

HOGERE ZEEVAARTSCHOOL

NAUTISCHE FACULTEIT

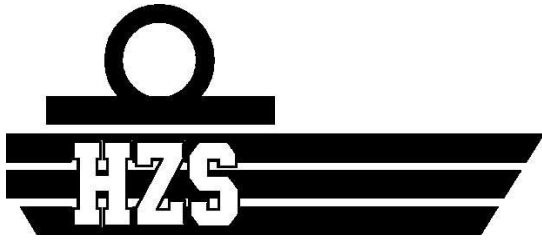
Conservatie van scheepswrakken in de Noordzee

Diederik Van Besauw

Promotor: Prof. Capt. Dr. Kris De Baere

Masterscriptie voorgedragen tot het
behalen van de graad van master
in de Nautische Wetenschappen

Academiejaar: 2017-2018



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL

NAUTISCHE FACULTEIT

Conservatie van scheepswrakken in de Noordzee

Diederik Van Besauw

Promotor: Prof. Capt. Dr. Kris De Baere

Masterscriptie voorgedragen tot het
behalen van de graad van master
in de Nautische Wetenschappen

Academiejaar: 2017-2018

Voorwoord

In de eerste plaats zou ik mijn promotor Prof. Kapt. Dr. Kris De Baere willen bedanken voor het doornemen van deze thesis, voor zijn constructieve feedback, voor zijn onvoorwaardelijke beschikbaarheid en voor het aanbrenge van interessante contactpersonen en artikels. De samenwerking met het Antwerp Maritime CORrosion Team, het Agentschap Onroerend Erfgoed en het Vlaamse Instituut voor de Zee was voor mij een enorm fijne ervaring. Daarom zou ik alle betrokken leden van deze teams eveneens willen bedanken.

Dit eindwerk was voor mij een zeer leerrijke en uitdagende ervaring die met de nodige obstakels gepaard ging. Het heeft bijgedragen aan mijn doorzettingsvermogen, probleemoplossend denkvermogen en zelfstandigheid. Wetenschappen interesseren mij altijd enorm en prikkelen steeds mijn nieuwsgierigheid, maar dit eindwerk had ik onmogelijk tot een goed einde kunnen brengen zonder de steun van vele vrienden en familie.

De lijst van personen die ik daarom zou willen bedanken is eindeloos daar zij het allemaal de moeite waard maakten. Zij waren de nodige drijfveer om dit tot een goed einde te brengen.

In het bijzonder wil ik klasgenoot en naaste vriend Chris Maervoet, die graag tijd maakte om dit werk door te nemen, hartelijk bedanken. De laatste personen die ik uitdrukkelijk wil bedanken zijn Resi Sterkens en Eddy van Besauw zonder wie dit alles nooit mogelijk geweest zou zijn.

Abstract

Het Belgische deel van de Noordzee bevat meer dan 290 gekende scheepswrakken. Het complexe, corrosieve milieu nabij de zeebodem zorgt ervoor dat deze wrakken na afzienbare tijd zullen verdwijnen wanneer er niet zou worden ingegrepen. Wrakken hebben echter een gunstige invloed op het visbestand en houden de geschiedenis levendig.

In deze thesis staat daarom het onderzoek naar de conservatie van scheepswrakken in de Noordzee centraal. Eerst zal deze thesis zich toespitsen op een boeiend stukje Belgische geschiedenis. Vervolgens worden de voornaamste wrakken in tijd en ruimte gesitueerd, waarna nagegaan wordt welke reeds de beschermde status gekregen hebben. Ook zal er toegelicht worden waarom bepaalde andere wrakken die status ook zouden verdienen. Verder zal ook de corrosie van wrakken worden uitgespit en zullen de potentiële beschermings-technieken daartegen worden besproken.

Het doel van deze thesis is allereerst de corrosiesnelheid van de wrakken te bepalen teneinde te kunnen voorspellen hoe lang een wrak nog aanwezig zou zijn op de zeebodem. Vanuit het originele scheepsplan (*shell expansion plan*) wordt de originele plaatdikte verkregen en na onderwater plaatdiktemetingen kent men ook de huidige staaldikte. Met behulp van de datum waarop het schip verging kan het plaatdikteverlies per jaar berekend worden. Dit zal ook vergeleken worden met een bestaand corrosiemodel dat in deze thesis specifiek wordt toegepast op de Belgische Noordzee. Het tweede doel van deze thesis dient om technieken aan te reiken waarmee men de corrosie kan stoppen of voldoende afremmen om het wrak te kunnen beschermen en bijgevolg aanzienlijk langer *in situ* te bewaren. Uiteindelijk wordt er zelfs een conceptueel plan uitgewerkt om dit mogelijkerwijze te bewerkstelligen.

Er wordt geconcludeerd dat het corrosiemodel toepasbaar lijkt in Belgische wateren maar dat het onderzoek nog veel meer metingen nodig heeft om dit te kunnen bevestigen. Ook de effectiviteit en de neveneffecten van de besproken conserveringstechnieken dienen nog onderzocht te worden.

The Belgian part of the North Sea harbors more than 290 known ship wrecks. The complex corrosive environment near the seabed deteriorates these wrecks. It will also make them disappear in time if there wouldn't be any interference. However, the presence of wrecks in the North Sea isn't in any case a negative aspect. The wrecks do have a positive influence on the fish stock, and they do keep history alive.

This thesis will first focus on a fascinating piece of Belgian history, situate the concerning wrecks in time and space, tell which ones have already gained a protected status and explain why certain others would also earn that status. Furthermore it will take a closer look at the corrosion of wrecks and eventually the potential protection techniques to preserve these wrecks will be discussed.

The first aim of this thesis is to determine the corrosion rate of these wrecks in order to predict how long a wreck would still exist below sea level. The original steel thickness is obtained from the shell expansion plan and after underwater plate thickness measurements, the current steel thickness is also known. Using the date on which the ship sunk, the corrosion loss per year can be calculated. This will also be compared with an existing corrosion model that will be specifically applied to the Belgian North Sea. The second aim of this thesis is to provide techniques to stop or slow down the corrosion sufficiently to preserve a wreck in situ for a considerably longer time. Eventually a conceptual plan is worked out to possibly achieve this.

One can eventually conclude that Melchers's corrosion model seems fit but that this research requires much more data in order to confirm whether it works for these shipwrecks. Further research is also required into the effectiveness and side-effects of the conservation techniques discussed.

Inhoudsopgave

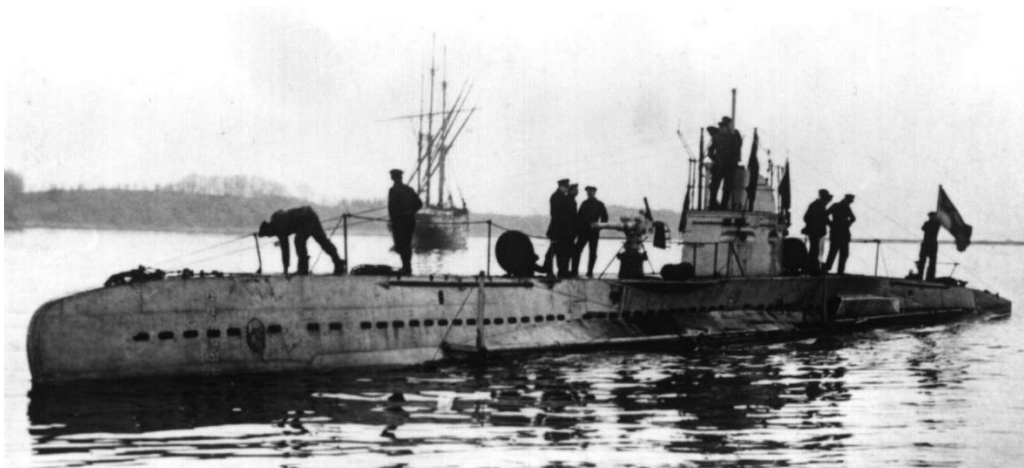
VOORWOORD	I
ABSTRACT	II
1. INLEIDING	1
2. GESCHIEDENIS	4
2.1 WO I.....	5
2.2 WO II.....	8
3. WELKE SCHEEPSWRAKKEN	12
3.1 BELGISCHE NOORDZEE IN CIJFERS.....	12
3.2 WET BETREFFENDE DE BESCHERMING VAN CULTUREEL ERFGOED ONDER WATER.....	15
3.3 REEDS 11 WRAKKEN ERKEND OP 3 SEPTEMBER '18.....	16
3.4 KEUZE VAN WRAKKEN.....	20
3.5 ONZE KEUZE GEMOTIVEERD.....	22
<i>Tabel 1: Samenvattende tabel wrakkeuze (eigen werk)</i>	25
4. CORROSIE	26
4.1 OXIDATIE VAN HET METAAL.....	26
4.2 CORROSIEPROCES.....	28
4.3 VORMING VAN DE BIOFILM.....	32
4.4 MIC.....	35
4.5 OMGEVINGSFACTOREN DIE DE CORROSIESNELHEID BEÏNVLOEDEN.....	40
4.6 SAMENSTELLING STAAL EN DE INVLOED OP HET CORROSIEPROCES.....	46
4.7 CORROSIEMODEL VOOR DE BELGISCHE NOORDZEE.....	48
5. ONDERZOEK	50
5.1 DATAFICHES EN VARIËRENDE PARAMETERS.....	50
5.2 JAARGEMIDDELDEN.....	51
5.3 WERKWIJZE EN MEETAPPARATUUR <i>IN SITU</i> METINGEN.....	52
5.4 RESULTATEN DUIKEN.....	54
5.5 WERKELIJK PLAATDIKTEVERLIES EN RELATIE MET HET CORROSIEMODEL.....	57
5.6 ZOEKEN NAAR EEN EXTRA BRUIKBAAR WOII-WRAK.....	59
5.7 OEFENING WRAKQUOTERING.....	64
6. CONSERVERING	72
6.1 OPOFFERINGSANODES.....	72
6.2 OPGEDRUKTE STROOM.....	76
6.2.1 <i>Klassieke batterij</i>	77
6.2.2 <i>Aluminiumbatterij</i>	79
6.2.3 <i>Bio-batterij</i>	79
6.3 COATING.....	83

6.4 BESCHERMINGSPOTENTIEEL VAN MACRO-ORGANISMEN IN DE BIOFILM	85
6.5 BIOFOULING ALS INDICATIE VOOR DE ONDERLIGGENDE CORROSIE	87
6.6 BEDEKKEN	88
6.7 CONCEPTUEEL PLAN TER BESCHERMING VAN SCHEEPSWRAKKEN	90
7. CONCLUSIE	93
8. LIJST VAN FIGUREN.....	95
9. LIJST VAN TABELLEN	98
10. APPENDIX	99
BIJLAGE 1: EVOLUTIE VAN DUIKBOTEN IN WO I – SCHETSEN (TERMOTE, 1999)	99
BIJLAGE 2: DUITSE WRAKKENLIJST UIT WERELDOORLOG 2.....	101
BIJLAGE 3: GEALLIEERDE WRAKKENLIJST UIT WERELDOORLOG 2	102
BIJLAGE 4: DATAFICHES VAN DE 10 GEKOZEN WRAKKEN UIT HOOFDSTUK 3.5	103
(EIGEN WERK)	103
11. BIBLIOGRAFIE	114

1. Inleiding

De belangstelling voor maritiem erfgoed is de laatste jaren enorm toegenomen in al zijn vormen. Zowel bij de overheden op alle niveaus, van lokaal tot internationaal, als bij het grote publiek en allerhande organisaties stijgt de interesse nog steeds. Dat leidde recent nog tot de ontdekking en identificatie van een bijna intact duikbootwrak uit de Eerste Wereldoorlog, de **UB-29**. Deze Duitse duikboot van het type UB-II deed in de Eerste Wereldoorlog 36 schepen zinken met behulp van zijn kanon en twee torpedobuizen. Op 27 november 1916 vertrok hij echter op zijn laatste missie onder het bevel van Erich Platsch. Hij voer probleemloos door de netten en mijnen van de *Dover Barrage* en deed onderweg nog zes schepen zinken. Nadat hij op 7 december de Noorse Meteor kelderde werd er niets meer van de UB-29 vernomen.

Volgens de archieven zou de Britse HMS Landrail hem op 13 december geramd hebben en vervolgens nog met twee dieptebommen hebben belaagd. Maar ondanks de uitgebreide verslagen komen de opgegeven coördinaten niet overeen met de positie waar de UB-29 werd teruggevonden. Hij zonk namelijk niet in Britse maar in Belgische wateren en dat is voer voor archeologen en geschiedkundigen. Ofwel werd de duikboot gedeeltelijk geramd door de Britse torpedojager, maar kon hij nog blijven varen en botste hij verder op een mijn, ofwel was de HMS Landrail op dat moment in gevecht met een andere duikboot, hoogstwaarschijnlijk de UC-19. De Duitse overheid besliste om de UB-29 met zijn 22 opvarenden die mee zijn vergaan als zeemansgraf te erkennen. Het wrak moet daarom met het nodige respect worden behandeld en vandaar is ook de bescherming aangevraagd (Nieuwsblad, 2017a).



Figuur 1: Foto van de UB-29 aan de Britse oostkust (Staelens, 2017)

De Noordzee bevat een unieke collectie aan wrakken en het Belgische deel daarvan herbergt daarmee een heel belangrijk deel van onze geschiedenis. Vooral schepen – het merendeel uit Wereldoorlogen 1 en 2 – zijn flink vertegenwoordigd en vertellen een boeiend verhaal. Wanneer men niets zou ondernemen om deze wrakken beter te beschermen zal er binnen afzienbare tijd ook niets meer overblijven van deze artefacten. De emotionele waarde van deze scheepswraksites, het respect dat oorlogsgraven verdienen en het historische belang van bepaalde gebeurtenissen zijn van onschatbare waarde en kan men onmogelijk negeren. De landing van Normandië waarin de *destroyer HMS Wakeful* een enorm belangrijke rol speelde, of de operatie ‘Dynamo’ zijn slechts een greep uit onze Belgische geschiedenis waarvan de sporen absoluut niet verloren mogen gaan.

Op 5 augustus 2013 ratificeerde België als 45^{ste} lidstaat de UNESCO 2001 conventie ter bescherming van het cultureel erfgoed onder water. Cultureel erfgoed is een verzamelnaam voor alles wat door vorige generaties is gemaakt en nu nog bestaat en een grote waarde heeft voor de gemeenschap (Vlaamse Overheid, z.d.). Het wordt onderverdeeld in het tastbare roerende erfgoed en het immateriële erfgoed. Het cultureel erfgoed onder water is een deel van het roerende erfgoed en is ondanks diens grote omvang een vaak vergeten aspect. Het doel van het UNESCO verdrag is daarom cultureel erfgoed onder water te waarborgen en te versterken en het te beschermen in het belang van de mensheid. Met de wet van 4 april 2014 betreffende de bescherming van onderwater erfgoed werd dit dan ook mogelijk in België (Meeus, 2017).

Door dat ontbrekende politieke en wettelijke kader van weleer worden deze historisch waardevolle wrakken tegelijk ook bedreigd. Zo vertegenwoordigen wrakken niet alleen een groot deel van onze geschiedenis, maar zijn zij ook de ideale kweekplaats voor fauna en flora in de anders zo kale zeebodem. Als er niets wordt ondernomen om de wrakken te beschermen, zal alles stilaan verdwijnen. Het departement Maritieme Archeologie van het Agentschap Onroerend Erfgoed heeft daarom de Hogere Zeevaartschool te Antwerpen gecontacteerd, om meer te leren over corrosie en specifiek corrosie in de bodem. Samen met het Vlaamse Instituut voor de Zee (VLIZ) onderzoeken de HZS en het Agentschap Onroerend Erfgoed hoe lang deze scheepswrakken nog zouden blijven bestaan alvorens volledig afgebroken te zijn, indien er niets zou worden ondernomen en de natuur vrij spel krijgt.

Deze scriptie zal zich in het licht daarvan toeleggen op een boeiend stukje Belgische maritieme geschiedenis, de voornaamste wrakken op de bodem van de Noordzee situeren, vertellen welke reeds beschermd zijn en een lans breken voor de wrakken die meer aandacht verdienen en in de toekomst een beschermde status zouden moeten krijgen.

Wrakken doen namelijk meer goed dan kwaad. Ze hebben een gunstige invloed op het visbestand en houden de geschiedenis levendig door onder meer ook de promotie van de duiksport. Daarom zal er verder ook worden toegespitst op de corrosie van de wrakken en de potentiële vormen van bescherming.

Een eerste stap daarbij is het bepalen van de corrosiesnelheid. Door het opzoeken van de originele plaatdikte en het meten van de *in situ* plaatdikte op dit moment, kan men het plaatdikteverlies berekenen. Daaruit wordt middels de datum van zinken een gemiddelde corrosiesnelheid berekend en kan de resterende levensduur van het wrak – indien niet zou worden ingegrepen – voorspeld worden.

2. Geschiedenis

De bodem van de Noordzee ligt bezaaid met talloze unieke wrakken, elk met hun eigen verhaal. Door de eeuwen heen zijn hier talloze schepen gezonken; van boomstamboten uit de prehistorie tot Vikingschepen, van VOC¹ schepen tot stoomschepen, van onderzeeërs tot voorpostboten, en van vissersboten tot recenter gezonken vrachtschepen. Tezamen geven deze wrakken inzicht in de maritieme geschiedenis van de Noordzee en zijn ze van cultureel belang.

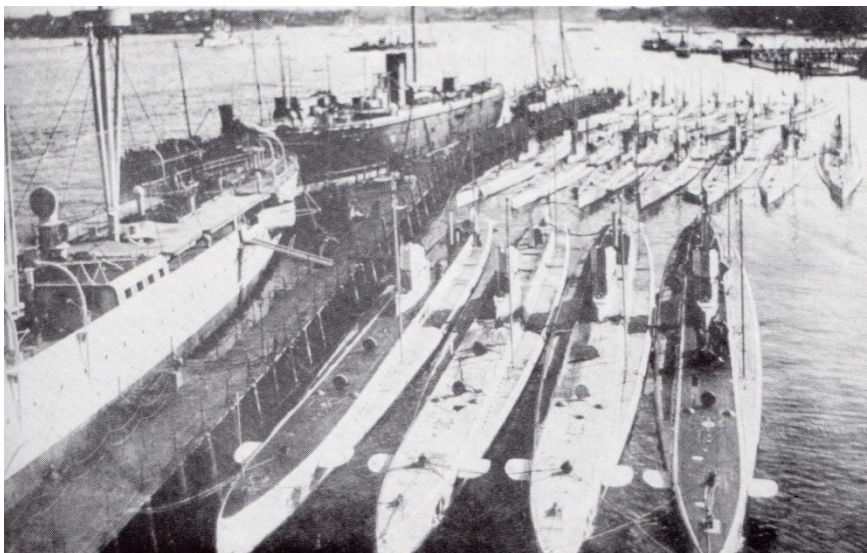
Het is echter merkwaardig dat er nagenoeg geen scheepswrakken gevonden en of bekend zijn van voor de 20^{ste} eeuw. Een regio als Vlaanderen behoorde in de middeleeuwen namelijk tot de top van de toenmalige wereld en kende een behoorlijk intensieve handel over zee. De bloeiperiode van Brugge en later Antwerpen was immers in belangrijke mate gebaseerd op de maritieme handel. Een groot deel van het nautische verleden van het zuidelijke Noordzeegebied blijft dus volledig buiten beeld via de gekende scheepswraksites. Dat is hoofdzakelijk te wijten aan het feit dat houten scheepswrakken al van voor ze zinken te maken hebben met de *Teredo Navalis*, oftewel paalworm. Die zorgt voor een snelle degradatie van het hout en doet het uiteindelijk uit elkaar vallen. De weinige overblijfselen van de scheepsstructuur zinken vervolgens weg in de zandbodem en worden dan door de stroming en vervolgens de verplaatsing van de zandbanken begraven en onzichtbaar. Ook zullen de boomkorvisserij en baggerwerkzaamheden van de afgelopen veertig jaar heel wat van deze wrakken genivelleerd hebben (S. Van Haelst & Pieters, 2017).

Circa 90% van de gekende scheepswrakken in onze Noordzee is gezonken in de 20^{ste} eeuw, het overgrote merendeel in de twee Wereldoorlogen, en tezamen weerspiegelen zij een belangrijk deel van de recente Belgische geschiedenis. In dit hoofdstuk zullen daarom belangrijke maritieme passages uit beide Wereldoorlogen worden toegelicht.

¹ VOC, Verenigde Oost-Indische Compagnie, een particuliere handelsonderneming met overzees handelsmonopolie tussen 1602 en 1800 (Gaastra, 1976)

2.1 WO I

De U-boot kende tijdens de Eerste Wereldoorlog een versnelde technologische evolutie en had een grote impact op de wijze van oorlog voeren op zee. Het zou ook het belangrijkste wapen worden waarmee Duitsland Groot-Brittannië op de knieën trachtte te krijgen. Want hoewel in het begin van de 20^{ste} eeuw de Britten en Fransen de duikboot als een goedkoop wapen zagen om hun kusten en havens te beschermen, zagen de Duitsers duikboten toen nog niet als een doorslaggevend wapen in tijden van oorlog. Dat veranderde echter wanneer de Britten aan het begin van de oorlog een tactische blokkade van de vaarroutes naar Duitsland planden. Het land zou komen te lijden zonder import van voedsel en grondstoffen. Tijdens de Eerste Wereldoorlog kenden de duikboten een heuse evolutie (cfr. Bijlage 1) en werden er zo 144 U-boten², 143 UB-boten³ en 104 UC-boten⁴ afgewerkt waarvan er 329 effectief werden ingezet (Termote, 2014).



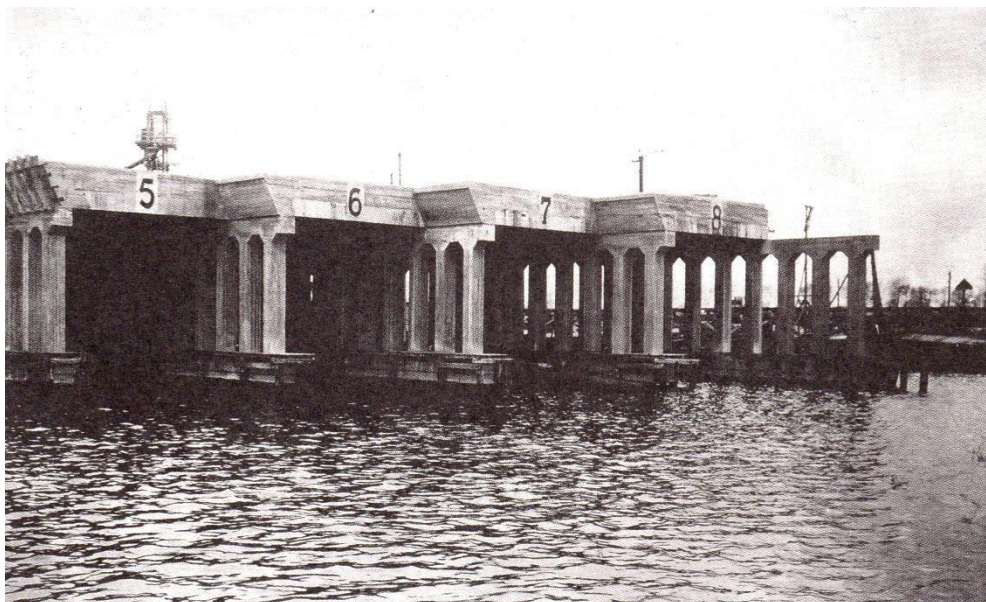
Figuur 2: Duitse duikboten samen met hun bevoorradingschip afgemeerd (Termote, 1999)

² De U-klasse of lange-afstandsonderzeeboten waren voorzien van dubbelwandige rompen waartussen de ballasttanks en drukvaten (voorzien van lucht) zaten om deze weer leeg te maken. De U-1 tot U-19 werden uitgerust met dieselmotoren die dikke witte rook en gensters uitstootten waardoor ze snel werden opgemerkt, hadden geen dekbewapening en slechts een kleine voorraad torpedo's. De U-20 tot U-138 werden uitgerust met betere MAN-dieselmotoren en een kanon aan dek. De U-139 tot 157 waren meer dan 100m lang, voorzien van twee 15cm kanonnen en 20 torpedo's die vanuit acht torpedobuizen konden worden afgevuurd (Termote, 1999).

³ De UB-klasse of kleine (30-55m) kustpatrouille-U-boten werden ontwikkeld voor korte-afstandspatrouilles en evolueerden in 3 types. De UB-I had een enkele romp en enkel een eenvoudige mitrailleur aan dek. De UB-II werd uitgerust met betere dekbewapening en de UB-III kreeg ook een dubbele romp (Termote, 1999).

⁴ De UC-klasse of mijnenleggers waren op hun mijnschachten in hun boeg na identiek aan de UB-klasse. Ze evolueerden op dezelfde manier in drie types waarbij de UC-I boten slechts 12 mijnen vervoerden en de UC-II en UC-III 18 mijnen aan boord hadden (Termote, 1999).

Het nieuwe onderzeese wapen zou niet hoofdzakelijk gericht worden op de zeemacht van een vijandelijk land, maar vooral op de toevoer via handelsschepen. Door de industriële revolutie was Groot-Brittannië volledig afhankelijk van de invoer van grondstoffen en voeding. Maar ook Duitsland was slechts voor 80% zelfvoorzienend op vlak van voeding waardoor een afsnijding van overzeese import ook voor hen een langzame versmacting zou betekenen. Dat resulteerde in de productie van enorm veel Duitse U-boten die voornamelijk opereerden vanuit Vlaamse basissen⁵. Opereren vanuit de 30 kilometer lange kustlijn van Zeebrugge tot Oostende bespaarde hen immers telkens een zeereis van 300 mijl naar iedere nederzetting van de geallieerden. Kort na de Duitse bezetting van België op 14 oktober 1914 startte het eerste offensief dat gericht was op het stoppen van vijandelijke scheepvaart en schuimden Duitse U-boten dan voornamelijk de Noordzee af om ook koopvaarders te kelderen (Termote, 2014).

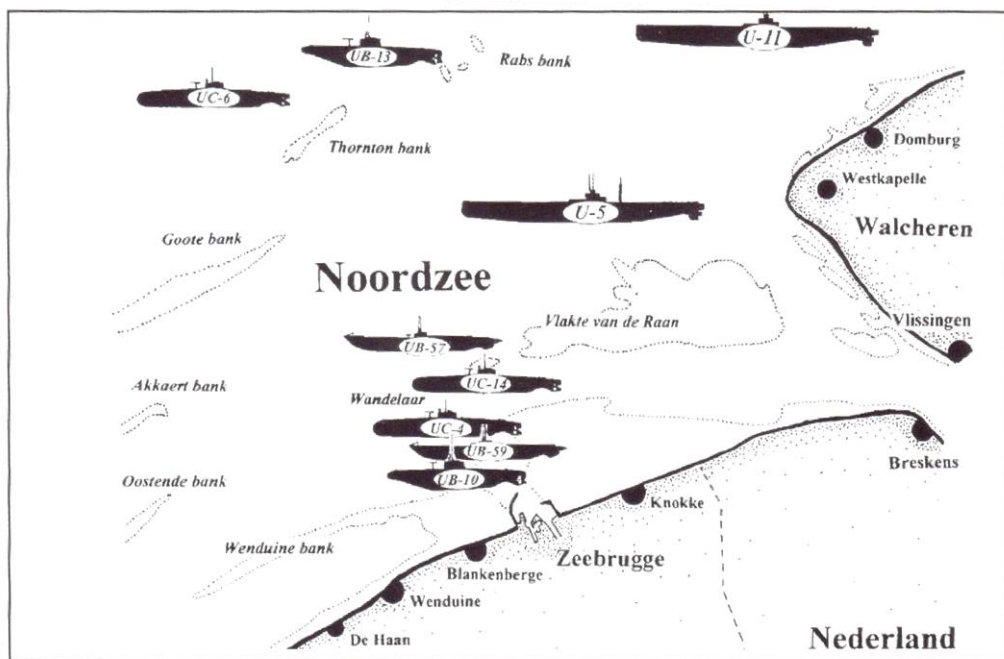


Figuur 3: Een groepsbunker met plaats voor 8 grote duikboten in de achterhaven van Brugge kon bescherming bieden tegen zware luchtaanvallen (Termote, 2018).

Duitsland had duidelijk de overmacht in de Grote Oorlog, maar toen Duitsland en de Centrale Machten eind 1916 de hand uitstaken naar de geallieerden voor een oprechte vrede werd die ronduit verworpen. Hierdoor ging op 31 januari 1917 een onbeperkte duikbootoorlog van start, het tweede offensief. De Duitsers zonken daarbij ook neutrale schepen in de hoop

⁵ De Duitse Keizerlijke Marine opereerde vanuit Brugge (hun zenuwcentrum), Zeebrugge en Oostende. Dit resulteerde uiteindelijk in een aanval van de geallieerden, een ultieme poging om de havengeulen te blokkeren met blokschepen en de Duitse U-boten een halt toe te roepen. 136 schepen vertrokken op 22 april 1918 vanuit Dover in drie konvooien richting Zeebrugge waarvan er 76 effectief streden in de Slag om Zeebrugge op 23 april 1918 (Termote, 2018).

Nederland en de Scandinavische landen af te schrikken nog verder handel te drijven met Groot-Brittannië. Maar ze kelderden daarbij ook grote passagiersschepen, die ervan beticht werden munitie- en troepentransporten te voorzien, waaronder ook tot dan toe neutrale Amerikaanse schepen. Het is dan ook niet onlogisch dat president Wilson op 6 april 1917 het geduld verloor en ook de oorlog aan Duitsland verklaarde. Samen met de invoer van het konvoosysteem en de steun van Amerika zouden de geallieerden het tij dan toch kunnen keren (Termote, 1999).



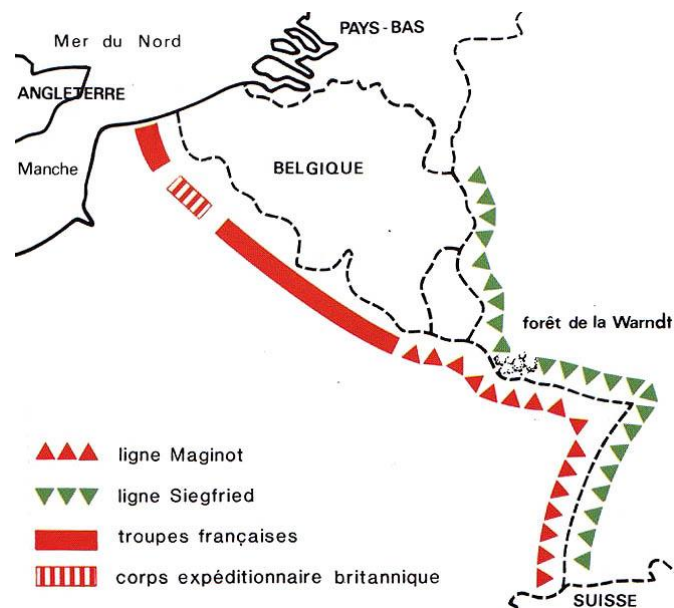
Figuur 4: Verloren Duitse Onderzeeërs tijdens WO I voor de Vlaamse kust (Termote, 1999)

Na de wapenstilstand op 11 november 1918 begon de terugtocht van de Duitse marine uit Vlaanderen waarbij slechts negen U-boten op eigen kracht Duitsland weer konden bereiken. Een aantal overgebleven U-boten en oppervlakteschepen die in de havens lagen was niet zeewaardig (genoeg) en werd samen met de landfaciliteiten vernietigd. In de eerste plaats wilden de Duitsers op die manier voorkomen dat hun materiaal in de handen van de Belgen zou vallen. In de tweede plaats hadden hun vernietigende acties het doel om de heropbouw van de havens zo lang als mogelijk uit te stellen. Tijdens de evacuatie werden er ook drie U-boten op sleeptouw naar zee genomen. De **UB-10**, de **UC-4** en een UB-III-klasse lagen in reparatie en zou men op zee vernietigen omdat ze niet op eigen kracht tot in Duitsland zouden geraken. De eerste werd op één kilometer in zee reeds tot zinken gebracht door kanonvuur

van de kustbatterij. Ze werd in 1980 geborgen en vervolgens begraven aan de buitenkant van de dam – nu onder de moderne containerhaven. De twee laatsten werden een vijftal mijl ten noorden van Zeebrugge gezonken, vermoedelijk door het openzetten van de zeekranen. De identificatie van deze UB-III-klasse blijft trouwens na verschillende duiken nog steeds een mysterie. (Termote, 2014).

2.2 WO II

Engeland en Frankrijk verklaarden op 3 september 1939 de oorlog aan Duitsland nadat de laatste Polen was binnengevallen. Aanvankelijk had dat behalve het verduisteren van de steden tijdens de nacht en de aanwezigheid van honderden ballonversperringen geen zichtbare gevolgen voor de Britten. Dat was het begin van de *phoney-war* of *valse oorlog* die zou duren tot mei 1940. Overal in Engeland werden regimenten in paraatheid gebracht om samen met de andere geallieerden het Duitse offensief af te stoppen. De moreel was hoog omdat de geallieerden technologisch sterker waren en het grootste deel van hun defensie gebaseerd was op de zogezegd ondoordringbare Maginot-linie (Termote, 2000).

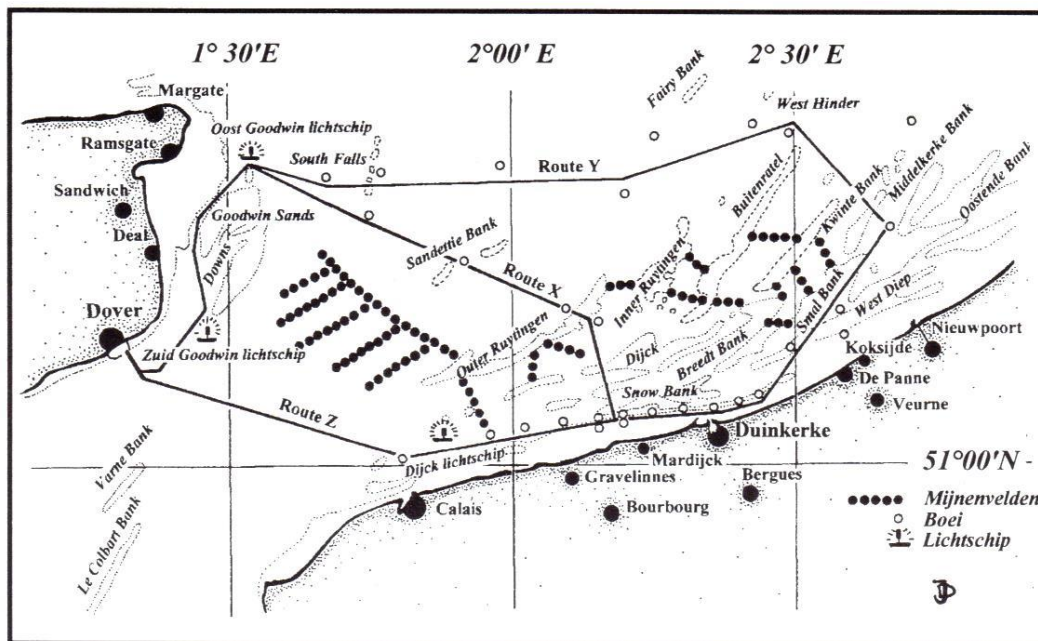


Figuur 5: Maginot-linie met daarnaast de ligging van Franse en Britse troepen tussen Verdun en Duinkerke (DeuFraMat, z.d.)

Dat was een zwaargebouwde keten van forten die vlak na WO I gebouwd werd, genoemd naar de Franse minister van oorlog toen. De lijn van beton, staal en kanonnen begon ten noorden van Basel, volgde de Rijn, liep langs Straatsburg en Metz, en eindigde bij Verdun in

Longuyon. Om financiële en politieke redenen werd de fortengordel niet verder gebouwd langs de 300 km lange Belgische grens. De geallieerden achtten de Ardennen als ondoordringbaar voor tanks en dat zou de Fransen duur komen te staan tegen mei 1940. De beruchte tangbeweging van de *Blitzkrieg* bewees dat de Ardennen niet zo ondoordringbaar waren als gedacht en sneed de Belgisch-Frans-Britse linies al gauw middendoor, waardoor de geallieerden moesten terugtrekken tot het gebied tussen Verdun en Duinkerke (Termote, 2000).

Eind mei werd het zo benauwd dat de Britten een evacuatieplan organiseerden vanuit een schuilplaats in de krijtrotsen onder *Dover Castle* gekend als de dynamokamer. De schamele twee- tot dertigduizend manschappen die dagelijks vanuit Boulogne, Calais en Duinkerke werden geëvacueerd waren duidelijk niet voldoende toen ook Boulogne en Calais werden ingenomen door de Duitsers. Op 26 mei 1940 zette de Britse Admiraliteit daarop operatie *Dynamo* in gang om de resterende manschappen van het Britse Expeditieleger te evacueren. Tot dan hadden de schepen de meest voor de hand liggende route – route Z – van 39 zeemijl genomen voor de evacuatie, maar de Duitse kustbatterij in Gravelines kon hen daar nu ongenadig beschieten. Daarom kwamen er twee alternatieve routes: de 55 zeemijl lange route X en route Y die 87 zeemijl mat. Die laatste ging over Belgisch gebied en was gevaarlijk door de geallieerde mijnevelden maar verder wel het veiligst voor Duitse kustbatterijen. Dat keerde echter toen Nieuwpoort in Duitse handen viel (Termote, 2000).



Figuur 6: Evacuatieleroutes X, Y en Z (Termote, 2000)

Door de bombardementen bleken de meeste kaaien van Duinkerke onbruikbaar en konden enkel de twee lange havenpielen, die niet voorzien waren van bolders of dergelijke, gebruikt worden om manschappen te evacueren. Door de beperkte diepgang, de deining en het getij konden enkel de reddingsboten de troepen oppikken en naar de grotere schepen brengen die dieper in zee lagen te wachten. Hierdoor bereikten op 27 mei slechts 7669 manschappen Engeland en dat aantal moest drastisch verhogen. De nu overbodige voertuigen werden naast elkaar op het strand gezet om zo succesvolle loopbruggen te construeren en duizenden manschappen vanaf het strand te laten inschepen. Er werden zelfs kleine vaartuigen opzettelijk hoog op het strand gezet om als loopbrug te dienen. Ook namen grote schepen het risico om aan het oostelijke staketsel van Duinkerke aan te meren en werden kleine vaartuigen uit Engeland opgevorderd om manschappen in de ondiepe wateren te kunnen oppikken. De torpedobootjagers deden het meeste werk omdat ze door hun hoge snelheid vaak twee reizen per dag konden maken. Maar ze leden ook zware verliezen in het mijnenveld voor Nieuwpoort en Oostende waar op 29 mei drie belangrijke torpedobootjagers zonken: de *HMS Wakeful* en *HMS Grafton* en *HMS Lydd* (Termote, 2000).

De organisatie op het strand verbeterde echter en allerhande boten brachten soldaten over naar de grotere schepen in zee. Vanaf 1 juni gaf de Admiraliteit ook evenveel prioriteit aan de evacuatie van Franse soldaten als aan Britse manschappen. Op dinsdagochtend 4 juni hadden de Duitsers de stadsrand van Duinkerke bereikt en eindigde operatie *Dynamo* met een overweldigend succes. Ondanks een enorm verlies aan schepen en manschappen konden toch ca. 300 000 manschappen worden geëvacueerd (Termote, 2000).

Zesenvijftig torpedojagers werden omwille van hun snelheid en efficiënte bewapening tegen luchtaanvallen ingezet in Operatie *Dynamo*. Daarvan vergingen er zes Britse *destroyers* en drie Franse *Torpilleurs*. De bekendste daarvan is de *HMS Wakeful* die met een groot verlies aan mensenlevens verloren ging door een *Schnellboot* aanval in het begin van de ontzetting van Duinkerke (Termote, 2000).

De *HMS Wakeful* was van de verouderde W-klasse en was op 29 mei 1940 op de terugweg vanuit Duinkerke toen het bij een luchtbombardement 70 bommen kon ontwijken maar toch door een laatste getroffen werd aan de zijkant. De volgende ochtend werd ze – samen met de *HMS Grafton* en *HMS Lydd* onderweg met 640 militairen – gelokaliseerd door de Duitse E-klasse duikboot S-30 ter hoogte van de Kwinteboei. Diens eerste torpedo kon door de

Wakeful rakelings ontweken worden, maar een tweede trof de voorste boiler ruimte, precies in het midden van het schip. Het schip kraakte in twee en zonk in 15 seconden, waarna de afgesloten boven water stekende delen nog door de *Korvet Sheldrake* gekelderd werden. Slechts 40 van de 740 opvarenden overleefden deze tragedie. (Collier & Prudames, 2004).

Zowel de geallieerden als de Duitsers leden grote verliezen in onze Belgische Noordzee tijdens de tweede wereldoorlog. Dat is ook duidelijk te merken aan het grote aantal wrakken van beide partijen (cfr. Bijlage 2 en 3).



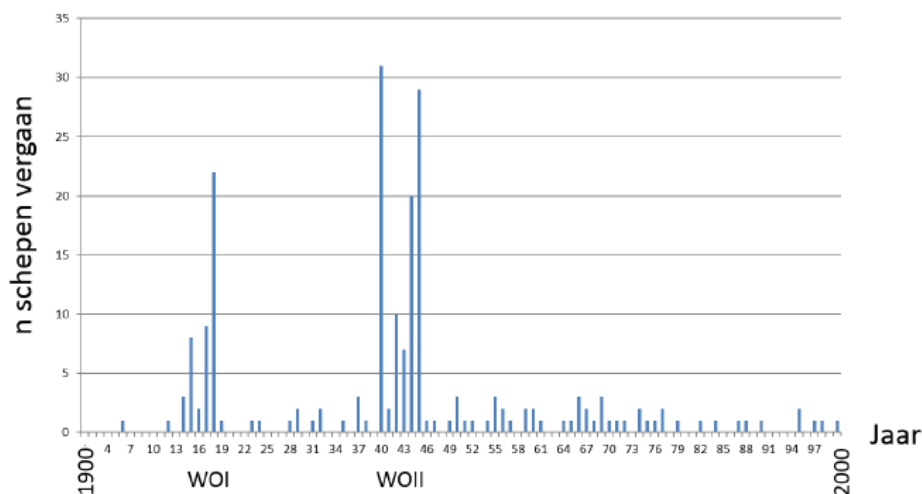
Figuur 7: HMS Wakeful, torpedobootjager H88 (Termote, 2000)

3. Welke scheepswrakken

3.1 Belgische Noordzee in cijfers

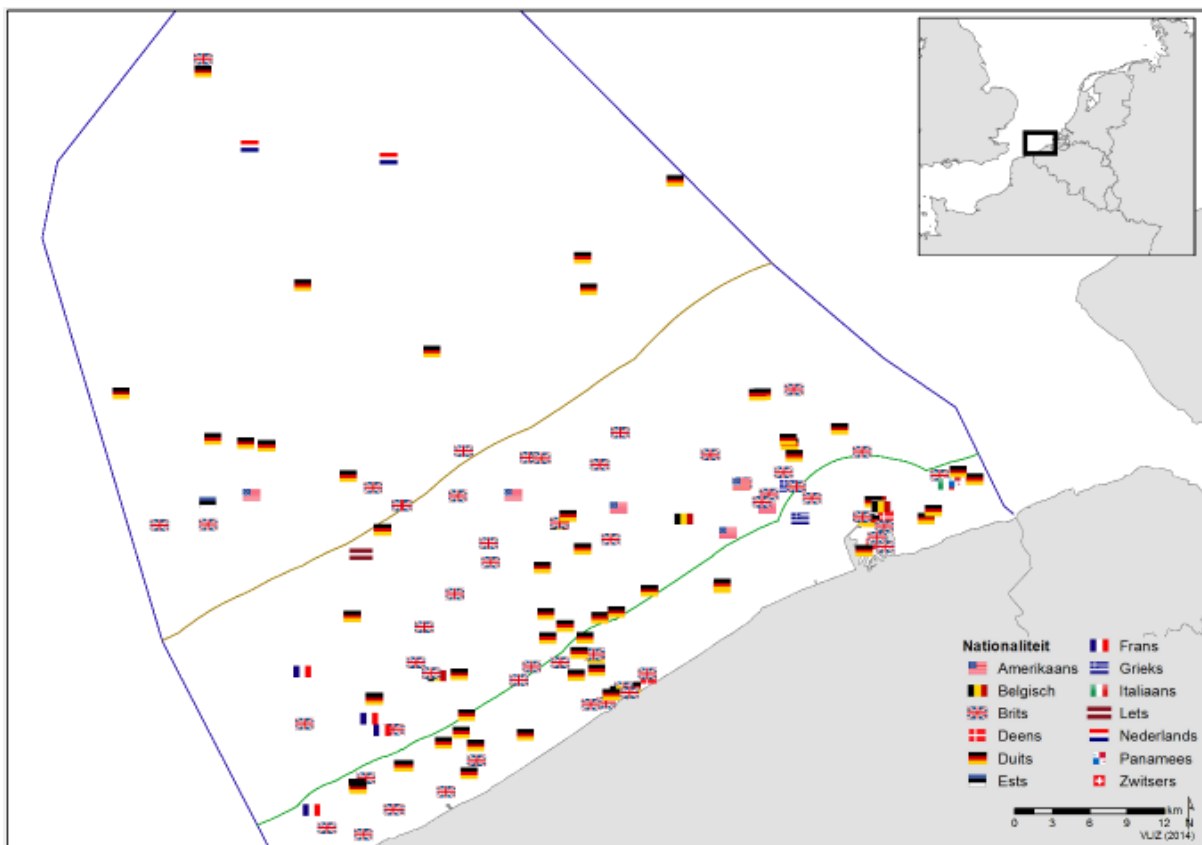
De Belgische Noordzee bevat momenteel 361 gekende wraksites waarvan meer dan 290 scheepswrakken. Daarvan konden reeds 228 scheepswrakken gedeeltelijk of precies geïdentificeerd worden. Slechts 1 wrak is ongedateerd, 16 zonken voor 1900 en de overige 211 situeren zich allemaal in de 20^{ste} eeuw. Van de scheepswrakken van voor 1900 dateren er 10 uit de 19^{de} eeuw, 4 uit de 18^{de} eeuw en telkens één uit de 17^{de} en 16^{de} eeuw. Het oudste gekende wrak, het zogenaamde Zeebrugge-wrak, dateert uit de eerste helft van de 16^{de} eeuw waardoor het nautisch verleden van Vlaanderen voor 1500 volledig buiten beeld blijft. Aangezien er in het verleden al wel Romeinse amforen opgevist werden, is het hoogst waarschijnlijk dat er ook scheepswrakken uit deze periode aanwezig zijn in of op de Noordzeebodem. Zoals eerder besproken zullen deze door de paalworm, de stroming en de nivellering door onder andere baggerwerkzaamheden waarschijnlijk onzichtbaar begraven zijn in de zeebodem.

Bij het bekijken van onderstaande grafiek (figuur 8) met de scheepswrakken uit de 20^{ste} eeuw vallen meteen de pieken op ter hoogte van de Wereldoorlogen. De hoge piek in 1918 is te wijten aan het afzinken van een aantal U-boten door de Keizerlijke Marine op het einde van de Grote Oorlog. In de tweede Wereldoorlog gebeurde hetzelfde in 1945 en is de piek van 1940 te wijten aan de evacuatie van Duinkerke (cfr. Hoofdstuk 2. *Geschiedenis*) (S. Van Haelst & Pieters, 2017).



Figuur 8: Grafiek met de scheepswrakken uit de 20^{ste} eeuw (S. Van Haelst & Pieters, 2017)

De wrakken in de Belgische Noordzee vertegenwoordigen in totaal 17 verschillende nationaliteiten. Dat toont meteen het internationale karakter van het onderwater erfgoed aan. België draagt dus een verantwoordelijkheid ten aanzien van niet minder dan 16 andere landen. Bijna twee derde van de wrakken is toe te wijzen aan één van beide Wereldoorlogen waarbij Groot-Brittannië en Duitsland voor 80% WO I vertegenwoordigen. Dat weerspiegelt meteen welke naties in dit deel van de Noordzee de meeste sporen hebben nagelaten (Van Haelst & Pieters, 2017).

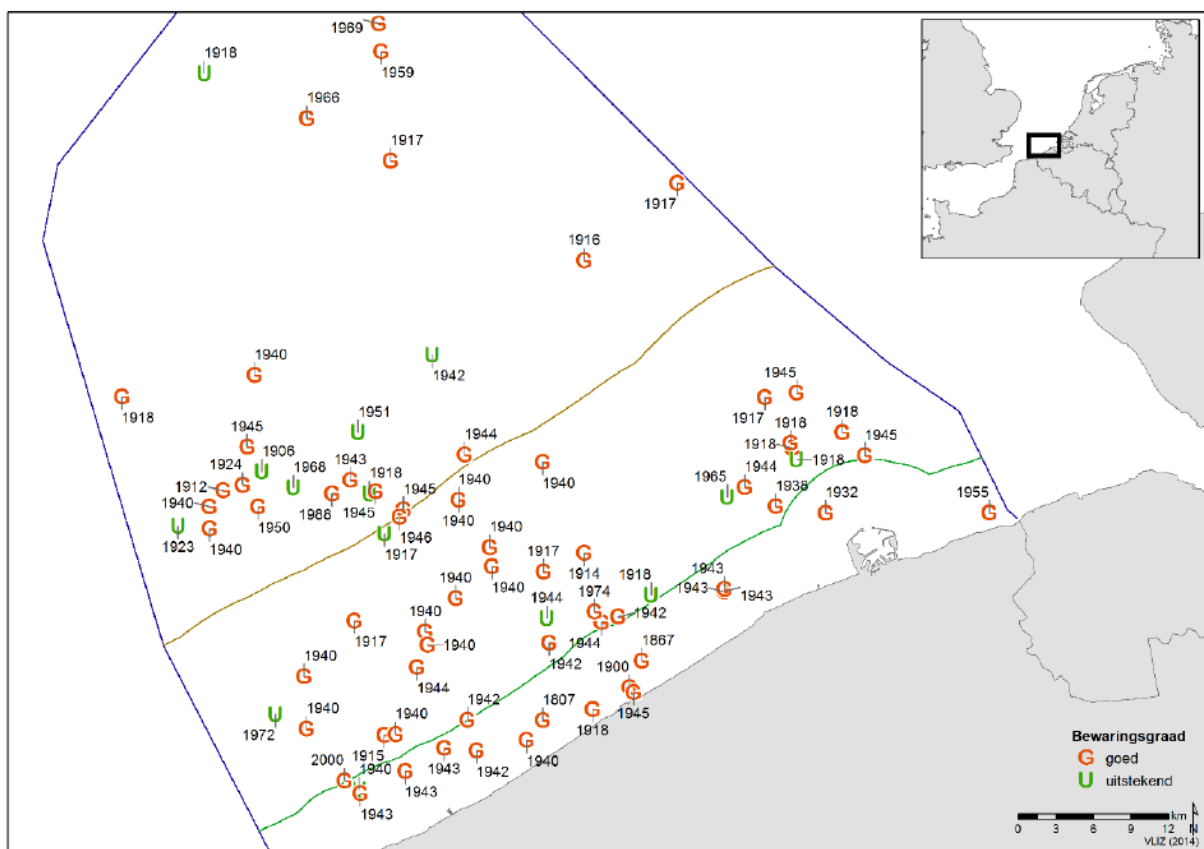


Figuur 9: Nationaliteiten van schepen gezonken tijdens WO I en WO II (Van Haelst, 2014)

Deze scheepswrakken uit de Wereldoorlogen werpen logischerwijs de vraag op of er al dan niet bepaalde sites als oorlogsgraf zouden moeten erkend worden om ze zodoende met het nodige respect te behandelen. Om een wrak als oorlogsgraf te identificeren hanteert het Agentschap voor Onderwater Erfgoed twee voorwaarden: het schip dient vergaan te zijn tijdens de Eerste (1914-1918) of Tweede Wereldoorlog (1940-1945) en bij het vergaan is minstens één opvarende omgekomen. Zo komen er 70 verschillende schepen in aanmerking – voornamelijk militaire vaartuigen en staatschepen, maar ook opgevoerde burgervaatuigen

– waarvan er enkelen in stukken braken (cfr. HMS Wakeful), in totaal goed voor 80 scheepswraksites (Van Haelst & Pieters, 2017).

Er is ook een duidelijk verschil in bewaringstoestand van alle wrakken, wat een belangrijk criterium vormt om een wrak nog eventueel te beschermen. De scheepswrakken kunnen worden onderverdeeld in drie ongeveer even grote groepen: uitstekend tot goed bewaard (figuur 10), gemiddeld bewaard en slecht tot zeer slecht bewaard. Deze laatste groep betreft de scheepswrakken die in het verleden reeds (gedeeltelijk) geborgen of genivelleerd zijn, terwijl de eerste groep – goed voor slechts 79 wrakken – nog in een organisch verband aanwezig is op de zeebodem. Dat wil zeggen dat slechts 27% van de gekende wraksites interessant zijn voor de verdere ontsluiting en beleving van het duiktoerisme. We dienen er i.e. zorgzaam mee om te springen (Van Haelst & Pieters, 2017).



Figuur 10: Kaart met goed tot uitstekend bewaarde wrakken (Van Haelst & Pieters, 2017)

3.2 Wet betreffende de bescherming van cultureel erfgoed onder water

Voor wat betreft de relatief weinig overblijvende goed geconserveerde wrakken is het positief dat er sinds 1 juni 2014 in België een wetgeving is omtrent cultureel erfgoed onder water.

De Unesco conventie van 2 november 2001 te Parijs ontwierp een verdrag ter bescherming van het cultureel erfgoed onder water voor alle lidstaten. Het doel van dit verdrag is het cultureel erfgoed onder water te waarborgen en te versterken en het te beschermen in het belang van de mensheid. Zo bepaalt het verdrag onder andere dat geborgen bestanddelen opgeslagen en bewaard moeten worden met het oog op de conservering op lange termijn, mag cultureel erfgoed niet gebruikt worden voor commerciële exploitatie en moeten menselijke resten met respect behandeld worden. Elke verdragsluitende staat moet ook het nodige doen om het publiek bewust te maken van het belang van dit erfgoed. België ratificeerde in 2013 als 45^{ste} dit verdrag (VLIZ, 2015a).

De implementatie van dit Verdrag in België volgde met de wet die op 1 juni 2014 in voege trad. Deze is van toepassing op vondsten in de territoriale zee, in de exclusieve economische zone en op het Belgisch Continentaal Plat. In de EEZ en op het BCP geldt deze wet enkel wanneer de vondst zich ten minste 100 jaar onder water bevindt.

De wet bepaalt onder andere dat vondsten gemeld moeten worden bij de ontvanger van het cultureel erfgoed – dit is de Gouverneur van West-Vlaanderen – en dat zij niet bovengehaald mogen worden noch dat er werkzaamheden aan mogen verricht worden zonder de uitdrukkelijke toestemming van de ontvanger (VLIZ, 2015a).

Met het Koninklijk Besluit van 21 september 2016 ging Philippe De Backer, staatssecretaris voor de Noordzee, nog een stap verder in de bescherming van dit erfgoed. Hij legde vast dat er geen activiteiten mogen worden uitgevoerd die het *in situ* beschermde erfgoed kunnen wijzigen en dat alle activiteiten in de buurt ervan de noodzakelijke inspanningen moeten leveren om er geen schade aan toe te brengen. Voor elk historisch wrak dat erkend wordt als cultureel erfgoed onder water kunnen bij deze ook bijkomende individuele beschermingsmaatregelen vastgelegd worden. Verder moet ook iedere duik naar een erkend wrak minstens vier uur op voorhand gemeld worden aan de FOD Mobiliteit. Zo weet men welk wrak duiktoerisme aantrekt en kunnen ook controles uitgeoefend worden (Meeus, 2017).

De Gouverneur van West-Vlaanderen heeft daaromtrent, als ontvanger van het cultureel erfgoed onder water, een werkgroep opgericht om een gemotiveerd advies ter bescherming te kunnen geven aan de staatssecretaris. Deze werkgroep bestaat onder meer uit duikers, vissers en mariene archeologen. Zij proberen transparant te werk te gaan en kiezen voor wrakken die representatief zijn en een historische rol van betekenis hebben. De vervolgens uitgevaardigde beschermingsmaatregelen houden telkens rekening met een zo klein mogelijke afstand of straal rondom de centrale coördinaat van het wrak, om de vrijheden van andere gebruikers zo min mogelijk te beperken. Zeemansgraven dienen met absoluut respect behandeld te worden en indien het wrak aan een ander land toebehoort is er overleg om de beschermingsmaatregelen af te stemmen. Elk beschermd wrak wordt mede voor de veiligheid van de duikers opgekuist van netten en ander materiaal (Decaluwé, 2017).

3.3 Reeds 11 wrakken erkend op 3 september '18

- De *West-Hinder* kreeg op 13 mei 2014 als een van de eerste drie wrakken de beschermde status. Dit Belgische lichtschip kwam op 13 december 1912 in aanvaring met het stoomschip Ekbata waarbij een tiental opvarenden stierven.



Figuur 11: Wazige maar zeldzame foto van de eerste Westhinder uit 1864

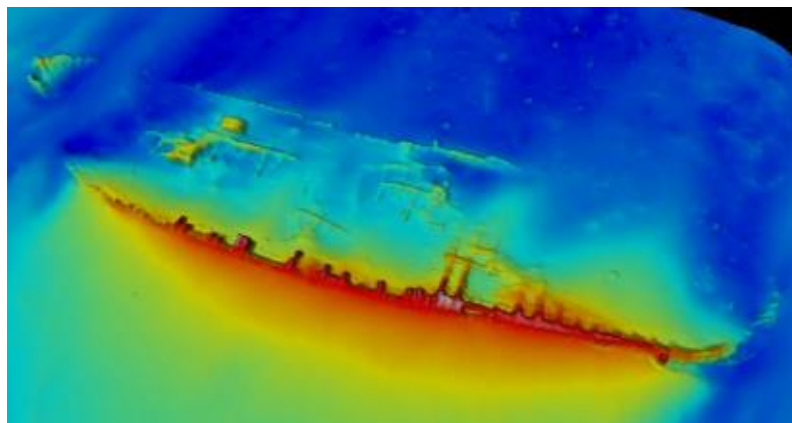
(Van Haelst & Pieters, 2017)

- Het oorlogsschip *HMS Wakeful* kreeg eveneens op 13 mei 2014 de beschermde status. Het goed bewaarde wrak van deze Britse torpedobootjager zonk in 1940 bij de ontzetting van Duinkerke. De wraksite bestaat uit twee delen met een totale oppervlakte van 1000 vierkante meter en is te beschouwen als een oorlogsgraf voor 700 opvarenden.



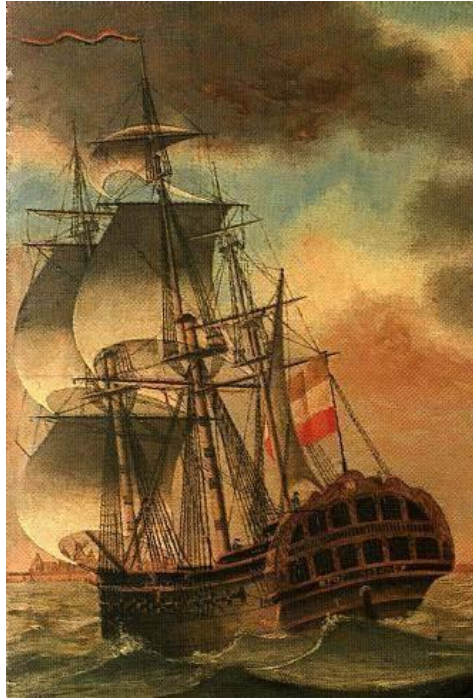
Figuur 12: Multibeam-beeld van de HMS Wakeful (Van Haelst & Pieters, 2017)

- Het **Houten scheepswrak van Oostende**, of beter gezegd de restanten ervan, kreeg op 10 maart 2015 de beschermde status. Bij een survey in het kader van een energie-opwekkende boei voor de kust van Oostende werd het toevallig opgemerkt. De robuuste constructie van pijnhouten spanten is mogelijk van Noord-Amerikaanse origine. Het zou een 19^{de}-eeuws zeilschip geweest zijn.



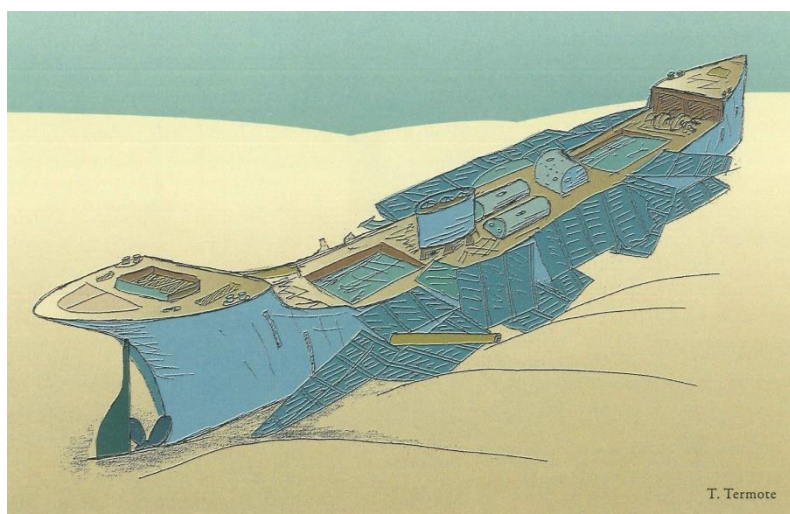
Figuur 13: Multibeam-beeld houten wrak bij Oostende (Van Haelst & Pieters, 2017)

- **'t Vliegend Hart** is een VOC schip dat zonk in 1735 ten noorden van de Vlakte van de Raan. 175 opvarenden kwamen hierbij om het leven. Het wrak kreeg samen met de vijf volgende scheepswrakken de beschermde status op 12 september 2016.



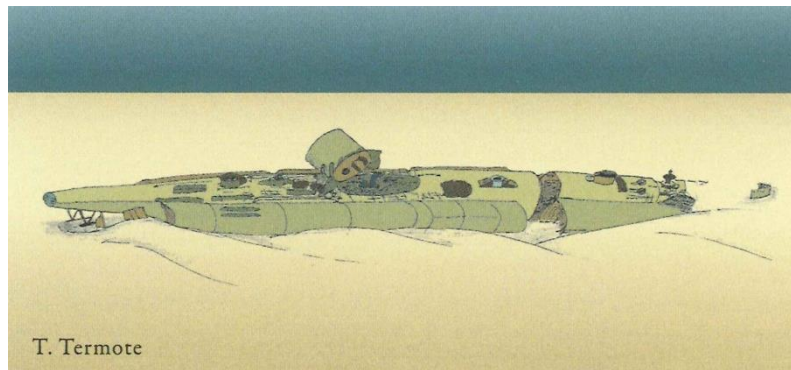
Figuur 14: 't Viegend Hart (Termote, 2009)

- Het **Buiten Ratel Wrak** is een 18^{de}-eeuws scheepswrak op de zandbank Buiten Ratel. Dit grote Nederlandse zeilschip dat zonk in 1741 werd ook op 12 september 2016 toegevoegd aan de lijst van beschermde wrakken.
- De **SS Kilmore** werd eveneens op dezelfde moment toegevoegd aan deze lijst. Het is een vrachtschip dat zonk in 1906 en goed is bewaard. Het scheepswrak steekt grotendeels boven de zeebodem uit en werd geïdentificeerd aan de hand van de scheepsbel.



Figuur 15: Tekening wrak SS Kilmore (Termote, 2009)

- De ***U-11*** werd als eerste Duitse duikboot evenzeer toegevoegd op 12 september 2016. Het is de enige langeafstandsboot van dit type U-boot dat in de Noordzee ligt. Het verging met man en muis toen het in 1914 op een zeemijn botste en wordt i.e. als oorlogsgraf beschouwd.



Figuur 16: Tekening wrak U-11 (Termote, 2009)

- Het oorlogsschip ***HMS Briljant*** werd als laatste van deze reeks van vijf op 12 september 2016 de beschermde status toegekend. Het ondernam samen met de HMS Sirius een raid op Oostende met de bedoeling de haveningang te blokkeren. Een eerste poging mislukte door een opzettelijk verplaatste boei, maar een tweede poging op 23 april 1918 was succesvol. Het werd samen met de Sirius opzettelijk afgezonken en staat symbool voor de raid op Oostende.



Figuur 17: Foto HMS Briljant (WNS, 1937)

- Het militaire vliegtuig *Motor Launch 561 HM* kreeg pas eerder dit jaar, op 6 april 2018, de beschermde status en wordt erkend als oorlogsgraf.

Nota: Tijdens een archeologisch onderzoek in het kader van de aanleg van Nemolink, een hoogspanningskabel tussen Groot-Brittannië en België, zijn in juni en juli 2017 stukken van een vliegtuig gevonden. Het zou onder andere gaan om een schroef van een turbo, aluminiumplaten en een beschermplaat tegen munitie van een Amerikaanse bommenwerper van het type Boeing B17-G uit de Tweede Wereldoorlog. Deze maakt – hoogstwaarschijnlijk na het repatriëren van de stoffelijke overschotten – een grote kans om ook beschermd te worden vanwege zijn historische waarde (Belga, 2018).

- Een tweede uit de laatste lichting beschermde wrakken is het patrouilleschip *Branlebas* uit de Eerste Wereldoorlog. Haar propeller raakte in 1915 een mijn waardoor vijf officieren omkwamen en het schip snel water maakte. De overige 65 officieren en matrozen konden worden gered door de *Obusier*. Desalniettemin wordt deze als oorlogsgraf beschouwd.



Figuur 18: Torpilleur Branlebas (Decaluwé e.a., 2018)

- De laatste van deze reeks van drie is de eerder besproken *UB-29* (zie figuur 1) uit WOI die ook op 6 april dit jaar beschermd werd. Deze Duitse duikboot werd in september 2017 ontdekt en later dat jaar geïdentificeerd door onder meer een plaatje op een van de torpedobuizen.

(De Redactie, 2014; Decaluwé, et al., 2018; Nieuwsblad, 2017; VLIZ, z.d.)

3.4 Keuze van wrakken

Sommige scheepswrakken zijn slechts veertig jaar geleden gezonken en zijn reeds ernstig toegetakeld door corrosie, anderen liggen al meer dan honderd jaar op de zeebodem en zijn

nog steeds goed bewaard. De eerste grote vraag is logischerwijs welke parameters de corrosiesnelheid van schepen onder water bepalen. De volgende logische doelstelling is het bestuderen van de haalbaarheid om de onderwatercorrosie tegen te werken of zelfs misschien volledig te stoppen. Het heeft immers geen zin een wrak cultureel erfgoed te maken als men niet kan garanderen dat het nog ettelijke jaren bewaard zal blijven.

Het verschil in corrosiesnelheid kan het gevolg zijn van de leeftijd die het schip had op de moment dat het zonk. Ook verschil in constructiestaal dat gebruikt werd en gebruikte coatings en verven zijn factoren die niet vergeten mogen worden. Maar ook de condities waaraan het wrak is onderworpen onder water kunnen erg variëren. Vermoedelijk is het een combinatie van al deze factoren die de uiteindelijke corrosiesnelheid zal bepalen. In eerste instantie zullen de onderwatercondities van de wrakken vergeleken worden. Pas later zullen dan de gebruikte scheepsstalen worden vergeleken en in een verder stadium van het onderzoek zullen eventueel de conservatiemogelijkheden worden onderzocht.

Om de corrosiesnelheid van scheepswrakken te kunnen modelleren in het verdere onderzoek moeten de wrakken enerzijds zowel geografisch gespreid liggen, als elkaar chronologisch met voldoende tussentijd opvolgen. We hopen een significant verschil in functie van de tijd en de plaats vast te stellen. Anderzijds worden er ook best wrakken vergeleken die op hetzelfde moment zonken en nagenoeg op dezelfde plaats liggen teneinde de resultaten van het model te kunnen toetsen (*bench marking*) en betrouwbare gemiddelde waarden te verkrijgen. Hiermee wordt dan een database met alle verzamelde data per wrak aangelegd welke dan later zal worden geanalyseerd om vervolgens de significante parameters te extraheren.

Het Agentschap Onroerend Erfgoed selecteerde daarom in december 2014 zeventien scheepswrakken uit haar bestaande database (www.maritieme-archeologie.be). Teneinde deze database werkbaar en overzichtelijk te houden zal er in dit eerste deel van het onderzoek een selectie van tien scheepswrakken worden gemaakt die gemakkelijk bereikbaar zijn en waarvan voldoende data beschikbaar zijn. Deze selectie gebeurde o.a. op basis van een gemiddelde, goede of uitstekende conservatiegraad; het type schip; de vermoedelijke beschikbaarheid van data i.v.m. de bouw; de datum waarop het schip zonk en natuurlijk ook de geografische ligging.

Die ligging is enerzijds belangrijk om te vergelijken of de data variëren met de spreiding, maar is anderzijds eveneens belangrijk voor de slaagkans van een duik. Het onderzoek onder

water is sterk afhankelijk van de zichtbaarheid. Zo kent de Oostelijke hoek van de Belgische Territoriale Zee nagenoeg altijd een barslechte zichtbaarheid, terwijl die vanaf 25 à 30 mijl uit de kust meestal goed is. Het gebied daartussen varieert met de weersomstandigheden maar is jaarlijks na de bloei in het voorjaar meestal optimaal (Van Haelst).

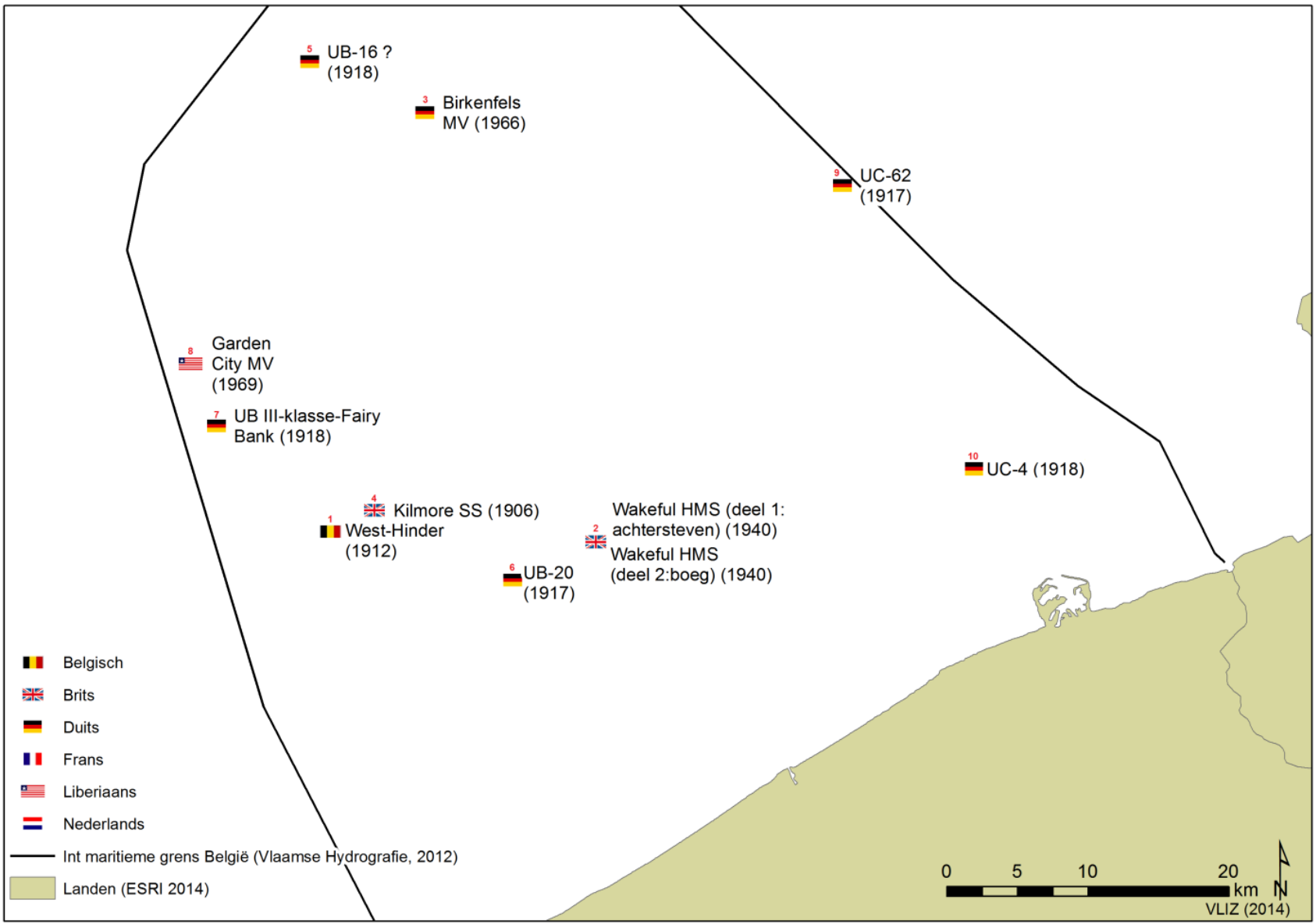
Omdat de duikboten, ofwel U-boten, uit de wereldoorlogen een groot historisch belang hebben, zijn minstens de helft van de gekozen wrakken ook U-boten. Deze onderzeeërs vormen door hun gelijkaardige bouw (beschikbaarheid constructieplannen en/of -gegevens), en omdat zij in dezelfde periode zijn gezonken, een ideale vergelijkingsbasis.

3.5 Onze keuze gemotiveerd

- Het eerste wrak dat werd gekozen is de *West-Hinder*. Het Belgische lichtschip kwam meer dan honderd jaar geleden in aanvaring met het stoomschip Ekbata waarbij een tiental opvarenden stierven. Het is goed geconserveerd en werd reeds aanvaard als cultureel erfgoed. Het is daarom ook belangrijk om hierover exacte data te bekomen.
- Het tweede geselecteerde wrak is de *HMS Wakeful*. Deze Britse duikboot is ook goed geconserveerd en werd eveneens aanvaard als cultureel erfgoed. Het spreekt voor zich dat hierover dan ook exacte data moeten worden bekomen. Theoretisch zou men steeds over scheepswraksites moeten spreken i.p.v. scheepswrakken. Dit schip is bijvoorbeeld in volle vaart in tweeën getorpedeerd bij de militaire ontruiming van Duinkerke en de posities van de boeg en het achterstevan verschillen bijgevolg ietwat. Dit erkende oorlogsgraf heeft dan ook een belangrijke historische waarde.
- Een volgend gekozen wrak is de Duitse duikboot *UB-16* van het type UB1. Deze is uitstekend geconserveerd en is gemakkelijk te examineren in water met een bijna steeds goede zichtbaarheid. De Belgische Noordzee heeft nl. vaak last van slechte zichtbaarheid en kan volgens ervaren duikers worden opgedeeld in drie ruwe zones: een zone waar steeds een hele slechte zichtbaarheid heerst (felgroen) rond de haven van Zeebrugge, een zone waar pas na de bloei een goede zichtbaarheid is (lichtgroen, tot ca. 20 mijl uit de kust) en een zone waar steeds een relatief goede zichtbaarheid wordt waargenomen (lichtblauw). De wrakken liggen ook tussen de verschillende zandbanken en tussen deze banken is een duidelijk verschil in soort begroeiing en dus ook zichtbaarheid te merken.
- Vervolgens werd nog een uitstekend bewaarde Duitse duikboot type UB2 uitgekozen: de *UB-20* (Termote, 2013). Deze ligt in de zone waar de zichtbaarheid pas goed wordt na de

bloei, maar is feller begroeid dan andere wrakken. Deze is ook ooit in tweeën gedynamiteerd om binnenin te kunnen kijken en zou bijgevolg gevoelsmatig meer onderhevig moeten zijn aan corrosie.

- De vierde Duitse duikboot die aan het lijstje werd toegevoegd is de **UB-III**-klasse-Fairy. Deze is goed geconserveerd, heeft een gemakkelijke ligging in de zone met steeds goede zichtbaarheid en is ook een goede vergelijking met de andere U-boten.
- De **UC-62** is ook een Duitse duikboot die goed bewaard is gebleven. Deze heeft een hoge bedekkingsgraad, dus zal daar hoogstwaarschijnlijk minder gecorrodeerd zijn. Vooral de geografische ligging is goed. Zo is er spreiding van de data aangezien deze aan de hele andere kant van het kustwater ligt dan bijvoorbeeld de UB-III.
- De **UC-4** is de laatste van de vijf gekozen Duitse U-boten die allemaal 96 à 97 jaar geleden zonken. Deze is goed geconserveerd maar ligt echter wel in de zone met heel beperkte zichtbaarheid voor de haven van Zeebrugge. De UC-4 is voornamelijk gekozen voor de geografische ligging (spreiding).
- De **MV Birkenfels** is een Duitse bulkcarrier die goed is geconserveerd en ligt er volgens verschillende duikers mooi bij. Na een aanvaring in dichte mist zonk het schip 49 jaar geleden met nog 100 ton brandstof aan boord en ook van de 8750 ton ijzererts zou nog een heel groot deel in het schip bewaard zijn gebleven.
- Ook de **MV Garden City** werd weerhouden. Deze Britse bulkcarrier is 46 jaar geleden gezonken na een aanvaring – een goede vergelijkbare tijdsspanne met de Birkenfels MV – maar is slechts in gemiddelde staat. De twee wrakken liggen nochtans in hetzelfde zichtbaarheidsgebied, dus worden hier verschillen gezocht die hopelijk direct zullen wijzen op de parameter(s) die de corrosiesnelheid beïnvloeden.
- Tenslotte werd ook nog de **SS Kilmore** aan de lijst toegevoegd. Een Britse bulkcarrier die meer dan 108 jaar geleden zonk en toch uitstekend bewaard is gebleven. Dit wrak is meer dan twee maal zo oud als de Garden City en ligt er heel mooi bij i.t.t. die vorige.



Figuur 19: Kaart met geografische ligging van de 10 gekozen scheepswrakken (VLIZ, 2015b)

Tabel 1: Samenvattende tabel wrakkeuze (eigen werk)

Scheepswrak	Waarom
West-Hinder	Goed geconserveerd reeds Cultureel Erfgoed Belgisch lichtschip
Wakeful HMS (boeg + achterstevan)	Goed geconserveerd reeds Cultureel Erfgoed Britse duikboot
UB-16	Uitstekend geconserveerd Duitse duikboot (UB1) Steeds goede zichtbaarheid
UB-20	Uitstekend geconserveerd Duitse duikboot (UB2) Goede zichtbaarheid na de bloei Feller begroeid dan andere wrakken In 2 gedynamiteerd (corrosiepatroon)
UB III-klasse-Fairy	Goed geconserveerd Duitse duikboot (UB3) Steeds goede zichtbaarheid Geografische ligging (spreiding) ⇒ goede vergelijkbaarheid U-boten
UC-62	Goed geconserveerd Duitse duikboot (UC2) Sterke bedekkingsgraad (zand ⇒ minder corrosie?) Geografische ligging (spreiding)
UC-4	Goed geconserveerd Duitse duikboot (UC1) Geografische ligging (spreiding maar voor Zeebrugge ⇒ beperkt zicht)
Birkenfels MV	Goed geconserveerd Duitse bulkcarrier Nog veel lading en brandstof aan boord Steeds goede zichtbaarheid
Garden City MV	Gemiddeld geconserveerd Liberiaanse bulkcarrier Gezonken rond zelfde tijd ⇒ verschillen? Steeds goede zichtbaarheid
Kilmore SS	Uitstekend geconserveerd Britse bulkcarrier 108 jaar geleden gezonken, ligt er toch heel mooi bij, beter dan vorige twee bulkcarriers ⇒ verschillen?

4. Corrosie

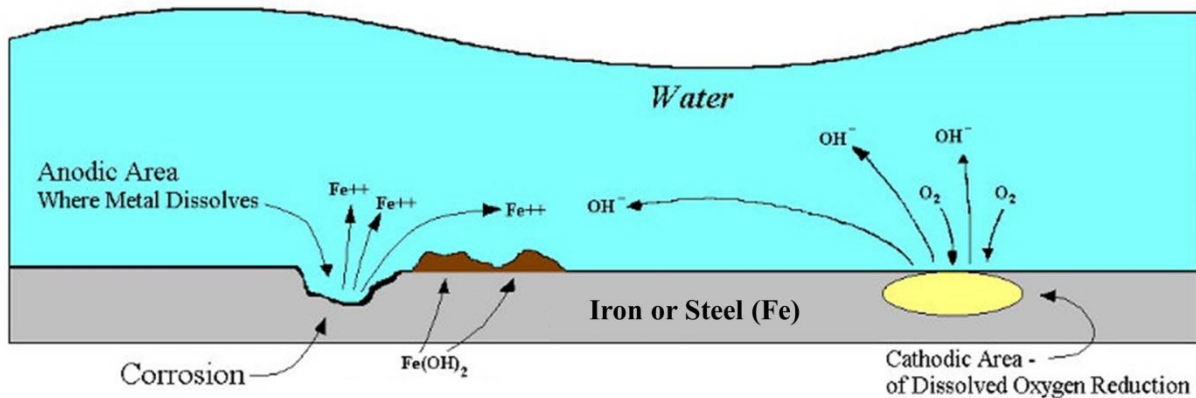
De corrosie van staal is het resultaat van een hele reeks elektrochemische reacties die zich afspelen aan het metaaloppervlak. Deze reacties zijn veranderlijk en bijzonder volatiel in functie van de milieucondities. Om het corrosieproces beter te begrijpen is het nuttig om het procedé sterk te vereenvoudigen door o.a. de omgevingsfactoren even buiten beschouwing te laten. In deze paper zal daarom eerst gezocht worden naar de verschillende fasen van het corrosieproces en pas later zullen de verschillende stappen verder worden toegelicht. Ook de invloed van de omgevingsfactoren en dergelijke zullen nadien besproken worden.

4.1 Oxidatie van het metaal

In de natuur streven metalen ernaar om een zo laag mogelijk energieprij (enthalpie) te hebben, hun meest stabiele toestand. Daarom komen deze meestal voor in hun oxide- of sulfidevorm, als erts of roest. Om staal te vervaardigen om vervolgens schepen te construeren moeten de metaalionen bijgevolg reduceren, i.e. elektronen opnemen en dus een hoger energieniveau bereiken. Het vrije metaal verkeert vanaf dan in een metastabiele toestand en zal spontaan terug naar zijn stabielere, geoxideerde vorm terugkeren wanneer het met rust gelaten wordt. De drang om elektronen af te staan is het drijvende mechanisme voor alle corrosieprocessen (Potters, 2015).

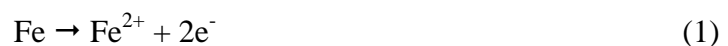
Er bestaan vele verschillende types van corrosie, maar wanneer het gaat om de corrosie van scheepsstaal onder water is enkel de uniforme corrosie nog van groot belang. Op de zeebodem heersen er namelijk geen hoge temperaturen en doorgaans ook geen significant zure of basische milieus waardoor onder andere chemische corrosie en stresscorrosie uitgesloten kunnen worden. De uniforme corrosie van het scheepsstaal beslaat het hele metaaloppervlak of minstens een groot deel van het metaal dat ontbloot is. De corrosie verloopt gelijkmatig en diens snelheid hangt rechtstreeks af van het metaal en de omgeving (Roberge, 1999).

De uniforme corrosie van scheepsstaal is natte elektrochemische corrosie die het best kan worden voorgesteld door een ijzer-corrosiecel. Elke corrosiecel heeft vier elementen nodig om te werken: een kathode, een anode, een metallische verbinding tussen beide en een elektrolyt.



Figuur 20: IJzer-corrosiecel onder water (Waterhouse Corporation, z.d.)

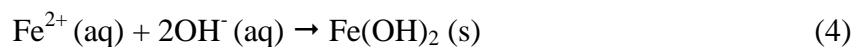
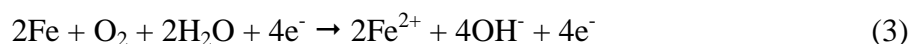
Zoals af te leiden valt uit de bovenstaande afbeelding fungeert het zeewater als elektrolyt en het scheepsstaal als metallische verbinding. Aan het oppervlak ontstaan anodische en kathodische gebieden. Elke microscopisch kleine plaats op het metaaloppervlak waar het metallische ijzer wordt geoxideerd werkt als anode. Het ijzer wordt er als volgt geoxideerd:



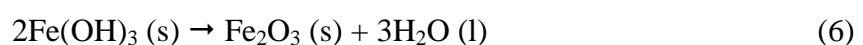
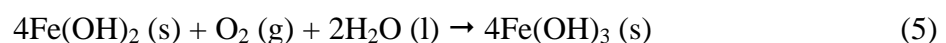
De ijzerionen (Fe^{2+}) lossen op in het zeewater terwijl de elektronen (e^-) zich via de staalplaat verplaatsen naar de kathode. Dit zijn de plaatsen waar de opgeloste zuurstof (O_2) reduceert en samen met water (H_2O) combineert tot hydroxyde-anionen volgens de reactie:



De twee gevormde ijzerionen die nu opgelost zijn in het zeewater vormen dan het slecht oplosbare groene ijzer(II)hydroxide dat vervolgens neerslaat:



Ijzer met oxidatiegetal II (Fe^{2+}) kan echter nog een elektron afstaan en zo nog stabiel worden. Daarom zal de bekomen neerslag nog verder oxideren waarbij het ijzer oxidatiegetal III krijgt (Fe^{3+}). In eerste instantie leidt dat tot ijzer(III) hydroxide en daarna tot de onoplosbare bruine roest, ijzer(III)oxide:



(Difference Wiki, z.d.; Nave, 2005)

De uniforme corrosie is voor beide oxidatiestappen logischerwijze afhankelijk van de hoeveelheid opgeloste zuurstof in het zeewater. Dat is ook duidelijk zichtbaar in de voorgaande chemische reacties (2) tot en met (5). Uniforme corrosie zal naarmate het corrosieproces vordert een onoplosbare bruine roest laag per laag opbouwen totdat deze laatste een barrière gaat vormen tussen het metaaloppervlak en de opgeloste zuurstof in het zeewater. Vanaf dan moet de opgeloste zuurstof zich hier een weg door banen. Nu wordt de snelheid waarmee de opgeloste zuurstof tot het metaaloppervlak geraakt het controlerende mechanisme. De corrosiesnelheid zal nu steeds meer afnemen naarmate de corrosielaag dikker wordt.

4.2 Corrosieproces

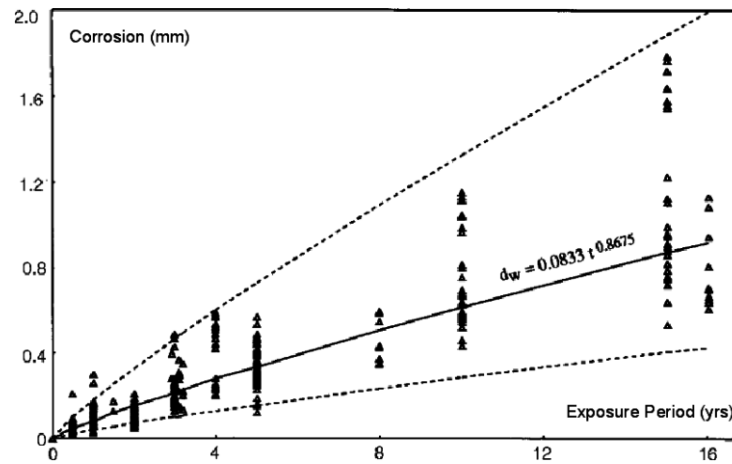
Zoals eerder uiteengezet zou de resterende levenstermijn van een scheepswrak bepaald worden door middel van een eenvoudige berekening – het plaatdikteverlies per jaar. Wanneer de originele plaatdikte kan gedetermineerd worden op basis van originele bouwplannen en ook de huidige plaatdikte in situ gemeten wordt, kan het plaatdikteverlies berekend worden. De datum wanneer het schip verging is meestal vrij nauwkeurig bekend, dus wordt de verstreken tijd dat het scheepswrak zich al op de zeebodem bevindt ook vrij snel gedetermineerd. De formule

$$\frac{d_{\text{zonk}} - d_{\text{nu}}}{t_{\text{zonk}} - t_{\text{nu}}} = d_{\text{verlies}}/t \quad (7)$$

vat deze berekening mooi samen. Opgemerkt kan worden dat deze berekening ervan uit gaat dat het plaatdikteverlies en bijgevolg de corrosiesnelheid een lineair proces doorheen de tijd zou zijn. Helaas is dat niet het geval en blijkt het corrosieproces in verschillende fasen te verlopen (Melchers & Ahammed, 1994).

In het verleden zijn er reeds heel wat pogingen ondernomen om modellen op te stellen die de corrosieontwikkeling waarheidsgetrouw weerspiegelen. Sommige wetenschappers vertrokken vanuit een theoretische benadering van het corrosieproces terwijl anderen kozen voor een bijna volledig empirisch model. Bijvoorbeeld het probabilistische corrosiemodel van Paik et al (Paik e.a., 1998). De meesten gingen ervan uit dat de oxidatie van het metaal het controlerende mechanisme was en dat de corrosiesnelheid bijgevolg afneemt naarmate de tijd verstrijkt. De roestlaag wordt namelijk steeds dikker en de zuurstoftoevoer naar het metaaloppervlak zal zo moeizamer gaan verlopen. Maar deze modellen – waarbij grondige

vereenvoudigingen aan randvoorwaarden nodig waren – bleken echter moeilijk toepasbaar op de praktische *in situ* gemeten waarden en geen van allen bleken ze echt waarheidsgetrouw voor voorspellingen op lange termijn (Melchers, 2008).



Figuur 21: Spreiding data corrosieverlies ondergedompeld staal tot 1994 (Melchers, 2008)

Sommigen stelden voorop dat het corrosieproces niet volledig te vatten is en een accuraat model daarom enkel 100% empirisch kan worden gedetermineerd uit datasets. Maar de data vergaard door classificatiemaatschappijen e.a. zijn helaas zelden of nooit vergezeld door de omstandigheden waarin deze gemeten zijn. Daarom hebben die datasets een te grote spreiding (zie figuur 21) om een degelijk model te verkrijgen (Gardiner & Melchers, 2003; Yamamoto & Ikegami, 1998). Parameters zoals de watertemperatuur, de watervervuiling, de opgeloste zuurstof, de watersnelheid, het zoutgehalte, zouden daarbij in acht genomen moeten worden. Ook is het zeewater zelf een mengeling van biologische en chemische componenten die elk vooral op de lange termijn een belangrijke of minder belangrijke rol spelen. Zoals vermoed kan worden hebben deze omstandigheden een behoorlijk significante invloed op het corrosieproces. Dit wordt later in dit eindwerk verder behandeld.

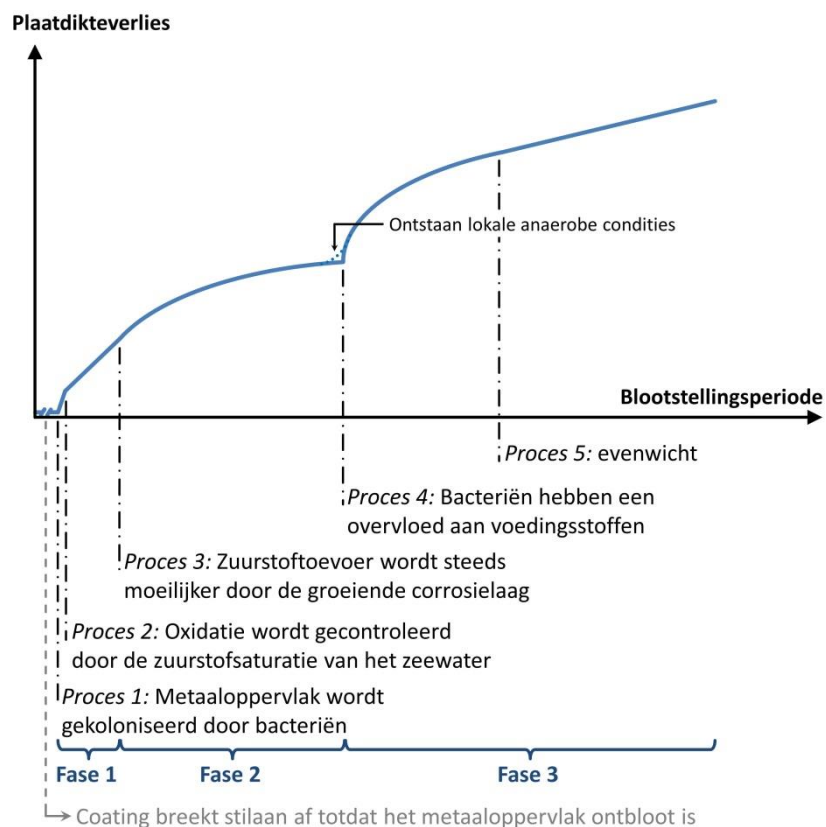
Om een waarheidsgetrouw model voor het corrosieproces van staal onder water op te stellen is het van primordiaal belang om te begrijpen hoe dit proces verloopt. Wanneer de coating van het (scheeps-)staal begint af te breken, begint logischerwijze de corrosie. Het corrosieproces wordt ook niet uitsluitend gecontroleerd door de anorganische elektrochemische roestvorming zoals de meesten deze kennen. De microbiële invloed blijkt veel groter dan men weleer dacht. Niet alleen scheepswrakken zijn onderhevig aan dit corrosieproces, maar ook de onderwaterdelen van havenstructuren en offshore installaties

worden blootgesteld aan het soms extreme maritieme klimaat. Uit Brits onderzoek blijkt dat 90% van de havenstructuren lijdt aan microbieel beïnvloede corrosie – oftewel MIC⁶ – en dat dit een bepalende factor is voor hun levensduur (van der Mijle Meijer e.a., 2014).

Het corrosieproces verandert met de tijd naarmate de corrosieproducten evolueren en opstapelen. Hierdoor variëren de omstandigheden aan het corroderende metaaloppervlak en doorloopt het corrosieproces verschillende fasen (Melchers, 2008). Wanneer het corrosieproces sterk vereenvoudigd wordt kan men ruwweg 3 fasen onderscheiden:

- fase 1 wanneer er nog geen biofilm aanwezig is,
- fase 2 wanneer er een dunne biofilm gevormd wordt,
- fase 3 wanneer de biofilm aangedikt is en ook macro-organismen bevat (Li e.a., 2013).

Deze 3 fasen worden onderverdeeld in 5 processen (zie onderstaande figuur 22) en zullen hieronder verder worden besproken (Melchers, 2003a).



Figuur 22: Corrosiemodel voor scheepsstaal ondergedompeld in zeewater (Melchers, 2008)

⁶ Microbial Influenced Corrosion, oftewel microbieel beïnvloede corrosie, is een corrosieproces waarbij een bepaalde set aan milieucondities en omgevingsfactoren de corrosiesnelheid en types corrosie sterk beïnvloedt. De aanwezigheid en activiteit van bepaalde micro-organismen leidt tot versnelde en onverwachte corrosie. (Little & Lee, 2007)

Fase 1 is een relatief korte fase waarin twee processen (1 & 2) elkaar snel opvolgen. Als stukken naakt staal, na het degraderen van de coating of in geval van mechanische beschadiging, in contact komen met zeewater zullen allereerst heel lokaal bacteriën deze stukken koloniseren en de basis van een biofilm vormen. Dit eerste proces heeft slechts effect op korte termijn. Men spreekt over dagen tot weken waardoor deze fase een verwaarloosbaar effect heeft op lange termijn en bijgevolg praktisch genegeerd mag worden bij het verder modelleren (Beech & Sunner, 2004). Ook zal de oxidatie van het ijzer in het metaal onmiddellijk tot stand komen. Dit is het tweede proces waarbij de typische roodbruine roest wordt gevormd volgens de volgende chemische reactie:



De reactie toont onmiddellijk aan dat onder water – waar H_2O in overvloed aanwezig is – de reactie -oftewel corrosiesnelheid- gecontroleerd wordt door de toevoer van opgeloste zuurstof in het water. Hoe meer zuurstof er opgelost is in het water, hoe sneller de zuurstof bij het metaaloppervlak is en hoe hoger de corrosiesnelheid zal oplopen.

Vervolgens zullen de roestlagen zich opstapelen totdat fase 2 aanbreekt en daarmee ook het derde proces start. In deze fase wordt het corrosieproces gecontroleerd door de snelheid waarmee de zuurstof door de roestlagen en biofilm tot bij het metaaloppervlak kan komen. Naarmate de corrosielaag, i.e. de verschillende roestlagen op elkaar en de biofilm, dikker wordt, zal de toevoer van de zuurstof steeds trager verlopen en de corrosiesnelheid vertragen. Dit proces wordt passivatie genoemd (Melchers, 2008). In dezelfde periode verschijnen ook macro-organismen dankzij de goed gevormde voedingsbodem. Dit proces verloopt verder totdat de biofilm een bepaalde dikte bereikt en de zuurstoftoevoer op bepaalde delen van het metaaloppervlak gereduceerd en tenslotte volledig wordt afgesneden.

Bij de voorgaande chemische reactie kan de vraag gesteld worden waarom het zout in het water (NaCl) niet in acht genomen wordt, terwijl geweten is dat het chloride-ion – Cl^- dat vrijkomt bij het oplossen in water – zeer agressief is. Het reageert namelijk met de Fe^{3+} ijzerionen tot FeCl_3 . Dit agressieve zout reageert vervolgens nog verder tot FeCl_2 . Deze ijzerchloriden worden echter zelden gedetecteerd in roestlagen waardoor vermoed wordt dat deze enkel als katalysatoren dienen en vervolgens weer oplossen (Gilberg & Seeley, 1981).

Nu de corrosielaag en biofilm zo dik zijn geworden dat de zuurstoftoevoer minimaal wordt en de bacteriën erin goed tieren door voldoende voedingsstoffen, breekt fase 3 aan. Deze fase begint met het vierde proces waarbij er door de dik aangegroeide biofilm van micro- en

macro-organismen anaerobe gebieden op het metaaloppervlak ontstaan. Door microbiële activiteit in deze gebieden ontstaan er dan sterk corrosieve omstandigheden waardoor de corrosiesnelheid opnieuw significant verhoogt. Op het metaaloppervlak zorgen bacteriën er dan voor dat anaerobe gebieden anodisch worden terwijl daarnaast aerobe gebieden als kathode fungeren (Little & Lee, 2007).

Tenslotte ontstaat er een soort evenwicht en breekt het vijfde en laatste proces aan. In het begin van fase 3, tijdens het vierde proces, is er een overvloed aan voedingsstoffen voor de bacteriën en loopt de corrosiesnelheid enorm hoog op. Maar naarmate dit proces vordert raken de voedingsstoffen in de biofilm uitgeput en moeten deze weer worden aangemaakt. De corrosiesnelheid is nu niet meer afhankelijk van het aantal bacteriën maar van het metabolisme van deze bacteriën en de aanvoer van voedingsstoffen. Ook zal de corrosielaag niet steeds dikker worden. Door de wrijving van het stromende water zal deze ook wat weg eroderen en zal deze laag quasi even dik blijven. Het vijfde en laatste proces breekt dus aan wanneer het evenwicht is bereikt en bijgevolg de corrosiesnelheid constant/lineair wordt (Melchers, 2008). Het verschil in omstandigheden waarin de scheepswrakken in onze Noordzee zich bevinden is, wanneer men jaargemiddelden vergelijkt, nihil (Hernandez, z.d.). Daarom zal het gemiddelde metabolisme van de bacteriën per jaar constant zijn, zal de aanvoer van voedingsstoffen gelijk zijn en zal ook de erosie door de stroming van het zeewater e.d. gelijk blijven.

4.3 Vorming van de biofilm

Van zodra het ontblote metaaloppervlak in contact komt met onsteriel water, zeewater in dit geval, start de vorming van de biofilm. Dit gebeurt reeds tijdens proces 1 (zie figuur 22). Organische en anorganische stoffen accumuleren zich dan op het metaaloppervlak waardoor micro-organismen worden aangetrokken. Het is nog steeds onduidelijk of deze accumulatie van (an)organische stoffen noodzakelijk is voor de vorming van een biofilm, maar het is zeker dat het een gunstig effect heeft voor een snellere groei van de micro-organismen (van der Mijle Meijer e.a., 2014).

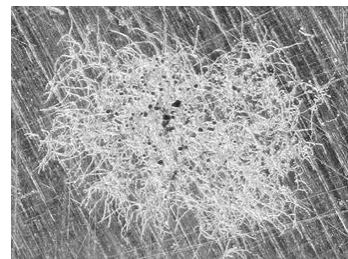
Micro-organismen zijn organismen die niet zichtbaar zijn met het blote oog. Deze worden onderverdeeld in microalgen, fungi en bacteriën. Om te overleven, te groeien en zich voort te planten hebben ze elk water, voeding en elektronacceptoren nodig. Hun voeding kan bestaan

uit koolstof (C), stikstof (N₂), fosfor (P) en zwavel (S). Mogelijke elektronacceptoren aan het substraatoppervlak zijn zuurstof (O₂), sulfaat (SO₄²⁻), nitraat (NO₃⁻), nitriet (NO₂⁻), koolstofdioxide (CO₂), Mn⁴⁺, Cr⁶⁻ en Fe³⁺.

Micro-organismen kunnen zich hechten aan een substraat, in dit geval het naakte metaaloppervlak, en zij vormen daarbij de basis van een biofilm. Ten eerste zijn microalgen ééncellige fotosynthetische organismen die in licht zuurstof produceren en in het donker zuurstof nodig hebben. De meest voorkomende zijn diatomeeën, kiezelwieren, die ook organische zuren afscheiden wat een voedingsbodem is voor grotere aangroei, macro-organismen. Ten tweede zijn er de fungi. Deze doen niet aan fotosynthese en hun mycelium – vegetatieve structuur – groeit tot macroscopische grootte. Ze nemen organisch materiaal op en produceren eveneens organische zuren.



Figuur 23: Kieselwieren
(VLIZ, 2015c)



Figuur 24: Fungi op een metaaloppervlak
(Little & Lee, 2007)

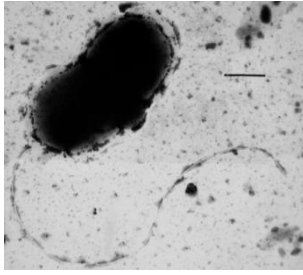
De derde zijn de bacteriën en deze blijken de belangrijkste invloed te hebben op de corrosie. Zij vermenigvuldigen zich door celsplitsing en vormen zo kolonies die worden gegroepeerd op basis van hun finale elektronacceptor. Aerobe bacteriën gebruiken zuurstof als finale elektronacceptor, terwijl anaerobe bacteriën bijvoorbeeld een sulfaat of een metaal zullen reduceren (Little & Lee, 2007).

Tabel 2: Soorten ademhaling van organismen met voorbeelden van elektronacceptoren (Little & Lee, 2007)

Elektronacceptor	Product	Organismen
<i>Aerobe ademhaling</i>		
O ₂	H ₂ O	Strikt of facultatief aerobe organismen
<i>Anaerobe ademhaling</i>		
NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻ , N ₂ O, N ₂	Denitrificerende bacteriën
S ²⁻	SO ₄ ²⁻	Strikt anaerobe bacteriën, SRB
S	S ²⁻	Facultatieve en strikt anaerobe bacteriën
CO ₂	Acetaat CH ₃ COO ⁻	Acetogene bacteriën
	Methaan CH ₄	Methanogene bacteriën
Fe ³⁺ , Mn ⁴⁺ , Cr ⁶⁺	Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , Cr ³⁺	Metaal reducerende bacteriën

De typische bacteriën die een biofilm vormen behoren tot de groep van de pseudomonaden. Deze bacteriën scheiden overvloedig veel slijm af – extracellulaire polysacchariden, het bacteriekapsel waarmee ze zichzelf beschermen tegen de buitenwereld. Dit is nodig om structuur te geven aan de biofilm, maar het is tegelijk een proces dat heel wat energie vereist. Deze bacteriën zijn daarom ook nagenoeg allemaal aerobe micro-organismen. De zuurstofconsumptie van deze groeiende biofilm kan na verloop van tijd zo groot worden dat er geen zuurstof meer door de biofilm en corrosielaag tot bij het metaaloppervlak geraakt. Zo ontstaan er anaerobe gebieden dichtbij het metaaloppervlak (Little & Lee, 2007; Wiersema, z.d.).

Het slijm en de andere stoffen die de pseudomonadische micro-organismen afscheiden zijn een ideale voedingsbodem voor de kolonisatie van andere micro- en macro-organismen. De families micro- & macro-organismen die het corrosieproces bevorderen zijn heel ruim. Naarmate onze kennis inzake MIC uitbreidt zien we die groepen groeien. Typische vertegenwoordigers van beide families zijn respectievelijk de sulfaat reducerende bacteriën (SRB) (figuur 25) in de anaerobe gebieden en zeepokken (figuur 26) aan de waterzijde van de biofilm. De macro-organismen bestaan uit twee morfologische types: de zachte zonder exoskelet (bv. wieren, koralen, sponzen) en de harde met exoskelet zoals een schaal (bv. Mosselen) (“Marine Macrofouling and Corrosion of Some Engineering Alloys in Arabian Gulf Seawater”, 2000).



Figuur 25: SRB
(Schülke & Mayr GmbH, 2018)

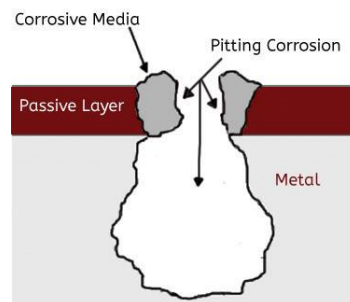


Figuur 26: Zeepokken
(Scheldeschorren, 2017)

De macro-organismen zullen later in deze paper verder worden besproken i.v.m. hun functie tot eventuele bescherming of indicatie van de toestand van het metaal.

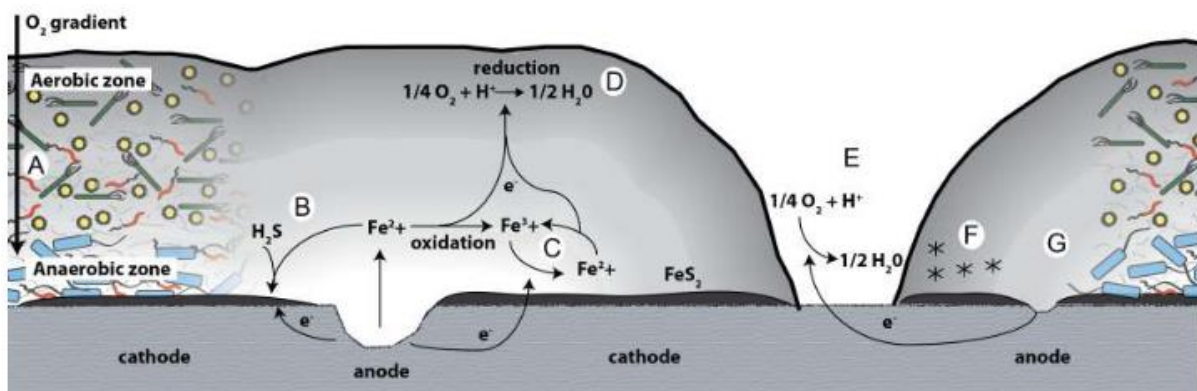
4.4 MIC

Niet alleen scheepswrakken zijn onderhevig aan corrosie, maar ook de onderwaterdelen van havenstructuren en offshore installaties worden blootgesteld aan het soms extreme maritieme klimaat. Volgens een Britse studie lijdt 90% van alle havenstructuren, aan microbiële corrosie – MIC oftewel *microbial influenced corrosion* (van der Mijle Meijer e.a., 2014). Een Amerikaanse studie stipuleert dat de kost die de corrosie van staal met zich meebrengt 1 tot 5% van het Amerikaanse BNP zou bedragen waarvan 50% microbiële corrosie als oorzaak zou hebben (Flemming, 1996; Roberge, 2005). Het is dan ook niet verwonderlijk dat MIC de belangrijkste factor blijkt bij het bepalen van de resterende leeftijd van een wrak onder water. Microbiële corrosie is corrosie veroorzaakt of versterkt door de aanwezigheid en de activiteiten van micro-organismen. Het veroorzaakt geen aparte corrosiemechanismen, maar versterkt corrosiemechanismen of maakt deze mogelijk door het creëren van een aparte set milieucondities. Zo kan MIC heel lokaal corrosie in de hand werken (putcorrosie), voor verhoogde erosie corrosie zorgen, versnelde galvanische corrosie veroorzaken of bijvoorbeeld ook waterstofbrosheid teweegbrengen (Little & Lee, 2007).



Figuur 27: Putcorrosie (Extreme Bolt & Fastener, 2016)

Een biofilm accumuleert vele organische en anorganische stoffen en maakt ook eigen voedingsstoffen aan. Wanneer de film dik genoeg is kan hij volledig zelfvoorzienend zijn, zelfs wanneer de voedingsstoffen aan de waterzijde heel gering zijn. Daarom kan de corrosie vaak onverwacht toch verder gaan en/of zelfs versnellen. De complexiteit van de interactie tussen het metaal en de micro-organismen zorgt er echter voor dat er vele mogelijke mechanismen zijn volgens dewelke een biofilm werkt. Men is het er nog steeds niet over eens of er wel één dominant mechanisme te determineren is, of dat er verschillende zijn. Die laatste hypothese lijkt veel logischer aangezien microbiële corrosie in enorm veel verschillende milieucondities voorkomt en een biofilm uit een brede waaier aan organismen kan bestaan. Het is dus belangrijk te beseffen dat de aanwezigheid van een bepaald mechanisme een ander mogelijk mechanisme in een verschillend geval niet uitsluit (Beech & Gaylarde, 1999; Li e.a., 2013). Een biofilm kan de diffusie van chemische stoffen sterk hinderen, zowel in- als uitwaarts. Daardoor ontstaan er vaak lokale omstandigheden die sterk verschillen van de milieucondities eromheen (Beech & Sunner, 2004). Deze lokale omstandigheden kunnen op verschillende wijzen de onderliggende corrosie sterk beïnvloeden. Aan de hand van figuur 28 (onderstaand) zal getracht worden enkele mechanismen te verduidelijken.



Figuur 28: Corrosiemechanismen in een biofilm (Li e.a., 2013)

In een zuurstofrijke omgeving kan de zuurstofconcentratie doorheen de biofilm toch sterk variëren. De zuurstofgradiënt ontstaat door de diffusie van zuurstof die moeilijker wordt naarmate de biofilm aandikt en door de consumptie van O₂ door het metabolisme van aerobe bacteriën. Bijgevolg kan er dus in een aerob milieu onder een biofilm toch een anaerobe regio ontstaan. Het ontstaan van deze anaerobe zones (A) maakt de snelle toename van sulfaat reducerende bacteriën en andere anaerobe corrosieversterkende organismen mogelijk. Het bestaan van een anaeroob gebied naast een aerobe zone aan het metaaloppervlak noemt men

concentratiecellen. De zuurstofrijke/aerobe kant zal kathodisch worden en de zuurstofarme/anaerobe kant zal anodisch wegcorroderen.

De biofilm kan ook concentraties exponentieel verhogen wanneer het bijvoorbeeld de diffusie van corrosieve chemicaliën belet. Omdat alle zuurstof vaak wordt opgebruikt in het bovenste deel van de biofilm, kunnen anaerobe bacteriën daaronder zoals SRB welig tieren met de productie van sterk corrosieve metabolieten zoals waterstofsulfide (H_2S) tot gevolg. SRB produceren namelijk H_2S , wat veel krachtiger is wanneer het ingekapseld zit onder een biofilm (**B**) dan wanneer het vrij zou diffuseren in het zeewater. Het is namelijk een mogelijke katalysator voor waterstofbrosheid (*hydrogen embrittlement*) van het metaal en het zorgt ook voor de vorming van ijzersulfide-mineralen die de corrosiesnelheid doen stijgen. Een experiment King et al heeft uitgewezen dat er een groot verschil ontstaat in sulfideconcentratie (S^{2-}) wanneer er een gelijke hoeveelheid zwavel werd toegevoegd aan een kolonie SRB of aan een steriel medium. In het eerste geval werden de sulfiden onderaan de biofilm geproduceerd en vastgehouden, in het tweede geval diffuseerden deze gewoon in het zeewater terwijl deze sulfiden nodig zijn als voedingsbron in de biofilm (King e.a., 1973).

Ook ijzer(II)ionen kunnen worden vastgehouden (**C**) en zo in verhoogde concentraties voorkomen. Deze Fe^{2+} -ionen blijken een hoofdrol te spelen bij microbiële corrosie. Ondanks een sterke microbiële activiteit zou er nauwelijks corrosie plaatsvinden wanneer er geen Fe^{2+} -ionen beschikbaar zouden zijn voor de SRB. Dit bewijst dat deze ijzer(II)ionen een doorslaggevende functie hebben in de microbiële corrosie van ijzer of staal in waterig milieu m.b.v. sulfaat reducerende bacteriën. Hiervoor zijn twee mogelijke verklaringen: ofwel heeft het redoxkoppel $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ een veelbetekenende rol, ofwel diens corrosieproducten. In een oplossing van water en ijzer ontstaat er een galvanische cel met volgende reacties:



waarbij de standaard elektropotentiaal (E^0) van waterstof als referentie wordt gebruikt.

Deze elektropotentiaal van het redoxkoppel $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ zijn op hun beurt weer bevorderlijk voor de corrosie van het staal. Als oxidator is het Fe^{3+} -ion ($E^0 = 0,77\text{V}$) beter dan waterstof ($E^0 = 0\text{V}$), maar zuurstof ($E^0 = 1,23\text{V}$) reduceert beter. D.w.z. dat bij gelijke ionenconcentraties een kathodische reactie met zuurstof zou plaatsvinden. Maar zoals in figuur 28 ter hoogte van C wordt geïllustreerd is de reductie van Fe^{3+} -ionen bij de corrosie van staal een positieve feedbacklus, terwijl O_2 voortdurend wordt opgebruikt. Omdat in dit

zuurstofarme milieu ijzer(II)ionen steeds worden geregenereerd zal de eerste reactie toch primeren. De Fe^{2+} -ionen worden dan geregenereerd aan de bovenkant van de biofilm waardoor zuurstof ze daar weer kan oxideren om zo de Fe^{3+} -ionenconcentratie weer te herstellen. Wanneer de zuurtegraad $\text{pH} > 4,5$ blijft, is geweten dat deze reactie heel snel verloopt waardoor de corrosiesnelheid niet beïnvloed wordt (Li e.a., 2013).

De biofilm helpt dat laatste mechanisme op twee manieren: de Fe^{3+} -ionen worden geconcentreerd dichtbij het metaaloppervlak en het scheidt de twee oxidatiereacties ruimtelijk. Dat tweede gebeurt als volgt: de elektronen die vrijkomen door de oxidatie van Fe^{2+} -ionen in de anaerobe zone verplaatsen zich door de geleidende biofilm tot de aerobe zone, waar ze worden opgenomen door de zuurstof (**D**). Omdat nu beide ijzer-ionen niet meer door de biofilm moeten reizen kan de corrosiesnelheid enorm verhoogd worden. Dit geeft aan dat eerder de aanwezigheid van de biofilm zelf, dan de aanwezigheid van de bacteriën die de biofilm creëerden en stabiliseerden, de corrosiesnelheid onmiddellijk aanzienlijk verhoogt (Li e.a., 2013).

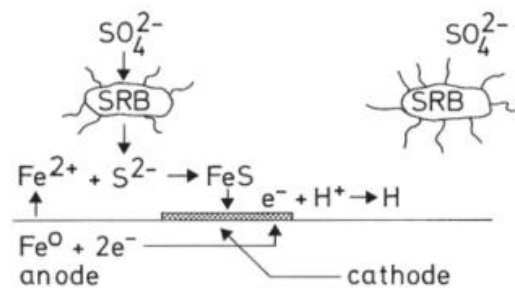
De fysieke structuur en heterogene compositie van de biofilm zelf dragen ook bij tot het corrosieproces. Biofilms hebben een ongelijke structuur en verschillen microscopisch significant van dikte waardoor concentratiecellen (**E**) ontstaan en lokale corrosie ontstaat.

Verder is er ook de hypothese dat werkzame enzymen in de biofilm zoals hydrogenase (**F**), de corrosie kunnen bevorderen. De complexvorming van metaalionen zou bijvoorbeeld de redoxpotentiaal van de Fe^{2+} -ionen in de biofilm kunnen veranderen, maar hiervoor is tot op heden nog geen bewijs gevonden (Beech & Sunner, 2004).

Tenslotte is het ook het vermelden waard dat SRB ervoor zorgen dat de ijzer(II)ionen ook ijzersulfide-varianten zullen vormen. Eén van die varianten is het stabiele pyriet (FeS_2) dat een soort passiveringslaag vormt, maar de vorming van deze varianten lijkt heel willekeurig. Ijzersulfiden zijn dan wel kathodisch tegenover ijzer, maar toch kan dit tegelijk een beschermend of net sterk destructief effect hebben. Een kleine breuk in deze laag kan tot enorme putcorrosie leiden door het enorme verschil in grootte tussen de FeS_2 -kathode en de ontblote staaanode. Pyriet is de meest stabiele vorm maar tegelijkertijd ontbindt het ook gemakkelijk in de aanwezigheid van bepaalde bacteriën zoals *Acidithiobacillus ferrooxidans* (Rohwerder e.a., 2003). Het effect van de biofilm op deze passiveringslaag is verre van duidelijk. Het kan als fysiek bindmiddel fungeren en zo de laag stabiliseren, of diens aanwezigheid kan de vorming van de passiveringslaag net verhinderen (**G**). Beide scenario's

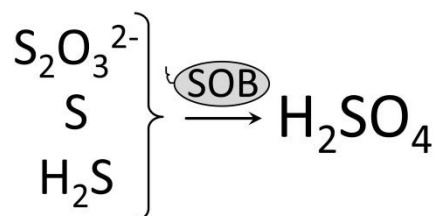
zijn mogelijk en het effect van ijzersulfiden blijft dus dubbelzinnig. Het hangt er immers van af wat zich eerst hecht op het metaaloppervlak: de ijzersulfide-laag of de biofilm (Li e.a., 2013).

Naast de pseudomonaden, de groep bacteriën die door overvloedige slijmproductie de biofilm vormt, hebben vele andere organismen ook hun plaats en belangrijk mechanisme binnen de biofilm. Allereerst zijn er de reeds aangehaalde sulfaat reducerende bacteriën (SRB), de hoofdrolspelers die de corrosiesnelheid verhogen. Zoals hierboven besproken creëren ze concentratiecellen, maken ze H₂S aan en brengen ze ook onoplosbare ijzersulfiden voort. De reductie van zwavel door SRB zorgt er ook voor dat de kathode gedepolariseerd wordt. Zo stapelen elektronen zich hier niet op en kan het corrosieproces ongehinderd blijven doorgaan (van der Mijle Meijer e.a., 2014).



Figuur 29: Depolarisatie van de kathode door SRB (Flemming & Geesey, 1991)

Vervolgens zijn er de zuur producerende bacteriën (APB) die van veel verschillende organische stoffen een zuur kunnen maken. Zo kunnen zwavel-oxiderende bacteriën (SOB) stoffen als thiosulfaat ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), zwavel (S) en waterstofsulfide (H_2S) omzetten in zwavelzuur (H_2SO_4).



Figuur 30: Zwavel-oxiderende bacteriën (SOB) (eigen werk)

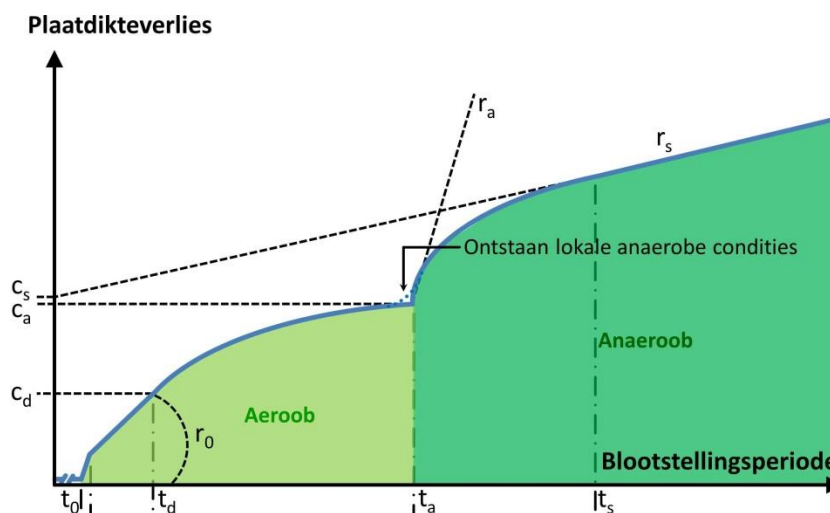
Ook andere APB kunnen door de heterotrofe gisting van organische zuren, organische zuren produceren. Lokale zuurproductie in een biofilm kan de corrosie van metalen enorm

versnellen. Actieve zuur producerende micro-organismen kunnen hun milieu in 1 à 2 dagen zodanig verzuren dat de corrosiesnelheid weer aanzienlijk verhoogt (Flemming & Geesey, 1991). De zuurtegraad verandert de corrosiesnelheid nauwelijks wanneer de pH van de omgeving tussen 4 en 10 blijft. Als deze echter wel 4 of minder wordt bij de anode, zullen de corrosieproducten die neergeslagen waren en een passiveringslaag vormden terug in oplossing gaan. De beschermingslaag is nu lokaal weg en de corrosiesnelheid zal enorm stijgen in het zure milieu (De Baere, 2011).

Tenslotte vindt men in een biofilm ook ijzer- en mangaan gerelateerde micro-organismen. De complementaire acties van ijzeroxidatoren (IOB) en ijzerreductoren (IRB) zijn bepalend voor de stabiliteit van ijzer en daarom van cruciaal belang voor het corrosieproces. Enerzijds kunnen zure ijzeroxidatoren (AIO) de oxidatie van Fe^{2+} -ionen tot Fe^{3+} -ionen bevorderen in zure milieus, wat zorgt voor de afzetting van ijzeroxiden en hydroxiden en/of ijzerchloridezouten die zeer corrosief kunnen zijn. Anderzijds kunnen ijzerreductoren Fe^{3+} -ionen reduceren naar mobiele Fe^{2+} -ionen waardoor passiveringslagen afgebroken kunnen worden. Aangezien de microbiële ijzeroxidatie in aerobe omstandigheden plaatsvindt zullen IOB aan de kathode te vinden zijn. Verschillend daarmee vindt microbiële ijzerreductie plaats in anaerobe condities waardoor IRB dan aan de anode te vinden zijn (van der Mijle Meijer e.a., 2014).

4.5 Omgevingsfactoren die de corrosiesnelheid beïnvloeden

Het corrosiemodel van Melchers dat eerder in dit hoofdstuk werd besproken is natuurlijk onderhevig aan vele invloeden. De basiskalibratie van het model werd gedaan voor staal dat continu is ondergedompeld in traag stromend en niet-vervuild kustwater dat logischerwijs zo zuurstofrijk mogelijk is. In dat geval is de belangrijkste variabele de zeewatertemperatuur T . De temperatuur bepaalt namelijk de oplosbaarheid van de corrosieve stoffen in het zeewater. Hoe hoger de temperatuur is, des te hoger de oplosbaarheid en dus aanwezigheid van de corrosieve substanties, waardoor de corrosiesnelheid logischerwijze stijgt. De temperatuur bepaalt ook de snelheid van een chemische reactie. Per 10°C verdubbelt de snelheid (De Baere, 2011; Melchers, 2008).



Figuur 31: Multifasig corrosiemodel (Melchers, 2008)

Tabel 3: Gekalibreerde procesparameters voor corrosie onder water in functie van gemiddelde Zeewatertemperatuur T (Melchers, 2008)

Uniforme corrosie	Putcorrosie
$r_0 = 0,079 \cdot e^{-0,054 \cdot T}$	
$c_a = 0,32 \cdot e^{-0,038 \cdot T}$	$c_a = 0,99 \cdot e^{-0,052 \cdot T}$
$t_a = 6,61 \cdot e^{-0,088 \cdot T}$	$t_a = 6,61 \cdot e^{-0,088 \cdot T}$
$r_a = 0,066 \cdot e^{0,061 \cdot T}$	$r_a = 0,596 \cdot e^{0,526 \cdot T}$
$c_s = 0,141 - 0,00133 \cdot T$	$c_s = 0,641 \cdot e^{0,0613 \cdot T}$
$r_s = 0,039 \cdot e^{0,0254 \cdot T}$	$r_s = 0,353 \cdot e^{-0,0436 \cdot T}$
r_0, r_a, r_s (mm/jaar) c_a, c_s (mm)	

Bovenstaande figuur & tabel tonen aan dat de gemiddelde zeewatertemperatuur een duidelijk effect heeft op het plaatdikteverlies in alle processen. Het geïdealiseerde overgangspunt tussen de aerobe oxidatie en de anaerobe microbiële corrosie, aangeduid door t_a , is afhankelijk van T . Dit duidt erop dat in tropische wateren binnen een jaar tijd reeds anaerobe condities ontwikkeld zullen zijn en dat dit in arctische wateren jarenlang kan duren. Immers: $t_a(T=22,5^\circ\text{C}) = 1$ jaar en $t_a(T=2^\circ\text{C}) = 5,5$ jaar (Melchers, 2008).

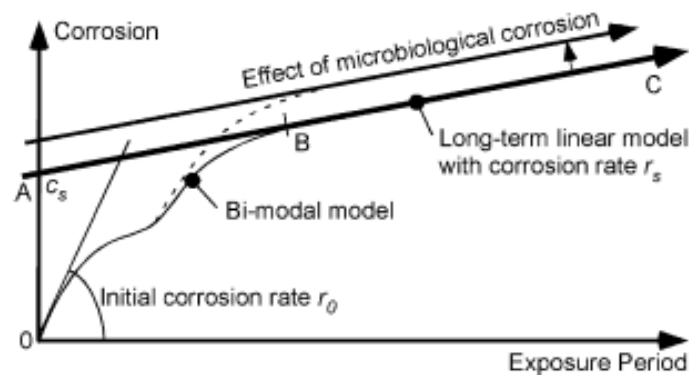
T_s is het ogenblik dat de anaerobe corrosiesnelheid r_s constant wordt. Deze werd niet geparametriseerd in tabel 2 maar uit persoonlijke communicatie met prof. Melchers leerden we dat t_s ongeveer gelijk is aan $2 \times t_a$ (“*But as a rough rule I tend to imagine it as about $2 \times t_a$. That seems to fit closely enough to most of the trends we have*”)

Er zijn natuurlijk nog vele andere factoren die het corrosieproces beïnvloeden en geen onderdeel zijn van Melchers' oorspronkelijke model.

Zo is er de watervervuiling die weinig effect zal hebben op het corrosieproces, tenzij het bijzonder grote concentraties chemicaliën betreft. Processen 2 en 3 (figuur 22) worden namelijk beïnvloed door de concentratie opgeloste zuurstof en niet door de exacte chemische samenstelling van het water. Er is echter wel één grote uitzondering, namelijk wanneer het water vervuild is door nutriënten. Bacteriën zijn enorm gevoelig aan deze voedingsstoffen en zullen voor een hogere corrosiesnelheid en groter plaatdikteverlies zorgen. Bacteriën zijn actief in processen 1, 4 en 5 waardoor r_0 en r_s groter zullen worden (Melchers, 2005). Voor zeewater is opgeloste anorganische stikstof – DIN oftewel *Dissolved Inorganic Nitrogen* – de bepalende nutriënt. DIN omvat nitraat (NO_3^-), nitriet (NO_2^-) en ammonia (NH_4^+). Des te groter de concentratie DIN is, des te groter de microbiële corrosiesnelheid zal zijn (Melchers, 2018).

De Atlantische Oceaan en Noordzee zijn reeds uitvoerig bestudeerd omwille van hun verhoogde stikstofgehalten. De verhoogde concentratie DIN heeft als voornaamste oorsprong de industrie en de bemesting in de landbouw van de omringende landen. De stoffen stromen met het regen- of afvalwater langs de rivieren tot in de zee. Omdat dit vooral een invloed op lange termijn heeft op het corrosieproces heeft Prof. Melchers geprobeerd deze DIN concentratie ook in rekening te brengen bij de parameters c_s en r_s .

In plaats van te focussen op het metabolisme van de micro-organismen heeft hij de relatie tussen de concentratie DIN en het resulterende corrosieverlies bestudeerd. Op die manier wordt de complexe microbiologie omzeild. Zelfs bij extreem hoge DIN concentraties is er geen directe invloed van de stikstof op de elektrochemische reacties, wat bewijst dat DIN enkel een noemenswaardig effect heeft in de processen 4 en 5. De diffusie van de nutriënten (opgelost in het zeewater) door de roestlagen wordt hier de factor die de corrosiesnelheid controleert. Aangezien dit enkel een effect heeft op langere termijn (fase 3) en de corrosiesnelheid dan constant wordt door de microbiëel gecontroleerde anaerobe corrosie, kan de corrosie op lange termijn als een lineaire functie worden benaderd (figuur 32) (Melchers, 2013).



Figuur 32: Schematische vereenvoudiging van Melchers' corrosiemodel (Melchers, 2013)

Factoren c_s en r_s zijn afhankelijk van de gemiddelde zeewatertemperatuur (Tabel 3) en de corrosiesnelheid wordt constant na een ondergedompelde tijd van minimaal 2 keer t_a vooropgesteld (Melchers, 2013).

Het effect van verhoogde DIN concentraties kan worden bepaald door deze corrosieverliezen te vergelijken met verliezen in wateren met verwaarloosbaar kleine hoeveelheden. Deze laatste wordt berekend met behulp van Melchers' bimodale model en vervolgens vergeleken met de gemeten waarde in wateren met verhoogde DIN concentraties. Uit figuur 32 kan ook worden afgeleid dat het voorspelde corrosieverlies op lange termijn (c_p , waarbij $t > 2 \cdot t_a$) als volgt kan worden berekend:

$$c_p(t) = c_s + t \cdot r_s \quad (12)$$

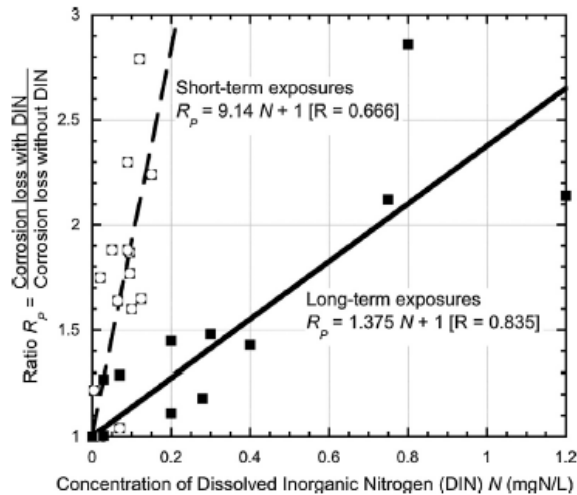
Daarbij is t de ondergedompelde tijd verminderd met de tijdsspanne dat de coating nog intact bleef. Bij de vergelijking met de gemeten waardes kan men de ratio voorspeld tegenover gemeten corrosieverlies (R_p) als volgt berekenen:

$$R_p = c_p / c \quad (13)$$

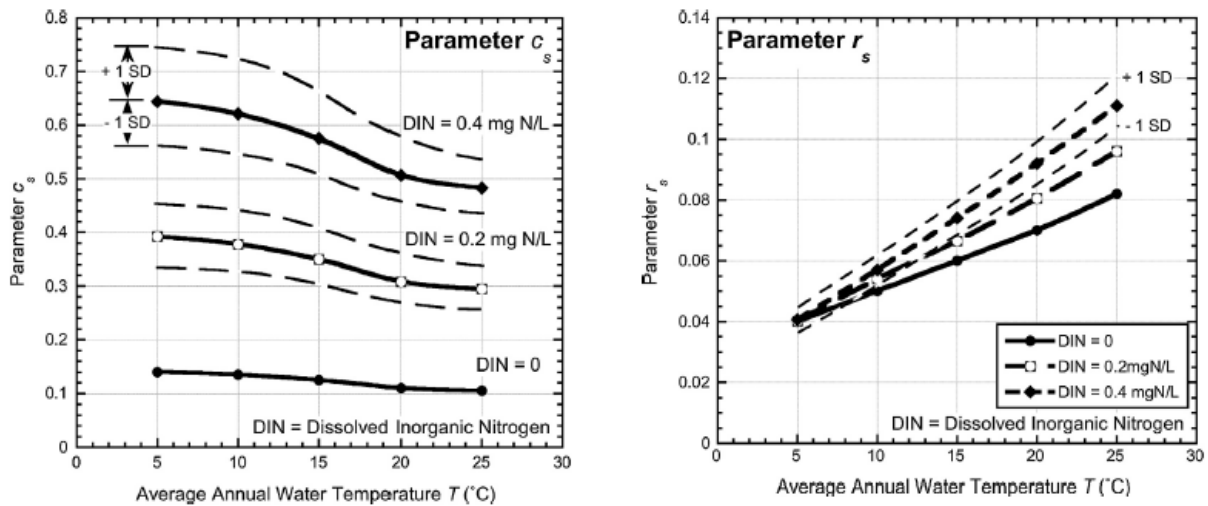
Deze bekomen ratio's R_p werden vervolgens geplott in functie van de *in situ* gemeten DIN concentraties (figuur 33). Daaruit kon vervolgens een empirische formule voor de lineaire trendlijn worden afgeleid:

$$R_p = 1 + 1,375 \cdot N \quad (14)$$

Waarbij N de concentratie DIN uitgedrukt in milligram N per liter is. De werkelijke ratio blijkt na een ondergedompelde tijd van tien jaar of langer nog nauwelijks te verschillen van deze trendlijn. Dit zorgt voor een goede betrouwbaarheid en laat toe de parameters c_s en r_s te berekenen en te plotten (figuur 34) (Melchers, 2013).



Figuur 33: Trendlijn data R_p ratio's (Melchers, 2013)



Figuur 34: Parameters c_s en r_s bij verhoogde DIN concentraties (Melchers, 2013)

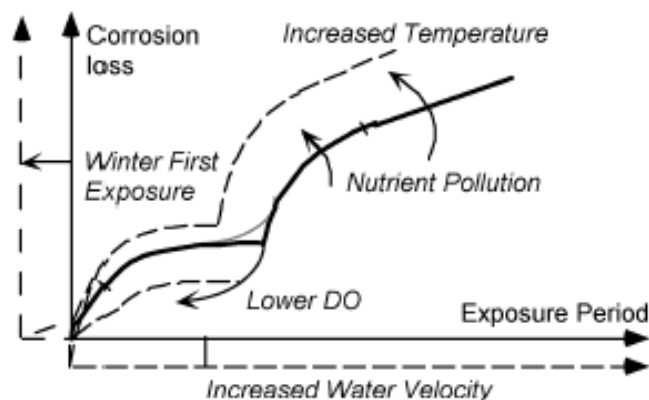
Het valt op dat de parameter c_s (dikte van de roestlaag bij aanvang van de anaerobe corrosie) het sterkst wordt beïnvloed en dat r_s (constante anaerobe corrosiesnelheid) slechts een kleine extra inclinatie krijgt. Dit kan verklaard worden omdat de hogere concentratie DIN voor dikkere roestlagen zorgt en de diffusie van het nutriëntrijke water logischerwijs gradueel trager gaat verlopen. Dit heeft tot gevolg dat vooral proces 4 voor meer corrosieverlies zal zorgen (verschuiving omhoog, zie figuur 32) en dat de corrosiesnelheid in proces 5 (r_s) slechts iets hoger zal zijn (Melchers, 2013).

Verder zijn er ook nog factoren die nog niet mathematisch berekend of benaderd zijn.

Ten eerste is er de opgeloste zuurstof in het water – DO of *dissolved oxygen*. Minder zuurstof zou ervoor zorgen dat de oxidatie van het metaal in processen 2 en 3 (figuur 22) sterk

onderdrukt wordt. Dat heeft een direct effect op parameters t_a , r_0 en c_a en zorgt ervoor dat er sneller anaerobe condities zouden worden bereikt waardoor proces 4 sneller aanvat (zie figuur 35). Maar aangezien alle kustwateren onderhevig zijn aan wind en golven is het water daar steeds verzadigd met zuurstof en kan worden aangenomen dat dit geen significant effect zal hebben op het corrosieproces (Melchers, 2008).

Ten tweede heeft de snelheid van het water ook een invloed op het begin van het corrosieproces, tijdens de zuurstof gecontroleerde oxidatie. Dit is het effect van golven wanneer in proces 2 de roestlagen nog niet dik en stevig genoeg zijn om het onderliggende metaaloppervlak te beschermen. Proces 2 zal zo langer aanhouden en de corrosiecurve zal door het grotere plaatdikteverlies omhoog schuiven (Melchers & Jeffrey, 2004). Metingen in zeeewater met snelheden tot 1m/s toonden aan dat de stromingssnelheid slechts in de eerste drie tot vier weken de corrosiesnelheid sterk verhoogt. Daarna heeft dit geen significant effect meer (Melchers, 2018).



Figuur 35: Schematische samenvatting van mogelijke invloeden op de corrosiecurve (Melchers, 2008)

Ten derde bepaalt het ogenblik (seizoen) wanneer het wrak zonk de corrosiesnelheid in proces 2. Onderzoek door Amacort⁷ heeft aangetoond dat de coating van scheepsstaal onder water nog 5,5 jaar bescherming biedt (Willemen, 2017). Wanneer het ontblote scheepsstaal dan vervolgens voor het eerst in de winter in contact komt met het zeeewater zorgt het ervoor dat proces 2 trager verloopt maar ook langer duurt. Dat heeft voornamelijk te maken met de lagere temperatuur (invloed op r_0 , c_a en t_a) en daarom schuift de standaard corrosiecurve als het ware op naar rechts (Melchers, 2008).

⁷ Amacort = Antwerp Maritime Academy CORosion Team; een team van docenten van de Hogere Zeevaartschool te Antwerpen dat onderzoeken doet naar maritieme corrosie en fouling.

Tenslotte kan nog vermeld worden dat de diepte waarop een wrak ligt of het zoutgehalte van het zeewater respectievelijk geen en nauwelijks effect hebben op het corrosieproces. Hoe dieper een wrak ligt hoe hoger de hydrostatische druk, maar er is geen enkel bewijs dat de druk een invloed zou hebben. Ook het zoutgehalte heeft een veel kleiner effect dan alle andere oplosbare elementen in het zeewater. Het heeft uiteindelijk slechts een minieme invloed op hele korte termijn – men spreekt van dagen – wat verwaarloosbaar is (Melchers, 2006).

4.6 Samenstelling staal en de invloed op het corrosieproces

Het staal dat gebruikt wordt voor de constructie van schepen is een legering van ijzer (Fe) en koolstof (C) – *carbon steel* of zacht staal genoemd. De koolstofconcentratie is bepalend voor de fysieke eigenschappen van het staal. Scheepsstaal bevat daarom ongeveer 0,15 à 0,23% koolstof, met een maximum van 0,4% (Potters, 2015).

Tabel 4: Koolstofconcentratie in verschillende ijzerkoolstoflegeringen (Potters, 2015)

Carbon Steel	% koolstof (w/w)	Eigenschappen en toepassingen
Low carbon steel smeedijzer (wrought iron)	<0.1%	Zacht en smeedbaar, gemakkelijk te vervormen
Mild steel	0.1 – 0.25%	lage treksterkte; goedkoop en smeedbaar. Oppervlaktehardheid kan verbeteren door het te carburiseren
Medium carbon steel	0.25 – 0.45%	Balans tussen smeedbaarheid en sterkte. Slijtbestendig. Goed voor grote onderdelen, bv. Automobiellindustrie.
High carbon steel	0.45 – 1.0%	Zeer sterk – voor veren en kabels.
Ultra-high carbon steel	1.0 – 2.0%	Zeer hard – voor messen en ander gereedschap
Gietijzer Cast iron	2.0 – 6.67%	lager smeltpunt gemakkelijk te gieten minder stevig en sterk dan staal

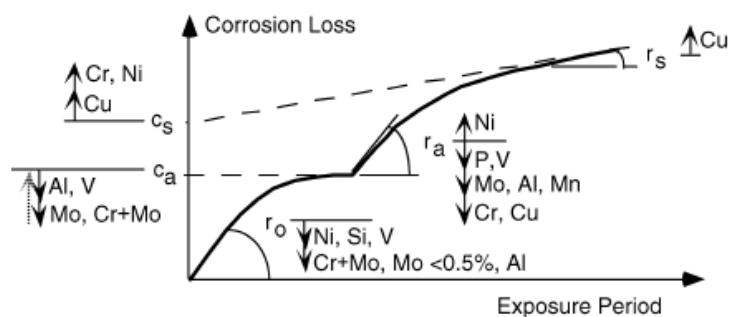
Naast koolstof worden er ook nog andere elementen toegevoegd om de eigenschappen van staal te verbeteren. Voorbeelden hiervan zijn: mangaan (Mn), silicium (Si), vanadium (V), wolfram (W), molybdeen (Mo), chroom (Cr) en nikkel (Ni). Scheepsstaal bevat een redelijk hoog percentage mangaan (0,4-0,7%) terwijl zwavel en fosfor tot een absoluut minimum worden beperkt (<0,05%). De laatste twee zorgen voor slechte laseigenschappen en zwavel kan bij het rollen van het staal reeds voor microscopische barsten zorgen (Eyres, 2007).

Om scheepsstaal te classificeren hebben classificatiemaatschappijen vijf soorten (*grades*) IACS⁸ steels in het leven geroepen. *Grade A steel* is het reguliere zachte staal dat voldoet aan de eisen van Lloyds Register en *Grade C* voldoet aan die van American Bureau of Shipping. *Grade B* is van een betere kwaliteit dan *Grade A* en specificeert op welke kritieke plaatsen dikkere platen moeten worden gebruikt. *Grade C, D, E* zijn respectievelijk toenemend beter bestand tegen de verderzetting van barsten in het staal. Zij hebben verbeterde kerftaaiheidskenmerken (Eyres, 2007). Deze staalsoorten zijn niet zo corrosieresistent maar worden toch gebruikt aangezien ze goedkoop, gemakkelijk te produceren en redelijk sterk zijn. Toch kunnen de eigenschappen nog verder verbeterd worden door kleine toevoegingen van chroom, nikkel en koper. Zo vervaardigt men hoogwaardig staal dat sterker is en vooral beter bestand tegen corrosie (Budinski, 2003).

Tabel 5: Chemische samenstelling van “Grade A steel” (in wt%) (Okley, 2009)

Kwaliteit	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
A	0,13	0,24	0,66	0,015	0,015	<0,04	<0,02	<0,005
AH	0,18	0,1-0,5	0,90-1,60	0,035	0,035	0,2	0,4	0,08
Kwaliteit	Al	V	Nb	Cu	Ti	CE(IIW)	Pcm	
A	0,006	<0,005	<0,005	<0,02	<0,005	0,243	0,172	
AH	0,015	0,05-0,1	0,02-0,05	0,35	0,02	-	0,38	

Minieme verschillen in de samenstelling van het scheepsstaal hebben geen significant effect op de corrosie, zeker wanneer de oxidatie van ijzer (proces 2 & 3) de corrosiesnelheid bepaalt. Voor grotere legeringsverschillen is er echter wel degelijk een effect op het corrosieverloop (Melchers, 2003b; Melchers, 2004).



Figuur 36: Effect van staallegeringen op de corrosie (Melchers, 2008)

⁸ IACS: International Association of Classification Societies

Figuur 36 geeft schematisch weer welk effect deze verschillen in de legeringen hebben op de corrosie van het staal. Het spreekt voor zich dat een hogere koolstofconcentratie een hogere corrosiesnelheid teweeg brengt in de anaerobe fasen (processen 4 & 5) (Melchers, 2003b).

4.7 Corrosiemodel voor de Belgische Noordzee

Alle besproken parameters in beschouwing genomen kan er geconcludeerd worden dat er twee belangrijke parameters zijn. De temperatuur T die bijna alle elektrochemische processen beheerst en de opgeloste anorganische stikstof DIN die de grootste impact heeft op de microbiële corrosie. De gemiddelde zeewatertemperatuur van de Belgische Noordzee bedraagt 12,5°C en de gemiddelde DIN 488,86µg/mol of 0,492 mg/l volgens het Vlaamse Instituut voor de Zee (De Baere, 2017; Hernandez, 2017).

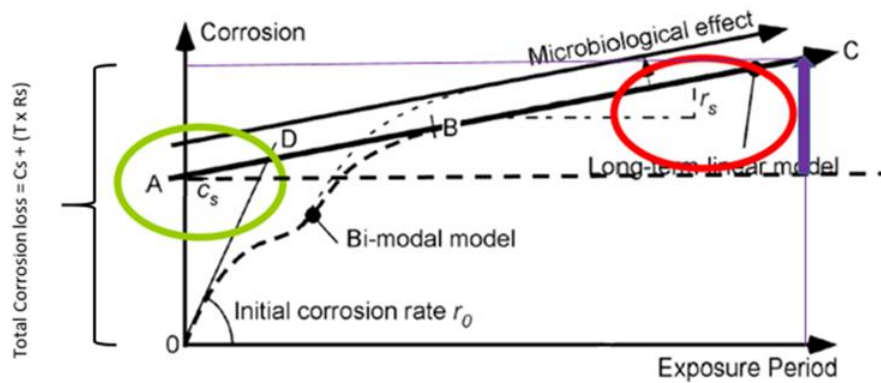
Hiermee kunnen de parameters van het corrosiemodel als volgt berekend worden voor onvervuild water:

General corrosion seawater temperature 12.5°C		
t_a	$6.61 \cdot \exp(-0.088 \cdot T)$	2,200277863
c_a	$0.32 \cdot \exp(-0.038 \cdot T)$	0,199003218
r_0	$0.076 \cdot \exp(0.054 \cdot T)$	0,149266506
r_a	$0.066 \cdot \exp(0.061 \cdot T)$	0,141479488
c_s	$0.141 - (0.00133 \cdot T)$	0,124375
r_s	$0.039 \cdot \exp(0.0254 \cdot T)$	0,053573881

Figuur 37: Parameters multi-fasig corrosiemodel voor de Belgische Noordzee (De Baere, 2017)

De scheepswrakken die interessant zijn voor dit onderzoek zijn allen reeds tientallen jaren tot meer dan honderd jaar geleden gezonken. Er kan dus met zekerheid gesteld worden dat proces 5 is aangebroken en de corrosiesnelheid nu constant is. Wiskundige analyse van de corrosiecurve van Melchers' bimodale model geeft dat het plaatdikteverlies gelijk is aan de volgende formule:

$$\text{Corrosion loss} = \text{plaatdikteverlies} = (c_s + (t-t_0) \cdot r_s) \cdot R_p \quad (15)$$



Figuur 38: corrosiemodel van Melchers – parameters gedetermineerd (Melchers, 2016)

De factor c_s (in mm) is dan het plaatdikteverlies op het moment dat de corrosiesnelheid constant wordt. De totale tijd dat het wrak zich reeds onder water bevindt is t (in jaren) en t_0 (in jaren) is de tijdsspanne dat de coating nog intact bleef. De constante anaerobe corrosiesnelheid is r_s (in mm/jaar) en R_p is de correctiefactor voor de DIN. R_p is de ratio plaatdikteverlies met DIN/plaatdikteverlies zonder DIN zoals in 4.5 beschreven.

In de Belgische Noordzee wordt de ratio R_p dan:

$$R_p = 1 + 1,375 \cdot 0,492 \text{mg(N)/l} = 1,6765 \quad (16)$$

Het corrosieverlies voor wrakken in de Belgische Noordzee die lang geleden gezonken zijn wordt dan volgens tabel 2 en formules (14) en (16):

$$c(t) = (0,141 - 0,00133 \cdot 12,5 + (t - t_0) \cdot 0,039 \cdot e^{0,0254 \cdot 12,5}) \cdot 1,6765 \quad (17)$$

$$c(t) = (0,1244 + (t - t_0) \cdot 0,0536) \cdot 1,6765 \text{ [mm/jaar]} \quad (18)$$

Hierbij is t de totale ondergedompelde tijd en t_0 de tijd die de coating nog intact bleef. Ook dient te worden opgemerkt dat een coating onder water nog ongeveer 5,5 jaar intact blijft (Willemen, 2017) en dat bij $12,5^\circ\text{C}$ de corrosiepas anaeroob wordt na $t_a = 2,2$ jaar. Het scheepswrak moet dus minimaal 10 jaar gezonken zijn ($\text{coating life} + 2 \cdot t_a = 5,5 + 2 \cdot 2,2$) opdat deze voldoen aan de eisen voor formule (18).

5. Onderzoek

5.1 Datafiches en variërende parameters

Alle data die tot hiertoe zijn verzameld, zijn opgelijst in fiches per wrak. Hiervoor werden data uit de databank van het Agentschap Onroerend Erfgoed (Demerre, z.d.) en de CTD-databank van het VLIZ (Hernandez, z.d.) gebruikt.

Ook werden er reeds vijf duiken op scheepswrakken uitgevoerd. Daarbij werd gedoken naar de *MV Garden City*, de *West-Hinder*, de *UB-III-klasse-Fairybank*, de *UII* en de *MV Birkenfels*. Er werd getracht de huidige staalplaatdikte te meten op verschillende posities en ook staalmonsters te nemen. Indien mogelijk werden er ook onderwaterbeelden gemaakt om de soort begroeiing te bepalen. Er konden echter telkens slechts drie diktemetingen gebeuren in het kleine half uur duiktijd omdat de staalplaat vrijgemaakt dient te worden. De begroeiing en de corrosielaag dient te worden weggeschraapt alvorens op het oneffen oppervlak een juiste meting kon worden waargenomen. Dit nam extra tijd in beslag en er zal dus meerdere malen per wrak moeten worden gedoken.

Tijdens de duik op de *West-Hinder* was de zichtbaarheid beduidend minder en kwamen de duikers vast te zitten in vistuig waardoor er geen metingen konden worden uitgevoerd. De gegevens van deze expeditie met de *RV Belgica* zijn ook verwerkt in de samenvattende fiches (Sven Van Haelst, 2015a).

De wrakfiches met verzamelde data voor de gekozen scheepswrakken uit hoofdstuk 3.5 bevinden zich in Bijlage 4.

De CTD unit (*current, temperature and depth*) is een console die wordt neergelaten wanneer het onderzoeksvaartuig stilligt op de positie van het meetstation. Hieraan hangen verschillende meters om het zuurstofgehalte (DO, *dissolved oxygen*), het zoutgehalte, de druk, de temperatuur, het chloorgehalte, enz. te meten. De data die hiermee verkregen worden, zijn opgelijst in een grote datasheet (Hernandez, z.d.) en daaruit moesten voor dit onderzoek de juiste waarden worden geëxtraheerd.

Het is echter zo dat een wrak vaak midden tussen twee meetstations ligt en dat er op die twee stations niet op hetzelfde moment gemeten werd. Door seizoensverschillen en dergelijke is het dus onmogelijk om te interpoleren tussen de meetresultaten van twee verschillende stations en

is men verplicht de metingen van het dichtstbijzijnde station te nemen. Deze positiefout zorgt i.e. voor een meetfout in het onderzoek, zeker wanneer later ook de begroeiing zal worden bekeken. De macro-organismen die op een scheepswrak groeien verschillen zichtbaar enorm per dal tussen de zandbanken. De data zouden daarom in liefst hetzelfde dal gemeten moeten worden maar dat is bij deze niet meer zeker.

Niettegenstaande valt het op dat zoals verwacht alle parameters verschillen naargelang de tijd van het jaar en dat alle waarden ter hoogte van de wrakken steeds minder variëren op eenzelfde tijdstip. Zo meet het zoutgehalte (in PSU) doorheen een volledig jaar tussen 33,2476 en 34,6307, terwijl de data van de wrakken daar afzonderlijk niet buiten gaan.

Men mag ook niet uit het oog verliezen dat al deze wrakken reeds tientallen jaren, sommigen zelfs meer dan honderd, op de zeebodem liggen. De jaarlijkse variatie blijkt daarom ver ondergeschikt in belang ten opzichte van het jaarlijks gemiddelde en de evolutie daarvan. Door de aanzienlijke stroming in de Noordzee zullen ook logischerwijs de lokale verschillen worden uitgevlakt of zelfs helemaal verdwijnen. De gemiddelde waarden en condities waaraan de wrakken onderhevig zijn zullen nagenoeg hetzelfde zijn waardoor een weinig verschillend resultaat blijkt. Lokale waarden gemeten op een bepaald ogenblik in de tijd hebben bijgevolg geen of bijzonder weinig belang.

Hieruit volgt dat de onderlinge verschillen tussen de scheepswrakken in de Belgische Noordzee zullen moeten worden verklaard door andere variaties dan die van de data van de CTD console.

5.2 Jaargemiddelden

Een stap in de goede richting voor het begrijpen van de corrosie van deze wrakken is het onderzoeken van de corrosiesnelheid. Daarvoor werd in het vorige hoofdstuk een corrosiemodel gezocht. Het model van Melchers lijkt het best betrouwbare en zal daarom in dit onderzoek aan de praktijk worden afgetoetst.

Zoals in hoofdstuk 4.5 beschreven werd, is geweten dat dit model direct afhankelijk is van de gemiddelde zeewatertemperatuur T en de opgeloste anorganische stikstof (DIN). Met T gelijk aan $12,5^{\circ}\text{C}$ en een gemiddelde DIN van $0,492\text{ mg/l}$ (Hernandez, 2017; VLIZ, z.d.-b) kon in hoofdstuk 4.7 ook een formule (17) voor het corrosieverlies worden afgeleid. Maar ook de

gemiddelde corrosiesnelheid op lange termijn (r_s voor $t > 12$ jaar) kan als volgt worden berekend:

$$r_s = 0,039 * e^{0,0254 * T} * R_p \quad (19)$$

Met de parameters van de Belgische Noordzee wordt dit dan:

$$r_s = 0,039 * e^{0,0254 * 12,5} * 1,6765 = 0,0898 \text{ mm/jaar} \quad (20)$$

Vervolgens zijn er zoals besproken nog enkele factoren die de corrosiesnelheid beïnvloeden. Allereerst is er de opgeloste zuurstof DO met een jaargemiddelde concentratie 8,946 mgO₂/l (Hernandez, z.d.). Dit komt overeen met het feit dat het zeewater steeds voor 94 à 100% O₂-gesatureerd is (VLIZ, z.d.-b). Het corrosiemodel is opgesteld voor gesatureerde kustwateren en bijgevolg zal de DO concentratie van de Belgische Noordzee de curve niet beïnvloeden.

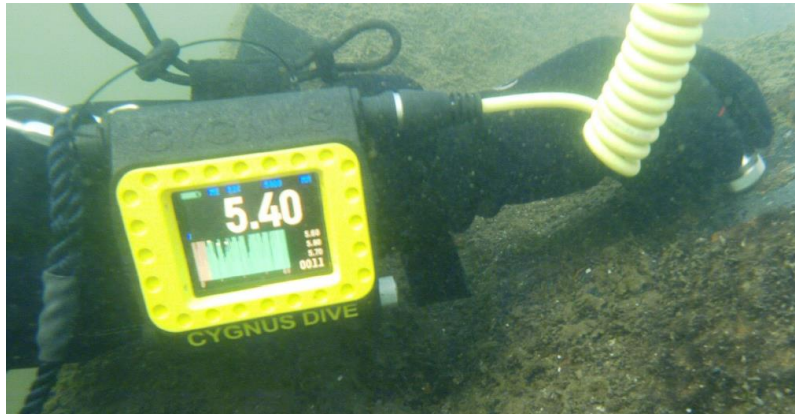
Voorts heeft de stroming, voornamelijk veroorzaakt door getijdewerking, op de Belgische zeebodem een gemiddelde snelheid van 0,5 m/s (VLIZ, z.d.-b). Deze heeft enkel een effect op korte termijn en Melchers stelt dat bij een stromingssnelheid van 1 m/s na twee jaar 0,1 mm extra corrosieverlies moet worden gerekend (Melchers & Jeffrey, 2004). Bij het voorspelde corrosieverlies op lange termijn zou bijgevolg een extra verlies van 0,1 mm moeten worden opgeteld, maar dit zal ondergeschikt blijken aan de variatie van de *in situ* gemeten data.

Tenslotte heeft de Belgische Noordzee een gemiddeld zoutgehalte van 34-35 g/l (VLIZ, z.d.-b), maar de variatie hiervan is weinig relevant zoals beschreven in hoofdstuk 4.5. Zolang er zout in het water zit, geleidt het voldoende als elektrolyt voor de elektrochemische processen. De concentratie mag bijgevolg sterk variëren (Melchers, 2006).

5.3 Werkwijze en meetapparatuur *in situ* metingen

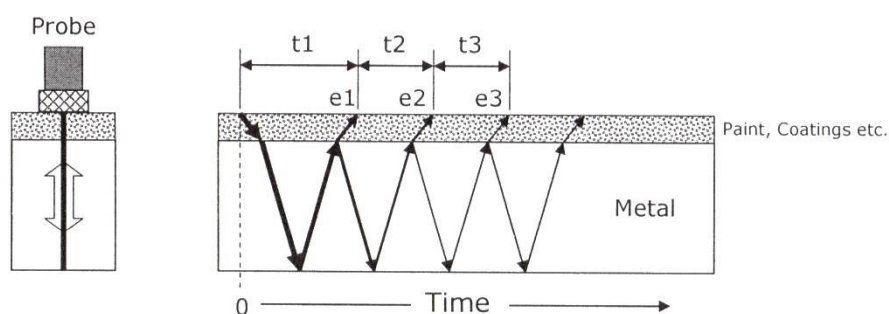
Om het berekende corrosieverlies te kunnen toetsen aan de werkelijkheid moeten de resterende staalplaatdiktes *in situ* gemeten worden. Het liefst doet men dit zonder het scheepswrak te beschadigen of het corrosieproces te beïnvloeden. Een gat boren in het wrakstaal om vervolgens de plaatdikte te meten is bijgevolg geen goede optie. Ook is het wrakstaal steeds bedekt met een dikke corrosielaag en daar bovenop biologische begroeiing zoals zeeanemonen (roestlagen en micro- en macro-organismen, cfr. Hoofdstuk 4). Zodoende moet de scheepshuid worden ontbloot alvorens men een meting kan uitvoeren. Ook kan vaak de binnenkant van het wrakstaal niet bereikt worden omdat het wrak binnenin vaak volledig verzand is.

Daarom is het gebruik van ultrasone diktemeters een ideale oplossing. Bij de wetenschappelijke duiken naar de wrakken in dit onderzoek werd daarom gekozen voor de *Cygnus DIVE M2* ultrasone plaatdiktemeter. Het wrakstaal wordt hiermee niet beschadigd of doorboord. Het meettoestel wordt op de voorarm van de duiker vastgemaakt waardoor beide handen vrij blijven en er moet slechts één zijde van het scheepsstaal bereikbaar zijn (Cygnus, 2014).



Figuur 39: Cygnus DIVE bevestigd op de voorarm van een duiker (Van Haelst, 2015)

Een ultrasone plaatdiktemeter werkt volgens hetzelfde principe als sonarsystemen of het dieptelog aan boord. Een transducer zendt een korte ultrasone geluidspuls uit die weerkaatst bij een overgang van materiaal en een tijd later wordt de geluidsgolf weer opgevangen door de transducer. Indien het materiaal waarvan de dikte gemeten wordt, in dit geval het wrakstaal, homogeen is, zal de geluidspuls aan de achterkant weerkaatsen. Het verschil in tijd tussen het zenden en het ontvangen van de geluidspuls, en het kennen van de geluidssnelheid in metaal, maakt het mogelijk om de staaldikte te berekenen. Deze plaatdiktemeter werkt met een *single crystal multiple echo* probe, wat betekent dat de probe meerdere ultrasone pulsen zendt en ontvangt bij iedere meting (Cygnus, 2014).



Figuur 40: Tijdsverschil tussen de geluidspulsen bij een plaatdiktemeting (Cygnus, 2014)

De afgelegde afstand van iedere geluidspuls wordt door het meettoestel berekend door de volgende formule:

$$x = v * t \quad (21)$$

Hierbij bedraagt de gemiddelde geluidssnelheid v in zacht staal 5800 m/s (CMA science, 2015) en is t het tijdsverschil in seconden tussen het verzenden en ontvangen van de geluidspuls. De staaldikte is de halve afgelegde afstand $x/2$, hier uitgedrukt in meter.

Het is belangrijk dat het wrakstaal zo schoon mogelijk wordt gemaakt alvorens een meting wordt uitgevoerd. Desalniettemin kan de geluidspuls reeds deels afbuigen en weerkaatsen bij de overgang van een eventuele corrosielaag naar metaal en weer terug. Daarom is een meting pas betrouwbaar wanneer tijdspannes t_2 en t_3 gelijk zijn (figuur 40). Indien dat niet het geval is kan dat duiden op een te ruw oppervlak aan de voor- of achterzijde van het metaal en dient men de probe een klein beetje te verplaatsen. De metingen worden weergegeven op het scherm van het meettoestel dat op de onderarm van de duiker wordt bevestigd. Wanneer de ontvangen signalen gelijk zijn (toppen van de curve), dan is de meting betrouwbaar en kan deze worden opgeslagen in het geheugen van de plaatdiktemeter.

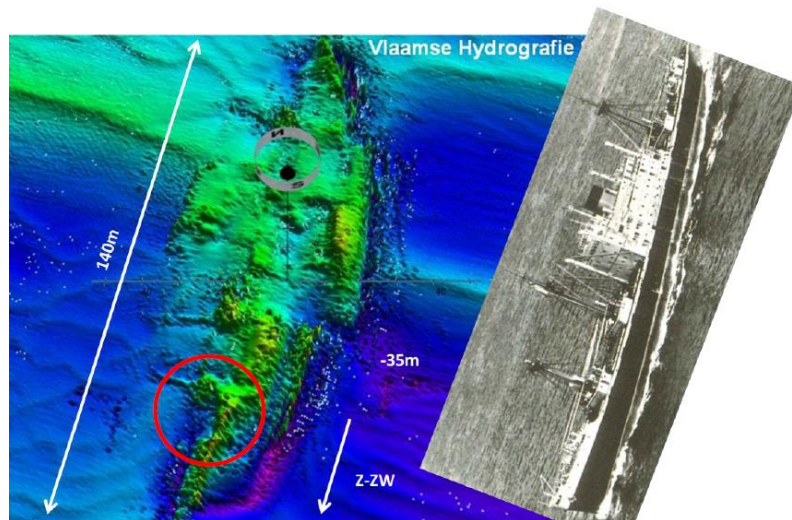
De ijking van het toestel is eveneens belangrijk aangezien de geluidssnelheid van groot belang is. Er kan gerekend worden met een standaard snelheid zoals voorheen gegeven, maar bij voorkeur wordt een stuk staal met dezelfde samenstelling gebruikt om middels de exact gekende dikte het toestel te kalibreren (Cygus, 2014).

5.4 Resultaten duiken

In 2015 konden er zeven wetenschappelijke duiken worden uitgevoerd op verschillende wrakken. De RV Belgica en RV Simon Stevin voeren respectievelijk in februari en mei uit, telkens voor een driedaagse duikcampagne. De resultaten van de duiken met als doel plaatdiktemetingen uit te voeren volgen hieronder.

- **Garden City** 10 februari 2015:

Op de opbouw van het voorschip konden drie succesvolle metingen worden uitgevoerd. De resterende staalplaatdikte was 5,15mm, 4,70mm en 12,90mm. De laatste meting was hoogstwaarschijnlijk ter hoogte van een steunbalk en mag bijgevolg genegeerd worden voor verdere berekeningen. Een gemiddelde resterende staalplaatdikte van 4,93mm kan bijgevolg worden genoteerd.

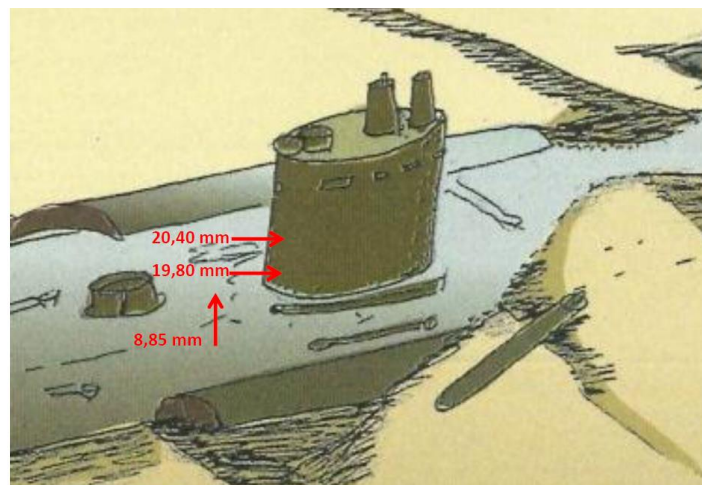


Figuur 41: Situering plaatdiktemetingen MV Garden City (Van Haelst, 2015)

- **UB III Fairybank** 10 februari 2015:

Op de commandotoren (conning tower) werd een resterende staalplaatdikte van 19,80mm en 20,40mm gemeten. Gemiddeld noteren we 20,10mm.

De drukhuid mat nog 8,85mm.



Figuur 42: Situering plaatdiktemetingen UB-III-klasse Fairybank (Van Haelst, 2015)

- **West-Hinder** 11 februari 2015:

Bij deze duik was de zichtbaarheid nihil en kwamen beide duikteams vast te zitten in vistuig. Wegens een tijdstekort konden er bijgevolg geen metingen worden uitgevoerd. De maximale duiktijd bedraagt immers een half uur en het ontbloten van het wrakstaal (wegbikken van de concrementie) neemt ook enige tijd in beslag.

- **Sabrina Z.577** 11 mei 2015:

Bakboord achteraan op anderhalve meter van de schroef en evenveel van de zeebodem werden zeven metingen uitgevoerd. De resterende plaatdikte bedroeg 3,65mm tot 5,55mm met een gemiddelde van 5,14mm.



Figuur 43: Situering plaatdiktemetingen Sabrina Z.577 (Van Haelst, 2015b)

- **MV Birkenfels** 12 mei 2015:

Bovenaan op de wand van het ruim konden 14 metingen worden uitgevoerd met resultaten tussen 4,55mm en 4,95mm. Een gemiddelde resterende staalplaatdikte van 4,70mm werd berekend.

- **SS Kilmore** 13 mei 2015:

De plaats waar men initieel wilde meten bleek uitsluitend uit corrosieproducten te bestaan. Er was na het wegbikken van deze laag geen staal meer te zien. Er kon nog een ander stuk scheepsstaal met concrete worden meegenomen waarvan de staaldikte nog 2 à 3 millimeter bedroeg. Dat is overigens te weinig voor de Cygnus DIVE M2 die slechts plaatdiktes van minimaal 3mm kan meten.

- **UII** 13 mei 2015:

Hier konden in totaal 34 metingen worden uitgevoerd waaruit de volgende gemiddelde resterende plaatdiktes werden berekend:

- 30,55mm stuurboord onderaan het achterschip
- 6,73mm voor de drukhuid centraal bovenop het dek
- 11,27mm voor de drukhuid aan stuurboordzijde

5.5 Werkelijk plaatdikteverlies en relatie met het corrosiemodel

Om het werkelijke plaatdikte-verlies te berekenen moet de originele staalplaatdikte van het schip gedetermineerd worden uit de (bouw)plannen⁹. Deze plannen zijn helaas niet altijd beschikbaar nadat het wrak reeds tientallen jaren op de zeebodem ligt. Hieronder volgt een opsomming van de gevonden gegevens omtrent de plaatdiktes:

De drukhuid van de UB III-klasse duikboot op de Fairybank werd origineel uit 12mm dik staal vervaardigd en meet nu nog 8,85mm. Dat betekent een verlies van 3,15mm op 97 jaar tijd.

De commandotoren van deze UB III werd uit 30mm dik staal vervaardigd en er blijft slechts 20,10mm over. Dat is een verlies van 9,90mm in 97 jaar tijd. Hier werd mogelijk een andere staalsoort gebruikt of deze staalplaat werd voor het zinken ernstig toegetakeld.

De MV Garden City werd vervaardigd uit 8mm dik zacht staal en meet momenteel nog 4,93mm dik. Dat betekent een verlies van 3,07mm in 46 jaar.

De drukhuid centraal bovenaan de duikboot U11 werd origineel uit 12mm dik staal vervaardigd en meet nog 6,73mm. Dat betekent een verlies van 5,27mm in 101 jaar tijd.

De MV Birkenfels werd eveneens geconstrueerd uit 8mm dik staal waarvan nu nog 4,70mm overblijft. Dat betekent een verlies van 3,30mm in 49 jaar tijd.

Gezien de sterk verschillende resultaten van de UB III wordt er slechts verder gegaan met de resultaten van de drie laatste wrakken.

Vervolgens wordt het corrosiemodel van Melchers uitgewerkt voor de desbetreffende drie wrakken:

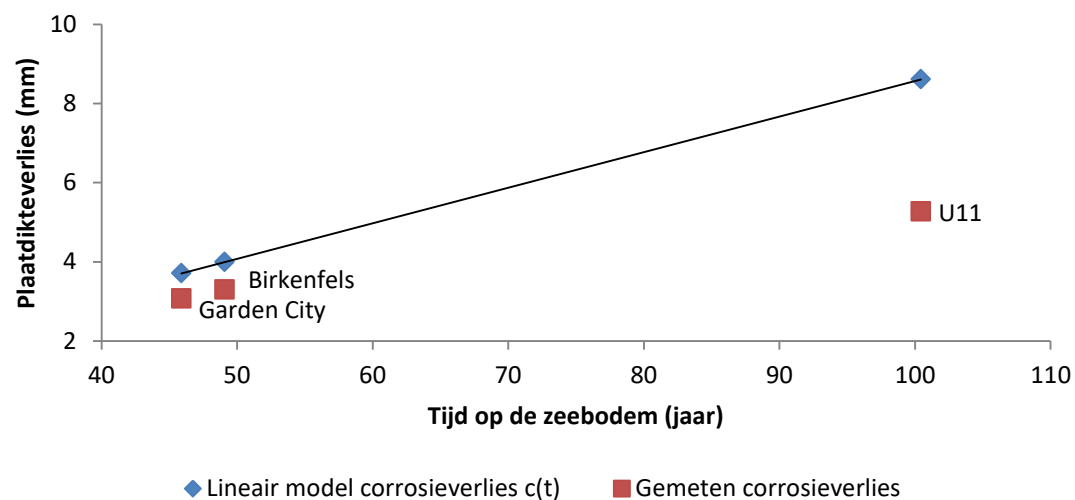
Allereerst blijft de coating van het schip nog gemiddeld 5,5 jaar intact. De tijdsspanne op de zeebodem t moet dus worden verminderd met 5,5 jaar. Ook moet een extra corrosieverlies van 0,05mm worden gerekend door de gemiddelde stroming nabij de zeebodem. Zodoende kan volgens formule (17) het corrosieverlies berekend worden. De uiteindelijke formule voor het corrosieverlies in mm/jaar wordt dan:

$$c(t) = (0,1244 + (t-5,5)*0,0536)*1,6765 + 0,05 \quad (22)$$

⁹ Shell Expansion Plan, scheepsplan waarop onder meer de originele staalplaatdikte vermeld wordt.

Tabel 6: Het corrosiemodel versus in situ metingen (eigen werk)

Wrak	Datum gezonken	Datum metingen	Tijd op de zeebodem (in jaar)	Resterende termijn intacte coating (in jaar)	Corrosieverlies c(t) volgens Melchers' model (in mm)	Gemeten corrosieverlies (in mm)
U11	09/12/1914	13/05/2015	100,428	5,5	8,789	5,27
Birkenfels	07/04/1966	12/05/2015	49,097	5,5	4,176	3,30
Garden City	19/03/1969	10/02/2015	45,894	5,5	3,888	3,07



Figuur 44: Lineair corrosiemodel versus in situ metingen (eigen werk)

Op het eerste zicht lijkt het corrosiemodel wat pessimistisch en is er een minder groot plaatdikteverlies dan voorspeld. De U11 lijkt sterk af te wijken (3,34mm of 39%) van Melchers' model, maar dit zou misschien verklaard kunnen worden door de gladde vorm van een duikboot. Een duikboot vergaart namelijk niet snel biologische aangroei (Van Haelst, 2014) waardoor proces 4 wordt uitgesteld en de corrosie vertraagt door het einde van proces 3. Dit is slechts een hypothese want uit deze summiere data kan eigenlijk nog geen standvastige conclusie getrokken worden.

5.6 Zoeken naar een extra bruikbaar WOII-wrak

Om het lineaire corrosiemodel van Melchers voor wrakken op lange termijn verder te toetsen aan de werkelijkheid, moeten best ook punten in het midden van de curve worden gezocht. Op die manier kan minstens de lineariteit bevestigd of ontkracht worden.

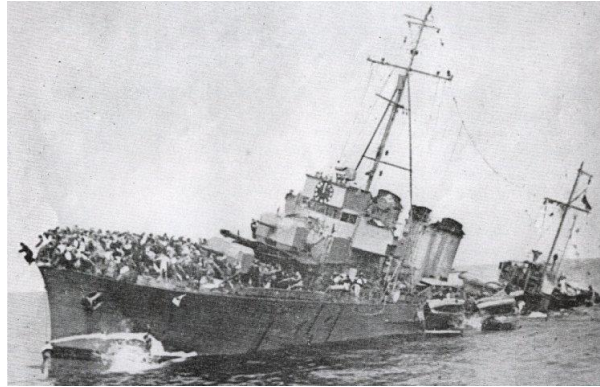
Midden tussen de U11 van 1914 en de twee andere wrakken van de jaren '60 bevinden zich de jaren 1940-1950. Een wrak dat in die tijd gezonken is zou nu circa 70 jaar op de zeebodem liggen. Een bijkomende handigheid is dat deze periode rond de Tweede Wereldoorlog is en er bijgevolg een groter dan gemiddelde hoeveelheid wrakken in aanmerking kunnen komen.

Initieel beperkte het zoeken zich tot scheepswrakken die ooit in Frankrijk gebouwd waren omdat er op 10 november een bezoek aan het Franse museum French Lines te Le Havre was gepland. Zij bezitten een groot archief met alle data, papieren en plannen van allerhande Franse maritieme instellingen. Ook scheepsplannen van vroegere bouwerven bevinden zich hier en er was dus een grote kans hier bruikbare scheepsplannen te vinden. E-mailcorrespondentie met Natacha Potéreau, verantwoordelijke van het archief, bevestigde dat er niets digitaal beschikbaar is en dat een bezoek het meest efficiënt zou zijn.

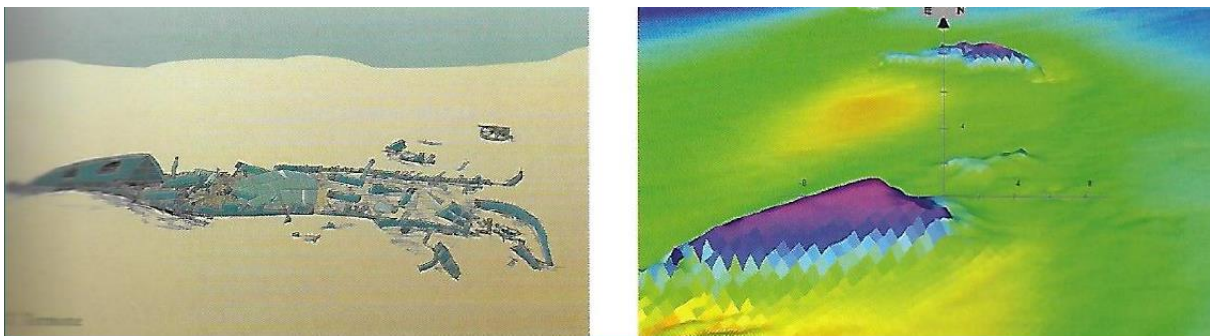
Bij het onderzoek werd de databank¹⁰ van het Agentschap Cultureel Erfgoed volledig doorlopen: maar hieruit kon uiteindelijk slechts één wrak worden geselecteerd: **Bourrasque**. Dit Franse fregat – een *destroyer* of torpedobootjager met dezelfde functie als de HMS Wakeful – werd ingezet tijdens operatie Dynamo van WOII en werd geraakt door een mijn op 30 mei 1940. Vervolgens werd ze beschoten door de kustbatterij van Nieuwpoort waarbij het achterschip geraakt werd en het vaartuig zonk. Gelukkig konden er nog 559 opvarenden worden gered, maar logischerwijs wordt het erkend als oorlogsgraf. Het wrak is goed bewaard en bevindt zich op 11,7m tot 16,5m diepte. Het is voor 60% bedolven – mogelijk de reden

¹⁰ http://www.maritieme-archeologie.be/WK_Ship_GenView.aspx

waarom het zo goed bewaard werd – door de zeebodem, maar de machinekamer en boeg zijn goed zichtbaar. Het schip behoorde toe aan de Franse Marine en werd gebouwd door **Chantiers de France, Duinkerke (FR)** (VLIZ, z.d.-a).



Figuur 45: Foto van de Bourrasque na de beschieting (VLIZ, z.d.-a)



Figuur 46: Huidige toestand Bourrasque (tekening Termote en multibeam sonar scan VLIZ)

Verder werd er geen ander Frans gebouwd wrak gevonden omwille van het feit dat ook vaak de bouwer niet gekend is, het wrak reeds geborgen werd of het wrak niet zonk tussen 1935 en 1955. Databanken van Afdeling Kust¹¹ en dergelijke leverden geen enkel nieuw wrak op. De Bourrasque is echter een militair vaartuig en bij French Lines is men niet in het bezit van militaire informatie. Toevallig werden hier wel de plannen van de Garden City teruggevonden. Ondertussen zijn er echter wel reeds plannen verkregen van de Bourrasque bij een bezoek aan het archief *Service Historique de la Défense* te Parijs begin september 2017. Men is enkel nog op zoek naar het juiste Shell Expansion Plan om gericht te kunnen duiken en goed bruikbare metingen uit te voeren.

¹¹ <http://www.afdelingkust.be/nl/wrakkendatabank>

Om het onderzoek niet te laten afhangen van één enkel wrak werd de zoektocht uitgebreid naar schepen die in België gebouwd werden en ook zonken tussen 1940 en 1950. Volgens dezelfde werkwijze als de vorige werden de volgende wrakken gevonden:

Wandelaar, Lichtschip nr. 4	Slecht geconserveerd	deels geborgen
SS Emeraude (..gebouwd in UK..)	Slecht geconserveerd	deels ontmanteld
Zulma Maria N.757	Slecht geconserveerd	100% bedekt
Aloha TSMY	Slecht geconserveerd	deels ontmanteld
Emile Z.139	Gemiddeld geconserveerd	100% bedekt
Charles Velghe N.140	Gemiddeld geconserveerd	(visser)
O.143?	Gemiddeld geconserveerd	(visser)
Julia Denise B.14	Gemiddeld geconserveerd	(visser, bij Zeebrugge)

De eerste vijf wrakken zijn slecht geconserveerd en/of geborgen en/of volledig bedekt waardoor ze niet in aanmerking komen. De laatste 3 komen schijnbaar wel in aanmerking maar na e-mailcorrespondentie met VLIZ-medewerker en duiker Sven Van Haelst blijken deze wrakken echter praktisch onbruikbaar. De volgende redenen werden aangehaald:

Charles Velghe N.140

- × Deze ligt dichtbij de kust waardoor er vaak slecht zicht is.
- × Het wrak is in zeer slechte en fragmentarische staat waardoor het sowieso moeilijk wordt om te weten op welk onderdeel van het wrak men nu juist aan het meten is.
- × Het ligt dichtbij het wrak van de HMS Withley waardoor het gevaar bestaat dat men op onderdelen van de Withley aan het meten is i.p.v. de N.140.

Julia Denise B.14

- × Ten eerste is men niet helemaal zeker of dit wrak daadwerkelijk de Julia Denise is.
- × Het is een houten wrak met slechts enkele metalen verstevigingen, i.e. minder geschikt voor dit corrosieonderzoek. Ook werd het geraakt door zeemijnen waardoor weer moeilijk te herkennen is op welk deel de duiker juist metingen uitvoert.
- × Haar ligging vlakbij de kust, net voor Zeebrugge en dicht bij de monding van de Westerschelde, zorgt voor een permanent slechte zichtbaarheid.

O.143

- × Ook hiervan is men niet 100% zeker dat dit wel de O.143 is.
- × Het was een houten schip dat door een zeemijn uit elkaar is gereten.
- × Ook hier is de zichtbaar meestal heel slecht door de ligging vlakbij de kust nabij de haven van Zeebrugge en de Westerscheldemonding.

Tenslotte werd er eveneens gezocht naar schepen die in Nederland gebouwd werden aangezien de Belgische schepen niets opleverden. Nederland heeft een sterk nautisch verleden en de communicatie met het buurland zou wel iets kunnen opleveren.

De volgende drie wrakken werden bruikbaar geacht:

- Het **SS *Rijnstroom*** is een vracht- en passagierschip dat door de U17 op 2 maart 1940 werd getorpedeerd. Het oorlogsschip zou enerzijds ver genoeg in zee liggen om een relatief goede zichtbaarheid onder water te kunnen garanderen. Anderzijds ligt het wrak relatief diep (-36m) waardoor de bodemtijd van de duikers korter is teneinde decompressie te voorkomen. Vervolgens dient er ook rekening mee gehouden te worden dat indien dit wrak net in het voorzorgsgebied rondom een windmolenpark ligt er bij iedere duik een vergunning moet worden aangevraagd.
- Het **SS *Sint Annaland*** ook gekend als ***Polflied*** is een goed bewaard vrachtschip dat op 17 maart 1940 verging. Het is echter geen oorlogswrak. De bulkcarrier ligt ver genoeg uit de kust om een goed zicht te garanderen. Het is erg verwoest maar de kiel zou zichtbaar zijn waardoor de wandplaten net naast de kiel gemakkelijk te meten zouden zijn. Dit wrak ligt ook op 36 meter diepte waardoor er weer weinig bodemtijd zal zijn voor de duikers.
- Het **SS *Grutto*** met bouwnummer 541 is een vrachtschip dat op 5 maart 1940 tot zinken werd gebracht en gezien wordt als oorlogsgraf. Ook dit wrak ligt ver genoeg uit de kust. Het is in twee gebroken en het middengedeelte ligt uiteen gereten en verspreid over 55 meter. Het voorschip is echter wel nog geschikt om metingen op uit te voeren. Maar ook bij dit wrak moet nagegaan worden of het niet in een van de voorzorgsgebieden rondom een windmolenpark ligt omdat er dan bij iedere duik een vergunning zou moeten worden aangevraagd.

(Theuns, z.d.; VLIZ, z.d.-a)

Alles bij elkaar zijn het toch drie goede kandidaten, wat later ook werd bevestigd door Mr. Van Haelst, en daarom werd er in oktober 2017 contact opgenomen met het NIOZ¹² om de Nederlandse scheepsplannen te vinden. Zij verwezen door naar de *AWN Vereniging van Vrijwilligers en de Archeologie* en de *Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed*. Ook deze konden ons niet helpen en de laatste gaf weer andere contactadressen door.

Zodoende werden het Scheepvaartmuseum Amsterdam en het Maritiem Museum van Rotterdam gecontacteerd voor alle drie de schepen. Ook het Streekarchief Midden-Holland werd gecontacteerd inzake het archief *N.V.C. van der Giessen in Krimpen a/d IJssel* voor de stoomschepen *Rijnstroom* en *Grutto*. Het Gemeentearchief Schiedam werd eveneens gecontacteerd voor het archief van de *N.V. werf Gusto* van de SS Sint-Annaland.

Zij kwamen echter allen terug met een negatief antwoord en ook bleek dat er bepaalde geïnventariseerde¹³ stukken op mysterieuze wijze waren verdwenen. Zo is een interessante zwaartepuntberekening van het SS Sint-Annaland, vergezeld van bouwtekeningen, hoogstwaarschijnlijk verloren gegaan bij het transport van het Maritiem Museum te Rotterdam naar het Scheepvaartmuseum te Amsterdam.

Uiteindelijk nam Mr. Allewelt, voorzitter van *Erfgoed Werf Gusto*, contact op naar aanleiding van een doorgestuurd e-mail. Hij wist te vertellen dat bij de sluiting van *IHC Gusto BV* in 1978 bijna het gehele archief werd vernietigd. De roerige jaren '80 met de ontmanteling van de scheepsbouw in Nederland hebben ertoe geleid dat de weinige restanten van het archief ook meermaals van locatie zijn veranderd. Daarbij is een groot deel toch nog vernietigd en koos men ervoor om wegens plaatsgebrek enkel de offshore periode (1968-1978) bij te houden. Ook wist hij te vertellen dat het SS Sint-Annaland destijds werd afgeleverd aan de Steenkolen Handels Vereniging (SHV) te Rotterdam en dat deze tegenwoordig in Utrecht gevestigd is. Als laatste kon hij ook nog vertellen dat het SS Grutto destijds eigendom was van Ph. V. Ommeren te Rotterdam en dat deze onderneming is overgegaan in Vopak te Rotterdam.

Bijgevolg werden SHV Holdings en Vopak gecontacteerd maar deze konden ons niet helpen voor wat betreft scheepsplannen van de nodige wrakken.

¹² NIOZ, het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee

¹³ <http://www.maritiemdigitaal.nl/>

Tot op heden is er dus nog geen ander wrak gevonden om het lineaire corrosiemodel van Professor Melchers te toetsen. Enkel de Bourrasque zal misschien later dit jaar bij een duikcampagne bruikbaar zijn.

5.7 Oefening wrakquotering

Alvorens een wrak de beschermde status krijgt wordt het zoals besproken getoetst aan verscheidene criteria. Daarom werkte het Agentschap Onroerend Erfgoed waardestellende criteria uit om zo objectief mogelijk de erfgoedwaarde van een scheepswrak te bepalen. Vervolgens werd er door het AOE gevraagd om individueel deze wrakquoteringsoefening te maken aan de hand van de vooropgestelde criteria met bijhorende quotering en alle nodige artikels die via WeTransfer werden doorgestuurd, teneinde het evaluatiesysteem indien nodig te verbeteren en feedback te verkrijgen.

Er werd gevraagd om de oefening te maken voor de wrakken van de *UII*, de *Y-17 US Army Tanker* en het *Buiten Ratel Wrak*.

De criteria zijn een combinatie van het reeds bestaande Nederlandse maritieme waarderingssysteem en het Vlaamse waarderingssysteem voor sites op land.

In eerste instantie wordt er gekeken naar de inhoudelijke kwaliteit van een wraksite. Hierbij worden waarden toegekend aan de zeldzaamheid van de wraksite, de datering, de identificatie als oorlogs- of zeemansgraf en de link met zowel de landschappelijke context als met een historische periode of bepaalde historische gebeurtenis. Deze beoordelingen geven zo een waarde aan het wetenschappelijke/materiële aspect van een bepaalde wraksite.

Vervolgens wordt ook de belevingswaarde onder de loep genomen. Hierbij wordt de immateriële waarde van een wraksite enerzijds beoordeeld op basis van de aan- of afwezigheid van het specifiek doorleven van het wrak in de herinnering van (een deel van) de bevolking (herinneringswaarde) en anderzijds op basis van de mate waarbij de site bezocht wordt (i.e. bedoken wordt door duikers). Indien bij deze twee criteria géén positieve beoordeling mogelijk is, kan er gekeken worden naar het potentieel van ontsluiting. Deze drie criteria geven dan aan in hoeverre een wraksite door de bevolking nog ‘beleefd’ wordt of kan worden (Vermeersch e.a., 2015).

Nadat het inhoudelijke aspect en de beleving zijn beoordeeld, wordt vervolgens gekeken naar de fysieke kwaliteit van het scheepswrak. Bij deze beoordeling wordt de gekende fysieke

toestand van de site geëvalueerd omdat de graad van bewaring bepaalt hoe het wrak verder beheerd kan worden (bv. behoud en eventuele bescherming). Dit aspect wordt pas in tweede instantie beoordeeld omdat het geen doorslaggevende impact mag hebben op het bepalen van de erfgoedwaarde van een site. Een slecht bewaarde site kan bijvoorbeeld toch een hoge erfgoedwaarde bezitten (Vermeersch e.a., 2015).

Waarden	Criteria	Scores			
Inhoudelijke kwaliteit	Zeldzaamheid in de Belgische Noordzee	0 (niet zeldzaam)	1 (zeldzaam)		
	Datum van vergaan	1 (1946-nu)	2 (1919-1945)	3 (1800-1918)	4 (voor 1800)
	Status als grafcontext?	0 (afwezig/onbekend)	1 (zeemansgraf)	2 (oorlogsgraf)	
	Landschappelijke of historisch-archeologische context	0 (afwezig/onbekend)	1 (aanwezig)		
	Link met historische gebeurtenis	0 (afwezig/onbekend)	1 (algemeen)	2 (specifiek)	
Belevingswaarde	Herinneringswaarde	0 (afwezig/onbekend)	1 (aanwezig)		
	Frequentie van beduiken	0 (laag, 0-10 gemelde duiken per jaar)	1 (matig, 10 – 50 gemelde duiken per jaar)	2 (veel, >50 gemelde duiken per jaar)	
	Potentieel voor ontsluiting (indien voorgaande 2x0)	0 (afwezig)	1 (aanwezig)		
	Fysieke kwaliteit	Integriteit van het wrak	1 (0-33%)	2 (33-66%)	3 (>66%)
	Conservering	1	2	3	
	Mate van bedekking	1 (0-33% bedekt)	2 (33-66% bedekt)	3 (>66% bedekt)	

Figuur 47: Overzicht waarde-stellende criteria (Vermeersch e.a., 2015)

Een wrak wordt aanzien als zeldzaam wanneer het uniek is, unieke onderdelen bevat en/of er duidelijk kan worden beargumenteerd hoe ze hierdoor bijdragen aan de maritieme geschiedenis.

De datering is belangrijk omdat pas sinds de 19^{de} eeuw meer schepen uit metaal geconstrueerd werden en na de Wereldoorlogen geen enorm belangrijke gebeurtenissen aan het wrak kunnen worden gekoppeld.

De grafcontext dient om gewicht te geven aan de emotionele waarde voor nabestaanden. In een oorlogscontext heeft dit bijkomend ook een geschiedkundige waarde.

Vele wrakken lijken op een willekeurige plaats gezonken te zijn maar de contextwaarde probeert aan te geven of er een link is tussen de plaats waar het schip zonk en diens functie of dienst. Zo kan een wrak daar gediend hebben als beveiligingsvaartuig voor de scheepvaart, of op die plaats op een zeemijn gebotst zijn of zelfs op een specifieke zandbank gelopen zijn.

De link met een historische gebeurtenis kan er zijn op twee verschillende niveaus. Enerzijds kan het algemeen gekoppeld worden aan een historische periode en anderzijds aan een specifieke gebeurtenis zoals bijvoorbeeld respectievelijk internationale handel van de VOC of de Raid op Zeebrugge.

De herinneringswaarde van een wrak wordt toegekend wanneer het verhaal nog leeft bij een significant deel van de bevolking. Bijvoorbeeld wanneer het schip met een groot aantal opvarenden is gezonken door een historische gebeurtenis of wanneer er een gekende mythe aan gekoppeld is.

De frequentie van beduiken is ook een maat voor de beleving van de bevolking en voor het potentieel van het promoten van duiktoerisme voor een wrak.

Het potentieel voor ontsluiting heeft zowel betrekking op het duiktoerisme als op de bekendmaking van een site bij de bevolking via een brochure of dergelijke.

Het quoteren van de fysieke kwaliteit is vrij eenvoudig en wordt telkens opgedeeld in drie niveaus. De integriteit wordt opgedeeld in gefragmenteerd (1), een herkenbaar geraamte (2) en een intact wrak (3). De conservering is oftewel slecht (1), gemiddeld (2) of goed (3). Hoe meer bedekt een wrak is, hoe trager het corrodeert en hoe hoger de score zal zijn.

Met deze theoretische bagage maakte ik de wrakquoteringsoefening als volgt:

Buiten Ratel Wrak:

Zeldzaam (0/1):

Handelschip, ongeïdentificeerd, meerdere zulke wrakstukken in de Noordzee. Omdat het niet het enige in de buurt is, vinden we het niet zeldzaam → 0

Bron: Buitenratel-wrak Termote

Datum van vergaan (1-4):

1740-1750 → 4

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken

Status als grafcontext (0-2):

neen → 0

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken

Landschappelijke of historisch-archeologische context (0-1):

Vermits het duidelijk niet de Barneveld noch de Bethlehem betreft is er geen specifieke informatie over welk schip het zou zijn, dus geen historische context. Geen speciale plaats, geen landschappelijke info. → 0

Bron: Buitenratel-wrak Termote > laatste paragraaf

Link met historische gebeurtenis (0-2):

Algemeen: Handelschip in periode VOC, maar volgens de informatie is het duidelijk geen VOC schip. De periode is wel duidelijk geweten, daarom 1 (algemeen) als score.

Bron: Buitenratel-wrak Termote > laatste alinea

Herinneringswaarde (0-1):

Wij geven hier een 0 aangezien het wrak ongeïdentificeerd is en het duidelijk niet een bevolkingsgroep aanbelangt.

Bron: Buitenratel-wrak Zeebroek et al 2010

Frequentie van beduiken (0-2):

Er is geen enkele melding bij het MRCC, dus 0. Maar het zou kunnen dat bepaalde duiken niet werden aangegeven. Dus een 1 is eventueel mogelijk indien er 10 duiken niet aangegeven zouden zijn.

Bron: SBO_IWT-Rapport > p.10 > Gemiddeld aantal duiken/jaar volgens MRCC gekend

Potentieel voor ontsluiting (0-1):

9 mijl voor Koksijde (haalbaar), redelijke zichtbaarheid (na de bloei, einde lente tot zomer), weinig interessant door weinig overblijfselen → 0

Bron: Buitenratel-wrak Zeebroek et al 2010 > p.237

Integriteit (1-3):

Op de foto's zijn geen herkenbare structuren zichtbaar, enkel losse fragmenten zoals ankers. Daarom een 1.

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken > toestand

Conservering (1-3):

Rechtstreeks overgenomen uit de databank; bewaringstoestand: slecht → 1

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken > toestand

Mate van bedekking (1-3):

Rechtstreeks overgenomen uit de databank: 60% bedekt → 2

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken > toestand

U-11:

Zeldzaam (0/1):

“...enige van de vijftien onderzeebootwrakken die niet tot de Flandernflottille behoorde.”

Uniek in onze Noordzee → 1

Bron: U-11 – Termote 1999

Datum van vergaan (1-4):

9 à 12/12/1914 => 3

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken

Status als grafcontext (0-2):

Oorlogsgraf → 2

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken

Landschappelijke of historisch-archeologische context (0-1):

U-11 vernietigd door Britse mijn net buiten Zeebrugge. Context is gekend → 1

Bron: U-11 – Termote 2009 > p.2

Link met historische gebeurtenis (0-2):

Eerste gestationeerde lange-afstandsonderzeeboot tijdens WO I, geen specifiek gekende oorlogsgebeurtenis → 1

Bron: U-11 – Termote 1999 > p.1

Herinneringswaarde (0-1):

Op 9 december 1914 Zeebrugge verlaten, 25 koppige bemanning zonder waarschuwing mee tenonder. Familie en nabestaanden hebben nog steeds deze herinnering. → 1

Bron: U-11 – Termote 1999 > paragraaf 2

Frequentie van beduiken (0-2)

6 duiken per jaar → minder dan 10 → 0

Opmerking: Ook hier kunnen net als voorgaande sommige duiken niet aangegeven zijn.

Bron: SBO_IWT-Rapport > p.10 > Gemiddeld aantal duiken/jaar volgens MRCC gekend

Potentieel voor ontsluiting (0-1):

n.v.t. want herinneringswaarde = 1

[Net buiten Zeebrugge, zeer slechte zichtbaarheid, stroming, scheepvaart → 0]

Integriteit (1-3):

Gebroken, goed bewaard, drukhuid nog grotendeels intact, heel duidelijk te herkennen → 3

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken > toestand

Conservering (1-3):

Goed + drukhuid voor 90% aanwezig → 3

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken > toestand

Bron: U-11 – Termote 2009 > p.2

Mate van bedekking (1-3):

Wrak steekt gemiddeld 2 à 3 meter boven het zand en wrak is slechts 3,15m hoog → minder dan 33% bedekt → 1

Bron: U-11 – Termote 2009 > p.2 & <http://wrecksite.eu/wreck.aspx?141758>

Y-17 US Army Tanker:

Zeldzaam (0/1):

Één van 10 identieke Amerikaanse tankers ooit van die serie gebouwd, uniek in de Noordzee → 1

Bron: Y-17 – US Army Tanker – Grote Rede 2014 > p.4

Datum van vergaan (1-4):

9/4/1945 → 2

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken

Status als grafcontext (0-2):

Oorlogsgraf → 2

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken

Landschappelijke of historisch-archeologische context (0-1):

Geen specifieke plaats of ligging, geen specifieke opdracht of doel → 0

Bron: in geen van alle documenten iets terug te vinden, positie midden Noordzee (voor kust Oostende)

Link met historische gebeurtenis (0-2):

In de periode van WO II gezonken, dit is een criterium voor “algemeen”, dus geven we een 1.

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken

Herinneringswaarde (0-1):

Veel onduidelijkheden, geen specifiek gekende gebeurtenis, oorlogsgraf is ook niet gelinkt met eigen bevolking → 0

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken > Historiek

Frequentie van beduiken (0-2):

Niet vermeld => minder dan 10 → 0

Opmerking: Ook hier kunnen net als voorgaanden sommige duiken niet aangegeven zijn.

Bron: SBO_IWT-Rapport > p.10 > Gemiddeld aantal duiken per jaar volgens MRCC gekend

Potentieel voor ontsluiting (0-1):

Quote: “...Het verhoogt daarnaast ook de belevingswaarde...” → 4 onderzoekers vinden het de moeite waard → 1

Ca. 14 mijl uit de kust en op de grens met goede zichtbaarheid (gedurende ganse jaar), dus haalbaar en daarom ook een 1.

Bron: Y-17 – US Army Tanker – Grote Rede 2014 > p.4

Integriteit (1-3):

Gebroken, bovenbouw in slechte staat (in stukken bovenop wrak verspreid), duidelijk herkenbaar, ook onderdelen onderscheidbaar → 3

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken > toestand

Conservering (1-3):

Gemiddeld: onderbouw goed, bovenbouw zeer slecht → 2

Bron: Databank Onroerend Erfgoed <http://www.maritieme-archeologie.be/> > Wrakken > toestand

Mate van bedekking (1-3):

Op multibeam en schets is duidelijk nog veel te zien, iets meer dan 1/3e bedekt → 2

Bron: Y-17 US Army Tanker – Termote 2012 > afbeeldingen

	Zeldzaamheid (0/1)	Datering (0-4)	Graf (0-2)	Context (0-1)	Historische Gebeurtenis (0-2)	Duikers (0-2)	Herinnering (0-1)	Ontsluiting (0-1)	Totaal Erfgoedwaarde	Integriteit (1-3)	Conservering (1-3)	Bedekking (1-3)	
Buiten Ratel 5	0	4	0	0	1	0~1	0	0~1	5	6	1	1	2
U-11	1-	3	2	1	0-2	1	0	1	9-10	3	3	3	1
Y-17	1	2	2	0	1	0	0	1	7	3	2	2	2
US Army tanker	0								5				

Bijlage SBO_IWT Rapport

Eigen analyse

Mogelijke variatie

! = iets anders interpretatief mogelijk

Figuur 48: Samenvatting resultaat wrakquoteringsoefening (eigen werk)

De criteria lijken goed uitgekozen en voldoende objectief. Alleen kan de vraag gesteld worden of de datum van vergaan (datering) niet te zwaar doorweegt. Het is namelijk mogelijk dat een scheepswrak met nagenoeg geen historische meerwaarde of belevingswaarde op deze manier toch een relatief hoge score krijgt. Deze wrakken gaan beschermen is bijgevolg relatief nutteloos, zeker wanneer ze ook nog slecht geconserveerd zouden zijn. Bovendien kan ook nog de kritische vraag gesteld worden of een wrak daarom eerst 100 jaar als het ware zou moeten wegrotten om het dan pas een voldoende hoge quotering toe te kennen en te gaan beschermen.

Deze criteria zullen voortaan gebruikt worden als werkinstrument om de erfgoedwaarde van scheepswrakken in de Belgische Noordzee te bepalen. De werkgroep van de ontvanger van het maritiem erfgoed – de Gouverneur van West-Vlaanderen – voegt daar echter niet onbelangrijk aan toe dat wrakken die laag scoren maar wel representatief zijn voor het maritieme verleden toch ook kunnen worden voorgedragen om als cultureel erfgoed erkend te worden (Vermeersch e.a., 2015).

6. Conservering

Vanaf het moment dat een scheepswrak erkend wordt als cultureel erfgoed door de staatssecretaris voor de Noordzee, Philippe De Backer, wordt het op verschillende manieren beschermd. Er komt controle op het duiken, er mag niets boven worden gehaald en er mogen geen werkzaamheden worden uitgevoerd die het wrak zouden kunnen beschadigen. Maar het KB van 21 september 2016 geeft ook aan dat elk erkend wrak bijkomende individuele beschermingsmaatregelen kan krijgen. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om meer te doen dan wat men nu doet. Het corrosieproces stopt hierdoor immers niet en het zal er na verloop van tijd toch voor zorgen dat het wrak weg is, ondanks alle geleverde inspanningen.

Fundamenteel gezien heeft corrosie drie elementen nodig: metaal, zuurstof en een elektrolyt. Vergelijkbaar met het principe van de vuurdriehoek geldt hier hetzelfde: de corrosie stopt wanneer één van de drie elementen wordt weggehaald.

Zuurstof is onder water echter moeilijk te elimineren, het is namelijk opgelost in het zeewater wat op zijn beurt onmogelijk weg te halen is.

Het metaal is daarentegen gemakkelijker te beïnvloeden in deze driehoek. Door de elektro potentiaal van het metaal te beïnvloeden kan de corrosie worden afgeremd of zelfs gestopt.

Men kan ook het elektrolyt scheiden van het metaal met behulp van een effectieve coating (Potters, 2015).

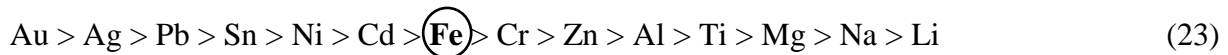
Het objectief van dit hoofdstuk is om beschermingstechnieken aan te reiken die ook de corrosie zouden vertragen of stoppen. Ook zullen de mechanismen van deze technieken worden besproken en hun effect op het wrak en de omgeving. Finaal zal er ook gekeken worden naar de haalbaarheid van elk van deze technieken.

6.1 Opofferingsanodes

Wanneer twee metalen in een waterige oplossing met elkaar in verbinding staan ontstaan er twee redoxkoppels en bijgevolg een galvanische cel. Het ene metaal zal corroderen en ionen in oplossing laten gaan waardoor vrijgekomen elektronen naar het andere metaal stromen, terwijl het andere metaal onaangetast blijft. Afhankelijk van het redoxkoppel heeft elk metaal

een bepaalde affiniteit voor het opnemen van elektronen. Dit wordt uitgedrukt door middel van de redoxpotentiaal¹⁴ E^0 . Hoe positiever de E^0 van een metaal is, hoe liever het elektronen opneemt en hoe edeler het metaal is. Het minst edele metaal zal daarom eerst oxideren waardoor het edelere metaal langer onaangetaast blijft (Potters, 2015).

De volgende reeks rangschikt de metalen in functie van hun evenwichtspotentiaal E^0 .



	E^0
• $\text{Li}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Li}$	- 3.05
• $\text{K}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{K}$	- 2.93
• $\text{Rb}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Rb}$	- 2.92
• $\text{Cs}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Cs}$	- 2.92
• $\text{Ba}^{++} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ba}$	- 2.91
• $\text{Sr}^{++} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Sr}$	- 2.89
• $\text{Ca}^{++} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ca}$	- 2.87
• $\text{Na}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Na}$	- 2.71
• $\text{Mg}^{++} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	- 2.37
○ $\text{H}_2\text{PO}_2^- + e^- \rightleftharpoons \text{P} + 2 \text{OH}^-$	- 2.05
• $\text{Be}^{++} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Be}$	- 1.85
• $\text{Al}^{+++} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Al}$	- 1.66

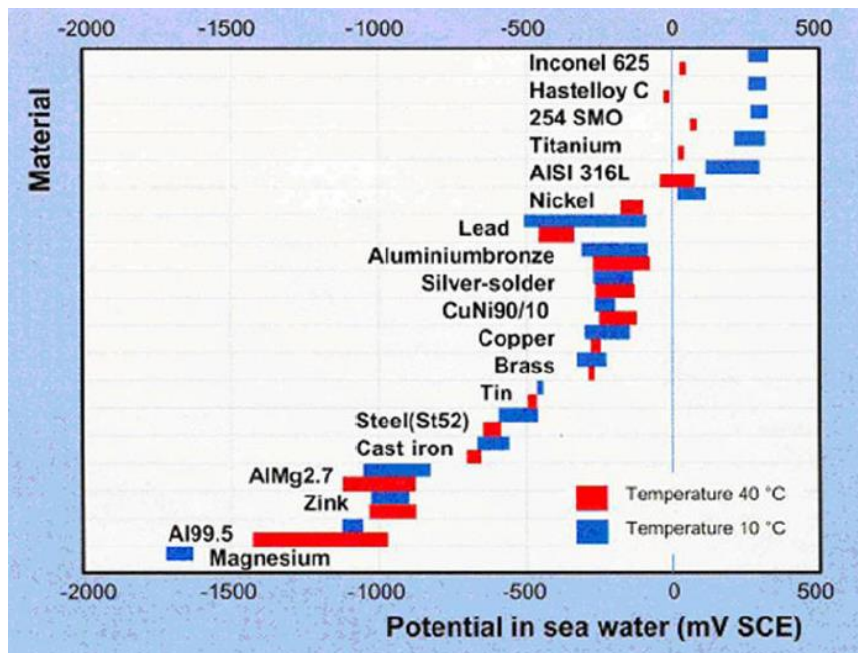
Figuur 49: Voorbeelden van redoxpotentialen volgens de Tabel van Mendeleïev (UCB, 2012)

Wanneer men twee verschillende metalen in contact brengt met elkaar vormt er zich een galvanisch koppel waarbij het meer edele als kathode en het meer onedele als anode gaat werken. De corrosie van een scheepswrak kan zo worden ingedijkt met behulp van kathodische bescherming met opofferingsanodes – oftewel GACP¹⁵. De redoxpotentiaal van het scheepsstaal – de drijvende kracht achter de galvanische corrosie – kan op deze manier zodanig verlaagd worden dat de corrosie stopt (Bartuli e.a., 2008).

Omdat zeewater een mengsel van elektrolyten is, is het moeilijk om de redoxpotentiaal van scheepsstaal (zacht staal) daarin te berekenen. Uit metingen blijkt dat wanneer er een elektro potentiaal van -860mV wordt bereikt de corrosie zal stoppen (ABS, 2007).

¹⁴ De redoxpotentiaal E wordt uitgedrukt in Volt. De potentiaal van de standaard waterstofelektrode – SHE oftewel *Standard Hydrogen Electrode* – H^+/H_2 is bij wijze van afspraak 0V. De potentiaal van een redoxkoppel, gemeten in standaardomstandigheden (20°C) tegenover dit koppel, wordt is de standaardpotentiaal E^0 (Potters, 2015).

¹⁵ GACP, Galvanic Anode Cathodic Protection



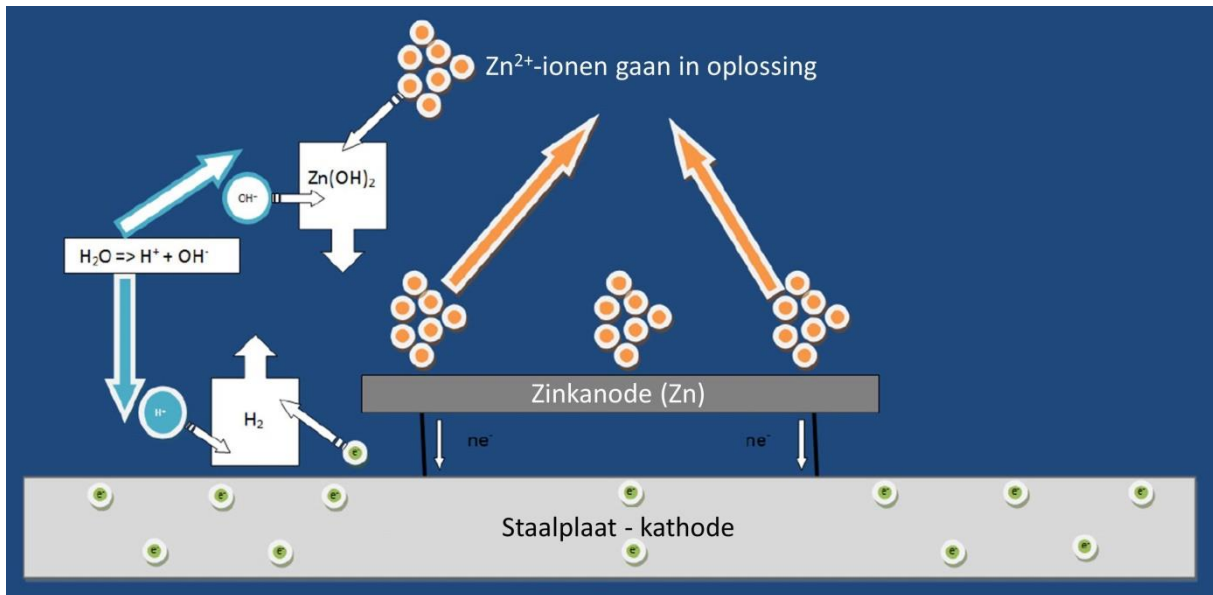
Figuur 50: Redoxpotentialen in zee water (mV SCE) (Johnsen, 2004)

De meest gebruikte soorten opofferingsanodes zijn deze op basis van magnesium (Mg-Al-Zn), aluminium (Al-Zn, Al-Zn-Sn, of Al-Zn-Hg) en zink (Zn-Al-Cd of Zn-Hg).

Zoals te zien is in figuur 50 geven magnesiumanodes het grootste potentiaalverschil (-1,5V tot -1,7V SCE). Dat is interessant wanneer men het aantal anodes wilt beperken, maar deze potentiaal is vaak te groot op het scheepsmetaal vlak naast de anode. De beschermende roestlaag kan hierdoor terug in oplossing gaan waardoor het naakte metaal terug kwetsbaarder is voor microbiële corrosie, zeker wanneer de anode is opgebruikt na enige tijd.

Opofferingsanodes van aluminiumlegeringen geven een redoxpotentiaalverschil van -0,97V tot -1,15V afhankelijk van de legering en de thermische behandeling. Dit laat wel toe om de juiste voltage te bewerkstelligen, maar deze werken uitsluitend in zout water. In zoet water vormt er zich namelijk een beschermende aluminiumoxide-laag (Al_2O_3) waardoor de anode passivert en niet meer zou werken.

Zinkanodes bekomen een potentiaalverschil van -1,05V en zijn tot op heden de meest gebruikte opofferingsanodes in de praktijk. De stroom die ze veroorzaken is namelijk niet te groot, in tegenstelling tot de magnesiumanodes, en ze werken in zowel zoet als zout water (Potters, 2015). Aluminiumanodes zijn minder bekend maar hebben in zout water een minstens even goede werking en winnen daarom tegenwoordig aan terrein.



Figuur 51: Kathodische bescherming m.b.v. Zinkanode (De Baere, 2011)

Figuur 51 geeft weer hoe het mechanisme van een zinkanode werkt, maar de werking van de drie besproken opofferingsanodes is erg gelijklopend. In de plaats van Zn(OH)₂ zou bij een aluminiumanode Al(OH)₃ gevormd worden en bij een magnesiumanode Mn(OH)₂. In dit geval zal door diens meest negatieve redoxpotential de zink-anode het liefst elektronen afgeven waardoor het langzaam oplost in het zeewater en daarbij Zn²⁺-ionen in oplossing gaan. De vrijgekomen elektronen (e⁻) vloeien dan via een metaalverbinding naar het scheepsstaal, de kathode. In het zeewater zal zoals in elke waterige oplossing de evenwichtsreactie H₂O ⇌ H⁺ + OH⁻ plaatsvinden. De waterstofionen (H⁺) zullen dan bij het metaaloppervlak gereduceerd worden – elektronen opnemen – en zo waterstofgas (H₂) vormen. De OH⁻-ionen zullen vervolgens binden met de Zn²⁺-ionen en bezinken.

Om een goede bescherming van opofferingsanodes te verkrijgen is het niet alleen belangrijk om ze goed elektrisch te verbinden met de scheepshuid met behulp van een goede metallische verbinding, maar ook dat deze anodes een afdoende capaciteit hebben. Daarom moet er een voldoende grote massa gebruikt worden en zullen deze ook juist geplaatst moeten worden. Het gewicht (wt) aan opofferingsanodes kan dan als volgt berekend worden:

$$I = \frac{A \cdot i}{1000} \quad (24)$$

$$\text{wt} = \frac{I \cdot \text{gl} \cdot 8760}{\text{capaciteit}} \quad (25)$$

Hierbij is I (in A) de te genereren stroom, A (in m^2) de te beschermen oppervlakte, i (in mA/m^2) de stroomdichtheid op het wrak, w_t (in kg) het totaalgewicht van de te installeren anodes, gl (in jaren) de gewenste leeftijd of tijd die de anodes werkzaam moeten blijven, 8760 het aantal uren in een jaar en de capaciteit (in A.h/kg) de kracht van een type anode. Zo hebben zinkanodes een capaciteit van 780 Ah/kg terwijl aluminiumanodes 2500Ah/kg verzorgen. Onbehandeld staal in de Noordzee heeft een stroomdichtheid van $85mA/m^2$ nodig (Netherlands National Water Board, 2008).

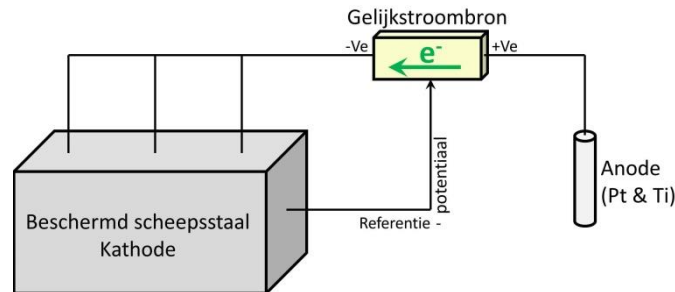
In de praktijk zou het plaatsen van opofferingsanodes op scheepswrakken een tijdrovende ingreep zijn die niet altijd een even goed resultaat zou opleveren. De opofferingsanode kan namelijk maar een bepaald gebied beschermen. Hoe verder van de anode verwijderd, hoe minder elektronen hier naartoe vloeien om het staal te beschermen. Ook wanneer er in het staal barsten of andere discontinuïteiten in de elektrische verbinding zijn gekomen, zal de bescherming hier niet voorbij komen. De meerdere anodes moeten dus op de juiste plaatsen en met voldoende capaciteit geplaatst worden. Het metaaloppervlak moet bij de plaatsing ook schoongemaakt worden en de anode moet door professionele onderwater-lassers worden geplaatst. Verder is het moeilijk om een opofferingsanode binnenin een wrak te plaatsen, waardoor niet alle plaatsen beschermd zouden kunnen worden. Daarbij is het niet onbelangrijk dat opofferingsanodes zorgen voor de ontwikkeling van het explosieve waterstofgas (figuur 51). In gesloten ruimtes, of plaatsen in het wrak waar het waterstofgas niet naar de oppervlakte kan stijgen en zich kan opstapelen, zorgt het o.a. voor duikers voor gevaarlijke omstandigheden. Tenslotte zijn de opofferingsanodes na verloop van tijd opgebruikt en moeten deze vervangen worden. Dit zorgt ervoor dat dit geen éénmalige ingreep zou zijn en het een dure beschermingstechniek is (Potters, 2015; Wankhede, 2017).

6.2 Opgedrukte stroom

Veeleer dan het scheepsstaal gereduceerd te houden door elektronen te onttrekken aan een oxiderend stuk metaal – de opofferingsanode – kunnen deze elektronen ook uit een stroombron gehaald worden. De kathodische bescherming via opgedrukte stroom (ICCP¹⁶) werkt volgens hetzelfde principe als de GACP en zorgt ervoor dat het metaal passief blijft door het omkeren van de elektronenstroom. De negatieve pool is dan verbonden met een

¹⁶ ICCP, Impressed current cathodic protection

metaal dat heel goed weerstand biedt aan corrosie, bijvoorbeeld titanium bekleed met een laagje platina, terwijl de positieve pool aan het scheepsstaal wordt verbonden (EasyChem Australia, z.d.).



Figuur 52: ICCP opstelling (eigen werk)

Zoals in figuur 52 geïllustreerd wordt kan met behulp van voldoende geplaatste elektroden op het scheepsstaal het beschermde gebied uitgebreid worden tot het hele wrak afdoende beschermd is. Een referentie-elektrode geplaatst op de minst beschermde plaats – zo ver als mogelijk van de ICCP-elektrodes – zorgt ervoor dat de juiste stroomsterkte wordt toegediend. Maar om een scheepswrak onder water van stroom te voorzien moet er ook een stroombron worden geplaatst. Zoals eerder besproken is een elektrospotentialverschil van -860mV nodig om de corrosie te stoppen en is een lichte overcompensatie zelfs gewenst. Daarom moet de stroombron een spanningsverschil van $900\text{-}1000\text{ mV}$ kunnen voorzien en ook een voldoende hoge stroomsterkte (I , zie formule 24) kunnen genereren teneinde een voldoende groot gebied te kunnen beschermen (Potters, 2015).

6.2.1 Klassieke batterij

Een natte lood-accu zoals in een auto wordt gebruikt zou op de zeebodem een minder verstandige keuze van stroombron zijn aangezien deze veel minder onderhoudsvriendelijk is dan bijvoorbeeld de droge lithiumbatterij of onderhoudsvrije VRLA¹⁷ batterij. Een lithiumbatterij is brandbaar en omdat die daarom moet worden ingekapseld in een metalen drukvat is deze duurder in aankoop dan de VRLA batterij (Bakker, 2017). Deze laatste is voorzien van een overdrukventiel dat in normale omstandigheden steeds gesloten is. Het weinige toch gevormde gas reageert binnen in de cel normaal gezien meteen weer tot water (Emrol, z.d.).

¹⁷ VRLA, Valve Regulated Lead Acid

Maar een klassieke accu ontladst ook en zou na enige tijd onvoldoende spanning en/of stroom bieden voor de ICCP. Daarom moeten deze batterijen ook opgeladen worden. Ondanks het feit dat hierdoor ook nog een oplader en generator moet worden geplaatst, is dit toch een mogelijke beschermingstechniek. De generator die stroom moet voorzien aan de oplader mag zich logischerwijs liefst niet aan het wateroppervlak bevinden aangezien het scheepvaartverkeer e.d. dan gehinderd kan worden. Deze installaties hebben een te grote omvang aan het zeeoppervlak en zijn ook te duur voor het opwekken van een dergelijk kleine stroom die uiteindelijk slechts nodig is voor de ICCP. Getijdenenergie kan echter wel op een andere manier omgezet worden in elektrische energie. Net als windturbines voor de wind bestaan er turbines die bewegen onder invloed van de zeestroming. Omdat de dichtheid van water veel groter is, zijn deze veel compacter terwijl hun vermogen hetzelfde blijft. Dit is hernieuwbare energie die door getijdenvoorspelling heel accuraat kan worden voorspeld (Vantilt, 2017).



Figuur 53: stromingsturbine (Vantilt, 2017)

Het gebruik van een stromingsgenerator zorgt ervoor dat er ondanks diens eventueel kleine formaat ook een transformator mee zal moeten worden geplaatst op de zeebodem om de juiste voltage en stroomsterkte voor de oplader te voorzien. Het plaatsen van een transformator werpt de vraag op of er dan ook niet rechtstreeks stroom kan worden afgetapt uit een nabijgelegen windmolenpark als het wrak hier vlakbij ligt. Dit blijkt echter niet evident aangezien één windmolen stromen tot 90A bij 33kV (3MW) kan genereren (Belwind, z.d.). Hiervoor zou een enorm dure automatische transformator moeten worden gebruikt.

6.2.2 Aluminiumbatterij

Het zogenoemde *Open Water Power* is een nieuwe technologie ontwikkeld door het *Massachusetts Institute of Technology*. Het is een energiesysteem dat als een combinatie van opofferingsanode en een batterij kan worden gezien. Dit systeem is goedkoper dan lithiumbatterijen en gaat langer mee. Het bestaat uit gelegerd aluminium, een kathode voorzien van een combinatie van elementen (o.a. nikkel) en een alkaline. Maar op het droge doet het echter niets aangezien het zeewater fungeert als elektrolyt en bijgevolg nodig is om een stroom te voorzien. Net zoals bij de aluminium opofferingsanode ontstaat hier een elektrische stroom tussen de aluminiumlegering (anode) en nikkellegering (kathode) – in figuur 51 de kathode (Matheson, 2017).



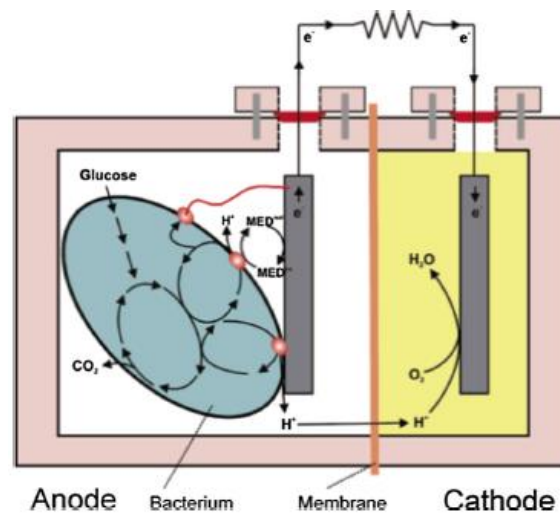
Figuur 54: Open Water Power batterij (Matheson, 2017)

Door een voldoende grote massa aluminiumlegeringsanode te voorzien bij deze batterij, zal deze lange tijd autonoom kunnen functioneren onder water. Eenmaal na bijvoorbeeld tien jaar (bepaald door de gekozen grootte) de anode is opgebruikt kan deze gemakkelijk en relatief goedkoop worden vervangen (Matheson, 2017). Deze batterij zorgt er ook voor dat een extra generator, transformator en oplader niet meer nodig zijn.

6.2.3 Bio-batterij

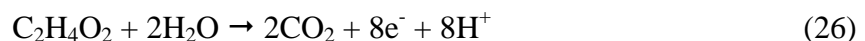
De voorgaande batterijen hebben allemaal onderhoud nodig en zijn na vijf tot tien jaar aan (gedeeltelijke) vervanging toe. Daarom kan bio-elektriciteit misschien wel een oplossing bieden. Het potentiaalverschil in de zeebodem en andere sedimenten, gegenereerd door microbiële ademhaling, is een technologie die reeds jaren wordt onderzocht. Deze milieuvriendelijke elektriciteitsopwekking is misschien niet zo praktisch als groene energiebron voor dagelijks gebruik door de relatief lage opbrengst, maar deze zou wel genoeg kunnen zijn voor ICCP (van der Mijle Meijer e.a., 2014).

Het principe om elektriciteit te ontginnen uit de zeebodem is eigenlijk vrij eenvoudig. Zeebodem bevat altijd een grote diversiteit aan micro-organismen, zeker dicht bij de kust. Aangezien iedere levende cel, van een mens of een bacterie, een stof nodig heeft om elektronen van te ontvangen (reductie) en een andere stof om elektronen aan af te staan (oxidatie), is dit een potentiële microbiële brandstofcel (MFC¹⁸). Zo ontvangt een spiercel van ons lichaam elektronen van suiker en staat deze weer af aan zuurstof. Alle levende cellen ontginnen hun energie aan redoxreacties tijdens de zogenaamde celademhaling (NWO, 2013).



Figuur 55: Microbiële brandstofcel (MFC) met anode- en kathodecompartment (Rahimnejad e.a., 2015)

De eerder onderzochte microbiële brandstofcellen werken volgens het principe in figuur 55. Een anaeroob compartiment (anode) wordt afgeschermd van een aerob compartiment (kathode) door een membraan dat protonuitwisseling toelaat (PEM¹⁹). Een zogenaamde actieve biokatalysator (bacterie) oxideert organische stoffen, hier suiker, een koolstofrijke stof, waardoor er CO₂, elektronen en protonen (H⁺) vrijkomen.



De protonen kunnen zich door het PEM naar de kathode verplaatsen terwijl de elektronen dat via het elektrische circuit doen. In het compartiment van de kathode reageren de protonen en elektronen met behulp van de aanwezige zuurstof weer tot water.



¹⁸ MFC, Microbial Fuel Cell

¹⁹ PEM, Proton Exchange Membrane

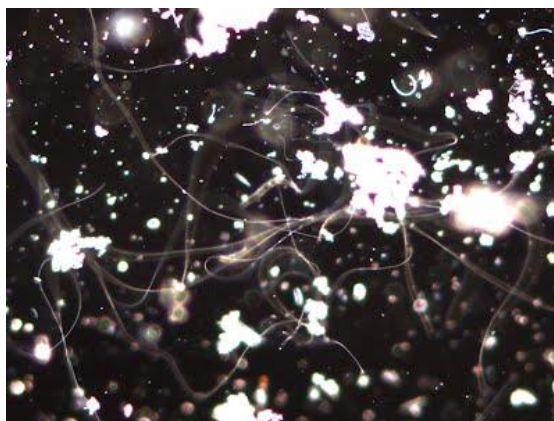
Uit bovenstaande reacties (26) en (27) is het duidelijk dat het compartiment van de anode volledig anaeroob moet zijn. Enige zuurstof (O_2) zou er namelijk voor zorgen dat de kathodereactie hier reeds plaatsvindt en er geen elektrische stroom wordt opgewekt. De compartimenten zijn moeilijk te verwezenlijken voor wat betreft de werking van anaeroob vlak naast aeroob (Rahimnejad e.a., 2015).

Een Deense ontdekking van speciale bacteriën (*Shewanella Oneidensis*) in 2010 zou de constructie van een bio-batterij wel eens gemakkelijker kunnen maken. Deze bacteriën zouden namelijk de redoxreactie niet in één cel uitvoeren, maar in twee aparte cellen. De bacterie aan het ene einde voert dan de oxidatiereactie uit. De vrijgekomen elektronen verplaatsen zich via een organische geleidende kabel naar de andere kant en daar voert een andere bacterie de reductiereactie uit (NWO, 2013).

Deze bacteriën halen hun energie uit de redoxreactie tussen zwavel in de zeebodem en de opgeloste zuurstof aan de interface met het zeewater. Er vormt zich dan een lange aaneenschakeling van 20000 tot wel 50000 bacteriën die de elektronen aan elkaar doorgeven van enkele centimeters diep in de zeebodem tot aan het bodemoppervlak. Om de opgebouwde ladingen te compenseren – positief beneden aan de oxidatiekant en negatief boven aan de reductiekant waar de elektronen toekomen – zal er ook een stroom van positieve sulfide-ionen naar het oppervlak bewegen (Ktori, 2013; NWO, 2013).

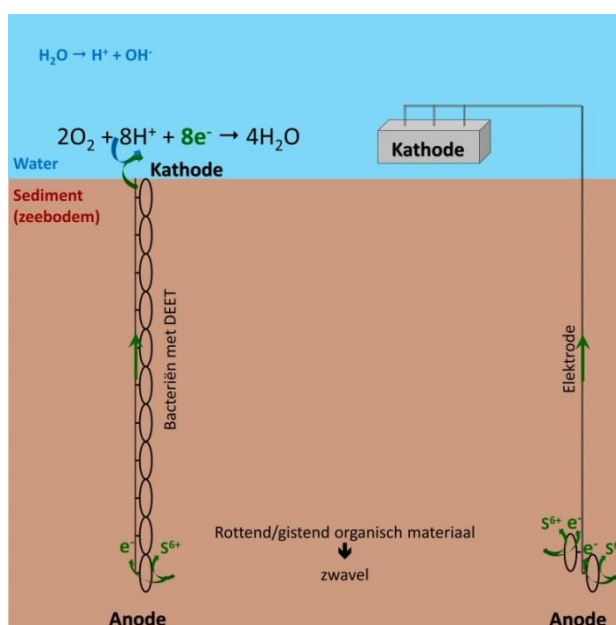
Onderzoek van het Departement Biologische Wetenschappen aan de *University of East Anglia* in Norwich (VK) heeft aangetoond hoe duizenden moleculaire kabels in de zeebodem, afkomstig van de *Shewanella Oneidensis* bacterie, onmiddellijk elektronen kunnen overdragen aan anorganische mineralen zoals ijzer, mangaanoxides of aan een geplaatste elektrode-oppervlak. Dit fenomeen heet directe extracellulaire elektronenoverdracht (DEET²⁰) en is een natuurlijke evolutie door het gebrek aan zuurstof dieper in de zeebodem. Voorbeelden hiervan zijn bacteriën van de *Shewanella* familie en sommige van de *Geobacter* familie. Deze hebben dunne moleculaire kabels ontwikkeld op ongeveer 2,5nm van hun celoppervlak. Langs deze kabeltjes – de lange witte draden in figuur 56 – kunnen ze elektronen direct na de oxidatiereactie afvoeren waardoor geen opstapeling van negatieve ladingen ontstaat (Ktori, 2013).

²⁰ DEET, Direct Extracellular Electron Transfer



Figuur 56: Zeebodemstaal onder een microscoop (copyright: Sairah Malkin, NIOZ) (NWO, 2013)

Indien deze bacteriën kunnen worden gecultiveerd, kan hiermee een MFC gemaakt worden die bijvoorbeeld uit industrieel afvalwater (rijk aan zware metalen) elektriciteit genereert, zij het wel in kleine hoeveelheden aangezien deze geen grote stromen ontwikkelen. Maar naast nog andere mogelijke milieuvriendelijke en industriële toepassingen kunnen energiezuinige meettoestellen onder water ondertussen van voldoende stroom voorzien worden met behulp van bacteriën die aan DEET doen. Het lijkt onwaarschijnlijk dat deze bacteriën het wereldenergieprobleem zullen kunnen oplossen, maar ze blijken wel geschikt voor kleinschalige bio-batterijen (Ktori, 2013). In het laboratorium van het NIOZ²¹ brandt er zelfs een lamp uitsluitend op energie van deze bacteriën (NWO, 2013).



Figuur 57: Mechanisme Shewanella Oneidensis e.a. en potentieel voor ICCP (eigen werk)

²¹ NIOZ, Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee

Orfei et al. slaagden er reeds in 2006 in om roestvast staal met deze technologie te beschermen. In hun laboratorium kon het RVS, ondergedompeld in zeewater, met behulp van grafietelektroden die ze begroeven in zeebodem zodanig worden gepolariseerd tot kathode dat het geen enkele corrosie ondervond (Orfei e.a., 2006).

Een groot voordeel aan het gebruik van deze microbiële brandstofcellen voor kathodische bescherming met opgedrukte stroom is dat het een natuurlijke stroombron is die voor deze toepassing hernieuwbaar en dus onuitputtelijk is (van der Mijle Meijer e.a., 2014). Praktisch is dit echter tot op heden nog onhaalbaar aangezien men deze bacteriën nog moet kunnen cultiveren, een juiste opstelling moet ontwerpen en moet onderzoeken welke spanning en welke neveneffecten dit oplevert.

6.3 Coating

Industriële coatings isoleren het metaal van water (elektrolyt) en zuurstof teneinde de corrosie te vertragen of stoppen. In eerste instantie zorgt een coating ervoor dat water en zuurstof niet tot bij het metaaloppervlak kunnen komen, maar dat is praktisch nauwelijks haalbaar. Mariene coatings zijn meestal permeabel genoeg voor gassen en kleine moleculen. Daarom zal een coating er in tweede instantie ook voor zorgen dat corrosieproducten – vaak grotere moleculen of ionen – niet weg zullen geraken van het metaaloppervlak. Bijgevolg zullen ladingen zich opstapelen en verzadigt het metaaloppervlak waardoor de reactie geremd en uiteindelijk gestopt zal worden (ABS, 2007).

Er bestaan coatings die onder water aangebracht kunnen worden. Wanneer het oppervlak grondig is schoongemaakt zorgt de twee componenten coating voor een sterke mechanische hechting met het metaaloppervlak die ook een goede bescherming tegen microbiële corrosie biedt. Deze zijn ecologisch verantwoord en bij het aanbrengen komen geen VOC's vrij. De twee componenten coating kan onder water worden aangebracht door middel van een handpomp systeem (Energy Coating, z.d.).



Figuur 58: Coating onder water aanbrengen m.b.v. handpomp systeem (Energy Coating, z.d.)

Een coating voor staal dat zich permanent onder water bevindt maakt steeds gebruik van barrièrewerking (ook sommige coatings op niet permanent ondergedompelde oppervlakken maken gebruik van deze werking). Door het toevoegen van vlokkende bestanddelen zoals bladerend aluminium (ook kathodische bescherming) en het aanbrengen van een dikke laag – 200 tot 350µm – wordt de doorlaatbaarheid voor water sterk belemmerd. Om er voor te zorgen dat wanneer het zeewater toch het metaaloppervlak bereikt het metaal toch niet zou corroderen, wordt er zink of aluminium aan de coating toegevoegd als extra kathodische bescherming (ABS, 2007).

Twee componenten coatings – *cross-linked thermoset coatings* – worden vervoerd in twee verschillende verpakkingen en worden pas net voor het aanbrengen in de juiste verhoudingen vermengd. De uitharding gebeurt op twee manieren: het oplosmiddel verdwijnt door verdamping en iets trager zal de coating verder uitharden door de chemische reactie met water. De coating voor onder water maakt gebruik van epoxyhars dat het best bestand is tegen maritieme milieus. Daarom zou deze coating de beste bescherming bieden en de langste levensduur hebben (ABS, 2007). ExxonMobil zegt dat deze coating 33 jaar lang voldoende kan beschermen en nadien weer afgeschuurd en overschilderd kan worden (Humphreys, 2010).

Ondanks het feit dat de toepassing een enorm tijdrovend proces zou zijn – het scheepswrak moet immers helemaal worden schoongemaakt en idealiter moet het staal overal volledig ontbloot zijn – betreft dit wel een enorm onderhoudsvriendelijke beschermingstechniek.

6.4 Beschermingspotentieel van macro-organismen in de biofilm

Alle voorgaande beschermingstechnieken beïnvloeden de milieuomstandigheden aan het oppervlak van het scheepswrak fundamenteel. Het effect van kathodische bescherming op het microbiële leven is niet gekend, maar vermoed wordt dat dit de fauna en flora wel aantast. Het staal wordt kathode, bijgevolg zullen andere mineralen moeten worden geoxideerd, en ook een coating zal een invloed zal hebben op de fauna. Het is echter net één van de objectieven van dit onderzoek om ook de fauna – meer specifiek het visbestand – te waarborgen. Daarom is het interessant om de mogelijkheden van een biologische coating te bekijken.

De dikke bio-film die ontstaat in fase 3 (cfr. corrosiemodel, figuur 22) kan het metaaloppervlak bijna volledig afdichten zoals een industriële coating. Deze zogenaamde bio-coating zou i.e. theoretisch het metaal kunnen beschermen tegen corrosie. Het ziet er naar uit dat biologische aangroei (*biofouling*) de uniforme corrosie wel kan vertragen of stoppen, maar dat tegelijk door het ontstaan van anaerobe zones (cfr. 3.2) op het staaloppervlak MIC voor meer putcorrosie zorgt (de Brito e.a., 2007). Om een beschermende biofilm te creëren moeten de specifieke organismen bij voorkeur rechtstreeks op het metaal kunnen hechten met weinig tussenruimte voor accumulatie van ander organisch materiaal. Dit kan in de vorm van een biofilm die bestaat uit een dichte gemeenschap van grote organismen. De grote densiteit van deze organismen zorgt ervoor dat er zich geen grote hoeveelheden ander organisch materiaal kunnen verzamelen waardoor anaerobe gebieden en bijgevolg microbiële corrosie zouden ontstaan (de Brito e.a., 2007).

Als eerste worden diatomeeën, oftewel vastzittende algen gekend als kiezelwieren (figuur 23), in grote percentages aangetroffen in een dunne biofilm. Deze diatomeeën onttrekken CO₂ aan hun omgeving en geven O₂ vrij tijdens hun primaire productie. Dit zorgt voor de verlaging van de pH en een verhoging van het opgeloste zuurstofgehalte, wat beide de corrosie zou bevorderen. Deze celademhaling heeft echter fotosynthese nodig waardoor bij daglicht de hoogste corrosiesnelheden worden gemeten. Maar Landoulsi et al. hebben kunnen aantonen dat kiezelwieren staal toch zouden kunnen beschermen omdat zij ook H₂O₂ (waterstofperoxide) kunnen produceren (Landoulsi e.a., 2011).

SRB's zorgen namelijk voor de productie van H₂S, wat op hun beurt door aerobe bacteriën wordt omgezet in zwavelzuur (H₂SO₄), wat de corrosie van metaal bevordert.

Waterstofperoxide (H_2O_2) oxideert echter het H_2S waardoor er minder H_2SO_4 -productie is en het corrosieproces toch wordt afgeremd (Solvay Interox, 2001).

Eashwar et al. (Eashwar e.a., 1995) suggereren dat een dergelijke dichtbegroeide biofilm van kiezelwieren zou kunnen worden gekweekt in een milieu waar voldoende Uv-licht voor fotosynthese aanwezig is. Op die manier zouden de diatomeeën leven op basis van hun primaire productie. Wanneer de biofilm vervolgens volgroeid is kan de corrosie onderdrukt worden door het aanzienlijk verminderen van het Uv-licht (diep genoeg onder water) waardoor de microbiële redoxreacties niet meer of nauwelijks zouden kunnen plaatsvinden. De kiezelwieren zouden daarbij niet afsterven maar hun metabolisme verloopt logischerwijs aanzienlijk trager (Eashwar e.a., 1995).

Ten tweede kunnen mosdiertjes, korstvormende bryozoa, ook een dunne biofilm vormen. Zij creëren namelijk minerale exoskeletten die netachtige structuren vormen over het metaaloppervlak waardoor er theoretisch een licht permeabele barrière ontstaat tussen het metaal en de opgeloste zuurstof in het water. Dit is slechts getest met twee soort bryozoa, *Membranipora Membranacea* en *Schizoporella Errata*, en daarbij konden twee onafhankelijke studies niet uitmaken of deze mosdiertjes de corrosiesnelheid beïnvloedden of niet (de Brito e.a., 2007; de Messano e.a., 2009). Er bestaan niettegenstaande veel verschillende soorten mosdiertjes die elk een verschillend permeabele netstructuur creëren, maar hier is nog geen verder onderzoek naar verricht. Het zou dus best kunnen dat bepaalde bryozoa in een biofilm de corrosie van staal kunnen onderdrukken.

Ten derde zijn er de eendenmossels, oftewel zeepokken (figuur 26), die in het juiste seizoen heel snel een oppervlak kunnen bedekken. Ze sluiten het metaaloppervlak af van de omgeving en laten heel weinig ruimte voor microbiële activiteit. Het zou in de juiste omstandigheden de uniforme corrosie vertragen. De zeepokken hebben echter ook nadelen. Kleine openingen in de bedekking zorgt voor putcorrosie en hun kalkachtig rugschild zorgt voor cirkelvormige erosie van het staal (de Brito e.a., 2007; de Messano e.a., 2009). Vanzelfsprekend vormen deze dus geen goede bio-coating.

Gelijkaardig aan eendenmossels hechten Japanse oesters, *Ostrea gigas*, zich ook rechtsreeks aan het metaal, maar hun schelpen zorgen ook voor erosie. Hiervoor gelden dus dezelfde voor- en nadelen (de Brito e.a., 2007).

Tenslotte hebben natuurlijke sponzen ook een potentiële toepassing. Ze kunnen zich rechtstreeks hechten aan het metaaloppervlak en zijn zacht waardoor ze geen erosie veroorzaken. Het lijkt waarschijnlijk dat de celademhaling van sponzen ervoor zorgt dat de zuurstofconcentratie ter hoogte van het metaaloppervlak sterk verminderd wordt zonder een anaeroob milieu te creëren. Op die manier kunnen er geen anaerobe bacteriën overleven, ontstaan er geen concentratiecellen en wordt MIC onderdrukt terwijl de oxidatie van het metaal ook wordt afgeremd. Er ontstaat bijgevolg een milieu dat de corrosie permanent zodanig vertraagt als op het einde van proces 3 (cfr. Corrosieproces figuur 22). Een bijkomend voordeel is dat sponzen op alle dieptes kunnen groeien wat verder onderzoek zeker de moeite waard maakt (van der Mijle Meijer e.a., 2014).

Alle potentiële vormen van bio-coating in beschouwing genomen moet er toch worden opgemerkt dat deze de corrosie zouden kunnen verminderen, maar tegelijk in andere omstandigheden de corrosiesnelheid net doen stijgen. Aangezien de milieucondities onder water en de ontwikkeling van dunne dichte biofilms enorm moeilijk te controleren zijn, zullen bio-coatings nog niet meteen een effectieve beschermingstechniek vormen.

Sponzen lijken de beste eigenschappen te hebben, maar deze moeten nog uitvoerig verder worden onderzocht. De exacte impact op de corrosie moet worden bestudeerd en vervolgens zal moeten worden bekeken hoe de meest interessante soort kan worden ‘gezaaid’ op het scheepswrak teneinde een effectieve werking te kunnen bewerkstelligen.

6.5 Biofouling als indicatie voor de onderliggende corrosie

In de rand kan worden opgemerkt dat biofouling ook kan bekeken worden als indicatie voor de corrosie. Uit het vorige hoofdstuk (6.4) blijkt duidelijk dat er een relatie is tussen het corrosieproces en de bijhorende biologische aangroei op het staaloppervlak. Wanneer de relatie tussen staalconditie en aangroei voldoende kan onderbouwd en bewezen worden, zouden inspectiekosten aanzienlijk verlaagd kunnen worden. Dan zou men bij inspecties aan de hand van de biofouling de conditie van het staal kunnen determineren, moet men ook geen aangroei verwijderen, en kan dat laatste ook geen negatieve invloed hebben op de corrosie (van der Mijle Meijer e.a., 2014).

Om dit te bewerkstelligen zal bij toekomstige inspecties duidelijk beschreven moeten worden welk type aangroei overeenkomt met welke exacte conditie van het scheepsstaal en de verandering sinds de vorige keer.

Het uitwerken van zulke inventaris kan er in de toekomst zelfs voor zorgen dat er biofouling wordt ontdekt die een nog betere bescherming biedt.

6.6 Bedekken

Nog een andere manier om het corrosieproces van een scheepswrak tegen te werken is het bedekken ervan. Zoals beschreven bij de *Shewanella Oneidensis* bacteriën in 6.2.3 is er in de zeebodem geen zuurstof te vinden en is de corrosiesnelheid er bijgevolg significant lager of voor houten wrakken zelfs onbestaande omdat de paalworm er niet kan overleven.

Het bedekken van een scheepswrak zorgt voor een goede fysieke bescherming, het wegnemen van de zuurstof en het maakt het plunderen door clandestiene duikers ook onmogelijk. De meest gebruikte methoden voor fysieke bescherming zijn het gebruik van zandzakken of geotextiel – artificiële netten die het door de stroming aangevoerde sediment accumuleren. Als men sediment wilt verzamelen bovenop het wrak maakt men meestal gebruik van zee gras – oftewel dikker geotextiel, *debris netting* (Danilovic e.a., 2014).

Bij het gebruik van deze beschermingsmethode is het belangrijk dat het gebruikte sediment wordt onderzocht. De door de stroming aangevoerde zeebodem moet zorgen voor een goede bescherming, met andere woorden voldoen aan de juiste eigenschappen. Te fijn sediment (bv. fijn zand) zal namelijk gemakkelijk weer worden weggevoerd door de stroming, waardoor het niet voldoende kan opstapelen, terwijl te grof sediment (bv. gravel of steentjes) het wrak kan beschadigen (erosie). Bijgevolg wordt er liefst grof genoeg zand gebruikt (Danilovic e.a., 2014).

Zandzakken blijven door hun gewicht steeds op hun plaats op de zeebodem, bieden een goede bescherming tegen erosie en kunnen ook bijdragen aan de ondersteuning van de scheepsstructuur. Ze sluiten de omgeving echter niet hermetisch af waardoor er nog steeds zuurstof bij het scheepswrak kan komen. Daarom worden zij vaak gebruikt in combinatie met geotextiel wat de omgeving wel kan afsluiten van zuurstof. Voor wat betreft de duurzaamheid is het ook belangrijk dat er hoogwaardige synthetische materialen worden gebruikt voor de zandzakken teneinde ecologisch verantwoord het wrak langdurig te kunnen beschermen. De

inhoud van de zandzakken is bij voorkeur fijn zand zonder organisch materiaal om de biologische activiteit uit te sluiten (Danilovic e.a., 2014).



Figuur 59: Bescherming met zandzakken (Danilovic e.a., 2014)

Geotextiel is een goedkoop middel om grote oppervlakten te beschermen tegen erosie. Ook zorgt het voor een aanzienlijke vermindering tot volledige uitsluiting van zuurstof. Maar door zijn permeabiliteit kunnen micro-organismen en nutriënten nog steeds bij het wrak. Het is bijgevolg een ideale techniek om te gebruiken wanneer er periodieke controles of archeologische onderzoeken worden uitgevoerd omdat het snel weg te nemen is. Echter voor een betere bescherming wordt bovenop het geotextiel best een dikke laag zeebodem (zand) aangebracht met erbovenop zandzakken om het geheel op zijn plaats te houden (Danilovic e.a., 2014).



Figuur 60: Plaatsing van geotextiel over een scheepswrak (Danilovic e.a., 2014)

De twee voorgaande technieken kunnen een scheepswrak beschermen tegen fysieke en biologische invloeden maar blijven gevoelig aan stroming. Dat kan worden opgelost door het gebruik van artificiële zeegrasmatten die het door de stroming aangevoerde sediment accumuleren en vast houden. Het gras vertraagt het zeewater door de wrijving en geeft zo het sediment de kans om te bezinken. Deze techniek wordt in de praktijk reeds geruime tijd toegepast om pijpleidingen op de zeebodem te beschermen en blijkt heel effectief (Danilovic e.a., 2014).



Figuur 61: Artificieel zeegras in situ geplaatst (Danilovic e.a., 2014)

Het is ook niet onbelangrijk dat deze beschermingstechnieken even snel te verwijderen als aan te brengen zijn. Het lijkt dus de perfecte techniek om het wrak te beschermen en te conserveren tussen bijvoorbeeld twee archeologische onderzoeken in (Veth e.a., 2016).

6.7 Conceptueel plan ter bescherming van scheepswrakken

Het is duidelijk dat er geen sluitende conservering zal geboden worden door slechts één enkele van de voorgaande beschermingsmethodes. Een combinatie van technieken zal logischerwijs moeten worden toegepast opdat een scheepswrak afdoende beschermd zou worden.

Meestal wordt er gekozen voor het begraven of bedekken van het scheepswrak gecombineerd met kathodische bescherming zoals in Amerika (Pearl Harbour, Hawaii) en Australië bij de bescherming van bijvoorbeeld het wrak James Matthews (Ortmann, 2009; Veth e.a., 2016).

Allereerst worden er elektrodes op het wrak aangebracht die verbonden worden aan opofferingsanodes. Deze worden zo juist mogelijk geplaatst teneinde een zo goed mogelijke bescherming te bieden.

Het is natuurlijk onmogelijk om iedere vierkante centimeter scheepsstaal te beschermen omwille van geleidingsproblemen en obstructies (cfr. 6.1). Daarom wordt er vervolgens een zeegrasmat over het wrak geplaatst die wordt verankerd op de zeebodem door onder meer zandzakken.



Figuur 62: Plaatsing zeegrasmat op James Matthews (Veth e.a., 2016)

Deze zal het sediment verzamelen dat door de stroming wordt aangebracht en zodoende het wrak afschermen van zuurstof en beschermen tegen erosie. Op die manier is het scheepsstaal beschermd op verschillende manieren, kan het eenvoudig worden gecontroleerd om bijvoorbeeld de opofferingsanodes te hernieuwen en kan het tientallen tot honderden jaren bewaard blijven in (nagenoeg) dezelfde toestand (Richards, 2012).



Figuur 63: Succesvolle bescherming na vijf jaar (Veth e.a., 2016)

Hierbij kunnen natuurlijk vragen gesteld worden voor wat betreft het doel van de bescherming van het scheepswrak. Indien men het heeft over de ontsluiting van een wrak of meer specifiek

het promoten van de duiksport heeft het geen zin om een wrak te bedekken. Zoals in figuur 63 te zien is, zal er dan weinig te ontdekken zijn bij het duiken.

In de praktijk zijn er echter nog geen andere vormen van *in situ* bescherming toegepast of bestaat hier alleszins geen literatuur van.

Wanneer het wrak wenselijk zichtbaar en te bezoeken moet blijven terwijl het toch goed geconserveerd moet worden, zou een combinatie van coating en kathodische bescherming een succesvolle, maar enorm dure oplossing kunnen bieden.

Daarbij zal allereerst het wrakstaal zo volledig mogelijk ontbloot moeten worden, ook binnenin. Dit is een tijdrovende operatie. Onmiddellijk daarna moet de industriële coating (cfr. 6.3) worden aangebracht op het schone staal en dat tot in elke kleine uithoek van het wrak.

Omdat delen van het wrak bedolven of niet bereikbaar zullen zijn wordt een extra kathodische bescherming toegepast. Er worden elektroden bevestigd (gelast) nabij deze onbereikbare plaatsen, ook in de zeebodem, waaraan vervolgens opofferingsanodes, of in de toekomst misschien een stroombron, worden bevestigd.

Hierbij moet wel worden opgelet dat het wrakstaal niet overbeschermd wordt door de opgedrukte stroom of opofferingsanodes, want dat beschadigt de coating. Het is bijgevolg cruciaal deze technieken juist op elkaar af te stemmen teneinde een werkende conservering te bekomen.

7. Conclusie

Het Belgische deel van de Noordzee, bestaande uit de territoriale zee, de exclusieve economische zone en het Belgisch Continentaal Plat, herbergt een unieke collectie aan scheepswrakken. Allen hebben zij een groot of minder groot aandeel in onze maritieme geschiedenis en bieden zij een belangrijke kweekplaats voor het overgrote deel van het visbestand. Het maritieme klimaat heeft er echter voor gezorgd dat nog slechts 27% van de wrakken potentieel interessant is voor ontsluiting.

De wet betreffende de bescherming van onderwater erfgoed maakt het daarom mogelijk om scheepswrakken te beschermen en indien mogelijk bijkomende beschermingsmaatregelen te treffen. Aan de hand van waardestellende criteria werd er een wrakquoteringssysteem opgesteld dat de ontvanger van het Maritiem Erfgoed een indicatie geeft of een wrak beschermd zou moeten worden of niet. Zodoende zijn er ondertussen elf wrakken in de Belgische Noordzee die een beschermde status kregen.

Aan de hand van het model van Prof. Melchers werd er getracht een corrosiemodel uit te werken voor de Belgische Noordzee teneinde in te schatten hoe lang een wrak nog bewaard zou blijven op de zeebodem indien de natuur vrij spel houdt. De bepalende factoren voor de corrosie van scheepsstaal onder water blijken daarbij de temperatuur en concentratie DIN te zijn. Bijkomend hebben de opgeloste zuurstof en de stroming ook nog een kleinere, doch niet te negeren invloed. Na enig onderzoek blijkt dat dit model schijnbaar pessimistisch is en is het voorspelde plaatdikte verlies groter dan het werkelijke verlies.

Bijgevolg zal er in de toekomst verder moeten worden onderzocht of de specifieke aangroei op de wrakken in de Belgische Noordzee een significante invloed heeft, zoals in 6.4 diens beschermingspotentieel wordt geschetst. Bijvoorbeeld zouden de aanwezige bacteriën kunnen worden gecultiveerd en verder worden onderzocht. Ook werpt zich de vraag op of de vorm en gladheid van een scheepsromp een invloed kunnen hebben.

Er kan met zekerheid gesteld worden dat dit onderzoek nog te weinig metingen en data heeft vergaard waardoor definitieve conclusies nog niet kunnen worden getrokken. Het is immers niet altijd evident om plaatdiktemetingen uit te voeren op (meer dan) dertig meter diepte. Om ook het lineaire corrosiemodel op lange termijn verder te kunnen toetsen aan de werkelijkheid werd er gezocht naar een extra wrak in het midden van de curve. De Bourrasque is jammer genoeg tot op heden het enige wrak waarvan mogelijks de juiste plannen te vinden zijn.

Hopelijk worden er snel scheepsplannen gevonden van andere bruikbare wrakken om meerdere metingen te kunnen uitvoeren. Zo niet zal er moeten worden nagegaan of er wrakken in de wateren van buurlanden als Frankrijk en Nederland zijn die in aanmerking komen.

Tenslotte werd ook nagegaan welke conserveringstechnieken er zouden kunnen worden toegepast op een wrak om het langer te bewaren. In de meeste gevallen lijkt men wereldwijd enkel de archeologische waarde van een wrak in rekening te brengen waardoor er vaak wordt gekozen voor een combinatie van opofferingsanodes en volledige bedekking. Dit is een effectieve techniek die de corrosie volledig kan stoppen, maar in het objectief van dit onderzoek wordt daarbij de ontsluiting van een wrak vergeten. Meer bepaald het promoten van de duiksport zou hierdoor onmogelijk zijn aangezien er niets van het wrak zichtbaar zou blijven. Daarom zou er kunnen worden geopteerd voor een combinatie van coating onder water en opgelaste opofferingsanodes. Dit zou ook een volledige bescherming kunnen bieden maar het is enorm duur en hierover is niets bekend aangezien het nog niet elders wordt toegepast. Daarom zou er onderzoek moeten worden gedaan naar de mogelijkheid van deze techniek. Bij voorkeur ook *in situ* experimenten die de coating testen en de invloed op fauna en flora ervan.

Verder is het potentieel van de *Schewanella Oneidensis* en andere bacteriën die aan DEET doen nog te weinig bekend, maar lijkt dit wel veelbelovend met betrekking tot de bescherming van een wrak. Ook de bescherming met biocoating houdt tot op heden te veel risico's in waardoor verder onderzoek naar de juiste cultiverings- en zaai technieken nodig zijn.

Dit werk biedt vele interessante mogelijkheden tot verder onderzoek waarbij een bruikbaar corrosiemodel en praktisch haalbare beschermingstechniek zouden kunnen worden ontwikkeld.

Er zijn ook enkele interessante case studies die zich in het licht van dit onderzoek aanbieden. Zo is er bijvoorbeeld de 35000 ton explosieven uit WOI en WOII die op de Paardenmarkt, net voor de kust van Zeebrugge, in zee liggen. Deze bevat een grote hoeveelheid chemische substanties zoals mosterdgas die ooit vrij zou komen als de explosieven zijn doorgeroest. Het corrosiemodel zou kunnen worden gebruikt om te voorspellen wanneer er lekken en bijgevolg enorme vervuiling zouden ontstaan. De bescherming hiervan zou dat ook kunnen voorkomen.

8. Lijst van figuren

Figuur	Paginanummer	
Figuur 1: Foto van de UB-29 aan de Britse oostkust	1	
Figuur 2: Duitse duikboten samen met hun bevoorradingschip afgemeerd	5	
Figuur 3: Een groepsbunker met plaats voor 8 grote duikboten in de achterhaven van Brugge kon bescherming bieden tegen zware luchtaanvallen	6	
Figuur 4: Verloren Duitse Onderzeeërs tijdens WO I voor de Vlaamse kust	7	
Figuur 5: Maginot-linie met daarnaast de ligging van Franse en Britse troepen tussen Verdun en Duinkerke	8	
Figuur 6: Evacuatie routes X, Y en Z	9	
Figuur 7: HMS Wakeful, torpedootjager H88	11	
Figuur 8: Grafiek met de scheepswrakken uit de 20 ^{ste} eeuw	12	
Figuur 9: Nationaliteiten van schepen gezonken tijdens WO I en WO II	13	
Figuur 10: Kaart met goed tot uitstekend bewaarde wrakken	14	
Figuur 11: Wazige maar zeldzame foto van de eerste Westhinder uit 1864	16	
Figuur 12: Multibeam-beeld van de HMS Wakeful	17	
Figuur 13: Multibeam-beeld houten wrak bij Oostende	17	
Figuur 14: 't Viegend Hart	18	
Figuur 15: Tekening wrak SS Kilmore	18	
Figuur 16: Tekening wrak U-11	19	
Figuur 17: Foto HMS Briljant	19	
Figuur 18: Torpilleur Branlebas	20	
Figuur 19: Kaart met geografische ligging van de 10 gekozen scheepswrakken	24	
Figuur 20: IJzer-corrosiecel onder water	27	
Figuur 21: Spreiding data corrosieverlies ondergedompeld staal tot 1994	29	
Conservatie van scheepswrakken in de Noordzee	Diederik Van Besauw	95

Figuur 22: Corrosiemodel voor scheepsstaal ondergedompeld in zeewater	30
Figuur 23: Kieselwieren	33
Figuur 24: Fungi op een metaaloppervlak	33
Figuur 25: SRB	35
Figuur 26: Zeepokken	35
Figuur 27: Putcorrosie	35
Figuur 28: Corrosiemechanismen in een biofilm	36
Figuur 29: Depolarisatie van de kathode door SRB	39
Figuur 30: Zwavel-oxiderende bacteriën (SOB)	39
Figuur 31: Multifasig corrosiemodel	41
Figuur 32: Schematische vereenvoudiging van Melchers' corrosiemodel	43
Figuur 33: Trendlijn data R_p ratio's	44
Figuur 34: Parameters c_s en r_s bij verhoogde DIN concentraties	44
Figuur 35: Schematische samenvatting van mogelijke invloeden op de corrosiecurve	45
Figuur 36: Effect van staallegeringen op de corrosie	47
Figuur 37: Parameters multi-fasig corrosiemodel voor de Belgische Noordzee	48
Figuur 38: corrosiemodel van Melchers – parameters gedetermineerd	49
Figuur 39: Cygnus DIVE bevestigd op de voorarm van een duiker	53
Figuur 40: Tijdsverschil tussen de geluidspulsen bij een plaatdiktemeting	53
Figuur 41: Situering plaatdiktemetingen MV Garden City	55
Figuur 42: Situering plaatdiktemetingen UB-III-klasse Fairybank	55
Figuur 43: Situering plaatdiktemetingen Sabrina Z.577	56
Figuur 44: Lineair corrosiemodel versus in situ metingen	58
Figuur 45: Foto van de Bourrasque na de beschieting	60
Figuur 46: Huidige toestand Bourrasque	60
Figuur 47: Overzicht waarde-stellende criteria	65

Figuur 48: Samenvatting resultaat wrakquoteringsoefening	71
Figuur 49: Voorbeelden van redoxpotentialen volgens de Tabel van Mendeleiev	73
Figuur 50: Redoxpotentialen in zeewater (mV SCE)	74
Figuur 51: Kathodische bescherming m.b.v. Zinkanode	75
Figuur 52: ICCP opstelling	77
Figuur 53: stromingsturbine	78
Figuur 54: Open Water Power batterij	79
Figuur 55: Microbiële brandstofcel (MFC) met anode- en kathodecompartiment	80
Figuur 56: Zeebodemstaal onder een microscoop	82
Figuur 57: Mechanisme <i>Shewanella Oneidensis</i> e.a. en potentieel voor ICCP	82
Figuur 58: Coating onder water aanbrengen m.b.v. handpomp systeem	84
Figuur 59: Bescherming met zandzakken	89
Figuur 60: Plaatsing van geotextiel over een scheepswrak	89
Figuur 61: Artificieel zeegras <i>in situ</i> geplaatst	90
Figuur 62: Plaatsing zeegrasmat op James Matthews	91
Figuur 63: Succesvolle bescherming na vijf jaar	91

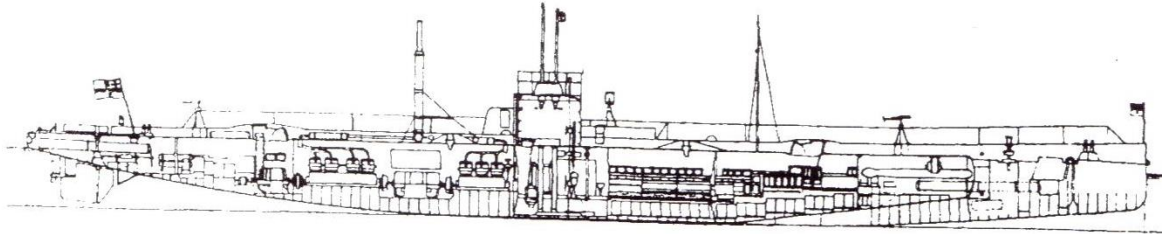
9. Lijst van tabellen

Tabel	Paginanummer
Tabel 1: Samenvattende tabel wrakkeuze	25
Tabel 2: Soorten ademhaling van organismen met voorbeelden van elektronacceptoren	34
Tabel 3: Gekalibreerde procesparameters voor corrosie onder water in functie van gemiddelde Zeewatertemperatuur T	41
Tabel 4: Koolstofconcentratie in verschillende ijzerkoolstoflegeringen	46
Tabel 5: Chemische samenstelling van “Grade A steel” (in wt%)	47
Tabel 6: Het corrosiemodel versus in situ metingen	58

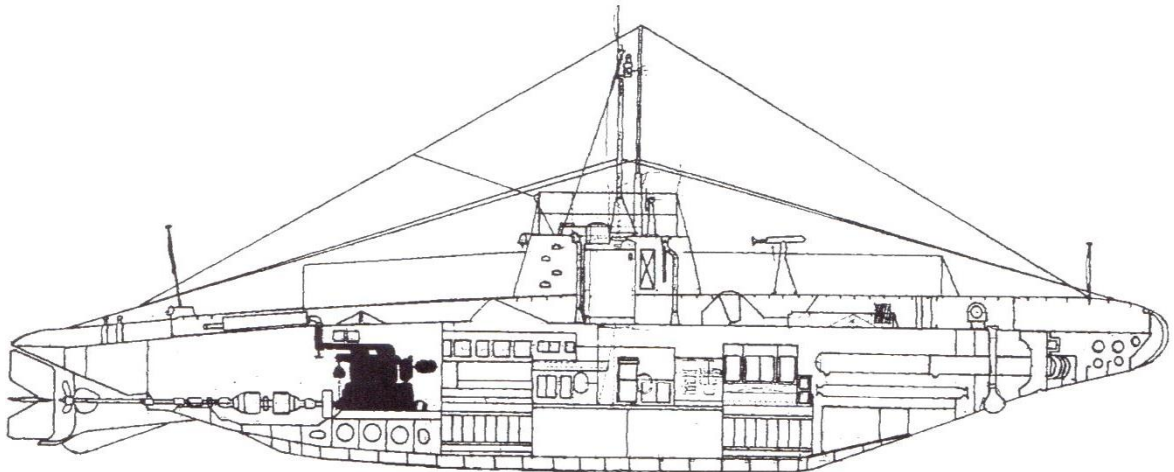
10. Appendix

Bijlage 1: Evolutie van duikboten in WO I - schetsen (Termote, 1999)

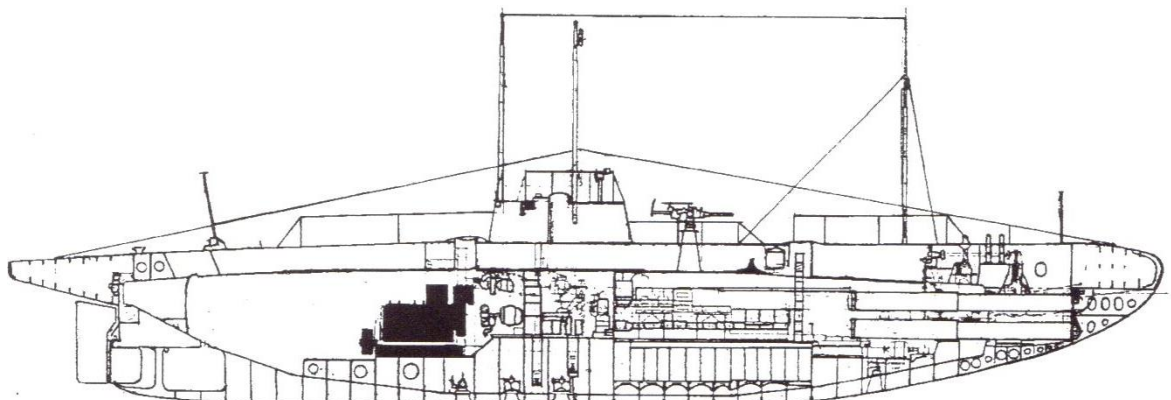
U-boot



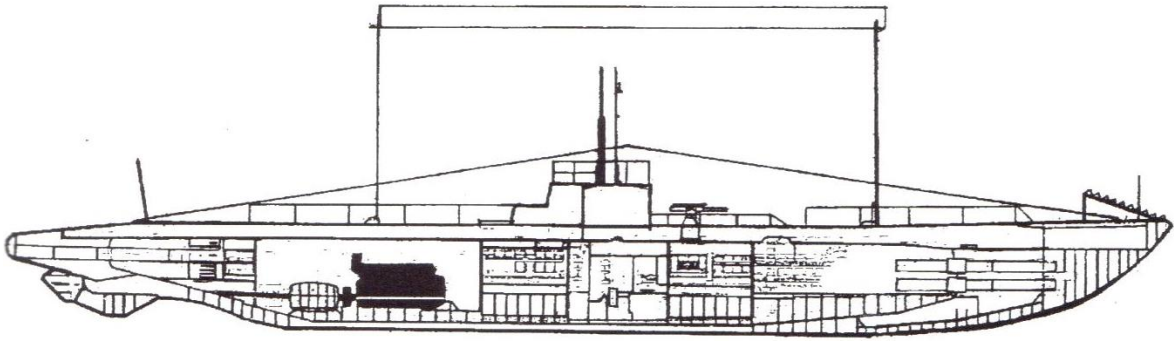
UB-I klasse



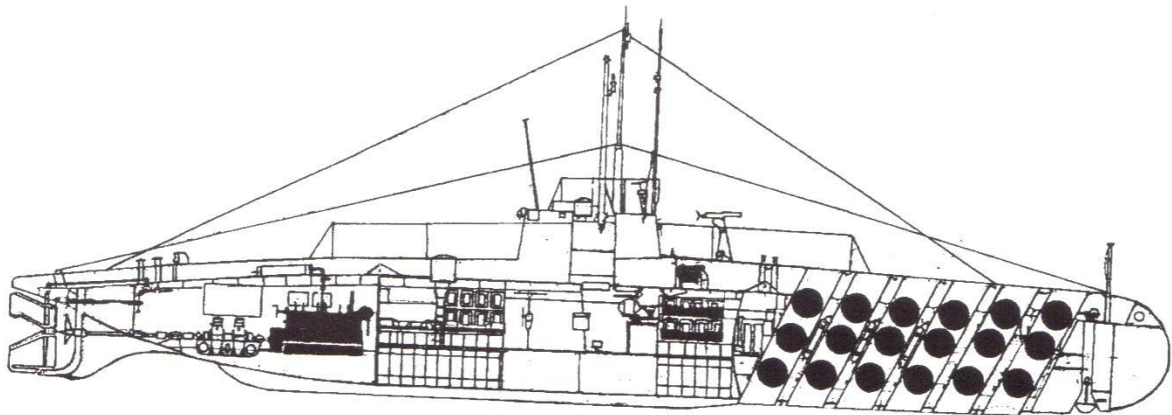
UB-II



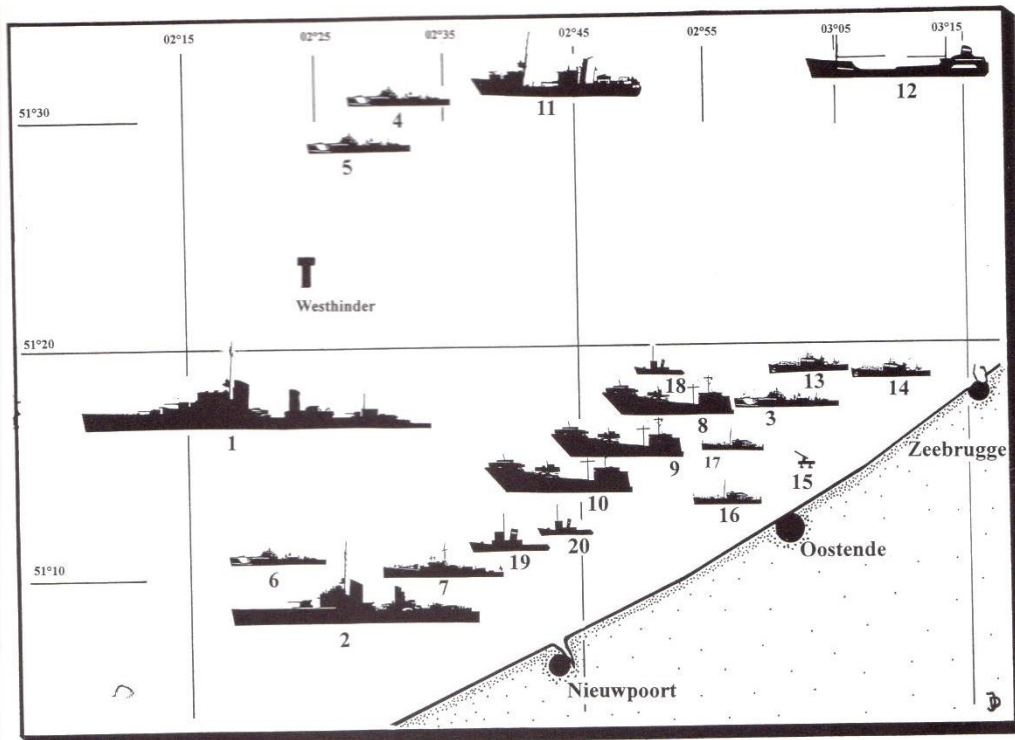
UB-III



UC-II



Bijlage 2: Duitse wrakkenlijst uit Wereldoorlog 2



1) **Bruno Heinemann**
51°16'16" N 002°17'02" E

2) **Wolf**
51°07'48" N 002°29'90" E

3) **S220**
51°16'43" N 002°52'28" E

4) **Schnellboot**
51°31'68" N 002°32'39" E

5) **Schnellboot**
51°29'71" N 002°30'17" E

6) **Schnellboot**
51°10'18" N 002°22'95" E

7) **Rauboot**
51°09'98" N 002°37'09" E

8) **Sperrbrecher 141**
51°17'68" N 002°49'59" E

9) **Sperrbrecher 142**
51°16'65" N 002°49'78" E

10) **Sperrbrecher 143**
51°13'23" N 002°44'30" E

11) **Vorpostenboot 1302**
51°28'49" N 002°41'32" E

12) **Coaster**
51°33'65" N 003°13'93" E

13) **M3604**
51°19'12" N 003°01'86" E

14) **M3606**
51°19'22" N 003°01'88" E

15) **Flakplatform**
51°14'71" N 002°55'70" E

16) **Richard II**
51°14'46" N 002°54'87" E

17) **In beslag
genomen jacht**
51°17'82" E 002°54'49" E

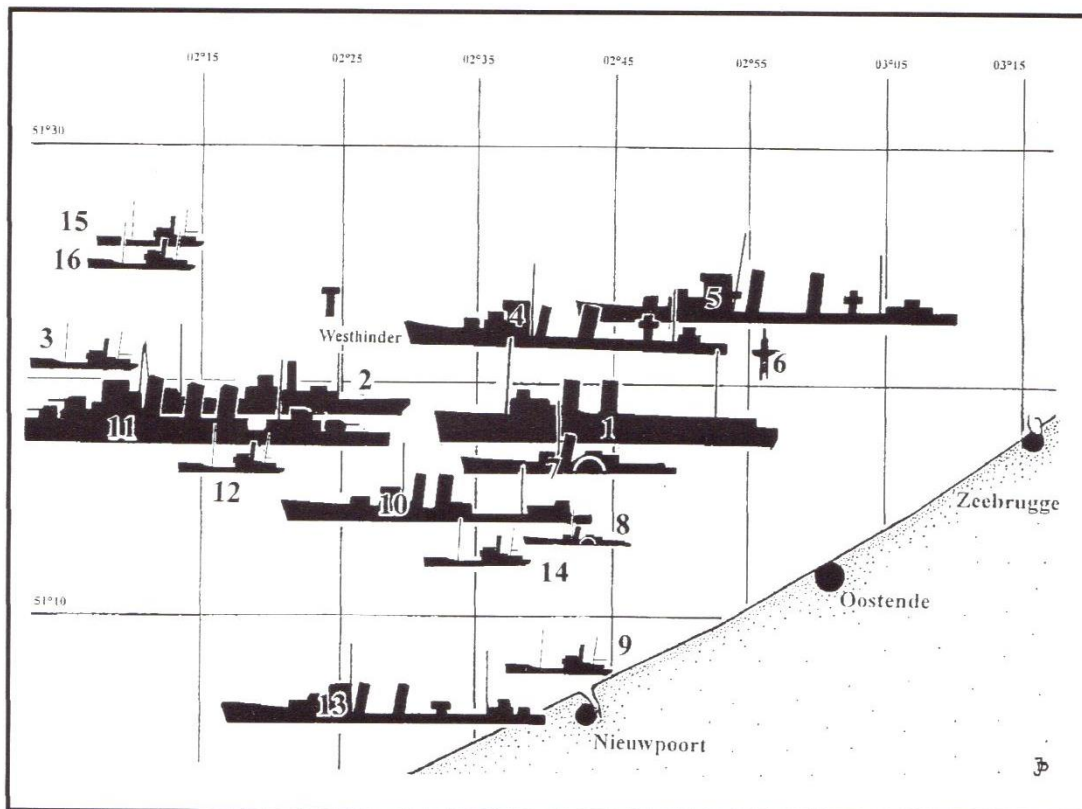
18) **Kleine
havensleepboot**
51°17'19" N 002°51'95" E

19) **Grote sleepboot**
51°10'12" N 002°37'00" E

20) **Kleine
havensleepboot**
51°11'94" N 002°44'99" N

(Termote, 1998)

Bijlage 3: Geallieerde wrakkenlijst uit Wereldoorlog 2



1) M.V. Queen of the Channel:	51.18.47 N	02.43.28 E
2) S.S. Abukir:	51.18.73 N	02.18.34 E
3) Thuringia:	51.20.56 N	02.02.44 E
4) H.M.S. Wakeful:	51.22.72 N	02.43.35 E
5) H.M.S. Grafton:	51.24.40 N	02.49.09 E
6) De mast (Comfort of deel van H.M.S. Grafton):	51.20.72 N	02.45.57 E
7) Waverley:	51.17.00 N	02.41.27 E
8) Gracie Fields:	51.12.55 N	02.39.39 E
9) Polly Johnson:	51.09.91 N	02.43.02 E
10) Bourrasque:	51.14.95 N	02.33.02 E
11) Sirocco:	51.18.95 N	02.14.13 E
12) Argyllshire of Stella Dorado:	51.16.62 N	02.15.79 E
13) H.M.S. Basilisk:	51.08.22 N	02.35.02 E
14) St. Achilleus (WK 103):	51.12.70 N	02.33.28 E
15) Blackburn Rovers:	51.24.79 N	02.13.89 E
16) Westella:	51.24.97 N	02.13.32 E

(Termote, 2000)

Bijlage 4: Datafiches van de 10 gekozen wrakken uit hoofdstuk 3.5

(eigen werk)

1) *West-Hinder* – Belgisch lichtschip - **Goed** geconserveerd

Algemeen:	
Setting bij zinken	Aanvaring met het stoomschip Ekbatana (Warzée 1999, 70-72). Op de site van de West-Hinder zou zich ook nog het anker van de laatste West-Hinder bevinden (zijn 1200 kg wegend paraplu-anker). Deze West-Hinder bevindt zich nu in Zeebrugge.
Datum gezonken	13/12/1912
Locatie (l,g)	l 51°22'878 N g 002°27'134 E
Diepte (m)	25-30 (/)
Saliniteit water (‰ = g/kg = PSU)	34,5609 PSU (practical salinity unit)
Samenstelling zouten	
Temperatuur zeewater (°C)	10,0809°C (16/12/2014)
O ₂ -concentratie (in water+bodem)	7,8119mg/l 86,472% saturatie
Stromingen (getij+algemeen)	
Scheepsinfo:	
Samenstelling gebruikte staal	
Positie op zeebodem	Intact, voorligging 038°, (/), (/)
Originele staalplaatdikten (+ waar)	
Staaldiktemetingen + aanduiden op GA plan (zie externe datasheet)	
Methode:	
Leeftijd schip op zink-datum	48 (15/03/1864)
Leeftijd wrak	102
Plaatdikteverlies	
Massaverlies/jaar	

Bron: CTD-station ZG02 (op 16/12/2014)

2) HMS Wakeful (achterste deel) – Britse duikboot (wrak 188) - Goed geconserveerd [Oorlogsgraf]

Algemeen:	
Setting bij zinken	Missie: militaire ontruiming Duinkerke 28/05/1940: reis 1 vanuit Duinkerke & op terugtocht naar Frankrijk gehavend bij luchtaanval (gat in zijkant schip) - zelfde dag (23.00u) 2de ontruiming. Getorpedeerd. Het schip brak in volle vaart in twee stukken.
Datum gezonken	29-30/05/1940
Locatie (l,g)	I 51°22'730 N g 002°43'360 E (Kwinteboei)
Diepte (m)	(/)
Saliniteit water (‰= g/kg = PSU)	34,3639 PSU
Samenstelling zouten	
Temperatuur zeewater (°C)	9,0871°C (16/12/2014)
O ₂ -concentratie (in water+bodem)	8,6181mg/l 93,228% saturatie
Stromingen (getij+algemeen)	
Scheepsinfo:	
Samenstelling gebruikte staal	
Positie op zeebodem	Gebroken met voorligging 224°, (/),(/)
Originele staalplaatdikten (+ waar)	
Staaldiktemetingen + aanduiden op GA plan (zie externe datasheet)	
Methode:	
Leeftijd schip op zink-datum	23 (06/10/1917)
Leeftijd wrak	74
Plaatdikteverlies	
Massaverlies/jaar	

2) HMS Wakeful (boeg) – Britse duikboot (wrak 185) - Goed geconserveerd [Oorlogsgraf]

Algemeen:	
Setting bij zinken	Missie: militaire ontruiming Duinkerke 28/05/1940: reis 1 vanuit Duinkerke & op terugtocht naar Frankrijk gehavend bij luchtaanval (gat in zijkant schip) - zelfde dag (23.00u) 2de ontruiming. Getorpedeerd. Het schip brak in volle vaart in twee stukken.
Datum gezonken	29-30/05/1940
Locatie (l,g)	l 51°22'711 N g 002°43'350 E (Kwinteboei)
Diepte (m)	(/)
Saliniteit water (‰= g/kg = PSU)	34,3639 PSU
Samenstelling zouten	
Temperatuur zeewater (°C)	9,0871°C (16/12/2014)
O ₂ -concentratie (in water+bodem)	8,6181mg/l 93,228% saturatie
Stromingen (getij+algemeen)	
Scheepsinfo:	
Samenstelling gebruikte staal	
Positie op zeebodem	Gebroken met voorligging 148°, (/),(/)
Originele staalplaatdikten (+ waar)	
Staaldiktemetingen + aanduiden op GA plan (zie externe datasheet)	
Methode:	
Leeftijd schip op zink-datum	23 (06/10/1917)
Leeftijd wrak	74
Plaatdikteverlies	
Massaverlies/jaar	

Bron: CTD-station 330 (op 16/12/2014)

3) *Birkenfels MV* – Duitse Bulkcarrier (wrak 269) – **Goed** geconserveerd

Algemeen:	
Setting bij zinken	Op weg van Bremen naar Khorramshahr (Perzische Golf) met een lading van 8750 ton ijzererts. Rond de middag kwam het door een dichte mist in aanvaring met het Duitse schip MV Marie Louise Bolten op 1' ten zuiden van het lichtschip de Noordhinder. Er zou nog een 100t fuel en ook veel lading aan boord zijn.
Datum gezonken	07/04/1966
Locatie (l,g)	1 51°38'990 N g 002°32'270 E
Diepte (m)	15-36 (t.o.v. HW)
Saliniteit water (‰= g/kg = PSU)	34,7490 PSU
Samenstelling zouten	
Temperatuur zeewater (°C)	10,3314°C (16/04/2014)
O ₂ -concentratie (in water+bodem)	10,8869mg/l 121,3112% saturatie
Stromingen (getij+algemeen)	
Scheepsinfo:	
Samenstelling gebruikte staal	
Positie op zeebodem	Vlak met voorligging 045°, 20% bedekt, gebroken
Originele staalplaatdikten (+ waar)	
Staaldiktemetingen + aanduiden op GA plan (zie externe datasheet)	
Methode:	
Leeftijd schip op zink-datum	15 (1951)
Leeftijd wrak	49
Plaatdikteverlies	
Massaverlies/jaar	

Bron: CTD-station W09 (op 16/04/2014)

4) Kilmore SS – Britse Bulkcarrier (wrak 210) – **Uitstekend geconserveerd**

Algemeen:		
Setting bij zinken	Gezonken na aanvaring met een ander Brits stoomschip Montezuma. Vracht = glas en aardewerk (handelswaren). Geïdentificeerd a.d.h.v. scheepsbel.	
Datum gezonken	29/07/1906	
Locatie (l,g)	1 51°23'730 N g 002°29'790 E	
Diepte (m)	20,50-30 (/)	
Saliniteit water (‰= g/kg = PSU)	34,5609 PSU (practical salinity unit)	
Samenstelling zouten		
Temperatuur zeewater (°C)	10,0809°C (16/12/2014)	
O ₂ -concentratie (in water+bodem)	7,8119mg/l 86,472% saturatie	
Stromingen (getij+algemeen)		
Scheepsinfo:		
Samenstelling gebruikte staal		
Positie op zeebodem	Vlak met voorligging 046°, steekt 8m boven zeebodem	
Originele staalplaatdikten (+ waar)		
Staaldiktemetingen + aanduiden op GA plan (zie externe datasheet)		
Methode:		
Leeftijd schip op zink-datum	16	(1890)
Leeftijd wrak	108	
Plaatdikteverlies		
Massaverlies/jaar		

Bron: CTD-station ZG02 (op 16/12/2014)

Commentaar: De Kilmore SS ligt er heel mooi bij i.t.t. bijvoorbeeld de Garden City.

5) UB-16 – Duitse duikboot type UB1 (wrak 272) – **Uitstekend geconserveerd [Oorlogsgraf]**

Algemeen:	
Setting bij zinken	Is als eerste duikboot uit de geblokkeerde haven van Zeebrugge gevaren en getorpedeerd.
Datum gezonken	10/05/1918
Locatie (l,g)	l 51°40'820 N g 002°25'100 E
Diepte (m)	36-41 (/)
Saliniteit water (‰= g/kg = PSU)	34,9282 PSU
Samenstelling zouten	
Temperatuur zeewater (°C)	10,2873°C (16/04/2014)
O ₂ -concentratie (in water+bodem)	10,8607mg/l 121,0416 % saturatie
Stromingen (getij+algemeen)	
Scheepsinfo:	
Samenstelling gebruikte staal	
Positie op zeebodem	Gebroken, bakboord list, (/), (/)
Originele staalplaatdikten (+ waar)	
Staaldiktemetingen + aanduiden op GA plan (zie externe datasheet)	
Methode:	
Leeftijd schip op zink-datum	3 (26/04/1915)
Leeftijd wrak	97
Plaatdikteverlies	
Massaverlies/jaar	

Bron: CTD-station LW02 (op 16/04/2014)

6) UB-20 – Duitse duikboot type UB2 (wrak142) [28x4m]– Uitstekend geconserveerd [Oorlogsgraf]

Algemeen:	
Setting bij zinken	Kusttorpedoboot uit WOI, type UB II, op proefvaart langs de Belgische Kust (on a Jolly). De boot keerde 's avonds niet terug. De geallieerden meldden het zinken van 2 U-boten (UC-boten volgens hen) door watervliegtuigen die dag in het Westhindergebied; mijnaanvaring is waarschijnlijker (enkel schade aan boeg en midden). Op 17 juni 1917 beschadigd bij een vliegtuigbombardement op Zeebrugge en Brugge.
Datum gezonken	29/07/1917
Locatie (l,g)	1 51°21'189 N g 002°38'326 E
Diepte (m)	23-27 (/)
Saliniteit water (‰= g/kg = PSU)	34,5609 PSU (practical salinity unit)
Samenstelling zouten	
Temperatuur zeewater (°C)	10,0809°C (16/12/2014)
O ₂ -concentratie (in water+bodem)	7,8119mg/l 86,472% saturatie
Stromingen (getij+algemeen)	
Scheepsinfo:	
Samenstelling gebruikte staal	
Positie op zeebodem	Gebroken met voorligging 046°, 45° gekanteld naar stuurboord, (/)
Originele staalplaatdikten (+ waar)	
Staaldiktemetingen + aanduiden op GA plan (zie externe datasheet)	
Methode:	
Leeftijd schip op zink-datum	1,5 (1916)
Leeftijd wrak	97
Plaatdikteverlies	
Massaverlies/jaar	

Bron: CTD-station ZG02 (op 16/12/2014)

Commentaar: Fel begroeid + in twee gedynamiteerd om binnenin te kunnen kijken

7) UB III-klasse-Fairy Bank – Duitse duikboot (wrak 245) – Goed geconserveerd

Algemeen:	
Setting bij zinken	Mogelijk UB-56, UB103, UB 104 of UB113. Misschien ook UB-54 (Oorlog onder Water) Waarschijnlijk getorpedeerd.
Datum gezonken	1917-1918
Locatie (l,g)	l 51°26'795 N g 002°19'992 E
Diepte (m)	18,20-22 (/)
Saliniteit water (‰= g/kg = PSU)	34,9102 PSU
Samenstelling zouten	
Temperatuur zeewater (°C)	15,9192°C (24/06/2014)
O ₂ -concentratie (in water+bodem)	8,1020mg/l 101,3579% saturatie
Stromingen (getij+algemeen)	
Scheepsinfo:	
Samenstelling gebruikte staal	
Positie op zeebodem	Intact met voorligging 140°, geen list, 5° trim op neus, sterk verzand (in erosieput)
Originele staalplaatdikten (+ waar)	
Staaldiktemetingen + aanduiden op GA plan (zie externe datasheet)	Commandotoren: 19,80-20,40mm Drukhuid: 8,85mm
Methode:	
Leeftijd schip op zink-datum	Ca. 1 (1917)
Leeftijd wrak	Ca. 97
Plaatdikteverlies	
Massaverlies/jaar	

Bron: CTD-station 421 (op 24/06/2014)

8) Garden City MV – Liberiaanse/Britse Bulkcarrier (wrak 253) – Gemiddeld geconserveerd

Algemeen:	
Setting bij zinken	Gezonken na aanvaring
Datum gezonken	19/03/1969
Locatie (l,g)	l 51°29'141 N g 002°18'321 E
Diepte (m)	15-35 (/)
Saliniteit water (‰= g/kg = PSU)	34,9102 PSU
Samenstelling zouten	
Temperatuur zeewater (°C)	15,9192°C (24/06/2014)
O ₂ -concentratie (in water+bodem)	8,1020mg/l 101,3579% saturatie
Stromingen (getij+algemeen)	
Scheepsinfo:	
Samenstelling gebruikte staal	
Positie op zeebodem	(/), Gebroken (op zijkant), 20% bedekt
Originele staalplaatdikten (+ waar)	
Staaldiktemetingen + aanduiden op GA plan (zie externe datasheet)	4,70-5,15mm (opbouw voorschip) 12,90mm (balk opbouw voorschip)
Methode:	
Leeftijd schip op zink-datum	23 (1946)
Leeftijd wrak	46
Plaatdikteverlies	
Massaverlies/jaar	

Bron: CTD-station 421 (op 24/06/2014)

9) UC-62 – Duitse duikboot (wrak 265) - Goed geconserveerd [Oorlogsgraf]

Algemeen:		
Setting bij zinken	Getorpedeerd wrak van de Od-1.	
Datum gezonken	19/10/1917	
Locatie (l,g)	1 51°36'551 N g 002°57'989 E	
Diepte (m)	31-36 (/)	
Saliniteit water (‰= g/kg = PSU)	33,8157 PSU	
Samenstelling zouten		
Temperatuur zeewater (°C)	4,6097°C (26/02/2013)	
O ₂ -concentratie (in water+bodem)	9,8734mg/l 96,0056% saturatie	
Stromingen (getij+algemeen)		
Scheepsinfo:		
Samenstelling gebruikte staal		
Positie op zeebodem	Gebroken, rechtop met voorligging 125°, sterk verzand (40% bedekt)	
Originele staalplaatdikten (+ waar)		
Staaldiktemetingen + aanduiden op GA plan (zie externe datasheet)		
Methode:		
Leeftijd schip op zink-datum	<1	(08/01/1917)
Leeftijd wrak	97	
Plaatdikteverlies		
Massaverlies/jaar		

Bron: CTD-station W07bis (op 26/02/2013)

10) UC-4 – Duitse duikboot (wrak 237) [25x2,5m] - Goed geconserveerd

Algemeen:	
Setting bij zinken	Opzettelijk tot zinken gebracht bij terugtrekking. (relatie met nabijgelegen U-boot UB-59)
Datum gezonken	--/10/1918
Locatie (l,g)	l 51°25'439 N g 003°06'154 E
Diepte (m)	6,3-8,2 (t.o.v. LLWS)
Saliniteit water (‰= g/kg = PSU)	32,0305 PSU
Samenstelling zouten	
Temperatuur zeewater (°C)	7,0784°C (26/03/2012) (16,1379°C op 20/06/2012)
O ₂ -concentratie (in water+bodem)	12,9910mg/l 132,318% saturatie
Stromingen (getij+algemeen)	
Scheepsinfo:	
Samenstelling gebruikte staal	
Positie op zeebodem	Intact met voorligging 342°, ligt 90° op BB, (/)
Originele staalplaatdikten (+ waar)	
Staaldiktemetingen + aanduiden op GA plan (zie externe datasheet)	
Methode:	
Leeftijd schip op zink-datum	3 (1915)
Leeftijd wrak	96
Plaatdikteverlies	
Massaverlies/jaar	

Bron: CTD-station 710b (op 20/06/2012)

11. Bibliografie

- ABS. (2007). Guidance notes on the inspection, maintenance and application of marine coating systems, 3rd edition. American Bureau of Shipping. Geraadpleegd van https://madden-maritime.com/wp-content/uploads/2015/06/abs-guidance-notes-on-coatings-pub49_coatingsnov07.pdf
- Bakker, K. (2017, 12 juli). Aluminium waterbatterij helpt onbemande onderzeeërs beter presteren | Maakindustrie – Nieuws, blogs en praktijkverhalen over de Nederlandse Maakindustrie. *Aluminium waterbatterij helpt onbemande onderzeeërs beter presteren*. Geraadpleegd van <https://www.maakindustrie.nl/nieuws/aluminium-waterbatterij-helpt-onbemande-onderzee%C3%ABrs-beter-presteren>
- Bartuli, C., Petriaggi, R., Davidde, B., Palmisano, E., & Lino, G. (2008). In situ conservation by cathodic protection of cast iron findings in marine environment (p. 8). Gepresenteerd bij 9th International Conference on NDT of Art, Jeruzalem, Israel. Geraadpleegd van www.ndt.net/search/docs.php3?MainSource=65
- Beech, I. B., & Gaylarde, C. C. (1999). Recent advances in the study of biocorrosion - an overview. *Revista de Microbiologia*, 30(3), 117–190. doi:10.1590/S0001-37141999000300001
- Beech, I. B., & Sunner, J. (2004). Biocorrosion: towards understanding interactions between biofilms and metals. *Current opinion in biotechnology*, 15, 181–186. doi:DOI 10.1016/j.copbio.2004.05.001
- Belga. (2018, 15 juni). Amerikaanse bommenwerper uit WOII gevonden in de Noordzee. *Knack*.
- Belwind. (z.d.). Windturbines - Belwind. *Belwind Offshore Energy - Windturbines*. Geraadpleegd van <http://www.belwind.eu/nl/windturbines/>
- Budinski, K. G. (2003). *materiaalkeuze voor technici, 3rd edition*. (Schoonhoven, Academic Service).
- CMA science. (2015, 2 november). Cursus Natuurkunde - Snelheid van geluid. *Geluidssnelheid - toelichting*. Geraadpleegd van <https://cma-science.nl/activities/nl/natuurkunde/Geluid/Geluidssnelheid/Geluidssnelheid%20-%20Toelichting.pdf>
- Collier, R., & Prudames, D. (2004). Bijkomende historische informatie rond zinken van de WAKEFUL HMS. Maritieme Archeologie. Geraadpleegd van http://www.maritieme-archeologie.be/documents/wrecks/HISTORIEK_WAKEFUL_HMS.pdf
- Cygnus. (2014, 20 februari). Cygnus Dive Operation Manual - Underwater Ultrasonic Thickness Gauge model M2-DIVE.

- Danilovic, V., Beltrame, C., Gelichi, S., & Carinci, F. M. (2014, 29 oktober). *In-situ conservation of the shipwrecks in the Mediterranean Sea*. (Università Ca' Foscari Venezia, Venetië, Italië). Geraadpleegd van <http://dspace.unive.it/bitstream/handle/10579/5482/835000-1163964.pdf?sequence=2>
- De Baere, K. (2011, 22 juni). *Corrosion in ballast tanks on board of merchant vessels - in situ study of the significant parameters*. (Universiteit Antwerpen, Antwerpen, België).
- De Baere, K. (2017, 7 november). *Analysis of corrosion rates on wreckage steel - a model exercise in the North Sea - AMACORT*. Gepresenteerd bij AMA research day, Hogere Zeevaartschool Antwerpen.
- de Brito, L. V. R., Coutinho, R., Cavalcanti, E. S., & Benchimol, M. (2007). The influence of macrofouling on the corrosion behaviour of API 5L X65 carbon steel. *Biofouling*, 23(3–4), 193–201. doi:10.1080/08927010701258966
- de Messano, L. V. R., Sathler, L., Reznik, L. Y., & Coutinho, R. (2009). The effect of biofouling on localized corrosion of the stainless steels N08904 and UNS S32760. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(5), 607–614. doi:10.1016/j.ibiod.2009.04.006
- De Redactie. (2014, 14 mei). Scheepswrakken in Noordzee beschermd als cultureel erfgoed. *HLN.be*, p. 1.
- Decaluwé, C. (2017, 23 november). Waarom worden scheepswrakken beschermd?
- Decaluwé, C., Maritiem en Onderwater Erfgoed, & VLIZ. (2018). Vondsten in zee - Registraties. *Registraties | Vondsten in zee*. databank, . Geraadpleegd van <http://www.vondsteninzee.be/overzicht-registraties?page=1>
- Demerre, I. (z.d.). Maritieme Archeologie - lijst scheepswrakken. *Lijst scheepswrakken*. Geraadpleegd 17 december 2015, van http://www.maritieme-archeologie.be/WK_ShipList.aspx
- DeuFraMat. (z.d.). Deutsch-Französische Materialien: Der deutsch-französische Streit um Elsass-Lothringen. *Der deutsch-französische Streit um Elsass-Lothringen*. Geraadpleegd van <http://www.deuframat.de/en/regionen/grenzueberschreitende-probleme-und-kooperation/grenzregionen-zwischen-frankreich-und-deutschland-das-beispiel-des-elsass-und-der-oberrheinregion/der-deutsch-franzoesische-streit-um-elsass-lothringen.html#cLL5>
- Difference Wiki. (z.d.). Ferrous vs. Ferric: What's the Difference? Geraadpleegd 30 juni 2018, van <https://www.difference.wiki/ferrous-vs-ferric/>
- Eashwar, M., Maruthamuthu, S., Palanichamy, S., & Balakrishnan, K. (1995). Sunlight irradiation of seawater eliminates ennoblement-causation by biofilms. *Biofouling*, 8(3), 215–221. doi:10.1080/08927019509378274
- EasyChem Australia. (z.d.). Shipwrecks and Salvage - Process of cathodic protection - EasyChem Australia. *Process of cathodic protection*. Geraadpleegd 8 december 2018, van

- <https://easychem.com.au/shipwrecks-and-salvage/4-marine-protection/process-of-cathodic-protection/>
- Emrol. (z.d.). Onderhoudsvrije batterijen en accu's. *Onderhoudsvrije batterijen voor stand-by en elektrische aandrijving*. Geraadpleegd van <https://emrol.com/onderhoudsvrije-batterijen/>
- Energy Coating. (z.d.). Onderwater coating. *Onderwater – Energy Coating*. Geraadpleegd van http://energycoating.nl/?page_id=94
- Extreme Bolt & Fastener. (2016). Technical Terms of Corrosion Simplified. Geraadpleegd van <https://www.extreme-bolt.com/technical-terms-of-corrosion-simplified.html>
- Eyres, D. J. (2007). Ship Construction 6th edition. *Butterwoth-Heinemann*, 45–50 & 376.
- Flemming, H. C. (1996). Biofouling and microbiologically influenced corrosion (MIC) -an economical and technical overview. *Microbial deterioration of materials*.
- Flemming, H. C., & Geesey, G. G. (1991). Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems. *Springer-Verlag*.
- Gaastra, F. S. (1976). De Verenigde Oost-Indische Compagnie in de zeventiende en achttiende eeuw. De groei van een bedrijf. Geld tegen goederen. Een structurele verandering in het Nederlands-Aziatisch handelsverkeer. *BMGN-Low Countries Historical Review*, 91(2), 249–272.
- Gardiner, C. P., & Melchers, R. E. (2003). Corrosion analysis of bulk carriers, Part I: Operational parameters influencing corrosion rates. *Marine Structures*, 16(8), 547–566.
doi:10.1016/S0951-8339(01)00026-0
- Gilberg, M. R., & Seeley, N. J. (1981). The identity of compounds containing chloride ions in marine iron corrosion products: a critical review. *Studies in Conversation*, 50–56.
doi:<https://doi.org/10.1179/sic.1981.26.2.50>
- Hernandez, F. (2017). Gemiddelde zeewatertemperatuur en DIN Noordzee - VLIZ.
- Hernandez, F. (z.d.). Marine Information and Data Acquisition System - CTD-data. *MIDAS - Marine Information and Data Acquisition System*. databank, . Geraadpleegd 30 juni 2018, van <http://www.vliz.be/vmdcdata/midas/cl.php?showhtml=true>
- Humphreys, S. (2010 juni). Economic Outlook Brightens For Pipeline Coating Developments. *Pipeline & Gas Journal*, 237(6). Geraadpleegd van <https://pgjonline.com/magazine/2010/june-2010-vol-237-no-6/features/economic-outlook-brightens-for-pipeline-coating-developments>
- Johnsen, R. (2004, 15 juni). *Cathodic Protection*. (Institut for Produktutvikling og Materialer, Trondheim). Geraadpleegd van <https://edoc.site/cathodic-protection-7-pdf-free.html>
- King, R., Miller, J., & Wakerley, D. (1973). Corrosion of mild steel by iron sulphides. *Br. Corros. J.*, 8(3), 137–141.

- Ktori, S. (2013, 15 juli). Bio-batteries: creating energy from bacteria | E&T Magazine. *Bio-batteries: creating energy from bacteria*. Geraadpleegd van <https://eandt.theiet.org/content/articles/2013/07/bio-batteries-creating-energy-from-bacteria/>
- Landoulsi, J., Cooksey, K. E., & Dupres, V. (2011). Interactions between diatoms and stainless steel: focus on biofouling and biocorrosion. *Biofouling*, *27*(10), 1109–1124. doi:10.1080/08927014.2011.629043
- Li, K., Whitfield, M., & Van Vliet, K. J. (2013). Beating the bugs: Roles of Microbial Biofilms in Corrosion. *Corrosion Reviews*, (31), 25. doi:<https://doi.org/10.1515/corrrev-2013-0019>
- Little, B. J., & Lee, J. S. (2007). *Microbiologically Influenced Corrosion*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Geraadpleegd van [https://books.google.be/books?id=1i8AJW6ziKMC&pg=PR5&ots=BTwxGmZWQj&dq=microbiologically%20influenced%20corrosion%20brenda%20J.%20little%20B.J.%20%26%20J.S.%20Lee%20\(2007\)&lr&hl=nl&pg=PR4#v=onepage&q=microbiologically%20influenced%20corrosion%20brenda%20J.%20little%20B.J.%20%26%20J.S.%20Lee%20\(2007\)&f=true](https://books.google.be/books?id=1i8AJW6ziKMC&pg=PR5&ots=BTwxGmZWQj&dq=microbiologically%20influenced%20corrosion%20brenda%20J.%20little%20B.J.%20%26%20J.S.%20Lee%20(2007)&lr&hl=nl&pg=PR4#v=onepage&q=microbiologically%20influenced%20corrosion%20brenda%20J.%20little%20B.J.%20%26%20J.S.%20Lee%20(2007)&f=true)
- Marine Macrofouling and Corrosion of Some Engineering Alloys in Arabian Gulf Seawater. (2000). (p. 8). Gepresenteerd bij Corrosion 2000, Orlando, Florida: NACE International. Geraadpleegd van <https://www.onepetro.org/conference-paper/NACE-00638>
- Matheson, R. (2017). *Batteries that “drink” seawater could power long-range underwater vehicles*. Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology. Geraadpleegd van <https://phys.org/news/2017-06-batteries-seawater-power-long-range-underwater.html>
- Meeus, K. (2017, 10 december). Waarom worden scheepswrakken beschermd?
- Melchers. (2016). *Effect of nutriënt pollution on long-term microbiologically influenced corrosion of steel and cast iron infrastructure*. Newcastle, Australië.
- Melchers, R. E. (2003a). Modeling of Marine Immersion Corrosion for Mild and Low-Alloy Steels-Part 1: phenomenological model. *Corrosion*, *59*(4), 319–334. doi:<https://doi.org/10.5006/1.3277564>
- Melchers, R. E. (2003b). Effect on marine immersion corrosion of carbon content of low alloy steels. *Corrosion Science*, *25*(11), 2609–2625.
- Melchers, R. E. (2005). Effect of nutrient-based water pollution on the corrosion of mild steel in marine immersion conditions. *Corrosion*, *61*(3), 237–245. doi:<https://doi.org/10.5006/1.3280633>
- Melchers, R. E. (2006). Modeling immersion corrosion of structural steels in natural fresh and brakish waters. *Corrosion Science*, *48*(12), 4174–4201.

- Melchers, R. E. (2013). Long-term immersion corrosion of steels in seawaters with elevated nutrient concentration. *Corrosion Science*, *81*, 110–116.
- Melchers, R. E. (2018). Progress in developing realistic corrosion models. *Structure and Infrastructure Engineering*, *14*(7), 843–853. doi:10.1080/15732479.2018.1436570
- Melchers, R. E., & Ahammed, M. (1994). *Nonlinear modelling of corrosion of steel in marine environments*. Research report (University of Newcastle (N.S.W.). Department of Civil Engineering and Surveying) no. 106.09.1994.
- Melchers, R. E., & Jeffrey, R. (2004). Influence of water velocity on marine corrosion of mild steel. *Corrosion*, *60*(1), 84–94.
- Melchers, R.E. (2004). Effect of small compositional changes on marine immersion corrosion of low alloy steel, *46*(7), 1669–1691.
- Melchers, Robert E. (2008). Development of new applied models for steel corrosion in marine applications including shipping. *Ships and Offshore Structures*, *3*:2, 135–144. doi:10.1080/17445300701799851
- Nave, C. R. (2005). Corrosion as an electrochemical process. Geraadpleegd van <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Chemical/corrosion.html>
- Netherlands National Water Board. (2008 juni). *Sacrificial anodes, merchant shipping and fisheries*. Geraadpleegd van <http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/Water/Factsheets/English/Sacrificial%20anodes,%20merchant%20shipping.pdf>
- Nieuwsblad. (2017a, 14 november). 22 bemanningsleden kwamen eind 1916 om het leven - 36 schepen tot zinken gebracht, uiteindelijk zelf vergaan: dit is het verhaal van de duikboot die gevonden werd voor onze kust. *Het Nieuwsblad*. Geraadpleegd van https://www.nieuwsblad.be/cnt/dmf20171114_03185494?hkey=&utm_source=nieuwsblad&utm_medium=newsletter&utm_campaign=lunchnieuwsbrief&adh_i=e4180b60ed955e882514c238fb052bda&imai=515746f3-bb88-4777-8580-43bd27dbce73&M_BT=1698235117864
- Nieuwsblad. (2017b, 14 november). OVERZICHT. Deze wrakken in de Noordzee zijn erkend als cultureel erfgoed. Geraadpleegd van https://www.nieuwsblad.be/cnt/dmf20171114_03185627
- NWO. (2013). Bio-batteries in the seabed - Bacteria that make electricity: the holy grail of materials science. *Bio-batteries in the seabed*. Geraadpleegd van <https://www.nwo.nl/en/research-and-results/cases/bio-batteries-in-the-seabed.html>
- Okley, S. (2009). Okley Steel. Geraadpleegd van http://www.oakleysteel.co.uk/ah36_sh36_shipbuilding_steel.htm

- Orfei, L. H., Simison, S., & Busalmen, J. P. (2006). Stainless steels can be cathodically protected using energy stored at the marine sediment/seawater interface. *Environmental Science & Technology*, *40*(20), 6473–6478.
- Ortmann, N. (2009, 13 januari). *Exploring practitioners' attitudes towards in situ preservation and storage for underwater cultural heritage*. (Flinders University). Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/profile/Nicole_Ortmann/publication/260402999_Exploring_Practitioners'_Attitudes_Towards_In_Situ_Preservation_and_Storage_for_Underwater_Cultural_Heritage/links/54257e970cf238c6ea7410b3.pdf
- Paik, J. K., Kim, S. K., & Lee, S. K. (1998). Probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of bulk carriers. *Ocean Engineering*, *25*(10), 837–860. doi:10.1016/S0029-8018(97)10009-9
- Potters, G. (2015). *Materie en Materialen voor Bachelors Scheepswertuigkundige*. (Cursus, Hogere Zeevaartschool Antwerpen, België).
- Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., & Oh, S.-E. (2015). Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: a review. *Alexandria Engineering Journal*, *54*, 745–756. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.031
- Richards, V. (2012). In Situ Preservation and Monitoring of the James Matthews Shipwreck Site. *Conservation and management of archeological sites*, *14*(1–4), 169–181. doi:10.1179/1350503312Z.00000000014
- Roberge, P. R. (1999). *Handbook of corrosion engineering*. McGraw-Hill Handbooks. Geraadpleegd van <https://www.cntq.gob.ve/cdb/documentos/quimica/197.pdf>
- Roberge, P. R. (2005). Corrosion Doctors. *Corrosion science and engineering information hub*. Geraadpleegd van www.corrosion-doctors.org
- Rohwerder, T., Gehrke, T., Kinzler, K., & Sand, W. (2003). Bioleaching review part a. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, *63*(3), 239–248.
- Scheldeschorren. (2017, 27 juni). Zeepokken – Balanomorpha – Galgeschoor en Groot Buitenschoor. *Zeepokken - Balanomorpha*. Geraadpleegd van <https://scheldeschorren.be/wp/zilte-natuur/fauna/soortenoverzicht-bodemleven/zeepokken-balanomorpha/>
- Schülke & Mayr GmbH. (2018). Sulfate reducing bacteria (SRB). *Sulfate reducing bacteria (SRB)*. Geraadpleegd van <http://www.oilfield-biocides.com/oilfield-biocides/microorganisms/SRB.php>
- Solvay Interlox. (2001, 3 september). Hydrogen Peroxide controlling reduced sulphur compounds. Solvay Interlox. Geraadpleegd van <https://www.solvay.com.au/en/binaries/Controlling%20reduced%20sulphur%20species-202502.pdf>

- Staelens, N. (2017, 14 november). Identificatie Duitse duikboot WOI: 22 namen gekend | Focus en WTV. Geraadpleegd van <https://www.focus-wtv.be/nieuws/identificatie-duitse-duikboot-woi-22-namen-gekend>
- Termote, T. (1998). *De Vergeten Vloot*. België in oorlog. Erpe: De Krijger.
- Termote, T. (1999). *Verdwenen in de Noordzee*. België in oorlog. Erpe: De Krijger.
- Termote, T. (2000). *Duinkerke en Dynamo*. België in oorlog. Erpe: De Krijger.
- Termote, T. (2009). *Schatten en Scheepswrakken*. Boeiende onderwaterarcheologie in de Noordzee. Leuven: Davidsfonds. Geraadpleegd van <http://www.sea-arch.be/nl/'t-vliegent-hart>
- Termote, T. (2013). *Duitse U-bootontwikkeling tijdens WO I*. De Grote Rede (p. 7). VLIZ.
- Termote, T. (2014). *Oorlog onder water* (3de dr.). Davidsfonds Uitgeverij.
- Termote, T. (2018, 31 augustus). *De Duitse duikbotenoorlog en de Britse tegenaanval - De Slag om De Noordzee*. Tentoonstelling, Brugge.
- Theuns, S. (z.d.). Stichting Maritiem-Historische Databank. Geraadpleegd van http://www.marhisdata.nl/main.php?to_page=schepen_overzicht
- UCB. (2012). Periodieke tabel der elementen. UCB S.A. Belgium. Geraadpleegd van https://www.ucb.com/_up/ucb_com_rd/documents/UCB_Periodic_Table_NL_.pdf
- van der Mijle Meijer, H., Foekema, E., & Leon, F. (2014). *Protecting with Nature (PwN)* (p. 18). Delft, Industrial Innovation.
- Van Haelst, S., & Pieters, M. (2017 januari). Infobrochure voor Noordzee wrakduikers. Agentschap Onroerend Erfgoed.
- Van Haelst, Sven. (2014, 24 november). *Scheeps- en andere wrakken*. Gepresenteerd bij SeArch Studiedag - Archeologie en Onderwaterlandschap, Brugge. Geraadpleegd van http://www.sea-arch.be/sites/sea-arch.be/files/public/docs/Publicaties/Presentatie_Van%20Haelst.pdf
- Van Haelst, Sven. (2015a). *RV Belgica Cruize 9-11 februari 2015* (p. 26). Agentschap Onroerend Erfgoed.
- Van Haelst, Sven. (2015b). *Verslag duikcampagne RV Simon Stevin 11-13 mei 2015*. Agentschap Onroerend Erfgoed.
- Vantilt, E. (2017, 21 april). Maritieme energie: hoe kunnen we energie opwekken op zee? *Wat is maritieme energie en hoe wordt elektriciteit geproduceerd?* Geraadpleegd van <https://www.killmybill.be/nl/maritieme-energie/>
- Vermeersch, J., Demerre, I., Pieters, M., & Van Haelst, S. (2015). *Archeologisch erfgoed in de Noordzee - Ontwikkeling van een efficiënte evaluatiemethodologie en voorstellen tot een duurzaam beheer in België*. Onroerend Erfgoed.

- Veth, P., Macleod, I., & Richards, V. (2016). The Australian Historic Shipwreck Preservation Project: In situ Preservation and Long-Term Monitoring of the Clarence (1850) and James Matthews (1841) Shipwreck Sites. *Journal Conservation and Management of Archaeological Sites*, 18(1–3), 240–253. doi:10.1080/13505033.2016.1182759
- Vlaamse Overheid. (z.d.). Cultureel Erfgoed. *Vlaanderen.be - Cultuur, sport en vrije tijd*. Geraadpleegd 20 november 2017, van <http://www.vlaanderen.be/nl/cultuur-sport-en-vrije-tijd/cultuur/cultureel-erfgoed>
- VLIZ. (2015a, 24 november). De nieuwe Belgische wet betreffende de bescherming van het cultureel erfgoed onder water. *Search - archeologisch erfgoed in de Noordzee*. Geraadpleegd 5 december 2015, a van <http://www.sea-arch.be/nl/wet-op-onderwatererfgoed>
- VLIZ. (2015b, 15 december). Kaart selectie 17 scheepswrakken. VLIZ.
- VLIZ. (2015c, 14 oktober). DE VLEET - Zee- en kustencyclopedie. *Kiezelwieren (diatomeeën) - De Vleet*. Geraadpleegd c van <http://www.vliz.be/vleet/content-vleet.php?language=0&id=3294&item=Kiezelwieren>
- VLIZ. (z.d.-a). Databank Maritieme Archeologie - Agentschap Onroerend Erfgoed. *Maritieme Archeologie*. databank, . Geraadpleegd a van <http://www.maritieme-archeologie.be/>
- VLIZ. (z.d.-b). Zeecijfers. *Zeecijfers*. Geraadpleegd b van http://www.vliz.be/cijfers_beleid/zeecijfers/search.php
- Wankhede, A. (2017, 26 december). Understanding Sacrificial Anodes on Ships - Marine Insight. *Understanding Sacrificial Anodes on Ships*. Geraadpleegd van <https://www.marineinsight.com/tech/understanding-sacrificial-anodes-on-ships/>
- Waterhouse Corporation. (z.d.). Waterhouse Corporation - Corrosion Control. *Waterhouse Corporation - Corrosion Control*. Geraadpleegd van http://engineeredwater.us/corrosion_control
- Wiersema, I. (z.d.). Kapsel slijmlaag Bacteriekapsel. *Microbiologie - bacteriekapsel, slijmlaag*. Geraadpleegd van <http://www.microbiologie.info/Kapsel%20en%20slijmlaag.html>
- Willemen, R. (2017, 3 april). *The economic benefit of a long term coating strategy*. Gepresenteerd bij Symposium AMACORT, Antwerpen, België. Geraadpleegd van <http://corrosion.hzs.be/Presentations/Remke%20Willemen.pdf>
- WNS. (1937). HMS Brilliant - World Naval Ships. *HMS Brilliant*. Geraadpleegd van https://www.worldnavalships.com/hms_briliant.htm
- Yamamoto, N., & Ikegami, K. (1998). A Study on the Degradation of Coating and Corrosion of Ship's Hull Based on the Probabilistic Approach. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 120(3), 121–128. doi:10.1115/1.2829532