decimalen. De grote coupons, die niet in de analytische weegschaal pasten, werden gewogen op een industriële weegschaal, met een nauwkeurigheid van twee decimalen. Alle gemeten gewichten werden gedocumenteerd in een Excel-bestand. Daarnaast werd elk rek eveneens voorzien van een uniek tagnummer.

5.1.1 Verkennende scans

Op maandag 30/09/2024 zijn de helft van de coupons van de rekken gehaald na twee maanden blootstelling. Dit omvatte vier kleine, vier middelgrote en één grote coupon per rek. In Vlissingen werden er twee grote coupons van het rek gehaald. De overige coupons bleven blootgesteld tot februari 2025.

Na verwijdering werden de coupons individueel gewikkeld in keukenrolpapier en verpakt in diepvrieszakjes met zipsluiting. Op dinsdag 01/10/2024 werden de coupons zorgvuldig droog gedept en opnieuw gewikkeld in keukenrol, waarna een silicagelzakje aan het diepvrieszakje werd toegevoegd. Silicagel absorbeert vocht uit de omgeving, wat bijdraagt aan een versneld droogproces.

Deze methode werd toegepast om een zo snel mogelijke droging van de coupons te garanderen, ter voorbereiding op de verkennende scans die op woensdag 02/10/2024 zouden plaatsvinden op de Campus Drie Eiken te Wilrijk.

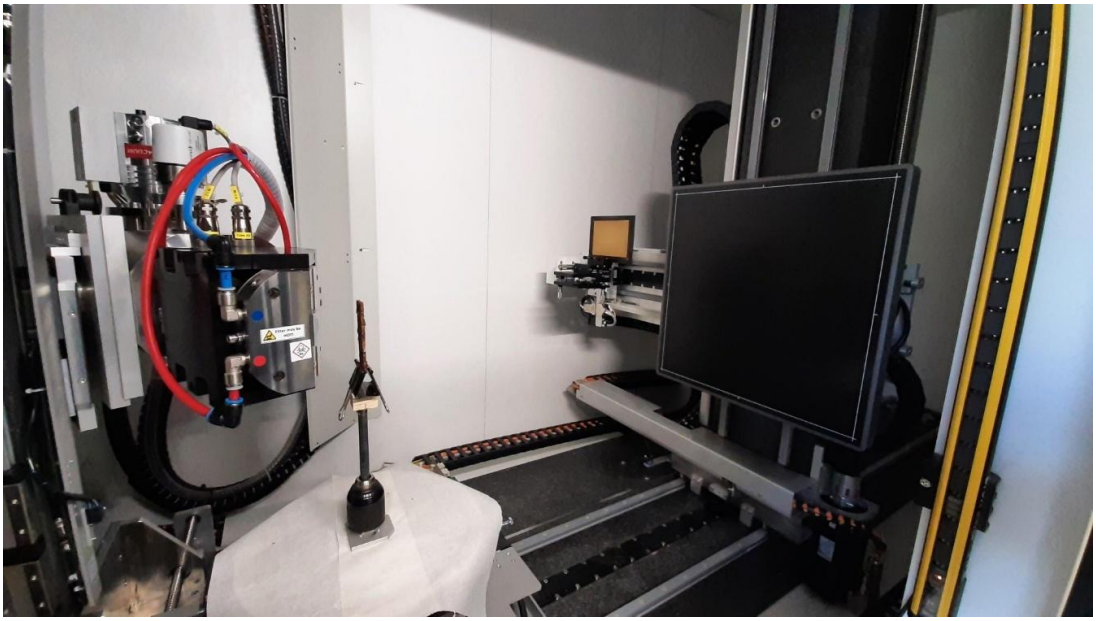
De verkennende scans zijn uitgevoerd op coupon R548959. Dit is een kleine coupon en afkomstig van het DYPLA-rek te Oostende. De coupon was twee maanden blootgesteld. De coupon werd geselecteerd op basis van de duidelijk zichtbare aanwezigheid van aangroeiorganismen. Figuur 25 geeft deze coupon weer.



Figuur 25 Voor en achterkant coupon R548959 voor verkennende scans

Bron: eigen werk

Er zijn twee soorten scans uitgevoerd: de circulaire XCT scan en de laminografie XCT scan, zoals besproken in sectie 4.6. Beide scans werden uitgevoerd met de FleXCT scanner op de Campus Drie Eiken van de Universiteit Antwerpen te Wilrijk.



Figuur 26 FleXCT scanner Campus Drie Eiken

Bron: eigen werk

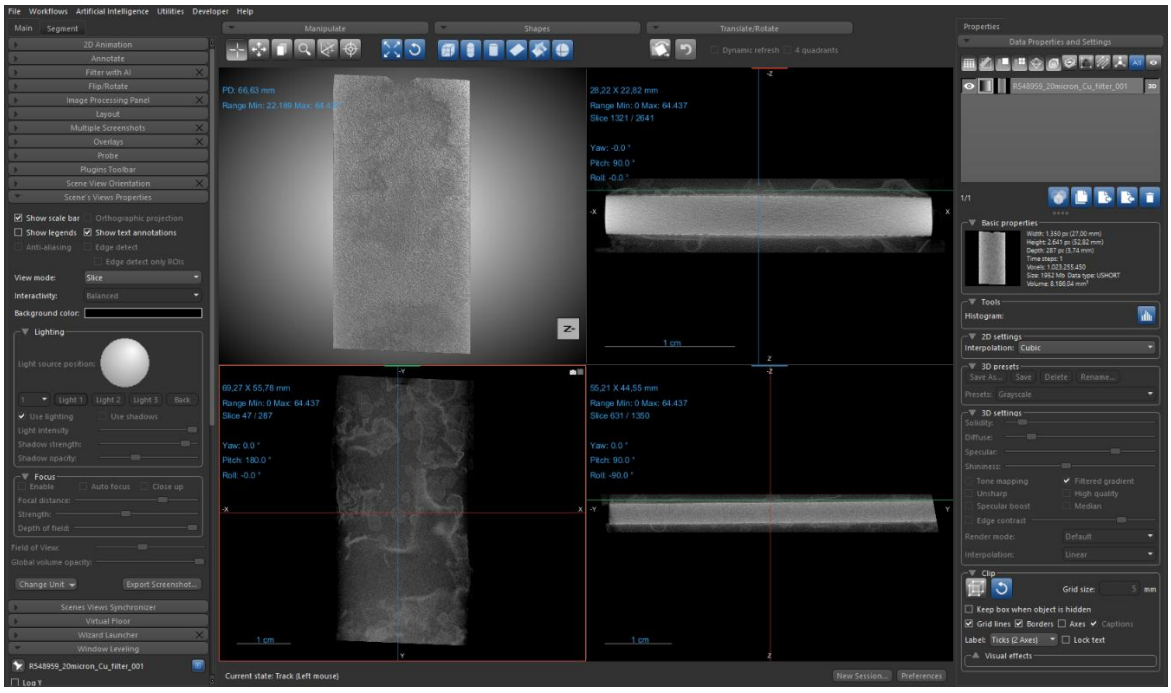
Figuur 26 toont deze FleXCT scanner. Links op de afbeelding bevindt zich de röntgenbron en rechts bevindt zich het zwarte detector scherm. De plaat, waarop de coupon staat opgesteld, kan rond haar eigen as draaien. De coupon is bevestigd op een zelfgemaakte houder.

De FleXCT scanner bestaat uit een op maat gemaakte UniTOMXL scanner van TESCAN XRE (De Samber et al., 2021).

De analyse van de resultaten van de scans werd gegenereerd met behulp van Dragonfly software, Versie 2024.1 voor [Windows]. Comet Technologies Canada Inc., Montreal, Canada; software beschikbaar op https://dragonfly.comet.tech/.

Dragonfly stelt de gebruiker in staat om laag per laag doorheen de 3D-reconstructie in het Z-as vlak te bewegen. De stapgrootte waarmee door de reconstructie wordt bewogen, is gelijk aan de ingestelde resolutie.

Figuur 27 toont het overzichtsscherm van Dragonfly. De weergegeven gereconstrueerde coupon betreft de R548959-coupon.



Figuur 27 Overzichtsscherm Dragonfly

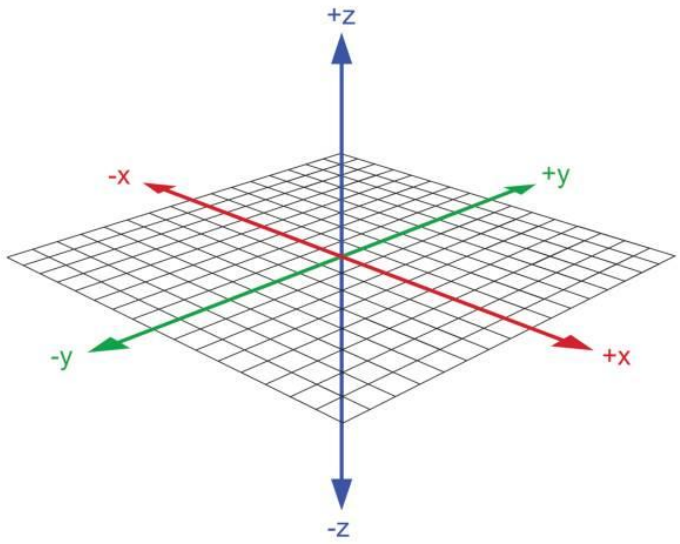
Bron: eigen werk

De afbeelding linksboven toont de driedimensionale reconstructie van de gescande coupon. De afbeeldingen rechtsboven, linksonder en rechtsonder zijn tweedimensionale reconstructies en maken navigatie mogelijk langs respectievelijk de Y-as,-, Z-as- en X-as.

De coupon is georiënteerd in het X-vlak, waarbij de X-as de longitudinale richting van de coupon definieert. De onderzijde van de coupon bevindt zich aan het positieve uiteinde van de X-as (+X) en de bovenzijde bevindt zich aan het negatieve uiteinde van de X-as (-X).

Verplaatsing langs de Z-as correspondeert met doorsneden die dieper het materiaal binnendringen of zich verder van het oppervlak van de coupon verwijderen.

Een doorsnede langs de Y-as geeft een transversale weergave van de coupon en een doorsnede langs de X-as geeft een longitudinale weergave van de coupon.



Figuur 28 XYZ assenstelsel

Bron: Attaphong, 2017

Op woensdag 02/10/2024 zijn er op de Campus Drie Eiken van de Universiteit Antwerpen te Wilrijk vier verkennende scans uitgevoerd om een globaal idee te krijgen van de werking, de tijdsduur en de ideale resolutie voor een scan met een XCT-scanner.

De eerste drie uitgevoerde scans volgden het principe van een circulaire XCT-scan, waarbij de coupon op een rotatieplatform werd geplaatst en onderworpen aan een conventionele kegelbundelscan. De vierde scan werd uitgevoerd volgens het principe van laminografie.

Tabel 3 biedt een overzicht van de vier uitgevoerde scans, inclusief het scantype, het al dan niet gebruik van een filter, de resolutie en de bijhorende scantijd. Deze tabel geeft een gestructureerd inzicht in de verschillende scanparameters en helpt bij de vergelijking van de gebruikte technieken en hun effect op de beeldkwaliteit en efficiëntie.

Het verschil in tijdsduur in Tabel 3 tussen de eerste en de tweede scan is te wijten aan de toevoeging van een koperfilter aan de röntgenbron. Deze filter blokkeert zwakkere röntgenstralen, wat resulteert in een duidelijker grijscontrast. Een nadeel van de filter is echter dat de sterkere stralen meer tijd nodig hebben om de belichting van de geblokkeerde zwakkere stralen te compenseren, wat de totale duur van het proces verlengt. Daarnaast neemt de scanduurtijd toe naarmate een hogere resolutie wordt ingesteld, zoals duidelijk zichtbaar is bij het vergelijken van scan 1 en scan 3.

Tabel 3 Verkennende scans

Bron: eigen werk

Scan nummer	**scantype**	**Filter**	**Resolutie**	**Tijdsduur scan**
Scan 1	Circulaire XCT	Neen	20 µm	± 5 minuten
Scan 2	Circulaire XCT	Ja, koperfilter 1,5 mm dikte	20 µm	± 12 minuten
Scan 3	Circulaire XCT	Neen	7,5 µm	± 25 minuten
Scan 4	XCT Laminografie	Ja, koperfilter 1,5 mm dikte	7,5 µm	± 5 minuten

Voor de derde scan werd de resolutie verhoogd. Dit leidde enerzijds tot een langere scanduurtijd, maar maakte anderzijds ook dat de coupon dichter tegen de röntgenbron geplaatst werd. Hierdoor verkleint het kijkveld en is er een beperkter scanoppervlak van de coupon. Bij een resolutie van 7,5 micrometer, afgekort µm, was het niet meer mogelijk om het volledige oppervlak van de coupon op één scanbeeld vast te leggen.

De tijdsduur van de scan, zoals weergegeven in Tabel 3, omvat uitsluitend de tijd die nodig was om de scan zelf uit te voeren. Het geeft niet de tijd weer die vereist was om de tweedimensionale afbeeldingen om te zetten naar een driedimensionale reconstructie.

Na afloop van de scans was de coupon uitgedroogd als gevolg van de warmte die werd geproduceerd door de röntgenbron. Dit wordt weergeven op Figuur 29.

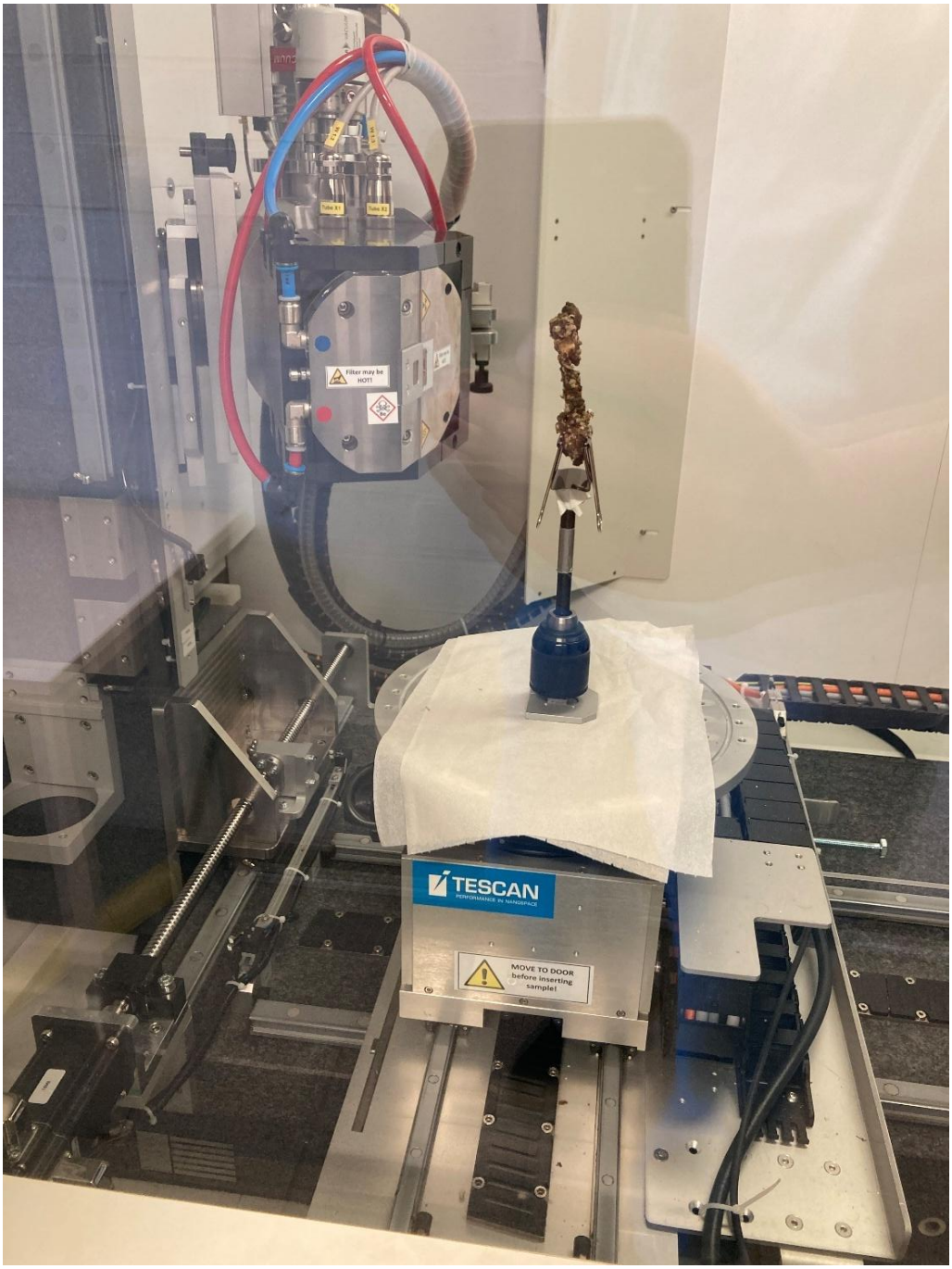
Na de eerste scan werden de aangroeiorganismen aan de onderkant van de coupon verwijderd om ervoor te zorgen dat de coupon zo recht mogelijk in de opstelling kon staan. Een scheef geplaatste coupon zou namelijk resulteren in een verstoorde driedimensionale reconstructie, wat de bruikbaarheid van deze reconstructie vermindert.



Figuur 29 Voor- en achterkant coupon na verkennende scans

Bron: eigen werk

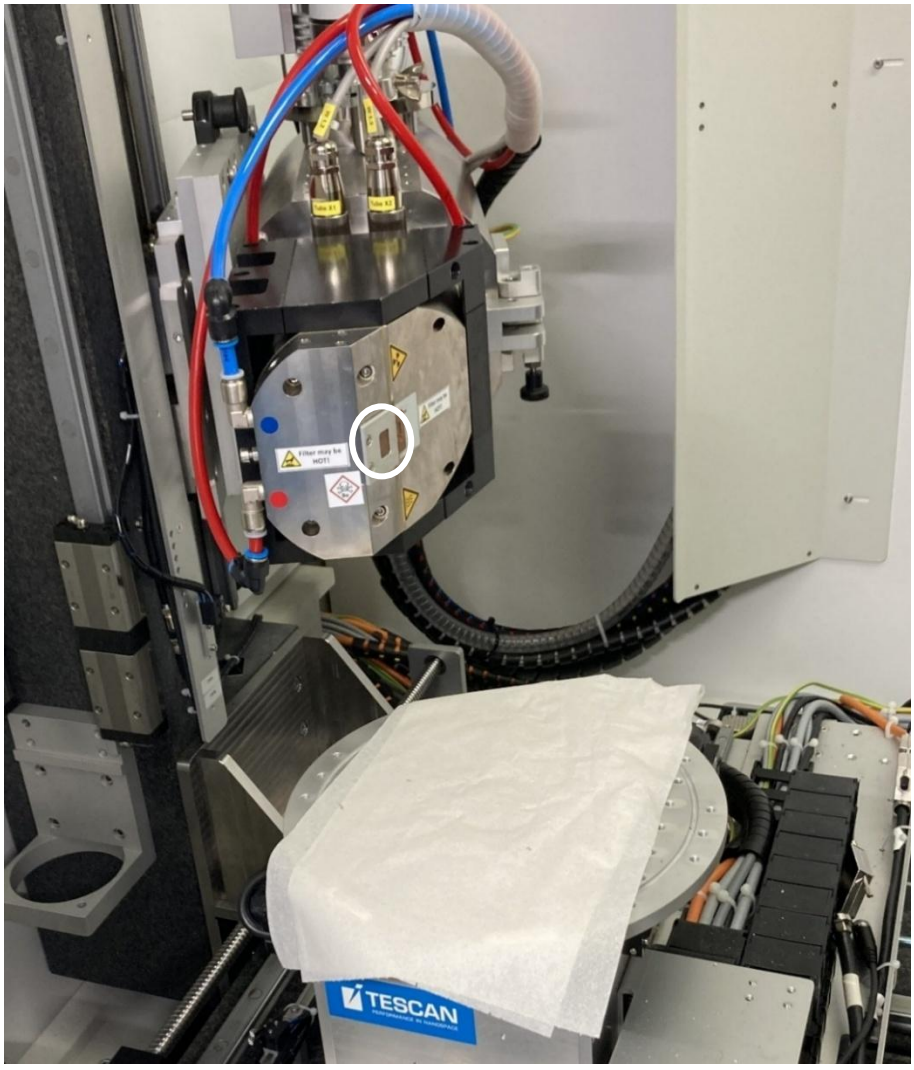
Figuur 30 toont de opstelling van de coupon in de CT-scanner. Hieruit blijkt duidelijk dat bij grote coupons de combinatie van een hoge resolutie en het volledig vastleggen van het oppervlak door middel van een circulaire XCT-scan zeer lastig te realiseren is. De coupon kan slechts tot een beperkte afstand van de bron worden gebracht, aangezien er voldoende ruimte moet zijn om de coupon 360 graden te laten roteren.



Figuur 30 Opstelling coupon in CT-scanner voor scan 1

Bron: eigen werk

Figuur 31 toont een close-up van de röntgenbron (aangeduid met een witte cirkel) van de CT-scanner, waarbij de koperfilter duidelijk zichtbaar is. Dit is het bruine plaatje dat zich in het midden van de röntgenbron bevindt en dat gebruikt wordt om de zwakkere röntgenstralen te filteren.



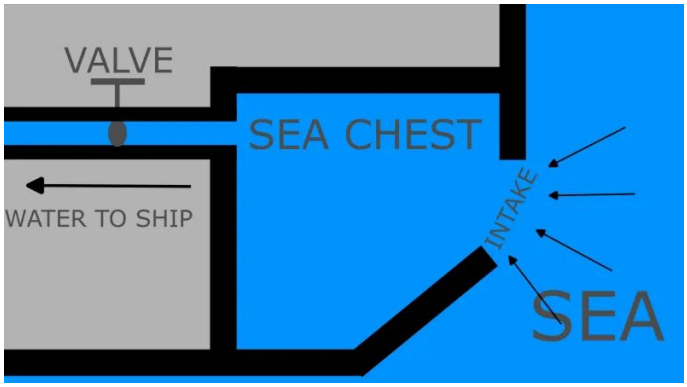
Figuur 31 Röntgenbron met koperfilter die aangeduid is met een witte cirkel

Bron: eigen werk

Na deze vier scans werd de coupon achtergelaten op de campus voor verdere testen om de beeldkwaliteit te optimaliseren. Daarnaast werden er twee extra coupons uit een ouder thesisonderzoek achtergelaten.

De eerste coupon is afkomstig uit een *sea chest*. De *sea chest* van een schip functioneert als een zuigpunt: het is de eerste plek waar zeewater binnenstroomt voordat het het scheepslichaam binnenstroomt. Eén zijde staat open naar de zee, terwijl de andere zijde

verbonden is met een pijpleiding die naar het schip leidt (Marine Cadet, 2024). Figuur 32 toont de *sea chest* van een schip. Deze coupon, afkomstig uit de *sea chest*, vertoont vrijwel geen aangroeiorganismen. Toch wordt aanzienlijke corrosieschade verwacht door de directe blootstelling aan zeewater.



Figuur 32 Sea Chest van een schip

Bron: Marine Cadet, 2024

De tweede coupon is afkomstig uit Socorro-project, een onderzoek uitgevoerd aan de Antwerp Maritime Academy. Deze coupon was twee jaar ondergedompeld aan het dynamisch platform in Oostende, hetzelfde platform waar één rek uit dit onderzoek ook ondergedompeld was. De selectie van deze coupon was gebaseerd op de zeer duidelijke en zware aanwezigheid van aangroeiorganismen en de langdurige onderdompeling, waardoor ook hier duidelijke corrosieschade werd verwacht. Beide coupons zijn afgebeeld op Figuur 33.



Figuur 33 Coupon sea chest links en coupon Socorro rechts

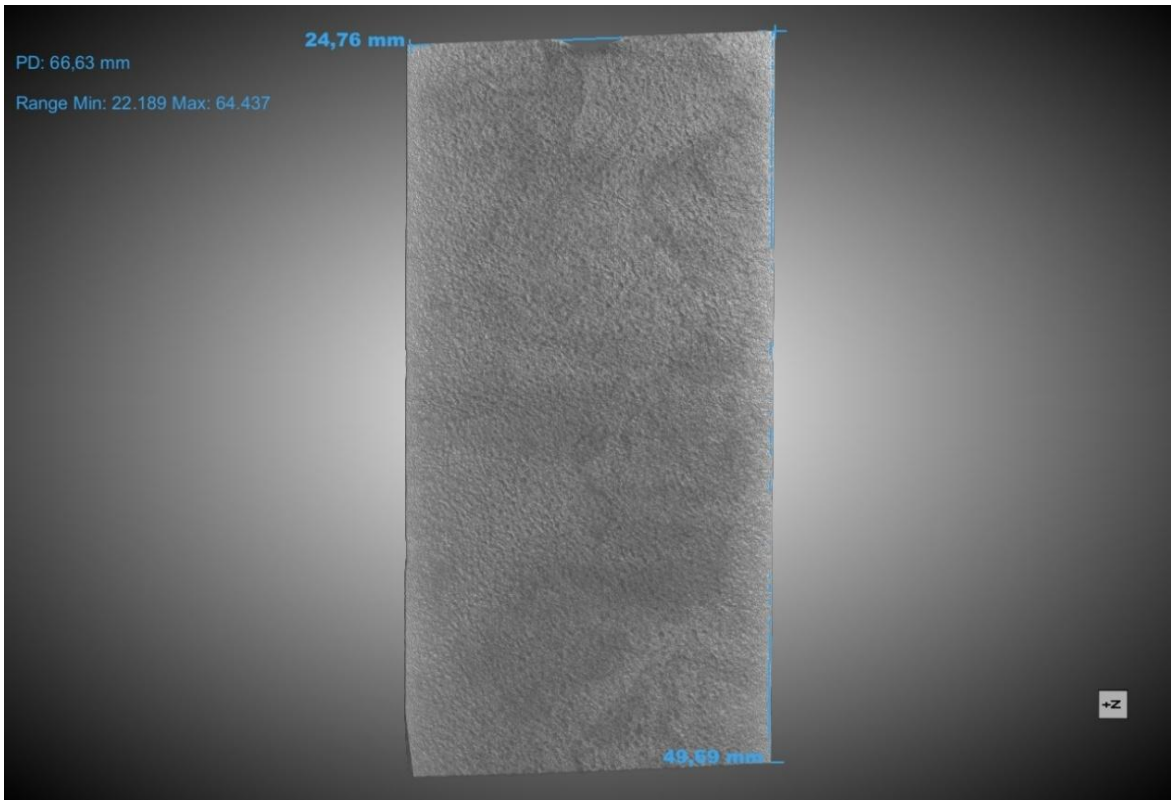
Bron: eigen werk

5.1.2 Bespreking verkennende scans

De volgende reconstructies zijn afkomstig van de metingen uit Tabel 3 van coupon R548959.

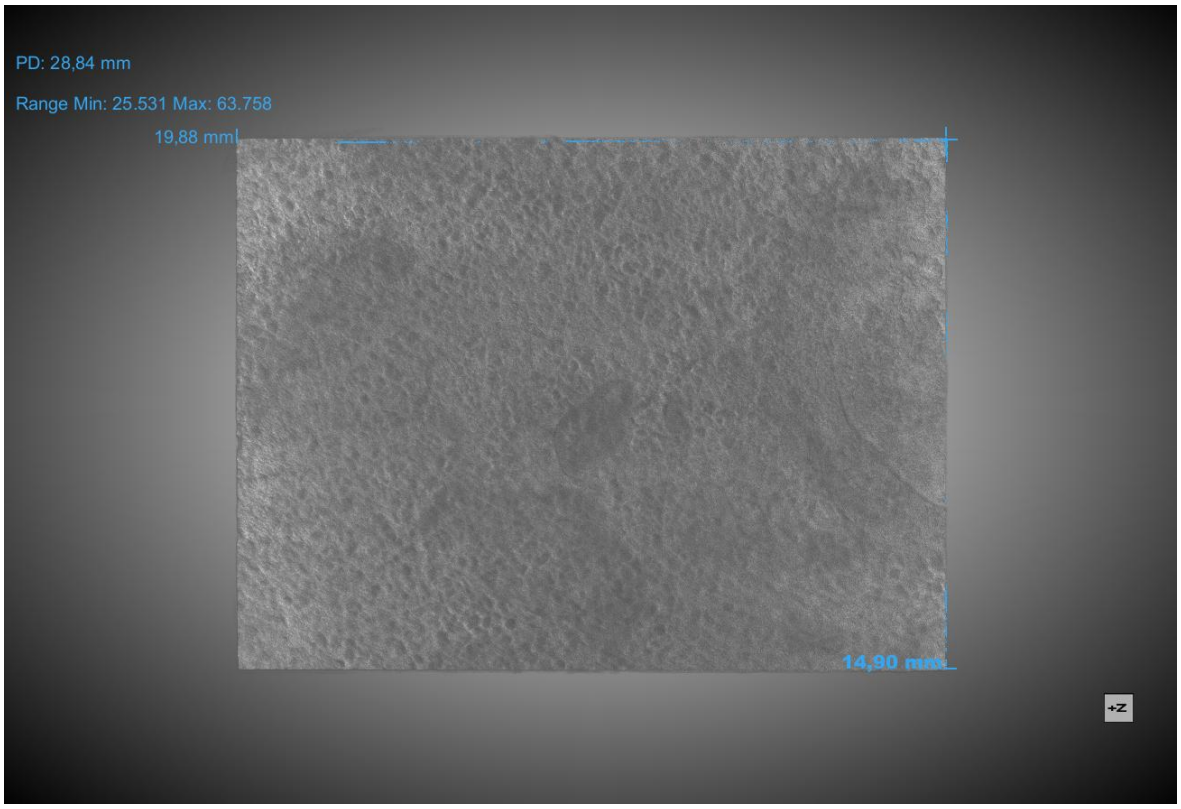
In Figuur 34 en Figuur 35 wordt het concept geïllustreerd dat in de vorige sectie is besproken. Er is een inverse relatie zichtbaar tussen de gewenste resolutie van de reconstructie en de grootte van de reconstructie: naarmate de resolutie toeneemt, neemt de maximale grootte van het gereconstrueerde oppervlak af. Figuur 34 toont een 3D-reconstructie van de coupon bij een resolutie van 20 µm. De oorspronkelijke afmetingen van een kleine coupon bedragen 80 mm in hoogte en 25 mm in breedte. Bij de gekozen resolutie blijft de breedte behouden, maar de hoogte wordt gereduceerd tot ±49,69 mm.

Daarnaast wordt ook duidelijk dat de positionering van de coupon ten opzichte van de bron cruciaal is. Indien de coupon schuin voor de bron geplaatst wordt, zal dit resulteren in een schuine rand in de reconstructie, zoals op Figuur 34.



Figuur 34 Afmetingen 3D-reconstructie 20 µm

Bron: eigen werk



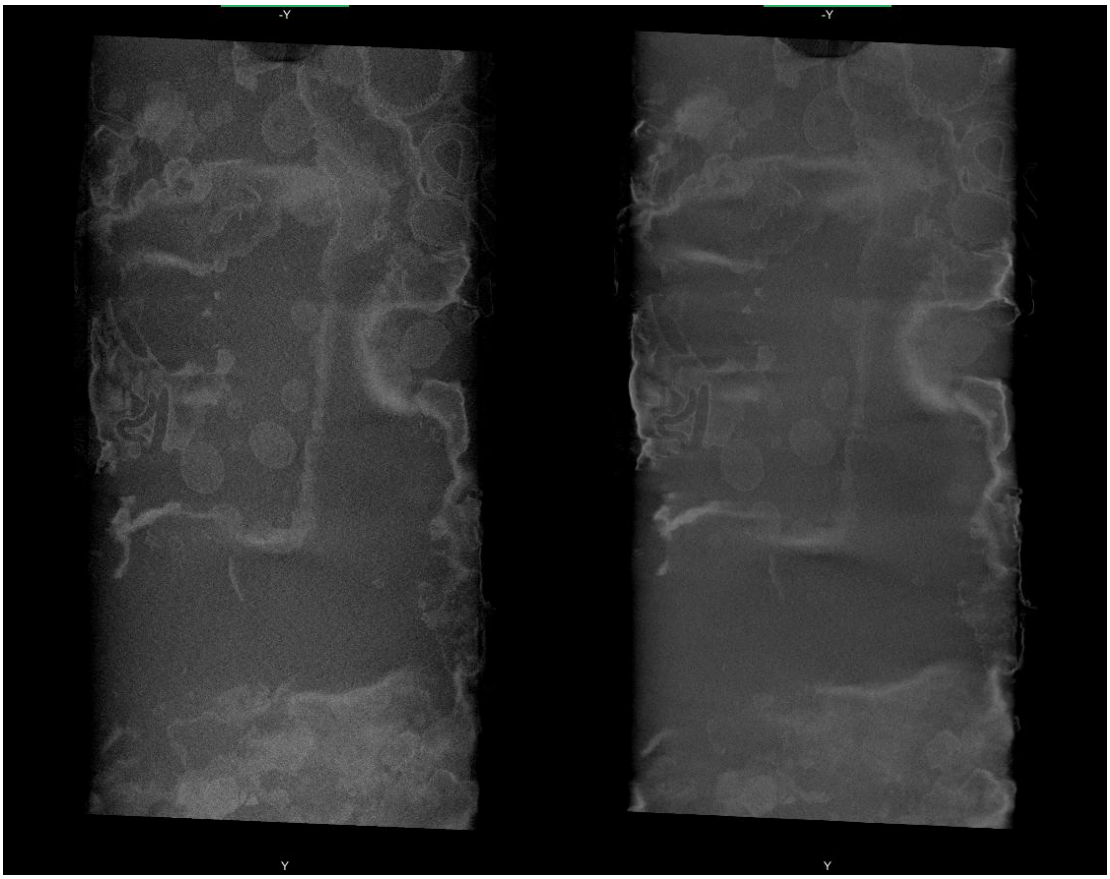
Figuur 35 Afmetingen 3D-reconstructie 7,5 µm

Bron: eigen werk

Figuur 35 toont de 3D-reconstructie van de coupon bij een resolutie van 7,5 µm. Bij deze hogere resolutie is niet alleen de hoogte verder afgenomen tot ±14,90 mm, maar is ook de breedte gereduceerd tot ±19,88 mm.

Om de corrosieschade zo nauwkeurig mogelijk te bepalen, is het gebruik van een hogere resolutie voordeliger. Een hogere resolutie maakt het mogelijk om met kleinere stappen door de 3D-recosntructie te navigeren, wat resulteert in een kleinere foutmarge. Hierdoor kunnen dieptes en afstanden nauwkeuriger gemeten worden, wat de betrouwbaarheid van de schadeanalyse ten goede komt.

Tot slot werd ook het gebruik van een filter in het vorige hoofdstuk aangehaald. Figuur 36 illustreert het effect van het gebruik van een koperfilter. De figuur toont links de driedimensionale reconstructie van de coupon bij een resolutie van 20 µm met een koperfilter en rechts dezelfde driedimensionale reconstructie maar zonder koperfilter. Het gebruik van de koperfilter resulteert in een duidelijke vermindering van de waas, waardoor de details van de reconstructie beter zichtbaar zijn. Bovendien is de omlijning van de aangroeiorganismen met de koperfilter scherper en duidelijker gedefinieerd.



Figuur 36 Verschil met (links) of zonder (rechts) koperfilter 3D-reconstructie

Bron: eigen werk

De reconstructie van de XCT laminografie scan leverde niet de gewenste resultaten op voor een gedetailleerde analyse. Om die reden is deze scan niet verder besproken in dit onderdeel.

Uit dit verkennende onderzoek bleek dat een kleine coupon het best geschikt is voor analyse met deze XCT-scanner en de bijhorende circulaire methode. Voor middelgrote en grote coupons is het echter uitdagender om een hoge resolutie te combineren met het in beeld brengen van het volledige oppervlak van de coupon. Om deze reden zullen in het verdere onderzoek binnen deze thesis uitsluitend testen worden uitgevoerd op de kleine coupons.

5.1.3 Scans datacoupons

Op donderdag 27/02/2025 werden er in het totaal vier nieuwe kleine coupon van de rekken verwijderd. Op die dag werd van elk rek één kleine coupon verwijderd voor analyse door de XCT-scanner op de Campus Drie Eiken te Wilrijk. De resterende coupons blijven op de rekken blootgesteld voor verder onderzoek.

Op dinsdag 01/04/2025 zijn er acht nieuwe kleine coupons gescand op de Campus Drie Eiken te Wilrijk van de Universiteit Antwerpen. De acht kleine coupons betreffen:

- Coupon 2 maanden blootstelling te Vlissingen J431074,
- Coupon 7 maanden blootstelling te Vlissingen J431080,
- Coupon DYPLA-rek 2 maanden blootstelling te Oostende R548957,
- Coupon DYPLA-rek 7 maanden blootstelling te Oostende R548960,
- Coupon STAPLA-rek 2 maanden blootstelling te Oostende J431064,
- Coupon STAPLA-rek 7 maanden blootstelling te Oostende J431069,
- Coupon 2 maanden blootstelling te Zelzate 105394,
- Coupon 7 maanden blootstelling te Zelzate 105395.

De selectie van de kleine coupons vond plaats op basis van de mate van bedekking door aangroeiorganismen, de visuele aanwezigheid van opvallende aangroeiorganismen met het blote oog, en de aanwezigheid van specifieke morfologische kenmerken die potentieel interessant waren voor verdere analyse met XCT.

Voor de reconstructie van de coupons werden XCT-scans uitgevoerd met twee verschillende resoluties: 10 µm en 35 µm. De scans werden wederom uitgevoerd met de FleXCT scanner op de Campus Drie Eiken van de Universiteit Antwerpen te Wilrijk.

Voor elke coupon werd een initiële circulaire XCT-scan verkregen met een resolutie van 35µm, waarmee de coupon volledig in beeld kon worden gebracht. De totale scantijd voor deze resolutie bedroeg circa 15 minuten. Deze tijd is exclusief de tijd die nodig was om de tweedimensionale afbeelding om te zetten naar een driedimensionale reconstructie. De combinatie van deze korte scantijd en relatief hoge resolutie maakten deze resolutie een goede optie om een overzicht te krijgen van de aangroeiorganismen en hun verspreiding over het oppervlak. De data voor 1 reconstructie ligt gemiddeld op 3GB.

Om een meer nauwkeurig reconstructie te verkrijgen voor schadeanalyse door corrosie is een hogere resolutie aangeraden. In dit onderzoek werd een resolutie van 10 µm toegepast. Deze resolutie resulteert in een scanbreedte van ongeveer 2,5 cm van het couponprofiel per circulaire XCT scan.

Op het volledige gebied van de coupon tussen de twee openingen, waarmee de coupon aan het blootstellingsrek was bevestigd, was een samengevoegde XCT-scan vereist, zoals besproken in onderdeel 4.6.2. Hiervoor werden drie circulaire XCT-scans uitgevoerd. De duur van één dergelijke circulaire XCT-scan bij een resolutie van 10 µm bedraagt ongeveer een half uur, wat resulteert in een totale scantijd van circa anderhalf uur per kleine coupon. De data voor deze reconstructie ligt wel beduidend hoger, namelijk: gemiddeld 27 GB.

Er is bewust gekozen om geen filter te gebruiken. Het toepassen van een filter zou de scantijd voor één enkele circulaire XCT-scan met een factor vijf verlengen bij een resolutie van 10 µm. Zonder filter bedraagt de belichtingstijd per opname 0,5 seconden, terwijl dit met filter toeneemt tot 2,5 seconden.

Een hogere resolutie dan 10 µm was niet mogelijk, aangezien dit zou verhinderen dat de volledige breedte van de coupon in één scan kon worden vastgelegd.

De afbeeldingen van deze scans werden wederom gegenereerd met behulp van Dragonfly software, Versie 2024.1 voor [Windows]. Comet Technologies Canada Inc., Montreal, Canada; software beschikbaar op https://dragonfly.comet.tech/.

5.1.4 Verwerking datacoupons

Op donderdag 17/04/2025 werden de aangroeiorganismen op de coupon onderworpen aan een visuele analyse, uitgevoerd door Prof. Dr. Geert Potters. Hierbij werd zowel met het blote oog als met behulp van microscopie gekeken naar de op de coupon aanwezige aangroeiorganismen. De waargenomen aangroeiorganismen werden geïdentificeerd, en hun contouren werden gelokaliseerd op de overeenkomstige posities op de scanbeelden, in overeenstemming met hun locatie op de coupon.

Op vrijdag 18/04/2025 werden de coupons verder verwerkt met als doel het bepalen van het gewichtsverlies, als maat voor de materiaaldegradatie.

De verwerking van de coupons startte met een reiniging onder hoge druk, met als doel zoveel mogelijk aangroeiorganismen en corrosieproducten mechanisch te verwijderen. Aansluitend werden de coupons chemisch gereinigd volgens de ASTM G01-procedures, specifiek sectie C.3.1 in tabel A1.1 , gericht op het verwijderen van corrosieproducten.

Volgens de ASTM-specificaties vereist de gebruikte chemische oplossing 50 gram Tin(II)chloride (SnCl2). Aangezien deze stof niet aanwezig was in het laboratorium, werd Tin(II)chloride dihydraat ($SnCl2*2H_2O$) als alternatief gebruikt. De vereiste hoeveelheid van deze stof werd berekend aan de hand van de verhouding van de molaire massa's van beide verbindingen, volgens de volgende formule:

$$\frac{molaire\ massa\ (SnCl2)}{molaire\ massa\ (SnCl2{*}2H2O)} = \frac{189.61}{225.654} \approx 0.840 \qquad (7.1)$$

Om 50 gram SnCl2 te evenaren, was daarom ongeveer 59.50 gram $SnCl2*2H_2O$ vereist:

$$\frac{benodige\ massa\ SnCl2}{0.840} = \frac{50}{0.840} \approx 59.50\ gram \qquad (7.2)$$

De coupons werden gedurende ongeveer drie minuten volledig ondergedompeld in de chemische oplossing. Aansluitend werden ze eveneens volledig ondergedompeld in gedestilleerd water en grondig afgespoeld om de resterende chemicaliën te verwijderen. Na deze behandeling werden ze voorzichtig drooggedept met keukenrol. Vervolgens werd van zowel de voor- als achterzijde een foto genomen, waarna de coupons werden gewogen. Tot slot werden de coupons weer individueel verpakt in hun bijhorende diepvrieszakje met zipsluiting, samen met een zakje silicagel ter voorkoming van vochtopname tijdens de opslag.

De corrosiesnelheid is bepaald op basis van de volgende formule in ASTM G01:

$$corrosiesnelheid = (K * W)/(A * T * D) \qquad (7.3)$$

Waarbij:

- K = een constante afhankelijk van de gewenste snelheid, in dit geval 8.76 x 10^4 voor corrosiesnelheid in millimeter per jaar te bekomen,
- W = gewichtsverlies in gram,
- A = oppervlakte in cm^2, 2,5 cm x 8,0 cm = 20 cm^2
- T = tijd blootstelling in uren, 1752 uur voor 2 maanden en 5352 uur voor 7 maanden,
- D = densiteit in gram/cm^3 afhankelijk van staalsoort, voor S235 is het 7.85 gram/cm^3.

In de volgende secties (5.2, 5.3 en 5.4) wordt de ontwikkeling van aangroeiorganismen op de coupons geanalyseerd aan de hand van visuele beeldvorming, na blootstellingsperioden van respectievelijk één, twee, vier en zeven maanden op de drie verschillende locaties.

In sectie 5.5 wordt voor elke onderzochte coupon een tweedelige vergelijking uitgevoerd: enerzijds tussen de visuele waarnemingen, die tijdens de visuele inspectie met Prof. Dr. Geert Potters werden waargenomen, en de doorsneden van scans met betrekking tot de aangroeiorganismen en corrosieproducten, en anderzijds tussen de visuele waarnemingen en de scans die de mate van corrosieschade in kaart brengen.

Op basis van deze gegevens wordt een geïntegreerde analyse uitgevoerd waarbij de visuele beelden en scans worden gecombineerd om een representatieve resultante coupon te reconstrueren. Dit maakt het mogelijk om een directe correlatie te leggen tussen de aangetroffen aangroeiorganismen en de onderliggende corrosieschade. Er wordt voornamelijk gekeken naar de gebieden met relatief zwaardere aantasting door corrosie.

Voor de scandoorsnedes zijn enkel de scans op een resolutie van 35 µm gebruikt. De scans op een resolutie van 10 µm konden niet worden ingeladen op de computer, ondanks het RAM geheugen van 32 GB. Tot slot wordt de corrosiesnelheid voor elke onderzochte coupon bepaald op basis van de eerder besproken formule.

In dit onderdeel, 5.5, zal er regelmatig worden verwezen naar de termen ‘scan’ en ‘afbeelding’, in het kader van de vergelijking tussen een XCT-scan van een coupon en een visuele afbeelding ervan. Met ‘scan’ wordt specifiek gedoeld op beeld verkregen via XCT, terwijl ‘afbeelding’ betrekking heeft op een conventionele visuele opname van de coupon.

Voor de resultante coupon te verkrijgen zijn de aangroeiorganismen en corrosieproducten op de afbeeldingen en de scans aangeduid met een kleur. De kleurencode is als volgt:

- Lichtgroen = aangroeiorganismen op afbeelding,
- Donkergroen = corrosieproducten op afbeelding,
- Paars = aangroeiorganismen op scan,
- Lichtblauw = corrosieproducten op scan,
- Geel = zwaardere schadezones op scan.

5.2 Vlissingen

De coupons werden geplaatst op de Calamiteitensteiger te Vlissingen, boven een oesterbank. Het water waarin de coupons waren blootgesteld is zuiver zeewater. Het rek werd geplaatst op een dynamisch platform. Dit platform volgt de verticale beweging van het zeewater door getij, waardoor het rek op een constante diepte hing gedurende de blootstellingsperiode.

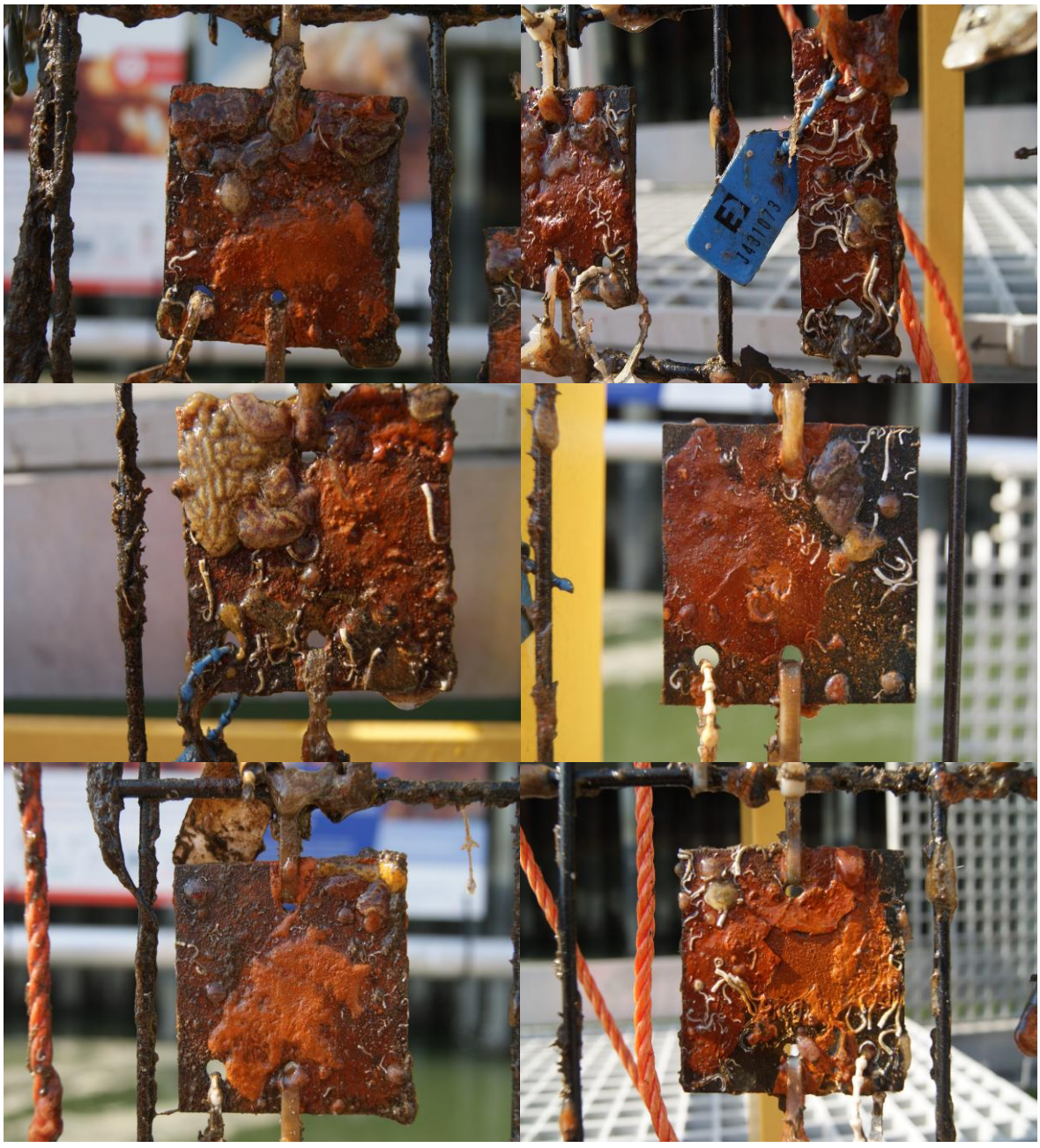


Figuur 37 Rek voor blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk

5.2.1 Eén Maand blootstelling te Vlissingen (augustus 2024)

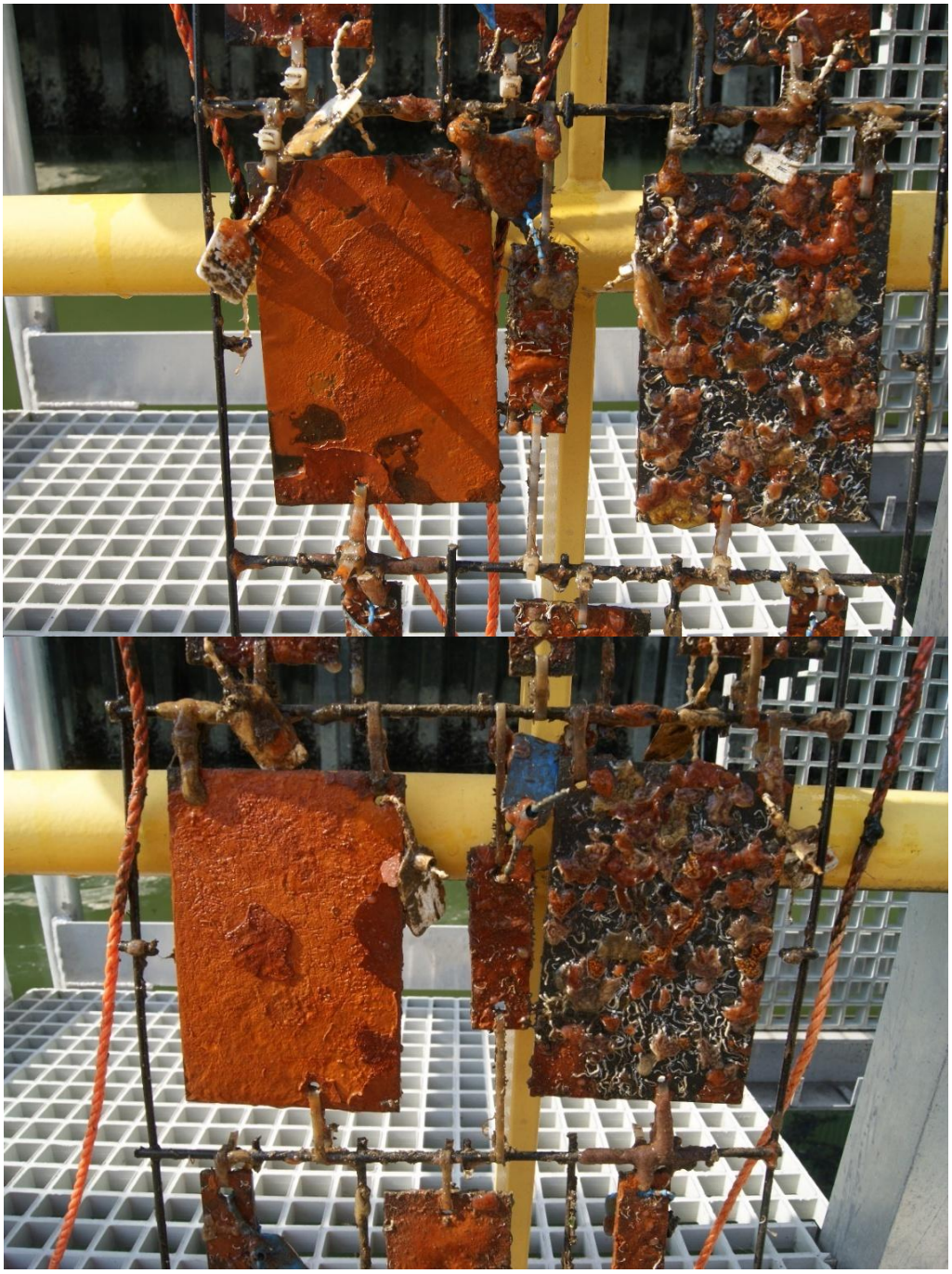
Wat bij het rek in Vlissingen opviel in vergelijking met dan van Oostende en Zelzate was dat er veel meer aangroeiorganismen zichtbaar waren op de coupons na één maand blootstelling. Er was een duidelijke aanwezigheid van kalkkokerwormen op enkele coupons. Dit zijn de langwerpige witte aangroeiorganismen op Figuur 38. Het zijn hoogstwaarschijnlijk trompetkalkkokerwormen en werden al besproken in hoofdstuk 3.2.7.



Figuur 38 Coupons na 1 maand blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk

Het meest opvallende verschijnsel op dit rek was het verschil in aangroei op de twee grote coupons die zich in het midden van het rek bevonden, Figuur 39. De bovenste afbeelding toont de voorkant, terwijl de onderste de achterkant van deze coupons weergeeft. De ene zijde is bedekt met een uniforme oranje corrosieproductenlaag, terwijl de andere zijde een groot aantal aangroeiorganismen vertoont. Er is een duidelijke aanwezigheid van kalkkokerwormen, sponzen en zachte organismen die niet geïdentificeerd konden worden.



Figuur 39 Verschil grote coupons na 1 maand blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk



Figuur 40 Close-up grote coupon na 1 maand blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk

De derde grote coupon (Figuur 41), die hoger op het rek hing, had geen verschil in aangroei op de voor- en achterkant en vertoonde over het algemeen zeer weinig aangroei. Enkel in de hoekpunten aan de onderkant werden enkele kalkkokerwormen teruggevonden en aan de bovenkant van de coupon was er een donkere corrosieproductenlaag. De centrale zone van de coupon was een oranje corrosieproductenlaag met een zone waar zelfs het stalenoppervlak nog te zien was.



Figuur 41 Derde grote coupon na 1 maand blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk

5.2.2 Twee Maanden blootstelling te Vlissingen (september 2024)



Figuur 42 *Coupons na 2 maanden blootstelling te Vlissingen waarop zeewier met rode pijlen is aangeduid*

Bron: eigen werk

De kalkkokerwormen hadden zich verder ontwikkeld en ook waren de eerste sporen van zeewieren aanwezig op de coupons. Enkele zijn aangeduid met een rode pijl. Toch is het zeer duidelijk dat op bepaalde coupons zeer veel van deze organismen zijn aangehecht terwijl er op andere coupons zo goed als geen zijn aangehecht en er enkel een oranje corrosieproductenlaag zichtbaar is.



Figuur 43 Verschil grote coupons na 2 maanden blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk

Het verschil bij de twee grote coupons op het rek in Vlissingen was nog steeds duidelijk zichtbaar. De zijde met de oranje corrosieproductenlaag vertoonde echter een minder uniforme bedekking dan eerder waargenomen. Bovendien was er nu op alle hoekpunten van deze zijde aangroei van kalkkokerwormen te zien.



Figuur 44 Close-up grote coupon na 2 maanden blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk

Tot slot vertoonde de derde coupon, die na 1 maand blootstelling zeer weinig aangroei vertoonde, nu al meer aangroei. De achterkant, de rechter afbeelding van Figuur 45, was zwaarder bedekt door aangroeiorganismen dan de voorkant van de coupon.

Op de coupon zijn er twee zones te onderscheiden. Enerzijds zijn de boven- en onderkant bedekt met kalkkokerwormen en enkele stukken zeewier. Anderzijds is het centrale gedeelte van de coupon bedekt met een oranje corrosieproductenlaag.



Figuur 45 Derde grote coupon na 2 maanden blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk

5.2.3 Vier Maanden blootstelling te Vlissingen (november 2024)



Figuur 46 Coupons na 4 maanden blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk

De verdere ontwikkeling van de kalkokerwormen is goed waarneembaar. Na vier maanden blootstelling vertoonde elke coupon zichtbare aanhechting van kalkkokerwormen, terwijl deze organismen na twee maanden blootstelling soms moeilijk te vinden waren op de coupons. Er bleef echter een verschil bestaan tussen de coupons in het percentage van het oppervlak dat door deze aangroeiorganismen bedekt was.

De randen van de meeste coupons als ook het rek zelf waren nu bedekt met plakken zeewier.

De twee grote coupons, die bij één en twee maanden blootstelling werden besproken, werden na tweeënhalve maand verwijderd voor het verkennend onderzoek dat in het volgend hoofdstuk wordt besproken. Ze werden verwijderd vanwege het opvallende verschil tussen de zijdes, wat interessant werd geacht om de schade op beide zijdes te vergelijken in relatie tot de verschillende bedekkingsgraden.



Figuur 47 Grote coupon na 4 maanden blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk

Er werd nog steeds een verschil vastgesteld tussen het centrale gedeelte van de coupon en de bovenste en onderste delen. De kalkkokerwormen vertonen verdere ontwikkeling en de stukken zeewier overheersen de coupon meer in vergelijking met de coupon na twee maanden blootstelling, afgebeeld op Figuur 45.

Daarnaast was de corrosieproductenlaag niet langer oranje, maar presenteerde deze zich nu in een donkeroranje tint met zwarte insluitsels. Deze donkere kleur is kenmerkend voor de ontwikkeling van meer zuurstofarme omstandigheden. Tot slot was het profiel van de coupon niet meer egaal, zoals op Figuur 45, maar waren er nu meer heuvels/opstapelingen door corrosieproducten.

5.2.4 Zeven Maanden blootstelling te Vlissingen (februari 2025)



Figuur 48 Coupons na 7 maanden blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk

Na zeven maanden blootstelling was er slechts een geringe toename in de dichtheid van de aangroeiorganismen op de coupons. De ontwikkeling van de kalkkokerwormen, sponzen en andere zachte organismen zette zich stabiel voort, zij het in beperkte mate.

Het zeewier was wel duidelijker in lengte/grootte toegenomen. Op sommige afbeeldingen is de grens tussen coupon en rek al moeilijker te onderscheiden.

De beperkte toename van aangroeiorganismen kan vermoedelijk worden toegeschreven aan de invloed van de wintermaanden.

Ook de grote coupon vertoonde weinig verandering ten opzichte van de situatie na vier maanden blootstelling. De zwarte kleur van de corrosieproductenlaag was nog steeds zichtbaar, evenals de aanwezigheid van de stukken zeewier en de kalkkokerwormen.



Figuur 49 Grote coupon na 7 maanden blootstelling te Vlissingen

Bron: eigen werk

5.3 Oostende

In de haven van Oostende, waar twee rekken werden blootgesteld, is de waterkwaliteit brak. Brak water is water dat minder zout is dan zeewater, maar nog teveel zout bevat voor consumptie als drinkwater (Huyghebaert, 2019).

Eén rek werd op een dynamisch platform geplaatst, waardoor het tijdens de volledige blootstelling op een constante diepte bleef hangen, zoals eerder vermeld. Het andere rek werd op een statisch platform gemonteerd, waardoor het voortdurend aan variërende dieptes werd blootgesteld gedurende de onderdompeling.

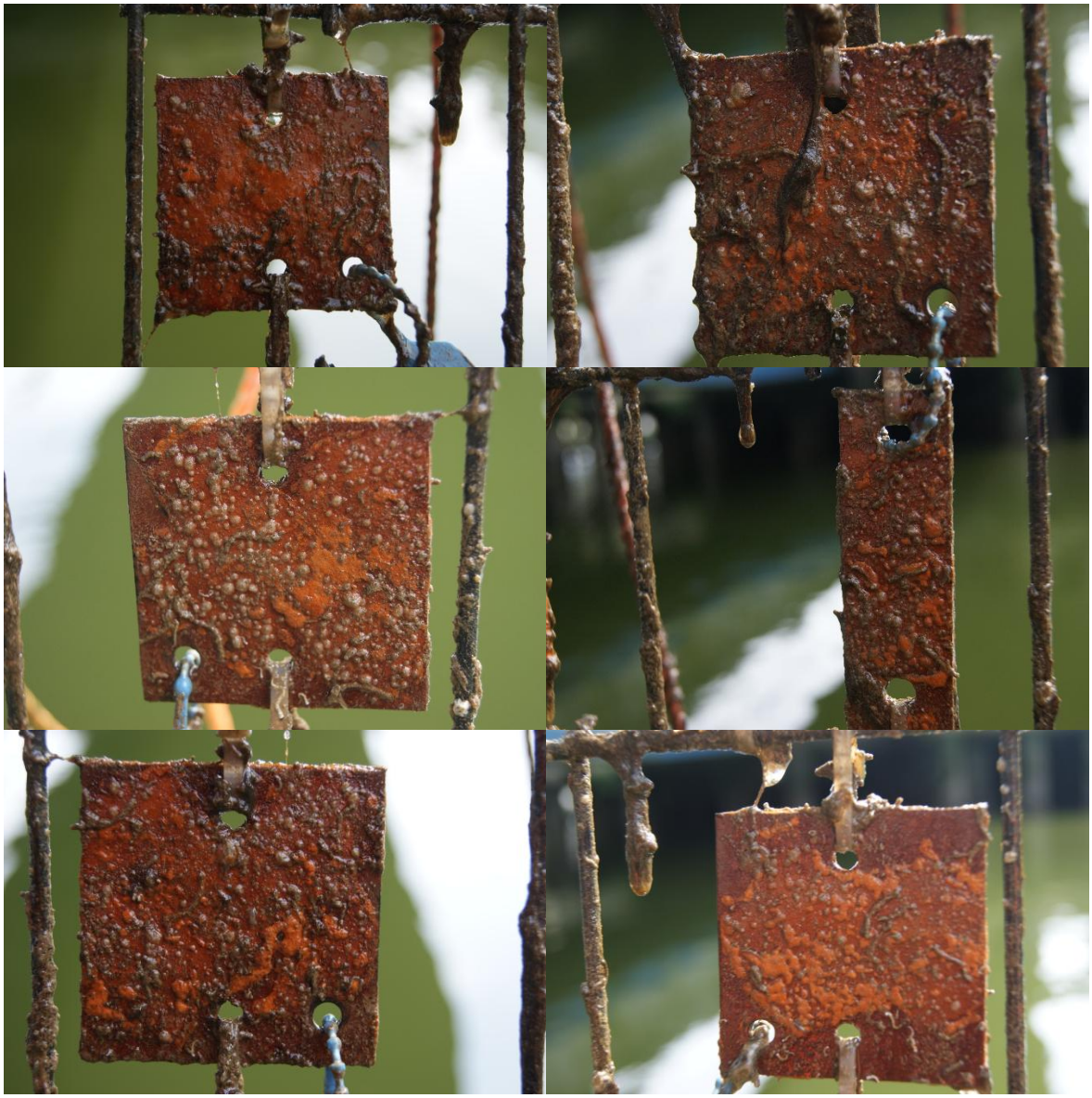
In het verdere verloop van deze thesis zal het statische platform aangeduid worden als STAPLA en het dynamische platform als DYPLA.



Figuur 50 STAPLA-rek links en DYPLA-rek rechts voor blootstelling te Oostende

Bron: eigen werk

5.3.1 Eén Maand blootstelling te Oostende (augustus 2024)



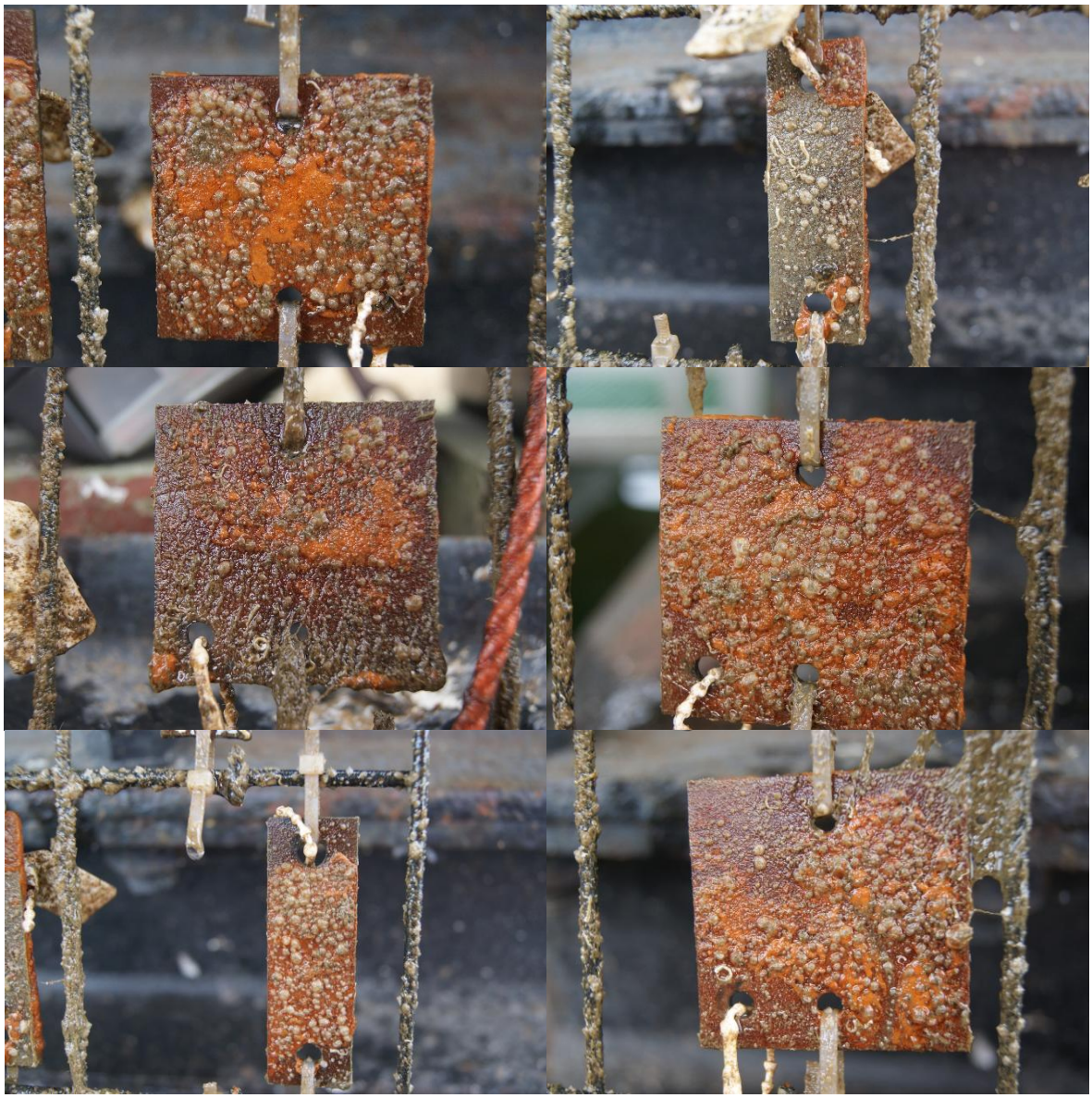
Figuur 51 Coupons STAPLA na 1 maand blootstelling te Oostende

Bron: eigen werk

De aangroei op zowel het statische- als dynamische platform was al na één maand blootstelling verschillend van dat te Vlissingen. Voornamelijk de grote hoeveelheid kalkkokerwormen was hier niet aanwezig op deze coupons. Er werden er wel enkele aangetroffen op zowel het STAPLA- als het DYPLA-rek, maar niet in dezelfde mate alsop enkele coupons in Vlissingen.

De kleine grijze bulten op de coupons zijn hoogstwaarschijnlijk jonge zeepokken in ontwikkeling. De coupons van het DYPLA-rek vertonen er hier meer van in vergelijking met het STAPLA-rek.

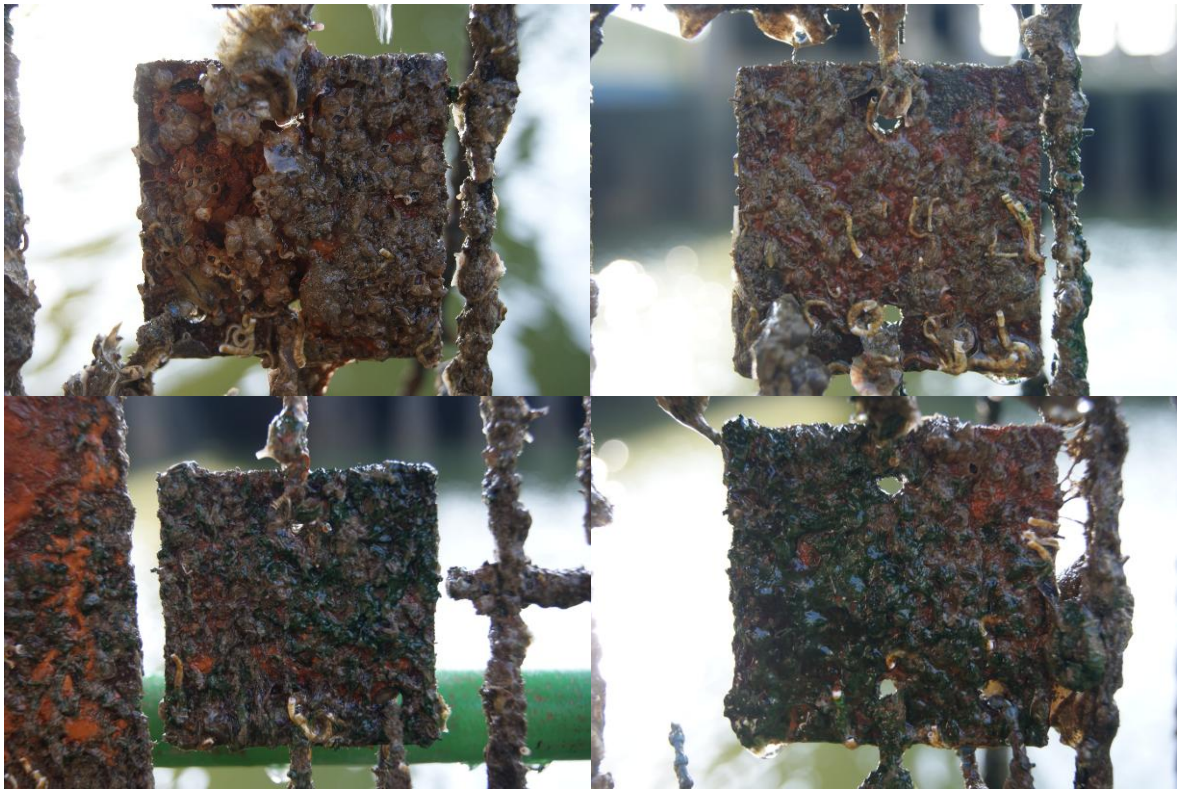
Verder waren er ook geen zachte organismen en sponzen zichtbaar, zoals in Vlissingen wel het geval was na één maand blootstelling.



Figuur 52 Coupons DYPLA na 1 maand blootstelling te Oostende

Bron: eigen werk

5.3.2 Twee Maanden blootstelling te Oostende (september 2024)



Figuur 53 Coupons STAPLA-rek na 2 maanden blootstelling te Oostende

Bron: eigen werk

De zeepokken waren na twee maand blootstelling duidelijk zichtbaar ontwikkeld, met name op het DYPLA-rek, hoewel ze ook aanwezig waren op het STAPLA-rek, zij het in mindere mate. Dit verschil was al enigszins te verwachten na het bekijken van de sporen van jonge zeepokken in ontwikkeling op de coupons na één maand blootstelling maar nu was het verschil zeer opvallend.

De mate van bedekking door de zeepokken op het STAPLA-rek was zeer verschillend voor elke coupon. Enkele coupons waren grotendeels bedekt terwijl andere enkel op de rand bedekt waren met zeepokken en op het centrale gedeelte enkel een uniforme oranje corrosieproductenlaag vertoonden, zoals op Figuur 54.

Daarnaast was er ook nog steeds sprake van kalkkokerwormen, hoewel deze veel frequenter en duidelijker te zien waren op de coupons van het STAPLA-rek.



Figuur 54 Coupons DYPLA-rek na 2 maanden blootstelling te Oostende

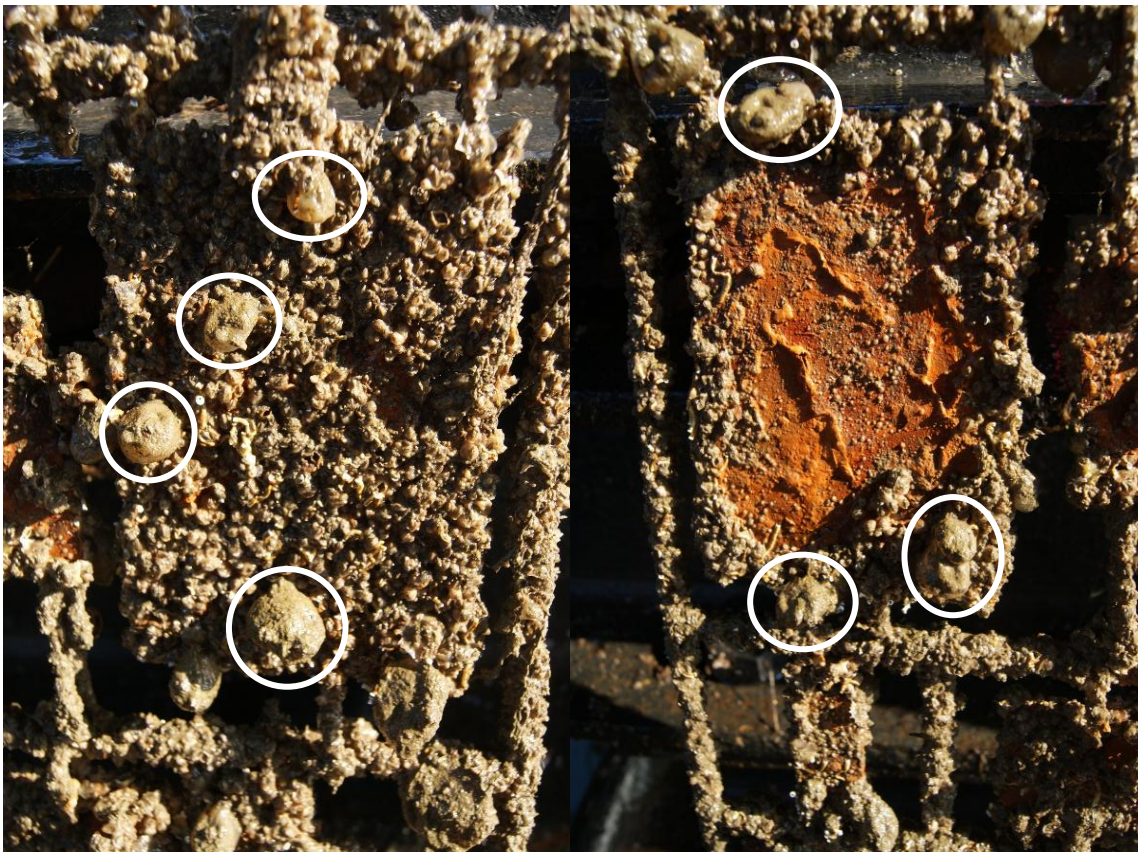
Bron: eigen werk

Ook op de grote coupons op het DYPLA-rek was het waarneembaar dat niet elke coupon dezelfde mate van bedekking van aangroeiorganismen had. De twee grote coupons, op Figuur 55, die zich in het midden van het rek op dezelfde diepte bevonden, vertoonden desondanks een aanzienlijk verschil in aangroei en hoeveelheid bedekt oppervlak.

De coupon op de linkse afbeelding was volledig bedekt met zeepokken en enkele zakpijpen Dit is waarschijnlijk de ronde zakpijp, reeds besproken in hoofdstuk 3.2.6. De zakpijpen zijn aangeduid met een witte cirkel op Figuur 55 en Figuur 56.

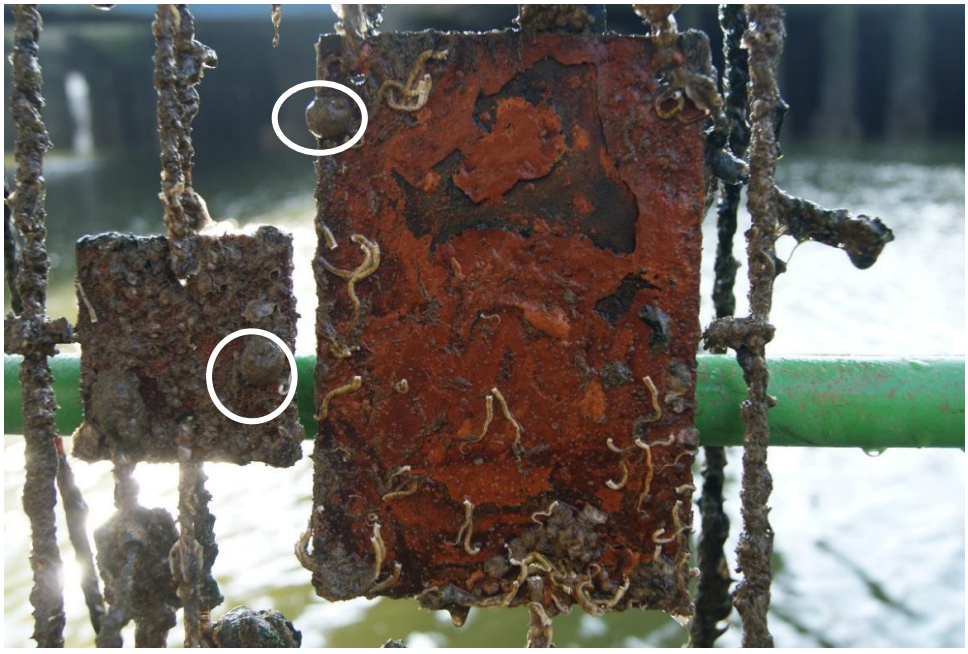
Bij de coupon op de rechter afbeelding waren uitsluitend de randen bedekt met zeepokken, kalkkokerwormen en enkele zakpijpen. In het centrale gedeelte van deze coupon was een oranje corrosieproductenlaag aanwezig, waarop zich de eerste sporen van ontwikkelde jonge zeepokken begonnen af te tekenen.

De grote coupons op het STAPLA-rek vertoonden een vergelijkbare mate van aangroei. Alle coupons bevatten sporen van kalkkokerwormen, enkele zakpijpen en zeepokken, zij het in aanzienlijk geringere mate dan de coupons op het DYPLA-rek. De coupon op Figuur 56 bevond zich ook in het midden van het rek.



Figuur 55 *Grote coupons DYPLA rek na 2 maanden blootstelling te Oostende waarop zakpijpen met witte cirkel zijn aangeduid*

Bron: eigen werk



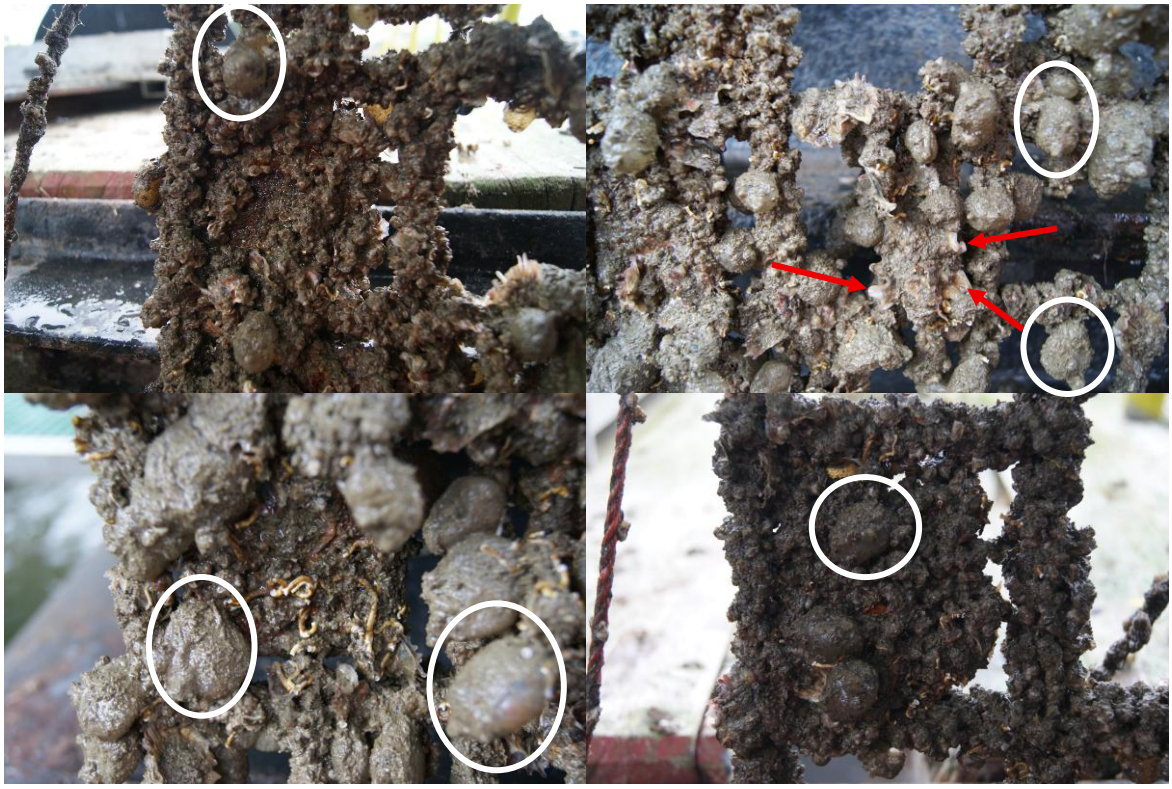
Figuur 56 *Grote coupon STAPLA rek na 2 maanden blootstelling te Oostende waarop zakpijpen met witte cirkel zijn aangeduid*

Bron: eigen werk

5.3.3 Vier Maanden blootstelling te Oostende (november 2024)

De afbeeldingen van het DYPLA-rek zijn van mindere kwaliteit. Dit is enerzijds te wijten aan de instabiliteit van het rek, veroorzaakt door het grote gewicht van de aangroeiorganismen op de coupons. Bovendien, vanwege de aanzienlijke hoeveelheid en omvang van de aangroeiorganismen op het DYPLA-rek werd het onmogelijk voor de camera om scherp te stellen op de coupon. De beperkte lichtinval en de daardoor minder goede belichting van het platform benadeelden tevens de camera werking.

Het fotograferen van het STAPLA-rek werd minder beïnvloed door deze factoren, maar de omstandigheden waren ook daar niet ideaal.



Figuur 57 *Coupons DYPLA-rek na 4 maanden blootstelling te Oostende waarop zakpijpen met witte cirkel zijn aangeduid en oesterschelp met rode pijlen*

Bron: eigen werk

De coupons van het DYPLA-rek waren na vier maanden volledig bedekt met zeepokken en zakpijpen en op enkele coupons sporen van kalkkokerwormen. Bij enkele coupons was er bijna geen onderscheid meer te zien tussen de coupon zelf en de rand van het rek door de hoeveelheid en omvang van de aangroeiorganismen.

De afbeelding rechtsboven op Figuur 57 toont de schelp van wat mogelijks een oester kan zijn. De schelprand is aangeduid met enkele rode pijlen, aangezien deze niet makkelijk zichtbaar is tussen de vele aangroeiorganismen.

Er werden ook zeer veel zakpijpen teruggevonden, voornamelijk aan de onderkant van het rek, maar deze bevonden zich eerder op de randen van het rek dan op de coupons zelf. Figuur 58 geeft dit weer. Op Figuur 57 zijn enkele zakpijpen aangeduid met een witte cirkel.

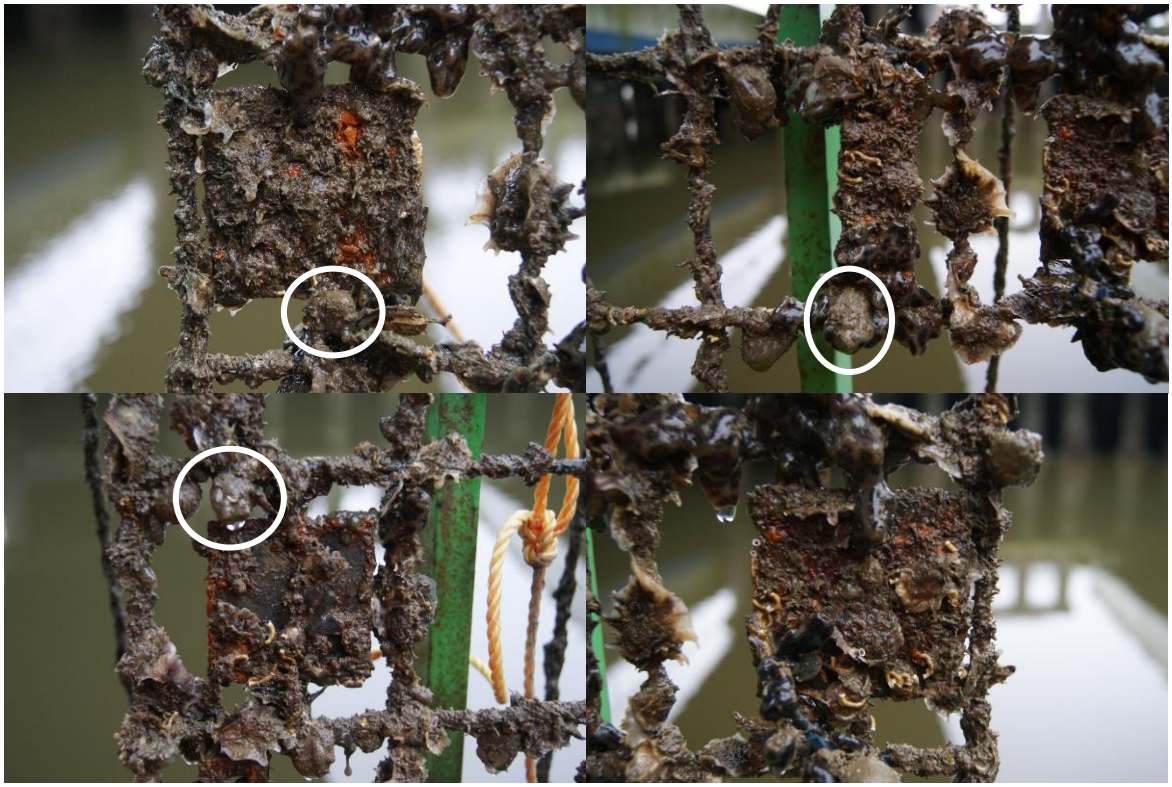


Figuur 58 DYPLA-rek na 4 maanden blootstelling te Oostende

Bron: eigen werk

Het STAPLA-rek was nog steeds in mindere mate bedekt met aangroeiorganismen. Slechts enkele zakpijpen en enkele zachte organismen die niet geïdentificeerd konden worden. Duidelijke, volgroeide zeepokken werden nog steeds niet veel teruggevonden op elke

coupon. Tot slot was op enkele coupons de oranje corrosieproductenlaag nog steeds zichtbaar, in tegenstelling tot de coupons op het DYPLA-rek. Opnieuw zijn enkele zakpijpen aangeduid met een witte cirkel op Figuur 59.

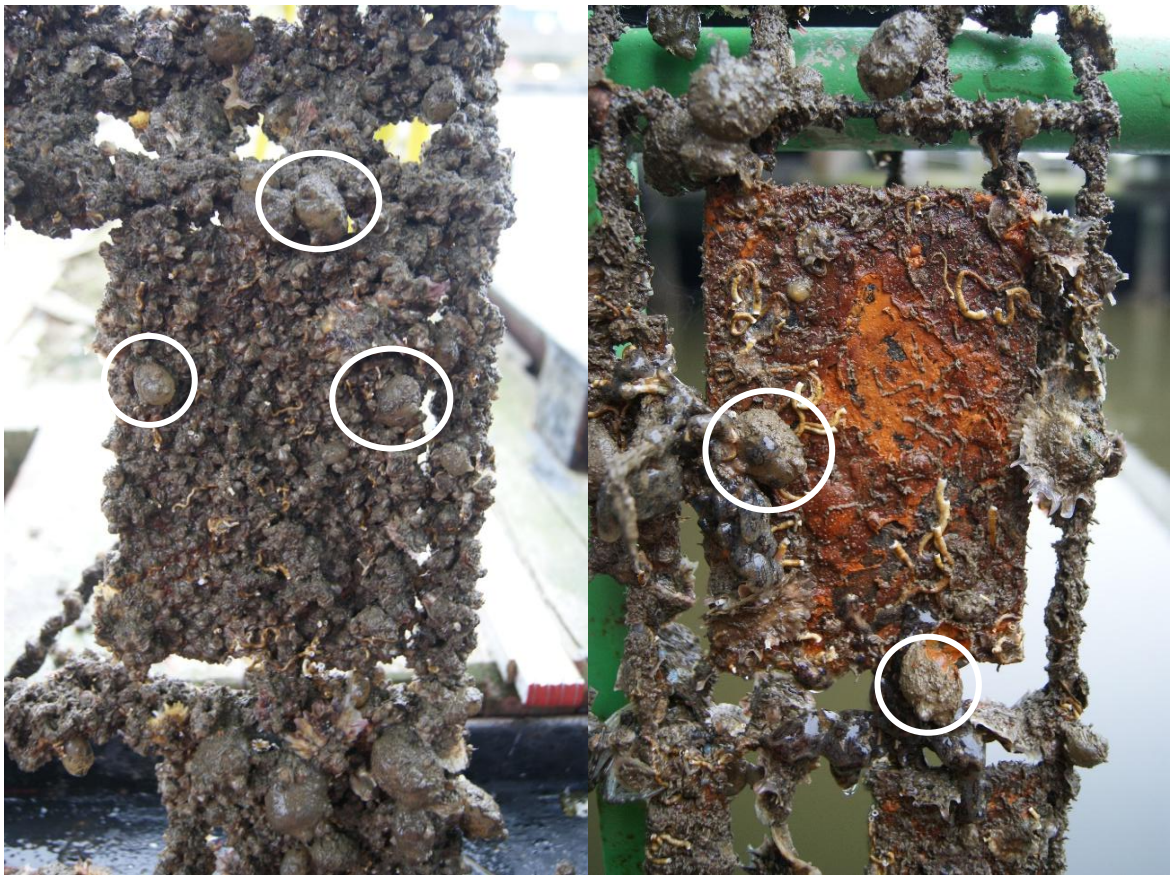


Figuur 59 *Coupons STAPLA-rek na 4 maanden blootstelling te Oostende waarop zakpijpen met witte cirkel zijn aangeduid*

Bron: eigen werk

De twee grote coupons op het DYPLA-rek vertoonden een vergelijkbare bedekking door aangroeiorganismen, bestaande uit een redelijk uniforme laag zeepokken, aangevuld met enkele zakpijpen en kalkkokerwormen. In tegenstelling tot de situatie na twee maanden blootstelling was er geen open zone zonder aangroeiorganismen meer aanwezig, zoals weergegeven in Figuur 55.

De twee grote coupons van het STAPLA-rek waren nog steeds, net zoals de kleine en middelgrote coupons, sterk verschillend van de coupons van het DYPLA-rek. Er werden voornamelijk kalkkokerwormen en een oranje corrosieproductenlaag waargenomen en amper zeepokken. Er werden ook enkele zakpijpen waargenomen, al zaten deze eerder op het rek dan op de grote coupons.

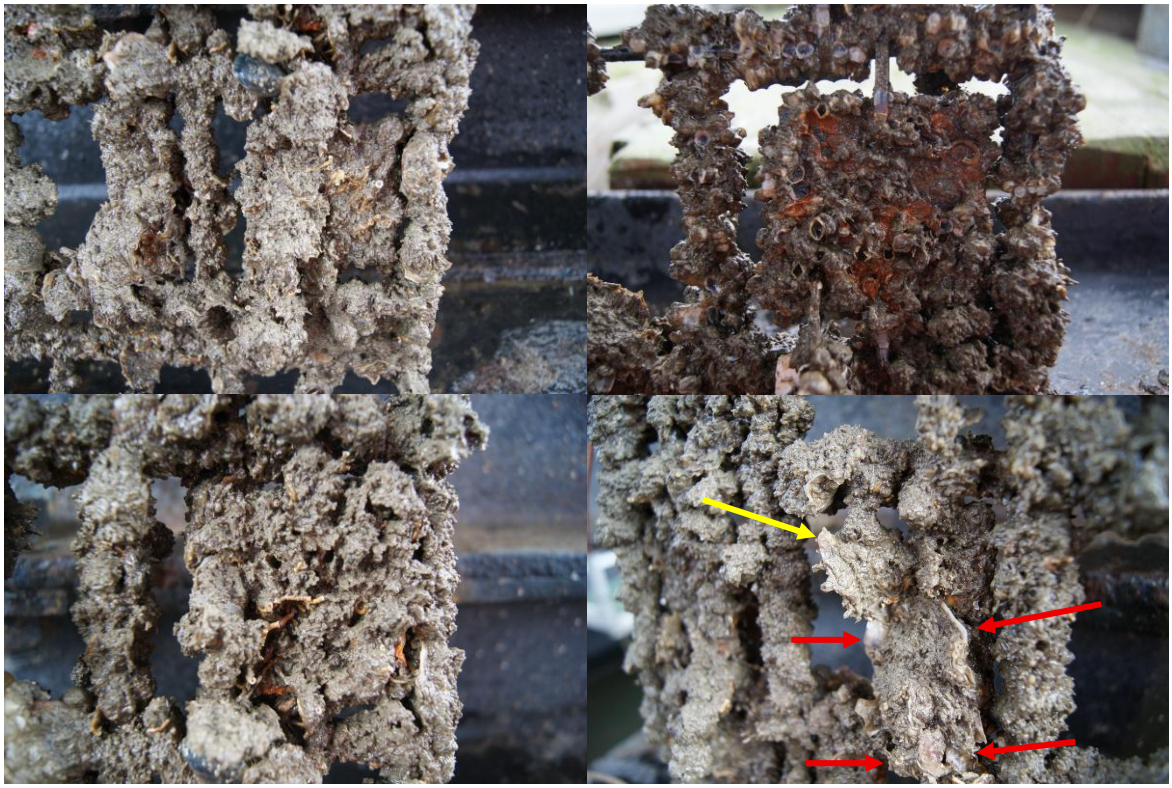


Figuur 60 *Grote coupon DYPLA-rek links en STAPLA-rek rechts na 4 maanden blootstelling te Oostende waarop zakpijpen met witte cirkel zijn aangeduid*

Bron: eigen werk

5.3.4 Zeven Maanden blootstelling te Oostende (februari 2025)

Net als op de afbeeldingen na vier maanden werd de scherpte van de foto's van het DYPLA-rek beïnvloed door de aanzienlijke hoeveelheid en omvang van de aangroeiorganismen.



Figuur 61 *Coupons DYPLA-rek na 7 maanden blootstelling te Oostende waarop oesterschelp aangeduid is met rode pijlen en extra schaaldier met gele pijl*

Bron: eigen werk

De coupons op het DYPLA-rek vertoonden een gelijkaardig aangroeipatroon als na vier maanden blootstelling. Ze werden gedomineerd door zeepokken en enkele kalkkokerwormen. Het onderscheid tussen coupon en rek was moeilijk te maken bij enkele coupons.

De afbeelding rechtsonder in Figuur 61 toont de vermoedelijke oesterschelp die al eerder werd opgemerkt na bij vier maanden op Figuur 57. Deze schelp strekt zich uit van het midden van de coupon tot aan de onderzijde. Boven de vermoedelijke oesterschelp is een bijkomend schaaldier aanwezig, al is het niet duidelijk of deze twee schelpen al dan niet bevestigd zijn op de coupon of op aangroeiorganismen die zich op de coupon bevinden. De vermoedelijke oesterschelp is aangeduid met rode pijlen en het schaaldier erboven met

één gele pijl. De schelprand van de vermoedelijke oester is nu al beter zichtbaar dan na vier maanden blootstelling.

De coupons op het STAPLA-rek vertoonden een mengsel van zeepokken, kalkkokerwormen, zachte organismen die niet geïdentificeerd konden worden en enkele kleine schelpen vermoedelijk van schaaldieren.

De bedekking door zakpijpen, die bij vier maanden blootstelling op beide rekken nog sterk uitgesproken was, was bij deze observatie nauwelijks meer waarneembaar. Op Figuur 60 zijn deze zakpijpen aangeduid met een witte cirkel. Figuur 63 toont dezelfde twee coupons en de eerder aangeduide zakpijpen zijn niet meer waarneembaar.



Figuur 62 Coupons STAPLA-rek na 7 maanden blootstelling te Oostende

Bron: eigen werk

De grote coupons van beide rekken vertoonden, wat de bedekking door aangroeiorganismen betreft, weinig verschil ten opzichte van de situatie na vier maanden blootstelling.

Op de grote coupon van het DYPLA-rek, die ook afgebeeld staat op Figuur 60 na vier maanden blootstelling, werd aan de onderzijde een afname van zeepokken waargenomen. Vermoedelijk zijn deze afgestorven en van de coupon losgeraakt. Ook de zakpijpen die bij

vier maanden nog aanwezig waren, werden niet meer teruggevonden, waarschijnlijk om dezelfde reden.

De grote coupon op het STAPLA-rek had een veel minder uitgesproken oranje kleur doordat de corrosieproductenlaag nu zwaarder bedekt was met aangroeiorganismen en sediment.



Figuur 63 *Grote coupon DYPLA-rek links en STAPLA-rek rechts na 7 maanden blootstelling te Oostende*

Bron: eigen werk

Het meest opvallende fenomeen tijdens de blootstellingsperiode was het verschil in bedekking door aangroeiorganismen tussen de twee rekken, ondanks het feit dat ze slechts enkele honderden meters van elkaar verwijderd in het water waren gepositioneerd.

5.4 Zelzate

Tot slot werd er één rek blootgesteld in de jachthaven van Zelzate, onderdeel van het kanaal Gent-Terneuzen. Hier is het een zoet water milieu. Net zoals in Vlissingen en in Oostende bevond het rek zich hier ook op een dynamisch platform.



Figuur 64 Rek voor blootstelling te Zelzate

Bron: eigen werk

5.4.1 Eén Maand blootstelling te Zelzate (augustus 2024)

In Zelzate was er een zeer groot verschil wat de aangroei op de coupons betreft in vergelijking met Oostende en Vlissingen. Op deze locatie waren het rek en de coupons zeer hard bedekt met wieren en waren er geen aangroeiorganismen waar te nemen na één maand blootstelling. Dit is vermoedelijk te wijten aan het feit dat het zoetwatermilieu onvoldoende geschikt is voor de ontwikkeling van aangroeiorganismen die afhankelijk zijn van een zoutwateromgeving, zoals die wel werden aangetroffen in Vlissingen en Oostende.

Onder het wier is een uniforme oranje corrosieproductenlaag waarneembaar.



Figuur 65 Coupons na 1 maand blootstelling te Zelzate

Bron: eigen werk

5.4.2 Twee Maanden blootstelling te Zelzate (september 2024)



Figuur 66 Coupons na 2 maanden blootstelling te Zelzate

Bron: eigen werk

Het wier had zich na twee maanden meer ontwikkeld en was in lengte toegenomen. Tegelijkertijd vertoonde de oranje corrosieproductenlaag een steeds minder uniforme verdeling. Op bepaalde coupons domineerde deze oranje corrosieproductenlaag ten opzichte van de ontwikkeling van het wier, en op andere coupons was dit net omgekeerd.

De grote coupons worden niet afzonderlijk besproken, aangezien ze een vergelijkbare aangroei vertoonden als de kleine en middelgrote coupons.

5.4.3 Vier Maanden blootstelling te Zelzate (november 2024)



Figuur 67 Coupons na 4 maanden blootstelling te Zelzate

Bron: eigen werk

Na vier maanden onderdompeling was voornamelijk de lengte van het wier duidelijk toegenomen. Op sommige coupons werd het onderscheid tussen de rand en het rek moeilijker te maken. Door de toegenomen begroeiing met wier werd de oranje corrosieproductenlaag steeds minder zichtbaar. Op enkele coupons bleven nog kleine zones aanwezig waar de corrosieproductenlaag boven het wier uitstak.

5.4.4 Zeven Maanden blootstelling te Zelzate (februari 2025)



Figuur 68 Coupons na 7 maanden blootstelling te Zelzate

Bron: eigen werk

Na zeven maanden onderdompeling was het wier nog verder in lengte toegenomen. De oranje corrosieproductenlaag was vrijwel volledig aan het zicht onttrokken. Het onderscheid tussen de coupon en het rek was soms nog steeds moeilijk te maken.

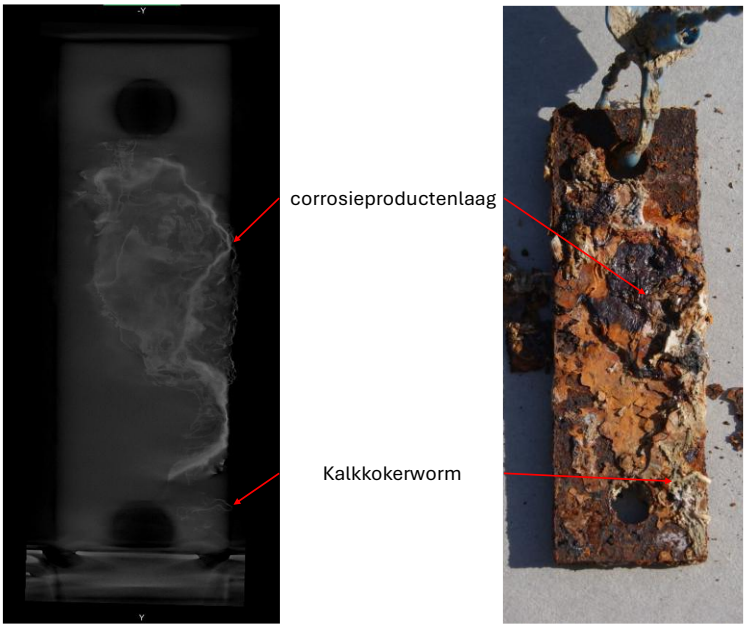
5.5 Resultaten XCT-scanner

5.5.1 Vlissingen twee maanden (september 2024)

Op het moment dat de scans werden genomen, bevonden er zich geen aangroeiorganismen meer op de voorzijde van de coupon. Dit is te wijten aan het feit dat de coupons op 30/09/2024 uit het water werden gehaald en pas op 01/04/2025 werden gescand. Gedurende deze periode van zes maanden heeft de coupon uit het water gelegen en volledig kunnen uitdrogen, waardoor het oppervlak begon te desintegreren. Als gevolg hiervan lieten vele aangroeiorganismen en lagen van corrosieproducten spontaan los van de coupon.

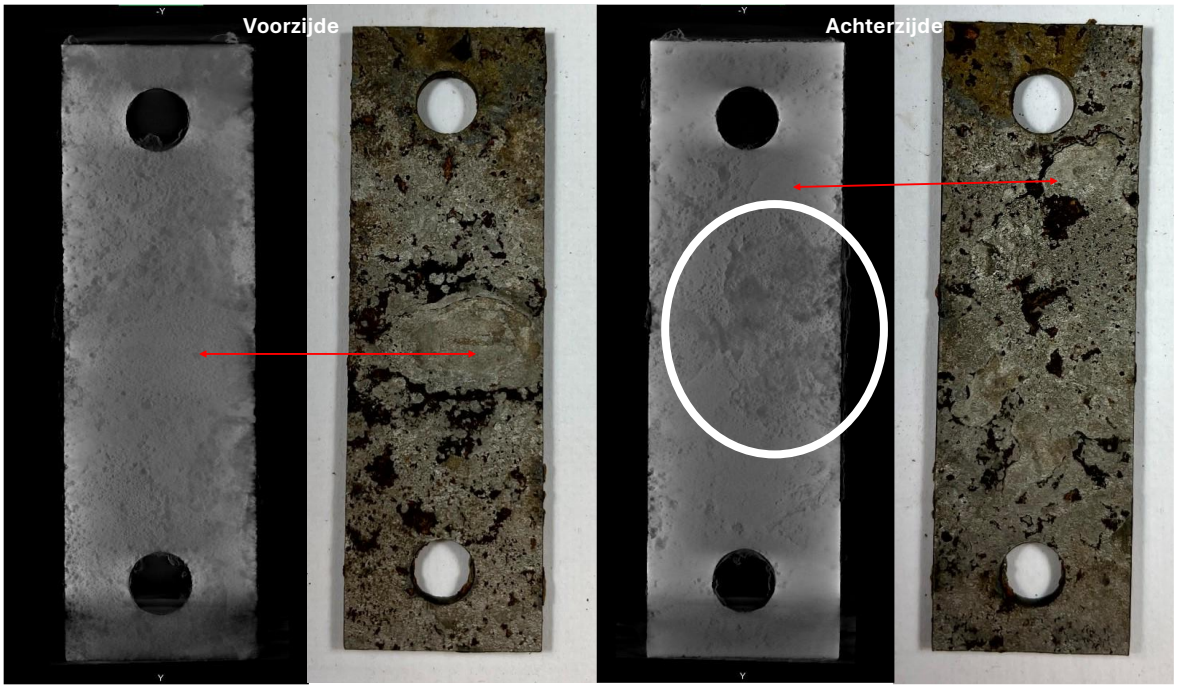
Deze observatie suggereert dat de aangroeiorganismen zich in eerste instantie hadden gehecht aan de corrosieproductenlaag en niet rechtstreeks op het staaloppervlak. Vanwege het verlies van deze lagen tijdens de droogperiode is er voor deze zijde van de coupon geen bruikbare vergelijking mogelijk tussen de scan en de afbeelding.

Op de achterzijde werd echter nog een kalkkokerworm waargenomen, die op de scan zwak zichtbaar is, maar duidelijk naar voren komt of de afbeelding. De centrale accumulatie op de coupon werd tijdens de visuele analyse bevestigd als een accumulatie van enkel corrosieproducten, zonder aanwezigheid van aangroeiorganismen.



Figuur 69 Achterzijde Vlissingen 2 maanden coupon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk



Figuur 70 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk

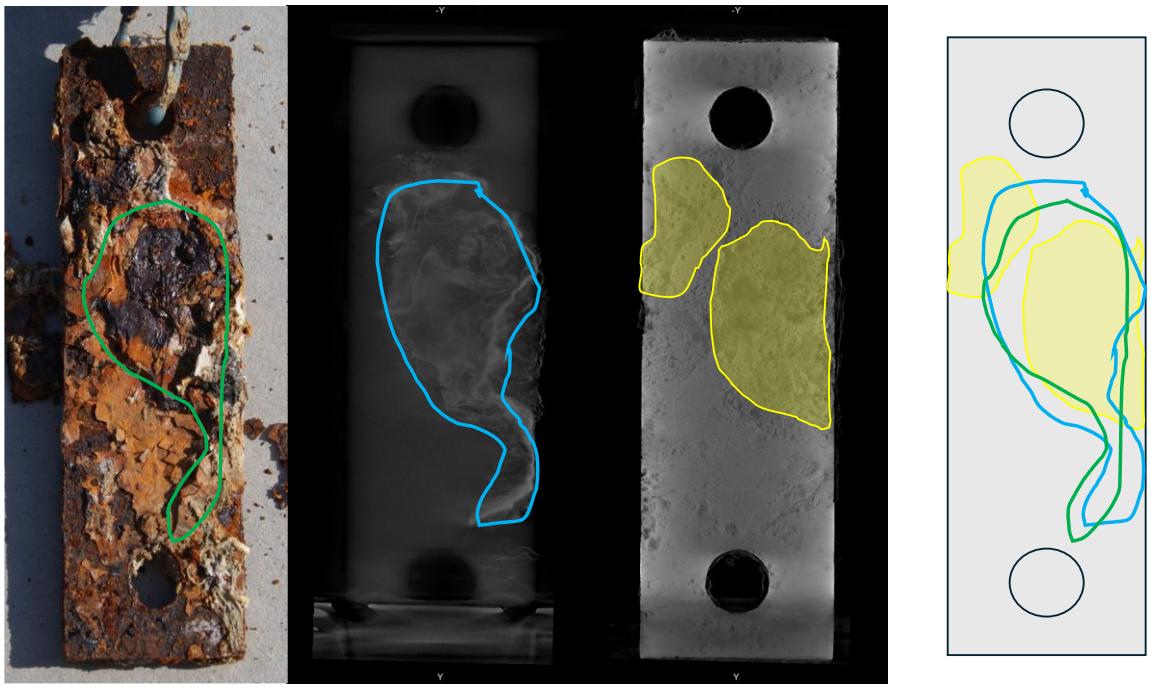
De voorzijde van de coupon vertoont over het algemeen een uniform aangetast oppervlak met een morfologie die doet denken aan een maanlandschap, gekenmerkt door talrijke putjes en holtes. Hoe donkerder de scanweergave, des te dieper de schade in het staaloppervlak is. In het centrale gedeelte is een zone zichtbaar met minder diepe schade. Deze regio is duidelijk herkenbaar op de afbeelding, terwijl de contouren ervan slechts subtiel zichtbaar zijn op de scan. De zone wordt aangeduid met een tweezijdige pijl. De schade is hier significant minder ernstig.

Vanwege de desintegratie van het oppervlak is het echter niet mogelijk om met zekerheid een verband te leggen tussen deze zone en specifieke aangroeiorganismen of de aanwezige corrosieproductenlaag.

Op de achterzijde van de coupon zijn eveneens zones met relatief beperkte schade aanwezig. Eén zone springt echter in het oog vanwege de uitgesproken mate van aantasting. Deze is aangeduid met een witte cirkel. Deze sterk aangetaste regio komt overeen met de locatie van een dikke corrosieproductenlaag zoals te zien op Figuur 69.

Dit wordt aangetoond op Figuur 71 waar de interessante gebieden op de verschillende afbeeldingen en scans van de achterzijde over elkaar worden gelegd om zo één resultante

coupon te verkrijgen. De andere zone met relatief ernstigere schade is eveneens aangeduid op deze figuur. Deze zone vertoont een gedeeltelijke overlap met het gebied waar een ophoping van corrosieproducten werd waargenomen. Het is echter moeilijk met zekerheid te stellen dat deze accumulatie de enige oorzaak van de schade vormt, gezien de beperkte overlap. Door de desintegratie van het oppervlak is het niet mogelijk om eenduidig vast te stellen of de oorzaak van de zwaardere schade gerelateerd is aan de aanwezigheid van de aangroeiorganismen en/of aan een laag van corrosieproducten.



Figuur 71 *Samenvattende vergelijken tussen corrosieproducten en onderliggende corrosieschade op achterzijde*

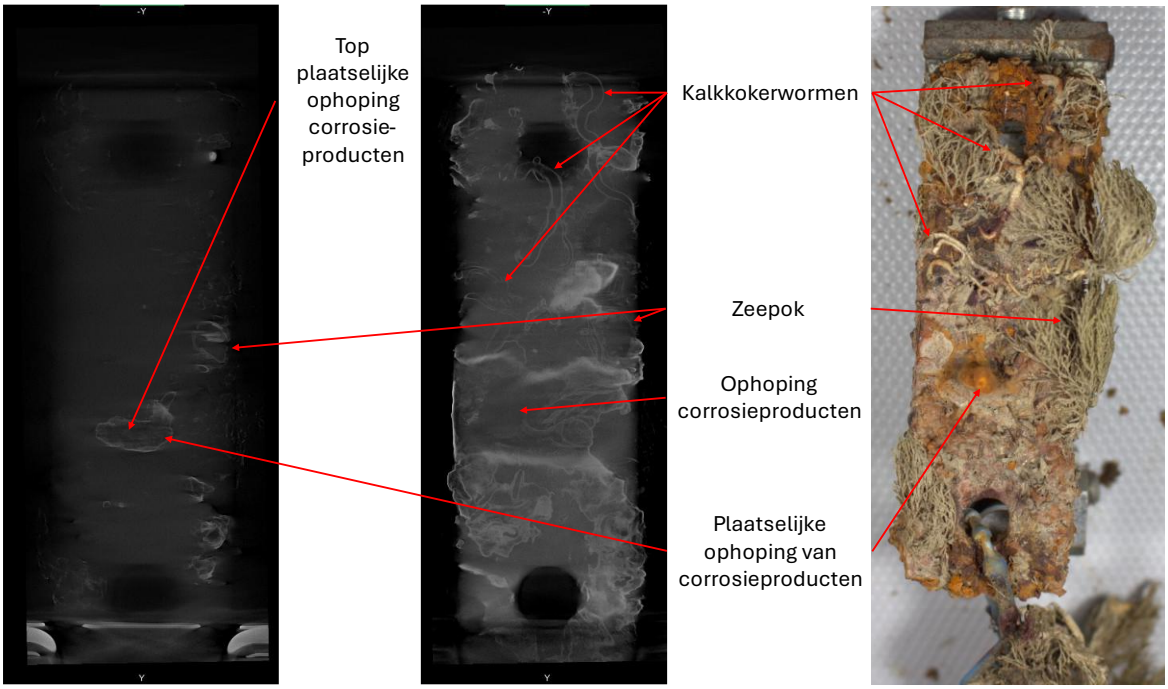
Bron: eigen werk

Het gewichtsverlies van deze coupon is 3,2603 gram, dit is 7,06% van het oorspronkelijke gewicht. De corrosiesnelheid voor deze coupon bedraagt 1,038 millimeter/jaar na twee maanden blootstelling te Vlissingen.

5.5.2 Vlissingen zeven maanden (februari 2025)

Op de voorzijde van de coupon vallen voornamelijk de kalkkokerwormen duidelijk op, evenals een zeepok waarvan de contouren goed zichtbaar zijn op de scan. Op de afbeelding, van Figuur 72, is deze zeepok echter grotendeels verborgen achter een fragment zeewier.

Wat verder opvalt aan de voorzijde is een plaatselijke ophoping van corrosie rond het midden van de coupon. Aanvankelijk werd verondersteld dat het hier ging om een aangroeiorganisme dat in de richting van de z-as was gegroeid en nadien bedekt was geraakt met corrosieproducten. De visuele analyse toonde echter aan dat het enkel om een accumulatie van corrosieproducten gemengd met zand ging, zonder de aanwezigheid van een onderliggend organisme of interne structuur.



Figuur 72 *Voorzijde Vlissingen 7 maanden coupon scan versus afbeelding*

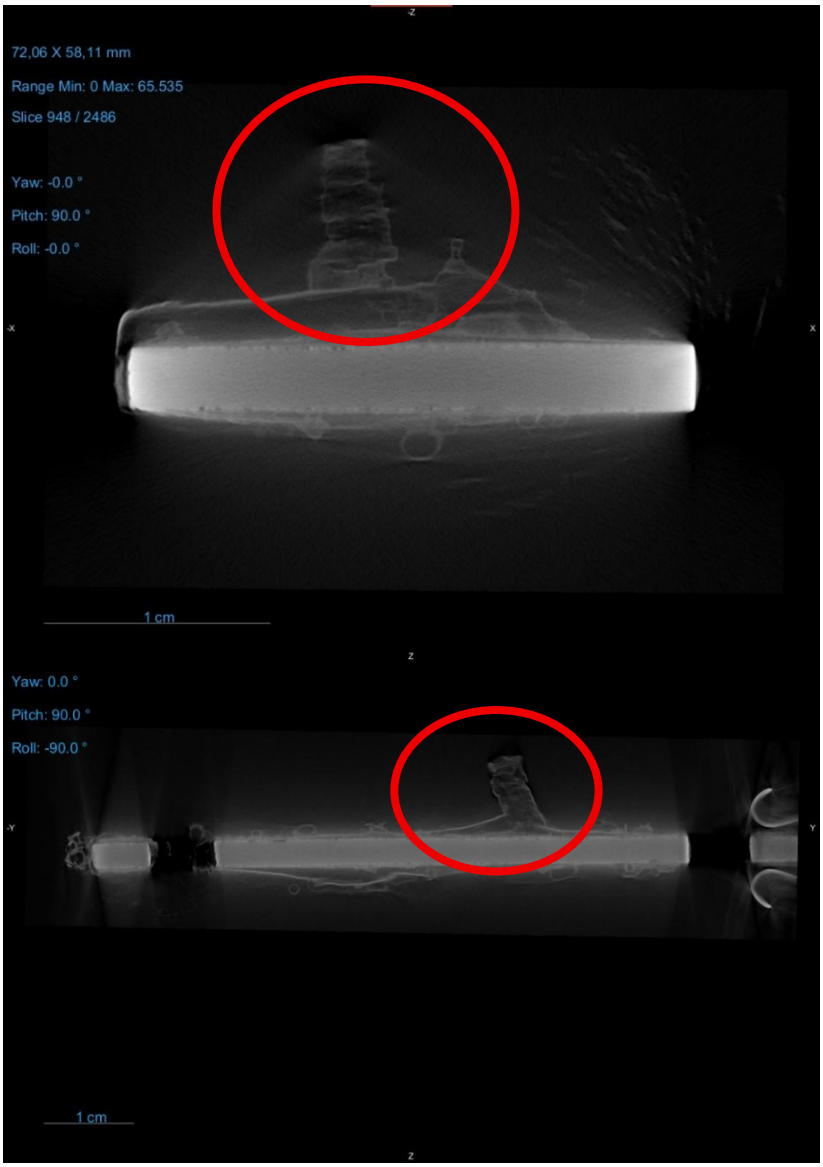
Bron: eigen werk

Figuur 72 toont tweemaal een scan in het XY-vlak. De linker scan werd op een hoger punt op de z-as genomen, om de hoogte van de plaatselijke ophoping van corrosie aan te tonen, terwijl de rechter scan vlak boven het staaloppervlak werd genomen. Op Figuur 73 is deze structuur aangeduid met een rode cirkel. Figuur 74 geeft de corrosie-accumulatie weer in verschillende doorsneevlakken.



Figuur 73 Corrosie-accumulatie aangeduid met rode cirkel

Bron: eigen werk



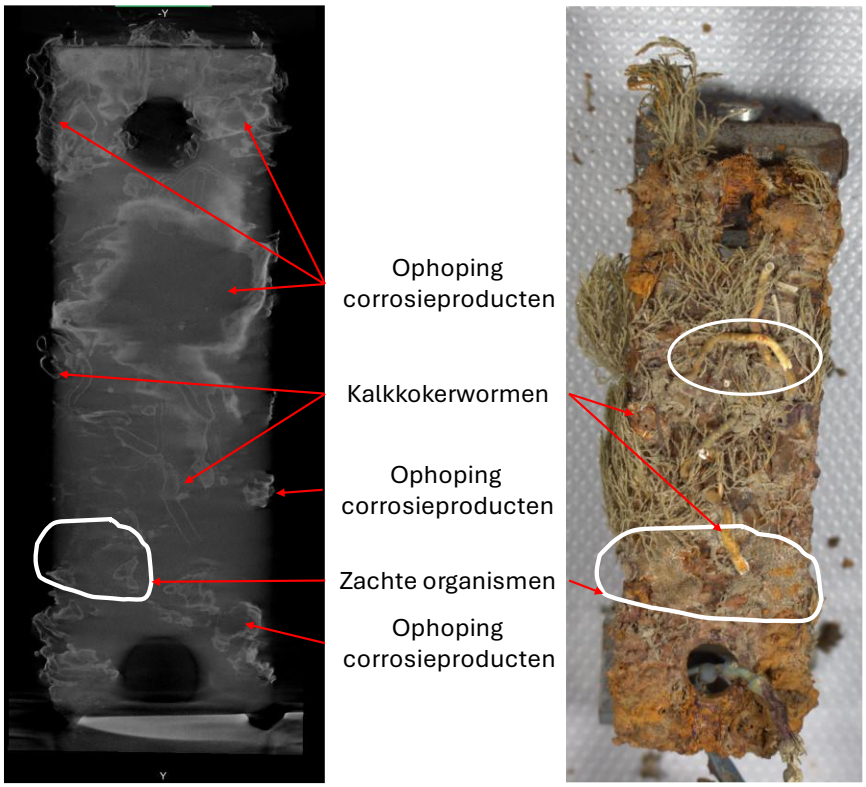
Figuur 74 Doorsnede corrosie accumulatie, aangeduid met rode cirkel, in het transversale vlak (boven) en longitudinale vlak (onder)

Bron: eigen werk

Aan de bovenzijde van de coupon werd tijdens de visuele analyse een gelijkaardige, maar aanzienlijk kleinere plaatselijke corrosie-accumulatie waargenomen. Ook hier werd geen interne structuur waargenomen, en de accumulatie is noch zichtbaar op de scan, noch op de afbeelding.

Daarnaast werden bij de microscopische analyse verschillende kleine dode kruipende organismen aangetroffen, vermoedelijk strandvlooien of vergelijkbare kleine schaaldieren. Deze waren niet zichtbaar met het blote oog en konden evenmin worden geïdentificeerd op de scans.

De achterzijde van de coupon werd voornamelijk gedomineerd door goed waarneembare kalkkokerwormen en zeewier. Er werd op deze kant geen plaatselijke corrosie accumulatie gevonden zoals op de voorkant. Wel werd er een groot ophopingsgebied van corrosieproducten waargenomen op de scan. Hierdoor is de kalkkokerworm, aangeduid met een witte cirkel op Figuur 75, niet waarneembaar op de scan aangezien deze doorsnede net boven het staaloppervlak is.

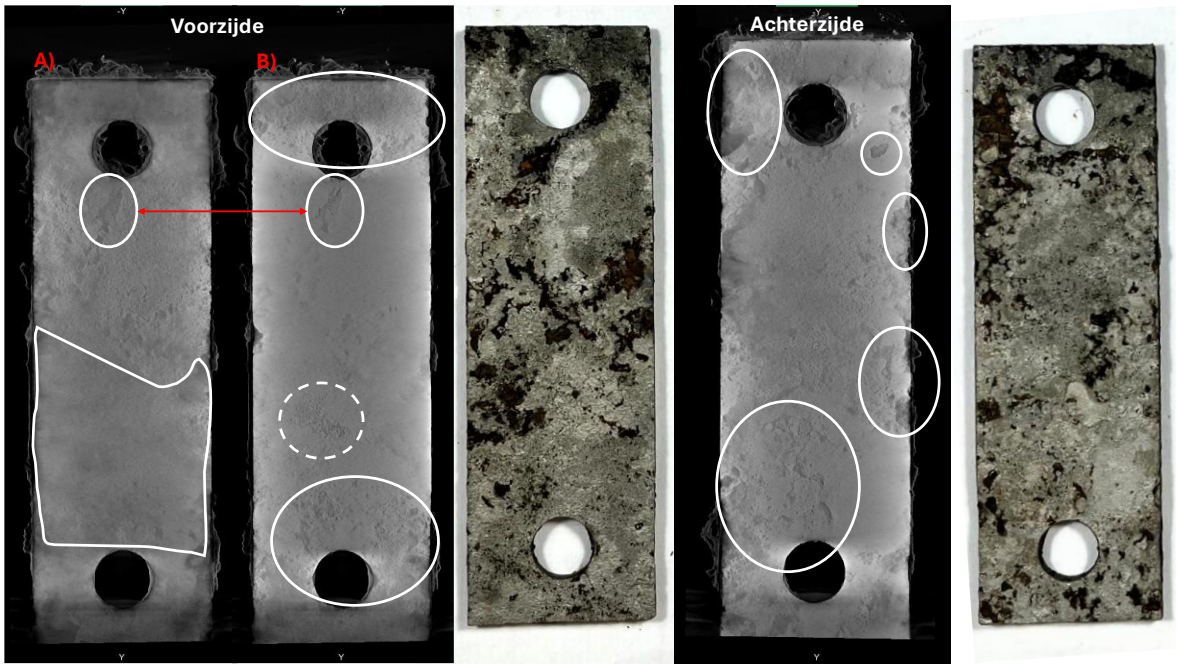


Figuur 75 *Achterzijde Vlissingen 7 maanden coupon scan versus afbeelding*

Bron: eigen werk

De zachte organismen die met de witte cirkel zijn aangeduid zijn zeer moeilijk waarneembaar op de scan, enkel het linker stuk is waarneembaar op de scan, maar wel veel duidelijker op de afbeelding. Welke soort deze zachte organismen exact zijn is niet bepaald tijdens de visuele analyse.

Tot slot werden er aan de onderkant van de coupon een groot aantal kleine openingen gevonden in de corrosieproductenlaag. Wat de oorsprong hiervan is, is onbekend.



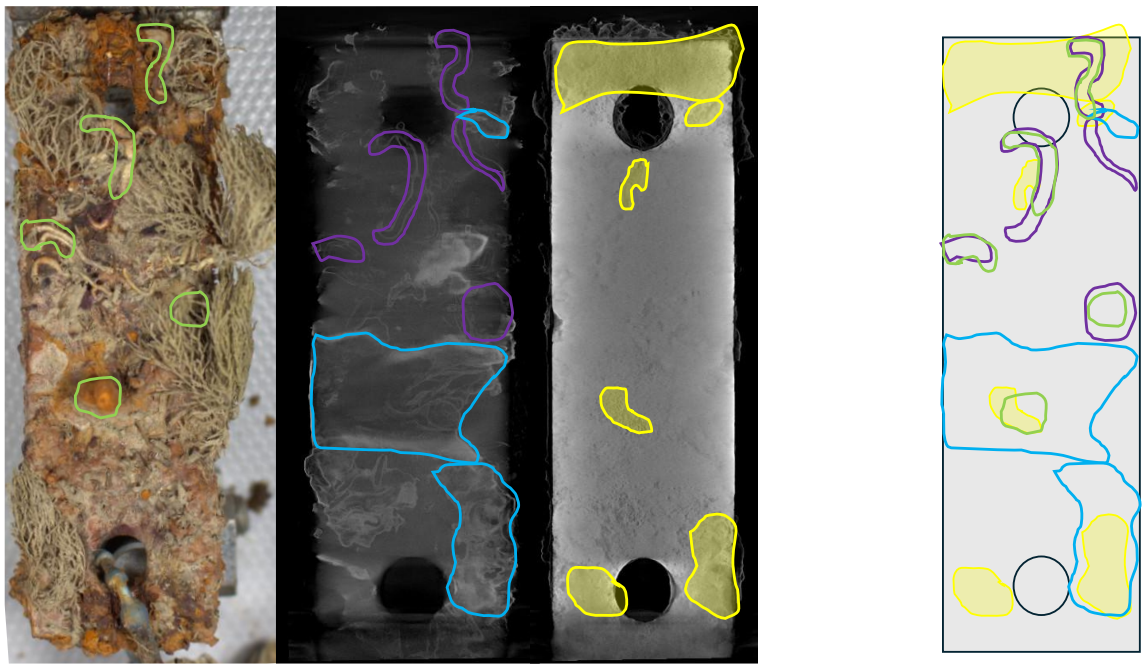
Figuur 76 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk

Voor de voorzijde zijn er twee doorsnedes in het XY vlak geanalyseerd om de schade in detail te bestuderen. De eerste scan, aangeduid als scan A, is genomen op een hoger niveau langs de Z-as. Deze keuze is gemaakt omdat de schade bij deze coupon zich op sommige locaties zo diep in het materiaal bevindt dat het niet mogelijk is om alle relevante schadezones binnen één enkele scan weer te geven.

De tweede scan, scan B, toont voornamelijk het niet-aangetaste staaloppervlak van de coupon, wat op de afbeelding herkenbaar is aan de homogene, witte kleur zonder onderbrekingen. De schade in deze gebieden is reeds zichtbaar op scan A. Op scan A is te zien dat aan de bovenzijde van de coupon reeds schade aanwezig is, terwijl deze aan de onderzijde nog niet in deze mate zichtbaar is, deze wordt pas veel duidelijker op scan B. Het verschil in hoogte tussen de twee scan is 150 µm.

Op scan B, zijn er vier opvallende gebieden met relatief diepere schade geïdentificeerd. Deze gebieden zijn elk gemarkeerd met een witte cirkel op Figuur 76. De meest opmerkelijke zone wordt aangeduid met een onderbroken witte cirkel. Deze diepere schadezone komt overeen met de lokale accumulatie van corrosieproducten die al eerder werd besproken en weergegeven op Figuur 74. Dit wordt aangetoond op Figuur 77 waar de top van deze plaatselijke accumulatie overeenkomt met deze zone. De grote omliggende ophoping van corrosieproducten, die onder deze plaatselijke accumulatie ligt, geeft natuurlijk ook al een indicatie dat er zwaardere schade te verwachten valt. Op deze coupon worden er nu ook kalkkokerwormen gevonden in relatief zwaarder beschadigde gebieden.



Figuur 77 *Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade voorzijde*

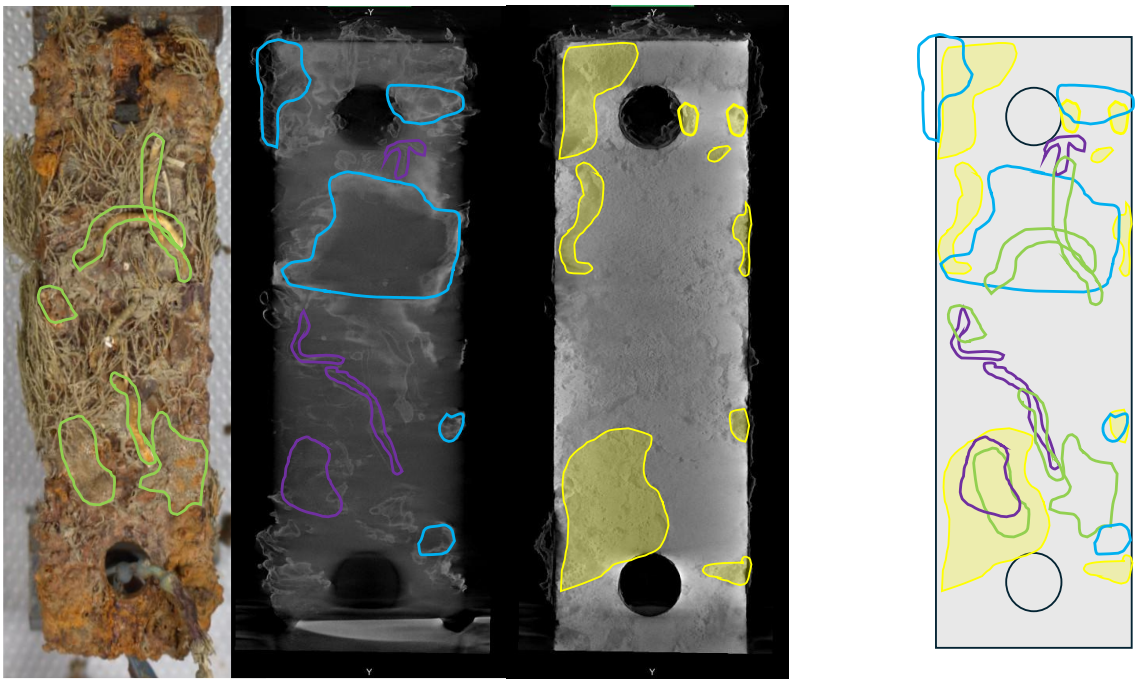
Bron: eigen werk

Voor de achterzijde van de coupon volstond één enkele doorsnede, het was niet nodig om er meerdere te maken, in tegenstelling tot de voorzijde. Ook hier zijn de zones met relatief zwaardere schade gemarkeerd met een witte cirkel. Zowel voor de voor- als achterzijde kon er echter geen directe correlatie worden vastgesteld tussen de scanbeelden en de afbeeldingen van het couponoppervlak.

Deze relatief zwaarder aangetaste zones bevinden zich voornamelijk aan de randen van de coupon en gaan doorgaans gepaard met een lokale ophoping van corrosieproducten. De

zachte organismen, die eerder op Figuur 75 werden besproken, bevinden zich deels boven een zone met zwaardere corrosie en deels boven een regio waar de corrosieschade minder was en het onaangetaste staaloppervlak reeds te zien is.

Op de centrale positie waar de uitgestrekte kalkkokerworm zich had gehecht, werd geen indicatie van relatief zwaardere corrosie vastgesteld, in tegenstelling tot de voorzijde waar er wel enkele kalkkokerwormen in relatief zwaarder beschadigd gebied werden waargenomen.



Figuur 78 *Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade achterzijde*

Bron: eigen werk

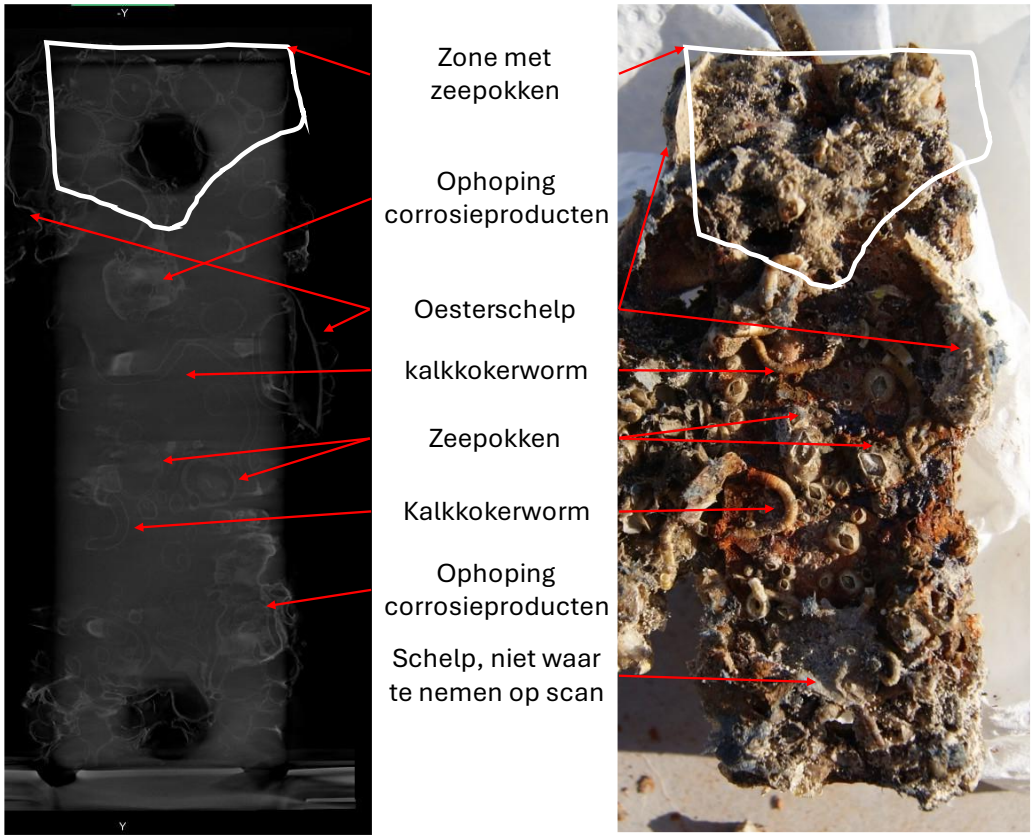
Het gewichtsverlies van deze coupon is 5,5589 gram, dit is 12,04% van het oorspronkelijke gewicht. De corrosiesnelheid voor deze coupon bedraagt 0,580 millimeter/jaar na een blootstelling van zeven maanden te Vlissingen.

5.5.3 DYPLA twee maanden (september 2024)

In vergelijking met de coupon uit Vlissingen vertoonde deze twee maanden blootgestelde coupon relatief weinig verlies van aangroeiorganismen en corrosieproducten, ondanks de langdurige opdroogperiode. De algemene staat van de coupon was nog goed te noemen.

Op de voorzijde waren voornamelijk veel zeepokken, waarvan enkele met een aanzienlijke afmeting, waarneembaar. Daarnaast waren enkele kalkkokerwormen duidelijk zichtbaar. Tijdens de visuele analyse werden ook twee kleine schelpen aangetroffen, waarop zich secundaire aangroei van kleine zeepokken had voorgedaan.

Net boven het gat aan de onderzijde werd tijdens de visuele analyse een bijkomende schelp waargenomen. Deze was echter niet zichtbaar op de XCT-scan. Aan de bovenzijde van de coupon werden eveneens grote zeepokken vastgesteld. Deze zijn op de afbeelding grotendeels bedekt met sediment en corrosieproducten, waardoor ze visueel minder goed herkenbaar zijn. De contouren van deze organismen komen echter wel duidelijk naar voren op de scan, aangeduid door de witte zone.



Figuur 79 Voorzijde DYPLA 2 maanden coupon scan versus afbeelding

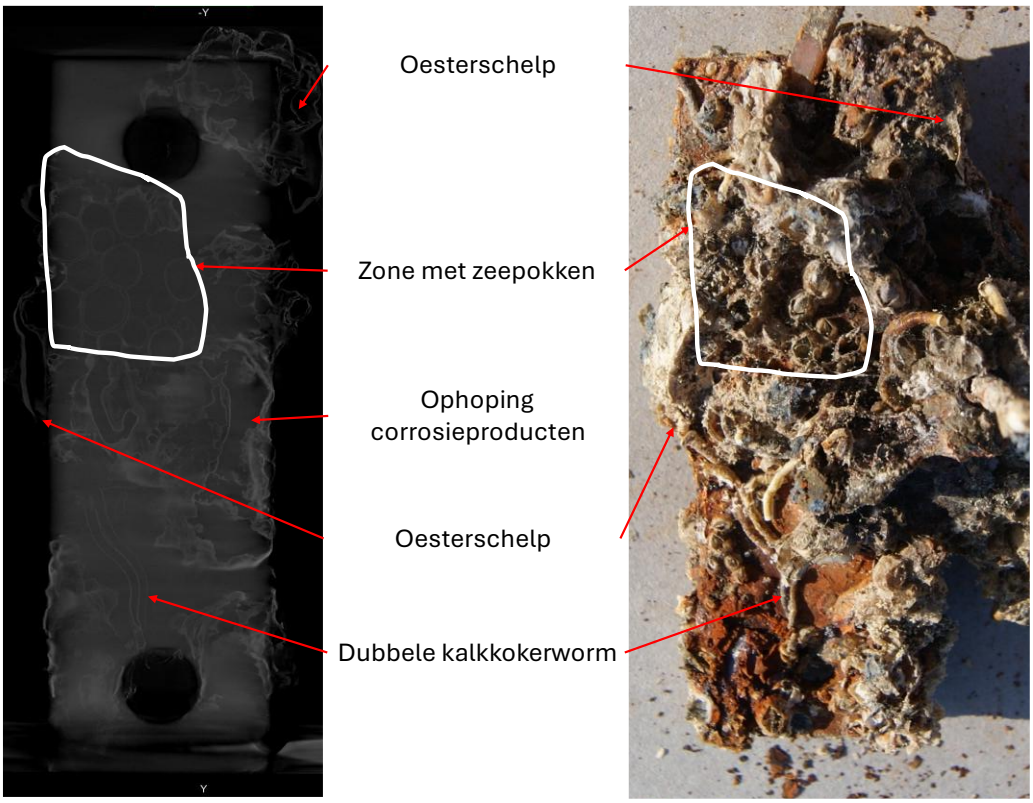
Bron: eigen werk

De achterzijde van de coupon vertoonde een vergelijkbare bedekking met aangroeiorganismen als de voorzijde. Ook hier waren zeepokken de dominante soort, aangevuld met enkele kalkkokerwormen. Met name de twee kalkkokerwormen die zich naast elkaar bevinden, zijn duidelijk zichtbaar op de XCT-scan en afbeelding.

Direct naast deze twee kalkkokerwormen bevindt zich een open zone waar zich geen aangroeiorganismen hebben gehecht. In dit gebied is de oranje corrosieproductenlaag duidelijk zichtbaar op de afbeelding.

Daarnaast valt op de XCT-scan een groot gebied met ophoping van corrosieproducten op aan de rechterzijde van de afbeelding.

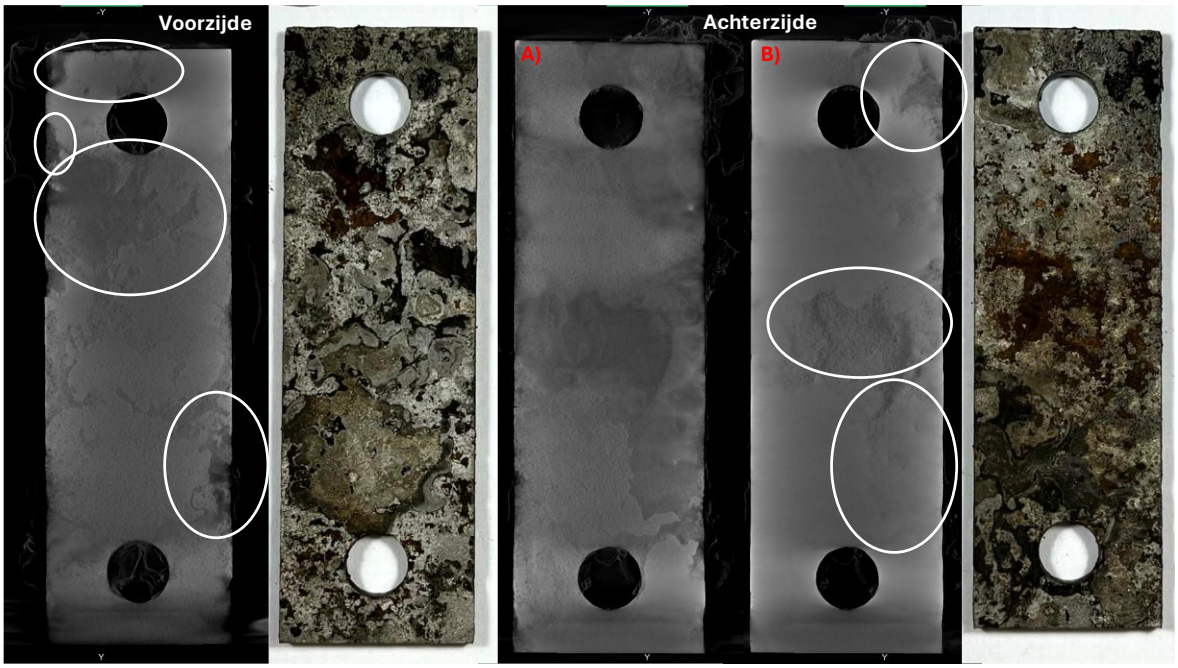
Tussen de zeepokken werd een aanzienlijke hoeveelheid sediment en corrosieproducten aangetroffen. De op de scan aangeduide corrosieproducten ophoping bestond uit corrosieproducten met zowel een zwarte als een rode kleur, wat mogelijk wijst op variaties in de samenstelling of oxidatietoestand van de corrosieproducten.



Figuur 80 *Achterzijde DYPLA 2 maanden coupon scan versus afbeelding*

Bron: eigen werk

Op de voorzijde van de coupon werd voornamelijk een uniform putcorrosiepatroon waargenomen. Een directe visuele correlatie tussen de scan en afbeelding is echter niet evident. Wel zijn er enkele zones met relatief zwaardere corrosie vastgesteld op de scan. Deze vier zones zijn aangeduid met een witte cirkel op Figuur 81.

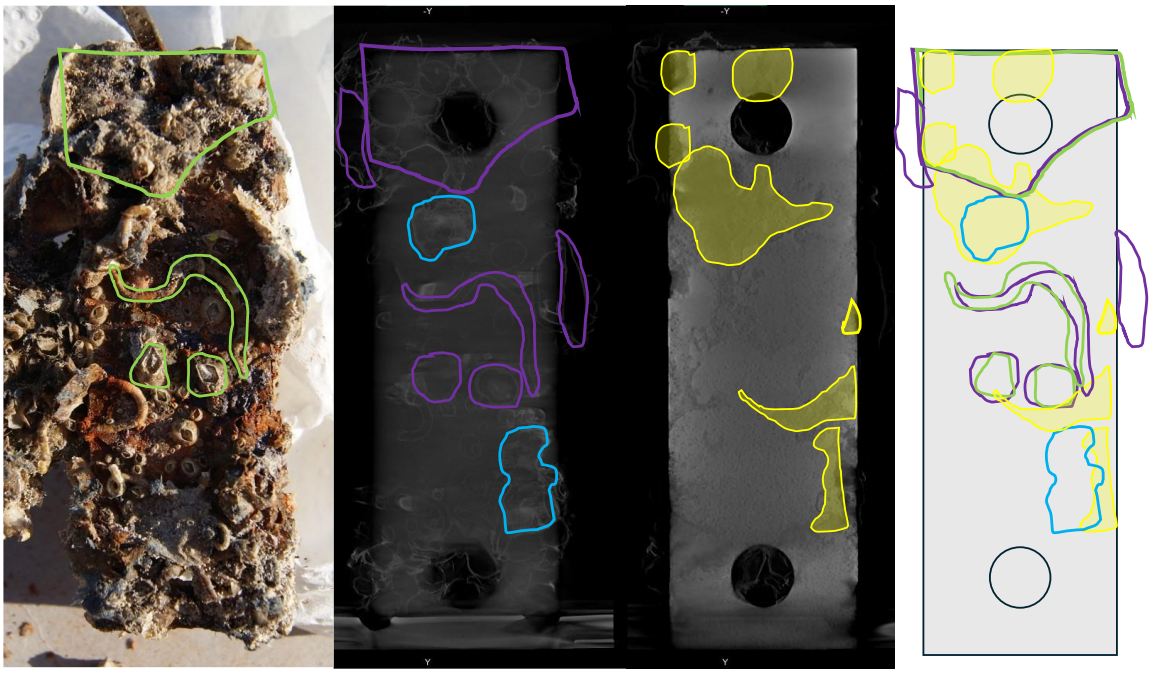


Figuur 81 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk

De zone rechtsonder stemt overeen met de ophoping van corrosieproducten zoals waargenomen op de scan. De grote zone net onder de opening in de coupon komt overeen met zowel een accumulatie van corrosieproducten als een deel van het gebied dat op de bovenzijde van de coupon gedomineerd werd door zeepokken. Ook de zone aan de bovenrand valt binnen ditzelfde door zeepokken beïnvloede gebied.

Tot slot correspondeert de kleine zone in de linkerbovenhoek met de aanhechtingsplaats van de oesterschelp en ook weer de door zeepokken gedomineerde zone. Onder de twee grote zeepokken en lange kalkkokerworm die zich in het midden van de coupon bevonden is geen significant zwaardere schade waar te nemen. Al deze observaties zijn weergegeven op Figuur 82.



Figuur 82 *Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade voorzijde*

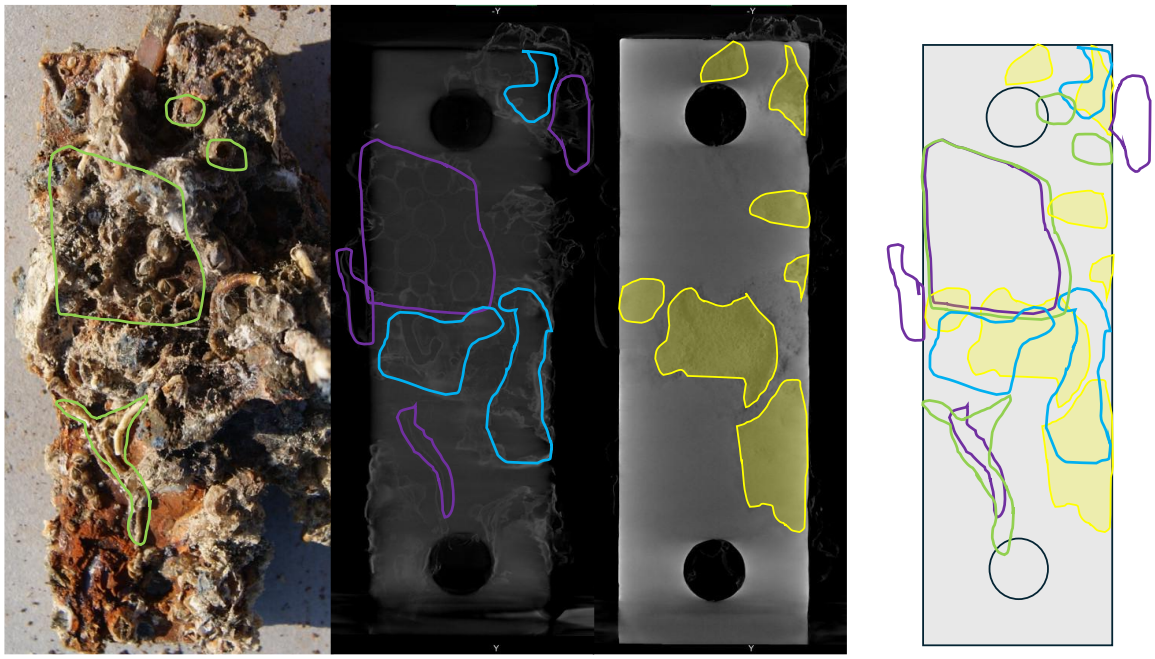
Bron: eigen werk

Voor de achterzijde van de coupon zijn, net als bij Vlissingen zeven maanden, twee XCT-scans op een verschillende hoogte langs de Z-as geanalyseerd om de diepte van de zwaarder beschadigde zones te kunnen visualiseren. Het hoogteverschil tussen de twee scans bedraagt 180 µm. Scan A is genomen op een hoger niveau, terwijl scan B dieper in het metaal doordringt. Deze opdeling was noodzakelijk, aangezien de schade die in scan B zichtbaar is, nog niet waarneembaar was op scan A. De drie zones met de meest uitgesproken schade zijn aangeduid met witte cirkels op Figuur 81.

De centrale, zwaarder aangetaste zone van de coupon komt overeen met de twee centrale gebieden waar een ophoping van corrosieproducten werd vastgesteld. Deze zone overlapt eveneens deels met het ruw gedefinieerd gebied dat werd gekenmerkt door een dominantie van zeepokken. Opmerkelijk is dat onder deze met zeepokken bedekte zone zelf geen relatief zwaardere metaaldegradatie werd vastgesteld.

Onder de twee kalkkokerwormen die zich naast elkaar bevonden, werd evenmin zwaardere corrosie waargenomen. Daarentegen werd op de aanhechtingsplaatsen van de twee oesterschelpen op de rand van de coupon wel een verhoogde mate van schade

gedetecteerd, overeenkomstig met eerdere bevindingen op de voorzijde van de coupon. Deze waarnemingen worden aangetoond op Figuur 83.



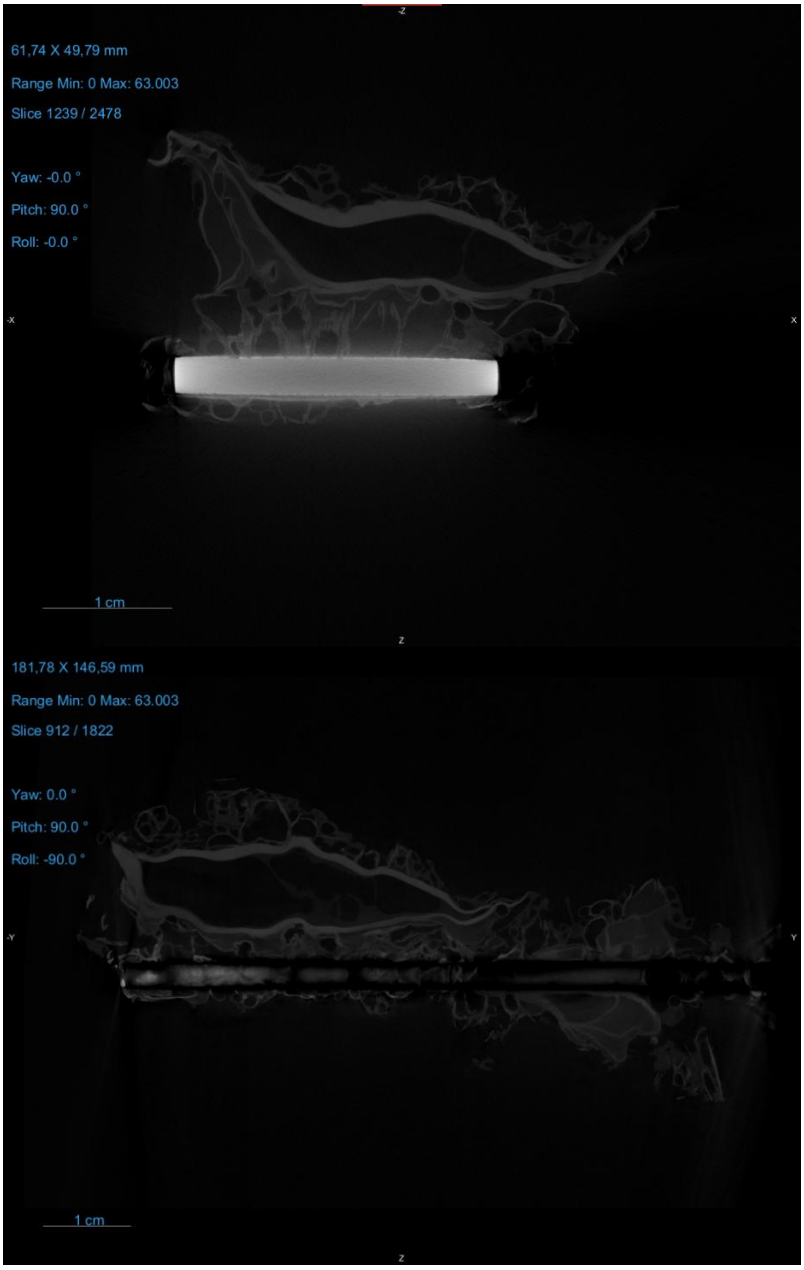
Figuur 83 *samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade achterzijde*

Bron: eigen werk

Het gewichtsverlies van deze coupon is 3,33167 gram, dit is 7,55% van het oorspronkelijke gewicht. De corrosiesnelheid voor deze coupon bedraagt 1,056 millimeter/jaar na een blootstelling van twee maanden te Oostende.

5.5.4 DYPLA zeven maanden (februari 2025)

De coupon afkomstig van het DYPLA-rek, die gedurende een periode van zeven maanden aan blootstelling onderhevig was, bleek vanuit scanperspectief de meest interessante van alle onderzochte coupons. Visuele inspectie toonde de aanwezigheid van een schelp die aanvankelijk werd geïnterpreteerd als een oesterschelp. Na verdere visuele analyse werd bevestigd dat het daadwerkelijk om een oesterschelp ging. Figuur 84 toont een doorsnede van de oester in het transversale (boven) en het longitudinale vlak (onder).

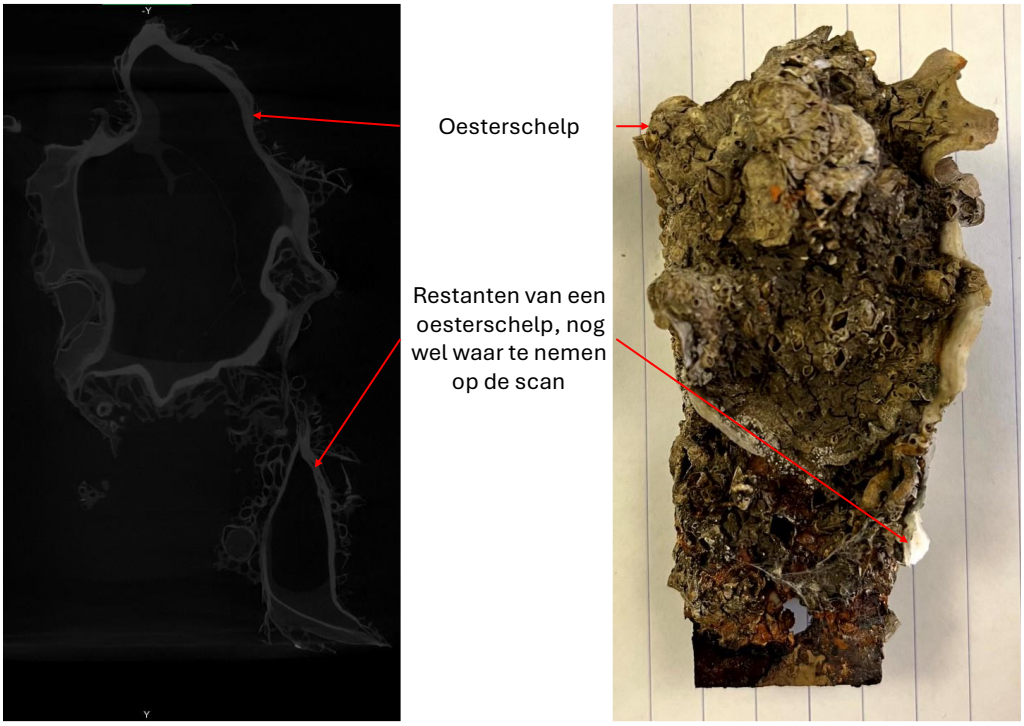


Figuur 84 Doorsnede oester in het transversale valk (boven) en longitudinale vlak (onder)

Bron: eigen werk

Figuur 85 toont de initiële scan, uitgevoerd met een resolutie van 35 µm. Op dat moment was aan de rechterzijde van de coupon nog een bijkomende schelpstructuur aanwezig. Deze werd na de eerste scan verwijderd om een vervolgsessie met een hogere resolutie van 10 µm mogelijk te maken. De aanhechtingsplaats van de schelp is echter nog zichtbaar op de afbeelding van de coupon. Tijdens de visuele analyse werd bevestigd dat het ook hier om een oesterschelp ging.

Zowel op de grote oester als op de kleinere, verwijderde oester, werden zeepokken aangetroffen die zich op de schelp hadden gehecht. Daarnaast werden op de grotere oesterschelp sporen van jonge oesters waargenomen; deze zijn echter niet zichtbaar op de scan. Deze kleine zeepokken op de oester zijn duidelijk waarneembaar op Figuur 84.



Figuur 85 *Voorzijde DYPLA 7 maanden coupon scan versus afbeelding*

Bron: eigen werk

Wat visueel slechts beperkt waarneembaar is, maar duidelijk naar voren komt in de scan, is dat de oesterschelp zich niet direct op het couponoppervlak heeft gehecht, maar op een reeds aanwezige laag zeepokken. Dit illustreert een belangrijk voordeel van de toegepaste analysetechniek: met een scan die slechts enkele minuten in beslag neemt, kan de volledige opbouw en gelaagdheid van aangroeiorganismen op het staaloppervlak gevisualiseerd worden, zonder dat deze aangroeiorganismen verwijderd hoeven te worden. Hierdoor

blijven de coupon en de aangroeiorganismen intact en geschikt voor eventuele verdere analyse.

Hoewel uit Figuur 84 reeds afgeleid kan worden dat de oester zich niet rechtstreeks op het staaloppervlak heeft gehecht, biedt de scan op Figuur 86 hiervoor het meest duidelijke bewijs.

Figuur 86 toont een scan van een doorsnede in het XY-vlak, net boven het staaloppervlak. Deze scan geeft een duidelijk beeld van de aangroeiorganismen die zich op het staaloppervlak hebben gehecht. De afbeelding rechts werd genomen na het verwijderen van de oester tijdens de visuele analyse. Hieruit blijkt duidelijk dat de oester zich had gehecht op een reeds aanwezige laag zeepokken – een observatie die eerder al via de scan werd bevestigd.

De laag zeepokken op het staaloppervlak vertoont een dichte structuur, waarbij de individuen nauw tegen elkaar zijn aangehecht en er slechts minimale open ruimtes aanwezig zijn tussen de aangroeiorganismen. Tussen de zeepokken zijn op de scan ook enkele kalkkokerwormen waarneembaar, maar het staaloppervlak wordt duidelijk gedomineerd door de compacte, aaneengesloten aanwezigheid van zeepokken.

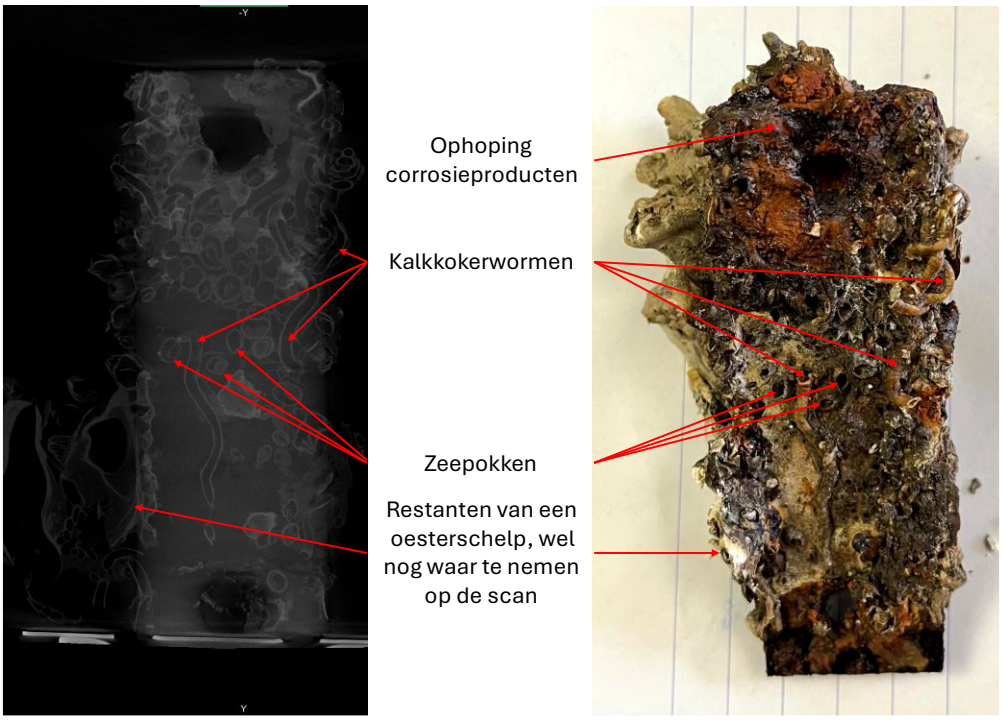


Figuur 86 Voorzijde DYPLA 7 maanden coupon zonder oester

Bron: eigen werk

De oester aan de rechterzijde van de coupon had zich wel op de rand van het staaloppervlak gehecht, dit is duidelijk te zien op Figuur 86.

Onder de zeepokken die zich bevonden onder de oester werden zandkorrels, corrosieproducten en andere vormen van sediment aangetroffen.



Figuur 87 *Achterzijde DYPLA 7 maanden coupon scan versus afbeelding*

Bron: eigen werk

De achterzijde van deze coupon vertoonde minder opvallende kenmerken. Tijdens de visuele analyse werden er voornamelijk zeepokken en enkele kalkkokerwormen waargenomen. Met name de langgerekte kalkkokerworm in het centrale gedeelte van de coupon, evenals aan de rechterzijde, zijn zowel op de scan als op de afbeelding duidelijk zichtbaar.

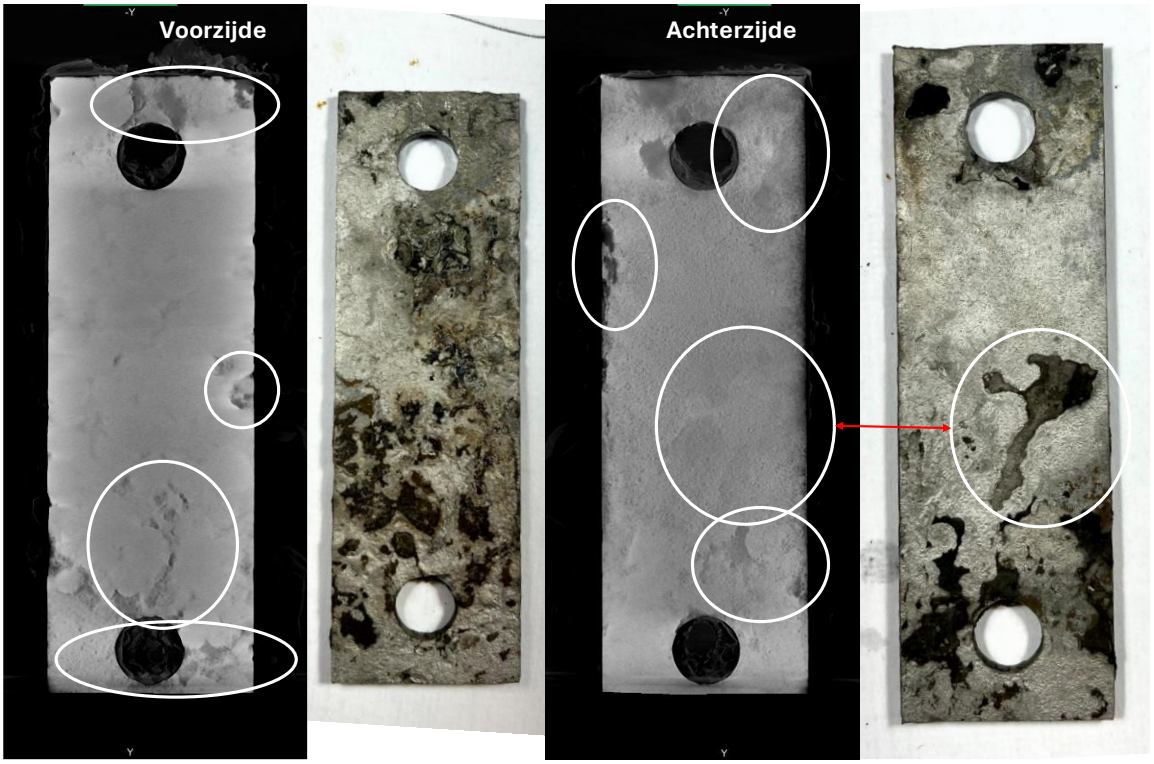
De zeepokken op deze zijde vertonen een minder compacte structuur in vergelijking met die op de voorzijde, met daartussen een duidelijk grotere aanwezigheid van kalkkokerwormen.

Uit de scan blijkt tevens dat het staaloppervlak aan de onderzijde niet volledig werd bedekt door aangroeiorganismen, er zijn nog meerdere open zones zichtbaar. Op de afbeelding zijn deze zones echter bedekt met zandkorrels, corrosieproducten en andere sedimentaire afzettingen, vergelijkbaar met de observaties aan de voorzijde van de coupon.

Voor de voorzijde van de coupon werd enkel een doorsneebeeld opgenomen waarin uitsluitend de zones met de zwaarste schade zichtbaar zijn. Vanwege de aanzienlijke variatie in diepte tussen de verschillende schadegebieden was het niet haalbaar om voor elk van deze zones afzonderlijk visualisaties te voorzien. Om die reden werd er gekozen voor een representatieve doorsnede. Het grootste deel van het staaloppervlak bevindt zich al in een onaangetaste toestand, met uitzondering van de vier met een witte cirkel gemarkeerde zones zoals weergegeven op Figuur 88.

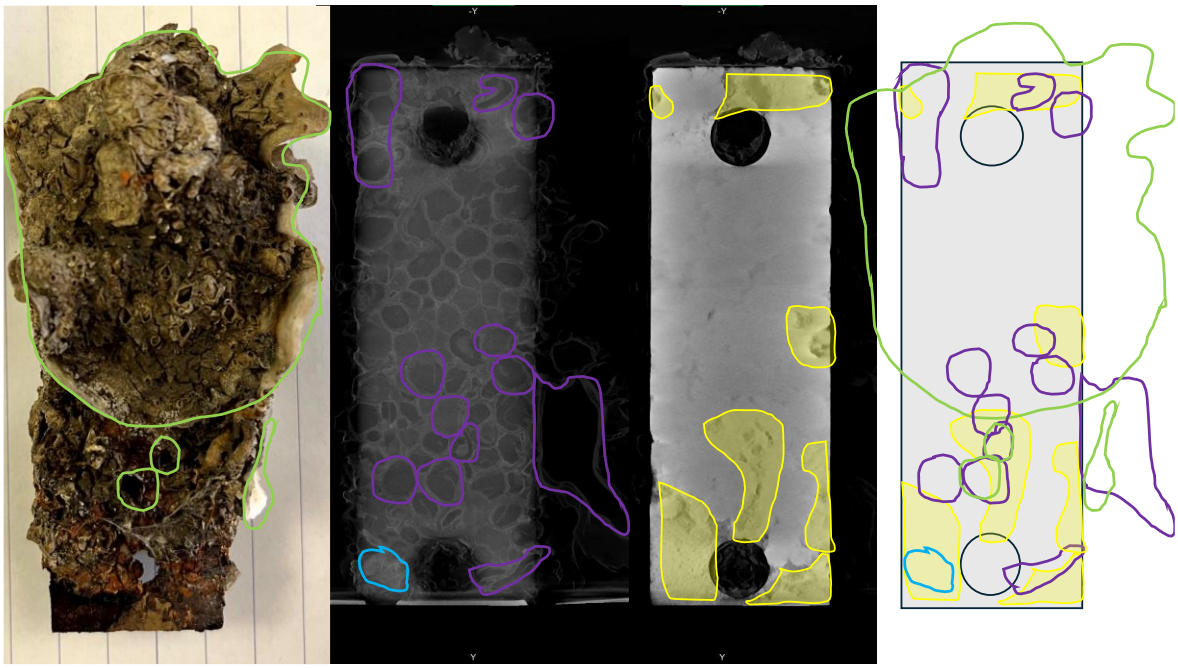
De meeste zones op de voorzijde met relatief zwaardere corrosie vertonen een ruimtelijke correlatie met de grootste zeepokken die op de scan van het staaloppervlak waarneembaar zijn. Onder de zeepokken met een kleinere omtrek wordt op deze coupon nog steeds schade teruggevonden, maar deze is niet gelinkt met de relatief zwaardere schade.

Onder de aanhechtingsplaats van de oester aan de rechterzijde is eveneens een zone met verhoogde schade zichtbaar. Daarnaast worden enkele kalkkokerwormen aangetroffen boven gebieden met zwaardere aantasting, zowel aan de boven- als onderzijde van de coupon. Deze observaties worden weergegeven op Figuur 89.



Figuur 88 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk



Figuur 89 *Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade voorzijde*

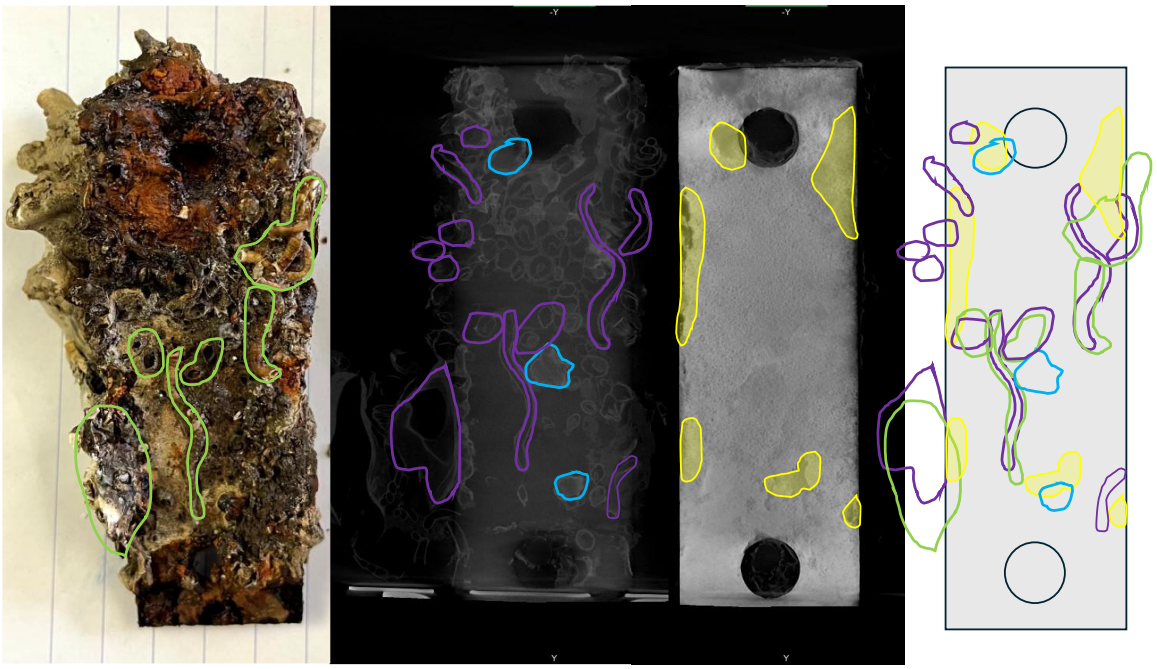
Bron: eigen werk

Op de achterzijde van de coupon valt op de afbeelding onmiddellijk een donkere zone op. Visueel lijkt deze zone dieper te liggen dan het omringende grijze staaloppervlak, maar de scan toont aan dat dit niet het geval is. Er is geen significant hoogteverschil vastgesteld. De contouren van deze zone zijn wel licht zichtbaar op de scan en worden aangeduid met een witte cirkel op Figuur 88, verbonden met een dubbele rode pijl. Daarnaast zijn de drie zones met relatief zwaardere schade eveneens gemarkeerd met witte cirkels.

Net zoals op de voorzijde werd onder de aanhechtingsplaats van de oester op de achterzijde van de coupon een licht verhoogde schadezone waargenomen.

De zwaarst beschadigde zone aan de linkerzijde van de coupon correspondeert met de aanhechtingsplaatsen van enkele zeepokken, die zich eerder op de rand van de coupon hadden vastgehecht dan op de achterzijde.

Een aantal van de zwaarder aangetaste zones valt bovendien samen met ophopingen van corrosieproducten. Het aantal en de omvang van deze accumulaties zijn echter beperkt in vergelijking met wat werd waargenomen op de coupons afkomstig van andere blootstellingslocaties. Dit wordt aangetoond op Figuur 90.



Figuur 90 *Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade achterzijde*

Bron: eigen werk

Het gewichtsverlies van deze coupon is 3,5753 gram, dit is 7,94% van het oorspronkelijke gewicht. De corrosiesnelheid voor deze coupon bedraagt 0,373 millimeter/jaar na een blootstelling van zeven maanden te Oostende.

5.5.5 STAPLA twee maanden (september 2024)

Deze coupon vertoonde na twee maanden een vergelijkbaar fenomeen als waargenomen bij de coupon uit Vlissingen na twee maanden: als gevolg van een langdurige opdroogperiode hadden de aangroeiorganismen zich losgemaakt van het oppervlak van de coupon. Dit suggereert opnieuw dat de aangroeiorganismen zich mogelijk hadden gehecht op de corrosieproductenlaag in plaats van rechtstreeks op het staaloppervlak.

Op de voorzijde van de coupon was de volledige laag aangroeiorganismen en corrosieproducten in één geheel losgekomen. de structuur van deze laag bleef intact, maar was niet langer verbonden met het staaloppervlak. Dit is te zien op Figuur 91, waarin te zien is dat de gehele laag als een eenheid van het staaloppervlak is geraakt. Naast de coupon zijn ook fragmenten van corrosieproducten zichtbaar, wat wijst op de broze aard van deze materialen.

Gezien het onderzoeksdoel, het in kaart brengen van corrosieschade en de bovenliggende aangroeiorganismen, werd het als minder informatief beschouwd om enkel de coupon zonder deze laag te scannen. Daarom is ervoor gekozen om twee afzonderlijke scans uit te voeren: één van de coupon zelf, zonder de aangroeiorganismen en corrosieproductenlaag, en één van de losgekomen laag zelf, bevestigd op een houten balk. Deze aanpak maakt het mogelijk om beide componenten afzonderlijk te analyseren en toch onderling te vergelijken.

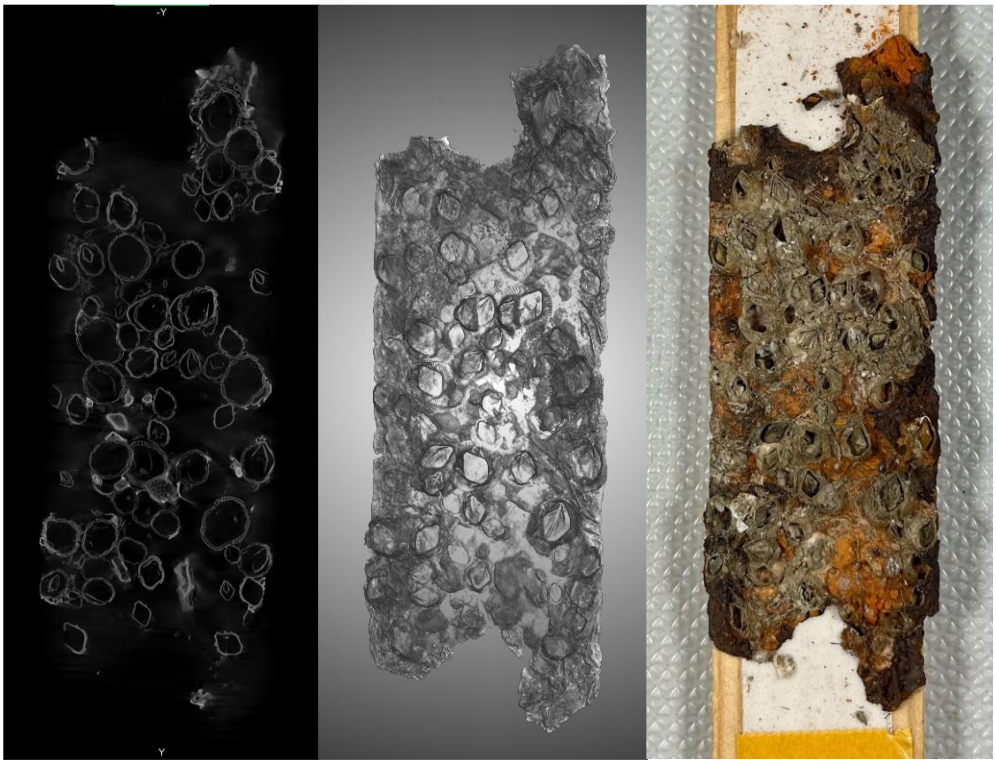


Figuur 91 Geloste laag aangroeiorganismen

Bron: eigen werk

Figuur 92 is de XCT-scans en afbeelding van de voorzijde van de coupon. De afbeelding toont de corrosieproductenlaag met aangroeiorganismen, bevestigd op de houten balk. Het is duidelijk dat de aangroei op deze laag voornamelijk bestaat uit zeepokken, die het beeld domineren. Andere types aangroeiorganismen werden niet waargenomen tijdens de visuele analyse.

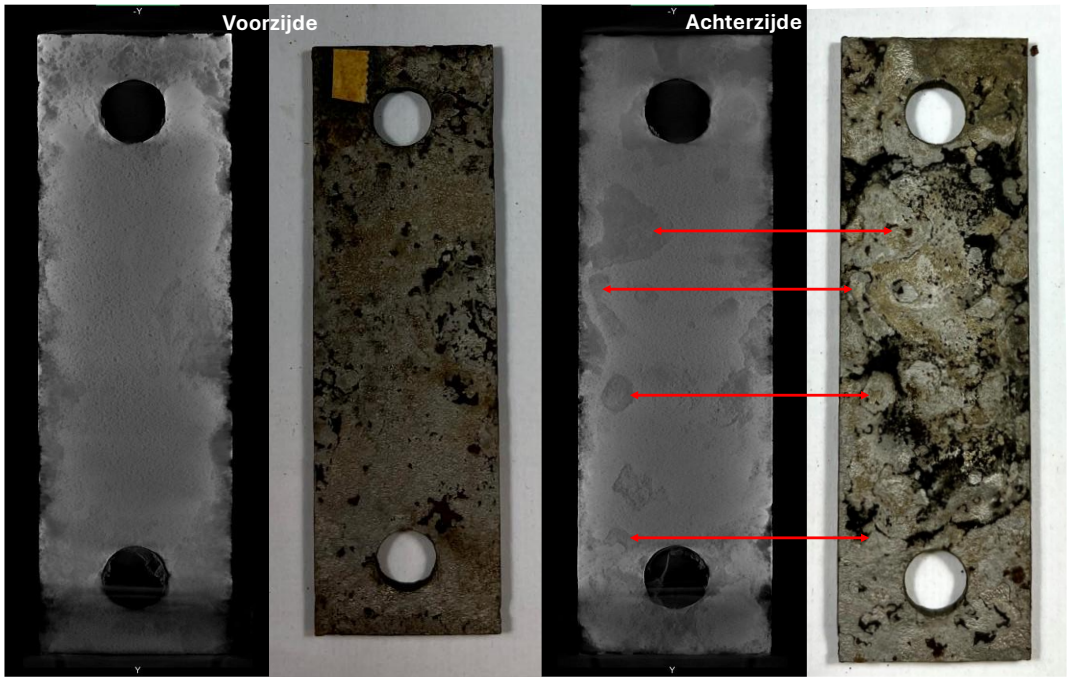
Tijdens het transporteren en bevestigen van deze losgekomen laag op de houten balk zijn er kleine fragmenten afgebroken. Dit bevestigt opnieuw de broze aard van de corrosieproductenlaag na een lange periode van opdrogen.



Figuur 92 Voorzijde STAPLA 2 maanden coupon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk

Op de achterzijde van de coupon werden er voor deze zelfde reden geen aangroeiorganismen aangetroffen, de volledige laag was in verschillende stukken van het oppervlak afgebroken. Hierdoor is het niet mogelijk om een zinvolle vergelijking te maken tussen de XCT-scan en de afbeelding met betrekking tot de aanwezigheid van aangroeiorganismen.



Figuur 93 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk

Op de voorzijde van de coupon toont de scan voornamelijk schade en inkepingen aan de randen van het staaloppervlak. Deze randdegradatie is minder duidelijk zichtbaar op de overeenkomstige afbeelding. Verder is een uniform patroon van putcorrosie zichtbaar, bestaande uit kleine corrosieputjes verspreid over het gehele oppervlak tussen de twee gaten. Dit komt overeen met het gebied waar oorspronkelijk de laag van corrosieproducten en zeepokken aanwezig was.

Op de achterzijde is er een gelijkaardig, uniform putcorrosiepatroon waarneembaar, maar daarnaast worden op de scan ook enkele opvallende diepere beschadigde zones geïdentificeerd. Deze zones zijn op de scan aangeduid met dubbele rode pijlen, die verwijzen naar de overeenkomstige locaties op de afbeelding. Door het ontbreken van de aangroeiorganismen op de achterzijde kan er echter geen verband worden gelegd met biologische activiteit, waardoor de oorzaak van deze diepere corrosiezones niet nader kan verklaard worden.

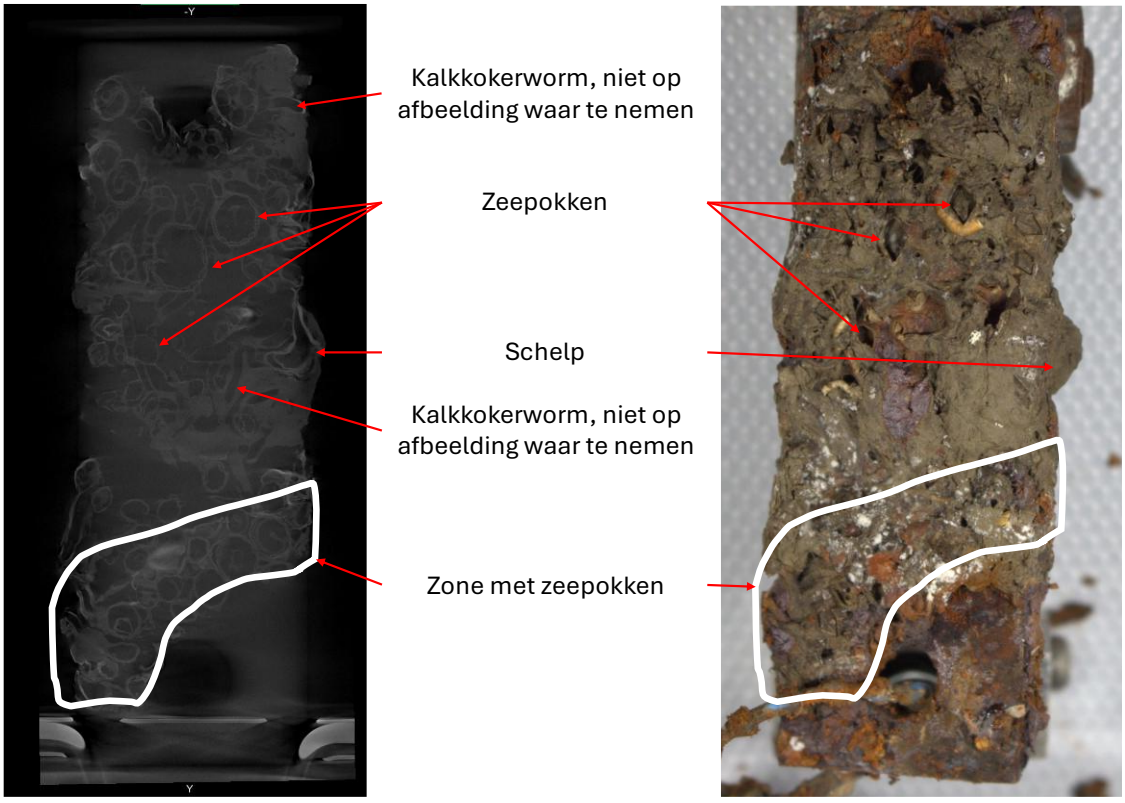
Omwille van deze reden is er voor deze coupon geen samenvattende afbeelding gemaakt.

Het gewichtsverlies van deze coupon is 2,7432 gram, dit is 5,97% van het oorspronkelijke gewicht. De corrosiesnelheid voor deze coupon bedraagt 0.874 millimeter/jaar na twee maanden blootstelling te Oostende.

5.5.6 STAPLA zeven maanden (februari 2025)

Tijdens de visuele analyse viel met name de grote zone aan de onderzijde van de voorzijde op, die sterk gedomineerd werd door zeepokken. Onder deze zeepokken werden nog micro-organismen waargenomen, die echter noch op de XCT-scan, noch met het blote oog zichtbaar waren. Verder microscopisch onderzoek van de zeepokken toonde aan dat deze tekenen van schimmelvorming vertoonden.

De contouren van de drie, op Figuur 94 aangeduide, zeepokken zijn duidelijk herkenbaar op de scan, evenals hun openingen, die zichtbaar zijn op de afbeelding. Daarnaast werden er ook enkele kalkkokerwormen en een schelp aangetroffen. De contour van de schelp is goed zichtbaar op de scan, maar op de afbeelding is deze bedekt door een laag sediment. Hetzelfde geldt voor de aangeduide kalkkokerwormen, die verborgen lagen onder sediment en zandkorrels en daarom visueel slechts beperkt zichtbaar zijn op de afbeelding.



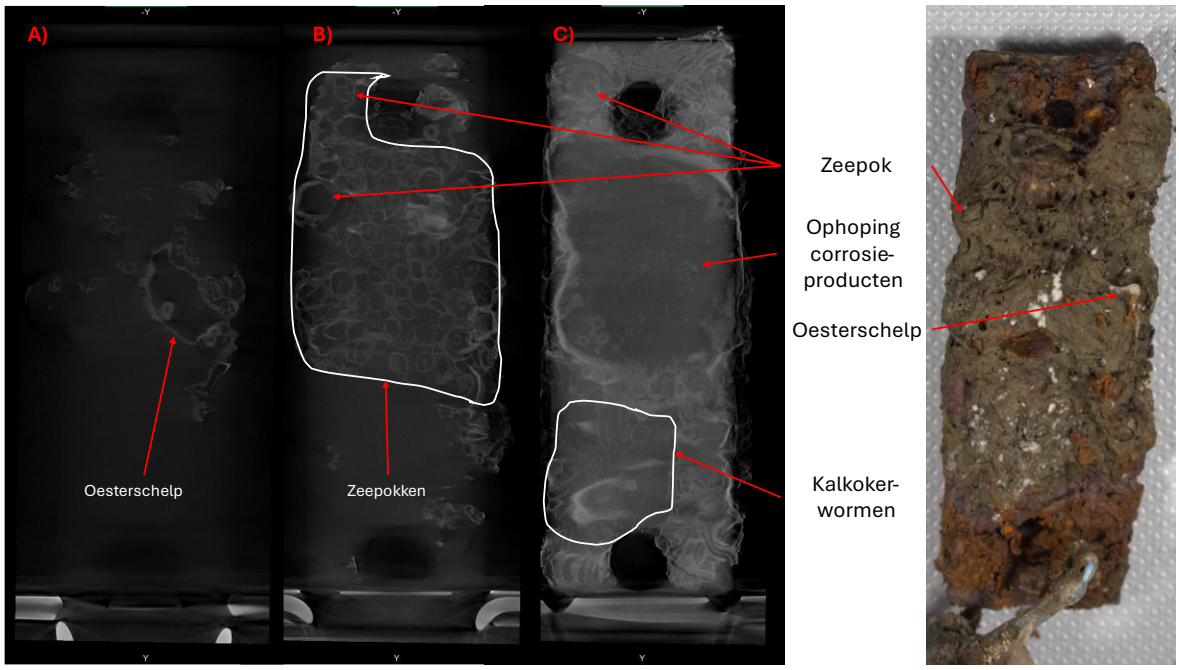
Figuur 94 *Voorzijde STAPLA 7 maanden coupon scan versus afbeelding*

Bron: eigen werk

De vergelijking tussen de scan en de afbeelding van de achterzijde is verdeeld in drie scans op verschillende hoogteniveaus langs de Z-as. Scan A bevindt zich het hoogste boven het staaloppervlak, terwijl scan C zich net boven het staaloppervlak situeert. Deze opdeling is noodzakelijk om de verschillende morfologische kenmerken en aangroeiorganismen op deze coupon adequaat te kunnen visualiseren.

De visuele beoordeling van de achterzijde wordt bemoeilijkt door de aanwezigheid van slib en vuil, waardoor aangroeiorganismen op het staaloppervlak visueel nauwelijks te onderscheiden zijn. Op het hoogste Z-niveau (scan A) is een oesterschelp aanwezig op de achterzijde van de coupon. Deze schelp is slechts gedeeltelijk zichtbaar op de afbeelding, de rand ervan is aangeduid met een rode pijl op Figuur 95. In de scan van het XY vlak is deze structuur beter herkenbaar, maar de transversale scan levert het meest gedetailleerde beeld van de oesterschelp.

De positie van de oester wordt op Figuur 96 gemarkeerd met een rode cirkel. De verhoogde laag die zich boven het staaloppervlak en onder de oester bevindt, is een visualisatie van de corrosieproductenlaag die zich net boven het staaloppervlak bevindt.



Figuur 95 Achterzijde STAPLA 7 maanden coupon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk

Op basis van de visuele gegevens lijkt de oester zich niet rechtstreeks op het staaloppervlak te hebben gehecht, wat onder meer blijkt uit de relatieve hoogte van de schelp ten opzichte

van de coupon. De scan biedt echter het overtuigendste bewijs: de oester bevindt zich bovenop een laag van zeepokken die duidelijk zichtbaar is op scan B.



Figuur 96 *Dorsnede transversale vlak met oesterschelp, aangeduid met rode cirkel, op achterzijde coupon*

Bron: eigen werk

Onder de oesterschelp werden tijdens de visuele analyse sediment, zand, slib, zandkorrels en rode corrosieproducten teruggevonden. Ook op het oppervlak van de schelp waren corrosieproducten aanwezig.

Op een lager Z-niveau wordt een uitgebreide zone waargenomen die volledig wordt gedomineerd door zeepokken (scan B), het is op deze zone dat de oesterschelp zich heeft gehecht. Nog dichter bij het staaloppervlak, op het laagste niveau van de scan (scan C), wordt een uitgestrekte zone met corrosieproducten zichtbaar, die ruimtelijk samenvalt met de eerder genoemde zeepokkendominantie.

Pas op dit laagste niveau worden aangroeiorganismen op de onderzijde van de coupon duidelijk in beeld gebracht via de scan. Deze zone bestaat hoofdzakelijk uit kalkkokerwormen. Een visuele vergelijking met de afbeelding is in dit geval echter opnieuw niet mogelijk vanwege de bedekking met sedimentair materiaal.

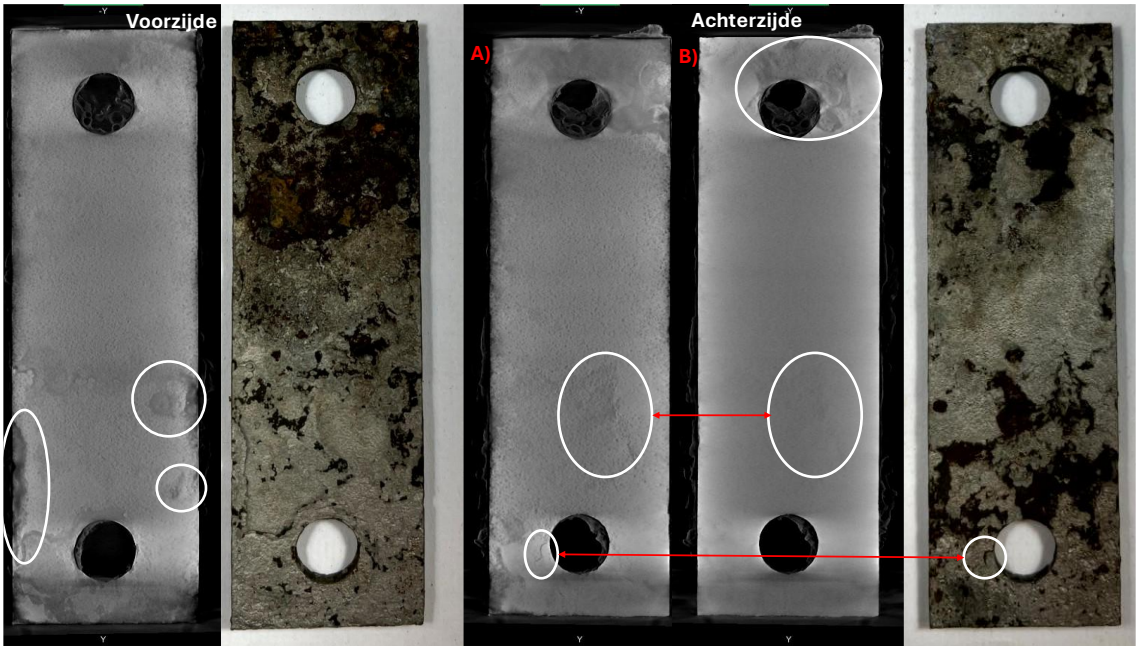
Het hoogteverschil tussen de verschillende scans is als volgt: 1,89 mm tussen scan A en scan B en 1,44 mm tussen scan B en scan C.

Op de voorzijde van de coupon is de relatief zwaardere aantasting voornamelijk geconcentreerd aan de onderzijde, met name langs de linkerzijde. Hier bevindt zich een uitgebreide zone met duidelijke materiaaldegradatie. Daarnaast zijn er twee kleinere, lokaal begrensde zones waar diepere putvorming is waargenomen. Deze drie zones met verhoogde schade-intensiteit zijn gemarkeerd met een witte cirkel op Figuur 97. De rest van het staaloppervlak vertoont een uniform putcorrosiepatroon.

De langgerekte schadezone langs de linkerzijde van de coupon correleert met de grote zone aan de onderzijde van de coupon die wordt gedomineerd door zeepokken. Ook de twee andere gebieden met relatief zwaardere schade bevinden zich binnen ditzelfde biologisch actieve gebied. Onder de grotere zeepokken, die zich aan de bovenzijde bevinden, is geen zwaardere corrosie waarneembaar.

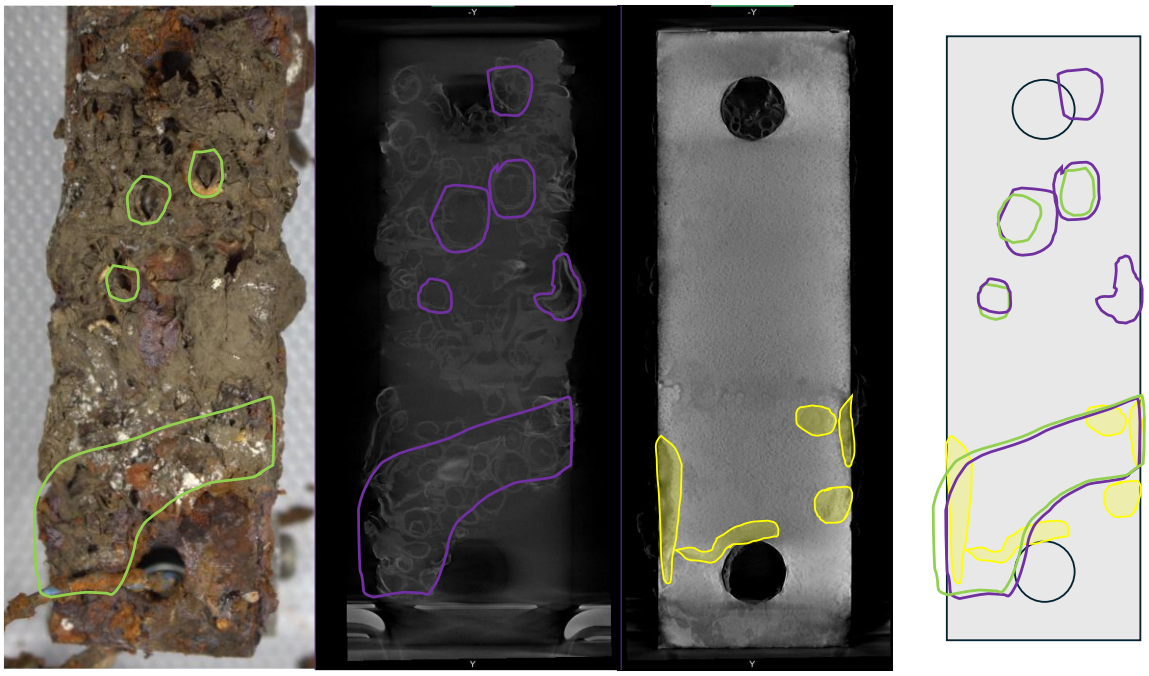
Ter hoogte van de hechtingsplaats van de kleinere oesterschelp aan de rechterzijde van de coupon is geen verhoogde schade of aantasting vastgesteld, in vergelijking met de situatie aan de onderzijde.

De bovenstaande observaties worden visueel ondersteund door Figuur 98.



Figuur 97 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk



Figuur 98 *Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen en corrosieschade voorzijde*

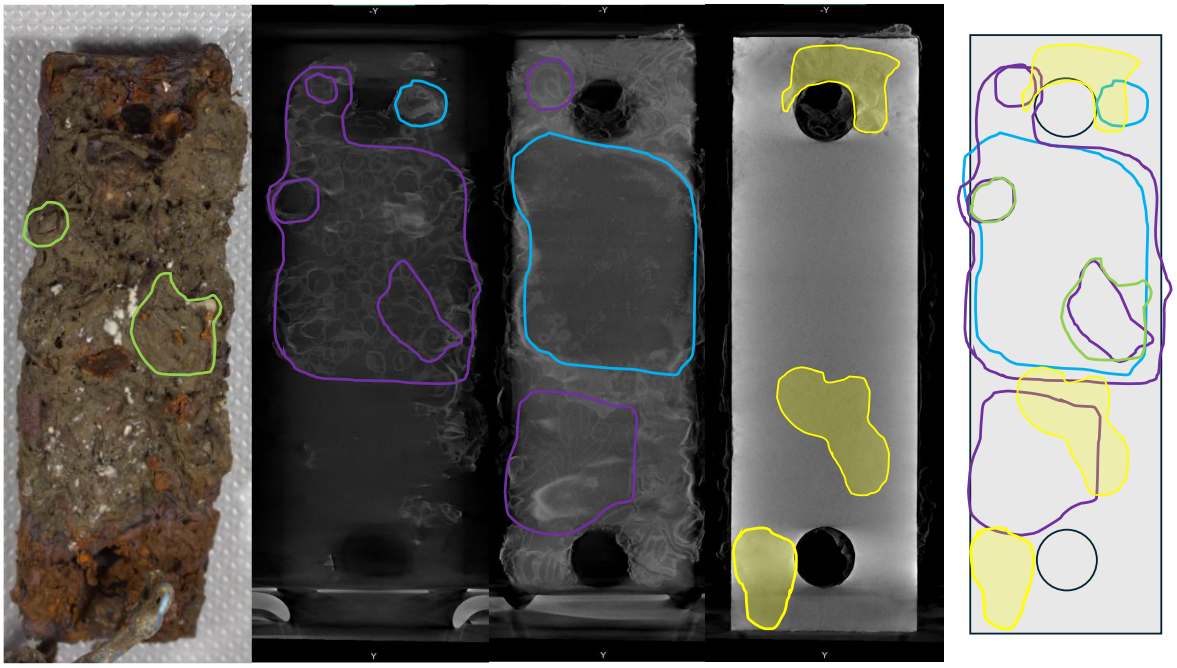
Bron: eigen werk

Voor de karakterisering van de schade aan de achterzijde van de coupon zijn twee scans op verschillende Z-niveaus noodzakelijk. Dit is vereist omwille van de zone aan de bovenzijde van de coupon, die op de hoger gelegen scan onvoldoende zichtbaar is. Het hoogteverschil tussen de twee scanvlakken bedraagt 120 µm. de centraal gelegen zone met relatief zwaardere schade is nog beperkt zichtbaar in scan B en wordt daar aangeduid met een dubbele rode pijl op Figuur 97.

De enige visuele overeenkomst tussen de scan en de afbeelding is de barst nabij de opening aan de onderzijde van de coupon, die in beide weergaven wordt aangeduid met een witte cirkel en is verbonden met een dubbele rode pijl.

De zone aan de bovenzijde, waar de meest uitgesproken schade is vastgesteld en met name de diepe holte naast de opening, correspondeert met een accumulatie van corrosieproducten. Een beperkt gedeelte van dit gebied valt eveneens samen met een zone die gedomineerd wordt door zeepokken. Voor het overige is er echter weinig overlap tussen de gebieden met aangroeiorganismen of corrosieproducten en deze zone met relatief zwaardere aantasting.

De centrale schadezone overlapt deels met het gebied dat gekenmerkt wordt door de aanwezigheid van kalkkokerwormen en deels met een regio waar de zeepokken en de onderliggende laag corrosieproducten dominant zijn. Opmerkelijk is dat er centraal onder deze uitgebreide zone met zeepokken, waar zich ook de oester had gehecht, geen verhoogde schade is waargenomen in vergelijking met andere gebieden op de coupon.



Figuur 99 *Samenvattende vergelijking tussen aangroeiorganismen, corrosieproducten en corrosieschade achterzijde*

Bron: eigen werk

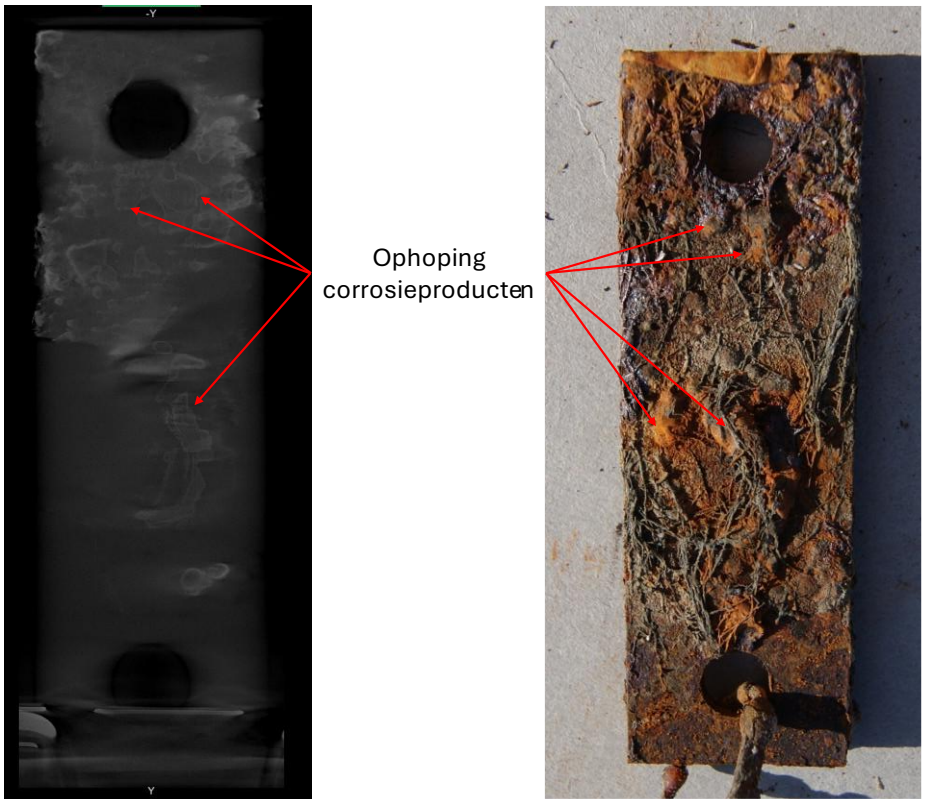
Het gewichtsverlies van deze coupon is 4,1029 gram, dit is 8,93% van het oorspronkelijke gewicht. De corrosiesnelheid voor deze coupon bedraagt 0,428 millimeter/jaar na een blootstelling van zeven maanden te Oostende.

5.5.7 Zelzate twee maanden (september 2024)

Op de voorzijde van de coupon is de enige duidelijke herkenbare overeenkomst tussen de XCT-scan en de visuele afbeelding de centraal gelegen, aangeduid op Figuur 100, ophoping van corrosieproducten. De aanwezigheid van wier op de coupon is, in tegenstelling tot het zeewier op de coupons in Vlissingen, op de scan zeer moeilijk, tot zelfs niet, detecteerbaar.

Tijdens de visuele analyse werd de centrale ophoping van corrosieproducten nader onderzocht. Deze bleek uitsluitend te bestaan uit corrosieproducten. Ook de overige kleine bultjes die zichtbaar zijn op de afbeelding bleken, net als de centrale ophoping, louter uit corrosieproducten te bestaan.

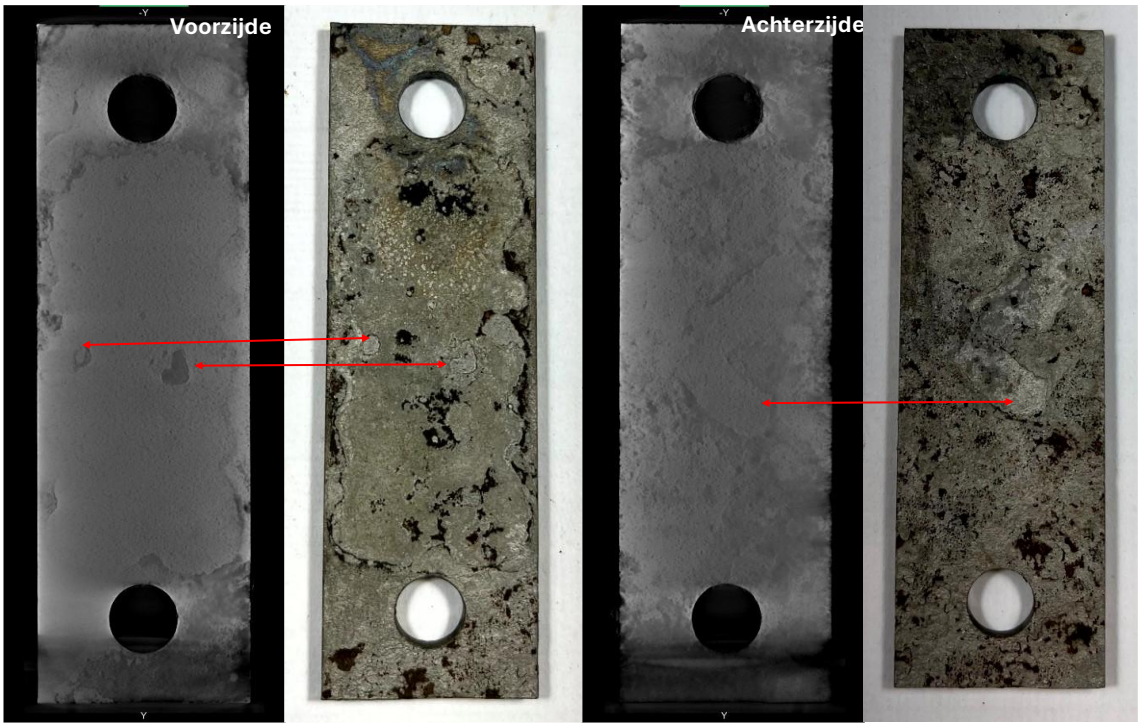
Evenals bij de visuele documentatie van de opvolging in Zelzate na verschillende maanden, kan er in dit geval slechts beperkt informatie worden verkregen over aangroeiorganismen en corrosieproducten, aangezien deze afwezig of niet waarneembaar zijn.



Figuur 100 Voorzijde Zelzate 2 maanden coupon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk

Op de achterzijde van de coupon werden geen significante ophopingen van corrosieproducten waargenomen. De XCT-scan vertoonde slechts beperkte overeenkomsten met de afbeelding en leverde geen aanvullende inzichten met betrekking tot aangroei op het couponoppervlak.



Figuur 101 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk

Op de voorzijde van de coupon vallen met name twee diepere putten op, centraal gelegen en aangeduid met een dubbele rode pijl. Deze vertonen duidelijk diepere schade in vergelijking met de rest van het oppervlak.

Op de achterzijde van de coupon zijn er, in tegenstelling tot de voorzijde, geen uitgesproken holtes vastgesteld. Enkel de structuur die is aangeduid met de dubbele rode pijl is in beperkte mate herkenbaar op de afbeelding. Door de afwezigheid van aangroeiorganismen en ophopingen van corrosieproducten is er op deze zijde geen duidelijke correlatie tussen de vastgestelde schade en de overliggende laag op het staaloppervlak.

Op de voorzijde komt de rechter put, tevens de grootste van de twee, overeen met de ophoping van corrosieproducten zoals aangeduid op Figuur 100. De kleinere holte correspondeert met de kleine ophoping van corrosieproducten. Dit wordt verduidelijkt in Figuur 101, waarop zichtbaar is dat de kleinere ophoping van corrosieproducten op de

afbeelding overeenkomt met de positie van de kleinere holte op de scan. De grotere holte stemt eveneens overeen met de centrale, omvangrijke ophoping van corrosieproducten. Zowel de contouren van deze ophoping op de afbeelding als die op de scan komen grotendeels overeen en positioneren zich duidelijk boven een groot deel van de diepere schadezone.

De beperkte ophopingen van corrosieproducten aan de bovenzijde, zoals aangeduid op zowel de afbeelding als scan, vertonen een gedeeltelijke, zij het minder uitgesproken, overeenkomst met de omvangrijke gele zone die wijst op relatief zwaardere schade in vergelijking met de rest van het staaloppervlak. In zones met relatief ernstigere corrosieschade is het aannemelijk dat een grotere accumulatie van corrosieproducten wordt aangetroffen.



Figuur 102 *Samenvattende vergelijking tussen corrosieproducten en onderliggende corrosieschade op voorzijde*

Bron: eigen werk

Tot slot bedraagt het gewichtsverlies van deze coupon 1,8558 gram, dit is 4,06% van het oorspronkelijke gewicht. De corrosiesnelheid van deze coupon bedraagt 0,591millimeter/jaar na twee maanden blootstelling te Zelzate.

5.5.8 Zelzate zeven maanden (februari 2025)

Op de voorzijde van deze coupon verhindert de dominante aanwezigheid van wieren een directe correlatie tussen de waarnemingen op de scan en de zichtbare structuren op de afbeelding. Bovendien belemmert het wier het dieptezicht, wat de interpretatie van de oppervlakte structuren verder bemoeilijkt.

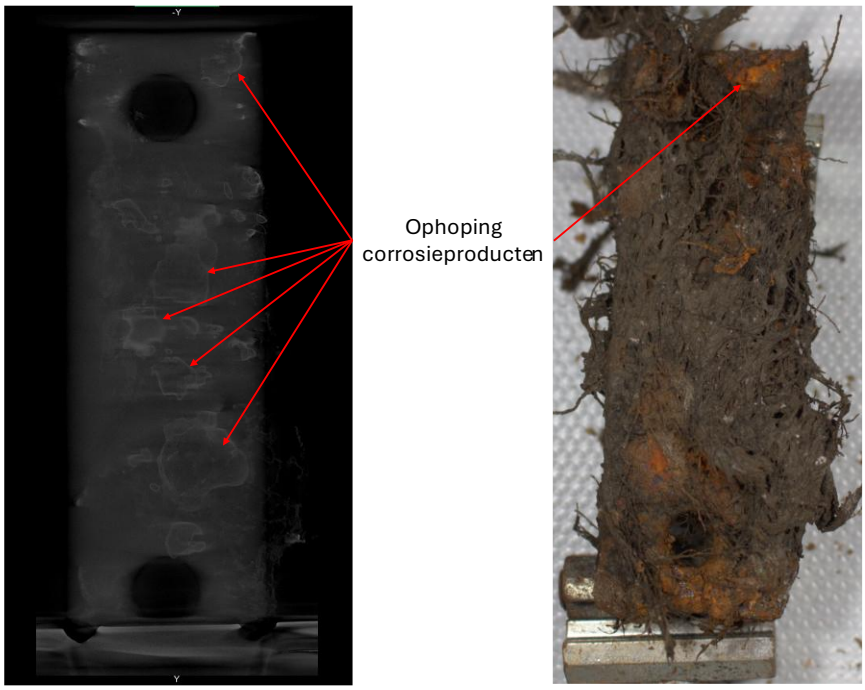
Tijdens de visuele analyse werd bevestigd dat de centrale, verhoogde zone zoals aangeduid op Figuur 103, volledig bestaat uit corrosieproducten.



Figuur 103 Voorzijde Zelzate 7 maanden coupon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk

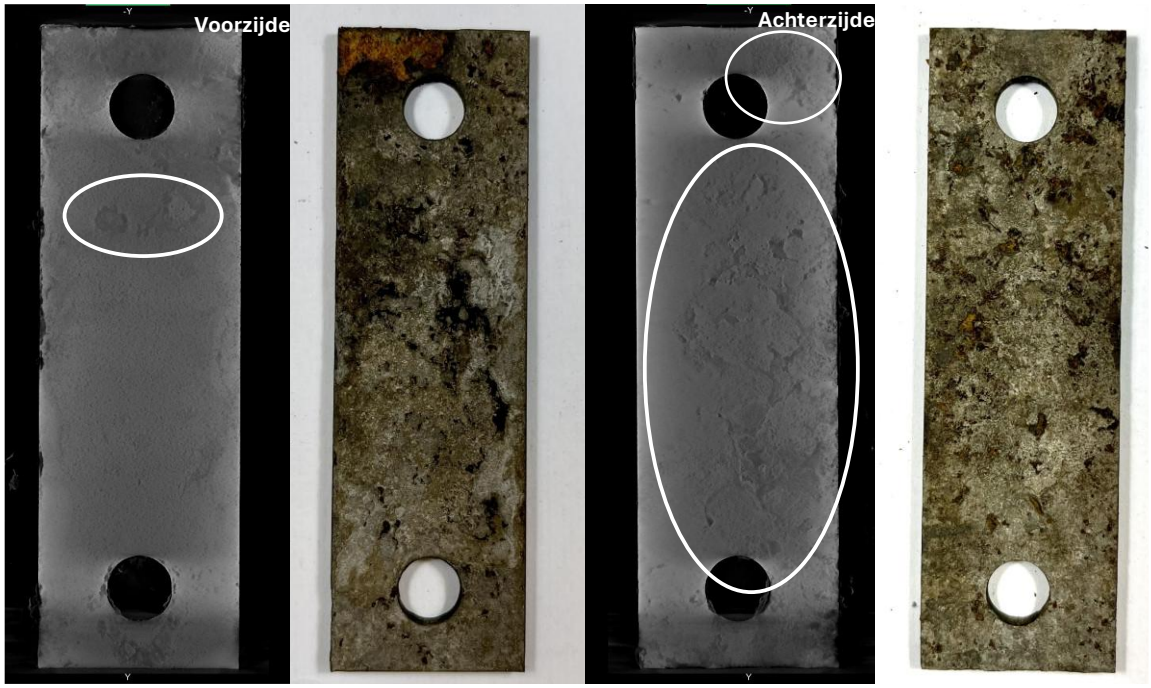
Op de achterzijde werd een gelijkaardig fenomeen waargenomen. Het gebied tussen de twee openingen van de coupon was grotendeels bedekt met ophopingen van corrosieproducten. Ook in dit geval bemoeilijkt de aanwezigheid van het wier het correleren van de op de scan waargenomen structuren met de visueel waarneembare structuren op de afbeelding. Enkel de ophoping van corrosieproducten aan de bovenzijde is in beperkte mate herkenbaar op zowel de scan als de afbeelding.



Figuur 104 Achterzijde Zelzate 7 maanden coupon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk

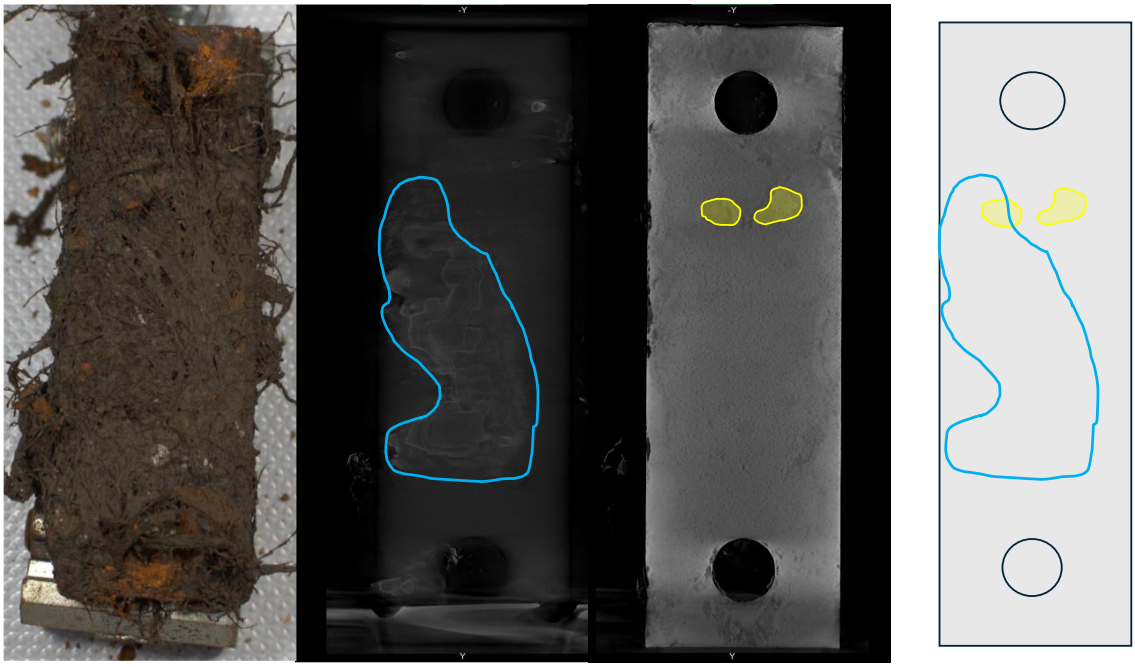
De corrosieschade op de voorzijde was een uniform putcorrosiepatroon, met uitzondering van twee relatief diepere putten, aangeduid met een witte crikel op Figuur 105.



Figuur 105 Corrosieschade patroon scan versus afbeelding

Bron: eigen werk

De linker put valt grotendeels samen met de zone waar een ophoping van corrosieproducten werden waargenomen, terwijl de rechter put zich net buiten deze zone bevindt. Dit is weergegeven op Figuur 106.

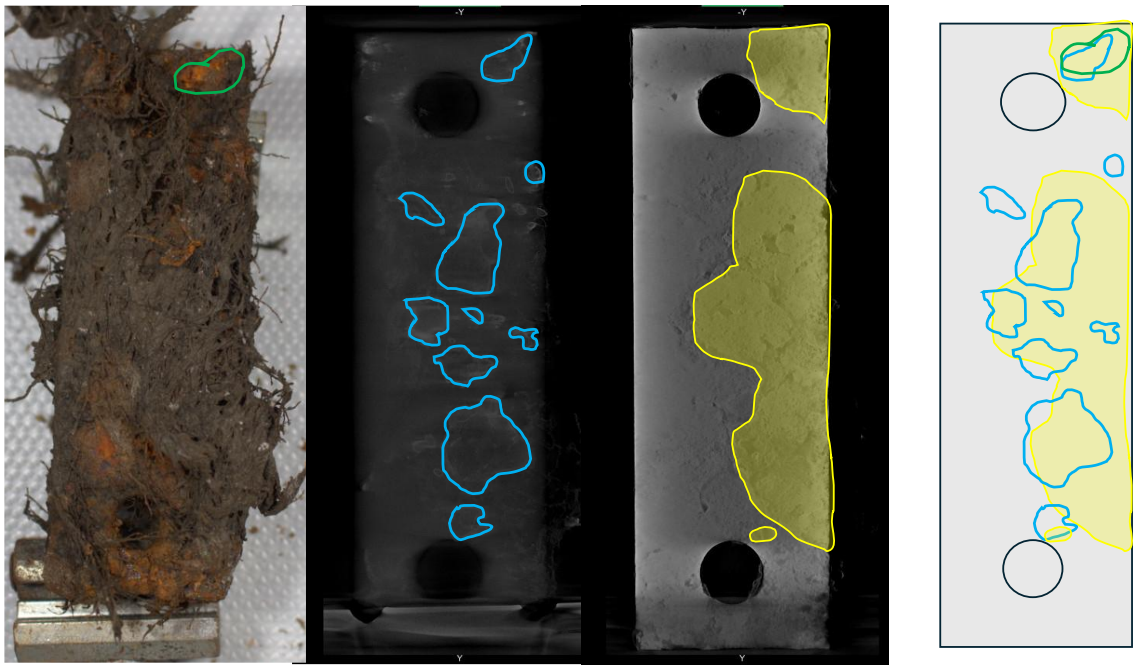


Figuur 106 Samenvattende vergelijking tussen corrosieproducten en corrosieschade voorzijde

Bron: eigen werk

Op de achterzijde van de coupon is het rechter gebied tussen de twee openingen duidelijk sterker aangetast dan de rest van het staaloppervlak. Deze zone is aangeduid met de witte cirkel op Figuur 105. Een tweede zone met relatief ernstige aantasting bevindt zich in de rechterbovenhoek van de coupon en is eveneens gemarkeerd met een witte cirkel.

Beide zones van verhoogde corrosieschade komen overeen met de ophopingen van corrosieproducten die op de scan werden waargenomen. Deze talrijke ophopingen bevinden zich vrijwel volledig binnen, of net aan de rand van, de zwaarder aangetaste gebieden. Deze correlatie wordt weergegeven op Figuur 107.



Figuur 107 Samenvattende vergelijking tussen corrosieproducten en corrosieschade achterzijde

Bron: eigen werk

Het gewichtsverlies van deze coupon is 2,4706 gram, dit is 5,43% van het oorspronkelijke gewicht. De corrosiesnelheid voor deze coupon bedraagt 0,258 millimeter/jaar na een blootstelling van zeven maanden te Zelzate.

5.5.9 Resultatentabel

Tabel 4 Overzicht corrosiesnelheid per onderzochte coupon

Bron: eigen werk

Blootstellingsplaats	Gewichtsverlies (gram)	Verlies oorspronkelijk gewicht (%)	Corrosiesnelheid (mm/jaar)
Vlissingen twee maanden (09.2024)	3,2603	7,06	1,038
Vlissingen zeven maanden (02.2025)	5,5589	12,04	0,580
DYPLA twee maanden (09.2024)	3,3167	7,23	1,056
DYPLA zeven maanden (02.2025)	3,5753	7,94	0,373
STAPLA twee maanden (09.2024)	2,7432	5,97	0,874
STAPLA zeven maanden (02.2025)	4,1029	8,93	0,428
Zelzate twee maanden (09.2024)	1,8558	4,06	0,591
Zelzate zeven maanden (02.2025)	2,4706	5,43	0,258

Uit de tabel blijkt duidelijk dat de corrosiesnelheid van alle onderzochte coupons hoger is na twee maanden blootstelling dan na zeven maanden. Deze afname in corrosiesnelheid over tijd kan worden verklaard door de initiële blootstelling van een onbehandeld staaloppervlak, dat in direct contact staat met het agressieve (zee)watermilieu en daardoor gevoeliger is voor aantasting. Naarmate de blootstelling voortduurt, vormt zich op het oppervlak een laag van corrosieproducten in combinatie met aangroeiorganismen. Deze laag fungeert als een fysieke barrière die de toegang van zuurstof, water en chloride-ionen tot het staaloppervlak beperkt, waardoor de corrosiesnelheid afneemt.

Het gewichtsverlies en dus ook de corrosiesnelheid bij de coupon van Vlissingen ligt na zeven maanden onderdompeling het hoogste van alle coupons. Dit was te verwachten door

het zoutwater milieu waarin de coupon zich bevond tegenover het brak- en zoetwater milieu van Oostende en Zelzate.

Tussen de coupons met blootstellingstijden van twee en zeven maanden wordt een duidelijk verschil in gewichtsverlies vastgesteld, met uitzondering van de coupons afkomstig van het DYPLA-rek. Voor deze laatste is het verschil tussen beide coupons beperkt tot circa ±0,2 gram. Opmerkelijk is dat beide DYPLA-coupons meer dan een halve gram afwijken van de overeenkomstige coupons op het STAPLA-rek, ondanks de beperkte afstand tussen beide rekken, circa 100 meter.

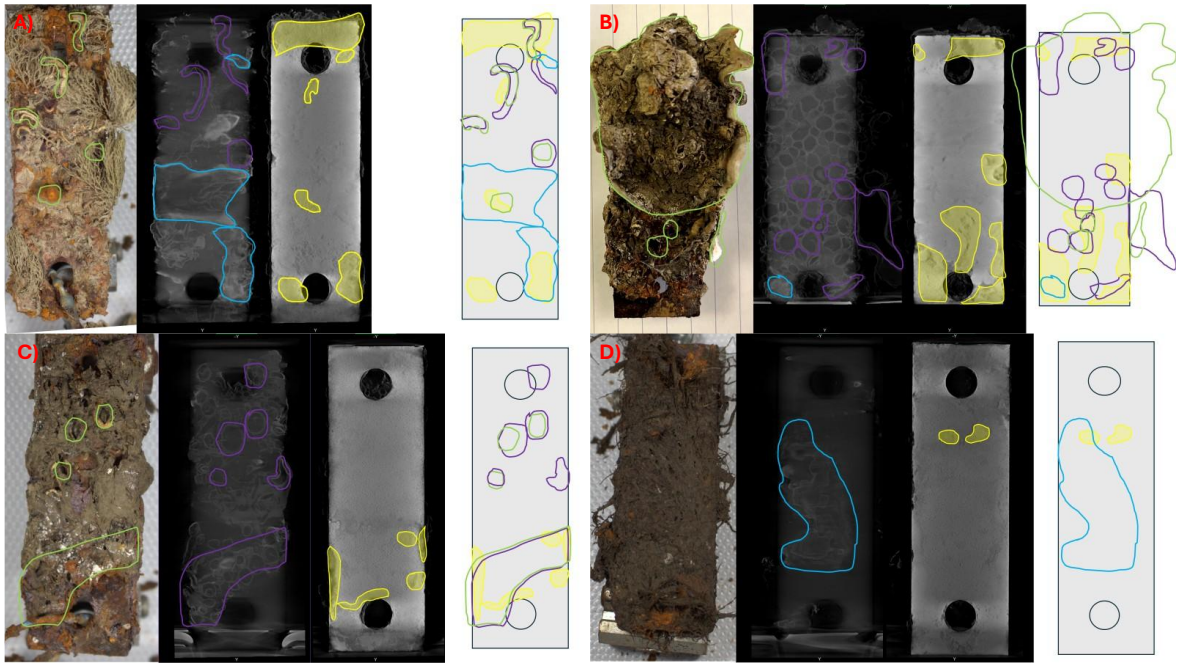
Aangezien in dit onderzoek slechts één coupon per blootstellingstijd en -locatie werd geanalyseerd, is het niet mogelijk om met zekerheid de oorzaak van deze afwijking te achterhalen. Wel werd ook tijdens de maandelijkse visuele opvolging opgemerkt dat de coupons van het DYPLA-rek systematisch een zwaardere aangroei van organismen vertoonden dan die van het STAPLA-rek. Deze observatie zou het geringere gewichtsverlies na zeven maanden kunnen verklaren, aangezien een dichtere laag van aangroeiorganismen en corrosieproducten een beschermend effect kan uitoefenen op het onderliggende materiaal. Voor de waargenomen verschillen na twee maanden is echter geen evidente verklaring voorhanden.

Gelet op de beperkte steekproefomvang kan niet met zekerheid worden vastgesteld of de afwijkingen te wijten zijn aan de DYPLA- of aan de STAPLA-coupons, noch of één van beide significante afwijkt van een eventuele normwaarde voor het rek in kwestie.

Het is opmerkelijk dat het gewichtsverlies en bijgevolge de corrosiesnelheid van de coupons in Zelzate het laagst zijn van alle onderzochte blootstellingslocaties. Deze bevinding staat in contrast met de waarnemingen uit de zomer van 2021, toen in de jachthaven van Zelzate een uitbraak van ijzervretende bacteriën werd vastgesteld. Deze bacteriën bleken het corrosieproces onder water tot wel dertig keer te versnellen ten opzichte van de normale snelheid (Vereecke, 2021). De huidige resultaten kunnen erop wijzen dat de omgevingscondities in de jachthaven van Zelzate sindsdien zijn veranderd en mogelijk niet langer gunstig zijn voor de ontwikkeling van deze bacteriën.

5.6 Vergelijking blootstellingslocaties

Voor deze vergelijking worden enkel de resultaten voor zeven maanden blootstelling gebruikt aangezien het niet mogelijk was om voor alle zijdes van de coupons bij twee maanden blootstelling een resultante coupon te maken en de link te leggen tussen schade en aangroeiorganismen.



Figuur 108 *Vergelijking vier coupons zeven maanden blootstelling voorzijde met A) Vlissingen, B) DYPLA, C) STAPLA en D) Zelzate*

Bron: eigen werk

Op de verschillende voorzijden is voornamelijk te zien dat voor alle coupons waar zich aangroeiorganismen op het oppervlak bevonden, de relatief zwaardere schade zich aan de randen of aan de openingen in de coupon bevindt. Voor de voorzijde van de coupon in Zelzate is de relatief zwaardere schade centraal op de coupon, zonder dat deze enige link heeft met zwaardere schade die al reeds aan de randen was begonnen en zich centraler had uitgebreid.

Dit is te linken aan de aanwezigheid en bezettingsgraad van de aangroeiorganismen op het staaloppervlak. Op de coupon van Zelzate werden er geen aangroeiorganismen teruggevonden. De aanwezigheid van deze organismen zorgt voor een barrière op de coupon, waardoor de meer centraal gelegen zones moeilijker bereikt kunnen worden door

het corrosieve milieu. Hierdoor worden de randen ook als eerste aangetast, aangezien er zich hier meestal geen aangroeiorganismen op bevinden.

Opmerkelijk is dat, van de drie geanalyseerde voorzijdes van de coupons afkomstig van de DYPLA-, STAPLA- en Vlissingen-locaties, uitsluitend de voorzijde van de in Vlissingen blootgestelde coupon een centrale zone met relatief ernstigere materiaalschade vertoont. Deze schade bevindt zich direct onder de locatie waar tijdens de blootstelling een accumulatie van corrosieproducten werd vastgesteld.

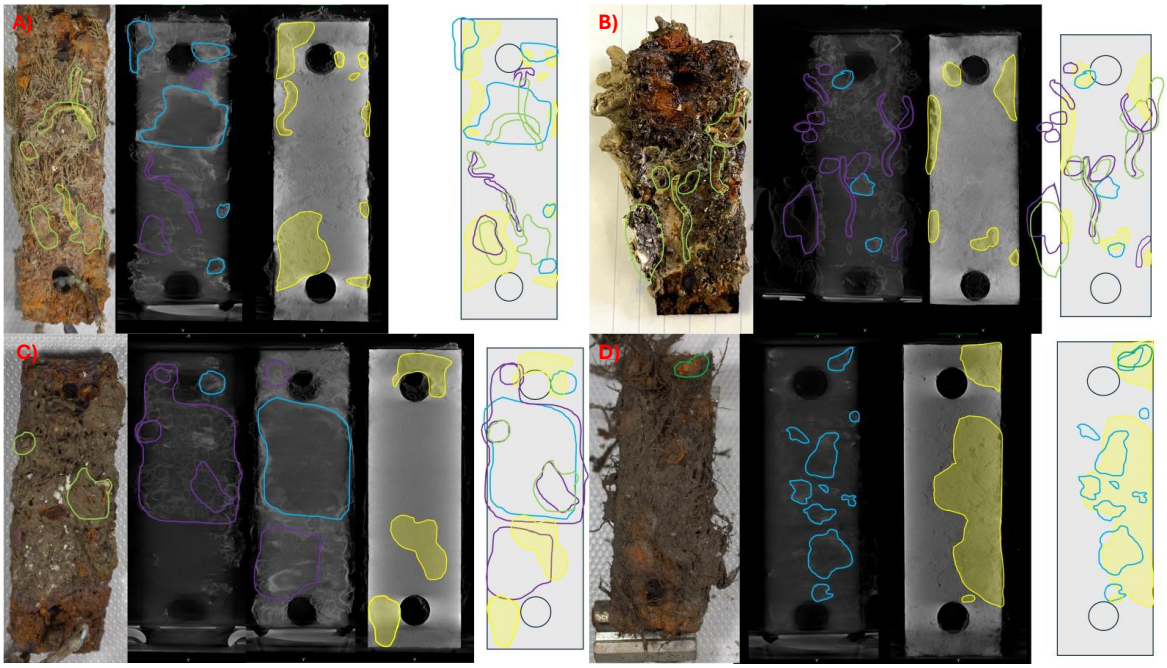
Op de voorzijde van de DYPLA-coupon valt de uitzonderlijk dichte structuur van de aangroeiorganismen op. De organismen vertonen een zeer hechte onderlinge aanhechting, zonder waarneembare open ruimtes tussen de individuen. Een dergelijke compacte kolonisatie werd niet vastgesteld op andere coupons, noch op de achterzijde van dezelfde coupon. Deze hechte, nagenoeg ondoorlatende biologische bedekking kan een verklaring bieden voor het relatief geringe gewichtsverlies van deze coupon. Door de dichte structuur fungeert de aangroei mogelijk als een effectieve barrière tegen materiaaldegradatie.

De waargenomen dichte structuur van de zeepokkenkolonie kan mogelijk verklaard worden door de aanwezigheid van de oesterschelp boven deze laag. Enerzijds fungeert de oester als een bijkomende fysieke barrière, die de onderliggende zeepokken beschermt tegen externe invloeden zoals sedimentatie, hydrodynamische belasting (bijvoorbeeld stroming) en kolonisatie door andere aangroeiorganismen. Anderzijds kan de oesterschelp de verticale groeiruimte van de zeepokken beperken, waardoor deze gedwongen worden zich voornamelijk lateraal te ontwikkelen, wat mogelijk heeft bijgedragen aan de compacte structuur.

Bovendien bestaat de aangroei op deze zijde hoofdzakelijk uit een uniforme laag zeepokken. Een dergelijk hoog niveau van uniformiteit in soortsamenstelling werd op geen van de andere geanalyseerde coupons na zeven maanden blootstelling waargenomen.

De meeste corrosieproducten op de voorzijden worden waargenomen op de exemplaren afkomstig uit Zelzate en Vlissingen. De coupon uit Vlissingen vertoont de meest uitgesproken ophoping van corrosieproducten, waarbij de grootste concentratie zich bevindt onder de lokale accumulatie van corrosieproducten. In contrast hiermee worden op de voorzijden van de coupons van zowel het STAPLA- als het DYPLA-rek slechts minimale

hoeveelheden corrosieproducten vastgesteld. Op deze coupons zijn de aangroeiorganismen rechtsreeks op het staaloppervlak gehecht, zonder tussenliggende corrosie laag.



Figuur 109 Vergelijking vier coupon zeven maanden blootstelling achterzijde met A) Vlissingen, B) DYPLA, C) STAPLA en D) Zelzate

Bron: eigen werk

Een gelijkaardig patroon wordt waargenomen op de achterzijden van de coupons. Ook hier wordt uitsluitend bij de coupon van Zelzate relatief zwaardere schade waargenomen in het centrale gedeelte van de coupon. Op de drie andere achterzijden van de coupons is de zwaardere schade gelinkt met de randen of een opening in de coupon.

Op de achterzijde van de DYPLA-coupon wordt vastgesteld dat de aanwezige zeepokken niet dicht op elkaar gehecht zijn, in tegenstelling tot op de voorzijde. Deze observatie suggereert ook dat de aanwezigheid van de oesterschelp op de voorzijde mogelijk een invloed heeft uitgeoefend op de hechtingsstructuur en de ruimtelijke organisatie van de aangroei.

Op de achterzijde van de STAPLA-coupon wordt, in tegenstelling tot de voorzijde, een aanzienlijke ophoping van corrosieproducten waargenomen. Onder dit uitgebreid gebied wordt er echter geen relatief zwaardere corrosieschade vastgesteld. Deze observatie wijst

erop dat de aanwezigheid van een accumulatie van corrosieproducten niet noodzakelijk gepaard gaat met onderliggende ernstige materiaaldegradatie.

De twee coupons afkomstig uit Oostende vertonen een aangroei die voornamelijk wordt gedomineerd door zeepokken, terwijl op de coupon van Vlissingen slechts één individueel exemplaar werd aangetroffen, namelijk op de voorzijde. Daarnaast worden op de coupons uit Oostende meerdere schelpstructuren waargenomen, waarvan de meest opvallende een oesterschelp op de DYPLA-coupon betreft. Ook kleinere schelpfragmenten zijn aanwezig. Dergelijke structuren worden niet teruggevonden op de coupons uit Vlissingen en Zelzate.

De grootste hoeveelheid en meest uitgesproken aanwezigheid van kalkkokerwormen werd vastgesteld op de coupon uit Vlissingen. Hoewel ook op de DYPLA- en STAPLA-coupons enkele individuen van kalkkokerwormen worden aangetroffen, is hun voorkomen minder uitgesproken dan op de coupon uit Vlissingen. Dit verschil geldt voor zowel de voor- als achterzijde van de coupons.

Op de coupon afkomstig uit Vlissingen, die werd blootgesteld aan zeewater, worden fragmenten van zeewier aangetroffen die zich op het oppervlak hadden gehecht. Ook op de coupon uit Zelzate, waar de blootstelling plaatsvond in zoet water, worden sporen van wierwaarneming vastgesteld. Opmerkelijk is dat op geen van de coupons uit Oostende, blootgesteld aan brak water, enige aanwezigheid van wier of gelijkaardige structuren wordt vastgesteld.

6 Algemene discussie

Aangezien deze analysetechniek voor het eerst werd toegepast in een onderzoek aan de Antwerp Maritime Academy, is een kritische bespreking van de methode gerechtvaardigd. Bovendien is er in de wetenschappelijke literatuur nauwelijks documentatie beschikbaar over het gebruik van deze techniek voor het detecteren van corrosie en aangroeiorganismen.

De inzet van X-ray Computertomografie (XCT) vormt een efficiënte en niet-destructieve analysemethode voor het in kaart brengen van zowel de aangroeiorganismen als de corrosieschade op het staaloppervlak. Met een resolutie van 35 µm kunnen binnen enkele minuten tweedimensionale beelden worden verkregen, die vervolgens binnen een half uur worden omgezet in een driedimensionale reconstructie. Deze benadering maakt het in dit onderzoek mogelijk om een globaal overzicht te verkrijgen van de verspreiding en morfologie van de aangroeiorganismen, hun lokalisatie op het staaloppervlak, alsook het algemene schadepatroon van de coupon, zonder dat de biologische aangroei eerst verwijderd hoefde te worden. Hierdoor blijft de coupon beschikbaar voor eventuele verdere analyse of zelfs verdere blootstelling.

Een bijkomend voordeel van deze techniek is dat op basis van de scan gericht gezocht kan worden naar zones van interesse, waardoor visuele inspecties en analyses efficiënter kunnen verlopen. In het kader van dit thesisonderzoek is deze aanpak echter niet toegepast, hoewel dit mogelijk tot een gerichtere en nauwkeurigere analyse van de aangroeiorganismen en corrosieproducten boven de relevante gebieden had kunnen leiden.

Tevens fungeert de scan als een permanente digitale geschiedenis, wat waardevol is wanneer men retroperspectief de aanwezigheid of positie van specifieke aangroeistructuren wenst te verifiëren.

De relatie tussen de visueel waarneembare aangroeiorganismen en hun overeenkomstige contouren op de scandoorsnedes is duidelijk vast te stellen. Eens de verschillende contouren gekoppeld zijn aan de bijhorende aangroeiorganismen-typen, kunnen deze zonder moeite herkend worden op de scanbeelden. Met name de structuren van

zeepokken, oesterschelpen, kalkkokerwormen en andere schelpstructuren zijn telkens goed afgelijnd en scherp zichtbaar.

Daarentegen zijn zachte organismen, die slechts éénmaal werden aangetroffen op de Vlissingen coupon na zeven maanden blootstelling, nauwelijks waarneembaar op de scan. Dit wijst erop dat de zichtbaarheid van aangroeiorganismen op scandoorsnedes sterk samenhangt met de hardheid en de materiaaldichtheid van hun externe structuren: hoe steviger het opbouwmateriaal van het organisme, des te beter het zichtbaar is op de scan.

Dit is te verklaren door het werkingsprincipe van XCT-scanning, waarbij röntgenstraling in grotere mate wordt geabsorbeerd door materialen met een hogere massadichtheid. Structuren zoals zeepokken, kalkkokerwormen en schelpen bestaan uit kalkhoudende of minerale componenten met een relatief hoge dichtheid, in tegenstelling tot zachte organismen. Als gevolg hiervan absorberen deze harde structuren meer straling, waardoor ze helderder worden weergegeven op de scanbeelden en gemakkelijker te onderscheiden zijn van hun omgeving.

Een beperking van het gebruik van een resolutie van 35 µm is de lagere nauwkeurigheid in de bepaling van schade diepte, in vergelijking met scans op 10 µm. Hogere resoluties resulteren in een kleinere afstand tussen opeenvolgende beelddoorsneden, wat leidt tot een kleinere foutmarge in de schadebepaling. Deze hogere resolutie vereist echter aanzienlijke reconstructietijden, langere scantijden en genereert grotere datasets, waarvoor vaak gespecialiseerde hardware met meer dan 32 GB RAM nodig is.

Voor de doeleinden van deze vergelijkende studie bleek de resolutie van 35 µm evenwel toereikend om gedetailleerde informatie te verkrijgen over zowel de aangroeiorganismen als de corrosieschade. Bovendien was het bij deze resolutie mogelijk om de volledige coupon in beeld te brengen, wat bij een resolutie van 10 µm niet haalbaar was in één enkele scan. Hierdoor werd de reconstructie van een representatieve, volledige coupon vergemakkelijkt.

Dit illustreert een bijkomend nadeel van de gebruikte XCT-scanner: naarmate het te scannen object groter is, moet de resolutie worden verlaagd, of dient men meerdere samengestelde scans uit te voeren. Deze laatste optie leidt tot een aanzienlijke toename in scantijd en reconstructiedata.

De keuze om coupons na twee maanden blootstelling te vergelijken met die na zeven maanden blootstelling is in de praktijk verdedigbaar. In dit onderzoek bleken de resultaten voor de twee maanden echter beperkt bruikbaar, doordat de coupons een lange opdroogperiode hadden ondergaan. Hierdoor trad er oppervlaktedesintegratie op en was de bovenliggende laag van corrosieproducten en aangroeiorganismen grotendeels verdwenen. Dit was het geval voor de coupons op het rek in Vlissingen en STAPLA-rek. De coupon op DYPLA-rek had hier minder last van ondervonden. Hierdoor droegen deze coupons minder bij aan het onderzoeksdoel. De XCT-scans van deze coupons konden enkel gebruikt worden voor het schadepatroon en niet voor de visuele vergelijking van aangroeiorganismen of de link tussen de aangroeiorganismen en de onderliggende schade. Om deze reden werden enkel de resultaten van zeven maanden besproken in de vergelijking.

Het fenomeen spleetcorrosie, een specifieke vorm van lokale corrosie die werd besproken in de literatuurstudie van deze thesis, werd niet waargenomen op de onderzochte coupons. Hoewel in diverse veldstudies melding wordt gemaakt van aangroeiorganismen die boven spleetcorrosie worden gevonden en veroorzaken, kon dit dergelijk effect in dit onderzoek niet worden vastgesteld. Daarentegen werd een andere vorm van lokale corrosie wel geobserveerd, namelijk putcorrosie. Deze bevinding suggereert dat spleetcorrosie in de aanwezigheid van aangroeiorganismen een zeldzaam verschijnsel is, dat enkel optreedt wanneer de door deze organismen gevormde omgevingen aan zeer specifieke voorwaarden voldoen.

Bij de analyse van de verschillende resulterende coupons, zoals besproken in hoofdstuk 5.5, werd bijzondere aandacht besteed aan de zones met relatief ernstige schade en de aangroeiorganismen en corrosieproducten die in deze gebieden werden aangetroffen. Het is een valide opmerking dat niet elk aangroeiorganisme op deze coupons werd aangeduid, waardoor de data niet in haar geheel werd geïnterpreteerd. Dit vormt een beperking wanneer men tracht uitspraken te doen over de relatie tussen specifieke aangroeiorganismen en de mate van corrosie onder deze organismen. Dergelijke analyses vereisen een meer gedetailleerde benadering waarin deze zones niet mogen worden genegeerd. Men moet onthouden dat als er onder een bepaald aangroeiorganisme geen zwaardere schade wordt gevonden, dit ook meetelt als data.

Niettemin ligt de voornaamste doelstelling van deze thesis in het verkennen van de toepasbaarheid van de XCT-scanner: wat met deze techniek waarneembaar is in de 3D-reconstructie en in welke mate deze data betrouwbaar zijn. Indien men in toekomstig onderzoek de invloed van individuele aangroeiorganismen op corrosieschade wil analyseren, is een hogere resolutie dan de gebruikte 35 µm in dit onderzoek aangewezen. Op deze resolutie is de foutenmarge te groot om met voldoende nauwkeurigheid de diepte en de ernst van deze schade vast te stellen.

Tot slot is belangrijk om te benadrukken dat de bekomen resultaten met betrekking tot het gewichtsverlies en de bijhorende corrosiesnelheid slechts een indicatieve waarde hebben voor de specifieke locatie en blootstellingsduur. Door het ontbreken van meerdere steekproeven is het niet mogelijk om te verifiëren of deze resultaten representatief zijn voor de norm, dan wel uitzonderingen vormen. Aangezien er per blootstellingslocatie en -periode slechts één coupon werd geanalyseerd, ontbreekt de noodzakelijke basis voor een statistische vergelijking of validatie van de verkregen waarden als normatieve of afwijkende meetresultaten.

Besluit

Uit de literatuurstudie blijkt dat spleetcorrosie een zeer moeilijk te detecteren vorm van corrosie is, met een complex mechanisme. De incubatieperiode is moeilijk te voorspellen, eenmaal deze voorbij is kan spleetcorrosie echter een zeer snel proces zijn. Spleetcorrosie kan leiden tot ernstige degradatie van materialen, ondanks dat het slechts een kleine hoeveelheid materiaal aantast.

Aangroeiorganismen kunnen eveneens spleetcorrosie veroorzaken. De door deze organismen ingesloten gebieden zijn moeilijk te controleren en vaak corrosiever dan traditioneel zeewater. De meeste onderzoeken hebben zich gericht op aangroei door micro-organismen, terwijl in deze literatuurstudie macro-organismen centraal staan. Dit is relevant aangezien de aangroei en de corrosie door deze macro-organismen sterk afhankelijk is van de geografische locatie en het plaatselijke milieu. Hierdoor staat onderzoek naar spleetcorrosie onder macro-aangroeiorganismen voor veel uitdagingen en slagen laboratoriumexperimenten vaak niet, aangezien deze omgevingen moeilijk na te boosten zijn.

Er is geen spleetcorrosie vastgesteld in het uitgevoerde veldexperiment. De andere vorm van lokale corrosie, putcorrosie, is wel vastgesteld op de coupons. Dit toont aan dat spleetcorrosie een zeer complex mechanisme is, en niet zomaar ontstaat.

Analyse met behulp van X-ray Computertomografie (XCT) vormt een efficiënte, niet-destructieve methode om zowel aangroeiorganismen als corrosieschade op stalen oppervlak gedetailleerd in kaart te brengen. Het kan op een zeer korte tijd een goede overview bieden van de aangroeiorganismen en de corrosieschade op de gescande coupon. Vooral kalkhoudende aangroeiorganismen zoals zeepokken, kalkkokerwormen en schaaldieren zijn duidelijk herkenbaar op de scandoorsneden. Bovendien biedt de reconstructie het voordeel dat er een blijvende digitale representatie van de onderzochte coupon beschikbaar blijft, wat verdere analyse en vergelijking in de toekomst mogelijk maakt.

Een XCT-reconstructie stelt de gebruiker in staat om zich in de X-, Y- en Z-richtingen te verplaatsen binnen en over het staaloppervlak. Deze functie maakt het mogelijk om

nauwkeurige metingen uit te voeren zonder de aangroeiorganismen op de coupon fysiek te beschadigen of verwijderen. Door opeenvolgende scandoorsnedes te combineren tot één resultante reconstructie kan een er een beter inzicht verkregen worden in de ruimtelijke relatie tussen specifieke schadezones en de aanwezigheid van aangroeiorganismen boven deze gebieden.

Een belangrijk nadeel van deze analysetechniek is de aanzienlijke hoeveelheid data die vereist is om de reconstructies te kunnen inladen en verwerken. Hoewel de toegepaste resolutie van 35 µm voor dit onderzoek geen problemen opleverde, bleek bij een hogere resolutie van 10 µm dat sommige reconstructies niet meer konden worden ingeladen vanwege een overschrijding van het beschikbare RAM-geheugen (32 GB) van de gebruikte computer.

Het bijkomend nadeel van deze analysetechniek is de inverse relatie tussen de gewenste resolutie en de grootte van het te scannen object. Naarmate de afmetingen van de coupon toenemen, neemt de maximale haalbare resolutie af indien men de volledige coupon in één scanbeeld wenst te capteren. Deze lagere resolutie vergroot de foutmarge tussen opeenvolgende scandoorsnedes, wat de nauwkeurigheid van de analyse kan beïnvloeden. Een mogelijke oplossing is het uitvoeren van een samengestelde XCT-scan op hogere resolutie, waarbij de coupon in meerdere segmenten wordt gescand en nadien digitaal samengevoegd. Dit gaat echter gepaard met een toename in scanduur en een aanzienlijke toename in de gegenereerde reconstructiedata.

Geconcludeerd kan worden gesteld dat X-ray Computertomografie een toegankelijke en doeltreffende analysemethode is om een gedetailleerd beeld te verkrijgen van zowel aangroeiorganismen als corrosieschade.

Hoewel dit onderzoek waardevolle inzichten biedt, dienen de resultaten met betrekking tot de corrosiesnelheid met de nodige voorzichtigheid te worden geïnterpreteerd. Gezien het beperkte aantal onderzochte coupons kan niet met zekerheid worden gesteld dat de gemeten waarden representatief zijn. Eveneens kunnen observaties van specifieke aangroeiorganismen boven corrosieschade niet eenduidig bevestigd worden. Deze beperkingen onderstrepen de noodzaak van vervolgonderzoek. Desalniettemin biedt deze studie een richtinggevend kader voor toekomstige studies en toepassingen op het gebied van X-ray Computertomografie.

Bibliografie

Abubakr, H. M. C., Ghaith, M. E., El-Sherif, A. A., & El-Deab, M. S. (2024). Influence of metal ions on cysteine as a corrosion inhibitor for low carbon steel in sulfuric acid: Polarization, EIS, XPS, and DFT analysis. *International Journal of Electrochemical Science*, *19*(7), 100620. https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100620

Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Butterworth-Heinemann.

Alberts, E. M., Taylor, S. D., Edwards, S. L., Sherman, D. M., Huang, C., Kenny, P., & Wilker, J. J. (2015). Structural and compositional characterization of the adhesive produced by reef building oysters. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *7*(16), 8533-8538. https://doi.org/10.1021/acsami.5b00287

Al-Janabi, Y. T. (2020). 1 An Overview of Corrosion in Oil and Gas Industry: Upstream, Midstream, and Downstream Sectors. In S. S. Viswanathan & A. U. Saviour (Red.), *Corrosion inhibitors in the Oil and Gas Industry* (pp. 3-38). Wiley.

Arsnt, J. (2017). The slime and grime that stick to ships. *ASBMB Today*. https://www.asbmb.org/asbmb-today/science/040117/the-slime-and-grime-that-stick-to-ships

ASTM. (z.d.). *Astm G1 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens*. Toaz.Info. Geraadpleegd 4 mei 2025, van https://toaz.info/doc-view-3

Atria. (2024). *Corrosion test with potentiostat*. ATRIA. Geraadpleegd 10 april 2024, van https://atriainnovation.com/en/blog/corrosion-test-with-potentiostat/

Attaphong. (2017, juli 18). *Image of 3d coordinate axis isolated on white*. iStock. Geraadpleegd 3 mei 2025, van https://www.istockphoto.com/vector/3d-coordinate-axis-vector-gm818268912-132376771

Balakrishnan, M., Leitão, C., Craveiro, D., Rodrigues, D. M., Santiago, A., Da Silva, L. S., & Subramanian, C. (2022). Post fire tensile properties of S355 J2 structural steel welded connections for construction industrial applications. *Metallurgical Research & Technology*, *119*(5), 511. https://doi.org/10.1051/metal/2022056

Bardal, E. (2007). *Corrosion and protection*. Springer London.

Barnes, H., & Bagenal, T. B. (1951). Observations on *Nephrops norvegicus* (L.) and on an epizoic population of *Balanus crenatus* Brug. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, *30*(2), 369-380. https://doi.org/10.1017/S0025315400012832

Barnes, S., & Quach, C. (2024, september 5). *Basic Principles of CT Scans—Interpretation—TeachMeAnatomy*. Geraadpleegd 29 mei 2025, van https://teachmeanatomy.info/the-basics/imaging/computed-tomography-ct-scans/

Başyiğit, A. B., Gül, A., & Kurt, H. I. (2023). Mechanical and Microstructural Investigation of Dissimilar S235 and S32205 Steel Sheets After TIG Welding. *Turkish Journal of Materials*, *8*(2), 10-14.

Bellinger, R. (2019, augustus 27). *What Is a Digital Microscope?* https://www.olympus-ims.com/en/insight/what-is-a-digital-microscope/

Bixler, G. D., & Bhushan, B. (2012). Biofouling: Lessons from nature. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *370*(1967), 2381-2417. https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0502

Blackwood, D. J., Lim, C. S., Teo, S. L. M., Hu, X., & Pang, J. (2017). Macrofouling induced localized corrosion of stainless steel in Singapore seawater. *Corrosion Science*, *129*, 152-160. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.10.008

Brak, C. A. (2000). 2.16 Inleiding in corrosie. In *International welding engineer Materiaalkunde* (pp. 1-46). Nederlands Instituut voor Lastechniek.

Cant, J., Behiels, G., & Sijbers, J. (2016). *Continuous digital laminography*. 5.

Cemmedo, M. (2015). *Protection of ship from corrosion*. University of Kyrenia, masterthesis.

Chen, W., Wang, M., Li, M., Li, K., Huang, Y., & Xu, Y. (2023). Interaction of marine organisms on localized corrosion of 316L stainless steel in Dalian seawater. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, *70*(4), 157-165. https://doi.org/10.1108/ACMM-02-2023-2755

De redactie. (2022). *De toepassingen en eigenschappen van constructiestaal*. Vraag & Aanbod. Geraadpleegd 29 april 2024, van https://www.vraagenaanbod.nl/achtergrond/de-toepassingen-en-eigenschappen-van-constructiestaal/

De Samber, B., Renders, J., Elberfeld, T., Maris, Y., Sanctorum, J., Six, N., Liang, Z., De Beenhouwer, J., & Sijbers, J. (2021). FleXCT: A flexible X-ray CT scanner with 10 degrees of freedom. *Optics Express*, *29*(3), 3438-3457. https://doi.org/10.1364/OE.409982

Degraer, S., Carey, D., Coolen, J., Hutchison, Z., Kerckhof, F., Rumes, B., & Vanaverbeke, J. (2020). Offshore Wind Farm Artificial Reefs Affect Ecosystem Structure and Functioning: A Synthesis. *Oceanography*, *33*(4), 48-57. https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.405

Delft Solid Solutions. (2024). *Scan- en transmissie-elektronenmicroscopie*. Delft Solids Solutions. Geraadpleegd 10 april 2024, van https://www.solids-solutions.com/nl/rd/deeltjeskarakterisering-analyse-van-deeltjesgrootte-en-deeltjesvorm/scan-en-transmissie-elektronenmicroscopie/

Eashwar, M., Subramanian, G., Chandrasekaran, P., & Balakrishnan, K. (1992). Mechanism for Barnacle-Induced Crevice Corrosion in Stainless Steel. *CORROSION*, *48*(7), 608-612. https://doi.org/10.5006/1.3315979

Erdtsieck, D. G. J. (2006). *Corrosie*. HU-Utrecht.

Etor, A. (2009). *Electrochemical neasurement of crevice corrosion of type AISI 304 stainless steel*. University of Saskatchewan, masterthesis. https://core.ac.uk/reader/226144850

European Federation of Corrosion Working Party on Corrosion Education. (1974). *Corrosion Education Manual*. Swedish Corrosion Institute.

Evident Corporation - NDT. (2019, december 10). *How Does a Digital Microscope Work?* AZoM. Geraadpleegd 4 september 2024, van https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=18805

Fytianos, G., Ucar, S., Grimstvedt, A., Svendsen, H. F., & Knuutila, H. (2016). Corrosion Evaluation of MEA Solutions by SEM-EDS, ICP-MS and XRD. *Energy Procedia*, *86*, 197-204. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.01.020

Garcia, A., Valdez, B., Schorr, M., Zlatev, R., Eliezer, A., & Hadad, J. (2010). Assessment of marine and fluvial corrosion of steel and aluminium. *Journal of Marine Engineering & Technology*, *9*(3), 3-9. https://doi.org/10.1080/20464177.2010.11020235

Gellings, P. J. (2006). *Inleiding tot Corrosie en Corrosiebestrijding*. PPI uitgeverij.

Greenfieldboyce, N. (2010). Mighty Mussels Have Industrial Strength. *NPR*, 1.

Haarsma, M. (2019, maart 1). *Nederlands Soortenregister | overzicht van de Nederlandse biodiversiteit*. Geraadpleegd 15 april 2025, van https://www.nederlandsesoorten.nl/linnaeus_ng/app/views/species/nsr_taxon.php?id=138831&cat=CTAB_MEDIA#gallery

Hadzihafizovic, D. (2023). *Welding of Stainless Steel*. Dzevad Hadzihafizovic's Lab. https://doi.org/10.5281/ZENODO.10337415

Hilti Belgium. (2015). *Corrosie Handbook*. Hilti Belgium nv.

Hiscock, K. (2008, april 29). *Sea grapes (Molgula manhattensis)—MarLIN - The Marine Life Information Network*. https://www.marlin.ac.uk/species/detail/1735

Hussain, C. M., Verma, C., Aslam, J., Aslam, R., & Zehra, S. (2023). 4—Crevice corrosion. In C. M. Hussain, C. Verma, J. Aslam, R. Aslam, & S. Zehra (Red.), *Handbook of Corrosion Engineering* (pp. 55-69). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95185-2.00004-6

Huyge, B., Renders, J., Sanctorum, J., De Beenhouwer, J., & Sijbers, J. (2024). X-ray image reconstruction for continuous acquisitions with a generalized motion model. *Optics Express*, *32*(22), 39192-39207. https://doi.org/10.1364/OE.531999

Huyghebaert, p. (2019, juli 13). Deze installatie in Oostende maakt van brak water drinkwater: 'Uniek in West-Europa'. *vrt nws*. https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2019/07/12/deze-installatie-in-oostende-maakt-van-brak-water-drinkwater-

u/#:~:text=In%20Oostende%20wordt%20de%20laatste,moet%20daar%20komaf%20mee%20maken.&text=Er%20is%20bijzonder%20weinig%20grondwater%20aan%20de%20kust.

Ikani, N., Pu, J. H., & Cooke, K. (2024). Analytical modelling and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to evaluate influence of corrosion product on solution resistance. *Powder Technology*, *433*, 119252. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119252

Imbert, C. A. C., Ragoonath, D., & Lewis, W. G. (1999). Corrosion of offshore platforms off the south-east coast of Trinidad. *West Indian Journal of Engineering*, 8.

Ingels, H. (2001). *Materialenleer: Toegepaste wetenschappelijke vorming*. die Keure.

Jafarzadeh, S., Zhao, J., Shakouri, M., & Bobaru, F. (2022). A peridynamic model for crevice corrosion damage. *Electrochimica Acta*, *401*, 22. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139512

Kennell, G. F., Evitts, R. W., & Heppner, K. L. (2008). A critical crevice solution and IR drop crevice corrosion model. *Corrosion Science*, *50*(6), 1716-1725. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.02.020

Khodabux, W., Causon, P., & Brennan, F. (2020). Profiling Corrosion Rates for Offshore Wind Turbines with Depth in the North Sea. *Energies*, *13*(10), 19. https://doi.org/10.3390/en13102518

Lasia, A. (2014). Conclusions. In A. Lasia, *Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications* (pp. 341-342). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8933-7_17

Marine Cadet. (2024, januari 8). *Understanding Sea Chests on Ships: Water Intake Systems*. Geraadpleegd 16 november 2024, van https://marinecadet.com/what-is-a-sea-chests/

Marine Education Society of Australasia. (2015). *Tunicates*. Geraadpleegd 15 april 2025, van http://www.mesa.edu.au/tunicates/

Marya. (2024, april 18). SEM Disadvantages: Understanding Common Issues. *Element-Pi*. https://elementpi.com/sem-disadvantages/

Materials Evaluation and Engineering, Inc. (2016). *Handbook of Analytical Methods for Materials*. Materials Evaluation and Engineering, Inc.

Materiex. (z.d.). Digital Microscopy, Light Microscopy, Electron Microscopy, 3D Profilometry. *Materiex*. Geraadpleegd 4 september 2024, van https://www.materiex.com/digital-microscopy/

Naresh, K., Khan, K. A., Umer, R., & Cantwell, W. J. (2020). The use of X-ray computed tomography for design and process modeling of aerospace composites: A review. *Materials & Design*, *190*, 108553. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108553

National Geographic. (2024). *Oysters | National Geographic*. National Geographic. Geraadpleegd 13 april 2024, van https://www.nationalgeographic.com/animals/invertebrates/facts/oysters

Neville, A., & Hodgkiess, T. (2000). Localised effects of macrofouling species on electrochemical corrosion of corrosion resistant alloys. *Britisch Corrosion Journal*, *35*(1), 6. https://doi.org/10.1179/000705900101501083

PalmSens. (2023). *Corrosion Handbook*. PalmSens BV. https://www.palmsens.com/app/uploads/2024/06/0538-PAS23-Corrosion-handbook_digital-.pdf

Permeh, S., Lau, K., & Duncan, M. (2021). Effect of crevice morphology on SRB activity and steel corrosion under marine foulers. *Bioelectrochemistry*, *142*, 12. https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2021.107922

Popov, B. N. (2015). Chapter 7—Pitting and Crevice Corrosion. In B. N. Popov (Red.), *Corrosion Engineering* (p. 37). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62722-3.00007-0

Port of Rotterdam. (2021). Drijvende windmolens voor diepe wateren. *Havenkrant*, *49*(13), 12.

Price, S. J., & Figueira, R. B. (2017). Corrosion Protection Systems and Fatigue Corrosion in Offshore Wind Structures: Current Status and Future Perspectives. *Coatings*, *7*(2), 51. https://doi.org/10.3390/coatings7020025

Propspeed. (2024). *What Exactly Are Barnacles Anyway?* Propspeed. Geraadpleegd 12 april 2024, van https://propspeed.com/media/news/news-item/2021/01/18/what-exactly-are-barnacles-anyway

Rainbow, P. S. (1984). An introduction to the biology of British littoral barnacles. *Field Studies*, *6*, 1-51.

Refait, P., Grolleau, A. M., Jeannin, M., Rémazeilles, C., & Sabot, R. (2020). Corrosion of Carbon Steel in Marine Environments: Role of the Corrosion Product Layer. *Corrosion and Materials Degradation*, *1*(1), 198-218. https://doi.org/10.3390/cmd1010010

Relini, G., Tixi, F., Relini, M., & Torchia, G. (1998). The macrofouling on offshore platforms at Ravenna. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *41*(1), 41-55. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(98)80007-3

Roncolato, F., Fellowes, T. E., Duce, S., Mora, C., Johansson, O., Strachan, I., Bugnot, A. B., Erickson, K., Figueira, W., Gribben, P. E., Pine, C., Morgan, B., & Vila-Concejo, A. (2024). Ecomorphodynamics of oyster reefs and their influence on oyster reef morphology. *Geomorphology*, *456*, 109213. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109213

Sangeetha, R., Kumar, R., Doble, M., & Venkatesan, R. (2010). Barnacle cement: An etchant for stainless steel 316L? *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *79*(2), 524-530. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.05.009

Schelpdieren. (2023, april 13). *What determines the growth of mussels in both shell length and meat weight? - Schelpdieren*. https://schelpdieren.com/en/2023/04/13/what-determines-the-growth-of-mussels-in-both-shell-length-and-meat-weight/, https://schelpdieren.com/en/2023/04/13/what-determines-the-growth-of-mussels-in-both-shell-length-and-meat-weight/

Siggelkow, I. (2012). *Evaluation of corrosion in crevices where materials with different surface coatings are combined*. Uppsala universiteit, masterthesis.

Smithsonian Environmental Research Center. (2025). *Invasions.si.edu/nemesis/species_summary/159557*. Geraadpleegd 14 mei 2025, van https://invasions.si.edu/nemesis/species_summary/159557

Swapp, S. (2007, mei 17). Scanning Electron Microscopy (SEM). *Techniques*. https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html

Ten Hove, H. A., & Lucas, J. A. W. (1996). Kalkkokerwormen van Nederland. *Het Zeepaard*, *56*, 30-52.

The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2025, april 11). *Invertebrate*. Geraadpleegd 15 april 2025, van https://www.britannica.com/animal/invertebrate

Tosec. (2024). *Staalsoorten*. Tosec. Geraadpleegd 29 april 2024, van https://tosec.nl/nl/wiki/staalsoorten/

TWI. (2024). *Scanning Electron Microscopy (SEM) Analysis and Imaging*. TWI. Geraadpleegd 10 april 2024, van https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/failure-analysis-and-repair/microscopy/scanning-electron-microscopy-sem-analysis-and-imaging.aspx

Valdez, B., Ramirez, J., Eliezer, A., Schorr, M., Ramos, R., & Salinas, R. (2016). Corrosion assessment of infrastructure assets in coastal seas. *Journal of Marine Engineering & Technology*, *15*(3), 124-134. https://doi.org/10.1080/20464177.2016.1247635

Vargel, C. (2020). Chapter C.8—Crevice corrosion. In C. Vargel (Red.), *Corrosion of Aluminium (Second Edition)* (pp. 267-271). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099925-8.00020-X

Venugopalan, V. P., & Wagh, A. B. (1990). Biofouling of an offshore oil platform: Faunal composition and biomass. *Indian Journal of Marine Sciences*, *19*, 53-56.

Vereecke, K. (2021, augustus 9). Pleziervaarders maken zich zorgen over ijzervretende bacterie in jachthaven. *hln.be*. https://www.hln.be/zelzate/pleziervaarders-maken-zich-zorgen-over-ijzervretende-bacterie-in-jachthaven~a417eb0f/

Wang, W. Y., Ni, J. Y., Huang, S. H., Cui, Q. W., Wang, Y. Q., Gu, Z. Q., & Li, Y. F. (2024). Hyposalinity stress reduces mussel byssus secretion but does not cause detachment. *Science of The Total Environment*, *930*, 172561. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172561

Wang, Z., Huang, Y., Wang, X., Xu, Y., & Cai, F. (2022). Effects of oyster as macrofouling organism on corrosion mechanisms of a high-strength low-alloy steel. *Corrosion Science*, *207*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110580

Wang, Z., Wang, X., Huang, Y., Zhou, H., Wu, Y., Sun, Y., Nan, Y., Xu, H., Pu, J., & Hou, B. (2023). Macrofouling organisms: Protection or damage of steel in marine environments? *Corrosion Science*, *212*, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110928

Watersportvereniging Noord-Beveland. (2025). *Onderzoek Trompetkalkkokerworm | Watersportvereniging Noord-Beveland Colijnsplaat*. Geraadpleegd 14 mei 2025, van https://www.wsvnb.nl/onderzoek-trompetkalkkokerworm

Wikimedia Commons. (2019). *File:Praezession.svg*. Geraadpleegd 20 september 2019, van https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Praezession.svg&oldid=359946474

Wu, Z., Wang, Z., Li, Z., Hao, H., Qi, Y., & Feng, D. (2024). Impacts of ocean acidification and warming on the release and activity of the barnacle waterborne settlement pheromone, adenosine. *Marine Pollution Bulletin*, *199*, 115971. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115971

YENA Engineering. (2024). *Eigenschappen en gebruik van S Series (235, 275 en 355) Staal*. YENA Engineering. Geraadpleegd 29 april 2024, van https://yenaengineering.nl/nl/eigenschappen-en-gebruik-van-s-series-235-275-en-355-staal/

Zhang, T., Wang, J., Li, G., & Liu, H. (2021). Crevice corrosion of X80 carbon steel induced by sulfate reducing bacteria in simulated seawater. *Bioelectrochemistry*, *142*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2021.107933

Zhang, Z., Li, Z., Wu, F., Xia, J., Huang, K., Zhang, B., & Wu, J. (2022). A comparison study of crevice corrosion on typical stainless steels under biofouling and artificial configurations. *Npj Materials Degradation*, *6*(1), 1-12. https://doi.org/10.1038/s41529-022-00301-w

Zhao, Y., & Jin, W. (2016). Mill Scale and Corrosion Layer at Concrete Surface Cracking. In *Steel Corrosion-Induced Concrete Cracking* (pp. 79-92). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809197-5.00005-0