



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

NAUTISCHE WETENSCHAPPEN

Nut en noodzaak van een verfsysteem in ladingtanks van olietankers en PSPC-COT

Jasper Simoens

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

Promotor: Kapt. Dr. De Baere

Academiejaar: 2016 - 2017



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

NAUTISCHE WETENSCHAPPEN

Nut en noodzaak van een verfsysteem in ladingtanks van olietankers en PSPC-COT

Jasper Simoens

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

Promotor: Kapt. Dr. De Baere

Academiejaar: 2016 – 2017

Woord vooraf

Voor u ligt het eindwerk 'Nut en noodzaak van een verfsysteem in ladingtanks van olietankers en PSPC-COT'. De scriptie gaat dieper in op de rol van IMO PSPC-COT in het garanderen van de kwaliteit van deze verfsystemen.

Om als onervaren student/cadet een scriptie te schrijven over een onderwerp zoals corrosie en verfsystemen, is het onmisbaar om terug te kunnen vallen op iemand die beschikt over een enorme expertise. Daarom wil ik graag Kapt. Dr. K. De Baere bedanken om me te begeleiden als promotor in het schrijven van deze scriptie. Bovendien wil ik Mr. Eliasson en Mr. Jansen bedanken voor het delen van hun kennis en expertise. Ook wil ik AMACORT bedanken voor hun uitgebreid onderzoek naar corrosie. Van dit team heb ik meerdere bronnen verwerkt. Verder wil ik iedereen bedanken die mijn scriptie heeft nagelezen. Ten slotte wil ik graag mijn vriendin, Karen Devroe, bedanken. Zij stond altijd klaar om me te steunen.

Jasper Simoens,

Antwerpen, 31 maart 2017

Samenvatting

Sommige olietankers hebben last van versnelde corrosie in hun ladingtanks. Aan de dekbeplating veroorzaakt een agressieve tankatmosfeer versnelde, uniforme corrosie. Aan de bodembeplating kunnen corrosieve elementen, water, slib, en bacteriën hevige putcorrosie veroorzaken. Tijdens de jaren negentig werd deze corrosieproblematiek steeds erger door het invoeren van de dubbele wand en de trend van dalende kwaliteit van ruwe aardolie.

Door de corrosie kunnen er lekken ontstaan en kan het schip structurele schade lijden, waardoor het milieu vervuild kan raken. Bijgevolg is het noodzakelijk de ladingtanks van olietankers te beschermen tegen corrosie.

Het aanbrengen van een verfsysteem is een aangewezen methode om de ladingtanks te beschermen tegen corrosie. Om de effectiviteit en de duurzaamheid van het verfsysteem te verzekeren is het belangrijk dat het verfproject zorgvuldig wordt uitgevoerd en dat de verfapplicatie goed verloopt. Echter, werven hoeven maar 12 maanden garantie te bieden. Daardoor kunnen ze besparen door het verfsysteem minder zorgvuldig aan te brengen. Bovendien proberen veel eigenaars kosten te besparen door minder te investeren in de zorgvuldige applicatie van het verfsysteem, of de ladingtanks zelfs helemaal niet te verven. Daarom is het noodzakelijk dat de applicatie van een verfsysteem niet enkel verplicht wordt, maar dat het verfproject zelf ook gereguleerd wordt.

PSPC-COT is de broodnodige minimumstandaard die het verfproject in de ladingtanks van olietankers reguleert. Het streefdoel van PSPC-COT is dat het verfsysteem in de ladingtanks van olietankers minstens 15 jaar in een 'goede' staat blijft. Door PSPC-COT zullen de werven en scheepseigenaars meer moeten investeren in het plannen, aanbrengen en onderhouden van een degelijk verfsysteem in de ladingtanks van olietankers. Anderzijds zullen de eigenaars zeker zijn dat hun ladingtanks gedurende een minimale periode beschermd zijn tegen corrosie. Voorlopig is het zeer waarschijnlijk dat PSPC-COT haar doelstelling zal halen.

PSPC-COT vertoont gebreken. Zo vormen de lasnaden tussen de scheepsblokken de achilleshiel van verfsysteem in de ladingtanks. Ook kennen de prestatietests voor de verf enkele tekortkomingen. Bovendien is PSPC-COT een minimumstandaard die slechts een beperkte levensduur van het verfsysteem garandeert.

Abstract

Certain crude oil tankers suffer from accelerated corrosion in their cargo tanks. The corrosive tank atmosphere will cause accelerated uniform corrosion on the deck plating. Aggressive compounds, sludge, high temperatures and bacteria can cause severe pitting of the bottom plating. The implementation of a double hull and the trend of the deteriorating quality of the transported crude oil, aggravated cargo tank corrosion even more.

As a consequence of accelerated cargo tank corrosion, oil tankers can suffer from structural damage such as holes and cracks. In the worst case, the oil tanker can break up, causing an environmental disaster. Because of these corrosion issues, a suitable corrosion protection system for cargo tanks of crude oil tankers becomes necessary.

The application of a coating on the tank top and the deck plating of the cargo tanks is a suitable mean to protect the cargo tank from corrosion. To prevent the coating from failing prematurely, it is essential that the coating project and the coating application are executed in a thorough and organized manner. However, the shipyard guarantee spans only 12 months. This means that the coating could fail prematurely. Furthermore, many ship owners try to save costs by applying the coating system in a less decent manner. Even worse, some ship owners don't apply a cargo tank coating at all. To assure the quality of the coating system in cargo tanks of crude oil tankers, it is not only necessary to make a coating system compulsory, but there is also the need to implement coating standards in order to assure a minimum quality of the coating.

PSPC-COT is the much needed minimum standard which regulates the corrosion protection and the coating project in cargo tanks of a crude oil tanker. The goal of PSPC-COT is that the applied coating remains in 'good' condition for at least 15 years. Because of PSPC-COT, shipyards and ship owners will have to invest more money into the planning, application and maintenance of a decent coating. However, ship owners will be sure that the cargo tanks of their crude oil tankers will be protected against corrosion for at least 15 years. While the available data is still limited, it is probable that PSPC-COT will effectively reach its target life of 15 years in good condition.

Nevertheless, PSPC-COT has shortcomings. The erection joint area is the Achilles heel of PSPC-COT. Also, there are certain weaknesses to the type approval laboratory test. Furthermore, PSPC-COT is only a minimum standard which seeks a compromise between the interests of the different parties involved. If the coating is to remain intact for a period that is significantly longer than 15 years, it may be necessary to apply different standards.

Inhoud

Lijst met afbeeldingen	xiii
Lijst met tabellen.....	xvii
Glossarium	xix
Inleiding	1
1 Ruwe aardolie	3
1.1 Algemeen	3
1.2 Samenstelling.....	4
1.2.1 Alkanen	5
1.2.2 Alkenen	6
1.2.3 Aromatische koolwaterstoffen:	6
1.2.4 Cycloalkanen	7
1.2.5 Alkynen	8
1.2.6 Heterocomponenten	8
1.2.7 Diagram	9
1.3 Fysische eigenschappen.....	10
1.3.1 Temperatuur	10
1.3.2 Densiteit.....	10
1.3.3 Het troebelpunt	12
1.3.4 Het vloeipunt.....	13
1.4 Kwaliteit.....	13
2 Elektrochemie en corrosie.....	15
2.1 De redoxreactie	15
2.2 De galvanische cel	16
2.3 Corrosie.....	18
2.3.1 Definitie	18
2.4 Thermodynamica	19

2.4.1	Inleiding	19
2.4.2	De eerste wet van de thermodynamica.....	19
2.4.3	De tweede wet van de thermodynamica	23
2.4.4	De Nernstvergelijking	26
2.4.5	De wetten van Faraday	30
2.5	De ijzer -corrosiecel.....	32
2.6	Het Pourbaixdiagram.....	33
3	Verschillende vormen van corrosie	35
3.1	Soorten corrosie.....	35
3.1.1	Uniforme corrosie.....	35
3.1.2	Putcorrosie.....	37
3.1.3	Galvanische corrosie	38
3.1.4	Spleetcorrosie	39
3.1.5	Microbiële corrosie.....	40
3.1.6	Waterstofschaade	42
4	Corrosie in ladingtanks van olietankers.....	43
4.1	Het probleem: agressieve corrosie in ladingtanks.....	43
4.2	Putcorrosie van de bodembeplating van ladingtanks van olietankers	46
4.3	Microbiële corrosie ter hoogte van de bodembeplating	48
4.4	Versnelde uniforme corrosie van de dekbeplating	50
4.4.1	De aanwezigheid van zwavel.....	52
4.4.2	Waterstof-geïnduceerde scheurvorming (Hydrogen Embrittlement)	56
4.5	Corrosie door CO ₂	57
4.6	Aanwezigheid van O ₂	58
5	Bijzonderheden die invloed hebben de corrosie in ladingtanks van olietanker ..	59
5.1	Dubbele wand	59
5.2	Slechte kwaliteit van het inert gas	61

5.3	Aanwezigheid van water	62
5.4	Het gebruik van hoogwaardig staal (HTS).....	63
5.5	Buigen van de scheepsstructuur	63
5.6	Aanwezigheid van slib en schilfers.....	64
5.7	Gebrek aan toegangsmogelijkheden.....	65
5.8	Een minder robuuste scheepsstructuur door minder strenge klasseregels	67
5.9	Negatieve tolerantie op de dikte van het staal.....	68
6	De gevolgen van versnelde corrosie	69
6.1	De belastingen op het schip en het belang van een sterke romp	69
6.2	Vermoeiing van de scheepsconstructie	74
6.3	Ongevallen gerelateerd aan corrosie	74
6.4	Olielekken	76
6.5	De Nakhodka	78
6.6	De Castor	79
7	Verfsystemen	81
7.1	Beschermend effect van de verf.....	81
7.2	Componenten.....	82
7.2.1	Het bindmiddel (<i>binder</i>).....	82
7.2.2	Pigmenten (<i>pigments</i>).....	82
7.2.3	Solventen (<i>solvents</i>)	83
7.2.4	Additieven (<i>additives</i>).....	84
7.2.5	<i>Extenders (fillers)</i>	84
7.3	Het <i>curen</i> van de verf.....	85
7.3.1	Niet converteerbare verven.....	85
7.3.2	Converteerbare verven	86
7.4	Factoren die het harden beïnvloeden.....	87
7.5	Adhesie	88

7.6	Cohesie	89
7.7	De dikte van de verflaag.....	90
7.8	Relatieve vochtigheid	90
7.9	Chlorides	91
7.9.1	Surface volume ratio	91
7.10	De temperatuur	92
7.11	Verfdefecten	94
7.11.1	Blaasvorming	94
7.11.2	Scheurvorming	100
7.11.3	Delaminatie.....	101
7.11.4	Roestvorming doorheen de verflaag.....	102
7.11.5	Falen van een verfsysteem door slechte constructie	103
7.11.6	Het falen van de hechting tussen de verf en het substraat.....	105
7.11.7	Slechte oppervlaktevoorbereiding.....	106
7.11.8	Vuil in het verfsysteem.....	106
7.12	Onderliggende oorzaken van verfdefecten.....	107
7.12.1	Gebrekkige verfsppecificaties	108
7.12.2	Onderhoud van het verfsysteem.....	108
7.12.3	Constructie	109
7.12.4	Formulatie van de verf	110
7.13	Invloed op corrosiepreventie	111
7.14	Oorzaken van het niet aanbrengen van een verfsysteem of van het slecht uitvoeren van een verfproject.....	113
7.14.1	Speculatieve eigenaars	114
7.14.2	Gebrekkige productieplanning en tijdsdruk.....	115
7.14.3	Inconsistenties tussen verschillende classificatiemaatschappijen en hun aanpak van inspectie en onderzoek.....	116
7.14.4	Gebrek aan garantie	116

8	PSPC-COT	117
8.1	Definitie	117
8.2	Toepassing.....	120
8.3	Locatie van het verfsysteem.....	122
8.4	TPA	124
8.5	PSPC-COT pijlers	125
8.6	Selectie van het verfsysteem	127
8.7	Eerste oppervlaktevoorbereiding.....	129
8.8	Tweede oppervlaktevoorbereiding	137
8.9	De applicatie van het verfsysteem	144
8.9.1	De voorschilderlaag	144
8.9.2	De topcoats.....	145
8.9.3	Mengen van het bindmiddel en de verharder.....	146
8.9.4	De applicatieapparatuur.....	146
8.9.5	Opleiding van de applicateurs.....	147
8.10	Laatste verfpreparaties.....	151
8.11	Documentatie	151
8.12	Onderhoud en reparaties aan boord	153
8.13	Vergelijking met TSCF	154
8.14	PSPC-COT testprocedure.....	156
8.14.1	Methode A: laboratoriumtest.....	157
8.14.2	De onderdompelingstest.....	160
8.14.3	Methode B: 5 jaar veldblootstelling	166
8.14.4	Methode C	168
9	Nut van IMO-PSPC	171
9.1	Inleiding.....	171
9.2	Gegevens van het IPPIC.....	172

9.3	Inspectieverslagen van gelijkaardige verfsystemen	172
9.3.1	Schip A	173
9.3.2	Schip B	175
9.3.3	Schip C	176
9.3.4	Schip D	176
9.3.5	Schip E en F	177
9.3.6	Schip G	178
9.3.7	Schip H	179
9.3.8	Mogelijke oorzaken van het vroegtijdig falen van schip G en schip H.	181
9.4	De mening van experts	181
9.5	Deelbesluit	182
Bibliografie		187

Lijst met afbeeldingen

Figuur 1: Verschillende soorten ruwe aardolie. (Nehal, 2013)	4
Figuur 2: De dichtheid en het zwavelgehalte van verschillende soorten ruwe aardolie. Een hoog zwavelgehalte zal bijdragen tot versnelde corrosie in ladingtaks van olietankers. (U.S Energy Information Administration, 2015)	5
Figuur 3: De alkanen 2,2,6,7,8-pentamethylnonaan en 3-ethyl-5-methylheptaan. (Potters, 2016)	5
Figuur 4: Alkenen. (De Baere, 2016)	6
Figuur 5: Aromaten (Potters, 2016)	7
Figuur 6: Cycloalkanen. (Potters, 2016)	7
Figuur 7: Een diagram dat gebruikt kan worden om verschillende soorten ruwe aardolie te categoriseren. (Nehal, 2013)	9
Figuur 8: De viscositeit in functie van de temperatuur en situering van het troebelpunt. (De Baere, s.d.)	12
Figuur 9: De dalende kwaliteit van ruwe aardolie. (Valero energy corporation, 2007)	14
Figuur 10: De API gravity van ruwe aardolie die door raffinaderijen in de V.S. wordt verwerkt. (ScienceNews, 2007)	14
Figuur 11: Het gemiddeld zwavelgehalte van aardolie die door raffinaderijen in de V.S wordt verwerkt. (ScienceNews, 2007).....	14
Figuur 12: Een galvanische cel. (Mühlpfordt, 2008)	17
Figuur 13: Energieniveau in functie van tijd. (De Baere, 2011).....	18
Figuur 14: Veranderingen van interne energie. (De Baere, 2011)	19
Figuur 15: De hoeveelheid energie in het universum is constant. (De Baere, 2011)	20
Figuur 16: Vrije energie. (Shodor, 2017).....	26
Figuur 17: Corrosie in een waterdruppel. (EduMission, 2017).....	33
Figuur 18: Het Pourbaixdiagram. (De Baere, 2011)	33
Figuur 19: Onderverdeling van verschillende corrosievormen. (Potters, 2016)	35
Figuur 20: Anodes en kathodes op bloot staal. (Amtec, 2015)	36
Figuur 21: Corrosie op bloot staal. (Amtec, 2011)	36
Figuur 22: verschillende soorten holtes die kunnen ontstaan bij putcorrosie. (Nippon Steel Corporation, 2000).....	37

Figuur 23: De vorming van een galvanische cel door het aaneenschakelen van twee metalen. (Potters, 2016)	38
Figuur 24: Grijs opofferingsanodes op een schip. (WRS Group, 2017)	39
Figuur 25: Spleetcorrosie. (Amtec, 2015)	39
Figuur 26: Een corrosiecel met MIC. (De Baere, 2017)	41
Figuur 27: Microbiële corrosie. (De Baere, 2017)	41
Figuur 28: Waterstofverbrossing. (Djukic, 2014)	42
Figuur 29: Corrosie in een ladingtank van een olietanker. (Paint International, s.d.)	45
Figuur 30: Putcorrosie op de bodem van een ladingtank. (Kashima et al., 2007)	47
Figuur 31: Putcorrosie. (De Baere, s.d.)	47
Figuur 32: Schade veroorzaakt door microbiële corrosie. (Intertanko, 2002)	49
Figuur 33: Corrosie van de dekplaat. (Rauta, 2004)	51
Figuur 34: Het verband tussen de corrosiesnelheid en de pH. (Roberge, 2010)	53
Figuur 35: De vorming van elementaire zwavel aan de onderzijde van de dekbeplating. (Kashima et al, 2007)	54
Figuur 36: Pyrofoor ijzer dat hevig oxideert. (Jeffries, 2010)	55
Figuur 37: Scheurtjes in het staal door waterstof geïnduceerde scheurvorming. (Rauta et al, s.d)	56
Figuur 38: Percentage dubbelwandige tankers versus percentage enkelwandige tankers (Intertanko, 2007)	59
Figuur 39: Temperaturen in de ladingtanks van een enkelwandige tanker en van een dubbelwandige tanker. (Rauta, 2002)	60
Figuur 40: Het verband tussen de temperatuur en de corrosiesnelheid. (De Baere, 2011)	61
Figuur 41: De snelheid van oxidevorming in functie van de relatieve luchtvochtigheid. (Dehumidification Technologies, 2017)	63
Figuur 42: Een typische roestschilfer van de dekbeplating die wordt aangetroffen op de bodem van de tank. (Intertanko, 2002)	64
Figuur 43: Door hun enorme omvang zijn tankers moeilijk te inspecteren. (Rauta, 2004)	66
Figuur 44: Afschuifkrachten op een schip. (Willemen, 2016-2017)	70
Figuur 45: Inwerking van verschillende krachten op het schip. (Marine Survey Practice, 2013)	70
Figuur 46: Trek- en drukkrachten tijdens sagging. (Marine Survey Practice, 2013) .	71

Figuur 47: Hogging en sagging. (Fagerberg, 2004)	72
Figuur 48: Falen van een corroderende structuur. (Melchers, 2017)	73
Figuur 49: De olietanker 'Erika'. (The New York Times, 2011)	73
Figuur 50: De Berge Istra. (Letkens, 2011)	77
Figuur 51: De boeg van de Nakhodka tijdens bergingswerken. (Maritime Cyprus, 2015)	78
Figuur 52: De scheur in het dek van de Castor. (Intertanko, 2002)	79
Figuur 53: Vlokelementen beschermen het substraat. (ABS, 2007)	83
Figuur 54: Verven die thermostatisch harden (fysische droging) en verven die thermoplastisch harden (chemische curing). (Hempel, 2013)	87
Figuur 55: Covalente bindingen en ionbindingen. (Eliasson, 2017)	88
Figuur 56: Door de tanker wit te verven zal de temperatuur van het verfsysteem minder snel tot boven de glastransitietemperatuur stijgen. (Devanney, 2006)	93
Figuur 57: Temperatuursveranderingen van de dekbeplating. (Yasunaga et al., 2003)	93
Figuur 58: De corrosiecel (Gordonengland, s.d.)	95
Figuur 59: Kathodische delaminatie en anodische blaasvorming als gevolg van de beschadiging van een epoxy coating. (Nguyen, 1996).	96
Figuur 60: Kathodische delaminatie. (Park, 2003)	97
Figuur 61: Blaasvorming door osmose. (ABS, 2007)	99
Figuur 62: Blaasvorming door elektro -osmose. (ABS, 2007)	99
Figuur 63: Krachten die delaminatie kunnen veroorzaken. (Eliasson, 2017)	101
Figuur 64: Een verfsysteem dat onthecht/ delamineert. (Hempel, 2013)	101
Figuur 65: Aftakelen door roestvorming onder de verflaag. (ABS, 2007)	102
Figuur 66: Een voorschilderlaag (<i>stripe coating</i>). (ABS, 2007)	103
Figuur 67: Afbrokkelen van een verfsysteem aan een scherpe rand. (Amtec, 2015)	104
Figuur 68: Corrosie aan een lasnaad. (Munger, 1999)	104
Figuur 69: Oorzaak van het verfdefect. (Kattan, Brodderick, 2010)	107
Figuur 70: De prestaties van het verfsysteem en de structurele efficiëntie in functie van de complexiteit van de constructie. (Broderick, 2015)	110
Figuur 71: De invloed van een goede of minder goede applicatie van een verfsysteem tijdens de verschillende levensfasen van een schip. (Broderick, Kattan, Wright, 2005)	111

Figuur 72: Voorwaarden voor een betrouwbaar verfsysteem. (Broderick, Kattan, Wright, 2005)	112
Figuur 73: Een chaotisch verfproject. (Jansen, s.d.).....	115
Figuur 74: Het resultaat van een chaotisch verfproject. (Jansen, s.d.)	116
Figuur 75: Locatie van het verfsysteem. (IMO, 2016).....	123
Figuur 76: Corrosie onder de aanzuiging. (TSCF, 2014).....	128
Figuur 77: Een arbeider die bezig is met stralen. (kblasting, 2016)	131
Figuur 78: Mengeling van shot -en gritdeeltjes. (Wei et al., 2011).....	132
Figuur 79: Een afzonderlijk blok voordat het aan de andere blokken wordt gelast. (Central Industy Group, 2016)	137
Figuur 80: Een schuurborstel en een bewerkte lasnaad tussen twee scheepsblokken. (De Baere, 2017)	140
Figuur 81: De toekomstige lasnaden van een scheepsblok voor het inpakken met tape. (Wei et al., 2011)	142
Figuur 82: De toekomstige lasnaden beschermd met tape. (Wei et al., 2011)	142
Figuur 83: Het afronden van de scherpe randen. (Wei et al., 2011)	143
Figuur 84: Het aanbrengen van een grijze voorschilderlaag. (Wei et al., 2011)	144
Figuur 85: Een verfspuit. (De Baere, 2017)	147
Figuur 86: Een open film. (Jansens, s.d.)	147
Figuur 87: De opleiding van de applicateurs wordt over het hoofd gezien. (TSCF, 2014)	148
Figuur 88: Het opleiden van de applicateurs. (Jansen, 2012).....	150
Figuur 89: Een gasdichte kamer in werking. (Eigen werk, 2017).....	159
Figuur 90: Een klimaatkast.	161
Figuur 91: Een staaltje tijdens de onderdompelingstest.	161
Figuur 92: Een verfsysteem dat faalt door een gebrek aan flexibiliteit. (TSCF, 2014).)	165
Figuur 93: Een verfsysteem dat faalt door een gebrek aan flexibiliteit. (TSCF, 2014)	166
Figuur 94: Het verfsysteem op de bodem van de ladingtanks is in een uitstekende staat. (Schip A, 2011)	174

Lijst met tabellen

Tabel 1: De samenstelling van ruwe aardolie per element. (Helmenstine, 2007)	4
Tabel 2: De samenstelling van ruwe aardolie per fractie. (Helmenstine, 2007)	4
Tabel 3: De spontaniteit van elektrochemische reacties. (De Baere, 2011)	25
Tabel 4: De samenstelling van de tankatmosfeer. (Yasunaga et al, 2013)	51
Tabel 5: Samenstelling van slib op de bodem van een gegeven ladingtank. (Kashima et al. 2007)	64
Tabel 6: Samenstelling vaste stoffen in massaprocent. (Kashima et al., 2007)	65
Tabel 7: Sectiemoduli in m ³ . (Devanney, 2006)	67
Tabel 8: Structureel falen. (CTX, 2006)	75
Tabel 9: Doorlaatbaarheid van een verlaag van 100 µm dik. (Funke, 1975)	81
Tabel 10: Goed, redelijk en slecht. (Wei et al., 2011)	117
Tabel 11: Beoordelen van de hoeveelheid corrosie. (IACS, 2015)	118
Tabel 12: Surveys. (IACS, 2015)	119
Tabel 13: PSPC-COT voor en tijdens de bouw van het schip. (Wei et al., 2011) ...	126
Tabel 14: Overzicht van de roestgraden van staal. (CIN, 2011)	130
Tabel 15: Een overzicht van standaarden van oppervlaktevoorbereiding. (Amtec, 2016)	132
Tabel 16: Straalnormen gebruikt door ISO 8501-1. (De Baere, 2008)	133
Tabel 17: Klassen van stof volgens ISO 8502-3 (Gardner, 2016)	138
Tabel 18: Beoordeling van de kwantiteit stof. (Corrosionist, 2016)	139
Tabel 19: St-normen. (Zandleven coatings, 2016)	140
Tabel 20: Een lasnaad die twee scheepsblokken met elkaar verbindt en werd bewerkt met mechanisch gereedschap. (TSCF, 2014.)	141
Tabel 21: Een vergelijking tussen PSPC en TSCF. (Aerts, 2012)	155
Tabel 22: De samenstelling van het testgas. (IMO, 2010)	159
Tabel 23: Het verfsysteem van schip B.	175
Tabel 24: Schip C.	176
Tabel 25: Schip E.	177
Tabel 26: Schip F.	177
Tabel 27: Schip H.	180

Glossarium

- **Aeroob:** Met lucht of zuurstof.
- **Anaeroob:** Zonder lucht of vrije zuurstof.
- **API:** American Petroleum Institute.
- **Anode:** Elektrode waar de oxidatiereactie plaatsgrijpt.
- **ASTM:** *American Society for Testing and Materials.*
- **Bacterie:** Prokaryotisch micro-organisme dat door een membraan ingesloten is.
- **Corrosie:** Het aantasten van een metaal waarbij de kwaliteit van dat metaal afneemt.
- **Corrosiesnelheid:** De snelheid waarmee de corrosiereactie optreedt op een metaaloppervlak.
- **Crude oil washing:** Het wassen van een ladingtank van ruwe aardolie met de lading zelf.
- **CTF:** *Coating Technical File.*
- **Dauwpunt:** De temperatuur waarbij bij een gelijkblijvende dampdruk condensatie optreedt.
- **DIN:** *Deutsches Institut für Normung* oftewel Duits Instituut voor Standarisatie.
- **Elektrode:** Metaal dat in contact staat met een elektrolyt langs waar elektrische ladingen het metaaloppervlak in of -uitgaan in een elektrochemische cel.
- **Elektron:** Een negatief geladen elektrisch deeltje.
- **Evenwichtsconstante:** De constante die weergeeft hoe het evenwicht in een chemische reactie gesitueerd ligt en in welke richting de reactie verloopt.
- **FPSO:** Floating Production, Storage and Offloading vessel. Dit is een vaartuig dat wordt gebruikt om aardolie en aardgas te produceren, te behandelen en op te slaan in afwachting van verder transport.
- **Gibbs vrije energie.** Dit is de energie, geassocieerd met een chemische reactie, die kan worden gebruikt om arbeid te verrichten.
- **HIC:** *Hydrogen Induced Cracking.*
- **Hogging:** Het buigen van de romp van het schip waarbij de stevens naar beneden buigen.
- **HSEQ:** Health, Safety, Environment en Quality. Dit betekent gezondheid, veiligheid, milieu en kwaliteit.
- **Uniforme corrosie:** Corrosie die gelijk is over het corroderende oppervlak.

- **IMO:** Internationale Maritieme Organisatie.
- **Inert gas:** Gas dat niet explosief of brandbaar is en dat in ladingtanks geïnjecteerd wordt om de atmosfeer van de ladingtank explosievrij te maken.
- **Ion:** Een elektrisch geladen atoom of molecule.
- **ISM:** International Safety Management.
- **JSTRA:** *Japan Ship Technology Research Association* oftewel de Japanse organisatie voor onderzoek naar scheepstechnologie.
- **Kathode:** De elektrode van de elektrochemische cel waar de reductiereactie plaatsvindt.
- **Kation:** Een positief geladen ion.
- **MARPOL:** Internationaal verdrag ter voorkoming van verontreiniging van schepen.
- **Massadichtheid:** De maat voor hoeveel massa een bepaalde stof bevat per gegeven volume.
- **Microbiële corrosie:** Corrosie die wordt veroorzaakt of versneld door micro-organismen.
- **Microob:** Micro-organismen die onzichtbaar zijn met het blote oog.
- **MS:** *Mild Steel*. Dit is het staal dat het meest wordt gebruikt voor de constructie van een tanker.
- **OPA:** Oil Pollution Act.
- **Oxidatie:** Een reactie die gepaard gaat met een verlies aan elektronen.
- **Passivatie:** Het vormen van een beschermende oxidelaag op het metaaloppervlak waardoor de corrosiesnelheid daalt.
- **PSPC:** Performance Standard for Protective Coatings.
- **Pyrolyse:** Het proces waarbij een organische stof wordt ontleed door deze te verhitten tot hoge temperaturen.
- **Potentiaal:** De neiging van een materiaal om elektronen op te nemen, uitgedrukt in Volt.
- **Redoxpotentiaal:** Potentiaalverschil dat bij een redoxreactie ontstaat tussen het reductiemiddel, de elektronendonor en het oxidatiemiddel.
- **Reductie:** Een reactie die gepaard gaat met een winst aan elektronen.
- **SIS:** *Swedish Standards Institute*

- **Sagging:** Het buigen van de romp van het schip waarbij de stevens van het schip naar boven buigen.
- **SOLAS:** “*The International Convention for the Safety of Life At Sea*” oftewel het ‘Internationale Verdrag voor de beveiliging voor mensenlevens op zee’. Dit belangrijk verdrag beschrijft aan welke eisen zeegaande schepen moeten voldoen op het gebied van constructie, uitrusting en bemanning, afhankelijk van het vaargebied.
- **SSPC:** *Steel Structures Painting Council*.
- **SSC:** *Sulfide Stress Cracking*.
- **Standaard evenwichtspotentiaal:** De evenwichtspotentiaal bij een temperatuur van 25 °C en een concentratie van 1 mol/liter.
- **Sulfaat reducerende bacteriën:** Micro-organismen die de koolstof uit de organische componenten gebruiken. Tijdens hun metabolisme reduceren ze sulfaten tot sulfiden of waterstofsulfiden.
- **Sweepblasting:** Een oppervlaktebehandeling waarbij er snel een straal met shot of grit over het oppervlak wordt gespoten. Dit is een manier om oppervlakteruwheid te bekomen op een al bestaande verflaag zonder deze te vernietigen. Zo zal de volgende verflaag beter hechten.
- **Thermodynamica:** De studie van de staat van energie in materialen.
- **TSCF:** *Tanker Structure Cooperative Forum*.
- **TMPC:** *Thermo-Mechanically Controlled Processed steel*.
- **ULCC:** ULCC staat voor Ultra Large Crude Carrier. Dit is een benaming voor gigantische tankers die een draagvermogen hebben dat groter is dan 300 000 ton.
- **VLCC:** Very Large Crude Carrier. Dit is een benaming voor enorme olietankers met een laadvermogen van 200 000 tot 300 000 ton.
- **Walshuid:** Een harde laag ijzeroxide (Fe_2O_3) die ontstaat bij het warm walsen van staal.

Inleiding

In de media worden we geregeld geconfronteerd met scheepsrampen en maritieme ongevallen waaronder aanvaringen, brand en aan de grond lopen. Men zou haast de indruk krijgen dat deze de belangrijkste oorzaken zijn van het levenseinde van het schip. Echter, de belangrijkste oorzaak van het degraderen van schepen is een stille doder: corrosie. Zo brak de olietanker 'Nakhodka' in twee voor de Japanse kust, waarbij zo'n duizend kilometer van de Japanse kust vervuild raakte door 10 000 ton ruwe aardolie. Achteraf bleek dat de dikte van de dekbeplating met 40 % was afgenomen door extreme corrosie. Daarom is een grondig begrip van de corrosieproblematiek aan boord van schepen van kapitaal belang, zodat scheepvaart veiliger en schoner wordt.

Deze thesis is een literatuurstudie die probeert te verklaren waarom het nodig is om een verfsysteem te verplichten in ladingtanks van olietankers. Verder wordt in de thesis aangetoond waarom het nodig is een uniforme standaard te hanteren voor dit verplichte verfsysteem. Ten slotte probeert de scriptie een toekomstbeeld te schetsen door te voorspellen of een dergelijk verfsysteem de ladingtank effectief zal beschermen door minstens 15 jaar in een 'goede' staat te blijven. Merk op dat er verschillende methodes bestaan om een ladingtank te beschermen tegen corrosie. Echter, dit werk zal focussen op het gebruik van een verfsysteem.

Deze scriptie is opgebouwd uit hoofdstukken die elk bijdragen tot een beter begrip van deze problematiek. Door de inzichten van elk hoofdstuk te combineren kunnen de onderzoeksvragen worden opgelost.

Eerst wordt de corrosie in ladingtanks besproken. Wat is de aard van de lading en de invloed ervan op corrosie? Welke corrosiegerelateerde fenomenen doen zich voor in de ladingtank? Hoe wordt corrosie veroorzaakt? Hoe wordt de corrosieproblematiek in ladingtanks van olietankers verergerd?

Vervolgens komen de negatieve gevolgen van corrosie in ladingtanks aan de beurt. Ook wordt verklaard waarom het nodig is om het verfproject te reglementeren, in plaats van de reders en werven vrij te laten kiezen. Daarna wordt IMO PSPC-COT besproken, en hoe deze reglementering kan bijdragen tot het voorkomen van

corrosie in ladingtanks van olietankers. Nadien worden ook mogelijke verbeteringen aan deze reglementering voorgesteld.

Ten slotte wordt er geprobeerd aan te tonen of een verfsysteem dat aangebracht is volgens IMO PSPC-COT het potentieel heeft om 15 jaar lang in een goede staat te blijven. Uiteindelijk volgt de conclusie. Hierbij worden de inzichten en informatie van elk hoofdstuk gecombineerd om zo antwoord te bieden op de onderzoeksvraag van deze scriptie

Dit proefschrift is nuttig omwille van het feit dat:

- Er een overzicht wordt gegeven van de corrosieproblematiek in ladingtanks van olietankers en PSPC-COT. De thesis combineert namelijk syntheses van verschillende belangrijke bronnen en de inzichten van verschillende gerespecteerde auteurs.
- De thesis zoekt naar maatregelen die IMO PSPC-COT beter kunnen maken.
- De thesis onderzoekt of PSPC-COT nuttig is.

Daardoor kan deze scriptie een bijdrage leveren aan het verhogen van de veiligheid aan boord van olietankers en aan het voorkomen van pollutie.

1 Ruwe aardolie

Om corrosie in ladingtanks van olietankers te begrijpen is het nodig om de eigenschappen van ruwe aardolie te kennen. Dit hoofdstuk zal de samenstelling, de fysische en de chemische eigenschappen van aardolie bespreken. Indien mogelijk zal het verband gelegd worden tussen de eigenschappen en de corrosie in de ladingtanks.

1.1 Algemeen

Ruwe aardolie is een geel-zwarte vloeistof die op bepaalde plaatsen in de geologische bodemlagen wordt teruggevonden. Een moderne maatschappij zonder ruwe aardolie is zo goed als ondenkbaar. Dit komt omdat ruwe aardolie van een groot aantal producten de belangrijkste grondstof is. Veel fossiele brandstoffen, waaronder benzine, kerosine en diesel, worden aan deze grondstof onttrokken. Ook geneesmiddelen, plastics, cosmetica en nog vele andere producten gebruiken aardolie als belangrijkste grondstof. Ruwe aardolie wordt gevormd uit de resten van gefossiliseerd organisch materiaal (dode planten, dieren, ..). Wanneer dit materiaal gedurende lange tijd onderhevig is aan grote drukken en aan hoge temperaturen in een anaeroob milieu, vormt zich een wasachtig materiaal. Dit wasachtig materiaal noemen we kerogen en het proces dat organisch materiaal omvormt tot kerogen noemen we catagenese. Vervolgens ondergaat dit materiaal onder invloed van de hitte pyrolyse¹. Door een reeks hoofdzakelijk endotherme reacties wordt het wasachtige materiaal omgevormd tot ruwe aardolie. Ruwe aardolie bestaat grotendeels uit koolstof en waterstof met sporen van vanadium, nikkel en andere elementen. Deze waterstof- en koolstofmoleculen kunnen zich met elkaar combineren tot een zeer groot aantal verschillende soorten moleculen. Er bestaan verschillende soorten ruwe aardolie omdat de samenstelling afhankelijk is van de leeftijd, diepte, bron en geografische locatie van de ruwe aardolie. (Margot, Olliver, 2005)

¹Pyrolyse is het proces waarbij een organische stof wordt ontleed door deze te verhitten tot hoge temperaturen. (Margot, Olliver, 2005)



Figuur 1: Verschillende soorten ruwe aardolie. (Nehal, 2013)

1.2 Samenstelling

Er bestaan veel verschillende varianten ruwe aardolie. De onderstaande tabellen tonen de samenstelling van ruwe aardolie per element en per fractie. De grafiek toont de viscositeit en het zwavelgehalte van verschillende soorten ruwe aardolie.

Tabel 1: De samenstelling van ruwe aardolie per element. (Helmenstine, 2007)

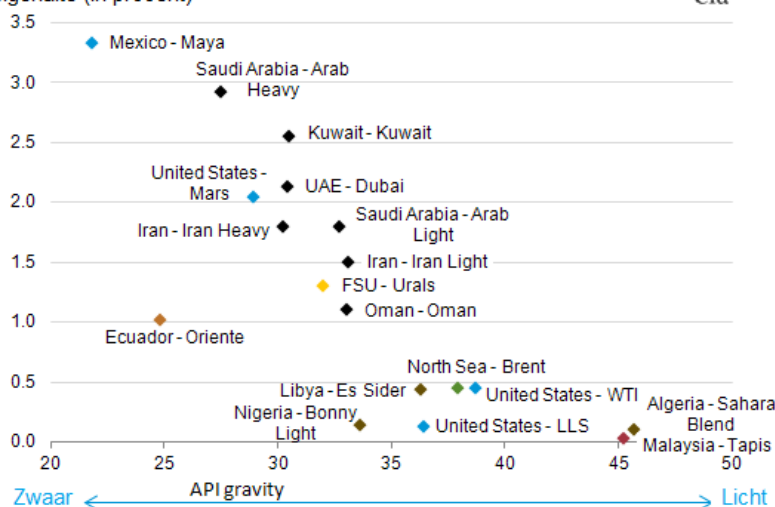
Samenstelling ruwe aardolie volgens element	
koolstof	83% tot 87 %
waterstof	10% tot 14%
zuurstof	0,1% tot 2%
zwavel	0,05% tot 7%
zwavel	0,05% tot 6%
metalen	<0,1%

Tabel 2: De samenstelling van ruwe aardolie per fractie. (Helmenstine, 2007)

Samenstelling ruwe aardolie per fractie	
alkanen	15% tot 60%
alkenen	30% tot 60%
aromaten	3% tot 30%
bitumen	Residu 1% tot 20%

Dichtheid en zwavelgehalte van ruwe aardolie

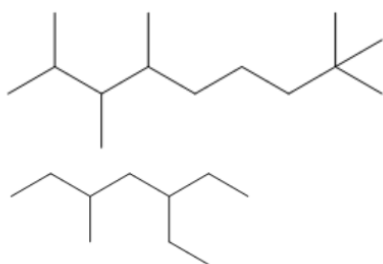
Zwavelgehalte (in procent)



Figuur 2: De dichtheid en het zwavelgehalte van verschillende soorten ruwe aardolie. Een hoog zwavelgehalte zal bijdragen tot versnelde corrosie in ladingtaks van olietankers. (U.S Energy Information Administration, 2015)

1.2.1 Alkanen

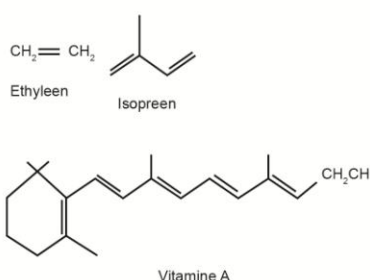
Alkanen zijn verzadigde koolwaterstoffen met de formule C_nH_{2n+2} . Als n kleiner is dan 5 treffen we bij een normale druk en kamertemperatuur het alkaan in gasvormige toestand aan. Voor waarden tussen $n = 5$ en $n = 15$ treffen we het alkaan aan in vloeibare toestand en voor waarden groter dan 15 treffen we het aan in vaste toestand of in vloeibare toestand met een hoge viscositeit. (Selly, 2005) Bij alkanen treffen we isomeren aan. Dit zijn moleculen met dezelfde samenstelling maar met een verschillende moleculaire structuur. Zo komt C_7H_{16} voor als heptaan of als 2-methylhexaan. (SPE, 2015)



Figuur 3: De alkanen 2,2,6,7,8-pentamethylnonane en 3-ethyl-5-methylheptaan. (Potters, 2016)

1.2.2 Alkenen

Alkenen zijn de tweede groep koolwaterstoffen die worden aangetroffen in ruwe aardolie. Deze groep heeft als molecuulformule C_nH_{2n} . Dit betekent dat er voor elk atoom koolstof, er twee atomen waterstof aanwezig zijn. Een alkeen bevat twee atomen waterstof minder dan een alkaan, omdat alkenen een dubbele binding hebben. Door deze dubbele binding tussen twee koolstofatomen, kunnen er zich op de desbetreffende koolstofatomen slechts drie andere atomen met een enkele binding hechten, waardoor er twee plaatsen minder vrij zijn voor waterstofatomen. (Davis, 2000)



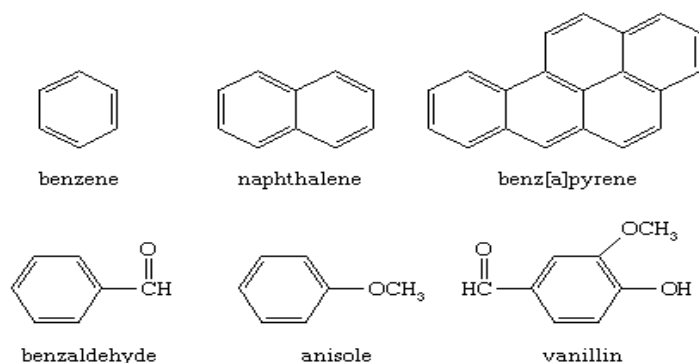
Figuur 4: Alkenen. (De Baere, 2016)

1.2.3 Aromatische koolwaterstoffen:

Aromatische koolwaterstoffen vormen de derde grootste groep van koolwaterstoffen die worden aangetroffen in ruwe aardolie. Hun moleculaire structuur bestaat uit één of meerdere ringen die bestaan uit zes koolstofatomen. Deze ringstructuren kennen afwisselend een dubbele en een enkele binding. De structuur van een aromaat is $C_6H_5 - Y$ waarbij Y een langere, rechte molecule voorstelt die verbonden is met de benzeenring (Margot, Olliver, 2005)

Aromatische koolwaterstoffen zijn normaal vloeibaar op kamertemperatuur en vertegenwoordigen ongeveer 10 procent van het gewicht van ruwe aardolie. Dit percentage kan oplopen tot 30 procent naarmate de API² dichtheid afneemt. Aromaten zijn niet gewenst in ruwe aardolie, omdat de aanwezigheid ervan de roetvorming verhoogt tijdens ontbranding. (De Baere, 2015)

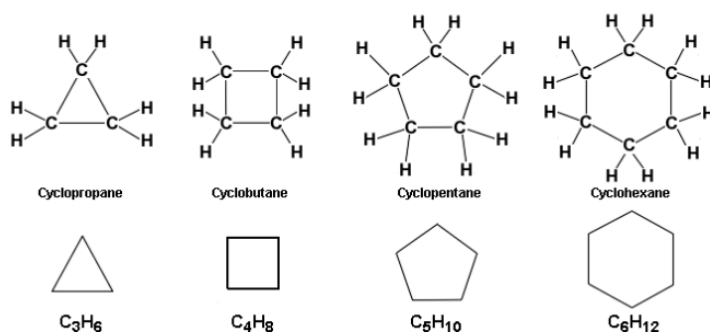
²API dichtheid is een eenheid die door het *American Petroleum Institute* ingevoerd werd om de massadichtheid van ruwe aardolie uit te drukken. API wordt berekend volgens de formule $API = \frac{141.5}{\rho_{relatief}} - 131.5$ (ICCT, 2011)



Figuur 5: Aromaten (Potters, 2016)

1.2.4 Cycloalkanen

Cycloalkanen zijn alkanen waarin minstens één gesloten keten of ring aanwezig is. De brutoformule van cycloalkanen is C_nH_{2n} . In tegenstelling tot aromatische koolwaterstoffen, bevatten de ringstructuren geen dubbele bindingen. Meestal zijn cycloalkanen vloeibaar op kamertemperatuur. (De Baere, 2016) Ten opzichte van alkanen hebben cycloalkanen hogere kookpunten, hogere smeltpunten en hogere massadichtheden. Dit komt omdat de ringstructuur een groter contactoppervlak veroorzaakt, waardoor de van der Waals krachten³ groter zijn. (McNaught, Wilkinson, 1997)



Figuur 6: Cycloalkanen. (Potters, 2016)

³ Dit zijn zwakke tot zeer zwakke elektromagnetische krachten tussen de atomen van edelgassen of tussen moleculen. (McNaught, Wilkinson, 1997)

1.2.5 Alkynen

Alkynen zijn onverzadigde koolwaterstoffen die minstens 2 koolstofatomen bevatten met een dubbele binding. Daardoor kan een alkyn 2 waterstofatomen minder dragen en wordt de structuurformule C_nH_{2n-2} . Op kamertemperatuur zijn alkynen meestal vloeibaar of gasvormig. (De Baere, 2016)

1.2.6 Heterocomponenten

Ruwe aardolie bevat behalve waterstof en koolstof nog andere componenten. Hierbij spreken we over zuurstof, stikstof, zwavel en enkele zeldzame metalen zoals nikkel en vanadium. Het percentage zuurstof varieert tussen de 0.06 en de 0.40 massaprocent. Deze zuurstof zit voornamelijk gevangen in moleculen zoals zuren, esters, ketonen, fenol en alcoholen. Bovendien komt er ook zuurstof terecht in de ladingtank via lekkende pompafsluitingen, gietijzerstukken, ventilatieopeningen en open luiken. (OCIMF, 1997)

Zuren komen vooral voor in jonge, ruwe aardolie en kunnen de corrosie in de ladingtank aanzienlijk versnellen. Deze zuren manifesteren zich als vetzuren, isoprenoïden, nafteen- en carboxylzuren. Ook treffen we stikstof aan in petroleum. Het percentage van stikstof varieert tussen de 0.01 en de 0.09 procent. De zwavelconcentratie van aardolie bedraagt 0.10 tot 7 procent van het totale gewicht van ruwe aardolie. Dit percentage omvat enkel de zwavelhoudende koolwaterstoffen en houdt dus geen rekening met het H_2S -gas en pure zwavel. De aanwezigheid van H_2S en pure zwavel versnelt de corrosie in de ladingtanks⁴. (Selly, 1998)

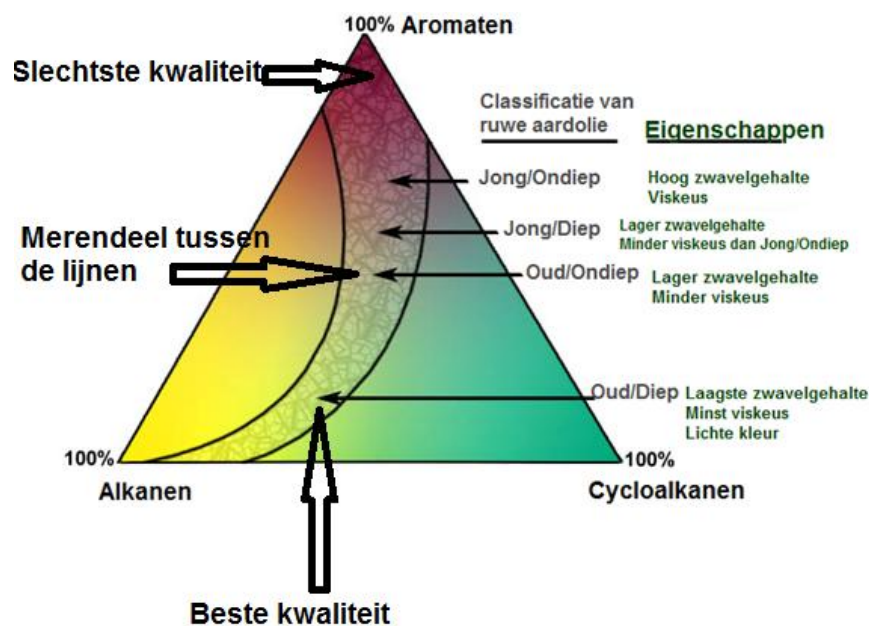
Volgens het zwavelgehalte kunnen we ruwe aardolie indelen in zwavelarme ruwe aardolie en zwavelrijke ruwe aardolie. Zwavelarme ruwe aardolie bevat minder dan 0.5 % zwavel. Zwavelrijke aardolie bevat meer dan 0.5 % zwavel.

Door het hoge zwavelgehalte is zwavelrijke ruwe aardolie corrosiever. Bovendien bevat zwavelrijke ruwe aardolie meer CO_2 , dat de corrosie in een ladingtank nog meer zal versnellen. (Selly, 1998)

⁴ Dit wordt later uitgelegd.

1.2.7 Diagram

De onderstaande afbeelding toont een schema waarmee het onderscheid kan worden gemaakt tussen verschillende soorten ruwe aardolie. In elke hoek staat één van de drie belangrijkste stofklassen. Zo zal ruwe aardolie die zeer dicht staat bij 'Aromaten' veel aromaten, minder alkanen en minder cycloalkanen bevatten. Ruwe aardolie die een hoog percentage aan aromaten bevat is van een slechte kwaliteit, terwijl ruwe aardolie die weinig aromaten bevat van een goede kwaliteit is. Bovenin bevinden zich vooral jonge varianten aardolie die uit ondiepe bronnen gewonnen zijn. Deze zullen viskeus zijn en een hoog zwavelgehalte hebben. (Nehal, 2013) Iets lager staan vooral veel jonge variëteiten die uit diepe bronnen gewonnen zijn. Deze zullen minder zwavel bevatten en minder viskeus zijn dan aardolie uit jonge, ondiepe bronnen. In oude, ondiepe bronnen bevindt zich meestal minder viskeuze aardolie die minder zwavel bevat. Helemaal onderaan de piramide bevindt zich ruwe aardolie uit oude, diepe bronnen. Deze aardolie bevat weinig zwavel en is het minst viskeus. Daarom is deze olie van de beste kwaliteit. (De Baere, 2015)



Figuur 7: Een diagram dat gebruikt kan worden om verschillende soorten ruwe aardolie te categoriseren. (Nehal, 2013)

Ten slotte staan er in het diagram twee kromme lijnen. Dit dient om aan te duiden dat de meeste soorten ruwe aardolie zich in een gebied bevinden, tussen deze twee lijnen. (Nehal, 2013)

1.3 Fysische eigenschappen

1.3.1 Temperatuur

Wanneer ruwe aardolie wordt gewonnen, hangt de temperatuur van de aardolie af van de diepte van het reservoir. Hoe dieper het reservoir, hoe hoger de temperatuur. Op vrij lage diepte varieert de temperatuur van ruwe aardolie tussen 60°C en 80°C. Op grotere dieptes fluctueert de temperatuur tussen 80°C tot 175°C. Ruwe aardolie wordt steeds minder gemakkelijk beschikbaar. Hierdoor boort men op steeds grotere dieptes naar steeds warmere aardolie. Vermits de gemiddelde temperatuur van de gewonnen olie stijgt, zal de transporttemperatuur ook stijgen. Doordat de getransporteerde ruwe aardolie warmer is, neemt ook de corrosie in de ladingtanks toe.⁵ (Selly, 2014) Zo zal een temperatuurstijging van 10°C leiden tot een verdubbeling van de corrosiesnelheid. (OCIMF, 1997)

1.3.2 Densiteit

De densiteit van aardolie wordt uitgedrukt in graden API. Deze eenheid werd geïntroduceerd door het *American Petroleum Institute*. Hierbij is API gelijk aan 141.5 gedeeld door de specifieke densiteit⁶ (ten opzichte van water) bij een temperatuur van 60 graden Fahrenheit, min 131.5. (ICCT, 2011)

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{\rho_{relatief}} - 131.5$$

De *API gravity* geeft ook een idee van de densiteit van de ruwe aardolie ten opzichte van water. Als de *API gravity* van de ruwe aardolie gelijk is aan 10, heeft deze dezelfde densiteit als water. De densiteit van olie is meestal lager dan de densiteit van water. Bijgevolg zal aardolie drijven op het water. In een ladingtank betekent dit dat het aanwezige water zich aan de onderste 0,5 - 1 meter van de tank zal verzamelen. Door de aanwezigheid van water, zal het water optreden als elektrolyt, en kunnen corrosiecellen tot stand gebracht worden. (Jansen, pers. comm. , 2017)

⁵ Dit wordt later in de thesis uitgelegd.

⁶ De specifieke densiteit van een stof ten opzichte van water is de verhouding van de massadichtheid (of densiteit) van deze stof ten opzichte van de densiteit van water bij een gegeven temperatuur.

$\rho_{relatief} = \frac{\rho_{stof 60^{\circ}F}}{\rho_{water 60^{\circ}F}}$

De *API gravity* is omgekeerd evenredig aan de densiteit. Dit betekent dat lichte ruwe aardolievarianten een hoge *API gravity* hebben, en zware varianten een lage *API*. .

Op deze manier kunnen we ruwe aardolie indelen in vier groepen: (ICCT, 2011)

- Lichte ruwe aardolie die een densiteit heeft die hoger is dan 31.1 graden API.
- Medium ruwe aardolie die een densiteit heeft, die hoger is dan 23.3 graden API, en lager dan 31.1 graden API.
- Zware ruwe aardolie die een densiteit heeft die lager is dan 22.3 graden. API.
- Uitzonderlijk zware ruwe aardolie met een API dichtheid lager dan 10 graden

Ruwe aardolie met een lage API neigt agressievere corrosie te veroorzaken dan aardolie met een hogere API. Lichte ruwe aardolie kunnen we aantreffen in het Forties Field dat in de Noordzee ligt of in de Nigerdelta. Medium, ruwe aardolie kan gevonden worden in Irak (Basrah medium) of in het Orinocobasin van Venezuela. Zware ruwe aardolie kunnen we aantreffen in Menemota (Venezuela), Indonesië (Sumatra heavy crude) en Frade Block (Brazilië). (Jones, 2010)

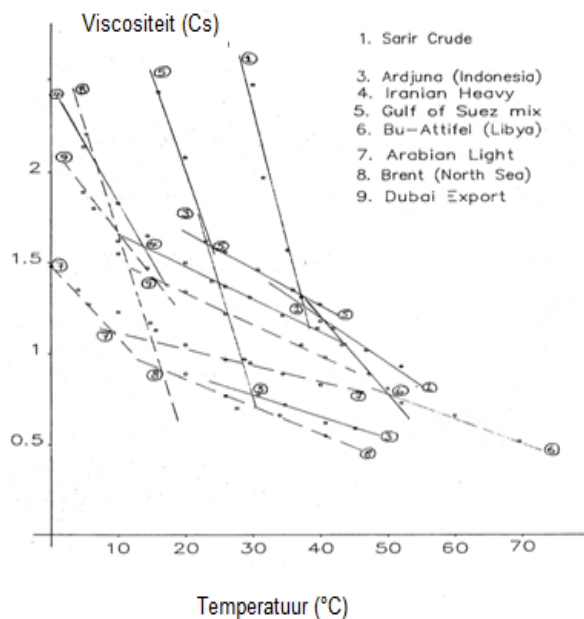
De densiteit van ruwe aardolie is groter dan de densiteit van water. Bijgevolg zal aardolie drijven op het water. In een ladingtank betekent dit dat het aanwezige water zich aan de onderste 0,5 - 1 meter zal verzamelen. Door de aanwezigheid van water, zal het water optreden als elektrolyt, en kunnen corrosiecellen tot stand gebracht worden. (Jansen, pers. comm. , 2017)

De viscositeit of stroperigheid is de grootte die uitdrukt hoeveel weerstand een vloeistof biedt tegen stromen. De dynamische viscositeit η wordt uitgedrukt in $Pa \cdot s$ (pascal maal seconde). De kinematische viscositeit is gelijk aan de dynamische viscositeit gedeeld door de dichtheid van de vloeistof en kan berekend worden met de formule $\nu = \frac{\eta}{\rho}$. Waarbij ν de kinematische viscositeit is, η de dynamische viscositeit en ρ de dichtheid van de vloeistof in $\frac{kg}{m^3}$. De eenheid van de kinematische viscositeit is m^2/s . De kinematische viscositeit van ruwe aardolie varieert van 1.4 tot 19.4 m^2/s . Ter vergelijking: de viscositeit van water bedraagt 1 m^2/s bij een temperatuur van 20°C. De viscositeit hangt af van de temperatuur, diepte en leeftijd van het oorspronkelijke reservoir. Bij een te hoge viscositeit wordt de ruwe aardolie moeilijker te verpompen. Om deze reden wordt viskeuze ruwe aardolie (bijvoorbeeld

Venezolaanse ruwe aardolie) vaak gemengd met geraffineerd materiaal om deze makkelijker te kunnen verpompen. Viskeuze ruwe aardolie bevat vaak een hoger percentage H_2S , wat bijdraagt bij versnelde corrosie in ladingtanks van ruwe aardolie. (Jones, 2010)

1.3.3 Het troebelpunt

Het troebelpunt van aardolie is de temperatuur waarop de alkanen in de aardolie beginnen te kristalliseren. Dit punt is bepalend voor de transporttemperatuur van de aardolie. Deze moet boven de temperatuur van het troebelpunt liggen zodat de ruwe aardolie vloeibaar blijft. Ruwe aardolie met een hoog troebelpunt zal bijgevolg op een hogere temperatuur moeten getransporteerd worden⁷ en een hogere temperatuur leidt nu net tot versnelde corrosie. (Selly, 2014) De onderstaande grafiek toont de viscositeit in functie van de temperatuur voor verschillende varianten ruwe aardolie. Het troebelpunt ligt op de knik van de lijn van elke soort ruwe aardolie. Vanaf deze knik wordt de aardolie veel sneller viskeus bij een dalende temperatuur door het stollen van de wassen. (De Baere, s.d.)



Figuur 8: De viscositeit in functie van de temperatuur en situering van het troebelpunt. (De Baere, s.d.)

⁷ Om de aardolie te verwarmen kan men onder andere gebruik maken van verwarmingsspiralen die met stoom verwarmd worden.

1.3.4 Het vloeipunt

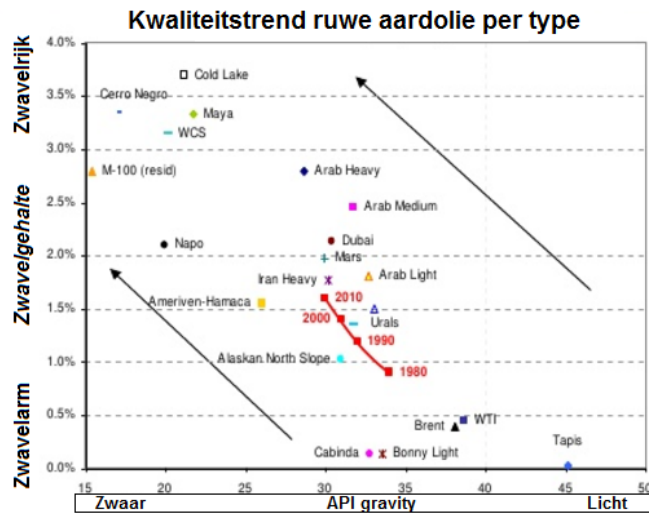
Het vloeipunt van ruwe aardolie is de temperatuur waarop de viscositeit van de ruwe aardolie zodanig hoog is dat deze niet meer kan verpompt worden. De vervoerstemperatuur van de ruwe aardolie moet minimaal 10°C boven het vloeipunt liggen. Hoe hoger het vloeipunt, hoe hoger de transporttemperatuur van de ruwe aardolie zal zijn en hoe meer corrosie zal worden versneld. (Selly, 2014)

1.4 Kwaliteit

Naarmate de wereldwijde olieconsumptie steeg, raakten de grootste en meest toegankelijke reservoirs uitgeput. Bijgevolg worden er steeds vaker minder toegankelijke bronnen aangeboord. Bovendien worden steeds viskeuzere, zoniet teervormige variëteiten van aardolie benut. Daardoor vertoont de gemiddelde kwaliteit van de getransporteerde ruwe aardolie globaal een dalende trend. (ScienceNews, 2007) Terwijl de meerderheid van de oliereserves een laag tot gemiddeld zwavelgehalte hebben, vertonen de *API gravity* en het zwavelgehalte een stijgende trend. (Valero energy corporation, 2007) Door de toename van het zwavelgehalte zal de zuurcorrosie in de ladingtanks van olietankers sneller verlopen⁸. Door de toenemende viscositeit zal het nodig zijn om de ruwe aardolie op een hogere temperatuur te vervoeren, waardoor de corrosie nog meer zal worden versneld⁹. (De Baere, pers.comm., 2015) De onderstaande afbeeldingen tonen respectievelijk de dalende gemiddelde kwaliteit van ruwe aardolie, de dalende *APIgravity* en het stijgende zwavelgehalte van aardolie die in Amerikaanse raffinaderijen wordt verwerkt.

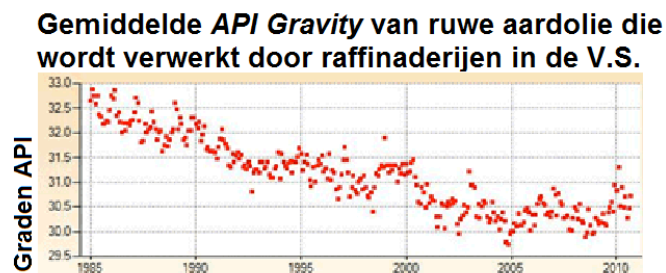
⁸ Dit wordt later uitgelegd.

⁹ Dit wordt later uitgelegd.



Bron: *Industry Reports*
 NOTA: de gemiddelde kwaliteit van de ruwe aardolie wordt voorgesteld door de rode lijn.

Figuur 9: De dalende kwaliteit van ruwe aardolie. (Valero energy corporation, 2007)



Figuur 10: De API gravity van ruwe aardolie die door raffinaderijen in de V.S. wordt verwerkt. (ScienceNews, 2007)



Figuur 11: Het gemiddeld zwavelgehalte van aardolie die door raffinaderijen in de V.S wordt verwerkt. (ScienceNews, 2007)

2 Elektrochemie en corrosie

2.1 De redoxreactie

De chemie kent verschillende soorten reacties. Eén van deze reacties is de redoxreactie. Dit is een reactie waarbij elektronen worden uitgewisseld. We behandelen dit soort van reacties omdat corrosie ook een redoxreactie is.

Bij redoxreacties is er telkens sprake van een overdracht van elektronen tussen de reagentia. Hierbij zullen de elektronen van het reductans overgedragen worden naar het oxidans. Tijdens de redoxreactie wordt elk elektron dat door het reductans wordt afgestaan terug opgenomen door het oxidans. Bijgevolg kunnen we redoxreacties voorstellen door middel van twee halfvergelijkingen. Een klassiek voorbeeld hiervan is de reactie tussen zinkionen en koperionen. Hierbij reageren koperionen (Cu^{2+}) volgens de halfreactie: (Potters, 2016)



De koperionen zijn het oxidans en ze nemen twee elektronen op. Bijgevolg ondergaat koper een reductie (=winst van elektronen). Zink verliest ionen en wordt omgezet in Zn^{2+} ionen volgens:



Doordat zink twee elektronen opneemt, ondergaat het een oxidatie en speelt het de rol van oxidans. De algemene reactievergelijking is de som van beide halfvergelijkingen. (Potters, 2016)



(Potters, 2016)

2.2 De galvanische cel

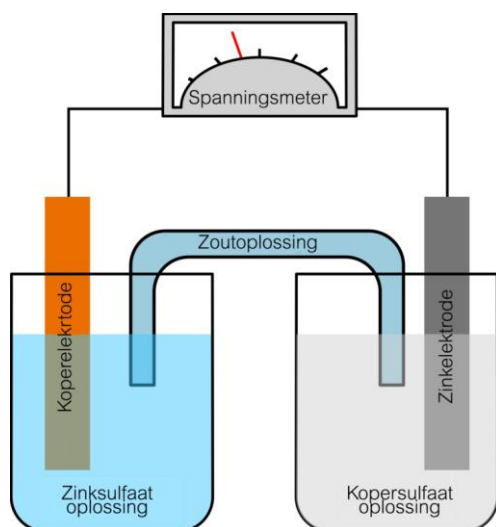
Wanneer de voorgaande halfreacties doorgaan, zal er energie vrijkomen onder de vorm van warmte. Door beide halfreacties fysisch te scheiden, kan de energie gebruikt worden onder de vorm van fysische stroom. Dit kan worden gedaan door middel van een galvanische cel.

De Galvanische cel is een opstelling die de chemische energie van de halfreacties omzet in elektrische energie. De galvanische cel bestaat uit:

- Twee verschillende metalen met een verschillende redoxpotential¹⁰. Beide metalen plaatjes zitten in een beker, waardoor deze metalen in oplossing kunnen gaan.
- Een geleider met een voltmeter. Daardoor kunnen de elektronen van het oxidans naar het reductans stromen.

Door het vrijkomen van de zinkionen zal de oplossing rond het oxidans steeds positiever geladen worden. Daardoor zullen de elektronen steeds moeilijker uit de koperelektrode wegstromen. Anderzijds zullen er steeds meer negatieve ladingen opstapelen aan het oxidans. Daardoor moeten de elektronen zich van een steeds positiever geladen omgeving bewegen naar een steeds meer negatief geladen omgeving. Bijgevolg zal de reactie steeds langzamer verlopen. Om dit te voorkomen is de galvanische cel voorzien van een zoutbrug, die transport van ionen toestaat zonder dat beide compartimenten zich volledig mengen. (Potters, 2016)

¹⁰ Zie volgende pagina.



Figuur 12: Een galvanische cel. (Mühlpfordt, 2008)

In een galvanische cel vinden de reductiereactie en de oxidatiereactie plaats aan de oppervlakte van de ondergedompelde plaatjes (elektrodes). De elektrode waaraan de reductie gebeurt, is de anode, terwijl de elektrode waaraan de oxidatie gebeurt de kathode is. (Potters, 2016)

De richting waarin de reactie verloopt, hangt af van de redoxpotentiaal van elk koppel reductans/oxidans. De redoxpotentiaal E^0 drukt uit hoe sterk een metaal of verbinding neigt elektronen op te nemen, en gereduceerd te worden. De redoxpotentiaal wordt uitgedrukt in Volt. Een metaal dat een koppel heeft met een hoge redoxpotentiaal is edel en zal niet snel neigen te corroderen als anode. Een metaal met een lage redoxpotentiaal zal sneller corroderen. De potentialen van metalen en legeringen kunnen we weergeven in de galvanische reeks. Deze reeks rangschikt de metalen volgen hun redoxpotentiaal. (Davis, 2000)

$\text{Au} > \text{Ag} > \text{Pb} > \text{Sn} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{Fe} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Al} > \text{Ti} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{Li}$

In deze galvanische reeks staan de metalen met de grootste redoxpotentiaal (edel) links terwijl de materialen met de kleinste potentiaal (onedel) rechts staan. (Davis, 2000)

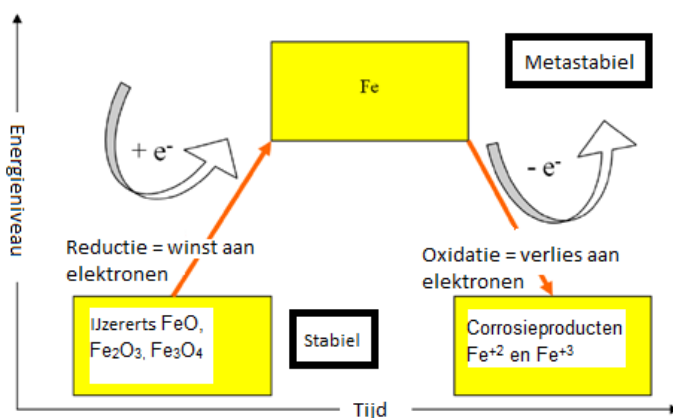
2.3 Corrosie

2.3.1 Definitie

Corrosie is het degraderen van materialen door interactie met hun omgeving, meer bepaald door elektrochemische reacties. Aan boord van een schip is corrosie de boosdoener die het staal doet roesten, wat leidt tot het aftakelen van het aangetaste oppervlak en dus van het betreffende schip. (Potters, 2016)

Corrosie is niet altijd negatief. Zo kan corrosie beschermende passivatielaag vormen op het oppervlak van roestvast staal. Deze laag is een oxidatielaag die verhindert dat het staal verder corrodeert.

Metalen komen voor in oxide -of sulfidevorm. In de hoogoven wordt het metaal uit de ertsen geëxtraheerd. Hierbij worden metaalionen gereduceerd tot ongeladen metaalatomen, wat een endergonische transformatie is. Bij een dergelijke transformatie stijgt de inwendige energie, de enthalpie en de Gibbs vrije energie. Daardoor komt een vrij metaal voor in een metastabiele toestand. Indien het metaal met rust wordt gelaten, zal het zal het spontaan naar een stabielere, geoxideerde vorm terugkeren. Deze drang om elektronen terug af te staan vormt de drijvende kracht achter alle corrosieprocessen¹¹. (De Baere, 2011)



Figuur 13: Energieniveau in functie van tijd. (De Baere, 2011)

¹¹ Uitgenomen bij de edelste metalen zoals goud en platina. (Potters, 2016)

2.4 Thermodynamica

2.4.1 Inleiding

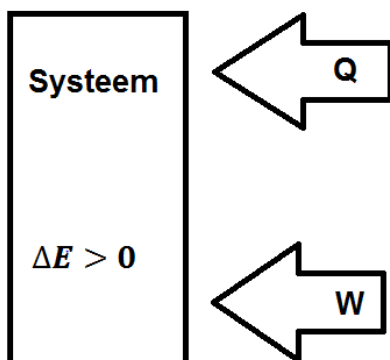
Thermodynamica bestudeert de energie van materialen. Door gebruik te maken van thermodynamica kunnen corrosieprocessen worden voorspeld.

2.4.2 De eerste wet van de thermodynamica

De eerste wet van de thermodynamica stelt dat de hoeveelheid energie een constante is. Energie kan omgezet worden maar niet ontstaan uit het niets of verdwijnen.

Wanneer er energie wordt uitgewisseld tussen een systeem en zijn omgeving, wordt deze energie uitgewisseld hetzij in de vorm van arbeid (w) hetzij in de vorm van warmte (Q). Processen kunnen energie transformeren of transporteren. Ze kunnen echter geen energie creëren of elimineren. (De Baere, 2011)

$$\Delta E = Q + w \quad (4)$$



Figuur 14: Veranderingen van interne energie. (De Baere, 2011)

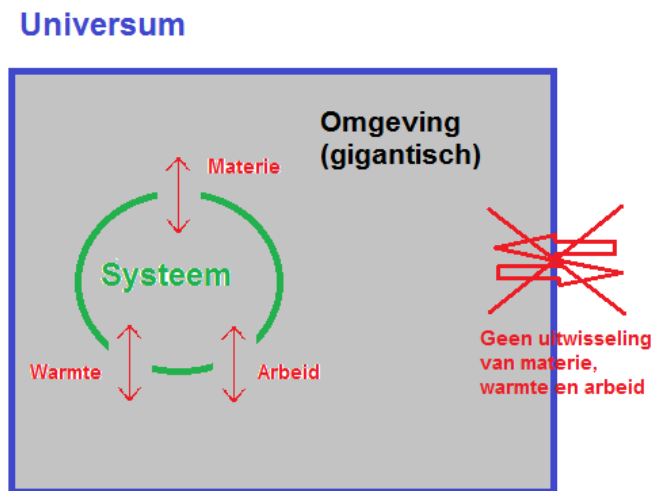
Hierbij betekent een positieve ΔE dat het systeem aan energie wint, terwijl een negatieve ΔE betekent dat het systeem energie verliest. Wanneer Q positief is, zal het systeem warmte winnen. Als Q negatief is zal het systeem warmte verliezen. Bij een positieve w zal het systeem arbeid ondergaan, terwijl een negatieve w betekent dat het systeem arbeid levert. (De Baere, 2011)

Figuur 15 toont dat de hoeveelheid energie in het universum constant is. $\Delta E_{\text{universum}}$ is nul. Om de thermodynamica van een systeem te bestuderen zullen we het proces van het universum moeten isoleren.

$$\Delta E_{\text{universum}} = 0 \quad (5)$$

$$\Delta E_{\text{universum}} = \Delta E_{\text{systeem}} + \Delta E_{\text{omgeving}} = 0 \quad (6)$$

$$\Delta E_{\text{systeem}} = -\Delta E_{\text{omgeving}} \quad (7)$$



Figuur 15: De hoeveelheid energie in het universum is constant. (De Baere, 2011)

Om voorspellingen te kunnen doen over hoe een systeem zich zal gedragen is het belangrijk om het behoud van energie (1^{ste} wet van de thermodynamica) terug te vinden in elk systeem dat bestudeerd wordt.

Enthalpie is in functie van druk, volume en temperatuur van een systeem $H = f(P, V, T)$. Die parameters variëren niet volledig onafhankelijk van elkaar maar staan in een bepaalde verhouding tot elkaar. In een fluidum bijvoorbeeld weten we dat $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$. (ideale gaswet of wet van Boyle en Gay-Lussac)

P staat voor druk, V voor Volume, T voor temperatuur, n het aantal mol en R de gasconstante. H of enthalpie staat voor het totale energieniveau van een systeem.

De totale energie is gelijk aan de inwendige energie E (energie gebonden aan de materie, onder andere de bindingsenergie van de moleculen) verminderd of vermeerderd met de arbeid die door of op het systeem wordt uitgeoefend.

Stel dat er energie, warmte wordt toegevoegd aan een systeem. Die warmte kan aangewend worden op verschillende wijzen. De materie gaat winnen aan interne energie, met andere woorden E stijgt en/of de toegevoegde energie zal druk en temperatuur creëren, arbeid verrichten. Naarmate het systeem meer arbeid verricht stijgt de interne energie minder. Daarentegen, bij totale afwezigheid van arbeid wordt de totale toegevoegde energie omgezet in interne energie.

De inwendige energie van een systeem correspondeert enkel met de toegevoerde warmte Q als op of door het systeem geen arbeid wordt verricht, met andere woorden, als het volume van het systeem niet verandert.

$$\Delta E = Q \pm w \text{ of } \Delta E = Q \pm PV \quad (8)$$

Q is toegevoegde warmte en $P \cdot V$ de verrichte arbeid w , gelijk aan druk maal volume.

$$w = PV \quad (9)$$

Als $PV = 0$, dan is de verandering in interne energie gelijk aan de toegevoegde warmte.

$$E = H - PV \quad (10)$$

$$H = E + PV \quad (11)$$

De enthalpie H wordt gebruikt om de warmtewisseling tijdens isobare processen (bv. een open kookpot) uit te drukken. De interne energie van een systeem hangt af van de verloren/gewonnen energie min de arbeid w verricht door het systeem: (De Baere, 2011)

Bij een constante druk betekent dit:

$$\Delta H = \Delta(E + PV) \quad (12)$$

$$\Delta H = \Delta E + P\Delta V \quad (13)$$

En aangezien $\Delta E = Q + w$ en $w = -P\Delta V$

$$\Delta H = Q + w - w \quad (14)$$

Bij constante druk zal de verandering in enthalpie gelijk staan aan de warmte die verloren of gewonnen wordt.

$$w = -P\Delta V \quad (15)$$

Bij de meeste reacties is $P\Delta V$ klein. Bijgevolg is het verschil tussen ΔH en ΔE ook klein.

$$\Delta H_{sys} = -\Delta H_{omgeving} \quad (16)$$

(De Baere, 2011)

2.4.3 De tweede wet van de thermodynamica

De eerste wet van de thermodynamica geeft ons informatie over de energie-uitwisseling tussen een systeem en haar omgeving. Hierbij blijft de totale hoeveelheid energie constant. Zoals eerder gezegd zijn corrosiereacties redoxreacties. Sommige redoxreacties verlopen spontaan, andere niet. De eerste wet van de thermodynamica zegt niets over het al dan niet spontaan verlopen van een reactie. (De Baere, 2011)

We kunnen de spontaniteit van een reactie wel bepalen door te kijken naar de tweede wet van de thermodynamica en de 'entropie'. Entropie drukt uit hoeveel onstabiele energie een bepaald gesloten systeem bevat. Wanneer de bruikbare energie afneemt en de onstabiele energie toeneemt, neemt de entropie toe. Doordat bruikbare energie onvermijdelijk verloren gaat, zal de wanorde van een systeem toenemen. Daarom is entropie tevens een maat voor de wanorde in het gesloten systeem. (De Baere, 2011)

In de natuur komt wanorde meer voor dan orde, omdat wanorde makkelijker te bereiken is. Daardoor zal de entropie in een gesloten systeem evolueren van laag naar hoog. De entropie wordt gegeven door:

$$S = Q/T \quad (17)$$

En de verandering in entropie:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (20)$$

Hierbij is S de entropie, Q de hoeveelheid warmte en T de hoeveelheid warmte van een gesloten systeem. (De Baere, 2011)

2.4.3.1 Josiah Willard Gibbs en vrije energie

Aangezien entropie de grootheid is die uitdrukt hoeveel energie er niet in staat is arbeid te verrichten, moet er ook een grootheid bestaan die uitdrukt hoeveel energie er wel beschikbaar is om arbeid te verrichten. (Davis, 2000)

De Gibbs vrije energie is de energie die bij een chemische reactie kan gebruikt worden om arbeid te verrichten. Hierbij staat de Gibbs vrije energie (G) gelijk aan de enthalpie (H), verminderd met het product van de temperatuur (T) en de entropie S van het systeem. (Davis, 2000)

$$G = H - TS \quad (19)$$

$$G = \text{Gibbs vrije energie} \quad (20)$$

$$H = \text{Entalpie} = E + PV \quad (21)$$

Hierbij is E de interne energie, P de druk, V het volume en T de temperatuur in Kelvin. Bij een constante temperatuur zal elke chemische reactie gepaard gaan met een verandering in Gibbs vrije energie. Deze kan gemeten worden met de volgende vergelijking:

$$\Delta G = (G_{\text{reactieproducten}} - G_{\text{reactanten}}) \quad (22)$$

$$\Delta G = (H_{\text{reactieproducten}} - H_{\text{reactanten}}) - T(S_{\text{reactieproducten}} - S_{\text{reactanten}}) \quad (23)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (24)$$

Wanneer $\Delta H < 0$, is de reactie exotherm en wordt er warmte afgegeven. Bij $\Delta H > 0$ is de reactie endotherm en wordt er warmte opgenomen. Als de wanorde van het systeem toeneemt, zal ΔS positief zijn, terwijl ΔS negatief zal zijn als de wanorde van het systeem afneemt. (De Baere, 2011)

Gibbs vrije energie is belangrijk bij het bepalen van de spontaniteit van de reactie. Wanneer de Gibbs vrije energie van de reactanten groter is dan de Gibbs vrije energie van de reactieproducten, zal de reactie spontaan verlopen. In dit geval is $\Delta G < 0$. Bijgevolg zal de Gibbs vrije energie afnemen tijdens de reactie. Als $\Delta G > 0$, zal energie nodig zijn om de reactie mogelijk te maken en bijgevolg zal ze niet spontaan verlopen. (De Baere, 2011)

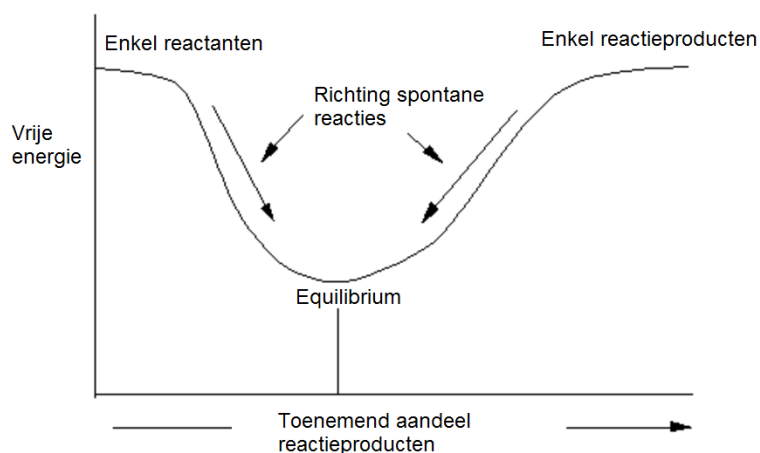
Het teken van ΔG hangt af van het teken van ΔH , het teken van ΔS en van de temperatuur. Tabel 3 toont het verband tussen deze parameters en het al dan niet spontaan verlopen van de reactie. (De Baere, 2011)

Tabel 3: De spontaniteit van elektrochemische reacties. (De Baere, 2011)

	Exotherm	Endotherm
Orde	$\Delta H < 0$ $\Delta S > 0$ Reactie verloopt spontaan bij elke temperatuur.	$\Delta H > 0$ $\Delta S > 0$ Reactie verloopt spontaan bij hoge temperaturen.
Wanorde	$\Delta H < 0$ $\Delta S < 0$ Reactie verloopt spontaan bij lage temperaturen.	$\Delta H > 0$ $\Delta S < 0$ Reactie verloopt nooit spontaan.

Bij de 2^{de} wet van de thermodynamica is de grootte van ΔG ook belangrijk. ΔG geeft weer hoeveel arbeid een systeem kan uitoefenen op zijn omgeving. Dit tijdens een spontaan proces, een constante temperatuur, en een constante druk. De energie die niet wordt gebruikt om arbeid te verrichten, wordt omgezet in warmte. (De Baere, 2011)

Figuur 16 toont de Gibbs vrije energie. Hierbij zien we dat deze afneemt tot dat de reactie in evenwicht is. Gibbs vrije energie en stabiliteit zijn omgekeerd evenredig.



Figuur 16: Vrije energie. (Shodor, 2017)

2.4.4 De Nernstvergelijking

Elektrochemische reacties geven de mogelijkheid om elektrische energie te produceren door middel van chemische reacties. W. Nernst legde als eerste deze link tussen thermodynamica en elektrochemie. Om elektrochemische reacties kwantitatief te benaderen, gebruiken we de Nernstvergelijking.

De vergelijking van Nernst beschrijft het verband tussen het potentiaalverschil tussen twee elektroden en de concentraties van de bij de elektrodereacties betrokken componenten. Deze vergelijking geeft de relatie weer tussen de chemische potentiaalverschillen in een elektrochemische reactie en de energie die daarbij vrijkomt. (Potters, 2016)

Om deze vergelijking af te leiden, beginnen we bij het beschrijven van de arbeid die geleverd wordt door een lading q in een spanningsveld met potentiaal V . q is een elektrische lading. w is de arbeid geleverd door een elektrisch veld wanneer de lading q verplaatst wordt tussen 2 punten met een verschillend elektrisch potentiaal ΔV . In de elektrochemie wordt ΔV vervangen door E , het verschil in reductiepotentiaal.

Een corrosieverschijnsel of een galvanische cel zijn gebaseerd op redoxreacties waarbij de anode elektronen vrijmaakt en de kathode deze elektronen accepteert. Een dergelijke redoxreactie kan gesplitst worden in 2 halfreacties waarbij telkens de bron van de opgenomen elektronen of het doel van de afgestane elektronen buiten beschouwing blijven. (Potters, 2016)

Alle reductors en oxidators geven niet met dezelfde gretigheid elektronen vrij of nemen elektronen op. Om dit duidelijk te maken heeft men het standaard redoxpotentiaal E^0 ingevoerd. Hoe hoger de E^0 -waarde, hoe makkelijker elektronen naar die oxidator toegaan. Hoe lager de E^0 -waarde, hoe makkelijker de reductor elektronen afstaat. (De Baere, 2017)

$$E = -w/q \quad (25)$$

Hierbij is E het verschil in reductiepotentiaal tussen reductor en oxidator of anode en kathode, w de arbeid en q de betreffende lading.

Als de galvanische cel een positieve spanning opwekt, kan het systeem arbeid leveren en dus energie verliezen. Daarom staat er een minteken in de vergelijking. De hoeveelheid arbeid is hierbij gelijk aan de hoeveelheid Gibbs vrije energie ΔG die vrijkomt. (Potters, 2016)

$$w = -\Delta G \quad (26)$$

(25) en (26) samen geeft:

$$\Delta G = -qE \quad (27)$$

Een positieve waarde voor E . en een negatieve waarde voor G staan beiden garant voor het spontaan verlopen van de betreffende reactie. De totale lading q die wordt overgedragen tijdens de reactie hangt af van het aantal mol overgedragen elektronen en de lading per mol elektronen. Als q de overgedragen lading is, n het aantal mol elektronen en F de Faradayconstante, geldt: (Potters, 2016)

$$q = nF \quad (27)$$

De constante van Faraday drukt uit hoeveel elektrische lading één mol elektronen bevat. Deze constante bedraagt $96\,485\text{ C/mol}$ elektronen. Dit betekent dat:

$$\Delta G = -nFE \quad (28)$$

Onder standaardomstandigheden geldt dan:

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \quad (29)$$

E^0 waarden zoals gepubliceerd gelden alleen als de concentraties van de opgeloste deeltjes in de halfreactie gelijk zijn aan 1,00 molair en de temperatuur 25,15°C of 298,215 K is.

Vergelijking(29) geeft het verband weer tussen chemische potentiaalverschillen in een elektrochemische reactie en de energie die daarbij vrijkomt in normomstandigheden¹².

De vergelijking geeft echter nog geen verband weer in niet -normomstandigheden hiervoor maken we gebruik van de Nernstvergelijking .

Om de Nernstvergelijking op te stellen moet er gekeken worden naar het verband tussen ΔG en de evenwichtsconstante K. (Potters, 2016)

Niet alle reacties in de chemie zijn éénrichtingsreacties; sommige reacties zijn reversibel. Wanneer twee reacties tegelijk doorgaan spreekt men over evenwichtsreacties. Deze soort reacties kunnen we beschouwen volgens de vergelijking:



De hoofdletters duiden de reactanten aan en hun respectievelijke concentraties. De kleine letters de stoichiometrische coëfficiënten voor de reactie.

Deze reactie is in evenwicht wanneer beide tegengestelde reacties met dezelfde snelheid verlopen. De invloed van beide tegengestelde drijfveren (de enthalpieverandering ΔH en de entropieverandering ΔS is dan even groot.

Wanneer de concentraties in mol/L worden uitgedrukt, kan de evenwichtsconstante K als volgt worden bepaald:

$$K = \frac{A^a B^b}{C^c D^d} \quad (31)$$

Heel dikwijls is de reactie niet in evenwicht en geeft formule 31 als resultaat niet K de evenwichtsconstante maar Q de reactiecoëfficiënt.

¹² Onder normomstandigheden verstaan we een temperatuur van 298,15 graden Kelvin, een druk van 10^5 Pa en concentraties van 1 mol/L. (IUPAC, 1987) (De Baere, 2011)

Wanneer $Q > K$ zullen de reagerende stoffen de rechterkant verkiezen. Als $Q < K$ zal de reactie naar links verschuiven. Als $Q = K$ is geen enkele kant bevoordeeld. (Potters, 2016)

Er is een verband tussen de evenwichtsconstante K en de Gibbs vrije energie ΔG . Wanneer we dit verband doortrekken, kunnen we een vergelijking opstellen die de verandering van Gibbs-vrije energie weergeeft in niet-normomstandigheden. Hierbij is T de eigenlijke temperatuur in Kelvin, Q het reactiequotiënt in niet-normomstandigheden, en R de universele gasconstante, zijnde $8,31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}$. (Potters, 2016)

$$\Delta G = E^0 - \left(\frac{RT}{nF}\right) \ln Q \quad (32)$$

Zoals eerder besproken kunnen we zeggen dat:

$$\Delta G = -nFE \quad (33)$$

en de standaard Gibbs vrije energie is:

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \quad (34)$$

Daaruit volgt:

$$E = E^0 - \left(\frac{RT}{nF}\right) \ln Q \quad (35)$$

Deze laatste vergelijking staat ons toe de redoxpotentialaal bij niet-normomstandigheden te berekenen.

Om de potentialaal bij normomstandigheden (temperatuur = $25^\circ\text{C} = 298,15^\circ\text{K}$) te berekenen kunnen de vergelijking bijwerken:

$$E_{298} = 298 = E_{298}^0 - \left(\frac{8.314510 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} * 298 \text{ K}}{n * \frac{96485 \text{ C}}{\text{mol}}}\right) * 2.303 \log Q \quad (36)$$

$$E_{298} = E_{298}^0 - \left(\frac{0.059}{n}\right) \log Q \quad (37)$$

2.4.5 De wetten van Faraday

De wetten van Faraday geven het verband weer tussen een elektrische lading en de hoeveelheid massa die door de bijbehorende elektrochemische reactie wordt vrijgesteld. Dankzij de wetten van Faraday kan men een schatting maken van de snelheid waarmee elektrochemische corrosie gebeurt. (Potters, 2016)

2.4.5.1 De eerste wet van Faraday

De massa van de producten die in een elektrochemische reactie aan de elektrode worden gevormd is evenredig met de hoeveelheid geleverde stroom.

$$m \sim It \quad (38)$$

$$m = ZIt \quad (39)$$

Hierbij stelt m de massa voor van het product in gram. t stelt de tijd voor in seconden en I is de stroom in Ampère. Z is een proportionaliteitsconstante die gelijk is aan de massa van een stof die gevormd wordt door 1 ampère seconden of 1 Coulomb per seconde aan lading. (Potters, 2016)

2.4.5.2 De tweede wet van Faraday:

De massa's van verschillende producten die worden gevormd door gelijke hoeveelheden elektriciteit zijn evenredig met de verhoudingen van de molaire massa's en het aantal elektronen in een bepaalde reactie.

$$m \sim Z \sim \frac{M}{n} \text{ of } Z = k \cdot M/n \quad (40)$$

Hierbij is m de massa van het product in gram, M de molaire massa's (in g/ mol), n het aantal elektronen en Z de proportionaliteitsconstante. (Potters, 2016)

Door beide wetten van Faraday, (39) en (40), te combineren krijgen we:

$$m = k \frac{M}{n} It \quad (41)$$

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} It \quad (42)$$

Bij (42) is F nog steeds de Faradayconstante. Nu kunnen we de hoeveelheid metaal berekenen die per tijdseenheid weg reageert in een corrosieproces.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{MI}{nF} \quad (43)$$

$$\frac{dm}{A dt} = \frac{MI}{nFA} \quad (44)$$

of

$$\frac{dm}{dt} = \frac{AMi}{nF} \quad (45)$$

Waarbij $i = I/A$ en de stroomdichtheid in A/m^2 .

Nu ook geldt:

$$m = \rho \cdot d \cdot A \quad (46)$$

Hierbij is m de massa, A het oppervlak waarop de reactie zich heeft afgespeeld, d de dikte van de weggereageerde laag en ρ de densiteit. Dankzij deze formule kan de corrosiediepte (d) worden berekend. (Potters, 2016)

$$\boxed{\frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{M}{nF\rho} i} \quad (47)$$

2.5 De ijzer -corrosiecel

Om elektrochemische corrosie in een natte omgeving mogelijk te maken moeten er vier voorwaarden vervuld zijn:

1. Aanwezigheid van een anode.
2. Aanwezigheid van een kathode.
3. Aanwezigheid van een metalen connectie tussen anode en kathode.
4. Aanwezigheid van een elektrolyt.

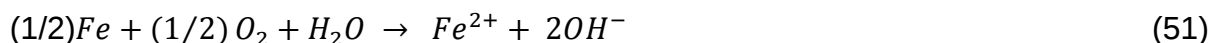
Een waterdruppel aan het oppervlak van een stalen plaat is voldoende om een kleine corrosiecel te vormen. Hierbij is de anode gelegen in het midden van de waterdruppel en treedt de anode op als elektrolyt. Aan de anode wordt ijzer geoxideerd: (Potters, 2016)



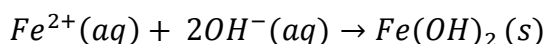
De ijzerionen gaan in oplossing en verplaatsen zich naar kathodeplaatsen aan de rand van de druppel. Aan de kathode zijn er voldoende ionen beschikbaar om met water -en zuurstofgas te combineren tot anionen: (Potters, 2016)



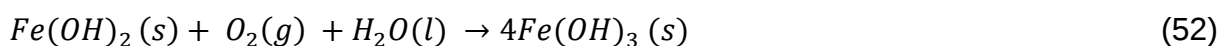
Wanneer we de reacties van (49) en (50) combineren krijgen we:

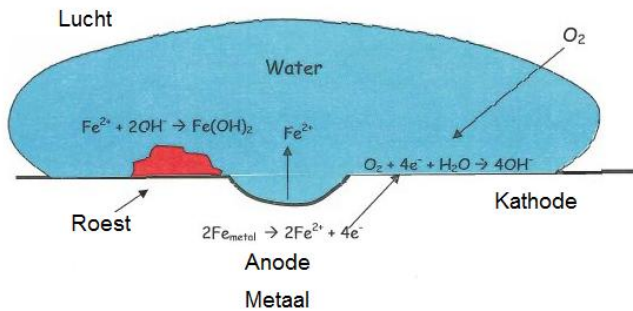


Hierdoor vormt er zich ijzer(III)hydroxide dat neerslaat:



Oxidatie van de bekomen neerslag zal dan in de eerste instantie tot ijzer (III) hydroxide leiden, en daarna tot het eigenlijke roest, ijzer (III) oxide:

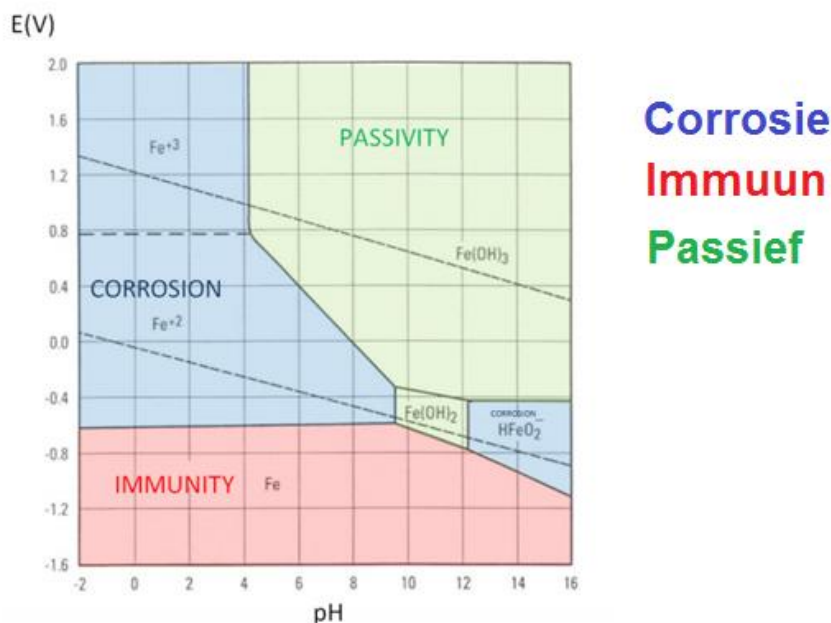




Figuur 17: Corrosie in een waterdruppel. (EduMission, 2017)

2.6 Het Pourbaixdiagram

Het Pourbaixdiagram is het diagram dat weergeeft of een gegeven metaal in bepaalde omstandigheden gevoelig is voor corrosie of niet. Het Pourbaixdiagram geeft niet weer hoe hoog de corrosiesnelheid van het desbetreffende materiaal zal zijn. Aan de basis van dit diagram zijn de evenwichtsfasen van het elektrochemisch systeem. Afhankelijk van het materiaal kan een Pourbaixdiagram er eenvoudig uitzien of juist heel ingewikkeld. Deze vorm hangt af van de samenstelling van het metaal en de omgeving waarin het metaal zich bevindt. Een eenvoudig Pourbaixdiagram wordt in de figuur hieronder weergegeven. (Potters, 2016)



Figuur 18: Het Pourbaixdiagram. (De Baere, 2011)

Dit diagram toont zuiver Fe dat zich in water bevindt. Op de verticale as wordt de waarde van het potentiaal in volt weergegeven en op de horizontale as de pH-waarden van het water. (Davis, 2000) Op het diagram onderscheiden we drie gebieden:

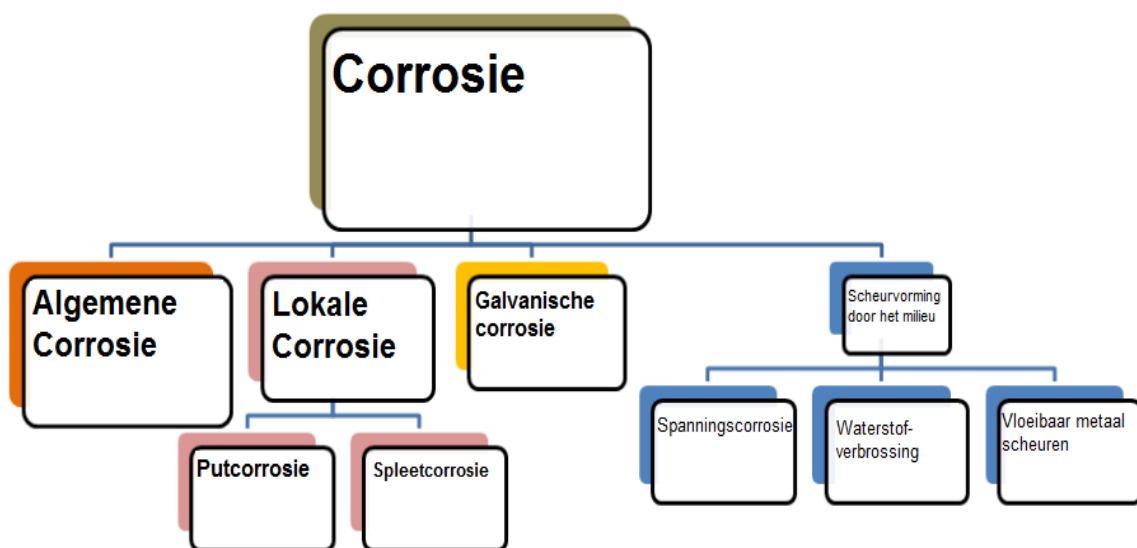
- Het corrosiegebied waarin het metaaloppervlak corrodeert.
- Het passieve gebied waarin het metaal reageert met zuurstof en er zich een passivatielaag vormt van metaaloxide (MO). Deze bedekt de oppervlakte van het metaal waardoor het tegen corrosie wordt beschermd.
- Het immune gebied waar het metaal niet reageert, en in ongewijzigde vorm blijft bestaan.

Bij een gegeven pH-waarde en een gegeven potentiaal kan worden afgelezen in welk gebied het metaal zich bevindt. De grenzen van deze gebieden worden aangegeven door de stippellijnen. Op de stippellijn is de reactie die bij deze stippellijn staat gegeven in evenwicht. Boven de stippellijn zal de reactie eerder naar rechts verlopen (oxidatie), terwijl onder de stippellijn de reactie eerder naar links zal verlopen (reductie). Dit diagram is handig wanneer men het corrosiegedrag van het metaal bestudeert. (Davis, 2000)

3 Verschillende vormen van corrosie

3.1 Soorten corrosie

Er bestaan veel verschillende vormen van corrosie. Deze thesis beperkt zich tot het bespreken van de belangrijkste vormen. De onderverdeling van deze vormen gebeurt volgens *NACE¹³ basic corrosion classes* en wordt weergegeven door Figuur 19.



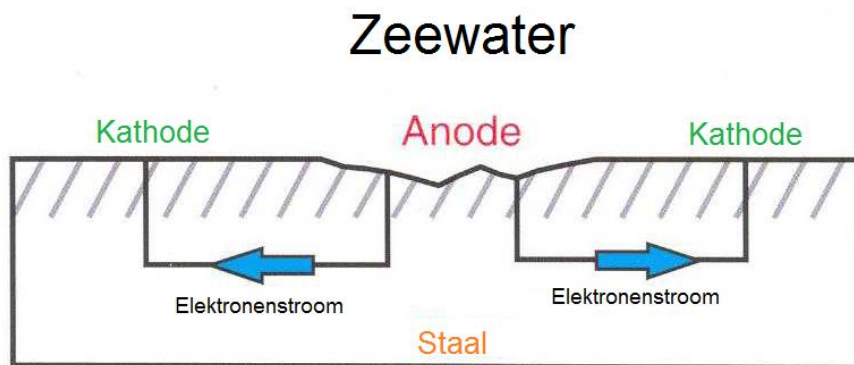
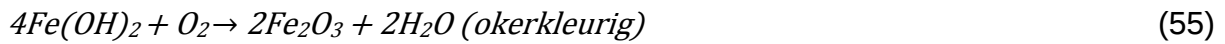
Figuur 19: Onderverdeling van verschillende corrosievormen. (Potters, 2016)

3.1.1 Uniforme corrosie

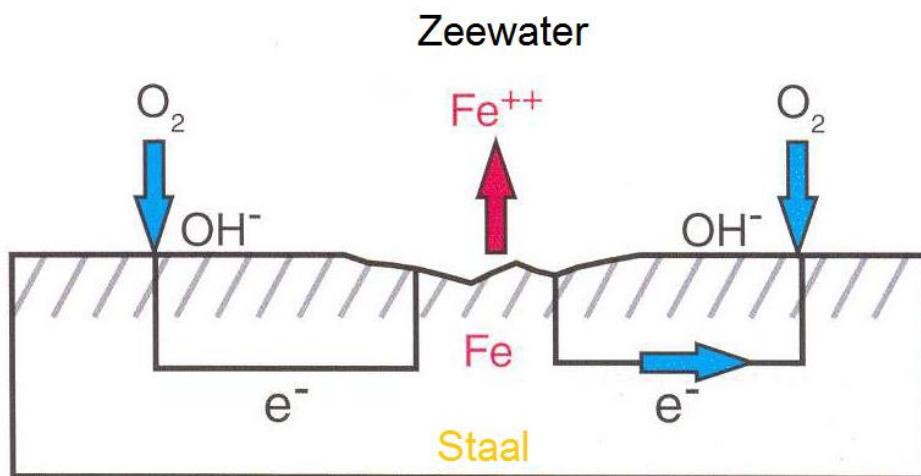
Uniforme corrosie is gelijkmatige corrosie over het volledige metaaloppervlak. Deze vorm van corrosie kan zich voordoen wanneer staal aan een waterig milieu wordt blootgesteld in aanwezigheid van voldoende zuurstof. In dit geval ontstaan er zeer veel kleine anodische en kathodische plekken. Naarmate het staal corrodeert, zullen de initieel anodische / kathodische zones veranderen. Zo zullen gebieden oorspronkelijk sterk anodisch waren, minder anodisch worden, waardoor een andere gebieden de functie van anode zal overnemen. Bijgevolg wisselen de anodes en kathodes voortdurend van plaats. Daardoor zal, na verloop van tijd, de corrosie van het metaal relatief uniform verlopen.

¹³ NACE staat voor *National Association of Corrosion Engineers*. (NACE, 2017)

Als de luchtvochtigheid groot genoeg is, kan atmosferische corrosie zich voordoen. In geval van uniforme corrosie zal Fe^{2+} reageren met OH^- tot $Fe(OH)_2$ en vervolgens andere complexere verbindingen aangaan. (Amtec, 2015)



Figuur 20: Anodes en kathodes op bloot staal. (Amtec, 2015)

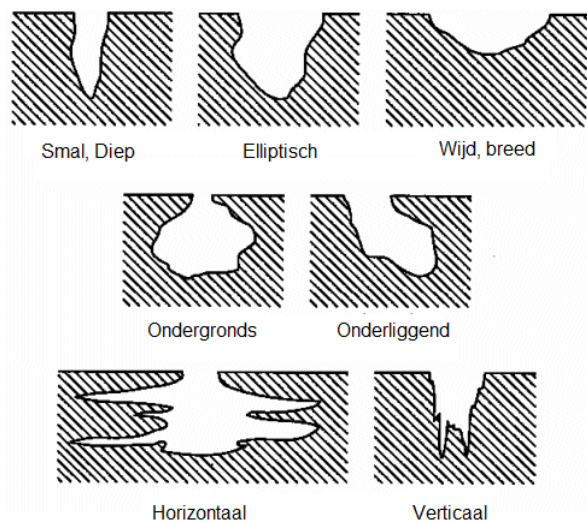


Figuur 21: Corrosie op bloot staal. (Amtec, 2011)

Merk op dat uniforme corrosie eigenlijk niet bestaat. Wanneer bloot staal onder een microscoop wordt geobserveerd, zal blijken dat het staal verschillende corrosiesnelheden vertoont. Uniforme corrosie is eigenlijk een term die werd bedacht om het modelleren van corrosieverschijnselen makkelijker te maken. (Melchers, 2017)

3.1.2 Putcorrosie

Putcorrosie is een vorm van hevige, lokale corrosie. Hierbij vormen er zich cavities die in zeer korte tijd het metaal kunnen doorboren. Putcorrosie komt veel voor bij metalen die een beschermende laag hebben, bijvoorbeeld een beschermende roestlaag of passivatielaag (stainless steel). Wanneer deze laag plaatselijk wordt doorbroken, zal het blote staal optreden als anode terwijl de rest van het staal zal optreden als kathode. Doordat de kathode zeer groot is en de anode zeer klein, zal het oplossen van het anodemateriaal zeer snel verlopen. (Heylbroeck, 2014)



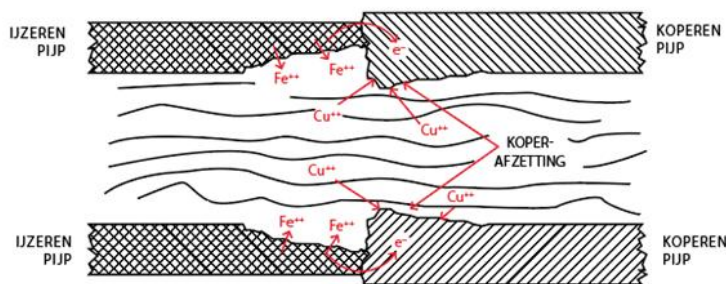
Figuur 22: verschillende soorten holtes die kunnen ontstaan bij putcorrosie. (Nippon Steel Corporation, 2000)

3.1.3 Galvanische corrosie

Galvanische corrosie is een vorm van corrosie die optreedt wanneer twee metalen of legeringen die een verschillende potentiaal hebben, met elkaar in verbinding worden gebracht door een elektrische geleider. Galvanische corrosie kan dus voorgesteld worden door de galvanische cel die we reeds besproken hebben. Om galvanische corrosie mogelijk te maken zijn drie factoren noodzakelijk:

- De betreffende metalen of legeringen moeten een verschillende redoxpotentiaal bezitten¹⁴.
- Ze moeten aan elkaar verbonden worden door middel van een gemeenschappelijke elektrolyt.
- Er moet een gemeenschappelijke, elektrische geleider aanwezig zijn.

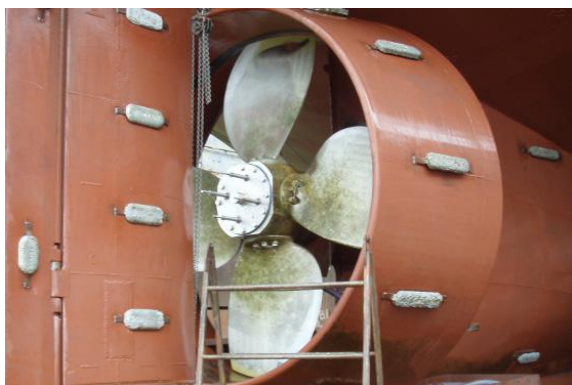
Hierbij zal het minst edele metaal corroderen, terwijl het meest edele metaal intact zal blijven.



Figuur 23: De vorming van een galvanische cel door het aaneenschakelen van twee metalen. (Potters, 2016)

Het principe achter galvanische corrosie kan gebruikt worden om het schip te beschermen tegen corrosie. Zink is minder edel dan het scheepsstaal. Door zinkanodes aan de scheepsrump te bevestigen, zal zink een galvanische cel vormen met het schip. Hierbij zal het zink zich opofferen, waardoor de scheepsrump zich gedraagt als kathode, en intact blijft. Tevens kunnen opofferingsanodes gebruikt worden om de ladingtanks van olietankers te beschermen tegen corrosie. Deze scriptie gaat hier niet dieper op in omdat de focus ligt op verfsystemen. (Potters, 2016)

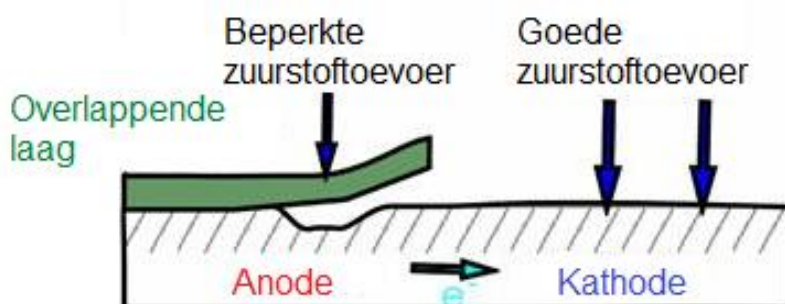
¹⁴ Potentiaalverschil dat bij een redoxreactie ontstaat tussen het reductiemiddel, de elektronendonor en het oxydatiemiddel; redoxpotentialen ontstaan tussen ionen van hetzelfde metaal maar met verschillende ladingen, alsook tussen metalen en oplossingen van hun ionen. (Potters, 2013)



Figuur 24: Grijs opofferingsanodes op een schip. (WRS Group, 2017)

3.1.4 Spleetcorrosie

Spleetcorrosie is een vorm van hevige, lokale corrosie. Meestal treedt deze vorm van corrosie op in nauwe openingen en in spleten waarin zich water kan verzamelen. Boutenkoppen, moeren, overlappingsen, klingenagels en ondersteunende knieën in ladingtanks zijn voorbeelden van plaatsen waar spleetcorrosie kan opreden. Aanvankelijk zal de corrosiereactie in de spleet normaal verlopen. Echter, door de beperkte ruimte in de spleet zullen bepaalde bestanddelen¹⁵ concentreren. Doordat de opgenomen stoffen niet zo vlot kunnen worden aangevoerd, en het gevormde roest slechts langzaam kan worden afgevoerd, zal zich een ander evenwicht instellen. Hierbij zal de aanwezige zuurstof gemakkelijker bij het metalen oppervlak geraken, dan bij de spleet. Bijgevolg zal het metaal in de spleet zich als anode gedragen en oplossen, terwijl het metaal buiten de spleet zich als kathode zal gedragen. Daardoor treedt er corrosie op. (Heylbroeck, 2014)



Figuur 25: Spleetcorrosie. (Amtec, 2015)

¹⁵ Bijvoorbeeld zout. (Heylbroeck, 2014)

3.1.5 Microbiële corrosie

Microbiële corrosie of MIC¹⁶ is een vorm van corrosie die wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van micro-organismen of bacteriën. Deze vorm van corrosie is meestal hevig en lokaal.

Vaak is het moeilijk om te bepalen of een bepaalde vorm van corrosie al dan niet veroorzaakt wordt door microben. Bovendien is de exacte rol en interactie van deze organismen nog niet goed begrepen. Wel staat vast dat ze zuren produceren, corrosiecellen creëren en waterstofsulfide voortbrengen.

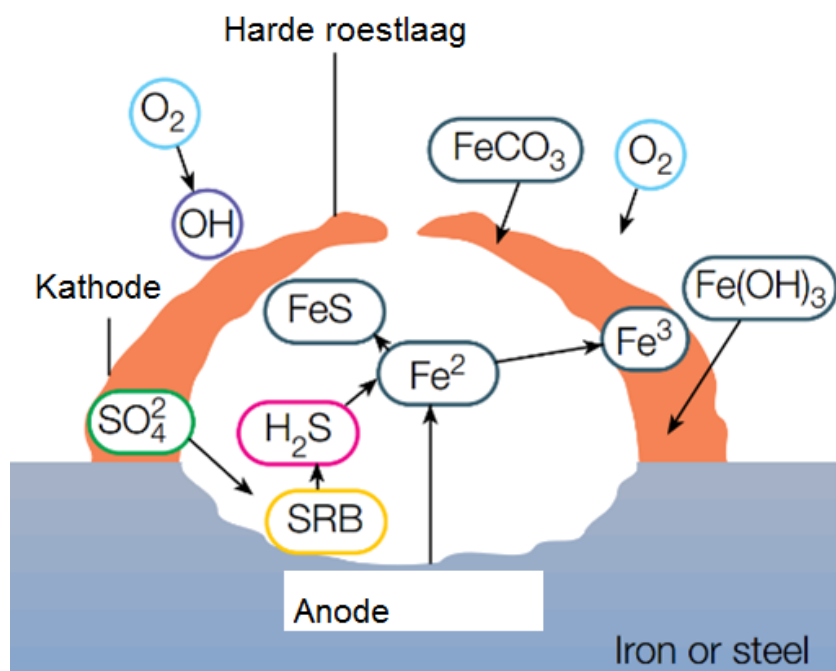
Echter, als men in een zuurstofarme omgeving corrosie aantreft in combinatie met slijmvorming stijgt de kans dat de corrosie microbieel is.

De meest voorkomende bacteriën zijn sulfaatreducerende bacteriën en bacteriën die zuur produceren. Deze leven in kolonies op het stalen oppervlak. Sulfaatreducerende bacteriën leven in zuurstofarme milieus en komen slechts lokaal voor op schepen. Meestal settelen de organismen zich in stilstaand water, dat kan voorkomen op de bodem van ballasttanks of op de bodem van ladingtanks.

Aanvankelijk kan men microbiële corrosie opmerken door de aanwezigheid van zwart slijm. Dit kan gepaard gaan met de aanwezigheid van waterstofsulfide dat ruikt als rotte eieren. Het metalen oppervlak onder de cavitatie heeft hierbij vaak een opvallende kleur. Ten slotte kan men staaltjes nemen en deze laten onderzoeken door een laboratorium.

Echter, de aanwezigheid van microben betekent niet automatisch dat er sprake is van microbiële corrosie. Bij gebrek aan kennis kunnen onverklaarde corrosiefenomenen onterecht bestempeld worden als MIC. Om dit te voorkomen is het belangrijk dat de betrokken corrosie -ingenieur competent en ervaren is. (Amtec, 2015)

¹⁶ MIC staat voor 'Microbiologically Influenced Corrosion'. (Amtec, 2015)



Figuur 26: Een corrosiecel met MIC. (De Baere, 2017)



Figuur 27: Microbiële corrosie. (De Baere, 2017)

3.1.6 Waterstofschade

Wanneer staal corrodeert in een zuur milieu worden waterstofionen gereduceerd aan de kathode. Hoewel het merendeel van de gevormde waterstof ontsnapt, zal een deel ervan zich nestelen tussen de granules van het metaal, in de vorm van atomische waterstof. Daardoor zal de buigzaamheid van het metaal afnemen en kunnen er scheurtjes ontstaan. Dit mechanisme heet waterstofverbrossing.

Verder kunnen er ook andere vormen van waterstofschade optreden, zoals spanningsscheuren door sulfide¹⁷, waterstof-geïnduceerde scheurvorming¹⁸ of blaasvorming door waterstof¹⁹. (Davis, 2000)



Figuur 28: Waterstofverbrossing. (Djukic, 2014)

¹⁷ Dit staat beter bekend als *Sulfide Stress Cracking*, of SSC. (Davis, 2000)

¹⁸ Waterstof- geïnduceerde scheurvorming staat ook bekend als '*Hydrogen Induced Cracking*'. (Davis, 2000)

¹⁹ Dit staat ook bekend als *Hydrogen Blistering*. (Davis, 2000)

4 Corrosie in ladingtanks van olietankers

Corrosie in een ladingtank manifesteert zich op verschillende manieren en volgt verschillende mechanismen. De agressieve tankatmosfeer veroorzaakt versnelde uniforme corrosie van de dekbeplating. Onderaan de ladingtank kan er soms sprake zijn van hevige putcorrosie door de aanwezigheid van water, zwavel en microben. Dit hoofdstuk focust op de belangrijkste corrosiemechanismen en geeft hun impact weer op de beplating van de ladingtank.

4.1 Het probleem: agressieve corrosie in ladingtanks

Vroeger was corrosie in ladingtanks van olietankers niet zo agressief. Dit kwam omdat de vervoerde aardolie minder viskeus en warm was en minder zwavel bevatte. Bovendien waren de meeste tankers enkelwandig. Daardoor volstond het om de cavitaties van de putcorrosie te vullen tijdens de vijfjaarlijkse reparaties in het droogdok. (Jansen, 2017) Wanneer de tanker 15-20 jaar oud was, was het vaak nodig om staal te vernieuwen van de dekbeplating. Bovendien werd de bodem van de tank gegritstraald en geverfd²⁰, zodat de putcorrosie stopte en de tanker nog enkele jaren kon blijven varen. Een dergelijke wijze van omgaan met corrosie in de ladingtank was vrij eenvoudig te begroten in de onderhoudsstrategie van het schip. (Intertanko, 2002).

Sinds het verplicht maken van de dubbele romp, verloopt corrosie in ladingtanks veel sneller. (Jansen, 2017) Johnson onderzocht in 2001 de totale kost van corrosie in de V.S. Hierbij bleek dat sommige eigenaars significante corrosie en significante putcorrosie²¹ ontdekten tijdens het de eerste vijfjaarlijkse inspectie van hun schepen. Ook Gunner (s.d.) ontdekte, na het onderzoeken van vijf dubbelwandige tankers, dat de dekbeplating verassend snel corrodeert. (Rauta et al, s.d.) In 1990 ontdekte men hevige putcorrosie in de bodembeplating van de ladingtanks van twee VLCC's²². Deze tankers waren zusterschepen en waren in het bezit van twee gerespecteerde eigenaars. Door de hevige putcorrosie moesten de tankers kostelijke reparaties ondergaan en opnieuw geverfd worden. (Rauta et al, s.d.)

²⁰ De tank werd gegritstraald om roest en contaminaties van het oppervlak te verwijderen. Daarna kon er een verlaag aangebracht worden. Deze coating vormde een beschermende laag tussen het blote staal en de corrosieve inhoud van de ladingtank, waardoor het staal niet corrodeert. (Intertanko, 2002)

²¹ Corrosie en putcorrosie zie 2.3.

²² VLCC staat voor *Very Large Crude Carrier*. Dit is een benaming voor enorme olietankers met een laadvermogen van 200 000 tot 300 000 ton. (van Dokkum, 2003)

Verder ontdekten andere rederijen dat de corrosie in de ladingtanks van hun tankers veel hoger lag dan de verwachte corrosiesnelheid van 0.1 millimeter per jaar. Zo ontdekten ze corrosiesnelheden van 1 tot 2 millimeter per jaar. In sommige gevallen lag de corrosiesnelheid nog hoger. (Rauta et al, s.d.)

Yasunaga et al. voerden onderzoek om de corrosie van de dekbeplating van de ladingtanks op een wetenschappelijke manier te meten en te begrijpen. Zij kwamen tot de conclusie dat:

- Er geen verschil was tussen corrosie van MS²³ en corrosie van TMCP²⁴ staal.
- Er geen duidelijk verschil is tussen de corrosiesnelheid van de dekbeplating van enkelwandige tankers en de dekbeplating van dubbelwandige tankers.
- De dekbeplating niet sneller roest dan 0.1 millimeter per jaar.
- De vorming van roestachtige vlokken aan de dekbeplating geen verband houdt met de ernst van de corrosie van de dekbeplating. (Yasunaga et al, 2003)

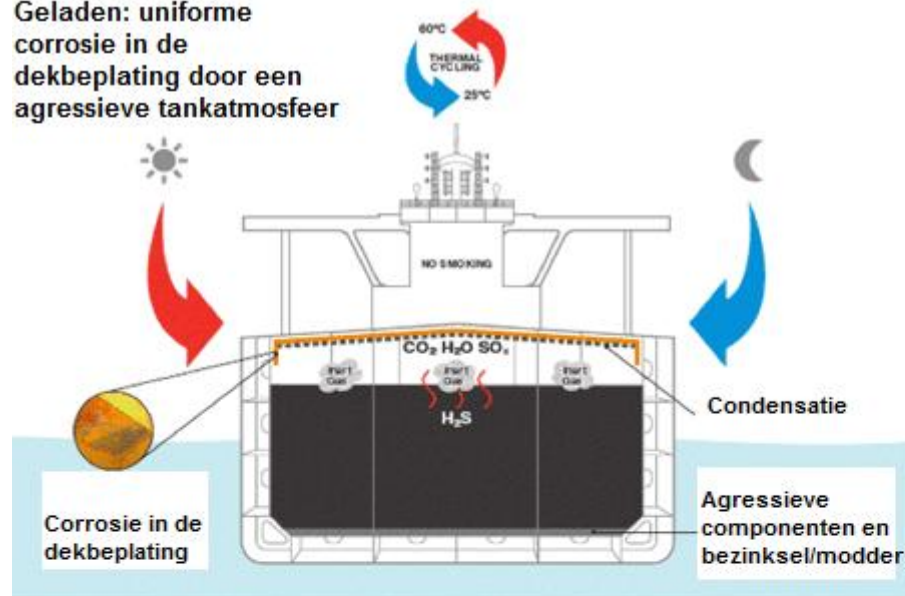
Uit een ander onderzoek blijkt dat de gemiddelde corrosiesnelheid van de dekbeplating slechts 0.057 millimeter per jaar bedraagt en de gemiddelde corrosiesnelheid van de bodembeplating slechts 0.09 millimeter per jaar. (Chevron, 2000)

Echter, het onderzoek van Yasunaga et al. onderzocht slechts 6 schepen, terwijl de onderzoeksresultaten van Chevron ook uitschieters tonen waarbij de dekbeplating 0.2174 millimeter per jaar corrodeert en er extreme putcorrosie aanwezig is op oudere schepen. (Chevron, 1997) Extreme corrosie van de ladingtanks wordt daarom gezien als een probleem dat zich voordoet op enkele individuele tankers en dat mogelijks afhankelijk is van de variëteit ruwe aardolie die vervoerd wordt en van de gevaren route. (Rauta et al, s.d.) Omdat extreme corrosie effectief voorkomt, zal dit hoofdstuk focussen op de corrosieverschijnselen in de ladingtanks van olietankers. Figuur 29 toont een beknopt overzicht van de belangrijkste problemen in de ladingtank.

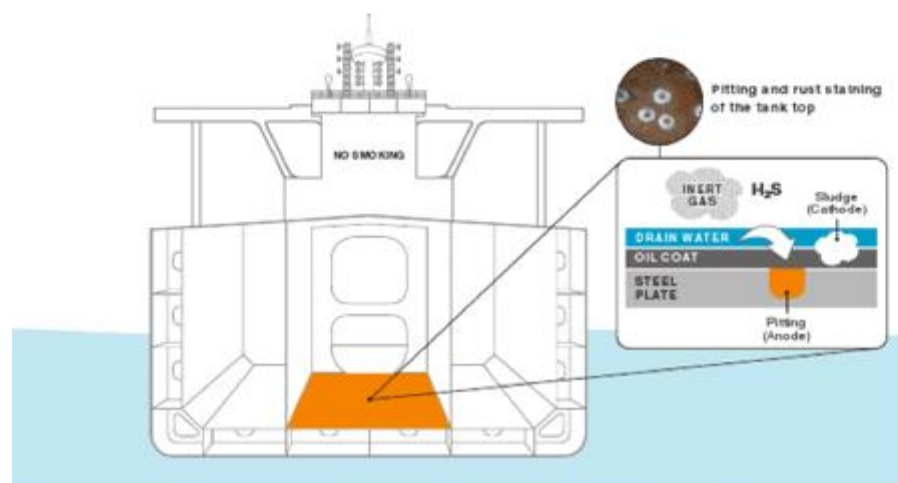
²³ MS of Mild Steel. Dit is het staal dat het meest wordt gebruikt voor de constructie van een tanker.

²⁴ TMCP staat voor Thermomechanically Controlled Process Steel. Dit is een staalsoort die werd geproduceerd door middel van een special thermodynamisch proces. Deze staalsoort is sterker maar zou gevoeliger zijn voor corrosie. (JFE, s.d.)

Geladen: uniforme
corrosie in de
dekbeplating door een
agressieve tankatmosfeer



Gelost: putcorrosie op de
bodem van de ladingtank



Figuur 29: Corrosie in een ladingtank van een olietanker. (Paint International, s.d.)

4.2 Putcorrosie van de bodembeplating van ladingtanks van olietankers

Ter hoogte van de bodembeplating van de ladingtank bevindt er zich dikwijls een laag water. Ook zijn er chloorionen en H_2S aanwezig, die afkomstig zijn uit de ruwe aardolie. Op de bodembeplating zelf bevindt er zich tevens een laag slib en oliebezinksel. Deze olielaag zal een beschermend effect hebben en de corrosie van de bodembeplating vertragen. Helaas zijn er veel defecten in deze beschermende olielaag. Deze defecten kunnen onder andere worden veroorzaakt door waterdruppels die op de tankbodem vallen of door *crude oil washing*²⁵. Op plaatsen waar er een storing is, zal het naakte staal dienst doen als anode, terwijl de directe omgeving rond het defect dienst doet als kathode. Doordat het kathodische oppervlak zeer groot is, en het anodische oppervlak zeer klein, zal er op deze anodes hevige putcorrosie ontstaan.

Hierbij is de reactie aan de anode:



De reactie aan de kathode wordt dan:

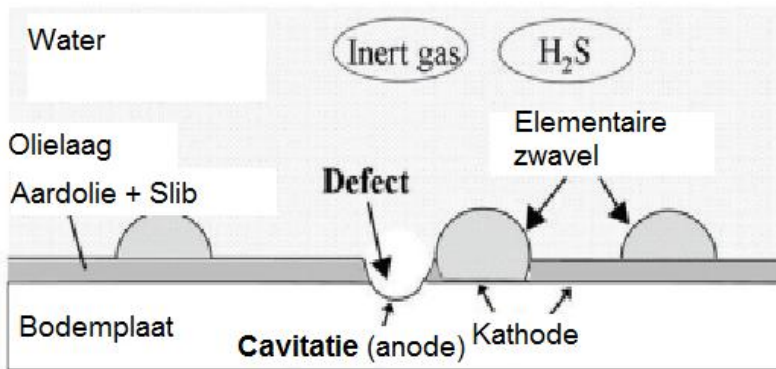


Bovendien verzamelt er zich bovenaan in de tank elementaire zwavel (S). Deze valt naar beneden op de bodembeplating. Daar zal de zwavel optreden als oxidator en de putcorrosie versnellen.



De onderstaande afbeelding toont het principe van putcorrosie in de ladingtank. (Kashima et al., 2007)

²⁵ Crude Oil Washing is het proces waarbij een ladingtank van een olietanker gewassen wordt door middel van ruwe aardolie die onder hoge druk tegen de wanden van de tank wordt gespoten. Door de lichte fracties in de aardolie zullen de viskeuze residuen oplossen en door de krachtige straal zullen de resten van ruwe aardolie worden weggespoten. (De Baere, s.d.)



Figuur 30: Putcorrosie op de bodem van een ladingtank. (Kashima et al., 2007)

Op de bodembeplating van de ladingtanks is er sprake van agressieve putcorrosie. Soms hebben enkelwandige tankers van minder dan 5 jaar oud al last van cavitaties. Zo werden er op één bepaalde tanker holtes van 2.0 tot 4.0 millimeter gemeten, met een dichtheid van 200 tot 400 putten per m^2 . De diepste cavitaties waren zelfs 7 millimeter diep. Dubbelwandige tankers lijden ook ernstig aan putcorrosie. Zo werd er een tanker onderzocht met een laadvermogen van 150,000 ton. Deze tanker was amper twee jaar oud. Toch bleek de gemiddelde diepte van de putten 2-3 millimeter te bedragen, terwijl er maxima werden ontdekt van 4 millimeter. (OCIMF, 1997)



Figuur 31: Putcorrosie. (De Baere, s.d.)

4.3 Microbiële corrosie ter hoogte van de bodembeplating

Microbiological Induced Corrosion (MIC) of microbiële corrosie is corrosie die veroorzaakt wordt door de werking van bacteriën. Een grote verscheidenheid aan bacteriën kan aangetroffen worden in alle delen van een olieproductie -en verwerkingsinstallatie. Dit gaat van het productieverblijf, over de pijpleidingen tot de ladingtanks van olietankers en meer. In ladingtanks van ruwe aardolie vinden we deze bacteriën vooral terug in de *sludge*/schilfers op de bodem van de tank. De bacteriën hebben de eigenschap dat ze zeer lang in een slapende staat kunnen overleven. Van zodra de omstandigheden gunstig worden, ontwikkelen deze bacteriën zich. Wanneer deze bacteriën een plekje vinden op het staal, kunnen deze aangroeien en putcorrosie veroorzaken. Kenmerkend hiervoor zijn de kleine brokjes met de schilferkorst erboven. Onder deze korstjes vinden we een olieachtige afzetting en een paar waterdruppeltjes. (OCIMF, 1997)

De bacteriën die het vaakst met staalcorrosie gepaard gaan zijn bacteriën die sulfaten reduceren. Deze bacteriën noemen we sulfaatreducerende bacteriën (SRB). Wanneer de omstandigheden gunstig zijn maken deze SRB grote hoeveelheden sulfiden aan. Deze kunnen neerslaan als metaalsulfiden, opgeloste sulfiden of waterstofsulfiden. (OCIMF, 1997)

Putcorrosie in tanks die door SRB gecontamineerd zijn, wordt veroorzaakt wanneer een aanzienlijke aerobe populatie (micro-organismen die enkel maar kunnen overleven in de aanwezigheid van vrije zuurstof) in de tank leeft. Deze aerobe bacteriën genereren gunstige omstandigheden voor SRB's. Gunstige omstandigheden voor SRB's zijn de aanwezigheid van water zonder opgeloste zuurstof, met oplosbare organische nutriënten zoals ammonium, nitraten, nitrieten e.a.. Doordat de aerobe micro-organismen de zuurstof verbruiken, wordt het betreffende gebied zuurstofarm en anodisch ten opzichte van de aangrenzende, relatief zuurstofrijke zones. Dit veroorzaakt de ontwikkeling van anodische corrosieputten. (OCIMF, 1997)

De vrij hoge temperatuur van ruwe aardolie is voor de meeste SRB's gepast. Mesofiele SRB's verkiezen temperaturen tussen 20°C en 50°C. Thermofiele SRB's verkiezen hogere temperaturen, namelijk boven 50°C. SRB's voeden zich voornamelijk met vetzuren, organische zuren, carboxylzuren en alcohols. Deze

worden geproduceerd door aerobe bacteriën. Tijdens hun levenscyclus extraheren de anaerobe SRB's de zuurstof van de sulfaten uit de lading. Ze oxideren hun organische voedingsbodem en vormen zo sulfiden, waaronder waterstofsulfide. Tijdens de ballastreis zijn de tanks leeg en kunnen deze oxiden terug geoxideerd worden om zure sulfaten te vormen zoals bijvoorbeeld zwavelzuur. Dit betekent dat de sulfaatcorrosiecyclus in drie stappen verloopt:

1. Aerobe omstandigheden
2. Anaerobe omstandigheden
3. Aerobe omstandigheden

De ervaring leert dat zelfs een efficiënt geïnerteerde ladingtank, voldoende zuurstof bevat om de aerobe fase te laten doorgaan. Hierdoor kan het proces zichzelf in stand houden, en is het onafhankelijk van de beladingstoestand van de tank. (OCIMF, 1997)

Sulfaatreducerende bacteriën zijn heterotroof en hebben een externe bron van organische koolstof (C) nodig. De energie voor hun metabolisme verkrijgen ze door de reductie van sulfaten (SO_4^{2-}) tot sulfiden (S^{2-}). Dit gaat volgens de vergelijking:



Bij deze reactie vervangt het sulfaat (SO_4^{2-}) de zuurstof (O_2) als elektronacceptor. Het gevolg van deze reactie is dat hoge concentraties sulfiden (S^{2-}) en/of waterstofsulfiden (H_2S) worden geproduceerd. Ook gaat de reductie van sulfaten door SRB's gepaard met de vorming van vele intermediaire reactieproducten, waaronder andere sulfaten (S^{2-}), thiosulfaten ($S_2O_3^{2-}$), en tetrathionaten ($S_4O_6^{2-}$). Deze intermediaire producten kunnen corrosief zijn voor ijzer en zijn legeringen. (OCIMF, 1997)



Figuur 32: Schade veroorzaakt door microbiële corrosie. (Intertanko, 2002)

4.4 Versnelde uniforme corrosie van de dekbeplating

De bovenkant van de ladingtank is onderhevig aan uniforme corrosie. Normaal gezien bedraagt de corrosiesnelheid 0.10 millimeter per jaar. Niettemin ontdekten sommige eigenaars dat het dek van hun tankers tot 0.25 millimeter per jaar aan dikte verliest.

Chevron onderzocht in 2000 de corrosie in de ladingtanks van haar olietankers. Hierbij ontdekte men dat bij een bepaald type olietanker er opvallend veel roestschilders van het dek naar beneden vielen. In dit geval corrodeerde de dekbeplating aan een relatief lage snelheid van 0.02 tot 0,1 millimeter per jaar. Echter, de corrosiesnelheid van de voorste ladingtanks bedroeg 0.1-0.25 millimeter per jaar, wat twee tot drie keer sneller is dan normaal.

Op een Suezmax tanker bedraagt de plaatdikte van de midscheepse dekbeplating 15-17 millimeter. Aan de voorste ladingtanks bedraagt de dikte van de dekbeplating slechts 12.5 millimeter. Daardoor zal de dikte procentueel gezien sneller afnemen en heeft corrosie een belangrijkere impact op de sterkte. (Chevron, 2000)

De versnelde corrosie wordt veroorzaakt door de agressieve tankatmosfeer. Deze bevat veel vocht dat condenseert op de dekbeplating. Bovendien wordt de corrosie versneld door H_2S , O_2 en CO_2 ²⁶ dat in de ladingtank aanwezig is. (Thygesen, 2000) De corrosieve werking van elk van deze componenten wordt later in de thesis besproken. Het onderstaande diagram toont hoe de samenstelling van de atmosfeer in een ladingtank kan zijn. (Yasunaga et al., 2003)

²⁶ De invloed van deze stoffen op corrosie in de ladingtank wordt later in deze thesis besproken.

Tabel 4: De samenstelling van de tankatmosfeer. (Yasunaga et al, 2013)

Samenstelling tankatmosfeer					
COT nummer	3S	4C	4S	5C	5S
Variant ruwe aardolie	A	B	C	D	E
Vulpercentage tank %	93	89	92	31	0
Concentratie gas					
H ₂ S (ppm.)	2790	1330	498	817	550
H ₂ O (vol%)	4,9	3,9	5,3	2,5	3,2
O ₂ (vol%)	1,7	2,5	1,8	3,9	4,9
CO ₂ (vol%)	3,7	4	2,2	10,9	13,2
SO _x (vol%)	1,3	3,9	1,6	2,7	0,7
N ₂ (vol%)	32,9	45	25,7	62	69,5
C _x H _y (vol%)	54,9	42,4	62,2	15	4,4
CO (vol%)	0	0	0	0	0



Figuur 33: Corrosie van de dekplaat. (Rauta, 2004)

4.4.1 De aanwezigheid van zwavel

4.4.1.1 Zuurcorrosie en zwavel

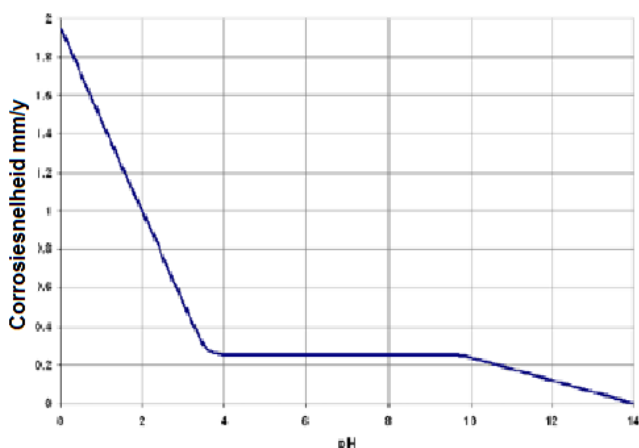
Arrhenius definieerde een zuur als een stof die in een waterig milieu in staat is om protonen af te geven. Wanneer een bepaalde stof in de ladingtank waterstofionen afgeeft in een waterig milieu zal de omgeving dus zuurder worden.



De pH of zuurtegraad van een oplossing is het negatieve Briggse logaritme van de waterstofionactiviteit in een oplossing, want de waterstofionactiviteit en de zuurtegraad staan met elkaar in verband. (Potters, 2013)

$$pH = -\log_{10}([H^+]) \quad (6)$$

Een oplossing met een neutrale zuurtegraad heeft een pH van 7. Wanneer de pH kleiner is dan 7 spreken we over een zure oplossing, wanneer de pH groter is dan 7 spreken we over een basische oplossing. Het oplossen van CO_2 en H_2S in het water dat aanwezig is in ladingtanks van ruwe aardolie, zorgt voor een zuur milieu in deze tank. Zolang de pH in de ladingtank tussen de 4 en 10 blijft, heeft de pH geen grote invloed op de corrosiesnelheid in de tank. Wanneer de pH zakt tot beneden 4.0 versnelt de corrosie. Dit komt omdat de neerslag die wordt veroorzaakt door de corrosiereactie oplost. Deze laag van neerslag die bestaat uit oxiden bedekt nu niet meer het metaaloppervlak, waardoor dit oppervlak direct contact maakt met de omgeving en sneller corrodeert. Bij oplossingen met een pH groter dan 10 daalt de corrosiesnelheid aanzienlijk. Dit komt omdat de snelheid waarmee zuurstof reageert met $Fe(OH_2)$ tot het beschermende Fe_2O_3 toeneemt. Hierdoor worden de oxides dichter bij het metalen oppervlak gevormd. Daardoor zullen de deze sneller geneigd zijn op het oppervlak neer te slaan. Bijgevolg zal er een beschermende passivatielaag gevormd worden, die corrosie hindert. (hygesen, 2000)



Figuur 34: Het verband tussen de corrosiesnelheid en de pH. (Roberge, 2010)

In aardolietanks komt zwavel voor. Dit komt omdat zwavel al in de aardolie zit en omdat SO_2 voorkomt in inert gas. Ter hoogte van de onderzijde van de dekbeplating vormt zich elementaire zwavel (S). Deze elementaire zwavel hecht zich eerst aan de onderkant van de dekbeplating, waarna deze begint af te brokkelen en op de bodembeplating terechtkomt. Ter hoogte van de bodembeplating bevindt zich water en ook ter hoogte van de onderkant van de dekbeplating vormt er zich condenswater wanneer deze beplating 's nachts afkoelt. De aanwezige elementaire zwavel reageert nu met water tot H_2S . (Kashima et al, 2007)

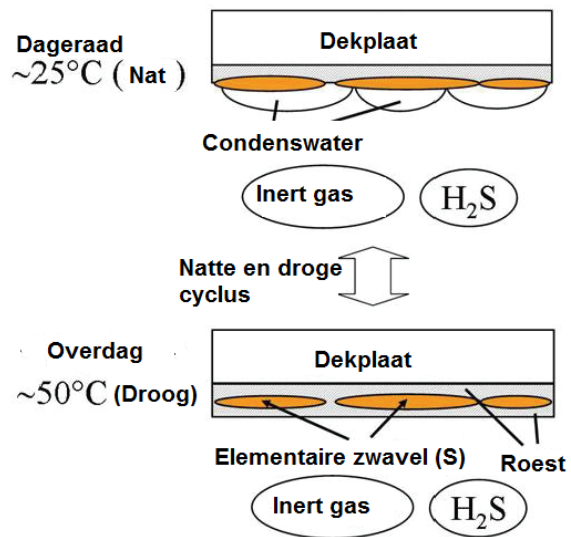


Wanneer waterstofsulfide oplost in water vormt dit een zwak zuur. Dit gebeurt volgens het volgende mechanisme:



Bij deze reactie komen waterstofionen vrij waarbij de zuurtegraad stijgt. Door het veroorzaken van een stijging van de zuurtegraad versnelt corrosie. (zie Figuur 34)

Ter hoogte van de dekbeplating wordt corrosie vooral versneld door de in de atmosfeer aanwezige H_2S . Wanneer er zich 's nachts condens vormt, volgt deze het reactiemechanisme (7) en daalt de pH van het condenswater. Op de bodem wordt corrosie vooral versneld door de elementaire zwavel, die van de onderste dekbeplating gebrokkeld is. Deze reageert eerst nog volgens (7) om daarna te reageren volgens (8). (Kashima et al, 2007)



Figuur 35: De vorming van elementaire zwavel aan de onderzijde van de dekbeplating. (Kashima et al, 2007)

4.4.1.2 Pyrofoor ijzer en zwavel

Pyrofoor komt van pyro (vuur) en for (dragen). Pyrofoor ijzer is dus ijzer dat spontaan vlam kan vatten wanneer het blootgesteld wordt aan de vrije atmosfeer. (Jeffries, 2010)

In de ladingtank reageert het roest van het ijzer met het aanwezige H_2S tot pyrofoor ijzer, water en elementaire zwavel. Dit kan gebeuren in een zuurstofarme/ inerte atmosfeer volgens de volgende vergelijking: (Jeffries, 2010)



Deze reactie is een endotherme reactie, wat betekent dat de hoeveelheid energie in de reactieproducten hoger is dan de hoeveelheid energie in de reagentia. Het pyrofoor ijzer, FeS , bevat dus veel energie. Wanneer pyrofoor ijzer plots in contact komt met zuurstof in de atmosfeer oxideert het zeer hevig. (Jeffries, 2010)



of



Bij deze hevige exotherme oxidatie wordt aanzienlijk veel hitte ontwikkeld. Deze hitte kan genoeg zijn om ontvlambare gassen in de tank te laten ontbranden. Om dit te voorkomen moet de tank inert zijn. Als de tank toch moet blootgesteld worden aan lucht moet dit langzaam en geleidelijk gebeuren. Indien mogelijk moeten de pyrofore roestschilfers verwijderd worden. (Jeffries, 2010)



Figuur 36: Pyrofoor ijzer dat hevig oxideert. (Jeffries, 2010)

4.4.2 Waterstof-geïnduceerde scheurvorming (Hydrogen Embrittlement)

De reactie tussen waterstofsulfide (H_2S) en ijzeroxide (Fe_2O_3) zal water (H_2O), vrije waterstof (H_2) en ijzersulfide (FeS) creëren.

SSC

De vrije waterstof (H_2) die hierbij wordt gevormd zal door het staal worden opgenomen. In het staal zal de waterstof zich tussen de grenzen van de kristallen van het staal bevinden. Dit kan resulteren in waterstof-geïnduceerde scheurvorming.

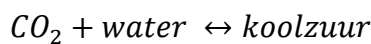
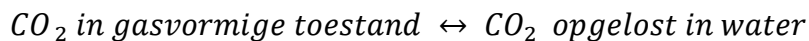
Wanneer de waterstof in het staal dringt bij een lage spanning, zullen er scheurtjes ontstaan die zich in een willekeurige richting vormen. Wanneer het staal onder spanning staat, kunnen de scheurtjes zich ontwikkelen in de richting van de uitgeoefende spanning. Dit tweede fenomeen is belangrijk omdat het de trekkracht van het staal sterk doet afnemen. Hierdoor kan de structuur van het schip ernstig beschadigd raken. (Rauta et al, s.d.)



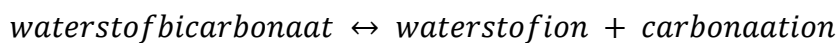
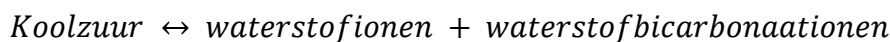
Figuur 37: Scheurtjes in het staal door waterstof geïnduceerde scheurvorming. (Rauta et al, s.d)

4.5 Corrosie door CO₂

De atmosfeer van de ladingtank van een olietanker bevat CO₂. Dit gas blijft achter in de tank na het gebruik van inert gas. Zo kan het IG-systeem van VLCC met laadcapaciteit van 300 000 m³ tot 12 ton CO₂ per reis produceren. Vervolgens vormt CO₂ een zwak carbonzuur door op te lossen in water dat aanwezig is in de ladingtank. (Rauta et al, s.d) Het reactiemechanisme gaat als volgt.



Hierna dissocieert het koolzuur in twee stappen gedeeltelijk in bicarbonaat en carbonaat. (Koteeswaran, 2010)



Bij deze reacties komen waterstofionen vrij. Hierdoor daalt de pH en stijgt de zuurtegraad van het milieu waardoor corrosie versneld wordt. (Koteeswaran, 2010)

De totale reactie die we bekomen kan dan neergeschreven worden als de volgende vergelijking:



Aan deze vergelijking zien we dat CO₂ gepaard gaat met de vorming van het corrosieproduct FeCO₃.

Buiten deze gegeven reacties kan ook de reductie van waterstofionen plaatsvinden.



Nu merken we dat deze reactie elektronen nodig heeft. Deze elektronen zijn afkomstig van $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ wat betekent dat het ijzer zal worden aangetast.



Aan de kathodische reacties zijn een proton reductie en de directe reductie van koolzuur zoals volgt:



(Koteeswaran, 2010)

4.6 Aanwezigheid van O_2

In de ladingtank bevindt er zich zuurstof. De aanwezigheid zuurstof die opgelost is in water versnelt de kathodische reactie. Dit kan weergegeven worden door de volgende reactievergelijkingen



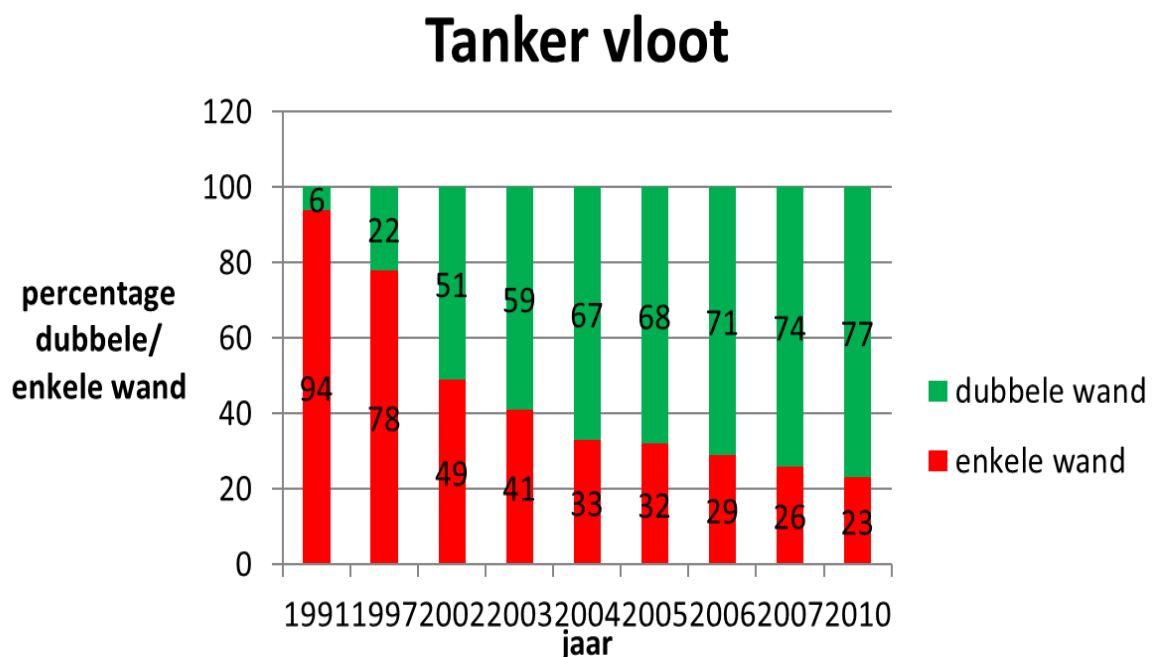
De aanwezige zuurstof neemt deel aan twee reacties. Zuurstof depolariseert de kathode (20) en (21) en het oxideert (23) de ijzerionen. Fe^{2+} tot Fe^{3+} . Fe^{3+} vormt dan ijzerhydroxide ($Fe(OH)_3$). IJzerhydroxide is een bruin poeder dat onoplosbaar is in water. Eenmaal de zuurstofionen opgebruikt zijn, is deze reactie niet meer mogelijk. Wanneer er veel dizuurstof aanwezig is of wordt aangevoerd kan de reactie blijven doorgaan en corrodeert er meer metaal. (De Baere, 2011)

5 Bijzonderheden die invloed hebben de corrosie in ladingtanks van olietanker

Het vorige hoofdstuk besprak de corrosie in een ladingtank van een olietanker. Normaal kan deze corrosie niet zo agressief zijn. Echter, een aantal zaken zorgt ervoor dat de corrosie in een ladingtank extreem hevig kan zijn of onopgemerkt blijft. Dit hoofdstuk bespreekt de belangrijkste bijzonderheden en hun invloed op corrosie in ladingtanks, voor de invoering van PSPC-COT.

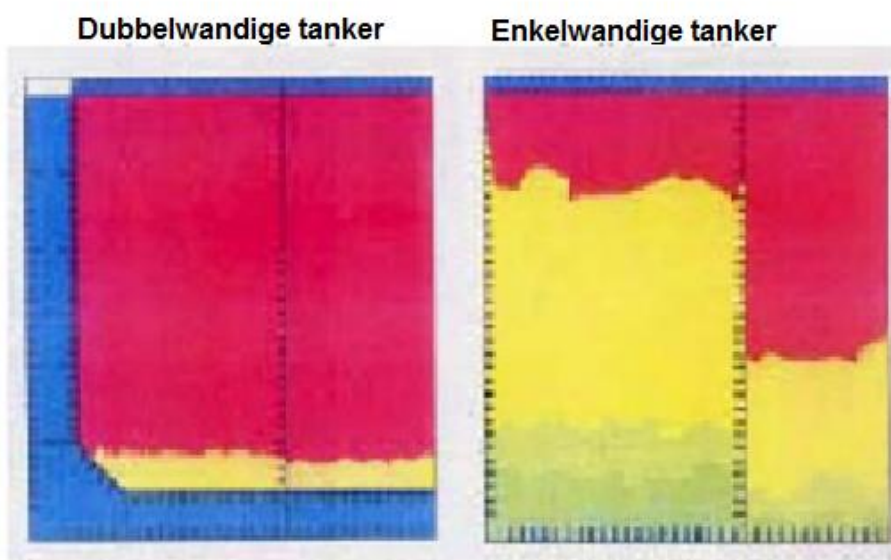
5.1 Dubbele wand

In 1989 strandde de olietanker *Exxon Valdez* op Bligh Reef in de wateren van Prince William Sound in Alaska. Hierbij lekte 4 miljoen liter olie in zee en werd het lokale ecosysteem bijna volledig vernietigd. Als gevolg van deze ramp werd in 1990 de *Oil Pollution Act* (OPA) ingevoerd. OPA verplicht alle ruwe aardolie tankers die zich in de wateren van de V.S. begeven, om uitgerust te zijn met een dubbele wand. Een dubbele wand betekent dat er tussen de buitenste en de binnenste wand van het schip minstens 2 meter ruimte moet zijn. Hierdoor is de kans op een olielek bij een aanvaring of stranding aan lage snelheden kleiner. Twee jaar later introduceerde IMO ook dubbelwandigheid volgens MARPOL bijlage 1. Enkelwandige tankers werden langzaam uitgefaseerd. (Intertanko, 2002)



Figuur 38: Percentage dubbelwandige tankers versus percentage enkelwandige tankers (Intertanko, 2007)

Tankers met een dubbele wand zijn onderhevig aan het thermosfles-effect. Een thermoskan bestaat uit twee wanden die gescheiden zijn van elkaar door een luchtledige ruimte. Hierdoor is de overdracht van warmte tussen de warme inhoud en de koude omgeving zeer laag, en blijft de koffie gedurende lange tijd op een hoge temperatuur. Hetzelfde gebeurt bij een dubbelwandige tanker. Door de dubbele wand komt de warme ruwe aardolie ladingtank niet rechtstreeks in contact met het koudere zeewater. Hierdoor blijft de ruwe aardolie gedurende een langere tijd op een hogere temperatuur. Zelfs gedurende de ballastreis, wanneer de ladingtank leeg is, ligt de temperatuur van deze tank tot 15°C hoger dan de temperatuur van het zeewater. (OCIMF, 1997)



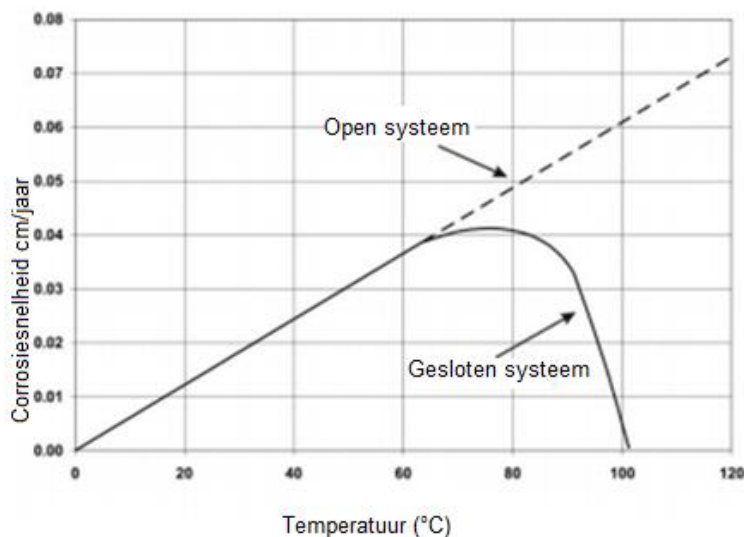
Figuur 39: Temperaturen in de ladingtanks van een enkelwandige tanker en van een dubbelwandige tanker. (Rauta, 2002)

Door deze hogere temperaturen neemt de corrosiesnelheid toe. Dit komt omdat bij een hogere temperatuur de diffusiesnelheid²⁷ toeneemt. Hoe hoger de diffusiesnelheid van de reagentia in een chemische reactie (in dit geval zijn dit corrosiereacties), hoe hoger de reactiesnelheid. Zo kan een temperatuurstijging van 10°C al leiden tot een verdubbeling van de corrosiesnelheid. (OCIMF, 1997) Eenmaal de temperatuur verder stijgt, neemt de snelheid waarmee de corrosie toeneemt af. Dit komt omdat bij een hogere temperatuur de oplosbaarheid van onder andere de corrosiebevorderende bestanddelen zuurstof (O_2) en koolstofdioxide CO_2

²⁷De diffusiesnelheid is de snelheid waarmee de deeltjes van een stof zich willekeurig verspreiden. (Potters, 2013)

afneemt. Hierdoor piekt de corrosiesnelheid rond de 60°C à 70°C alvorens terug te dalen. (De Baere, 2011)

Nog een gevolg van deze hoge temperaturen is een toename van bacteriële groei in de ruwe aardolie ladingtank. Deze bacteriën stimuleren en veroorzaken microbiële corrosie. (OCIMF, 1997)



Figuur 40: Het verband tussen de temperatuur en de corrosiesnelheid. (De Baere, 2011)

5.2 Slechte kwaliteit van het inert gas

Om een explosieve tankatmosfeer te vermijden, moet men voorkomen dat de zuurstofconcentratie in de tank te hoog ligt. Dat doet men door inert gas (IG) in de tank te injecteren. Dit is een gas dat minder dan 5% zuurstof bevat. Zo zal de zuurstofconcentratie in de tank onder 8% blijven en blijft de tank inert. Door het lage zuurstofgehalte kan IG de corrosie vertragen. Zo blijkt dat proper²⁸ IG de corrosie in de ballasttanks van TI-tankers doeltreffend kan vertragen. (De Baere, 2017) Echter, in ladingtanks van olietankers blijkt dat de zuurstofconcentratie van inert gas niet laag genoeg is om corrosie doeltreffend te stoppen. (OCIMF, 1997)

Het IG voor de ladingtanks wordt geproduceerd door flue gas²⁹ te scrubben³⁰. Daardoor is dit inerte gas van lage kwaliteit. Zo bevat het IG water, roet, zwavel en

²⁸ Voor deze proef werd inert gas gebruikt dat niet één keer, maar twee keer gereinigd werd door een scrubber. Daardoor bevatte het IG een minimum aan corrosieve bestanddelen. (De Baere, 2016)

²⁹ Flue gas' zijn uitlaatgassen van de hoofdmotor, generatoren, reservegeneratoren, etc. die door de schouw van het schip worden afgevoerd.

³⁰ Scrubben is, in deze context, het reinigen en afkoelen van flue gas.

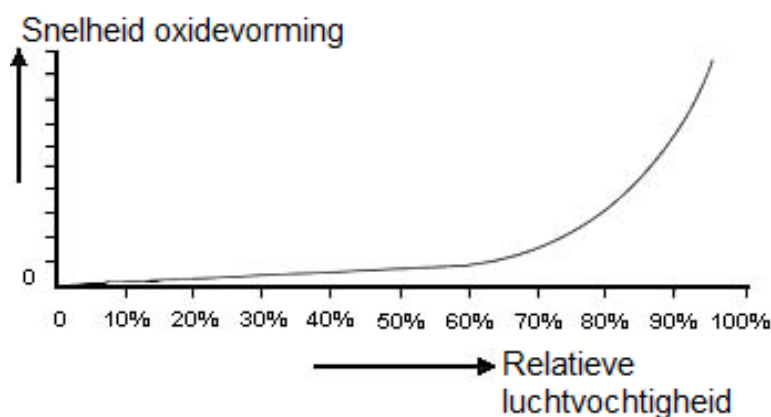
CO₂. Zoals eerder besproken zal elk van deze stoffen de corrosie in de ladingtanks versnellen. Bij het slecht functioneren van de IG-installatie zullen er meer corrosieve stoffen aanwezig zijn, waardoor corrosie nog meer wordt versneld. Daarom is het belangrijk is degelijk onderhoud van de IG-installatie zeer belangrijk. (OCIMF, 1997)

5.3 Aanwezigheid van water

In de ladingtanks van ruwe aardolie is water aanwezig. Dit kan op verschillende manieren in deze ladingtanks terechtkomen: (OCIMF, 1997)

- Water dat eerder in de verwarmingsspoelen condenseerde en door een lek in de ladingtank sijpelt.
- Water dat overblijft na het gebruiken van zwaar weer ballast.
- Overblijvend waswater.
- Water dat blijft staan omdat de tank niet op een effectieve manier gedraineerd werd.
- Water dat zich in de ruwe aardolie lading zelf bevindt.
- Water dat sijpelt uit lekken van aanliggende ballasttanks.
- Condenswater van inert gas. Doordat het warme inert gas eerst door een *scrubber* en door een *seal* passeert, is dit gas zo goed als verzadigd met water. (OCIMF, 1997) Inert gas kan tot 300 gram water per kubieke meter bevatten. Daardoor kan een VLCC tot 12 ton water in de ladingtank krijgen per keer dat het schip geïnerteerd wordt. (Rauta et al, s.d.)

Hierbij is water vooral afkomstig van inert gas en van de lading zelf. De aanwezigheid van water versnelt corrosie en is dus onwenselijk. Bovendien vormt de aanwezigheid van water samen met de hoge temperatuur in de ladingtank een vochtige atmosfeer. Hoe vochtiger de atmosfeer, hoe hoger de corrosiesnelheid van de beplating die met deze atmosfeer in contact staat. Zolang de vochtigheid onder 40% blijft wordt corrosie nauwelijks versneld maar eenmaal de vochtigheid boven de 60% stijgt, neemt de corrosiesnelheid sterk toe. (OCIMF, 1997)



Figuur 41: De snelheid van oxidevorming in functie van de relatieve luchtvochtigheid. (Dehumidification Technologies, 2017)

5.4 Het gebruik van hoogwaardig staal (HTS)

HTS of *Hight Tensile Steel* is een hoogwaardige staalsoort met een hoge treksterkte tussen 265 en 390 N/mm². Sommige tankers bestaan voor 80-90 % uit HTS. Daardoor worden er voor eenzelfde sterkte dunnere platen gebruikt. (OCIMF, 1997) Doordat de corrosiesnelheid in mm/jaar nog altijd even hoog ligt, (Yasunaga et al., 2003) zal plaatdikte procentueel gezien sneller afnemen. Hierdoor is hoogwaardig staal gevoeliger voor corrosie. (OCIMF, 1997)

5.5 Buigen van de scheepsstructuur

Terwijl het schip vaart, werken enorme krachten in op de romp. Deze krachten veroorzaken al dan niet dynamische vervorming van de romp (bijvoorbeeld *hogging*³¹/*sagging*³²). Dit veroorzaakt stresscorrosie. Normaal gezien vormt er zich bij corrosie van staal/ijzer een oxidelaag op de oppervlakte van het metaal. Deze oxidelaag heeft een beschermende werking en vertraagt corrosie. Wanneer dit metaal voortdurend vervormt onder invloed van externe krachten, brokkelt de beschermende oxidelaag af waardoor het staal telkens opnieuw onbeschermd bloot komt te staan aan de corrosieve omgeving en de corrosiesnelheid toeneemt. (OCIMF, 1997)

³¹Buigen van de romp het schip waarbij de stevens naar beneden buigen.

³²Buigen van de romp van het schip waarbij de stevens van het schip naar boven buigen.

5.6 Aanwezigheid van slib en schilfers

Op de bodem van een ladingtank vinden we soms grote hoeveelheden slib/schilfers terug. Dit bestaat uit restanten van vorige ladingen en schilfers die losgekomen zijn van de dekbeplating. Zoals eerder vermeld vormt dit slib de ideale biotoop voor bacteriën. Ook maakt het bezinksel de bodem van de tank oneffen door de afvoergaten te verstoppert en zo de tankdrainage te remmen³³. Door deze oneffenheden kunnen bepaalde delen van de tank zich eerder gedragen als een kathode en andere delen meer als een anode. Hierdoor worden corrosiecellen tot stand gebracht. (OCIMF, 1997) De onderstaande afbeelding toont een vlok die is losgekomen van de dekbeplating. Dergelijke schilfers bestaan voor 40 massaprocent uit roest en voor 60 massaprocent uit zwavel. Dat betekent dat er geen rechtstreeks verband bestaat tussen de hoeveelheid schilfers en de corrosie van de dekbeplating.



Figuur 42: Een typische roestschilfer van de dekbeplating die wordt aangetroffen op de bodem van de tank. (Intertanko, 2002)

Tabel 5: Samenstelling van slib op de bodem van een gegeven ladingtank. (Kashima et al. 2007)

Samenstelling slib in massa%		
Slib	Aardolie	Vaste stoffen
A	21,9	78,1
B	29,5	70,5

³³ Het verstoppert van de afvoergaten vormt geen probleem bij dubbelwandige tankers, omdat zij een vlakke tankstructuur hebben. (De Baere, 2017)

Tabel 6: Samenstelling vaste stoffen in massaprocent. (Kashima et al., 2007)

Samenstelling vaste stoffen in massa%			
Slib	α - FeOOH	Fe_3O_4	Andere
A	36	22	42
B	50	16	34

5.7 Gebrek aan toegangsmogelijkheden

Tankers zijn immense structuren. Om een VLCC volledig te inspecteren moet de inspecteur 11 kilometer klimmen, 300 000 m² oppervlak inspecteren, 1200 kilometer lasnaad nakijken, 58 kilometer longitudinale verstijvers nakijken, duizenden knieën nazien en 10 700 m² aan bodembeplating goedkeuren. Als 1 % van het oppervlak van de bodem last heeft van putcorrosie, zal dit leiden tot 85 000 gaatjes die moeten hersteld worden.(Rauta, 2004). Bovendien zijn de toegangsmogelijkheden³⁴ vaak gebrekkig of niet aanwezig omdat het geld kost om deze te installeren. (Intertanko, 2005) Daardoor is het moeilijk om de tanker volledig te inspecteren.

De ISM³⁵ code verplicht scheepseigenaars om degelijk onderhoud uit te voeren. Het probleem is dat er nog geen uniforme procedures en richtlijnen verplicht zijn. Doordat de tanker moeilijk te inspecteren is, en doordat er geen nauwkeurige procedure bestaat in verband met het inspecteren ervan, kan corrosie op bepaalde plaatsen onopgemerkt blijven. (EMSA, 2005)

Door aangepaste toegangsmogelijkheden en nauwkeurige inspectieprocedures te verplichten daalt het risico dat bepaalde delen van de tank niet of niet voldoende grondig gecontroleerd worden. Bovendien zou de werf een plan moeten voorzien dat toont welke plaatsen van het schip het gevoeligst zijn voor corrosie en hoe je die plaatsen het best kan inspecteren. Daarbij wordt de inspectie nog makkelijker door het gebruik van een verfstelsel dat een lichte kleur heeft. Door deze lichte kleur zullen corrosie en verfdefecten makkelijker detecteerbaar zijn. (Intertanko, 2005)

³⁴ Voorzieningen zoals ladders, trappen en relingen die ervoor zorgen dat de ladingtank toegankelijk is. (Rauta, 2004)

³⁵ ISM staat voor 'International Safety Management'.



Figuur 43: Door hun enorme omvang zijn tankers moeilijk te inspecteren. (Rauta, 2004)

5.8 Een minder robuuste scheepsstructuur door minder strenge klasseregels

Doorheen de jaren worden tankers steeds minder robuust gebouwd. Dit komt omdat de klasseregels minder streng zijn. De modulus van de midscheepse sectie en de modulus van de bodemsectie zijn in deze context van groot belang. De modulus van de midscheepse sectie geeft aan hoeveel weerstand de romp kan bieden tegen *hogging*, terwijl de modulus van de bodemsectie een idee geeft van de weerstand tegen *sagging*. Zo daalde de vereiste sterkte van het schip met 10 % tussen 1976 en 1996. De onderstaande tabel toont de vereiste moduli voor de ULCC³⁶ 'Hellespont Embassy', die werd gebouwd in 1976 onder de naam Aiko Maru. Het schip werd twee maal onderzocht en de eerste kolom toont de datums van deze onderzoeken, namelijk juli 1996 en mei 2001.

De kolom 'Vereist' toont de vereiste moduli voor respectievelijk het dek en de bodem, vastgelegd volgens de CSR in 1976 en in 1992. De kolommen 'Spant 83' en 'Spant 71' tonen de gebouwde en gemeten moduli ter hoogte van de betreffende spanten van het schip gemeten in juli 1996 en mei 2001. De tabel toont hoe de vereiste sterkte voor een tanker met 10 % is gedaald. De tabel toont dat de Hellespont Embassy sterker werd gebouwd dan vereist. In 1996, na 3 à 4 procent van haar plaatdikte kwijt te zijn door corrosie, was het nog altijd veel sterker dan nieuwe schepen die gebouwd waren volgens de regels van 1992. (Devanney, 2006)

Tabel 7: Sectiemoduli in m³. (Devanney, 2006)

Sectiemodulus in m ³							
		Vereist	Vereist	Spant 83		Spant 71	
Datum meting	Locatie	1976	1992	Gebouwd	Gemeten	Gebouwd	Gemeten
jun/96	Dek	108,1	97,3	115,7	111,4	115,7	111,6
jun/96	Bodem	108,1	97,3	129,1	125,1	129,1	123
mei/01	Dek	108,1	97,3	115,2	111,5	115,2	111,6
mei/01	Bodem	108,1	97,3	129,1	123,9	129,1	122,2

³⁶ ULCC staat voor *Ultra Large Crude Carrier*. Dit is een benaming voor gigantische tankers die een draagvermogen hebben dat groter is dan 300 000 ton. (van Dokkum, 2003)

5.9 Negatieve tolerantie op de dikte van het staal

Vroeger konden staalfabrieken de dikte van het staal niet nauwkeurig bepalen. Daardoor gebruiken classificatiemaatschappijen bepaalde toleranties op de dikte van het staal. Als de tolerantie 2 millimeter was, betekende dit dat een plaat waarvan de dikte minder dan 2 millimeter te groot of te klein was nog geaccepteerd werd. Klasseregels staan toe dat het staal 0.30 millimeter dunner is dan bedoeld. (IACS, 1999) Daardoor kan een plaat die volgens het bouwplan van het schip 15 millimeter dik is, in feite maar 14.7 millimeter dik zijn. Rekening houdende met het feit dat de gemiddelde corrosiesnelheid van staal ongeveer 0.1 millimeter per jaar bedraagt³⁷, betekent dit dat de eigenaar een schip kan accepteren dat al 3 jaar van haar corrosiemarge kwijt is, nog voor dat het in vaart wordt genomen. (Intertanko, 2002)

³⁷ Startend met de bouw van het schip zal ongeverfd staal al beginnen te corroderen aan een snelheid van ongeveer 0.1 millimeter per jaar. (Intertanko, 2002)

6 De gevolgen van versnelde corrosie

Het vorige hoofdstuk besprak de corrosie in de ladingtanks van olietankers. Wanneer versnelde corrosie optreedt, blijft dit niet zonder gevolgen. Dit hoofdstuk bespreekt de belangrijkste nadelen van corrosie en hun invloed op de veiligheid van het schip, de lading en de bemanning.

6.1 De belastingen op het schip en het belang van een sterke romp

Een schip is onderhevig aan statische krachten. Enerzijds werkt de zwaartekracht in op de massa van het schip. Het gewicht per sectie is niet altijd even groot en hangt af van o.a. de vorm, grootte en beladingstoestand van het schip. Anderzijds werkt de Archimedeskracht in op het onderwaterschip. De grootte van de Archimedeskracht is hierbij gelijk aan het totale gewicht van de vloeistof die verplaatst wordt door het onderwaterschip. Het totale gewicht van het schip ($\sum F_g$) en de totale Archimedeskracht ($\sum F_a$) op het schip moeten aan elkaar gelijk zijn. (Heylbroeck, 2015)

Som van alle archimedeskrachten die worden veroorzaakt door elk deel

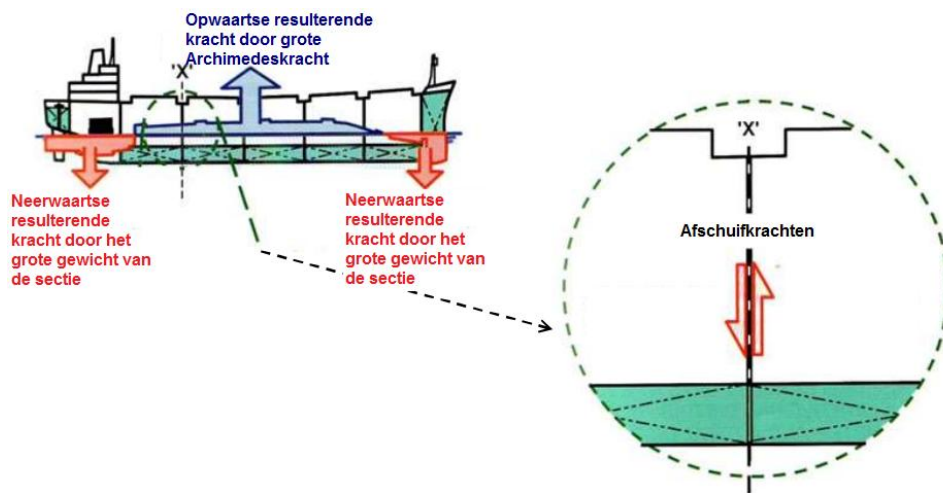
van het onderwaterschip = Het totale gewicht van het schip

$$\sum F_a = \sum F_g \quad (1)$$

Per sectie hangt de grootte van de Archimedeskracht af van het volume van het ondergedompelde onderwaterschip³⁸. Doordat het ondergedompelde volume van het schip niet gelijk is over de volledige lengte van het schip, zal de Archimedeskracht niet even groot zijn per sectie. Ter hoogte van de volle, volumineuze midscheepse secties is de Archimedeskracht groot, terwijl deze kleiner zal zijn ter hoogte van de fijne, smalle achterste secties. (Heylbroeck, 2015)

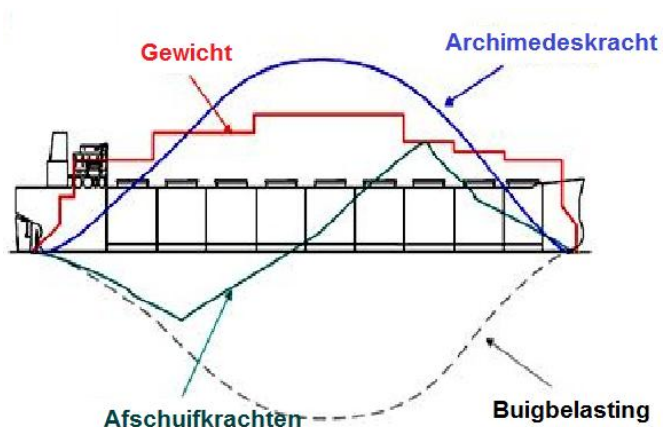
Per sectie zullen het gewicht en de Archimedeskracht niet gelijk zijn aan elkaar. Wanneer de éne sectie netto een opwaartse kracht ondergaat, terwijl een sectie die ernaast ligt netto een neerwaartse kracht ondergaat, ontstaat er een kracht tussen deze twee secties. Deze krachten, die de secties van elkaar af willen doen 'schuiven', noemen we afschuifkrachten. (Heylbroeck, 2015)

³⁸ De Archimedeskracht hangt ook af van de massadichtheid van het water. De massadichtheid van het water is voor een gegeven moment voor elke sectie zo goed als gelijk. Daarom wordt er niet dieper ingegaan op deze parameter.



Figuur 44: Afschuifkrachten op een schip. (Willemen, 2016-2017)

Door de afschuifkrachten die op de romp inwerken, ontstaan er buigmomenten. Dit zijn momenten die het schip proberen langsscheeps te vervormen. Wanneer het schip door de buigmomenten met de stevens naar boven wijst spreken we over *sagging*. Als het schip door de buigmomenten met de stevens naar beneden wijst spreken we over *hogging*. Doordat de buigbelasting evenredig is aan het kwadraat van de scheepslengte, zal de buigbelasting snel groter worden naarmate het schip langer wordt. (Heylbroeck, 2015) Figuur 45 toont het gewicht, de Archimedeskracht, de afschuifkrachten en de buigbelasting op een schip in 'hogging'.

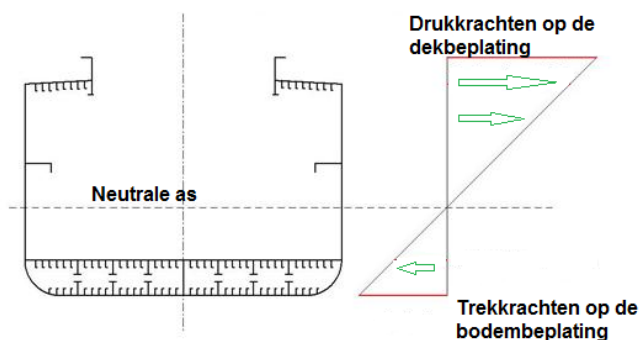


Figuur 45: Inwerking van verschillende krachten op het schip. (Marine Survey Practice, 2013)

Wanneer het schip onderhevig is aan een buigbelasting, zal één zijde van het schip een trekkracht ondergaan: de trekzijde. De andere zijde zal een drukkracht ondergaan: de drukzijde.

De denkbeeldige as tussen de drukzijde en de trekzijde heet de neutrale as. Op de neutrale as is het staal niet onderhevig aan trekbelasting, noch aan drukbelasting. Hoe verder weg van de neutrale as, hoe groter de trek- of duwkracht op het staal. Bijgevolg ontstaan de grootste belastingen ter hoogte van de dek- en bodembeplating, die het verst van de neutrale as liggen. Daardoor is de sterkte van deze zones bepalend voor de draagkracht van het schip. Het is dus zeer belangrijk dat deze platen in goede staat zijn. (Heylbroeck, 2015)

“Het dek is heilig!” (Heylbroeck, 2015)



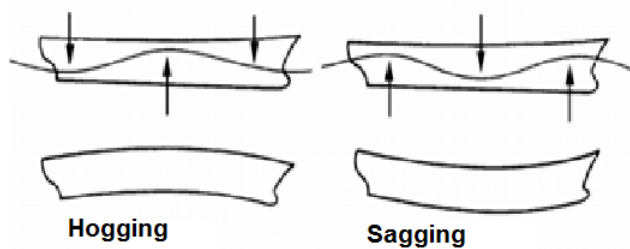
Figuur 46: Trek- en drukkrachten tijdens sagging. (Marine Survey Practice, 2013)

Naast de buigmomenten die veroorzaakt worden door de statische belasting op de romp in vlak water, ontstaan ook buigmomenten door de golven. De belasting als gevolg van wind- en zeegang kunnen we het makkelijkste verklaren door ze als één lange resulterende golf te beschouwen die inwerkt op het schip.

Stel dat het midscheeps gedeelte van de romp zich in het golfdal bevindt, terwijl de boeg en het achterschip zich elk ter hoogte van een golftop bevinden. Ten opzichte van de situatie in vlak water zal de opwaartse kracht aan de uiteinden toenemen, terwijl de opwaartse kracht aan het middenschip zal afnemen. Daardoor zal het schip last hebben van *sagging*. (Heylbroeck, 2015)

Wanneer de middensectie zich ter hoogte van de golftop bevindt, en de uiteinden zich ter hoogte van de golftoppen, zal het schip opbuigen. Daardoor zal het schip last

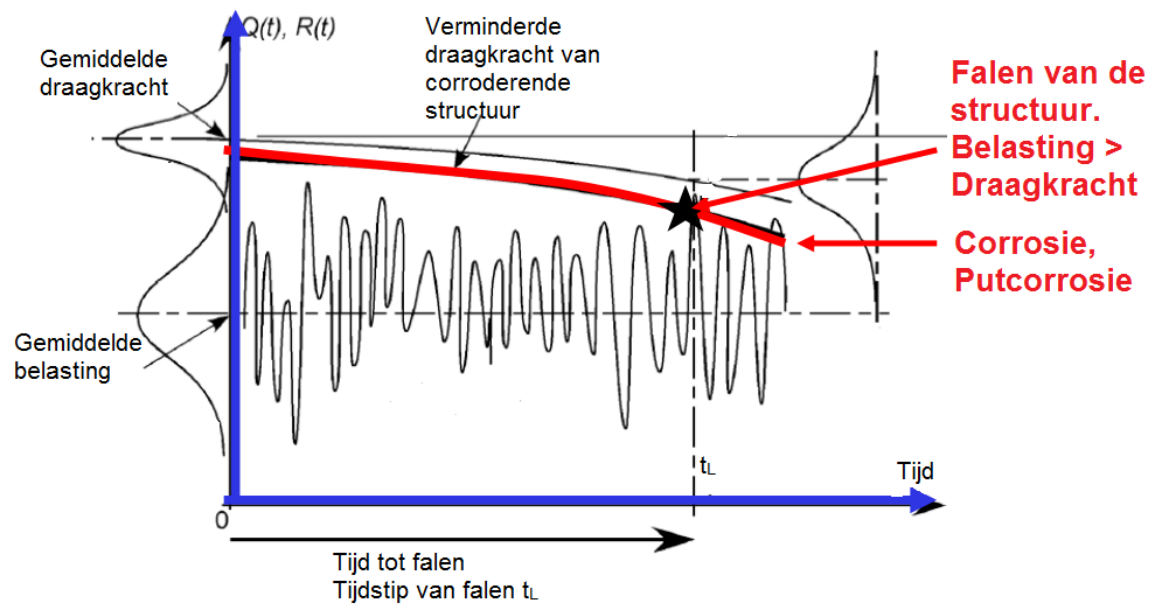
hebben van *hogging*. (Heybroeck, 2015) De onderstaande figuur toont respectievelijk een schip dat aan het hoggen is en een schip dat aan het saggen is.



Figuur 47: Hogging en sagging. (Fagerberg, 2004)

Figuur 48 toont hoe een structuur kan falen door corrosie. Het schip ondergaat een bepaalde gemiddelde belasting, die wordt voorgesteld door de zwarte fluctuerende lijn. De lijn fluctueert omdat structuren soms worden blootgesteld aan piekbelasting. Zo zal een schip bij kalm weer vaak minder belast worden dan tijdens een storm. De bovenste, zware kromme toont de draagkracht van de constructie. Een schip is zodanig ontworpen dat, tijdens de beoogde levenscyclus, de draagkracht altijd groter is dan de maximale belasting. Deze draagkracht zal doorheen de levenscyclus langzaam afnemen, bijvoorbeeld door vermoeiingsverschijnselen en corrosie. De rode kromme toont de verminderde draagkracht door onverwacht hevige corrosie van de structuur. (Melchers, 2017) Wanneer een tanker sterker verzwakt is door corrosie dan verwacht, bestaat het risico dat een piekbelasting de draagkracht overschrijdt. Dit kan catastrofale gevolgen hebben. Een dergelijke ramp gebeurde met de Erika. Deze olietanker was ernstig verzwakt door hevige corrosie in de ballasttanks (zie rode kromme). Vervolgens voer het schip in een storm, waardoor de romp werd onderworpen aan piekbelastingen die de verminderde draagkracht overschreden. Uiteindelijk brak het schip in twee. (BEA, 1999)

Doordat de corrosie in ladingtanks van olietankers hevig en onvoorspelbaar kan zijn, bestaat het risico dat de beplating van de bodem en van het dek aanzienlijk wordt verzwakt. Hierdoor zal de draagkracht van het schip afnemen. Bijgevolg bestaat het risico dat een piekbelasting (bijvoorbeeld een piek in de buigbelasting) de draagkracht van het schip overschrijdt. Daardoor kan er ernstige structurele schade ontstaan. In het ergste geval kan het schip zelfs in twee breken. Daarom is het uiterst belangrijk om de corrosie in de ladingtanks te vermijden. (EMSA, 2005)



Figuur 48: Falen van een corroderende structuur. (Melchers, 2017)



Figuur 49: De olietanker 'Erika'. (The New York Times, 2011)

6.2 Vermoeiing van de scheepsconstructie

Vermoeiing ontstaat wanneer een onderdeel of een constructie onderhevig is aan aanhoudende, dynamische belasting. Hierdoor ontstaan vermoeiingverschijnselen met daaraan gekoppeld een risico op barsten. Bij een aanhoudende belasting zullen deze scheuren blijven groeien. Veel verschillende scheepstypes kunnen last hebben van vermoeiing. Meestal doet dit faalmechanisme zich voor op oudere scheepstypes, maar het kan zich ook manifesteren binnen de eerste vijf jaar van de levenscyclus. De belangrijkste oorzaken van vermoeiing zijn gebrekkige details in het ontwerp van de scheepsstructuur, corrosie, spanningsconcentraties, het verkeerde gebruik van HTS en het optimaliseren van scheepsstructuur. Merk hierbij op dat bij een halvering van de dikte van het staal, de gevoeligheid van het staal voor vermoeidheid verviervoudigt! Wanneer een structuur hevig corrodeert, zal het risico op vermoeiingsverschijnselen exponentieel stijgen. Daarom is het bijzonder belangrijk corrosie te verhinderen. (EMSA, 2005)

6.3 Ongevallen gerelateerd aan corrosie

De levenscyclus van een schip kan op allerlei manieren tot een einde komen: aanvaring, contactschade, brand, explosie en verouderde (voortstuwings)machines zijn slechts enkele van de vele oorzaken. Eén van de belangrijkste oorzaken is echter een stille doder: corrosie. (De Baere et al., 2010)

Het '*Centre for Tankship Excellence*' is een organisatie die onafhankelijk onderzoek voert naar de veiligheid van tankers en praktische adviezen ontwikkelt om de tankvaart veiliger te maken. Deze organisatie legde een database aan over ongevallen en incidenten met tankers van 1960 tot 1995. De database bevat 872 incidenten met tankers waarvan 119 ongevallen werden veroorzaakt door een structureel defect aan de romp.

Tabel 8: Structureel falen. (CTX, 2006)

Falen van de scheepsstructuur 1960-2007			
Oorzaak	Aantal incidenten	Dodelijke slachtoffers	Gelekte olie (l)
Scheur in de romp	48	0	18 425 199
Falen of lekken van een pijp	3	0	7 778
Vermoedelijk falen van de romp	17	104	328 778 950
Corrosie	51	378	1 946 502 000
Totaal	119	482	2 293 713 927

Veel van deze incidenten deden zich voor bij zwaar weer en in open zee. Het slechte weer is echter niet de oorzaak van de ramp, maar wel de zwakke scheepsstructuur. Dit komt omdat tankers ontworpen zijn om zwaar weer aan te kunnen. In het geval van deze tankers was de constructie niet sterk genoeg ontworpen, of was de constructie te verzwakt door corrosie. In totaal werden 51 van de 119 incidenten in verband gebracht met corrosie.

Wanneer de oorzaak corrosie is, wordt er niet gespecificeerd welk deel van het schip gecorrodeerd was. In veel gevallen gaat het vooral om corrosie in de ballasttanks (vb. Erika), maar in sommige gevallen is corrosie in de ladingtanks ook van belang. (Devanney, 2006)

6.4 Olielekken

Door versnelde corrosie in de ladingtank kunnen gaatjes of cavitaties ontstaan. Daardoor kan de lading uit de tank lekken. (OCIMF, 1997)

Als de olie van de ladingtank naar de ballasttanks lekt, zal het ballastwater vervuild worden. Wanneer dit ballastwater gelost wordt, zal het milieu verontreinigd worden en kan de eigenaar beboet worden. (EMSA, 2005)

Wanneer er bij een enkelwandig tanker een gat ontstaat in de bodem, kan de aardolie onopgemerkt in zee lekken. Als het lek ontdekt wordt, kan het terug gestopt worden door olie van de betreffende tank over te pompen naar een andere tank tot de hydrostatische druk in de tank kleiner is dan de hydrostatische druk buiten de tank. Daardoor zal het zeewater eerder naar binnen lekken, dan de olie naar buiten. Dit principe heet HBL oftewel *Hydrostatic Balanced Loading*. (Devanney, 2006) Echter, om dit te kunnen doen moet er een ledige tank beschikbaar zijn. Dit is niet altijd het geval. (De Baere, 2017)

In een dubbelwandige tanker bestaat het risico dat de lading in de ruimte tussen de dubbele wand vloeit. Daar zal de lading dampen afgeven. Wanneer de concentratie aan ladingdampen in de ruimte tussen de twee wanden te hoog wordt, bestaat het risico dat atmosfeer in deze ruimte explosief wordt. De bemanning kan een dergelijke atmosfeer detecteren met behulp van gasdetectiesystemen, of tijdens een inspectie. Echter, gasdetectiesystemen zijn niet altijd even betrouwbaar. (Devanney, 2006) Bovendien weet de bemanning niet altijd hoe ze goed hoe ze met deze systemen moeten werken. (De Baere, 2017) Verder inspecteren sommige crews de dubbelwandige ruimte soms jarenlang niet. Bijgevolg neemt het risico op een explosie toe. (Devanney, 2006)

Om het gevaar van explosieve dampen beter te begrijpen, kan er gekeken worden naar rampen met andere schepen, die ook werden veroorzaakt doordat residuen van aardolie explosieve dampen veroorzaakten die ontploften. Een voorbeeld van zo'n calamiteit is de ramp met de OBO *Berge Istra*. Een OBO is een scheepstype dat ontworpen is om zowel natte als droge lading te vervoeren (Ore-Bulk-Oil). Zo kan een OBO een lading aardolie vervoeren tijdens de heenreis en een droge bulkclading vervoeren tijdens de terugreis. Om dit mogelijk te maken lijken deze schepen sterk op olietankers.

Op december 1970 voer de Berge Istra voor de Braziliaanse kust. Het schip had haar lading ruwe aardolie gelost en haar centertanks waren geladen met steenkool. Echter, de geleedigde wingtanks waren niet goed geïnerteerd en bevatten ontvlambare oliedampen, waardoor de tanks explodeerden en het schip zonk. (Dagbladet, 2006)

Ook de ramp met de Surf City en de ramp met de ABT Summer werden veroorzaakt door de aanwezigheid van explosieve dampen. In beide gevallen lekte er aardolie van de ladingtank naar de midscheepse ballasttank. In beide gevallen explodeerde de tank terwijl deze door de 1^{ste} officier onderzocht werd. Andere schepen die hetzelfde lot ondergingen waren; 'Andros Patria, Castillo De Bellver, Khark 5, Irenes Serenade, Haven, Betelgeuse, Odessy, en Hawaii Patriot. (CTX, 2017)



Figuur 50: De Berge Istra. (Lettens, 2011)

6.5 De Nakhodka

In 1997 voer de Russische tanker Nakhodka in zwaar weer voor de Japanse kust. Het schip was volledig geladen en mat 20,000 ton. Door het zware weer brak de tanker in twee en samen met de boeg spoelde meer dan de helft van de lading aan op de Japanse kust. (Devanney, 2006) Duizend kilometer kustlijn raakte vervuild en meer dan 200,000 man werd gemobiliseerd om in totaal 36,000 m³ afval op te ruimen. Daardoor was de ramp met de Nakhodka de grootste olieramp uit de geschiedenis van Japan. (Maritime Cyprus, 2015)

Toen de Japanse autoriteiten het schip onderzochten bleek dat de romp ernstig verzwakt was door corrosie. De dikte van de dekbeplating was gemiddeld voor 40 % afgenomen. Het dek was zo zwaar gecorrodeerd dat de onderdekse ondersteunende elementen (spanten en verstijvers) los waren gekomen van het dek. Daardoor was het schip zodanig verzwakt dat het zelfs een gemiddelde storm niet aan had gekund. Door de dynamische krachten, de statische krachten en de verzwakte constructie begon het dek te knikken³⁹ en brak het schip in twee. (Devanney, 2006)

Om te voorkomen dat andere tankers zoals de Nakhodka in twee breken, is het belangrijk dat corrosie in ladingtanks beperkt blijft.



Figuur 51: De boeg van de Nakhodka tijdens bergingswerken. (Maritime Cyprus, 2015)

³⁹ Knikken is een faalmechanisme waarbij een gegeven structureel element plots en hevig faalt onder compressie. (Heylbroeck, 2015)

6.6 De Castor

De Castor was een tanker die 29,500 ton benzine vervoerde. Op Nieuwjaarsavond 2000 kwam het schip in zwaar weer terecht voor Marokkaanse kust. Niet veel later ontstond er een scheur van 26 meter lang in het dek, ter hoogte van ladingtanks 4P, 4C en 4S. Het schip zocht toevlucht bij havens van 9 verschillend landen maar werd telkens geweigerd. Daardoor voer het schip nog 40 dagen rond tot het uiteindelijk gelost kon worden via feederschepen.

Toen ABS het schip onderzocht, bleek dat er sprake was van extreme corrosie in de ladingtanks. Bepaalde delen van de dekbeplating waren gecorrodeerd tot de dikte slechts 6 millimeter bedroeg. Bepaalde verstijvers, die gemaakt waren uit staal dat 15 millimeter dik was, waren gecorrodeerd tot 4.4 millimeter. Vier verstijvers die de dekbeplating van ladingtank nummer 4 bakboord versterkten, waren volledig verdwenen. Bovendien waren de lasnaden tussen de verstijvers van de dekbeplating en de dekbeplating voor 95% weggeroest. Ten slotte ontdekte men op bepaalde plaatsen dat de corrosiesnelheid van het staal 0.7 millimeter per jaar bedroeg.

Deze extreme corrosie werd veroorzaakt door een combinatie van een relatief agressieve lading en het gebrek aan een corrosiepreventiesysteem. Gelukkig voor het schip was er sprake van sagging, waardoor de scheur op het dek niet groter werd, maar toegedrukt. De bodem, die voor 10 % gecorrodeerd was, was zodanig gebouwd dat deze 34% sterker was dan de huidige regels verplichten. (Devanney, 2006)



Figuur 52: De scheur in het dek van de Castor. (Intertanko, 2002)

7 Verfsystemen

In de vorige hoofdstukken werd de corrosie in ladingtanks van olietankers en de gevolgen ervan besproken. Vanaf nu zullen de nadruk leggen op corrosiebescherming van de ladingtanks van een olietanker door het gebruik van een verfsysteem.

Eerst wordt er besproken hoe een verfsysteem corrosie zal vertragen. Vervolgens wordt er besproken uit welke componenten een verfsysteem bestaat. Ten slotte wordt er gekeken naar parameters die relevant zijn bij het verfproces, zoals het uitharden van de verf en de invloed van de temperatuur op de prestaties van het verfsysteem.

7.1 Beschermend effect van de verf

Bij een chemische reactie wordt de reactiesnelheid beperkt door de snelheid van de traagste stap. (Schalm, pers. Comm. 2017) Een verfsysteem kan het transport van ionen tegenhouden of vertragen. Bijgevolg kan de toevoer van ionen naar het substraat de traagste stap worden, waardoor corrosie van het staal wordt vertraagd. (Eliasson, 2017)

Echter, een verfsysteem verhindert niet altijd de doorgang van H_2O en ook niet de doorgang van zuurstof. (Eliasson, 2017) de onderstaande tabel toont hoeveel zuurstof en hoeveel H_2O bepaalde verven doorlaten per dag. Hierbij wordt de doorlaatbaarheid uitgedrukt door het aantal het milligram (mg) van de bepaalde stof dat op één dag (d) door één vierkante centimeter (cm^2) verfoppervlak kan dringen. Zo bedraagt de minimale waterpermeabiliteit die nodig is om corrosie van bloot staal in stand te houden $0.003-0.06 \text{ mg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$. (Funke, 1975)

Tabel 9: Doorlaatbaarheid van een verflaag van $100 \mu\text{m}$ dik. (Funke, 1975)

Doorlaatbaarheid van een verflaag van $100 \mu\text{m}$ dik.			
Soort verf	Permeabiliteit door waterdamp ($\text{mg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	Soort verf	Permeabiliteit door zuurstof ($\text{mg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
Alkydlak	2.3	Alkydlak	0.0103
Gechloreerd rubber	1.0	Gechloreerd rubber	0.022
Pomlyurethaan	1.4	Epoxy-polyamide	0.0073

Polyesterhars	1.3	VC-VA colopolymeer	0.0075
Koolteerepoxy	1.1	Nitrocellulose	0.106
Fenolhars	1.1	/	/
Nitrocellulose	4.8	/	/

7.2 Componenten

Verf bestaat zelden uit één enkele stof maar wel uit meerdere componenten. Elk component vervult zijn eigen taak en kan een cruciale rol spelen bij het verlengen van de levensduur en de effectiviteit van het verfsysteem.

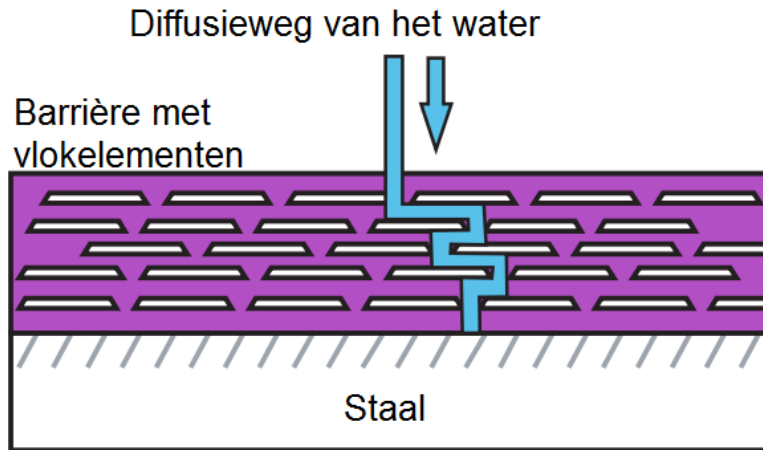
7.2.1 Het bindmiddel (*binder*)

Het bindmiddel van een verf is de stof die de componenten van de verf bijeen houdt en die er voor zorgt dat de verf een goede film vormt op het oppervlak. De dichtheid en de samenstelling van het bindmiddel zijn van bijzonder belang bij het bepalen van de permeabiliteit, de chemische weerstand en de weerstand tegen UV-straling. (Schweitzer, 2006)

7.2.2 Pigmenten (*pigments*)

Pigmentdeeltjes worden met de verf gemengd en hebben twee functies. Ten eerste zorgen deze deeltjes ervoor dat het verfsysteem een bepaalde kleur krijgt. Ten tweede kunnen de pigmentdeeltjes het substraat beschermen tegen corrosie. Vlokvormige pigmentdeeltjes vormen vlokken die evenwijdig georiënteerd zijn met het substraat. Wanneer de concentratie van de vlokken groot genoeg is, zullen deze de wateradsorptie door het verfsysteem vertragen doordat het water een langere weg moet afleggen voordat het bij het substraat geraakt.

Bij kathodische bescherming zal een relatief onedel metaal optreden als anode. Doordat de anode zichzelf opoffert, blijft het kathodische staal intact. Op dezelfde manier kunnen pigmentdeeltjes in de verf het onderliggende staal beschermen. Wanneer deze pigmentdeeltje relatief onedel zijn, zullen ze zich opofferen en het staal kathodisch beschermen. Bovendien zullen deze corroderende pigmenten een passivatielaag vormen die het staal bijkomend beschermt tegen corrosie. (Schweitzer, 2006)



Figuur 53: Vlokelementen beschermen het substraat. (ABS, 2007)

7.2.3 Solventen (*solvents*)

Een solvent is een stof die de viscositeit van het bindmiddel en van andere stoffen doet afnemen waardoor de verschillende componenten goed met elkaar mengen tot een homogene laag. Door de verlaagde viscositeit zal de verf kunnen aangebracht worden als een dunne, gladde en doorlopende film. De snelheid waarmee het solvent verdampt, is mede bepalend voor de eigenschappen van de verf eenmaal die gedroogd is. Wanneer een solvent niet volledig verdampt en gedeeltelijk in de verf gevangen zit, kan dit leiden tot het vroegtijdig falen van het verfsysteem door blaasvorming en *pinholing*⁴⁰ (Schweitzer, 2006). Echter, wanneer een solvent te snel verdamp, kunnen er ook verfdefecten ontstaan. Zo bestaat bijvoorbeeld het risico dat de verf geen uniforme laag vormt, maar draadvormige filamenten. Dit fenomeen heet *cobwebbing*. Bijgevolg is het belangrijk dat er een goed evenwicht wordt gevonden in het gebruik van solventen. (Ponderosa Paint, 1982)

Synthetische harsen zoals vinyl, epoxy en gechloreerd rubber zijn meestal meer polair en lossen beter op in polaire solventen. Het probleem met deze polaire solventen is dat ze sterker zullen worden vastgehouden door synthetische harsen en minder snel zullen verdampen. Daarom is het uiterst belangrijk dat verven met dergelijke harsen voldoende tijd krijgen om te harden en te drogen. (Schweitzer, 2006)

⁴⁰ Dit is een verfdefect waarbij er kleine putjes voorkomen op de verflaag. (Schweitzer, 2006)

Verfsystemen worden ontworpen om in bepaalde omstandigheden te worden aangebracht. Wanneer de omstandigheden waarin de verf wordt aangebracht veranderen, moeten ook de solventen worden aangepast. Bij koudere omstandigheden zullen solventen moeten worden gebruikt die sneller verdampen terwijl er bij warm weer solventen moeten worden gebruikt die minder snel verdampen. Sommige verven, onder andere moderne epoxyverven, hebben geen solventen meer nodig vanwege hun lage eigen viscositeit en zijn dus solventvrij, wat heel positief is naar het milieu toe. (Schweitzer, 2006)

7.2.4 Additieven (*additives*)

Additieven zijn stoffen die aan een verf worden toegevoegd om het verfsysteem bepaalde eigenschappen te geven. Zo kan kobalt worden toegevoegd aan alkydverven om deze beter te doen drogen. Meestal bevat de verf minder dan 0.1% van een dergelijk additief. Verder kunnen er nog andere additieven worden toegevoegd voor andere doeleinden. Zo kan zinkoxide aan de verf worden toegevoegd om achteruitgang door hitte te vertragen. Vinylverven bevatten vaak 1% carboxylzuur om voor een sterkere adhesie te zorgen tussen de verf en het metaal.

7.2.5 Extenders (*fillers*)

Extenders zijn stoffen die worden gebruikt om het volume van de verf te vergroten. *Extenders* kunnen ook gebruikt worden om bepaalde eigenschappen van het verfsysteem, zoals impactweerstand en zuurstofpermeabiliteit, te verbeteren. Bovendien kunnen *extenders* weerstand bieden tegen het doorzakken van de verf. Zowel talk als mica zijn twee stoffen die vaak worden gebruikt als *extender*. Vooral mica wordt gebruikt omdat deze *extender* de permeabiliteit voor zuurstof en waterstof doet dalen. Hierbij zal mica werken als een barrière waardoor water en zuurstof een langere weg zullen moeten afleggen en minder snel tot op het metaal zullen worden geabsorbeerd. (Schweitzer, 2006)

Sommige kwalitatieve verven verliezen hun beschermende eigenschappen door het gebruik van het verkeerde vulmiddel. Zo wordt er soms gebruik gemaakt van hygroscopische vulmiddelen zoals klei of calciumcarbonaat. Deze vulmiddelen absorberen vocht, waardoor het verfsysteem zwelt en zwakker wordt. (Schweitzer, 2006)

Het probleem bij het selecteren van een kwalitatief verfsysteem is dat werven geen belang hebben bij het aanbrengen van een verfsysteem dat duurzaam is. Voor hen is het vooral belangrijk dat het verfsysteem makkelijk aan te brengen is in een groot aantal verschillende omgevingen en weersomstandigheden, door slecht getrainde applicateurs. Bovendien is het belangrijk dat het verfsysteem snel kan uitharden, zodat de bouw van het schip op schema blijft. Aangezien werven een belangrijke klant zijn van de verffabrikanten, bestaat de kans dat zij hun verfsysteem aanpassen aan de eisen van de werf door het toevoegen van bijvoorbeeld accelerators en verdunners. (Devanney, 2006) Dit probleem kan worden opgelost door een kwaliteitstest voor de verven te verplichten,.

7.3 Het *curen* van de verf

Het *curen* van een verfsysteem is het proces waarbij een verfsysteem uithardt van een vloeibare naar een vaste toestand. Hoewel de meeste verven uitharden door een chemische reactie, harden sommige verven uit doordat het oplosmiddel verdampt. Op basis van het uithardingsproces kunnen verven in twee categorieën worden onderverdeeld:

- Niet converteerbare verven (verdamping en coalescentie).
- Converteerbare verven (polymerisatie) (NACE, 2011)

7.3.1 Niet converteerbare verven

Thermoplastische verven zijn verven die uitharden door verdamping van het oplosmiddel zonder dat er een chemische verandering optreedt. Wanneer de verf is aangebracht, kan deze terug worden verwijderd door de verf op te lossen met het oorspronkelijk oplosmiddel. Daarom wordt deze verf ook converteerbare verf genoemd. Bij het gebruik van thermoplastische verven verdampen grote hoeveelheden oplosmiddel. Daardoor komen veel vluchtige stoffen vrij, die schadelijk zijn voor het milieu. Door de strengere regels voor de uitstoot van vluchtige stoffen worden deze verven nu minder vaak gebruikt. Thermoplastische verven worden onderverdeeld naargelang hun hardingsmechanisme: verdamping of coalescentie.

Bij verdampen hardt de verf enkel door het verdampen van het oplosmiddel waardoor een geharde verflaag goed te overschilderen is. Wanneer er een nieuwe laag wordt aangebracht zal dit de onderliggende laag gedeeltelijk terug doen oplossen. Daardoor zullen de twee verflagen in elkaar vloeien om terug een stevige hechting te vormen. (NACE, 2011)

Bij coalescentie wordt een oppervlakte-actieve stof (*surfactant*) gebruikt om minuscule deeltjes van het verfharz te doen zweven in water. Hierbij treedt het water op als oplosmiddel. Eens het water verdampt fuseren de verfpartikels met elkaar waardoor ze een harde verflaag vormen. Om coalescentie te vergemakkelijken kunnen kleine hoeveelheden organisch oplosmiddel gebruikt worden. (NACE, 2011)

7.3.2 Converteerbare verven

Converteerbare verven zijn verven die uitharden door een polymerisatiereactie⁴¹. Hierbij ondergaat de verfharz een chemische reactie waardoor de verf niet terug oplosbaar is in de oorspronkelijke solvent. Bij het uitharden van thermostatische verven is een juiste mengverhouding zeer belangrijk. (Hempel, 2013) Tijdens het polymeriseren kunnen verschillende soorten chemische reacties plaatsvinden: fusie, hydratatie, co-reactie en oxidatie.

Bij fusie heeft de polymerisatiereactie een bepaalde temperatuur nodig om plaats te vinden. Daardoor is fusie een gedwongen uithardingsproces dat in gang wordt gezet door warmte. Een voorbeeld van een verf die op deze manier uithardt is *fusion-bond epoxy*. (NACE, 2011)

Bij een co-reactie wordt het uithardingsproces gestart doordat twee verschillende componenten (harz en verharder) met elkaar gemengd worden. Hierbij is de eerste stap het verdampen van de solvent. De tweede stap is polymerisatie of *cross-linking*. Deze stap kan meerdere dagen tot meerder weken in beslag nemen. Na het mengen heeft de gebruiker nog maar een beperkte hoeveelheid tijd om de verf aan te brengen. Deze tijd wordt *pot life* genoemd. Ook is er een minimale tijdsduur, nodig tussen het mengen en het aanbrengen: de inductietijd.

⁴¹ Polymerisatie is het proces waarbij korte monomeermoleculen binden tot langere polymeren. (Young et al. , 1987)

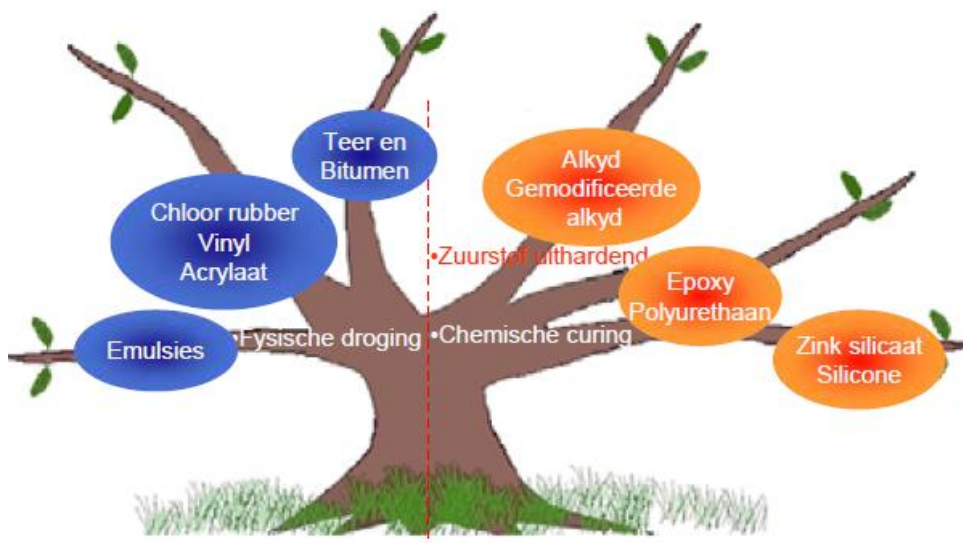
Bij *hydratatiecoatings* kan de verf enkel harden wanneer de luchtvochtigheid hoog genoeg ligt. Hierbij kan de verf verraderlijk snel droog lijken.

Oxiderende verven harden door te reageren met zuurstof uit de atmosfeer. Daardoor kan men het harden versnellen door het toevoegen van zuurstof. Wanneer de laag te dik is, bestaat het risico dat de bovenste laag hardt en de doorgang van zuurstof verhindert. Daardoor blijft de onderste laag vloeibaar en kan er *wrinkling* of verschrompeling optreden van de bovenste laag. (NACE, 2011)

7.4 Factoren die het harden beïnvloeden

Bij het harden van de verf is de mengverhouding van de verfcomponenten van cruciaal belang. Als deze verhouding niet wordt gerespecteerd zal de verf niet juist kunnen harden. Daardoor bestaat het risico dat het verfsysteem geen doeltreffende bescherming zal bieden of vroegtijdig faalt.

Daarom is het belangrijk om het technisch informatieblad te raadplegen alvorens de verfcomponenten samen te voegen.



Figuur 54: Verven die thermostatisch harden (fysische droging) en verven die thermoplastisch harden (chemische curing). (Hempel, 2013)

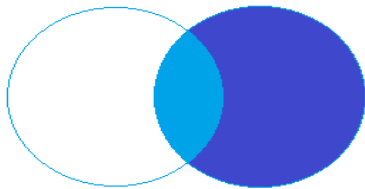
7.5 Adhesie

De adhesie is de mate waarin een verflaag hecht aan een substraat. Adhesie is één van de belangrijkste parameters die de levensduur van het verfsysteem bepaalt. Hierbij is het uiterst belangrijk dat de verf goed wordt aangebracht. De adhesie van een verf op een substraat wordt veroorzaakt door verschillende factoren. We focussen op secundaire/polaire bindingen die de adhesie veroorzaken, omdat deze krachten de belangrijkste invloed hebben.

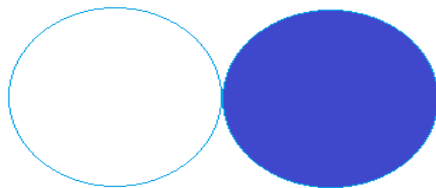
Wanneer er binnen een molecule een ongelijke distributie is van elektrische ladingen, kunnen er polaire bindingen ontstaan. Een verf die atomen bevat met zeer grote verschillen in elektronegativiteit zal een sterkere tendens hebben om polaire bindingen te ondergaan met het substraat. Daardoor zal de adhesie toenemen.

Om adhesie van een verf te verzekeren is het belangrijk dat de verf zo goed mogelijk in contact komt met het substraat. Daarom is het belangrijk dat het staal vrij is van roest, vuil, vet en andere contaminaties die het contact tussen het substraat en de verf verhinderen.

Covalente bindingen: gedeelde elektronen



Ionbindingen: geen gedeelde elektronen



Figuur 55: Covalente bindingen en ionbindingen. (Eliasson, 2017)

Ook kan adhesie worden veroorzaakt door mechanische bindingen. In dit geval zal de verflaag zich mechanisch verankeren met gaatjes, poriën, holtes, spleetjes en andere oppervlakteruwheden. Deze oppervlakteruwheid kan men bekomen door het oppervlak te stralen. Daardoor kan de mechanische adhesie tot vijf keer groter worden. (Schweitzer, 2005)

Wetting of natmaken is het proces waarbij vloeibare verf over het staal loopt. (Vanderstockt, 2014) Hierbij speelt de oppervlaktespanning van de vloeistof een grote rol. Als de oppervlaktespanning van de vloeistof groter is dan die van de vaste stof, zal de vloeistof parelen. Daardoor zal het staal niet “nat” worden. Hierbij speelt de samenstelling en de properheid van het staal een rol. Daarom is het uiterst belangrijk dat het substraat vrij is van vuil, vet en contaminaties zodat de verf niet parelt. Epoxyverven hebben over het algemeen een redelijk grote oppervlaktespanning. Echter, wanneer deze is opgelost in een solvent daalt de oppervlaktespanning en verbetert de *wetting*.

Niet enkel de oppervlaktespanning, maar ook de viscositeit van de verf beïnvloedt het natmaken omdat een hoge viscositeit de spreiding van de verf kan bemoeilijken. Daarom worden verven soms aan een hogere temperatuur aangebracht. Zo blijft de viscositeit laag en wordt het spreiden vergemakkelijkt. (Dwight, 2009)

7.6 Cohesie

Cohesie is de hechting tussen verschillende verflagen onderling. Een verfsysteem dat een slechte cohesie heeft, kan delamineren. Enkele van de belangrijkste parameters hierbij zijn: de verhouding tussen het pigment en het bindmiddel, het moleculair gewicht van het bindmiddel en de densiteit van het verbindingsnetwerk van de bindingsstof. (Vanderstockt, 2014) Wanneer de polymeren een hoog moleculair gewicht hebben, zal er een sterke cohesie zijn. Dat is omdat, samen met het moleculair gewicht, de lengte van de polymeerketting toeneemt. Daardoor stijgt hun vermogen om in elkaar te verstrengelen. Het voordeel van de toegenomen verstrengeling is dat de polymeernetwerken die gevormd worden groter en moeilijker uit elkaar te trekken zijn. Bijgevolg zullen de verflagen onderling beter hechten. Het nadeel van langere netwerken is dat de impactweerstand daalt waardoor dergelijke verven minder flexibel zijn en sneller breken. (Wicks, 2007)

7.7 De dikte van de verflaag

Een van de belangrijke parameters die de eigenschappen van een verfsysteem bepaalt, is de dikte van de verflaag. Wanneer de verflaag te dun is zal deze geen effectieve barrière vormen tussen het substraat en de omgeving. Echter, een te dikke verflaag is ook niet goed. Naarmate de verflaag dikker wordt zal de interne spanning toenemen. Bovendien blijft er meer solvent⁴² gevangen in de verflaag. Daarom is het belangrijk een ideale verfdikte te vinden. (Dwight, 2009) Hoewel sommige verffabrikanten vinden dat 270 µm dikte genoeg is voor een verfsysteem in een ladingtank, vereist PSPC-COT een minimale laagdikte van 320 µm. (International Paint, pers. comm., 2017) Bovendien voorziet PSPC-COT geen maximale laagdikte. De maximale laagdikte wordt dan bepaald door de voorschriften van de verffabrikant. Echter, de fabrikant heeft er geen bezwaar tegen dat de verf te dik wordt aangebracht. Wanneer de laagdikte te groot is, zal het verfsysteem sneller scheuren, waardoor het substraat kan corroderen. (De Baere, 2017)

7.8 Relatieve vochtigheid

De relatieve vochtigheid drukt uit hoeveel procent waterdamp zich ten opzichte van de maximale hoeveelheid waterdamp in de lucht bevindt, bij een bepaalde temperatuur en een bepaalde luchtdruk. (Vanderstockt, 2014) Tijdens de applicatie van de verf, het drogen en het uitharden is het belangrijk dat de relatieve luchtvochtigheid binnen bepaalde limieten blijft. Bij bepaalde soorten *curing* kan de verdamping van het oplosmiddel verhinderd worden door een te grote luchtvochtigheid. Daardoor zal de verdamping van het oplosmiddel niet goed verlopen en bestaat er een risico op oplosmiddelretentie of *solvent entrapment*. Daarentegen, verven die vocht nodig hebben om te harden zullen problemen ondervinden bij een te lage luchtvochtigheid. (Van der Kaaden, 2012)

⁴² De problemen die hierdoor worden veroorzaakt, worden later besproken in deze thesis.

7.9 Chlorides

Wanneer verfsystemen worden blootgesteld aan grote concentraties chlorides, kan hun bindstofmatrix ontbinden. Daardoor zullen de losse pigmentdeeltjes aan het oppervlak achterblijven en zal de verf haar glans en haar kleur verliezen. Deze vorm van verouderen wordt afpoederen genoemd. Hoewel de hoeveelheid gevormd poeder een indicatie is voor de aftakeling van de verf, vormt het geen maatstaf voor het dikteverlies. Desondanks zullen chlorides niet veel invloed hebben op de beschermende waarde van een epoxyverf omdat afpoederen de dikte met slechts enkele micrometers doet afnemen. (Van der Kaaden, 2012)

7.9.1 Surface volume ratio

De surface volume ratio drukt uit hoeveel vierkante meter substraat er kan geverfd worden met een gegeven volume verf. Zo raadt IPPIC⁴³ aan om in ballasttanks een *surface volume* ratio te gebruiken van 108 m²/m³.

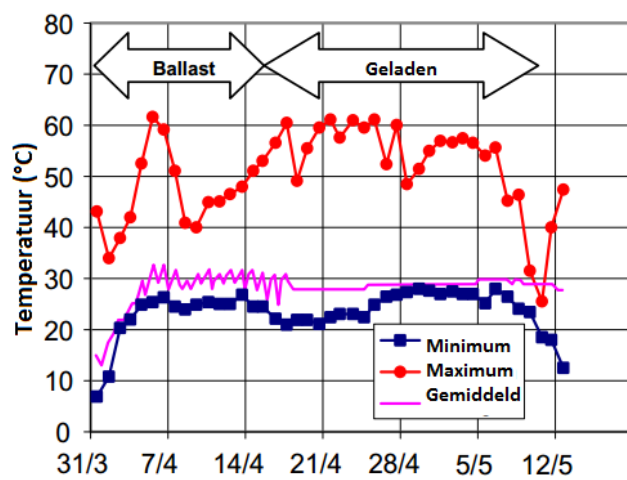
⁴³ IPPIC staat voor International Paint and Printing Ink Council. (IPPIC, 2017)

7.10 De temperatuur

De glastransitietemperatuur T_g van een verf is de temperatuur waarbij de polymeerkettingen genoeg thermische energie bevatten om uit hun verstrengeling te bewegen en te ontspannen in een losse oriëntatie. Daardoor zal het verfsysteem veranderen van een harde amorfe staat naar een rubberachtige, flexibele toestand. (Vanderstockt, 2014) Het gevolg hiervan is dat de hardheid, de plasticiteit, de permeabiliteit van water- en zuurstofmoleculen verandert waardoor het verfsysteem minder effectief wordt. Dit kan problematisch zijn in de ladingtank van een olietanker. Ten eerste heersen hoge temperaturen door de warme lading. Ten tweede wordt de dekbeplating blootgesteld aan de hitte van de zon. Hierdoor kan de temperatuur van het verfsysteem dat aangebracht is aan de onderzijde van de dekbeplating stijgen tot boven de glastransitietemperatuur. Zo ligt T_g van een epoxyverf in een ladingtank tussen 50 en 60°C. Wanneer de temperatuur van de verf vaak stijgt van onder de glastransitietemperatuur tot boven de glastransitietemperatuur (*thermal cycling*), zal het verfsysteem versneld verouderen. Om dit te voorkomen wordt het dek vaak wit geverfd, zodat de temperatuur niet te ver stijgt. Terwijl een rood dek in de Perzische golf tot bijna 60 °C verwarmd wordt, zal een wit dek zelden warmer worden dan 44°C. (Devanney, 2005) Dit werd onder andere gedaan bij de zogenaamde 'White Elephants' vb. de huidige TI Europe. (Jansen, pers. comm., 2017) Figuur 57 toont de dagelijkse temperatuursvariaties van de dekbeplating van verschillende VLCC's. De roze lijn stelt de gemiddelde temperatuur voor. De blauwe lijn toont de laagst gemeten temperaturen en de rode lijn toont de hoogst gemeten temperaturen. De X-as toont het verstrijken van de tijd. In het begin van de metingen zijn de tanks nog leeg en varen de schepen in ballast. Niet veel later zijn de tankers geladen, en zijn de ladingtanks gevuld met ruwe aardolie. De grafiek toont dat de temperatuur van de dekbeplating soms boven de 60°C Celsius ligt, zowel tijdens de ballastreis als tijdens de geladen reis. Bovendien toont de grafiek dat er sterke variaties zijn in temperatuur, waardoor er sprake kan zijn van '*thermal cycling*'. (Yasunaga et al., 2003)



Figuur 56: Door de tanker wit te verven zal de temperatuur van het verfsysteem minder snel tot boven de glastransitietemperatuur stijgen. (Devanney, 2006)



Figuur 57: Temperatuursveranderingen van de dekbeplating. (Yasunaga et al., 2003)

7.11 Verfdefecten

De levensduur van een verfsysteem is beperkt. Nadat een verfsysteem is aangebracht zal het beginnen te verouderen om uiteindelijk af te takelen, waarna er corrosie kan optreden. Bovendien kunnen verfsystemen vroegtijdig falen. Hierbij zullen blaasvorming, scheurvorming, delaminatie en roestvorming doorheen de verflaag de belangrijkste verfdefecten zijn. (Eliasson, 2017) Als het verfsysteem vroegtijdig faalt, wordt de ladingtank niet meer beschermd tegen corrosie. Daarom is het belangrijk te begrijpen welke verfdefecten er voorkomen, hoe deze veroorzaakt worden en hoe ze kunnen voorkomen worden. Dit deel zal de belangrijkste verfdefecten bespreken.

7.11.1 Blaasvorming

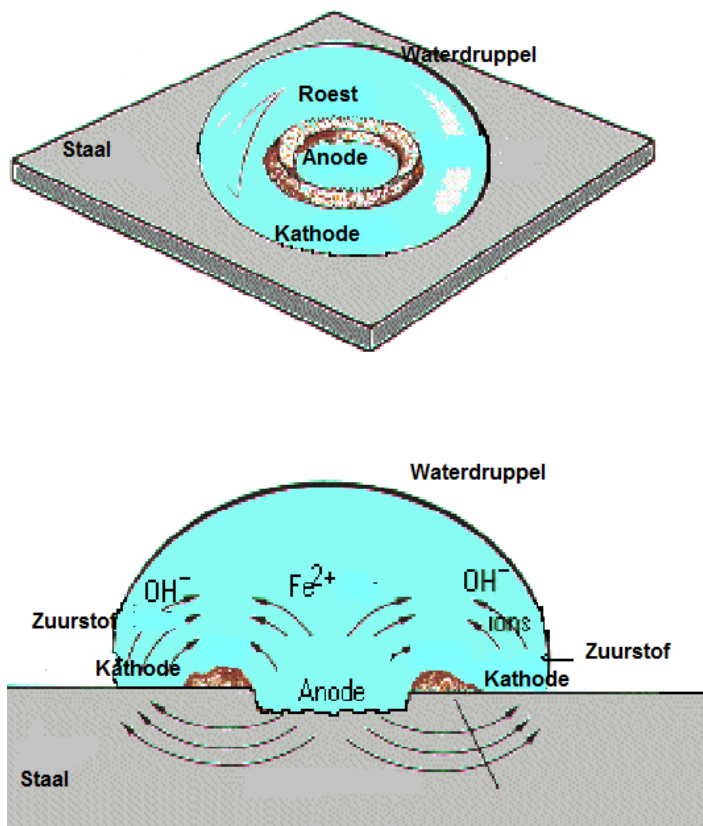
Een veel voorkomend verfdefect is het vormen van blaasjes. Blaasvorming kan verschillende oorzaken hebben: kathodische bescherming, osmose, elektro-osmose en solventretentie zijn hier de belangrijkste voorbeelden van.

7.11.1.1 *Blaasvorming door kathodische bescherming*

Kathodische bescherming van staal kan blaasvorming van het verfsysteem veroorzaken. Dit defect heet kathodische blaasvorming.

De belangrijkste reactie aan de kathode van een corrosiecel is de reductie⁴⁴ van zuurstof. Hierbij worden de nodige elektronen doorgegeven via het staal en geleverd door de reactie aan de anode.

⁴⁴ Een reductiereactie is een scheikundig proces waarbij een stof (de oxidator) elektronen opneemt van een andere stof. (de reductor) (Potters, 2016)



Figuur 58: De corrosiecel (Gordonengland, s.d.)

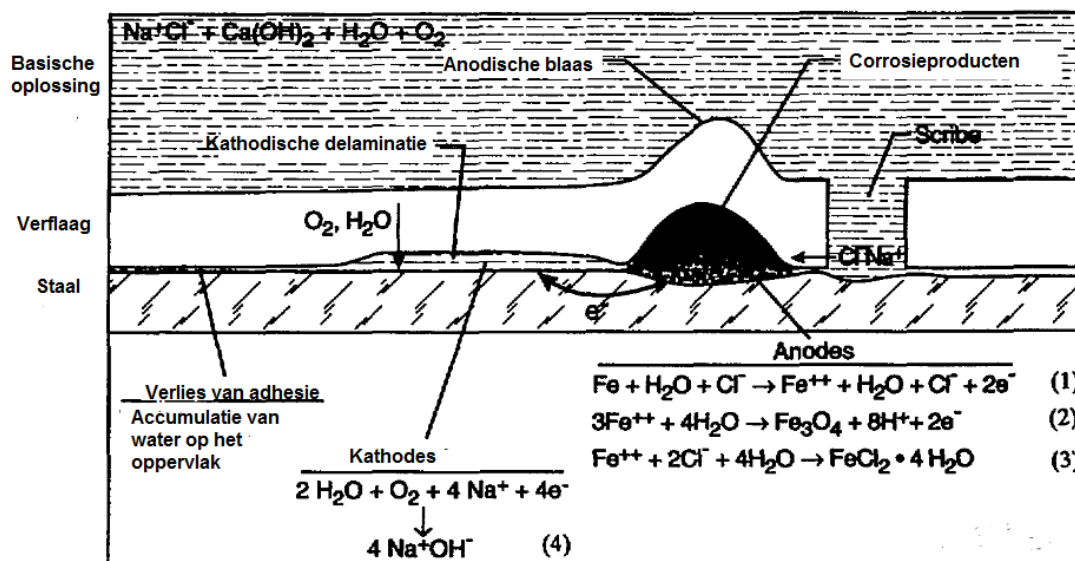
In een milieu waar zuurstof aanwezig is, wordt de belangrijkste kathodische reactie:



Bij aanwezigheid van Na^+ -ionen wordt er natriumhydroxide ($NaOH$) geproduceerd aan de kathode, waardoor de pH stijgt. De elektronen die nodig zijn om zuurstof te reduceren aan de kathode, kunnen geproduceerd worden door een eenvoudige corrosiecel.



Deze corrosiecel kan ontstaan door een beschadiging aan het verfsysteem of door kathodische bescherming.



Figuur 59: Kathodische delaminatie en anodische blaasvorming als gevolg van de beschadiging van een epoxy coating. (Nguyen, 1996).

In de bovenstaande afbeelding is het verfsysteem beschadigd. Deze schade is artificiële schade en wordt aangeduid door de 'scribe'. Eerst komen watermoleculen en chloorionen in contact met het stalen substraat, waar deze een standaard corrosiereactie veroorzaken. Bij deze corrosiereactie komen elektronen vrij en corrosieproducten zoals $FeCl_2$ en Fe_3O_4 . (Figuur 59: Reactie 2 en 3 op de figuur) Door het ophopen van deze corrosieproducten wordt de verflaag van het substraat afgeduwd en ontstaat er een anodisch blaasje.

Behoudens door roestvorming is het tevens mogelijk dat de dat de elektronen geleverd worden door de opofferingsanode.

In beide gevallen migreren de elektronen van de anode naar de kathode via een metallisch pad en zullen aanleiding geven tot de vorming van natriumhydroxide (Figuur 59 Reactie 4 op de figuur)

Reactie aan de anode:



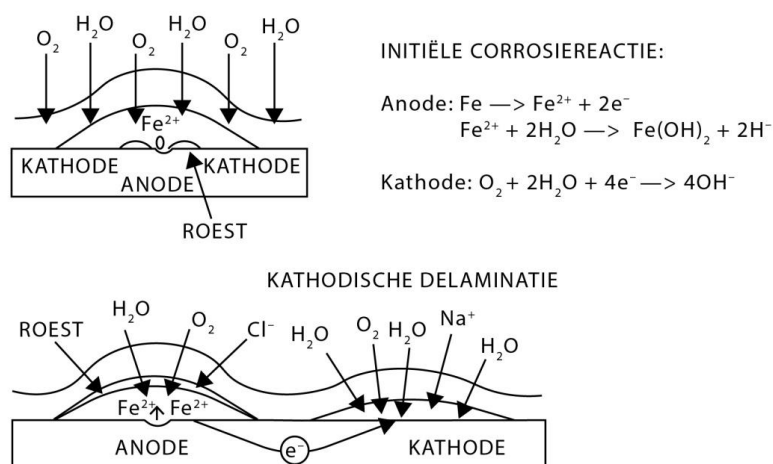
Aanvankelijk bevinden de anode en de kathode zich zeer dicht bij elkaar. Naarmate de corrosie zich verder zet zal de aanwezige roestlaag, de toevoer van zuurstof naar de kathode hinderen, waardoor reactie 4 (op Figuur 57) stilvalt. Desondanks worden er nog altijd elektronen geproduceerd (Figuur 57: Reactie 1 en 2 op de figuur), waardoor de kathode zich verplaatst naar plaatsen waar er wel veel O_2 en H_2O aanwezig is. Vermoedelijk worden de natriumionen vervoerd doorheen het verf/ staal interface.

Ter hoogte van de kathode zullen OH^- -ionen en natriumionen samen natriumhydroxide vormen. (Chuang, 1997)

Reactie aan de kathode:



Doordat natriumhydroxide een base is, kan de pH stijgen tot 14. De aanwezige OH^- -ionen, zijn hygroscopisch. Daardoor zullen ze water opslorpen en blaasvorming veroorzaken. Door de hoge pH van de oplossing in het blaasje zal de zink en de silicaatbinder in een zinksilicaat shop primer oplossen. Hoogst waarschijnlijk is de hoge pH de belangrijkste oorzaak van het kathodisch delamineren van het verfsysteem. (Park, 2003)



Figuur 60: Kathodische delaminatie. (Park, 2003)

7.11.1.2 *Blaasvorming door osmose*

Wanneer twee vloeistoffen met een verschillende concentratie ionen van elkaar gescheiden zijn door een halfdoorlatende wand⁴⁵, zal het water van het gebied met de laagste ionenconcentratie stromen naar het gebied met de hoogste concentratie. Dit fenomeen heet osmose. (Kottonau, 2011)

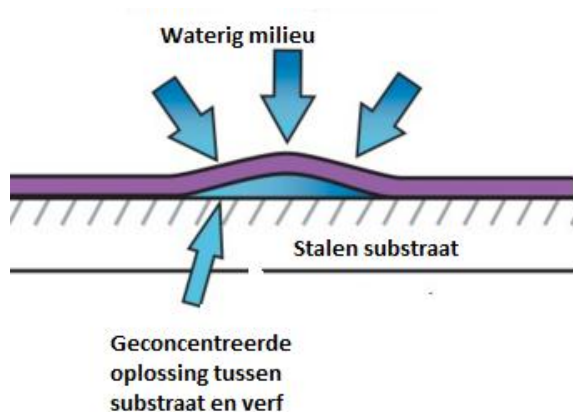
Blaasvorming kan ontstaan wanneer er zich tussen de verflaag en het substraat een waterige oplossing van ionen bevindt. Het water uit de omgeving heeft in deze situatie een lagere concentratie aan ionen dan het water tussen de verflaag en het substraat. Hierdoor zal osmose optreden en zal het water van de gebieden met een lage ionenconcentratie aangetrokken worden door de gebieden met een hoge concentratie om zo het evenwicht te herstellen. Hierdoor zal de druk tussen de verflaag en het substraat stijgen, zal de verflaag omhoog komen en misschien zelfs afbreken. (Contraros, 2015)

Osmose bij een verfsysteem kan worden veroorzaakt door de volgende zaken:

- Contaminatie van het oppervlak met oplosbare zouten.
- Oneffenheden op het oppervlak zoals neerslag, grenzen van metaalgranules, overgebleven gritdeeltjes en overgebleven shotdeeltjes of andere deeltjes die kunnen vrijkomen bij het stralen en het voorbehandelen van het oppervlak. Daarom is het belangrijk dat het oppervlak vuil- en vetvrij is voor men begint te verven.
- Overdreven oppervlakteruwheid door wrijving. Daarom is het belangrijk dat het oppervlak niet overdreven ruw is. (Schweitzer, 2006)

Om deze vorm van osmose te voorkomen is het belangrijk dat het substraat vrij is van zout, vuil en contaminaties. Bovendien moet het substraat de juiste oppervlakteruwheid hebben. (ABS, 2016)

⁴⁵ Een wand die water doorlaat maar ionen tegenhoudt. (Kottonau, 2011)

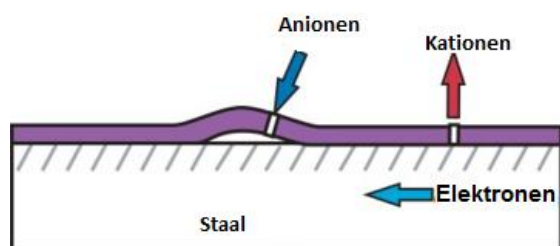


Figuur 61: Blaasvorming door osmose. (ABS, 2007)

7.11.1.3 *Blaasvorming door elektro -osmose*

Deze vorm van osmose ontstaat wanneer een blaasje, dat ontstond door normale osmose is gebarsten. Wanneer dit blaasje breekt ontstaat een potentiaalverschil tussen de anodische verflaag en het kathodische gebied onder de blaas. Door dit potentiaalverschil worden ionen richting de blaas geduwd en begint de blaas nog verder te groeien. (ABS, 2007)

Merk op dat een actief corroderend gebied in de omgeving, of een externe opofferingsanode eenzelfde drijvend kracht vormt voor de blaasvorming. Osmose en elektro-osmose neigen in het begin van de levensloop van het verfsysteem voor te komen. Terwijl de blaasvorming zich voordoet, behoudt de verflaag een zekere plasticiteit. (ABS, 2007)



Figuur 62: Blaasvorming door elektro -osmose. (ABS, 2007)

7.11.1.4 *Blaasvorming door solventretentie*

Blaasvorming door solventretentie ontstaat doordat de verflaag aan het oppervlak droog is voordat de solventen onder het oppervlak volledig verdampt zijn. Daardoor blijven deze gevangen in de verflaag. De kans op solventretentie is het grootst wanneer het verfsysteem wordt aangebracht onder de stralende zon omdat het oppervlak van de verf dan sneller droogt. Om dit te voorkomen is het beter om te wachten met verven tot in de late namiddag. Ook stijgt het risico op blaasvorming door solventretentie wanneer de verflaag dik is. Daarom is het beter de verf in meerdere dunne lagen aan te brengen in plaats van in één dikke laag.

Blaasvorming door solventretentie kan ook voorkomen bij anorganische verven die enigszins poreus zijn. Bij zulke verven zal het solvent uitzetten in de porositeiten. Hierbij kan de druk in de porositeit hoog genoeg worden om een blaasje te veroorzaken in de bovenliggende laag. Net zoals bij organische verven kan dit worden voorkomen door meerdere lagen aan te brengen en de zon te mijden. Bovendien bestaan er formulaties voor bovenlagen die dergelijke blaasvorming tegengaan. (Munger, 1999)

7.11.2 Scheurvorming

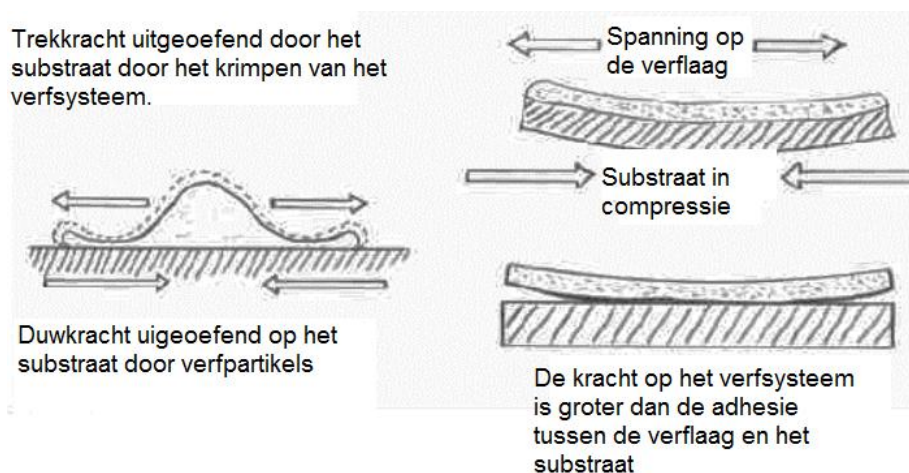
Het scheuren van de verflaag is een faalmechanisme dat meestal wordt veroorzaakt door een slechte formulering van een verfsysteem dat veroudert. Scheuren is een ernstig fenomeen dat rechtstreeks penetreert tot het substraat en daardoor het stalen oppervlak blootstelt aan de corrosieve omgeving. Dit defect wordt veroorzaakt door spanningen in de verflaag en spanningen tussen het verfsysteem en het substraat. Hierbij wordt scheurvorming beïnvloed door bijvoorbeeld het uitzetten en het krimpen van het onderliggende substraat, nat worden, en drogen en adsorptie/desorptie van water.

Het scheuren van de verf kan van bijzonder belang zijn bij het aanbrengen van een epoxyverf in een ladingtank van een olietanker. Epoxyverven (amine-cured) neigen soms te scheuren op staal omdat staal gevoelig is voor uitzetten en inkrimpen bij het veranderen van de temperatuur. In dit geval worden vooral verfsystemen met een grote laagdikte aangetast, omdat verflagen met grotere filmdiktes, grotere interne spanningen ontwikkelen tijdens het curen. Het vormen van scheuren kan worden tegengegaan door het gebruik van de juiste stoffen in de verf, zoals de juiste pigmenten, en het gebruik van stoffen om de verf plastischer te maken. Door het

gebruik van pigmenten die vezels bevatten, kan het verfsysteem sterker gemaakt worden. Door het gebruik van plastische stoffen in de verf, wordt het verfsysteem zachter. Daardoor wordt het verfsysteem elastischer, en zal het minder snel scheuren onder invloed van spanningen die veroorzaakt worden door bijvoorbeeld temperatuursveranderingen. (Munger 1999)

7.11.3 Delaminatie

Door de invloed van statische- en dynamische krachten zal de romp van het schip buigen. Daardoor zal het staal onderhevig zijn aan compressie- en/of trekkrachten. Bijgevolg zullen er spanningen ontstaan tussen het verfsysteem en het substraat. Ook kan het verfsysteem krimpen naarmate het veroudert. Wederom zullen er krachten ontstaan tussen het verfsysteem en het substraat. Wanneer de spanning tussen de verflaag en het staal groter is dan adhesie, zal het verfsysteem delamineren. (Munger, 1999)



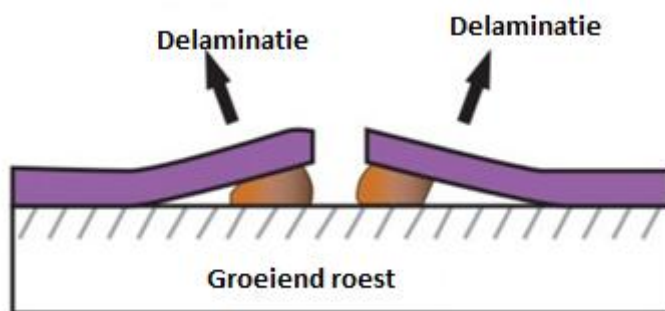
Figuur 63: Krachten die delaminatie kunnen veroorzaken. (Eliasson, 2017)



Figuur 64: Een verfsysteem dat onthecht/ delamineert. (Hempel, 2013)

7.11.4 Roestvorming doorheen de verflaag

Staal heeft de eigenschap 8 tot 12 keer meer volume in te nemen wanneer het oxideert. Als het substraat onder de verflaag begint te roesten zal het geoxideerde staal plots veel meer plaats innemen waardoor de verflaag van het oppervlak afgeduwd wordt en delamineert. Dit mechanisme is één van de belangrijkste verfdefecten tijdens het einde van de levenscyclus van het verfsysteem. Aftakeling door roestvorming ontstaat vooral in de buurt van andere verfdefecten, scherpe randen, lasnaden en plaatsen waar mechanische schade is opgetreden. We kunnen zeggen dat roest doet roesten. Een grote mechanische sterkte van de verflaag en een goede hechting aan het substraat helpen deze aftakeling deels tegen te gaan. (ABS, 2007)



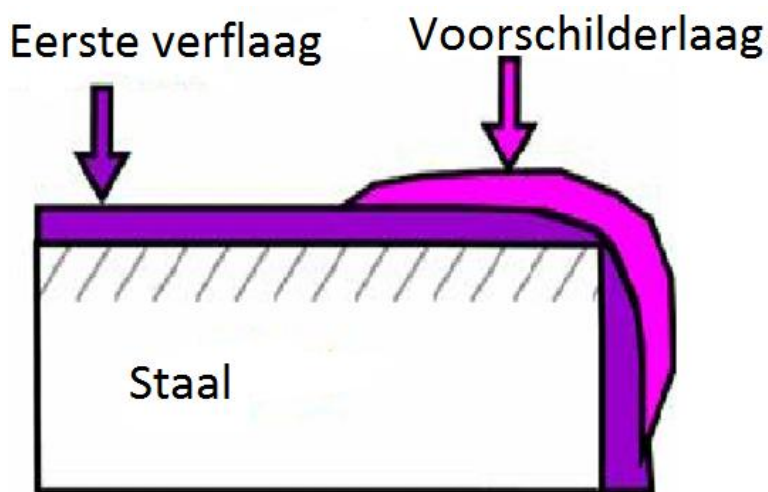
Figuur 65: Aftakelen door roestvorming onder de verflaag. (ABS, 2007)

7.11.5 Falen van een verfsysteem door slechte constructie

De constructie van de ladingtank heeft een invloed op de prestatie van het verfsysteem, en dus ook op de corrosie.

Scherpe randen

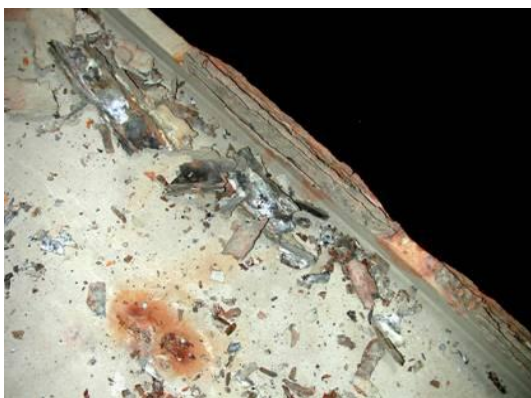
Aan een scherpe rand heeft de verflaag de neiging zeer dun te zijn. Daardoor zal corrosie veel sneller optreden. Eens het verfsysteem aan de randen faalt, zullen deze randen corroderen en afbreken. Om dit te voorkomen, kan men een extra laag verf aanbrengen, een zogenaamde 'voorschilderlaag' (*stripe coating*). Ook kan men de randen afronden, waardoor de dikteverandering minder abrupt is. (Munger, 1999)



Figuur 66: Een voorschilderlaag (*stripe coating*). (ABS, 2007)

Hoeken

Net als bij randen, zal het verfsysteem aan de hoeken snel falen. Aan de buitenkant van de hoek zal de verflaag dunner zijn waardoor corrosie er sneller optreedt. Aan de binnenkant van de hoek zal het aangebrachte verfsysteem krimpen tijdens het drogen. Daardoor zal de verflaag de hoek 'overbruggen' en zal het onderliggende staal worden blootgesteld. Van hieruit kan het metaal corroderen en zal de corrosie zich verderzetten. Ook bestaat het risico dat vuil en contaminaties samenhoppen in de binnenste hoek. Wanneer de hoeken niet grondig worden gereinigd, wordt er over het vuil heen geleverd. De verflaag zal dan weinig bescherming bieden en corrosie zal snel optreden. (Munger, 1999)



Figuur 67: Afbrokkelen van een verfsysteem aan een scherpe rand. (Amtec, 2015)

Lasnaden

Het oppervlak van een lasnaad is ruw en onregelmatig. Bovendien worden lasnaden vaak onvoldoende gereinigd waardoor er contaminaties aanwezig zijn. Daardoor zijn de lasnaden meestal de eerste plaats waar het verfsysteem defecten vertoont. Echter, als er voldoende aandacht wordt besteed aan de oppervlaktevoorbereiding van de lasnaden kan het verfsysteem op die plaats langer intact blijven dan de verf op de beplating van de tank. (Munger, 1999)



Figuur 68: Corrosie aan een lasnaad. (Munger, 1999)

Moeren en bouten

Moeren en bouten zitten vol hoeken en randen waardoor het verfsysteem snel zal falen. Daarom is het moeilijk corrosie te voorkomen tenzij het verfsysteem bijzonder zorgvuldig werd aangebracht. (Munger, 1999)

Overlappende platen

Overlappende hoeken en gewrichten zijn altijd bijzonder gevoelig voor corrosie. In deze gebieden zal de verflaag over het algemeen zeer snel falen. Het falen van het verfsysteem wordt veroorzaakt door de spleten tussen de verschillende staalplaten, de hoeken en de randen. Eens het verfsysteem defecten vertoont, zullen zout, vocht

en vuil tussen de overlap van de staalplaten terechtkomen en spleetcorrosie veroorzaken. Dit probleem kan verholpen worden door het gebruik van een anorganische zinkverf (Kathodische bescherming) op de betreffende oppervlaktes vooraleer deze samen te schroeven met de bouten. Op die manier blijft het oppervlak onder de overlapping gedurende een langere tijd beschermd. (Munger, 1999)

7.11.6 Het falen van de hechting tussen de verf en het substraat

Een slechte hechting van de verf op het substraat kan veroorzaakt worden door verschillende zaken:

- Slechte voorbereiding van het te verven oppervlak.
- Atmosferische effecten.
- Structurele tekortkomingen in een verflaag.
- Krachten tussen de verflaag en het substraat.
- Corrosie.
- Compatibiliteitsproblemen tussen de verf en het substraat of tussen twee opeenvolgende verflagen.
- Tekortkomingen tijdens de applicatie. (vuil en zout op het substraat, te hoge luchtvochtigheid, ..)

(Schweitzer, 2006)

7.11.7 Slechte oppervlaktevoorbereiding

Het vormen van scheuren, '*checking*' en '*alligatoring*' wordt veroorzaakt door het verouderen van een verf in combinatie met een slechte oppervlaktevoorbereiding. Het vormen van scheuren wordt veroorzaakt doordat de verf doorheen de jaren krimpt. Daardoor ontstaan er interne spanningen die groter zijn dan de mechanische sterkte van de verflaag en ontstaan er scheuren '*Alligatoring*' betekent dat een hardere, brozere verflaag, die is aangebracht over een meer elastische verflaag, begint te scheuren.

Afpellen van de verf, schilfervormingen en delaminatie worden veroorzaakt doordat de verf slecht hecht aan het substraat. Delaminatie komt voor wanneer een verflaag die aangebracht is op een andere verflaag afpelt en schilfers begint te vormen. (Schweitzer, 2006) Wanneer het afpellen wordt veroorzaakt door een compatibiliteitsprobleem tussen de verschillende verflagen, kan met een tussencoat, *tie coat*, aanbrengen tussen de twee verschillende verflagen in.

Delaminatie, afpellen en schilfervorming worden in het bijzonder veroorzaakt doordat de krachten die het verfsysteem kan opvangen groter zijn dan de adhesie. Dit kan enerzijds worden veroorzaakt door een zwakke oppervlaktevoorbereiding en anderzijds door een slechte hechting. Het slecht hechten van de verf wordt op zijn beurt veroorzaakt door de aanwezigheid van contaminaties tussen het verfsysteem en het substraat, of tussen verschillende verflagen onderling. Het is dus uitermate belangrijk dat zowel het substraat als de eerste verflaag proper zijn alvorens er over te verven. (Munger, 1999).

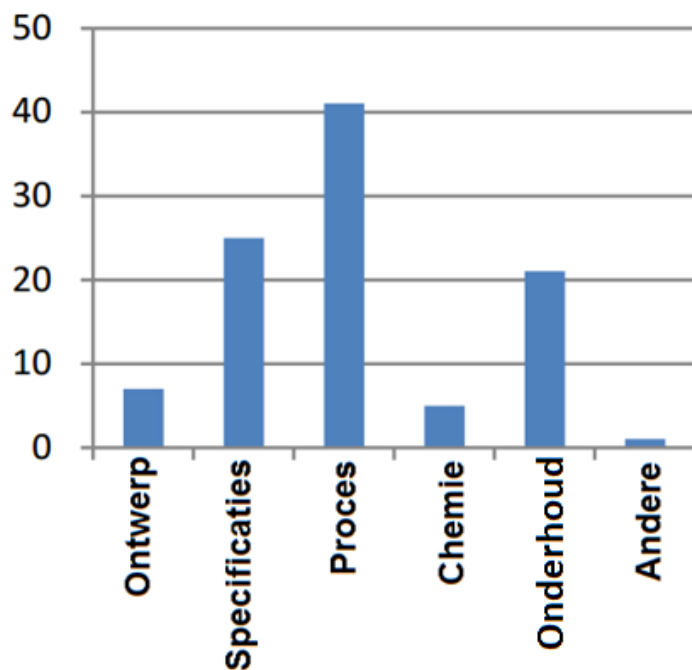
7.11.8 Vuil in het verfsysteem

Vuil dat terecht komt in het verfsysteem is een probleem dat vrij vaak voorkomt. Meestal wordt dit veroorzaakt door een gebrek aan aandacht, toewijding en procedures van de applicateurs. Zo zijn er situaties bekend waarbij de applicateurs over een berg zand heen verfd. Deze contaminaties komen vaak voor in hoeken en randen omdat vuil zich ophoopt op die plaatsen. Wanneer er geverfd wordt over een contaminatie zal de verflaag niet meer doorlopend zijn en zal corrosie spoedig optreden. (Munger, 1999)

7.12 Onderliggende oorzaken van verfdefecten

Om verfdefecten te vermijden is het belangrijk de onderliggende oorzaken van deze problemen te kennen. Alleen zo kunnen maatregelen genomen worden die de kwaliteit van het verfsysteem garanderen.

Kattan en Brodderick onderzochten de onderliggende oorzaken van verfdefecten en hun belang. De onderstaande grafiek toont het resultaat van hun onderzoek. (Kattan, Broderick, 2010)



Figuur 69: Oorzaak van het verfdefect. (Kattan, Brodderick, 2010)

Het merendeel van de verfdefecten wordt veroorzaakt door tekortkomingen in het verfproces. Onder dit verfproces verstaan we de oppervlaktevoorbereiding en de verfapplicatie. Zo kunnen de volgende fouten worden gemaakt:

- Een te hoog zoutgehalte van het substraat, waardoor er snel osmotische blaasvorming zal ontstaan.
- Te weinig oppervlakteruwheid, waardoor de verf niet goed kan hechten.
- Vuil, vet, vocht, stof en contaminaties op het substraat.
- Een gebrekkige properheid van het substraat. PSPC-COT verplicht het stralen van het substraat tot Sa 2.5. Wanneer dit niet gebeurt, zal er walshuid en corrosie achterblijven op het oppervlak. Daardoor zal het verfsysteem sneller falen.
- Slechte applicatieomstandigheden, zoals een te lage temperatuur of een te hoge luchtvochtigheid tijdens de applicatie.
- Foutief gebruik van verfspuiten.

7.12.1 Gebrekkige verfsppecificaties

De tweede belangrijkste oorzaak van verfdefecten zijn gebrekkige verfspecificaties. Onder specificaties verstaan we bijvoorbeeld de vereiste laagdikte, de vereiste oppervlakteruwheid en de vereiste straalnormen van het oppervlak. (Broderick, Kattan, Wright, 2005)

7.12.2 Onderhoud van het verfsysteem

Nog een belangrijke oorzaak is het onderhoud van het verfsysteem tijdens de levenscyclus van het schip. Zoals besproken zal corrosie op een verfdefect snel uitbreiden. Roest veroorzaakt roest. Daarom is het belangrijk dat verfdefecten tijdig gerepareerd worden, zodanig dat er geen corrosie kan ontstaan. Bijgevolg is een verfsysteem een dynamisch gegeven. Men kan niet zomaar een verfsysteem aanbrengen en verwachten dat het zal goed blijven. Men moet het ook onderhouden. (Broderick, Kattan, Wright, 2005)

7.12.3 Constructie

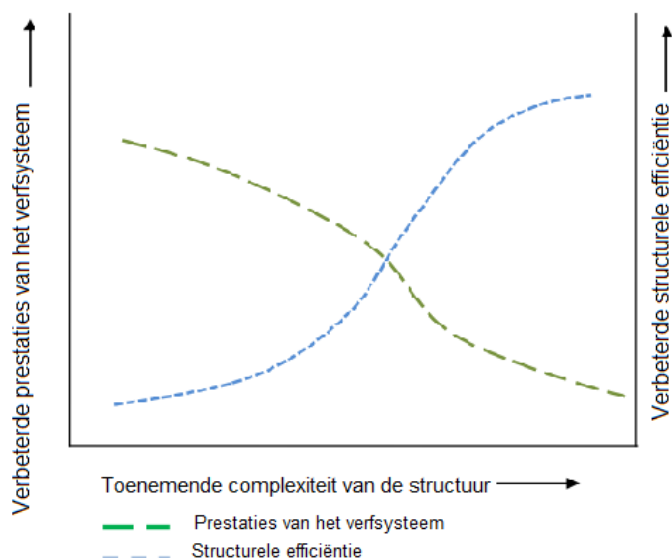
Het ontwerp van de geverfde constructie is ook een belangrijke factor. Er zijn sterke vermoedens dat het ontwerp van de scheepsstructuur een belangrijke invloed heeft op de activiteiten tijdens het aanbrengen van het verfsysteem. Dat komt omdat de complexiteit van de scheepsstructuur een negatieve invloed kan hebben op de toegankelijkheid, ventilatie en temperatuurcontrole. Enkele voorbeelden van zaken die ervoor zorgen dat de scheepsstructuur de levensduur van het verfsysteem verkort zijn:

- Complexe vormen waarvan het oppervlak moeilijk voor te bereiden en moeilijk te verven is.
 - Krappe ruimtes die moeilijk toegankelijk zijn.
 - Krappe ruimtes die moeilijk te drogen en te ventileren zijn.
 - Krappe ruimtes die moeilijk te verven zijn
 - Krappe ruimtes die moeilijk te onderhouden zijn.
 - Vlakke oppervlaktes die geen helling hebben en daardoor slecht draineren.
 - Gebruik van metalen die onderling galvanische corrosie veroorzaken.
- (Broderick, Kattan, 2010)

Doordat bepaalde structuren gevoeliger zijn voor corrosie moet de scheepsarchitect een evenwicht zoeken tussen twee concepten. Enerzijds kan de scheepsarchitect kiezen voor een ontwerp met een grote structurele efficiëntie. Dit betekent dat een structuur voor eenzelfde weerstand tegen een bepaalde belasting een laag gewicht heeft. Dergelijke constructies hebben meestal veel verstijvers en een kleinere plaatdikte. Zulk constructies zullen over het algemeen gevoeliger zijn voor corrosie. (Broderick, Kattan, Wright, 2005)

Anderzijds kan een scheepsarchitect kiezen voor een ontwerp dat gunstiger is voor het aanbrengen van een verfsysteem en een betere weerstand heeft tegen corrosie. Het nadeel is dat de constructie daardoor zwaarder wordt. (Broderick, 2015)

In praktijk zal de architect een afweging maken tussen deze twee concepten en een gulden middenweg zoeken. Dit wordt weergegeven in de onderstaande grafiek. Deze grafiek werd bedacht door Darren Broderick en toont het verloop van structurele efficiëntie versus het verloop van duurzaamheid van het verfsysteem. (Broderick, 2015)



Figuur 70: De prestaties van het verfsysteem en de structurele efficiëntie in functie van de complexiteit van de constructie. (Broderick, 2015)

Men kan de constructie van het schip verbeteren door bijvoorbeeld gerolde profielen te gebruiken of door complexe geometrische profielen te vermijden. Door de scheepsconstructie eenvoudig te houden wordt het aanbrengen, onderhouden en inspecteren van het verfsysteem gemakkelijker. Hierdoor stijgt de kans dat het verfsysteem 15 jaar in 'goede' staat blijft. (Broderick, 2015)

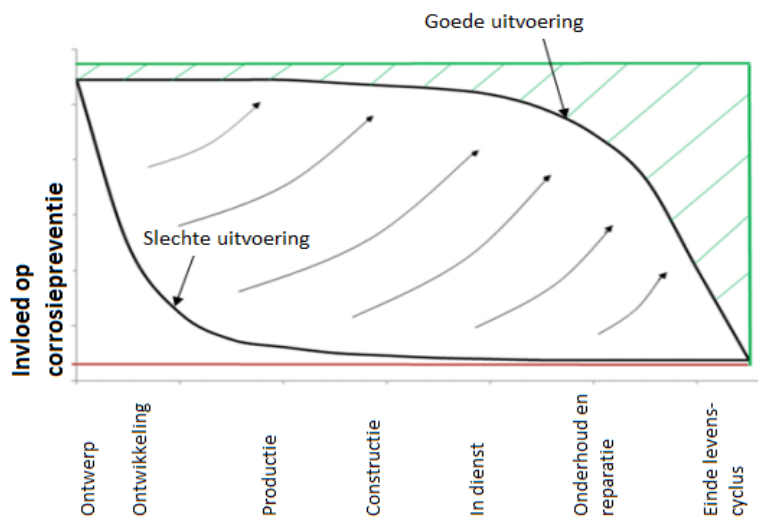
Voor het invoeren van de dubbele wand was constructie een belangrijke oorzaak van verfdefecten in de ladingtanks. Wanneer het schip voorzien is van een dubbele wand, zal vb. de bodem van de ladingtank zelf glad zijn. De complexe structurele elementen, (verstijvers, spanten,, ..) bevinden zich daardoor in de ruimte tussen de dubbele wand, en in de ballasttanks. Bijgevolg heeft het invoeren van de dubbele wand de problematiek van een verfonvriendelijk ontwerp verplaatst van de ladingtanks naar de ballasttanks. (De Baere, pers. comm., 2017)

7.12.4 Formulatie van de verf

Verder is een foutieve chemische samenstelling (formulatie) van het verfsysteem een factor die verfdefecten kan veroorzaken. Echter, fouten in de formulatie van de verf zijn slechts van beperkt belang. Dit betekent dat een slecht geformuleerde verf die goed aangebracht is, mogelijks langer zal standhouden dan een goed geformuleerde verf die slecht is aangebracht. (Broderick, Kattan, 2010)

7.13 Invloed op corrosiepreventie

Ook onderzochten Kattan, Broderick en Wright de invloed van een al of niet correcte applicatie op het presteren van een verfsysteem gedurende de levensloop van een schip. De onderstaande grafiek toont deze invloed. De bovenste lijn toont hoe sterk het verfsysteem kan verbeterd worden bij het toepassen van goede praktijken, terwijl de onderste lijn de invloed toont bij slechte praktijken. Het gearceerde gebied toont het verschil tussen de twee krommes en de mogelijke progressie die kan gemaakt worden door goed te werken. Hoewel de figuur geen exacte en nauwkeurige verbanden weergeeft, biedt ze inzichten in het belang van hoogstaand vakmanschap. (Kattan, Broderick, Wright, 2005)



Figuur 71: De invloed van een goede of minder goede applicatie van een verfsysteem tijdens de verschillende levensfasen van een schip. (Broderick, Kattan, Wright, 2005)

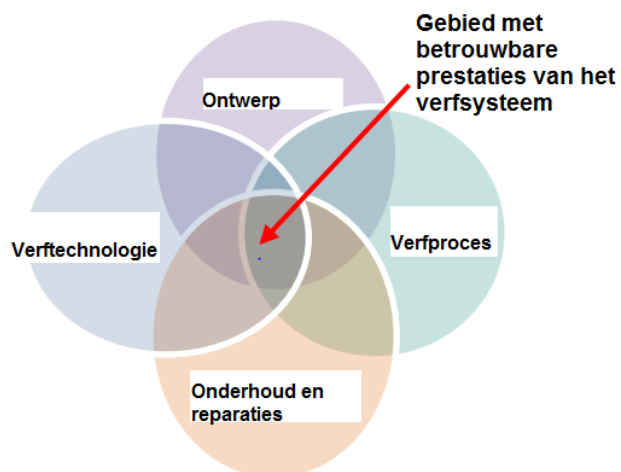
De grafiek toont hoe het ontwerp van het schip kan helpen bij het voorkomen van corrosie. Zo zorgt de keuze om het schip te fabriceren uit staal ervoor dat het schip onderhevig zal zijn aan corrosie. Verder laat de afbeelding zien dat de invloed van corrosiepreventie afneemt naarmate het schip ouder wordt. Bovendien toont de curve dat het verschil tussen goede en slechte praktijken het snelste toeneemt tijdens de fases vlak voordat het schip in vaart wordt genomen⁴⁶. Dit betekent dat goede praktijken tijdens het verfproces een belangrijk verschil kunnen maken in de preventie van corrosie. (Kattan, Broderick, Wright, 2005) Onderhoud en reparatie bepalen het moment waarop de coating begint te degraderen, omdat roest doet

⁴⁶ Productietechniek, productie en constructie.

roesten. Daarom moeten onderhoud en reparaties tijdig en goed worden uitgevoerd. (De Baere, pers. comm.) Onder onderhoud verstaan we het bijwerken (*touch up*) van het verfsysteem, terwijl het nog in een 'goede'⁴⁷ staat verkeert. Onder reparatiewerken verstaan we grondige werken die uitgevoerd worden om een verfsysteem van een 'redelijke' of 'slechte' staat terug naar een goede staat te brengen. (Wei et al., 2011)

Naarmate het schip ouder wordt, zullen de gemiddelde reparatiekosten van het verfsysteem stijgen. Dat komt omdat een steeds groter oppervlak van de verf gerepareerd moet worden terwijl de kosten per vierkante meter hersteld verfsysteem stijgen. (Kattan, Broderick, Wright, 2005) Zo kost het aanbrengen van een verfsysteem in een ladingtank volgens PSPC-COT ongeveer €40 per vierkante meter. Echter, het vervangen van een defect verfsysteem kan tot €1000 per vierkante meter kosten. Dat komt onder andere doordat het defecte verfsysteem eerst terug moet gestraald worden, het grit moet worden verwijderd en er stellingen moeten worden geplaatst. (Jansen, pers. comm., 2017)

Om dergelijke verfdefecten te vermijden moeten zowel het ontwerp van het schip, de verftechnologie, het onderhoud van het verfsysteem en het applicatieproces goed verlopen. Alleen zo kan het verfsysteem van een hoge kwaliteit zijn en garanderen dat het schip beschermd zal worden tegen corrosie.



Figuur 72: Voorwaarden voor een betrouwbaar verfsysteem. (Broderick, Kattan, Wright, 2005)

⁴⁷ De exacte betekenis van 'goed' wordt later in de thesis besproken.

7.14 Oorzaken van het niet aanbrengen van een verfsysteem of van het slecht uitvoeren van een verfproject

Een goed verloop van het verfproject is cruciaal om de betrouwbaarheid van het verfsysteem te garanderen. Hierbij moet er aandacht worden besteed aan onder andere de oppervlaktevoorbereiding, de verfapplicatie, de specificatie en de formulatie van de verflaag. Desondanks werd het verfproject vaak niet ideaal uitgevoerd. Soms werden de ladingtanks helemaal niet geverfd. Dit deel probeert te verklaren waarom degelijke verfsystemen soms ontbreken. Hierbij wordt de situatie besproken tijdens de jaren voordat PSPC-COT in voege trad.

7.14.1 Speculatieve eigenaars

Sommige eigenaars kochten het schip om er mee te speculeren. Dit zijn speculatieve eigenaars of *broker owners*. Zo kon een speculatieve eigenaar een schip laten bouwen voor 23 miljoen dollar, om het tijdens de bouw zelf nog te verkopen voor 58 miljoen dollar. Doordat speculatieve eigenaars het schip slechts een korte tijd in eigendom hadden, konden ze kosten besparen door geen verfsysteem aan te brengen in de ladingtanks, of door de applicatie minder zorgvuldig uit te voeren. (Jansens, pers.comm., 2017)

Het aanbrengen van een dure coating is enkel maar commercieel rendabel wanneer het schip gedurende zijn volledige levenscyclus eigendom is van dezelfde eigenaar⁴⁸. Echter, wanneer de eigenaar van het schip slechts gedurende een korte periode in eigendom heeft, is het niet altijd interessant te investeren in een duur verfsysteem. (Willemen, 2017)

Vroeger hielden eigenaars hun schepen langer in eigendom. Daardoor was het in hun belang dat deze schepen goed werden onderhouden.⁴⁹ Echter, steeds meer neigden tankers snel van eigenaar te veranderen. Doordat het schip niet meer levenslang in dienst bleven bij één eigenaar, kon de eigenaar besparen op corrosiepreventie in de ladingtank⁵⁰. Wanneer hij zag dat er problemen dreigden door het gebrekkige onderhoud, kon hij het schip doorverkopen aan de volgende partij. Daardoor bestond het risico dat schepen die vaak van eigenaar veranderen niet zo goed onderhouden zijn als schepen die lang in het bezit bleven van dezelfde eigenaar. (Devanney, 2006)

⁴⁸ *Cradle to Grave* – aanpak. (Willemen, 2017)

⁴⁹ Als een eigenaar teveel bespaart op tijdig onderhoud, zal hij achteraf dure reparaties moeten uitvoeren die zijn oorspronkelijke besparing kunnen teniet doen. (Devanney, 2006)

⁵⁰ Dit kan hij doen door bijvoorbeeld geen doeltreffend verfsysteem aan te brengen of door het bestaande verfsysteem niet goed te onderhouden.

7.14.2 Gebrekkige productieplanning en tijdsdruk

Tijdens de jaren voor het invoeren van PSPC-COT werden er weinig inspanningen geleverd om het verfproces te perfectioneren, terwijl de chemische formulatie van de gebruikte verven er wel op vooruit ging. Bovendien ontbraken de nodige managementsystemen om het verfproces goed te laten verlopen. Daardoor werden verfprocessen niet voldoende gecontroleerd en was de kwaliteit het verfsysteem onvoorspelbaar. Een dergelijke perceptie hield echter geen rekening met het feit dat een verfsysteem een enorm waardevol object (het schip) moest beschermen. (Broderick, Kattan, Wright, 2005)



Figuur 73: Een chaotisch verfproject. (Jansen, s.d.)

Bovendien integreerden veel werven het verfproces niet voldoende in hun productieplanning waardoor het verven van de afgewerkte scheepsblokken de achilleshiel (*bottleneck*) vormde van de productieplanning. Ook werd het verfproces vaak gebruikt als een buffer om vertragingen in de productie en in het staalbewerkingsproces op te vangen. (Broderick, Kattan, Wright, 2005) Daardoor kon het verfproces versneld worden ten koste van de kwaliteit van het verfsysteem en bestond het risico dat het verfsysteem sneller zal falen. (Devanney, 2006) Zo kon de werf ervoor kiezen om tijdens het stralen van de verf grotere mondstukken te gebruiken dan aangeraden wordt door het technisch informatieblad van het verfsysteem. Door dergelijke maatregelen te nemen bestond het risico dat het verfsysteem minder goed werd aangebracht waardoor het vroegtijdig kon falen. (Jansens, pers. comm., 2017)



Figuur 74: Het resultaat van een chaotisch verfproject. (Jansen, s.d.)

7.14.3 Inconsistenties tussen verschillende classificatiemaatschappijen en hun aanpak van inspectie en onderzoek.

Het bouwen of het repareren van een schip gebeurt onder toezicht van een classificatiemaatschappij. Een panel van European Maritime Safety Agency (EMSA) concludeerde dat verschillende klassebureaus verschillende regels hanteren en dat niet alle classificatiemaatschappijen even streng toezagen op de constructie van het schip. Daardoor werd het nodig om de regels die toegepast worden tijdens de bouw van het schip te harmoniseren en te standaardiseren. (EMSA, 2005)

7.14.4 Gebrek aan garantie

Wanneer een scheepsbouwer een schip bouwt moest hij minstens 12 maanden garantie kunnen bieden op dit schip. Aangezien het verfsysteem minstens 15 jaar in een goede staat moet blijven, was de garantie van 12 maanden te kort. (Jansen, pers.comm., 2017) De werf kon een goedkoop verfsysteem dat slechts 2-3 jaar stand hield aanbrengen zonder ervoor verantwoordelijk te worden gesteld. Het gevolg van deze gebrekkige garantie is dat de eigenaar niet zeker kon zijn of zijn schip wel effectief beschermd werd. (Jansen, pers.comm., 2017)

8 PSPC-COT

Dit deel zal PSPC-COT bespreken. Eerst wordt er gefocust op de principes achter PSPC-COT, het verloop van het verfproject en de documentatie. Daarna wordt de testprocedure besproken, en in het bijzonder de laboratoriumtest. Ook probeert de scriptie enkele pijnpunten van deze reglementering bloot te leggen. Ten slotte wordt er ingegaan op de impact van de resolutie.

8.1 Definitie

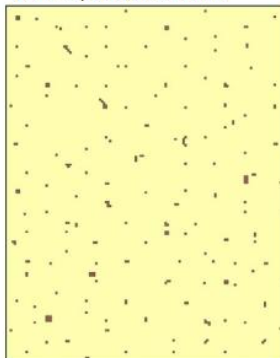
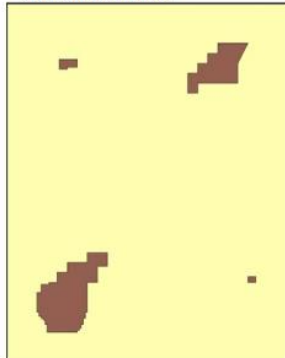
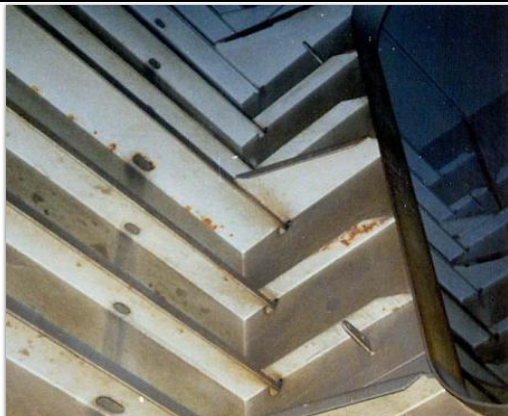
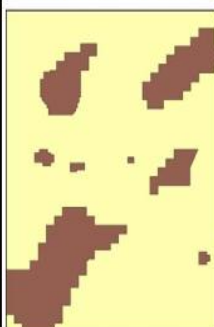
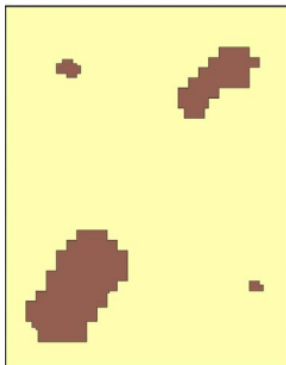
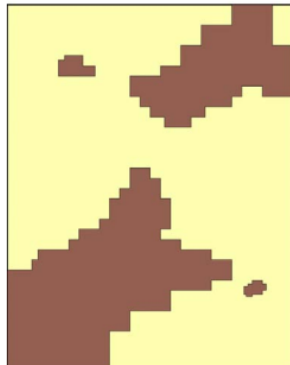
PSPC-COT staat voor Performance Standard for Protective Coatings for Cargo Oil Tanks of Crude Oil Tankers. PSPC-COT is een IMO⁵¹- resolutie die als doel heeft het verbeteren van de veiligheid op zee. Dit doet PSPC-COT door het reglementeren van de verfsystemen die corrosie tegengaan in de ladingtanks van tankers voor ruwe aardolie. Het doel van deze wetgeving is dat ladingtanks beschermd worden door een verfsysteem dat minstens 15 jaar in 'goede' staat blijft. Hierbij wordt een 'goede' staat omschreven als een staat waarbij minder dan 3 % van het verfsysteem is afgebroken en waarbij minder dan 20% van het verfsysteem is afgebroken ter hoogte van de lasnaden en randen. Dat betekent dat de corrosie slechts in minimale mate aanwezig mag zijn. Wanneer de tank in een iets mindere staat is bevindt dan 'goed' spreken we over een 'redelijke' staat. Een tank die te ernstig gecorrodeerd is, wordt bestempeld als 'slecht'. Tabel 10 toont de hoeveelheid corrosie bij respectievelijk een 'goede', een 'redelijke' en een slechte staat van de ladingtanks. (IMO, 2010)

Tabel 10: Goed, redelijk en slecht. (Wei et al., 2011)

	GOED	REDELIJK ³⁾	SLECHT
Afbraak van het verfsysteem of corrosie van het geverfde oppervlak ⁽¹⁾ .	<3%	3-20%	>20%
Oppervlakte met harde roest ⁽¹⁾ .	/	<10%	>= 10%
Plaatselijke afbraak van het verfsysteem of roestvorming op randen en lasnaden ⁽²⁾	<20%	20-50%	>50%
Nota's 1 1 % is het percentage dat berekend wordt op basis van het onderzochte gebied van het gebied dat 'Kritisch structureel gebied' is. 2 is het percentage dat berekend werd op basis van de randen en lasnaden die zich bevinden in het 'Kritisch structureel gebied' van het onderzochte gebied. 3 lokale roestvorming betekent het vormen van plaatselijk roest, zonder dat het verfsysteem zichtbaar faalt.			

⁵¹ IMO staat voor *International Maritime Organisation*. Dit is het agentschap van de Verenigde naties dat verantwoordelijk is voor het verbeteren van de veiligheid op zee, het verbeteren van de beveiliging van schepen en het minimaliseren van vervuiling. (IMO, 2017)

Tabel 11: Beoordelen van de hoeveelheid corrosie. (IACS, 2015)

Hoeveelheid corrosie			
GOED			
1% verspreide corrosie 		5% lokale corrosie 	
REDELIJK			
10 % lokale corrosie 	20% lokale corrosie 	33% corrosie 	
SLECHT			
10% lokale corrosie 	33% corrosie 		

Wanneer een ladingtank van een 'goede' naar een 'redelijke' staat gaat, moet het schip dure jaarlijkse inspecties ondergaan. Bijgevolg zal een slechtere staat van de ladingtanks leiden tot toegenomen inspectiedruk en toegenomen inspectiekosten. Bovendien zijn schepen met ernstig gecorrodeerde ladingtanks moeilijker te vercharteren. De huur die de eigenaar krijgt zal lager zijn, en het zal moeilijker zijn om het schip en de lading te laten verzekeren. Zo is een schip dat last heeft van extreme corrosie in de ballasttanks quasi onverhandelbaar. (De Baere, 2017) Tabel 12 toont het minimum aantal *surveys* die moeten uitgevoerd worden, in functie van de hoeveelheid corrosie. (IACS, 2015)

Tabel 12: Surveys. (IACS, 2015)

Coating conditie	Surveys (interne inspecties)															
GOED	S			I		S			I		S			I		S
REDELIJK of SLECHT	S	A	A	I	A	S	A	A	I	A	S	A	A	I	A	S
JAREN	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nota: S = special survey = vijfjaarlijks survey I = intermediate survey = survey dat tussen twee special surveys in wordt gevoerd A = annual survey = jaarlijks survey																

8.2 Toepassing

De oorspronkelijke 'Performance Standard for Protective Coatings' (PSPC) werd goedgekeurd door de IMO Resolutie 'MSC.215(82)'. PSPC is de IMO -resolutie die de veiligheid op zee probeert te verbeteren door corrosie aan te pakken in de ballasttanks en in de ruimtes tussen de dubbele wand. (Aerts, 2012)

Deze resolutie was van toepassing op alle ballasttanks in schepen van meer dan 500 brutoton. Ook is PSPC van toepassing op alle ruimtes tussen de dubbele romp van bulkschepen met een lengte van 150 meter of meer. PSPC geldt voor alle schepen waarvan:

- De oplevering zal plaatsvinden op of na 1 juli 2012.
- De kiel gelegd is op of na januari 2009.
- Het bouwcontract gesloten is op of na 1 juli 2008.

PSPC pakt corrosie in de ballasttanks aan door de applicatie van een verfsysteem te reglementeren. Ook laat PSPC ruimte om alternatieve methodes te gebruiken. (IMO, 2006) Later werd PSPC ook verplicht voor ladingtanks van olietankers⁵². PSPC-COT is dus PSPC voor ladingtanks van olietankers. Daardoor zijn beide resoluties nagenoeg identiek⁵³.

PSPC-COT is van toepassing op nieuwe tankers die bestemd zijn voor het vervoer van ruwe aardolie, internationale reizen maken en een laadvermogen hebben van meer dan 5000 ton. PSPC-COT treedt in werking vanaf:

- Het ondertekenen van het bouwcontract na 1 januari 2013.
- Het leggen van de kiel na 1 juli 2013 indien er geen bouwcontract gesloten is.
- Het afleveren van het schip na 1 januari 2016.

De resolutie is opgenomen in de SOLAS⁵⁴ onder hoofdstuk II-1: "Construction-structure, subdivision and stability, machinery and electrical installation", regel 3-11. (Wei et al., 2011)

⁵² Omwille van redenen die eerder in deze scriptie worden besproken.

⁵⁴ SOLAS staat voor "*The International Convention for the Safety of Life At Sea*" oftewel het 'Internationale Verdrag voor de beveiliging voor mensenlevens op zee'. Dit belangrijk verdrag beschrijft aan welke eisen zeegaande schepen moeten voldoen op het gebied van constructie, uitrusting en bemanning, afhankelijk van het vaargebied. (IMO, 2008)

Als alternatief voor het aanbrengen van een verfsysteem mag men de ladingtank beschermen met andere middelen zoals bijvoorbeeld corrosieresistent staal. Deze alternatieve beschermingsmethodes moeten voldoen aan de vereisten van resolutie MSC.289(87). Verder mag de vlaggenstaat een tankschip vrijstellen van deze verplichtingen om het testen van een nieuw verfsysteem of een nieuwe beschermingsmethode mogelijk te maken. Dit mag op voorwaarde dat deze tests passend en regelmatig gecontroleerd en beoordeeld worden, zodat men tijdig kan ingrijpen wanneer het alternatieve systeem faalt. Het feit dat het schip aan deze uitzonderingsregel voldoet zal worden vastgelegd in een *exemption file*. Ook mag de IMO een tanker voor ruwe aardolie vrijstellen van al deze voorgenoemde eisen als het schip gebouwd is om enkel maar ladingen te vervoeren of ladingsoperaties uit te voeren die geen corrosie veroorzaken. Wanneer zo'n schip vrijgesteld is van dergelijke regels zal dit worden neergeschreven in een *exemption certificate*. (SOLAS, 2014)

8.3 Locatie van het verfsysteem

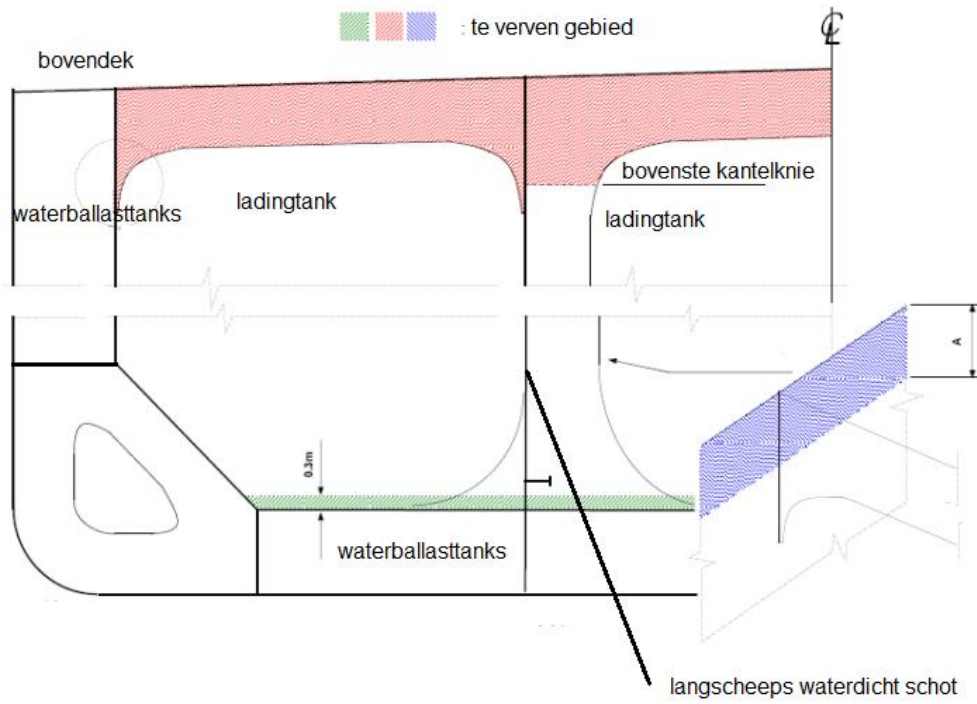
De ladingtanks moeten op zijn minst geleverd worden op de volgende plaatsen:

- De onderkant van de dekbeplating.
- De bodembeplating van de binnenste bodem en alles wat op deze bodembeplating staat tot op een hoogte van 0.3 m.
- De langsscheepse en dwarsscheepse waterdichte schotten moeten geleverd worden tot op de hoogte van de bovenste toegangsmogelijkheden. De bovenste toegangsmogelijkheden en de ondersteunende elementen van de toegangsmogelijkheden moeten volledig geleverd zijn.
- De waterdichte schotten van de ladingtank die niet voorzien zijn van toegangsmogelijkheden moeten geleverd worden. Deze verlaag begint aan de dekbeplating en gaat naar beneden over een lengte die ten minste gelijk staat aan 10% van tankhoogte⁵⁵. De verlaag moet echter niet verder doorgaan dan 3 meter onder het dek.
- De interne structuren van het dek⁵⁶. Dit betekent bijvoorbeeld de binnenkant van de pijpen. (Jansen, pers. comm., 2017)
- De knieën die in verbinding staan met het dek en met de langsscheepse en/of dwarsscheepse waterdichte schotten.
- Indien aanwezig moeten de onderdekse dwarsscheepse frames geleverd worden tot op de hoogte van de eerste kantelknieën. (IMO, 2017)

De verflagen moeten verschillende en lichte kleuren hebben, zodat corrosie en verfdefecten gemakkelijk gedetecteerd kunnen worden. (IMO, 2010)

⁵⁵ Met de tankhoogte wordt de hoogte van de tank bedoeld, gemeten aan de middellijn van de tank. (IMO, 2010)

Dwarsdoorsnede van een VLCC



Figuur 75: Locatie van het verfsysteem. (IMO, 2016)

8.4 TPA

De TPA, ofwel de tripartite overeenkomst (*Tripartite Agreement*), is de overeenkomst tussen de drie belangrijkste betrokken partijen in het verfproces:

- De scheepswerf.
- De verffabrikant.
- De eigenaar van het schip.

In de TPA komen de drie partijen overeen over de aanpak van de inspectie van de oppervlaktevoorbereiding en de werkwijze tijdens het verfproces. De TPA mag niet afwijken van PSPC-COT maar mag passend geïnterpreteerd worden om te voldoen aan de werkmethodes van de scheepswerf en de vereisten van de eigenaar. (Wei et al. 2011) Het is mogelijk dat scheepswerven hierdoor praktijken zullen hanteren die, binnen de grenzen van PSPC-COT, nefast zijn voor de kwaliteit van het verfsysteem. (De Baere, pers. comm., 2017)

Vroeger waren de vereisten voor het verfproces vaak niet genoeg gespecificeerd. Daardoor moesten veel zaken ter plekke worden geregeld, tijdens het verloop van het verfproces. Hierdoor daalde de voorspelbaarheid van het resultaat en daarmee ook de kans dat het verfsysteem voldeed aan de eisen van PSPC-COT. Bovendien konden afwijkende waarden gemakkelijk misbruikt worden wanneer bepaalde procedures niet goed op voorhand werden vastgelegd. Door deze problemen op te lossen kan de productiviteit stijgen en kunnen de kosten gedrukt worden. Dit is waarom de drie partijen op voorhand een gedetailleerde overeenkomst moeten hebben. (Wei et al., 2011)

PSPC-COT voorziet referentiestandaarden en de TPA moet de te volgen procedures definiëren. De TPA definieert bijvoorbeeld:

- De procedure om de aanwezigheid van oplosbare zouten te meten.
- De procedure om oplosbare zouten te verwijderen.
- De maximale NDFT⁵⁷.
- De methode om de NDFT te bepalen.
- De op te stellen rapporten.

⁵⁷ NDFT staat voor *Nominal Dry Film Thickness*. Dit is de gemiddelde dikte van de verflaag nadat deze gedroogd is. (Heylbroeck, 2012)

Hierbij moeten de partijen ook overeen komen welke ruimtes te verven, welk verfsysteem te gebruiken en de kwalificaties van de verfinspecteur. (Wei et al., 2011)

8.5 PSPC-COT pijlers

PSPC-COT baseert zich op een aantal pijlers. Elk van deze pijlers is uiterst belangrijk met het oog op het aanbrengen van een van een duurzaam verfsysteem dat de minimumleeftijd van 15 jaar moet halen in 'goede' conditie. Deze pijlers zijn het type verfsysteem, de oppervlaktevoorbereiding, het aanbrengen van de verf, het onderhoud, de inspectie en het documenteren van het verfproces. (Aerts, 2011) Tabel 13 geeft een overzicht van de belangrijkste stappen bij het implementeren van PSPC-COT tijdens de nieuwbouw van het schip. (Wei et al., 2011)

Tabel 13: PSPC-COT voor en tijdens de bouw van het schip. (Wei et al., 2011)

1: Voor aanvang van het verfproject.
Tripartiteovereenkomst tussen de verffabrikant, de werf en de scheepseigenaar.
Selectie van de gebruikte verfsystemen: enkel verfsystemen met een type approval certificate.
Gebruik van gekwalificeerde en gecertificeerde verfininspecteurs. Zij moeten minstens 2 jaar relevante ervaring hebben met NACE CIP Niveau 2 of FROSIO Inspecteur niveau III of equivalent.
Specificaties en inspectieprocedures van de oppervlaktevoorbereiding en het verfproces.
2: Tijdens het verfproject.
Kwaliteitscontrole van de automatische shopprimerfabriek.
Primaire oppervlaktevoorbereiding door: * Selecteren van het straalmedium. * Het controleren van de temperatuur en de relatieve vochtigheid van het stalen oppervlak. * Het meten van de properheid en de ruwheid van het oppervlak.
Het aanbrengen van de shopprimer tezamen met: * Het meten van de temperatuur en de relatieve vochtigheid van het stalen substraat. * Het meten van de NDFT.
Werken aan het scheepsblok.
* Het behandelen van de lasnaden en de scherpe randen. * Het behandelen van beschadigde shop primer en het behandelen van intacte shop primer.
Het aanbrengen van het verfsysteem met de vereiste NDFT terwijl de ruimte passend geventileerd is en de relatieve luchtvochtigheid gecontroleerd wordt.
Het samenlassen van de scheepsblokken.
* Lassen die nog niet geverfd zijn bewerken met elektrisch gereedschap. * Beschadigde verf repareren.
Laatste reparaties aan het verfsysteem
3: Einde van het verfproject.

8.6 Selectie van het verfsysteem

Om een ladingtank te beschermen tegen corrosie is er meer dan één enkele verflaag nodig. Daarom verplicht PSPC-COT niet de applicatie van één enkele verflaag, maar wel van een volledig verfsysteem. Dit verfsysteem bestaat uit een grondverf en twee topcoats. Als grondverf verplicht PSPC-COT het gebruik van een inhibitorvrije zinksilicaat shop primer. Deze shop primer dient als een beschermende laag die het staal beschermt gedurende de periode dat het complete verfsysteem nog niet aangebracht is⁵⁸. Over de grondverf worden twee epoxy topcoats aangebracht. Deze topcoats moeten het staal beschermen tegen corrosie. Wanneer de epoxy topcoats aangebracht worden over de shop primer, is het belangrijk dat deze verschillende verflagen compatibel zijn met elkaar. (IMO, 2010)

De selectie van het verfsysteem gebeurt door de betrokken partijen. Hierbij moeten de partijen rekening houden met een aantal factoren:

- De locatie van de ruimte relatief ten opzichte van verhitte oppervlaktes.
- De regelmaat waarmee ladingoperaties worden uitgevoerd. De directe omgeving waaraan het verfsysteem wordt blootgesteld.
- De vereiste properheid en droogte van het oppervlak.
- Wanneer er bijkomende kathodische bescherming wordt gebruikt moet het verfsysteem complementair zijn met dit beschermingssysteem.
- De permeabiliteit van het verfsysteem en de weerstand tegen zuren en inert gas.
- De mechanische eigenschappen van het verfsysteem. (flexibiliteit, impactweerstand). Tijdens *tank cleaning* wordt een vloeistof (ruwe aardolie, water, ...) onder hoge druk tegen de tankwand gespoten. Om hiertegen bestand te zijn is het belangrijk dat de verf gunstige mechanische eigenschappen heeft. (De Baere, 2017)

De *bellmouth* is aanzuigopening waarlangs de lading uit de tank kan worden gezogen. Door de stroomsnelheid van de lading bestaat het risico dat het verfsysteem erodeert. Hoewel dit fenomeen een probleem vormt in ballasttanks, kan

⁵⁸ De specificaties van het verfsysteem worden later in dit hoofdstuk besproken.

dit misschien ook voorkomen in ladingtanks (TSCF, 2014). De TSCF- richtlijn⁵⁹ stelt dat deze gevoelige zones moeten worden beschermd door een verfsysteem dat ofwel versterkt is ofwel dikker is dan normaal. Daarentegen geeft PSPC-COT geen specifieke richtlijnen over hoe corrosie ter hoogte van de aanzuiging moet worden aangebracht. Daarom zou PSPC-COT in de toekomst richtlijnen moeten voorzien die informatie geven over het verminderen van de erosie aan de *bellmouths*. (TSCF, 2014.)



Figuur 76: Corrosie onder de aanzuiging. (TSCF, 2014)

Op bepaalde oppervlaktes van een ladingtank kan de temperatuur sterk oplopen. Dit kan zo zijn wanneer het te verven vlak grenst aan waterdichte schotten die op hun beurt de grens vormen met een verwarmde ruimte. Zo kunnen bunkertanks en dagtanks verwarmd worden tot 90 °C. Ook kunnen dekken die blootgesteld worden aan de zon aanzienlijk temperaturen bereiken. Het is dan ook belangrijk dat het verfsysteem dat op die plaats wordt aangebracht bestand is tegen het geregeld stijgen/dalen van de temperatuur zonder dat de verf te bros wordt.

Bij het leveren van de verf moet de verfproducent gedocumenteerde performance records en technische informatiebladen kunnen voorleggen. (Wei et al., 2011) Deze documenten bewijzen dat het verfsysteem is goedgekeurd. De verfproducent moet ook in staat zijn om adequaat technisch advies te geven. De performance records,

⁵⁹ Dit is een richtlijn die van toepassing is op het aanbrengen van een verfsysteem in ballasttanks. De TSCF richtlijn is niet verplicht. (TSCF, 2017)

technische informatiebladen en elke assistentie die is verleend door de fabrikant zullen worden neergeschreven in het CTF. (Wei et al. , 2011)

8.7 Eerste oppervlaktevoorbereiding

Schepen worden opgebouwd uit stalen platen en stalen verstijvers. De eerste oppervlaktevoorbereiding is de voorbereiding van de stalen constructieplaten, voordat de eigenlijke bouw van het schip start. Wanneer deze staalplaten van de staalfabriek op de werf toekomen, zijn deze bedekt met walshuid⁶⁰ en roest⁶¹. Deze walshuid is onstabiel. Daardoor zal water doordringen tot het onderliggende staal en corrosie veroorzaken. Bijgevolg zal het corrosieproces de walshuid losmaken, waardoor walshuid ongeschikt is om te schilderen. Het is dan ook absoluut noodzakelijk om deze walshuid te verwijderen. (De Baere, 2011)

Om de duurzaamheid van het verfsysteem te garanderen moet het substraat vuil- en vetvrij zijn (Heylbroeck, 2015). Bovendien moet het oppervlak ruw genoeg zijn zodat de verflaag zich goed kan hechten. Zoals eerder besproken is de oppervlaktevoorbereiding zeer belangrijk omdat het oppervlak de fundering vormt van alle verflagen die er nadien op worden aangebracht. Volgens Wei et al. (2011) wordt falen dan ook in 70% van de gevallen veroorzaakt door een slechte oppervlaktevoorbereiding. Daarom vereist PSPC-COT dat het oppervlak tijdens de primaire oppervlaktevoorbereiding wordt behandeld totdat een properheid van minstens Sa 2 ½ bereikt wordt. Hierbij varieert de oppervlakteruwheid tussen 30 en 75 µm. (Wei et al. , 2011) Echter, deze oppervlakteruwheid is een compromisgetal dat een evenwicht zoekt tussen een goede hechting van het verfsysteem en een hoge productiesnelheid op de werf. Wanneer het oppervlakteprofiel 90 µm bedraagt zal de verf beter hechten, en zal het verfsysteem langer in een goede staat blijven. (De Baere, 2011) Tabel 14 geeft een overzicht van de verschillende roestgraden van staal

⁶⁰De walshuid is een harde laag ijzeroxide (Fe_2O_3) die ontstaat bij het warm walsen van staal. (Aerts, 2012)

⁶¹Voor aanvang van de primaire oppervlaktevoorbereiding varieert die staat van het staal meestal tussen A en B. Men ziet men veel walshuid met een beetje lichte roest. Conditie C en D worden sterk afgeraden omwille van het voorkomen van putcorrosie. (Wei et al, 2011)

Tabel 14:Overzicht van de roestgraden van staal. (CIN, 2011)

Graad	Eigenschappen	Foto
A	Het staaloppervlak is grotendeels bedekt met walshuid. Er is nauwelijks roest aanwezig.	
B	Het staaloppervlak begint te roesten. De walshuid begint vlokken te vormen.	
C	De walshuid is weggeroest of kan van het stalen oppervlak worden afgeschraapt. Lichte putcorrosie is zichtbaar met het oog.	
D	De walshuid is weggeroest en algemene putcorrosie is zichtbaar.	

Bij de voorbereiding van het oppervlak gaat men stralen. Dat betekent dat er tegen zeer hoge snelheid straalmiddel tegen het substraat wordt afgevuurd. Hierdoor kan de werf een gecorrodeerd oppervlak reinigen tot het metaal volkomen glad is. (Heylbroeck, 2015). Bij het kiezen van het straalmiddel heeft men de keuze tussen shotdeeltjes en gritdeeltjes. Shotdeeltjes lijken op kogels en hebben een ronde vorm. Dit is effectief bij het verwijderen van walshuid. Grit is hoekiger en is effectiever bij het verwijderen van roest. (Aerts, 2012) Logischerwijs gebruiken werven een mengsel van zowel shot als grit om het staaloppervlak voor te bereiden. De verhouding tussen de straalmiddelen hangt dan af van de verhoudingen tussen roest en walshuid.

Om te verzekeren dat het substraat niet gecontamineerd raakt, is het belangrijk de juiste straalmiddelen te gebruiken. Echter, PSPC-COT biedt geen richtlijnen voor het gebruik van straalmiddelen. Zo staat er in de resolutie niets over de karakteristieken van het straalmiddel en het verzekeren van de kwaliteit van het stralen. Daardoor bestaat het risico dat er geen goed oppervlakteprofiel wordt bekomen of dat het oppervlak gecontamineerd raakt. Daarom zou PSPC-COT in de toekomst regels moeten bevatten in verband met het certificeren en testen van het straalmiddel en het straalproces. (TSCF, 2014)

Het stralen moet onder de juiste omstandigheden gebeuren. Er kan niet gestraald worden wanneer de relatieve vochtigheid boven 85 procent ligt. Bovendien moet de temperatuur van het staal minstens 3° C boven het dauwpunt liggen. Ten slotte mag de concentratie opgeloste zouten op het oppervlak maximaal 50 mg/m² bedragen.



Figuur 77: Een arbeider die bezig is met stralen. (kblasting, 2016)



Figuur 78: Mengeling van shot -en gritdeeltjes. (Wei et al., 2011)

Om de properheid van het bestraalde oppervlak te bepalen worden er verschillende straalnormen gebruikt. Deze normen zijn door verschillende organisaties bepaald.

- Verenigde Staten (ASTM⁶² D 2200 en SSPC⁶³ VIS. 1&2)
- Verenigd Koninkrijk (Standaard BS⁶⁴ 4232)
- Duitsland (Standaard DIN⁶⁵ 18364)
- Japans (JSRA⁶⁶ SPSS, 1975)
- Zweeds (SIS⁶⁷ 05 5900)
- De meest gebruikte standaard is de Zweedse standaard. Deze standaard werd overgenomen door de internationale standaard ISO 8501-1. In de tabellen staan respectievelijk de internationale standaard en de vergelijking tussen de belangrijkste standaarden onderling. (Amtec, 2016)

Tabel 15: Een overzicht van standaarden van oppervlaktevoorbereiding. (Amtec, 2016)

⁶²“American Society for Testing and Materials”. (ASTM, 2016)

⁶³ “Steel Structures Painting Council.” (SSPC, 2016)

⁶⁴“British Standard.” (e-paint, 2016)

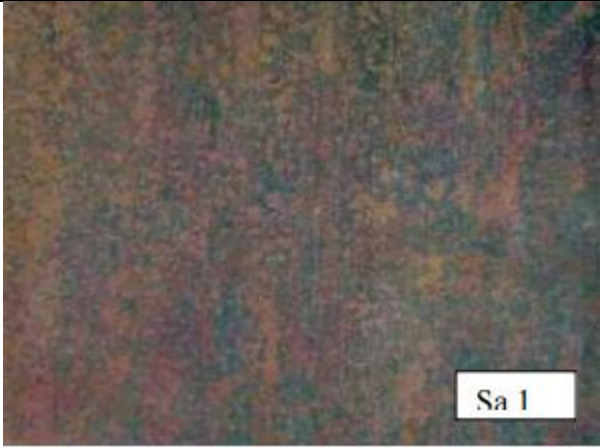
⁶⁵ “Deutsches Institut für Normung” ofwel Duits Instituut voor Standarisatie. (DIN, 2016)

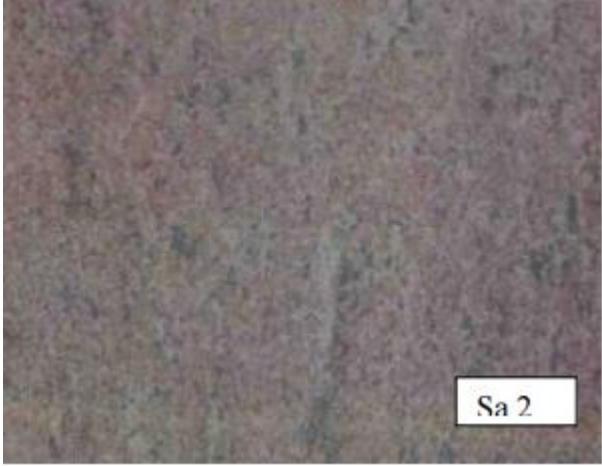
⁶⁶ “Japan Ship Technology Research Association” ofwel de Japanse organisatie voor onderzoek naar scheepstechnologie. (JSRA, 2016)

⁶⁷ Swedish Standards Institute. (SIS, 2016)

Overzicht standaarden oppervlaktevoorbereiding						
		Zweedse norm	ISO	SSPC	JSRA	NACE
Gritstralen						
	Visueel proper	Sa 3	Sa 3	SP 5		1
					Sh/Sd 3	
	Zeer proper	Sa 2.5	Sa 2.5	SP 10		2
					Sh/Sd 2	
	Proper	Sa 2	Sa 2	SP 6		3
					Sh/Sd 1	
	Eerder proper	Sa 1	Sa 1	SP 7		4
				SP 12		5
Machinaal reinigen						
		St 3	St 3	SP 3	Pt 3	/
		St 2	St 2	SP 2	Pt 2	/
Handgereedschap						
		St 3	St 3	SP 3	/	/
		St 2	St 2	SP 2	/	

Tabel 16: Straalnormen gebruikt door ISO 8501-1. (De Baere, 2008)

Sa1	Licht stralen. Het oppervlak is vrij van zichtbare olie, vet en vuil. Ook is het oppervlak vrij van weinig hechtende walshuid, roest, verven en vreemde materie.	
-----	--	--

Sa 2	Grondig stralen. Het oppervlak is vrij van zichtbare olie, vet en vuil. Verder zien we dat het oppervlak grotendeels vrij is van walshuid, roest, verven en vreemde materie. Eventuele overblijvende contaminaties hangen stevig vast aan het oppervlak.	
Sa 2 1/2	Zeer grondig stralen. Wanneer we kijken zonder uit te vergroten zien we een oppervlak dat vrij is van zichtbare olie, vet en vuil. Roest, verf, vreemde materie en walshuid zijn zodanig grondig verwijderd dat enkel kleine vlekjes en strepen zichtbaar zijn.	
Sa 3	Stralen tot visueel proper staal. Het oppervlak is vrij van zichtbare olie, vet en vuil. De kleur is uniform en metaalachtig.	

Soms moeten geverfde oppervlaktes gestraald worden om daarna terug opnieuw geverfd te worden. In dit geval is waterstralen en goede alternatieve methode op gritstralen. Daardoor heeft de werf meer keuze in hoe ze de oppervlaktes straalt en kan ze haar productiviteit verhogen. Helaas bespreekt PSPC-COT het waterstralen niet. (TSCF, 2014)

Na het stralen brengt de werf een shop primer aan. Dit is een verflaag die het roesten van het staal tijdens de bouw tegengaat. Bovendien kan de shop primer functioneren als een eerste grondlaag waarop de volgende verflagen zullen worden aangebracht. PSPC-COT schrijft voor dat deze shop primer een verf is op basis van inhibitorvrije zinksilicaat of equivalent. (IMO, 2010) Shop primers met zinksilicaat bieden een goede weerstand tegen corrosie omdat zink een minder edel metaal is dan staal. Daardoor zal zink optreden als anode en het staal beschermen in geval van corrosie. (Amtec, 2015) De dikte van de shop primer bedraagt ongeveer 15-25 μm . Dit kan problematisch zijn. Doordat de oppervlakteruwheid van het staal groter is dan de dikte van de shop primer, zal het profiel van het staal boven de shop primer uit steken. Zodoende kan het staal beginnen roesten. Daarom is het beter een dikkere shopprimer aan te brengen van bijvoorbeeld 75 μm . (De Baere, 2017)

De gebruikte shopprimer moet compatibel zijn met lassen en snijden. Zo mogen er tijdens deze processen geen toxische dampen vrijkomen. Ook moet de shop primer compatibel zijn met het gebruikte verfsysteem. Daarom moet er in de TPA worden overeengekomen welk verfsysteem er zal worden aangebracht. (Wei et al, 2011)

Het aanbrengen van een goede en gecertificeerde shop primer kan het werk tijdens de secundaire oppervlaktevoorbereiding aanzienlijk verlichten. Als de shop primer werd getest en goedgekeurd als zijnde een deel van het geselecteerde verfsysteem, kan deze shop primer behouden blijven als grondlaag. Dit doet men door hem enkel maar te behandelen met een lichte 'sweep blast'⁶⁸, waterstralen of een andere methode die niet schadelijk is voor deze shopprimer. Indien de shop primer niet werd goedgekeurd moet het oppervlak terug gestraald worden tot Sa 2 of Sa 2 $\frac{1}{2}$. Pas daarna kan de werf de eerste verflaag aanbrengen. (Wei et al., 2011)

⁶⁸ 'Sweepblasting' is een oppervlaktebehandeling waarbij er snel een straal met shot of grit over het oppervlak wordt gespoten. Dit is een manier om oppervlakteruwheid te bekomen op een al bestaande verflaag zonder deze te vernietigen. Zo zal de volgende verflaag beter hechten. (Transocean Coatings, 2016)

Wanneer er geverfd wordt is een goede ventilatie belangrijk. Deze ventilatie moet in stand gehouden worden tijdens het ganse verloop van het verfproces zodat de verf goed kan drogen en uitharden. Verder moet het verfsysteem worden aangebracht in gecontroleerde omstandigheden. De relatieve vochtigheid moet lager zijn dan 85% en de temperatuur van het staal mag niet lager zakken dan tot 3 °C boven het dauwpunt⁶⁹. Verder moeten andere mogelijke eisen van de verffabrikant worden voldaan. Na het aanbrengen van elke verflaag, zal de filmdikte ervan gemeten worden. Na het aanbrengen van het gehele verfsysteem, zal de totale laagdikte van het verfsysteem gemeten worden. Deze diktemetingen moeten met passende meetinstrumenten uitgevoerd worden en destructief testen moet zoveel mogelijk vermeden worden. Wanneer er na het aanbrengen van het verfsysteem gebieden met defecten (luchtbelletjes, gaatjes, etc.) zijn, moeten deze gebieden aangeduid en gerepareerd worden. De uitgevoerde reparaties zullen opnieuw gecontroleerd en gedocumenteerd worden. (Wei et al., 2011)

⁶⁹ Het dauwpunt is de temperatuur waarbij bij een gelijkblijvende dampdruk condensatie optreedt. Wanneer de temperatuur van een metaal onder het dauwpunt ligt zal er zich condens vormen op het oppervlak en kan men niet verven. (encyclo, 2016)

8.8 Tweede oppervlaktevoorbereiding

Nadat de stalen platen zijn behandeld, worden deze samen gelast tot afzonderlijke blokken. Later worden deze blokken samengevoegd tot één schip. Tijdens de bouw van een scheepsblok raakt het oppervlak van het te verven staal gecontamineerd met onreinheden. Bovendien kan de shopprimer beschadigd zijn door laswerken. Om er voor te zorgen dat het oppervlak geschikt is om van een definitieve verflaag voorzien te worden, ondergaat het een tweede oppervlaktevoorbereiding. Deze oppervlaktevoorbereiding vindt plaats tegen het einde van de bouw van het scheepsblok

Voor aanvang van het stralen moeten de scheepsblokken zo volledig mogelijk afgewerkt te zijn. Dit betekent dat de ladders, platformen, rails en andere elementen geïnstalleerd zijn voor het stralen begint. Deze onderdelen moeten tevens zo veel mogelijk voldoen aan PSPC-COT om te voorkomen dat zij de prestaties van de verfsystemen van de aanliggende structuren negatief beïnvloeden. (Wei et al., 2011)



Figuur 79: Een afzonderlijk blok voordat het aan de andere blokken wordt gelast. (Central Industry Group, 2016)

De mate waarin men de secundaire oppervlaktevoorbereiding moet uitvoeren, hangt af van de staat en kwaliteit van de verfsystemen die werden aangebracht tijdens de vorige stadia van de bouw. De gebruikte shop primer moet voldoen aan de eisen van PSPC-COT. Beschadigde shop primers moeten gestraald worden tot Sa 2 $\frac{1}{2}$. Wanneer de shop primer nog intact is en al eerder werd gekwalificeerd als onderdeel van het verfsysteem mag deze behouden blijven. De shop primer moet dan enkel maar gestraald worden door middel van *sweep blasting*⁷⁰ of waterstralen⁷¹. Zo wordt een goede goede adhesie van de epoxy- verlaag verzekerd. Een intacte shop primer die niet gekwalificeerd is moet worden gegritstraald tot Sa2 $\frac{1}{2}$. (IMO, 2010)

Deze voorbereiding is zeer belangrijk, want elke mogelijke contaminatie die wordt achtergelaten op de shopprimer kan zorgen voor een verzwakking in de hechting tussen het stalen substraat en de bovenliggende verflagen.

Bij het reinigen van het oppervlak is het belangrijk dat er niet teveel stof aanwezig is. De kwantiteit van de stofpartikels mag maximaal rating "1" krijgen voor partikelgrootte klasse "3", "4" en "5". (IMO, 2010)

Tabel 17: Klassen van stof volgens ISO 8502-3 (Gardner, 2016)

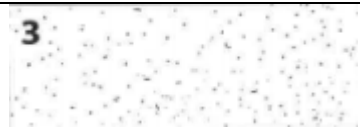
Klasse	Beschrijving van de stofpartikels
0	Wanneer we uitvergroten met factor 10 zijn de partikels niet zichtbaar.
1	Partikels zijn zichtbaar bij een uitvergroting van factor 10 maar ze zijn niet zichtbaar onder normaal of gecorrigeerd zicht. Deze partikels hebben normaal gezien een diameter van minder dan 50µm.
2	De partikels zijn zichtbaar onder een normaal of gecorrigeerd zicht. Deze partikels hebben normaal gezien een diameter tussen 50 en 100 µm.
3	Partikels zijn duidelijk zichtbaar onder normaal of gecorrigeerd zicht. Deze partikels zijn groter dan 0.5 mm.

⁷⁰ Sweep blasting is het behandelen van het oppervlak door snel over het oppervlak te passeren met een straal. 'Sweep blasting' wordt meestal gebruikt om oppervlakteruwheid te verkrijgen op een bestaande verlaag, zodat de nieuwe verlaag er beter op hecht. Voor shotstralen worden meestal fijne partikels gebruikt (0.2-0.5 millimeter) om te voorkomen dat de verlaag te veel beschadigd raakt. (Transocean coatings, 2016)

⁷¹ Waterstralen is het onder hoge druk (357-700 bar) afvuren van water op een oppervlak om zo het substraat te reinigen. (Aerts, 2012)

4	Partikels met een diameter tussen 2 en 2.5 millimeter.
5	Partikels met een diameter groter dan 2.5 millimeter.

Tabel 18: Beoordeling van de kwantiteit stof. (Corrosionist, 2016)

0	
1	
2	

Veel scheepswerven gritstralen het volledige blok tot Sa 2_{1/2}. Hierdoor zal de oppervlakteruwheid groter zijn dan bij shotstralen. Doordat het volledige oppervlak werd behandeld tot Sa 2_{1/2} worden de oppervlaktedefecten die ontstonden tijdens de primaire oppervlaktevoorbereiding gecorrigeerd. (Wei et al., 2011)

Wanneer de shop primer behouden mag blijven, wordt er vaak aan waterstralen gedaan. Helaas worden de specificaties van het waterstralen (afstand, waterkwaliteit, drogen, druk, etc.) niet tot in detail gedefinieerd. Daardoor moeten deze worden overeengekomen in de TPA. (Wei et al., 2011)

Na het stralen komen soms nog oppervlaktedefecten voor. Deze mogen niet altijd worden weggeslepen omdat dit de oppervlakteruwheid aantast. Kleine correcties mogen enkel worden bijgeslepen op voorwaarde dat men een schijf met een grote ruwheid gebruikt. Zo blijft de ruwheid van het oppervlak behouden. Het gebruik van een slijpschijf moet in dit geval besproken worden en vermeld in de TPA. Bij het slijpen mag het geslepen oppervlak niet groter zijn dan 3% van de totale oppervlakte van de tank. (Wei et al., 2011)

Oppervlaktevoorbereiding na het samenvoegen van de scheepsblokken

Tijdens de assemblage van het schip worden de scheepsblokken aan elkaar gelast. Hierbij zal een deel van het verfsysteem beschadigt raken. Wanneer het gaat over kleine beschadigingen die minder dan 2% van het totale oppervlak bedragen, mogen deze beschadigingen machinaal gereinigd worden. Hierbij moet het resultaat voldoen aan de ISO St 3-norm. (Wei et al, 2011)

St 3	Zeer zorgvuldig reinigen (hand/ machinaal). Wanneer men het oppervlak waarneemt met het blote oog dient het vrij te zijn van zichtbare olie, vet en vuil. Het grootste deel van de walshuid, roest, verflagen en vreemde materialen zijn verwijderd. Eventueel nog aanwezige verontreinigingen moeten stevig vastzitten.
St 2	Zorgvuldig reinigen (hand/machinaal). Wanneer men het oppervlak waarneemt met het blote oog is het vrij van zichtbare olie, vet, vuil, loszittende walshuid, roest, verflagen en vreemde materialen.

Tabel 19: St-normen. (Zandleven coatings, 2016)

St-3 kan bereikt worden door het oppervlak te bewerken met mechanisch gereedschap zoals een staalborstel. In afgesloten ruimtes (samen gelaste scheepsblokken) is dit veel gemakkelijker dan gritstralen omdat de werfarbeiders niet moeten sleuren met dikke luchtslangen. Bovendien moet er achteraf geen grit geruimd worden. Door het staal te bewerken met mechanisch gereedschap wordt het ruwheidsprofiel weggepoetst. Zodoende heeft het verfsysteem minder grip op het substraat en zal er een zwakkere adhesie zijn. (Jansens, pers.comm., 2017)



Figuur 80: Een schuurborstel en een bewerkte lasnaad tussen twee scheepsblokken. (De Baere, 2017)

Bovendien verplicht PSPC-COT dat prestatietests voor het verfsysteem enkel maar moeten uitgevoerd worden op oppervlakken die gestraald zijn tot Sa 2_{1/2}. Daarentegen moeten de oppervlaktes die bewerkt zijn met mechanisch gereedschap niet getest worden. Daardoor zijn de prestaties van het verfsysteem niet gegarandeerd en bestaat het risico dat de doelleeftijd van 15 jaar niet gehaald wordt. Bijgevolg zijn de randen tussen de scheepsblokken de achilleshiel van het verfsysteem in de ladingtank.

De beste oplossing is dat de zone rond de lasnaden gestraald wordt tot Sa2_{1/2}. Ook kunnen de testprocedures van PSPC-COT worden herzien. Zo zou er een adhesietest moeten verplicht worden voor oppervlakken die bewerkt zijn tot St3. Daardoor zullen de verfsystemen een specifieke formulatie krijgen voor dergelijke oppervlakken. (TSCF, 2014)



Tabel 20: Een lasnaad die twee scheepsblokken met elkaar verbindt en werd bewerkt met mechanisch gereedschap. (TSCF, 2014.)

Een groot oppervlak rond de lasnaden wordt niet geverfd. Daarom is het verstandig afdektape te gebruiken. Hierbij moet er zo min mogelijk tape worden gebruikt zodat een zo groot mogelijk deel van de tank geverfd wordt. Echter, PSPC-COT beschrijft niet voldoende hoe het assemblageproces van de verschillende scheepsblokken moet verlopen. Bovendien wordt het maximale oppervlak dat mag overgelaten worden, niet nauwkeurig gedefinieerd. (Jansen, pers.comm., 2017)



Figuur 81: De toekomstige lasnaden van een scheepsblok voor het inpakken met tape. (Wei et al., 2011)



Figuur 82: De toekomstige lasnaden beschermd met tape. (Wei et al., 2011)

Afronden van de randen

Vaak komen er scherpe randen voor op flenzen, afvoergaten en verluchtingsopeningen. Deze moeten worden afgerond zodat de kromtestraal van de afronding minstens 2 millimeter bedraagt. Het afronden wordt gedaan door middel van ‘*three-pass grinding*’. Dit betekent dat een arbeider in drie stappen de rand afrondt, door drie keer over het oppervlak te gaan met een slijptol. (Figuur 83: Het afronden van de scherpe randen. (Wei et al., 2011)) Nadat alle elementen zijn gesneden en samen gelast in een blok, moeten alle defecten, contaminaties en lasnaden behandeld worden zoals vereist door ISO8501-2 P2. (Broderick, Kattan, Wright, 2005)



Figuur 83: Het afronden van de scherpe randen. (Wei et al., 2011)

Eerder werd besproken hoe een vervriendelijke constructie kan bijdragen aan een langere levensduur van het verfsysteem. Merk op dat PSPC-COT, buiten het afronden van de randen, geen verder richtlijnen biedt in verband met *coating friendly design*. De structuren die in de ladingtank aanwezig zijn kunnen daardoor veronvriendelijk ontworpen zijn, met alle gevolgen van dien. Gelukkig bevinden, door het invoeren van de dubbele wand, de meeste complexe structuren zich niet meer in de ladingtank. (De Baere, 2017)

8.9 De applicatie van het verfsysteem

Nadat de verfininspecteur heeft vastgesteld dat het te verven oppervlak voldoet aan de vereisten in verband met bijvoorbeeld properheid, ruwheid, oplosbare zouten en de aanwezigheid van vet moet de verflaag zo snel mogelijk worden aangebracht. Anders bestaat het risico dat het oppervlak terug gecontamineerd raakt. (Wei et al., 2011)

8.9.1 De voorschilderlaag

De resolutie verplicht het gebruik van ten minste 2 voorschilderlagen (stripe coatings)⁷². Wanneer het bewezen is dat de NDFT groot genoeg is na het aanbrengen van één laag, volstaat deze éne laag. In dit geval is een tweede laag niet verplicht omdat de dikte van de verflaag te groot zou worden en de verf te bros. Bovendien moet de voorschilderlaag een andere kleur hebben dan de deklaag, zodanig dat men gemakkelijk het onderscheid kan maken tussen de verschillende verflagen. De voorschilderlaag moet worden aangebracht met een verfborstel of een verfroller en niet door middel van bijvoorbeeld een verfspuit. Na het verven moet de verf eerst passend drogen. Pas daarna mag de volgende laag worden aangebracht. (Wei et al., 2011)



Figuur 84: Het aanbrengen van een grijze voorschilderlaag. (Wei et al., 2011)

⁷² Een voorschilderlaag is een verflaag die bijkomend wordt aangebracht op plaatsen waar het verfsysteem snel zou kunnen falen zoals hoeken en randen. Op die manier wordt de totale dikte van het verfsysteem groter en zal het minder snel falen.

8.9.2 De topcoats

De topcoats zullen de barrière vormen die het staal beschermt tegen corrosie. Voordat deze lagen worden aangebracht, is het uiterst belangrijk dat het substraat vrij is van elke mogelijke contaminatie. De applicatie van de topcoat moet uiterst zorgvuldig gebeuren. Alleen zo kan men een continue, beschermende verlaag bekomen. Wanneer de verf wordt aangebracht door middel van een verfspuit, is het uiterst belangrijk dat de spuitmonden de juiste afmetingen hebben. Zo mag de spuitmond niet te groot zijn, en moet de afstand tussen de spuitmond en het substraat 30-50 cm bedragen. Ook moet de applicateur bijzondere aandacht besteden aan de achterkant van verstijvers, gaten, randen, etc. Om een goede verneveling van de verf te bekomen, is het belangrijk dat de verf de juiste viscositeit heeft. Bovendien moet de spuitmond werken op de juiste druk.

Om een goede hechting tussen de verflagen onderling te verzekeren, moeten de verflagen op het juiste tijdstip overschilderd worden. Hierbij geeft het technisch informatieblad van de verffabrikant het tijdsinterval tussen het herverven, in functie van de temperatuur.

PSPC-COT bepaalt dat er minstens twee epoxy topcoats worden aangebracht. Hierbij moet de NDFT van de twee verflagen samen minimaal 320 μm zijn volgens de 90/10 regel. Deze regel houdt in dat 90 procent van alle diktemetingen groter moet zijn of gelijk moet zijn aan deze dikte en dat geen enkele van de metingen lager mag zijn dan 0.9 keer de NDFT.

De resolutie bepaalt niet de dikte van de afzonderlijke toplagen. Zo kan de eerste toplaag een sneldrogende laag zijn met NDFT van 20 μm . Vervolgens zal de tweede toplaag een NDFT hebben van minstens 300 μm . Twee lagen van elk 160 μm dik is tegenwoordig het meest gebruikte systeem. (Wei et al., 2011)

Echter, PSPC-COT bepaalt geen maximale NDFT. Daardoor heeft de werf de vrijheid om de verf zeer dik aan te brengen. Zodoende bestaat het risico dat de het verfsysteem, door haar grote laagdikte, gemakkelijk scheurt. Daardoor bestaat het risico dat het verfsysteem vroegtijdig faalt. (De Baere, 2017)

8.9.3 Mengen van het bindmiddel en de verharder

Epoxy -verfsystemen hebben een beperkte houdbaarheid of *shelf life*. De *shelf life* van een product is de tijdsduur waarin het product in goede staat zal blijven. De *shelf life* gaat er vanuit dat het product in zijn oorspronkelijke verpakking wordt bewaard, in een afgeschermd omgeving en bij een temperatuur van 25 °C. Bij een hogere temperatuur zal de houdbaarheid van het product afnemen. Gegevens over de houdbaarheid kunnen we terugvinden op het technisch informatieblad van het product.

Wanneer de fabrikant geen specifieke gegevens geeft over de *shelf life*, zouden ééncomponentverven niet langer mogen opgeslagen worden dan 5 jaar bij een temperatuur van 25°C. Wanneer de temperatuur 35 °C bedraagt, zijn zo'n verven slechts 3 jaar houdbaar. De meeste tweecomponentproducten zijn 3 jaar houdbaar bij 25 °C en 2 jaar houdbaar bij 35°C. (Hempel, 2017)

8.9.4 De applicatieapparatuur

Verfsystemen kunnen op verschillende manieren worden aangebracht:

- Met de hand door middel van een borstel of een verfroller.
- Met behulp van een spuit door middel van air spray, airless spray en air-assisted airless. (Hempel, 2005)

Borstels en verfrollers bereiken maar een beperkte laagdikte (30 tot 50 µm). Daardoor worden deze vooral gebruikt voor het aanbrengen van een streeplaag en voor het bijwerken (*touching up*) van de verflaag. (Hempel, 2005)

Wanneer de verf wordt aangebracht met een spuit, is het uiterst belangrijk dat de juiste druk wordt uitgeoefend en dat de spuitmond de juiste afmetingen heeft. Als de druk of de afmetingen van de spuitmond anders blijken dan voorzien, kan dit ertoe leiden dat het verfsysteem niet de gewenste eigenschappen heeft. Zoals eerder besproken kan het opdrijven van een verfspuit nefast zijn voor de kwaliteit van het verfproject. Wanneer er wordt overgeschakeld van een 00.026" spuitmond naar een 00.035" spuitmond en de druk wordt opgedreven van 100 naar 150 bar zal de productie stijgen van 8000 m² per dag per spuit naar 20 000 m² per dag per spuit. Helaas leidt dit tot een afname van de kwaliteit van het verfproject. Zo bestaat het risico dat de verflaag het substraat niet goed bedekt. (Jansen, 2012)



Figuur 85: Een verfspuit. (De Baere, 2017)



Figuur 86: Een open film. (Jansens, s.d.)

8.9.5 Opleiding van de applicateurs

IMO PSPC-COT verplicht dat de inspecteurs voldoen aan een bepaald opleidingsniveau. Ook moeten de lassers en de inspecteurs die de lasnaden controleren voldoen aan regels die training en certificering verplichten. Wanneer het klassebureau controleert of de bouw van het schip voldoet aan de betreffende regels, zal deze eveneens de certificaten van de lassers controleren. Echter, de applicateurs van het verfsysteem moeten niet opgeleid zijn. (Jansen, 2012)



Figuur 87: De opleiding van de applicateurs wordt over het hoofd gezien. (TSCF, 2014)

In vergelijking met vroeger zijn de oppervlaktevoorbereiding en het aanbrengen van het verfsysteem complexer geworden. (Jansen, 2012) De applicateurs spelen hierbij een belangrijke rol. Als zij hun werk goed doen, kan een verfsysteem 15 jaar lang in een 'goede' staat blijven. Zoniet, stijgt het risico op verfdefecten waardoor het verfsysteem vroegtijdig zal falen. Dat betekent dat gebreken in het vakmanschap ertoe kunnen leiden dat een schip van honderden miljoenen dollar niet beschermd is tegen corrosie, zelfs als het verfsysteem wordt aangebracht volgens PSPC-COT. Het opnieuw verven van het schip is een streep door de rekening. Bovendien betekent een slechte applicatie een grote onzekerheid in de kostenberekening van het 'life-cycle-management' en het onderhoud van het schip. Daarom moest er iets ondernomen worden. (Jansen, 2012) Vanuit de industrie rees de vraag om applicateurs beter op te leiden. Zo richtte 'The Energy Institute' een 'Coating Task Force Group' op om onderzoek te voeren naar het optimaliseren van verfsystemen. Deze groep bestudeerde onder andere de volgende zaken:

- Richtlijnen voor het managen van het onderhoud van externe verfsystemen die aangebracht zijn op offshore installaties.
- Het ontwikkelen van een referentie van gebruikelijke praktijken in de industrie.
- Het verbeteren van de efficiëntie.

Eén van de conclusies van dit onderzoek was dat de kwaliteit en de efficiëntie van het verproces verbeterd kunnen worden door training en certificering van de betrokken partijen. (Jansen, 2012)

Het implementeren van een schema voor training en certificering zou de volgende voordelen hebben:

- Nieuwe partijen die willen toetreden tot de industrie zullen toegang hebben tot een gestructureerd en duidelijk verproces dat kan doorgegeven worden aan alle betrokken bedrijven.
- Door een dergelijk systeem is het mogelijk om de ervaring en de vaardigheden van de applicateurs beter te benadrukken.
- Het verbeteren van de HSEQ⁷³-regels en verwachtingen.
- Doordat er sprake is van een erkend kwalificatiesysteem is er een kwaliteitscontrole en kunnen de betrokken partijen er zeker van zijn dat de applicateurs competent zijn.
- Door een kwalificatiesysteem te implementeren kunnen de betrokken werknemers een carrière uitbouwen en hun huidige vaardigheden bewijzen met de nodige certificaten. (Jansen, 2012)

Een ander project dat het belang van gekwalificeerde applicateurs onderzocht was het 'DNV/ABS/FPSO Life Cycle Management (LCM) JIP'. Dit project onderzocht hoe de levenscyclus van FPSO's⁷⁴ efficiënter kon worden beheerd. Dit was nodig omdat dergelijke vaartuigen zeer duur zijn en een lange levenscyclus hebben (30 jaar). De onderzoeksgroep ontdekte hierbij dat eigenaars/operators van FPSO's zich zorgen maakten over de training en de vaardigheden van de applicateurs. (Jansen, 2012) Bovendien bleek dat overmatige corrosie de belangrijkste oorzaak was van het afdanken van offshore-constructies en schepen. (Jansen, 2012)

⁷³HSEQ staat voor Health, Safety, Environment en Quality. Dit betekent gezondheid, veiligheid, milieu en kwaliteit. (DAMEN, 2017)

⁷⁴ FPSO staat voor Floating Production, Storage and Offloading vessel. Dit is een vaartuig dat wordt gebruikt om aardolie en aardgas te produceren, te behandelen en op te slaan in afwachting van verder transport. (Shell, 2017)



Figuur 88: Het opleiden van de applicateurs. (Jansen, 2012)

Om de applicateurs zowel theoretisch als praktisch op te leiden, ontwikkelde NACE en ABS een cursus. Deze cursus duurt 3 dagen en zal gegeven worden door NACE ervaren en gecertificeerde instructeurs in de lokale voertaal. De eerste twee dagen wordt er gefocust op theorie en regelgeving in verband met gezondheid en veiligheid. De derde dag krijgen de cursisten praktijklessen waarin ze leren hoe ze met hun gereedschap om moeten gaan. Om te verzekeren dat de opleiding praktisch en kwalitatief blijft, mogen er maximaal 10-15 cursisten les volgen per instructeur. Ten slotte zou de opleiding plaatsvinden op de werf zelf en met het gereedschap van de werf. Daardoor worden de studenten getraind met materiaal dat ze effectief zullen gebruiken en blijven de kosten van de opleiding beperkt. (Jansen, 2012)

Het verplicht maken van een opleiding voor applicateurs kan op brede en uitgesproken steun rekenen. Bovendien is men het er mee eens dat een dergelijke opleiding het halen van de specificaties van PSPC-COT zou vergemakkelijken. Nochtans is een opleiding nog altijd niet verplicht en stelt PSPC-COT geen eisen aan de training van de applicateurs. (Jansen, 2012)

8.10 Laatste verfpreparaties

Nadat de tank is afgewerkt voeren de kwaliteitscontroleur van de werf, de verfininspecteur, de vertegenwoordigers van de scheepseigenaar en de vertegenwoordigers van de verffabrikant een laatste inspectie uit. Zij zullen verifiëren of de beschadigde gebieden werden gerepareerd en de metingen van de laagdikte werden uitgevoerd volgens de 90/10 regel. Alle meetresultaten van de laagdikte moeten hierbij genoteerd worden. Tenslotte zullen de aanwezige partijen een beknopt inspectieformulier van elke tank tekenen. (Wei et al. , 2012)

8.11 Documentatie

Het belangrijkste document is de 'Coating Technical File' of CTF. Dit is een verzameling van documenten die samen de geschiedenis van het verfsysteem weergeven. Dit dynamische document wordt opgestart vanaf de bouw van het schip en moet door de eigenaar worden onderhouden en aangevuld. (IACS, 2013) Eens het schip in vaart is, moet de CTF bijgehouden worden en moeten alle onderhoud reparaties en inspecties gedocumenteerd worden.(Aerts, 2012) De TCF bestaat uit de volgende documenten:

Type Approval Certificate

Het 'Type Approval Certificate' of TAC bewijst dat het product de nodige testen heeft doorstaan en voldoet aan de vereisten van PSPC-COT. Het TAC bevat de naam van het product en de shop primer waarop het getest is. Verder toont het certificaat welke andere shopprimers er mogen gebruikt worden in combinatie met het betreffende verfsysteem. Naast de NDFT bevat dit document ook de applicatievoorwaarden en de limieten van het product. Ten slotte bevat het TAC de geldigheidsduur van het certificaat. Het TAC moet wordt uitgereikt door de classificatiemaatschappij of door de vlaggenstaat. (Aerts, 2012)

Technische informatiebladen of 'Technical Data Sheets'

Het TAC moet altijd aangevuld worden met technische informatiebladen. Dit zijn documenten die alle relevante technische informatie bevatten van het product. Hieronder verstaat men bijvoorbeeld de applicatievoorwaarden⁷⁵, de productdata⁷⁶ en de fysieke kenmerken⁷⁷ van de verf. (IACS, 2013)

Ook geeft het technisch informatieblad de hoogste en de laagste temperatuur binnen dewelke het verfsysteem kan worden aangebracht. Helaas benadrukt dit document niet dat wanneer een verfsysteem, binnen de toegestane temperatuursrange, niet wordt aangebracht op de ideale applicatietemperatuur, de kwaliteit van het verfsysteem lager zal zijn. Wanneer men een verfsysteem aanbrengt bij de laagst mogelijke toegestane temperatuur, zal het verfsysteem sneller falen dan een verfsysteem dat op een ideale temperatuur werd aangebracht. (Jansen, 2017)

Het veiligheidsinformatieblad of 'Material Safety Data Sheet'

Dit is een document dat belangrijke veiligheidsinformatie bevat met betrekking tot het product. (IACS, 2013) Zo bevat het veiligheidsinformatieblad informatie over de classificatie van de stof, eerstehulpmaatregelen, maatregelen om een brand van het product te blussen, richtlijnen over hoe het product moet worden opgeslagen en richtlijnen over wat er moet gedaan worden bij contact met de stof. (Hempel, s.d.)

De verfproducent levert het TAC en het technisch informatieblad af aan de scheepswerf. Daarna zullen de scheepswerf en de verfproducent samen de jobspecificaties omschrijven.

De jobspecificaties

De jobspecificaties geven de belangrijkste regels die moeten gevolgd worden tijdens de staalvoorbereiding, de verfapplicatie, de verfspecificatie⁷⁸ en de verfcondities⁷⁹. (Aerts, 2012)

⁷⁵ Enkele voorbeelden van applicatievoorwaarden zijn: de mengverhouding, de gebruikte verdunner, de druk op de spuitmond, de NDFT en de applicatiemethode. (Hempel, 2017)

⁷⁶ Bijvoorbeeld de applicatietemperatuur, de vochtigheid en de samenstelling van de verf. (Hempel, 2017)

⁷⁷ Bijvoorbeeld het volumeprocent vaste stoffen, de tijd die nodig is om volledig te curen, het gehalte aan vluchtige stoffen (in g/l) en de relatieve dichtheid. (Hempel, 2017)

⁷⁸ Bijvoorbeeld de kleur, de naam van de verf, de naam van de minimale en maximale DFT, het aantal lagen en de naam van de verfproducent. (Aerts, 2012)

Verflogboek

De werf moet een verflogboek bijhouden. Dit is een logboek waarin staat dat het verfsysteem werd aangebracht volgens de specificaties en instructies van de verffabrikant. Als er werd afgeweken van de specificaties, staat dit opgeschreven in het document. (IACS, 2013)

Inspectieplan

Het inspectieplan duidt aan welke items er ten minste moeten worden geïnspecteerd. Ook duidt het inspectieplan een verfinspecteur aan samen met mogelijke assistenten.

Dagelijks logboek of daily log

In het *daily log* worden inspecties nauwkeurig omschreven. Wanneer er defecten aan het verfsysteem worden ontdekt, wordt dit genoteerd in het '*non-conformity report*'.

Nadat het verfproces is uitgevoerd, moet de inspecteur van de scheepswerf een laatste inspectie uitvoeren en de tank aanvaarden of weigeren.

8.12 Onderhoud en reparaties aan boord

Om het verfsysteem 15 jaar in een 'goede' staat te houden, moet het worden onderhouden aan boord. De aanbeveling nummer 87 van IACS stelt dan ook dat er geregeld kleine reparaties moeten worden uitgevoerd terwijl het verfsysteem nog steeds in een 'goede' staat is. Normaal gezien voert de bemanning van het schip deze klusjes uit. Het uitvoeren van deze herstellingen wordt bijgehouden in het CTF. De reparatieprocedure is vastgelegd in de TPA en werd overeengekomen tussen de drie partijen van de TPA.

Als de staat van het verfsysteem te snel achteruit gaat, en het verfsysteem niet meer in een 'goede' staat is, moet het schip een reparatie inplannen. Dit soort reparatie is niet zomaar een klein klusje, maar een groter project dat moet uitgevoerd worden in een werf. Tijdens deze reparatie moet het verfsysteem terug hersteld worden tot het

⁷⁹ Bijvoorbeeld de temperatuur van het staal en de maximale luchtvochtigheid bij het aanbrengen van de verf. (Aerts, 2012)

in een 'goede' staat verkeert. Door de omvang van de reparatie moeten dezelfde documenten⁸⁰ worden ingevuld als bij een nieuwbouw.

Tijdens de levenscyclus van het schip zal het classificatiebureau het schip inspecteren tijdens *special surveys*⁸¹ en *intermediate surveys*⁸². Wanneer het klassebureau ontdekt dat het verfsysteem niet meer in een 'goede' staat is, wordt het schip verplicht een jaarlijkse inspectie *annual survey* te ondergaan. (Wei et al, 2011)

8.13 Vergelijking met TSCF

Een van de belangrijkste nadelen van PSPC-COT is dat het een minimumstandaard is. Een dergelijke reglementering wordt bekomen door een compromis te sluiten tussen de verschillende partijen (reder, verffabrikant, werf) en zal geen optimale voorwaarden creëren die de levensduur van het verfsysteem verlengen. (Jansen, pers.comm., 2017). Wanneer het schip gebouwd is om een lange levenscyclus te hebben, zal PSPC-COT tekort schieten.

Bovendien heeft elk schip zijn eigen specifieke noden, afhankelijk van de route, het vaargebied, de onderhoudsstrategie, de soort ruwe aardolie en de beoogde levensduur. Door PSPC-COT zal elk schip verplicht zijn om het verfsysteem op dezelfde manier aan te brengen. (Eliasson, pers.comm., 2017)

'You cannot use the same shoe for different persons!' (Eliasson, pers comm., 2017)

Een voorbeeld van een strengere reglementering is de TSCF₂₅⁸³ -richtlijn voor verfsystemen in ballasttanks. Deze richtlijnen hanteert strengere normen, waardoor het verfsysteem niet 15 jaar, maar wel 25 jaar lang in een goede staat blijft. Merk op dat de verschillen tussen de twee regelgevingen niet zo groot zijn, maar toch een aanzienlijke impact hebben op de kwaliteit van het verfsysteem. (De Baere, 2017)

⁸⁰ Documentatie zoals bijvoorbeeld de selectie van een nieuw verfsysteem en de keuze voor de verfininspecteur.

⁸¹ Dit is inspectie van het schip die om de vijf jaar word uitgevoerd.

⁸² Dit zijn tussentijdse inspecties van het schip die tussen twee special surveys wordt uitgevoerd.

⁸³ TSCF staat voor Tanker Structure Cooperative Forum. (TSCF, 2017)

Tabel 21: Een vergelijking tussen PSPC en TSCF. (Aerts,2012)

	PSPC	TSCF 25
Toepassing		
Doelleeftijd	15 jaar	25 jaar
Conditie tijdens levensloop	GOED	GOED of REDELIJK
Toepassingsgebied	Ballasttanks van schepen >= 500 GT Ruimte tussen de dubbele wand van schepen met een lengte > 150 m	Ballasttanks van tankers
Verplicht	-Door IMO sinds 1 juli 2008 -Door IACS onder CSR sinds 1 juli 2006	Niet verplicht.
Pijlers		
<u>Staalvoorbereiding</u>		
1 ^{ste} oppervlaktevoorbereiding		
Oppervlaktebehandeling	Sa 2 $\frac{1}{2}$	Sa 2 $\frac{1}{2}$
	30-75 μm	30-75 μm
	50 mg/m ²	30 mg/m ²
	Afronden totdat de straal minimaal 2 millimeter is, of 3 maal slijpen.	Afronden tot bepaalde straal.
2 ^{de} oppervlaktevoorbereiding		
Oppervlaktevoorbereiding voor beschadigde shop primer en lassen.	Sa 2 $\frac{1}{2}$	Sa 2 $\frac{1}{2}$
Oppervlaktebehandeling niet –gekwificeerde shop primer	Sa 2 waarbij minstens 70% van de shop primer wordt verwijderd.	Niet van toepassing
Oppervlaktebehandeling intacte shop primer	<i>sweepblasting</i> , waterstralen, ...	Sa 2 $\frac{1}{2}$
Staalprofiel	30-75 μm	30-75 μm
Zoutlimiet	50 mg/m ²	30 mg/m ²
Stoflimiet	‘1’ uit klasse 3, 4 of 5	‘1’ voor alle zichtbare deeltjes

<u>Applicatie</u>		
Basis shop primer	Zinkhoudende inhibitorvrije zinksilicaat	Ethyl-zinksilicaat
Basis verfsysteem	Epoxy	Epoxy
Aantal voorschilderlagen	2	3
Aantal topcoats	2	3
DFT	320 µm	350 µm
Regel	90/10 regel	80/20 regel
Omgevingsfactoren	-Maximale luchtvochtigheid 85 % -Staaltemperatuur moet 3°C boven het dauwpunt liggen.	-Staaltemperatuur groter of gelijk aan 10 °C -Maximale luchtvochtigheid tenminste 3°C boven het dauwpunt.
Inspectie		
Certificatie	-NACE inspecteur niveau 2 -FROSIO inspecteur niveau 3 -Door de vlaggenstaat erkende inspecteurs.	Door NACE, FROSIO of equivalent erkende organisatie.

8.14 PSPC-COT testprocedure

Een verfsysteem voldoet pas aan PSPC-COT als het een *type-approval certificate* heeft. Om dit certificaat te verwerven, moet het systeem tests doorstaan die beschreven zijn in PSPC-COT. Hierbij moet het verfsysteem testmethode A+C doorstaan, of testmethode B+C. Dit hoofdstuk zal meer uitleg geven over deze testmethodes.

Epoxyverfsystemen die getest werden voor het van kracht worden van PSPC-COT kunnen aanvaard worden als ze werden getest volgens de procedure die overeen komt met de PSPC-COT testprocedure of equivalent. Hierbij mag het verfsysteem slechts een bepaalde maximale hoeveelheid aan roest en verblazen vertonen. Ook mogen verfsystemen gebruikt worden als deze een goed gedocumenteerde veldblootstelling ondergingen van 5 jaar, waarbij de uiteindelijke staat van het verfsysteem niet minder was dan 'goed'. (IACS, 2013)

8.14.1 Methode A: laboratoriumtest

Een verfsysteem kan getest worden door een laboratoriumtest. Deze test moet uitgevoerd worden in labo dat door de administratie erkend is. De testresultaten zullen worden gedocumenteerd en ingediend bij de administratie. De uitvoering en de details van de laboratoriumtest staan beschreven in de resolutie MSC.288(87) appendix 1 en 2.

Wanneer de test succesvol blijkt, moet het TAC zowel de naam van de epoxyverf vermelden als de gebruikte shop primer. Hierbij mag de epoxyverf zowel op bloot staal worden aangebracht als op de shop primer die op het TAC vermeld staat. De epoxyverf mag worden aangebracht op andere shop primers als deze werden getest en goedgekeurd als zijnde een deel van het verfsysteem. Hiervoor moeten de shopprimers de tests ondergaan die worden omschreven in PSPC-COT tabel 1: 2.3 en tabel 1: 3.2. Bovendien moeten ze getest zijn conform aan PSPC-COT Annex 1 of MSC.215(82), die ook bekend staat als de '*crossover test*'.

Als de epoxyverf wordt getest zonder shop primer zal het TAC enkel de epoxyverf vermelden. Ook hier kunnen bijkomende *crossover tests* ervoor zorgen dat het de epoxyverf op bepaalde shop primers mag worden aangebracht.

Tijdens de tests zal men proberen de omgeving van de ladingtank na te bootsen. Eerst wordt de verf getest in een dampfase (appendix 1) die representatief is voor de corrosieve omgeving aan de onderzijde van de dekbeplating. Daarna wordt het verfsysteem blootgesteld aan een omgeving die te vergelijken is met de omgeving van een bodemplaat die ondergedompeld is de lading (appendix 2). De test procedure probeert niet alleen de omgeving van de ladingtank zo goed mogelijk na te bootsen maar zorgt er ook voor dat de verf versneld verouderd. Hierdoor kan het verouderingsproces van meerdere jaren gesimuleerd worden in slechts enkele maanden. (IMO, 2010)

Voor het begin van de test moeten de IR identificatiecodes⁸⁴ van de verf en de verharder worden neergeschreven. Bovendien moeten de massadichtheden van de verf en de verharder worden opgeschreven, tezamen met de DFT. (IMO, 2010)

⁸⁴ Dit is het resultaat van de infraroodspectroscopie van de verf. Een infraroodspectroscopie is een spectroscopie die werkt met het elektrochemische deel van het elektromagnetisch spectrum. Infraroodspectroscopie is een vorm van molecuulspectroscopie. Hiermee kan niet enkel de

8.14.1.1 Test in de gasdichte kamer

De gastest vindt plaats in een gasdichte kast die gevuld is met een corrosief gas⁸⁵. De afmetingen van de kast zijn niet belangrijk, zolang deze geschikt zijn voor het correct uitvoeren van de test. In deze gasdichte kamer bedraagt de temperatuur $60 \pm 3^\circ\text{C}$. terwijl de relatieve vochtigheid van het gas 95 ± 5 procent bedraagt. Om het gas vochtig te houden moet er in de kast een trog met 2 ± 0.2 liter water staan. Vlak voor het verversen van het testgas moet het water van de trog moet worden ververs. Dit verversen gebeurt wanneer de samenstelling van het gas niet meer voldoet aan de testcondities. De uitvoerder van de test moet in het testrapport noteren hoe vaak hij/zij de samenstelling van het gas controleert en hoe vaak het gas vervangen wordt. (IMO, 2010)

De testpaneeltjes die gebruikt worden hebben een afmeting van 150 mm op 50 mm en zijn drie millimeter dik. De test stelt twee paneeltjes bloot terwijl een derde paneel in een normale atmosfeer blijft als referentie. (IMO, 2010)

Indien er een shop primer wordt aangebracht op de panelen, moet deze eerst worden blootgesteld aan verwerking gedurende minimaal twee maanden. Daarna moet de shopprimer gereinigd worden door deze te wassen met zoet water aan lage druk. (*low pressure water washing*) De manier waarop de shop primer wordt voorbereid moet worden neergeschreven, tezamen met een beoordeling van hoe kwalitatief de shop primer is. (IMO, 2010)

Ten slotte moeten de testpanelen worden opgehangen aan een constructie uit een inert materiaal. De panelen moeten zodanig geplaatst worden dat een verticale afstand van ten minste 20 millimeter tussen de panelen behouden blijft. Ook moeten de onderste randen van de panelen zich ten minste 200 millimeter boven het water bevinden en tenminste 100 millimeter weg van de wanden van de kast. Wanneer de kast bestaat uit meerdere laden moet de uitvoerder controleren dat de oplossing van de bovenste lade niet druipt op de panelen in de onderste lade.

samenstelling, maar ook de structuur van de molecule bepaald worden. (Spectralcalc, 2017) Elke verfsoort toont een uniek resultaat van deze spectroscopie. Daardoor kan men aan de hand van een spectroscopie bepalen over welke verf het gaat. (Alblas, 2017)

⁸⁵ De samenstelling van dit gas wordt later in dit hoofdstuk besproken.

8.14.1.2 De samenstelling van het testgas

Het testgas is zodanig samengesteld zodat het zo goed mogelijk lijkt op het mengsel van gassen dat zich normaal gezien in de ladingtank bevindt. In tegenstelling tot in een echte ladingtank bevat het testgas geen dampen van koolwaterstoffen omdat deze dampen geen significante invloed hebben op de corrosiesnelheid.

Tabel 22: De samenstelling van het testgas. (IMO, 2010)

N ₂	83 ± 2 volumeprocent droog gas
CO ₂	13 ± 2 volumeprocent droog gas
O ₂	4±1 volumeprocent droog gas
SO ₂	300±20 ppm
H ₂ S	200±20 ppm



Figuur 89: Een gasdichte kamer in werking. (Eigen werk, 2017)

8.14.2 De onderdompelingstest

Deze test werd ontwikkeld om de omgeving in een geladen olietank na te bootsen. De geverfde panelen meten 150 millimeter op 100 millimeter en zijn 3 millimeter dik. Deze panelen worden gedurende 180 dagen ondergedompeld in de vloeistof die representatief is voor ruwe aardolie. Om de hoge temperaturen van de ruwe aardolie te simuleren, moet de vloeistof een temperatuur hebben van 60 ± 2 °C. Deze temperatuur moet onafgebroken gehandhaafd worden door gebruik te maken van een erkende techniek. (IMO, 2010)

Voor de vloeistoffase kan men niet zomaar ruwe aardolie gebruiken. Dit komt omdat de samenstelling van ruwe aardolie niet overal dezelfde is. Bovendien kan de samenstelling van ruwe aardolie veranderen doorheen de tijd. Verder is het gebruik van ruwe aardolie ongezond en niet veilig voor de uitvoerders van de test. (*'practical health and safety barriers'*) Om dit probleem op te lossen maakt de test gebruik van een standaardvloeistof. Deze vloeistof bestaat uit een mengsel van gedestilleerde scheepsbrandstof, nateenzuur, benzeen, tolueen, kunstmatig zeewater en een H₂S-oplossing. (IMO, 2010)

Deze vloeistof wordt in een container met een vlakke bodem gegoten totdat de hoogte van de vloeistof 400 millimeter bedraagt. Daarbij vormt er zich een waterige laag vloeistof van 20 millimeter. Hierbij is het belangrijk dat de testpanelen verticaal geplaatst zijn en volledig zijn ondergedompeld. Ook zullen er meerdere testpanelen met dezelfde verf gebruikt worden. (IMO, 2010)

Net als bij de test met de gasdichte kamer moet de zinksilicaat shop primer eerst 2 maanden verweren. Pas daarna kan de shop primer gereinigd worden met behulp van waterwassen tegen lage druk, om uiteindelijk voorbereid te worden, en geverfd. De manier waarop de shop primer wordt voorbehandeld, moet worden genoteerd. Ook zullen de achterkant en de randen van de panelen geverfd worden, zodat het resultaat niet kan worden beïnvloed. (IMO, 2010)

Nadat de testpanelen 180 dagen zijn ondergedompeld, moeten de testpanelen worden afgedroogd met een proper doekje. Om te voorkomen dat de uitvoerder een verkeerd beeld krijgt van de corrosie moet de beoordeling van de corrosie op de testpanelen binnen de eerste 24 uur worden uitgevoerd. (IMO, 2010)



Figuur 90: Een klimaatkast.



Figuur 91: Een staaltje tijdens de onderdompelingstest.

8.14.2.1 Evaluatie

Na het uitvoeren van de test worden de panelen gespoeld met warm kraantjeswater en gedroogd met absorberend papier. Ten slotte wordt er gekeken naar de blaasvorming en de roestvorming op de panelen. Om het verfsysteem te aanvaarden mogen er geen blaasjes gevormd zijn en mag er geen roestvorming zijn op het oppervlak. Hierbij worden blaasjes en roestvlekken op minder dan 5 millimeter van de rand van het paneel genegeerd. (IMO, 2010)

8.14.2.2 Documentatie van de test

Tijdens de test moet er een testverslag worden opgesteld dat de volgende informatie bevat:

- De naam van de verffabrikant en de plaats waar de verf werd geproduceerd.
- De datum van de test.
- De naam/identificatiegegevens van elke gebruikte verf.
- Het 'batch nummer' van elk component van elk product.
- Gegevens over de oppervlaktebehandeling van de panelen voordat de shop primer werd aangebracht en gegevens over de behandeling van de shop primer voordat de andere lagen werden aangebracht.
- Informatie over het gebruikte verfsysteem zoals DFT, gebruikte verdunner, luchttemperatuur, etc.
- De resultaten van de test in de gasdichte kast.
- De resultaten van de test met de ondergedompelde panelen. (IMO, 2010)

8.14.2.3 Veiligheidsmaatregelen tijdens de test

Tijdens de test wordt er gebruik gemaakt van giftige stoffen. Daarom is het belangrijk dat de uitvoerders van de test de nodige veiligheidsmaatregelen in acht nemen. Ten eerste komt er zwaveldioxide vrij tijdens de test. Wanneer deze stof in contact komt met water wordt deze corrosief. Bovendien is zwaveldioxide giftig bij inhalatie en veroorzaakt het irritatie aan de ogen en aan het ademhalingsstelsel. (IMO, 2010)

Ten tweede kan er tijdens de test waterstofsulfide (H_2S) vrij komen. Dit is een verstikkende, licht ontvlambare en irriterende stof die bij contact met water corrosief wordt en uit de buurt moet worden gehouden van ontstekingsbronnen. De LTEL⁸⁶ van de stof bedraagt 5 ppm en de STEL⁸⁷ bedraagt 10 ppm. In hogere concentraties kan contact met H_2S dodelijk zijn en meervoudige blootstelling aan lagere concentraties van deze stof kan leiden tot een verminderd vermogen H_2S te ruiken. (IMO; 2010)

⁸⁶ 'Long Term Exposure Limit'. Dit is de maximale concentratie waaraan een mens mag worden blootgesteld gedurende een periode van 8 uur. (envirocare, 2016)

⁸⁷ 'Short Time Exposure Limit'. Dit is de maximale concentratie van een gas waaraan een mens kan worden blootgesteld gedurende 15 minuten, maximaal 4 keer per dag, met tussenposes van minimaal uur. (Encyclopedia of Occupational Health and Safety, 2016)

Ten derde komt men in contact met benzeen. Dit is een zeer kankerverwekkende stof die bovendien licht ontvlambaar is (*flash point*⁸⁸ – 11 °C).

Ten slotte riskeert men een blootstelling aan Toluëen. Deze stof is licht ontvlambaar (*flash point* 4 °C), kan irritaties veroorzaken en is een reprotoxine⁸⁹.

Om de blootstelling aan deze gevaarlijke stoffen te voorkomen moet men gebruik maken van beschermende maatregelen:

- Tijdens de test moet het systeem⁹⁰ afgesloten zijn.
- Tijdens de test moet de omgeving geregeld gecontroleerd worden, in het bijzonder tijdens de start en tijdens het einde van de test. De omgeving moet bovendien voldoende geventileerd zijn en persoonlijke beschermingsmiddelen moeten worden gedragen (IMO, 2010)

Afhankelijk van het land waar de test wordt uitgevoerd zijn speciale testapparatuur en beschermingsmaatregelen vereist.

⁸⁸ Dit is de temperatuur waarbij de dampen van een volatiele stof ontbranden wanneer deze in contact komen met een ontstekingsbron. (Flammable and Comustible liquids code, 2012)

⁸⁹ Dit zijn toxines die het voortplantingsstelsel aantasten. (eurostat, 2016)

⁹⁰ De panelen tezamen met de corrosieve vloeistof of het testgas.

8.14.2.4 Problemen met de laboratoriumtest

Hoewel de laboratoriumtest tracht een idee te geven van de duurzaamheid van het verfsysteem, schiet het op een aantal vlakken tekort.

Microbiële corrosie

Eén van de zaken die een verfsysteem kunnen aantasten is microbiële corrosie. (Prent, 2017) Echter, de opstelling die wordt gebruikt test de verf niet op de invloed van microbiële corrosie. Dit komt onder andere door de afwezigheid van:

- Bezinksel en roest die op een horizontale bodem kunnen liggen en een broedplaats voor bacteriën kunnen vormen.
- De relatieve⁹¹afwezigheid van bacteriën die microbiële corrosie kunnen veroorzaken. Daardoor zal de verf niet getest worden tegen de mogelijke schadelijke invloeden van microben. (Prent, pers. comm. , 2017)

Temperatuur

Ook ligt de temperatuur van sommige soorten ruwe aardolie hoger dan de temperatuur tijdens de test. Hierdoor controleert de test niet of een verfsysteem bestand is tegen ladingen die op een hoge temperatuur worden vervoerd. (Kattan, pers. comm., 2017) Zo zou de temperatuur van de laboratoriumtest beter 90°C bedragen, in plaats van de huidige 60 +/- 3°C. (Jansen, pers. comm., 2017)

IPPIC onderzoek

IPPIC⁹² onderzocht de betrouwbaarheid van het PSPC-COT testprotocol. Hierbij werden onder andere de volgende problemen ontdekt:

Ten eerste bleek dat de resultaten van het testprotocol moeilijk te reproduceren waren. Zo voerde IPPIC drie testen uit op drie verschillende locaties. Sommige stalen verf ondergingen daardoor drie keer dezelfde test. Echter, sommige verven faalden in de éne testserie terwijl ze voor een andere testserie wel slaagden. De oorzaak van de slechte consistentie is niet geweten.

⁹¹ Misschien is het mogelijk dat er wel bacteriën aanwezig zijn. Deze zullen echter niet in voldoende mate aanwezig zijn om significante microbiële corrosie te veroorzaken.

⁹² IPPIC staat voor International Paint and Printing Ink Council. IPPIC communiceert en coördineert beleid dat betrekking heeft op de verf -en printinkindustrie. (IPPIC, 2017)

Verder bleek dat de test vrij agressief is. Zo vergeleek de IPPIC PSPC-COT werkgroep de resultaten van een aantal verven in ladingtanks van olietankers met de resultaten van dezelfde verfsystemen tijdens de testprotocols. Daaruit bleek dat sommige verfsystemen die goed presteerden in ladingtanks faalden in de laboratoriumtest. Daardoor concludeerde IPPIC dat er een slechte correlatie was tussen het testprotocol en de realiteit. (IPPIC, 2010)

Vorbereitung testpaneeltjes

Een deel van het verfsysteem wordt aangebracht op een oppervlak dat werd bewerkt met elektrisch gereedschap. Maar, het testprotocol test echter niet de duurzaamheid van verfsystemen op dergelijke oppervlaktes. Daarom zouden verven ook moeten getest worden op paneeltjes die én een glad oppervlak hebben én bewerkt zijn met elektrisch gereedschap.

Wanneer de testpaneeltjes geverfd worden bevat hun oppervlak meestal zeer weinig zout. In de ladingtank kan het substraatechter vrij veel zout bevatten. Daarom zouden de laboratoriumtests moeten worden uitgevoerd op paneeltjes die zo goed als maximaal gecontamineerd⁹³ zijn. (TSCF, 2014)

Flexibiliteit verfsysteem

Ten slotte test het protocol niet de flexibiliteit van het verfsysteem. Daardoor bestaat het risico dat een PSPC-COT verfsysteem niet bestand is tegen het buigen van de scheepsstructuur en vroegtijdig faalt. (TSCF, z.d.)



Figuur 92: Een verfsysteem dat faalt door een gebrek aan flexibiliteit. (TSCF, 2014).)

⁹³ Tot 50mg/m². (IMO, 2010)



Figuur 93: Een verfsysteem dat faalt door een gebrek aan flexibiliteit. (TSCF, 2014)

8.14.3 Methode B: 5 jaar veldblootstelling

Bij methode B kan het verfsysteem worden goedgekeurd door een 5-jarige veldblootstelling. Het verfsysteem heeft de test doorstaan wanneer het na 5 jaar nog altijd in een 'goede' staat is. Hierbij moet alle nodige informatie zorgvuldig worden gedocumenteerd door de verffabrikant. Zo moet de fiche de originele rapporten van het aanbrengen bevatten, de specificaties van het verfsysteem, het origineel technisch informatieblad en de identificatiegegevens van de huidige formulatie. Als de mengverhouding van de basisverf of de verharder wordt gewijzigd moet de fabrikant een verklaring opstellen waarbij hij verzekert dat de samenstelling van het huidige product dezelfde is als de samenstelling van het originele product.

Verder moet de fabrikant het veiligheidsinformatieblad voorzien dat geldig is op de huidige productiesite. Ook moet de fiche van de fabrikant de specifieke zwaartekracht en de infrarood -identificatie⁹⁴ van het huidige en het oorspronkelijke product toevoegen aan de fiche. Wanneer dit niet verkrijgbaar is, moet de verfproducent een verklaring bijvoegen waarmee hij verzekert dat de gegevens van het oude product overeenstemmen met de gegevens van het huidige product. (IACS, 2013)

⁹⁴ Dit is het resultaat van de infraroodspectroscopie van de verf. Een infraroodspectroscopie is een spectroscopie die werkt met het elektrochemische deel van het elektromagnetisch spectrum. Infraroodspectroscopie is een vorm van molecuulspectroscopie. Hiermee kan niet enkel de samenstelling, maar ook de structuur van de molecule bepaald worden. (Spectralcalc, 2017) Elke verfsoort toont een uniek resultaat van deze spectroscopie. Daardoor kan men aan de hand van een spectroscopie bepalen over welke verf het gaat. (Alblas, 2017)

De inspectie wordt uitgevoerd door een classificatiemaatschappij in naam van een vlaggenstaat of door de verffabrikant en de vlaggenstaat samen. Hierbij moet de inspectie voldoen aan sectie 4 van MSC.1/Circ.1399.

De verfsystemen moeten worden getest in cargotanks waarvan er in één tank een temperatuur heerst van minstens 60 +/- 3 °C. De schepen waarop het verfsysteem wordt getest zouden op verschillende routes moeten varen en verschillende soorten ruwe aardolie moeten vervoeren. Hierbij moet er ook gevaren worden met de zuurste en warmste variëteiten aardolie. Als het vaartuig geen bijzonder zure of warme ruwe aardolie vervoert, moeten de laagste pH en de hoogste temperatuur tijdens de test duidelijk vermeld staan op het TAC. Sectie 4 van MSC.1/Circ./1399 geeft richtlijnen over het rapporteren van de staat van het verfsysteem. (IACS, 2013)

Als het verfsysteem de test heeft doorstaan, moet het TAC uitgegeven worden voor zowel de epoxyverf als de shop primer. Het TAC staat toe dat de epoxyverf gebruikt wordt samen met de hierbij vermelde shop primers of op bloot staal. Als de samenstelling van het verfsysteem wijzigt, verliest het TAC haar geldigheid. Wanneer de samenstelling wijzigt, is het de verantwoordelijkheid van de verffabrikant om de vlaggenstaat hier zo snel mogelijk van op de hoogte te brengen. (IACS, 2013)

8.14.4 Methode C

Methode C zijn de vereisten waaraan de verfproducent in elk geval moet voldoen, samen met de vereisten van methode A of de vereisten van methode B.

Hierbij moeten zowel de verfproducent als de producent van de shop primer voldoen aan de vereisten van IACS UR Z17 paragrafen 4, 5, 6 en 7 (met uitzondering van 4.7) en paragrafen 1.18.1 tot 1.18.6. Deze moeten worden nagekeken door de administratie. (IACS, 2013)

Om te voldoen aan methode C moet de verffabrikant de volgende informatie leveren aan de administratie:

- Een gedetailleerde lijst van de productiefaciliteiten.
- De namen en adressen van de leveranciers die de grondstoffen van de verf leveren.
- Details van de gebruikte kwaliteitstesten en details van eventuele overeenkomsten met onderaannemers.
- De lijst met handleidingen, testprocedures, instructies, etc.
- Kopieën van alle relevante certificaten, zoals het “*Quality Management System Certificate*”. (IACS, 2013)

Inspecties en audits van de faciliteiten moeten voldoen aan de eisen die gesteld worden door PSPC-COT. Om te verzekeren dat de formulatie van de verf effectief overeen komt met de formulatie volgens het TAC, moet de verfproducent een kwaliteitscontrolesysteem implementeren. Als deze formulatie wordt gewijzigd moet de verf opnieuw worden onderworpen aan de *Type Approval Test*. (Vanderstockt, 2013) Geregeld worden er op het verfsysteem metingen uitgevoerd om parameters zoals de viscositeit en de massadichtheid te controleren. De resultaten van deze metingen moeten zorgvuldig worden bijgehouden.

Indien mogelijk moeten details over de voorziening van de grondstoffen traceerbaar zijn. Bovendien moeten alle leveranciers beschikken over een *Certificate of Performance*. Hiermee toont de leverancier aan dat aan alle specifieke vereisten voor deze grondstoffen wordt voldaan. Indien dit certificaat ontbreekt, moet de verfproducent zich ervan vergewissen dat er toch aan de vereisten wordt voldaan. (IACS, 2013)

Het oorspronkelijk technisch centrum moet verifiëren dat alle gebruikte grondstoffen voldoen aan de nodige vereisten. Verfpotten moeten duidelijk gelabeld worden met de details zoals beschreven in het TAC. Technische fiches moeten voldoen aan PSPC-COT. Bovendien moet er een kwaliteitscontrolesysteem van toepassing zijn zodat deze fiches up-to-date blijven. (IMO, 2006)

9 Nut van IMO-PSPC

9.1 Inleiding

De laatste onderzoeksvraag van deze scriptie luidt: “Zal een verfsysteem de beoogde leeftijd van 15 jaar halen in een ‘goede’ staat?”

Deze vraag is moeilijk te beantwoorden, want PSPC-COT is slechts sinds enkele jaren verplicht. Daardoor is het aantal schepen dat al minstens 15 jaar met een gelijkaardig verfsysteem vaart relatief beperkt. Bovendien is de kans klein dat er een verfsysteem toevallig is aangebracht volgens standaarden die lijken op PSPC-COT.

Ten slotte is de bestaande informatie over schepen die varen met een PSPC-COT verfsysteem vertrouwelijk.

Niettemin zal ik proberen te voorspellen of een verfsysteem de beoogde doelleeftijd kan halen. Dit zal ik doen door:

- De duurzaamheid van het verfsysteem te bespreken met verfexperts, reders en verffabrikanten. Zij beschikken over relevante vertrouwelijke informatie waar ik geen toegang tot heb. Daardoor kunnen zij een kundig oordeel vellen over het nut van PSPC-COT.
- Het beoordelen van verfsystemen die werden aangebracht conform met vereisten die gelijkaardig zijn aan PSPC-COT. Als deze verfsystemen de beoogde doelstellingen halen, is de kans groot dat PSPC-COT ook de doelstellingen zal bereiken.

Om met zekerheid te kunnen zeggen of PSPC-COT zijn nut bewijst, moet een groot aantal schepen worden onderzocht die op verschillende routes varen met verschillende variëteiten ruwe aardolie. Helaas beschik ik maar over een beperkt aantal resultaten. Daardoor kan niet met 100 % zekerheid gezegd worden of PSPC-COT wel effectief is. Niettemin kunnen deze gegevens leiden tot een beter begrip van de duurzaamheid van een dergelijk verfsysteem.

9.2 Gegevens van het IPPIC

Het IPPIC is de organisatie die onder andere kwalificatietest A ontwikkelde voor PSPC-COT. Hierbij werden er gegevens verzameld van de coatings van 11 tankers. Na 5-10 jaar bleken alle verfsystemen nog steeds in een goede staat te zijn. Bovendien waren er slechts zeer weinig klachten over verven die voldoen aan de voorschriften van PSPC-COT. Daardoor concludeerde het IPPIC dat de prestaties van dergelijke verfsystemen in ladingtanks goed genoeg zijn om minstens 15 jaar in een goede staat te blijven. Verder bleek dat de huidige kwalificatietest voor verfsystemen die een TAC willen halen zeer zwaar is. Verfsystemen die in praktijk goede prestaties leveren, faalden tijdens de test. Daardoor is er een grote kans dat verven die goed genoeg zijn om de laboratoriumtest te doorstaan ook goed zullen presteren in de ladingtanks. (IPPIC, 2010)

9.3 Inspectieverslagen van gelijkaardige verfsystemen

De volgende schepen werden voorzien van een verfsysteem in hun ladingtanks voor ruwe aardolie. Hierbij werd schip A geverfd conform aan PSPC-COT. Van sommige andere schepen valt niet met zekerheid te zeggen of het verfsysteem voldoet aan PSPC-COT. Door de standaarden van het verfproject (straalnormen, oppervlaktevoorbereiding, ..) te vergelijken met de duurzaamheid van het verfsysteem, kan er mogelijks meer geleerd worden over de effectiviteit van PSPC-COT

9.3.1 Schip A

Schip A is een dubbelwandige VLCC. De ladingtanks van deze tanker werden vlak na de nieuwbouw geverfd met verf 1, een wrijvingsbestendige pure epoxyverf. Voor de aanvang van het verven werden de ladingtanks gespoeld met zoet water en gestraald tot Sa21/2. Vervolgens werden ze geverfd met een *holding primer* (grondverf) die een laagdikte had van 50 µm. Tenslotte werden twee lagen van verf aangebracht d.m.v. *airless spray*⁹⁵, elk met een laagdikte van 150 µm. Hierbij werd de bovenkant van het dek geverfd tot ongeveer 2 meter naar beneden. Ook werd de bodembeplating van de tank geverfd tot 0.2 m omhoog.

Na het derde *special survey* werden negen ladingtanks gecontroleerd. Hierbij bleek dat in elke tank het verfsysteem in een uitstekende staat was. Op de lasnaden, randen en hoeken werden slechts enkele kleine, geïsoleerde verfdefecten gevonden en enkele plekken met corrosie. In het gebied dat tegen de achterste ingang van tank No. 1S werden er verfbazen aangetroffen. Verder werd in geen enkele andere tank blaasvorming aangetroffen. Aan de onderkant van de dekbeplating werden kleine, afzonderlijke gebieden met verfdefecten aangetroffen. Op deze gebieden werden er laswerken uitgevoerd. De verflaag op de aanliggende gebieden was wel nog intact en bevond zich in een 'uitstekende' staat. Vlak boven en onder de laadlijnen waren er geen verfdefecten zichtbaar.

Op sommige plaatsen waren er krassen aanwezig op de verflaag. Deze werden veroorzaakt door contact met stalen spades die gebruikt werden om de laatste resten ruwe aardolie weg te scheppen. Telkens was de verflaag nog volledig intact. In het gebied rond de bellmouths was het verfsysteem in een uitstekende staat. Ook op de randen van de verzamelputten voor de lading was de verf in een uitstekende staat.

Op andere plaatsen werd het verfsysteem mechanisch beschadigd tijdens de bouw van het schip. Wanneer er op die plaatsen een cavitatie aanwezig was, bleek de corrosie zich niet door te zetten onder het verfsysteem. Op de bodem van de ladingtank werden de laatste resten ruwe aardolie verwijderd met verdunner. Wederom zag de verflaag er uit alsof ze nog maar net was aangebracht en verkeerde ze in een uitstekende staat. Bovendien werd de adhesie van het

⁹⁵ Dit is een verftechniek waarbij een oppervlak geverfd wordt door er verf op te spuiten. Bij *airless spray* wordt de nodige druk op de verf in de spuitmond geleverd door een hogedrukpomp. (Clarck, 2000)

verfsysteem gemeten in drie verschillende tanks. Door gebruik te maken van een krastest⁹⁶ ontdekten de inspecteurs dat de adhesie van het verfsysteem telkens uitstekend was (5/5).

De totale afbraak van het verfsysteem was minder dan 0.1% aan de dekbeplating en minder dan 0.3 % aan de bodembeplating, inclusief de mechanische schade.

De conclusie voor schip A is dat verfsysteem 1 uitstekende bescherming biedt tegen corrosie⁹⁷ in ladingtanks wanneer het wordt aangebracht op een goed voorbereid oppervlak. Hierbij is het verfsysteem in een staat die veel beter is dan 'goed', zoals omschreven wordt door IACS Resolutie A744 Rec.87. Om de levensduur van dit verfsysteem nog verder te verlengen moeten slechts minimale reparaties worden uitgevoerd.



Figuur 94: Het verfsysteem op de bodem van de ladingtanks is in een uitstekende staat. (Schip A, 2011)

⁹⁶ De krastest test de hechting tussen de coating en het substraat. Eerst gebruikt de inspecteur een sterk mes om een 'v' te krassen in de coating. Hierbij moet de kras penetreren tot aan het substraat. Ten slotte probeert de inspecteur met de punt van het mes de onderkant van de 'v' los te werken. Wanneer de coating gemakkelijk los komt is er een sterke adhesie, en vice versa. (Paint International, s.d.)

⁹⁷ Minimaal 15 jaar bescherming.

9.3.2 Schip B

Schip B is een dubbelwandige VLCC die werd omgebouwd tot FSO. In 2001 leverde de werf het schip af. In 2012 onderging het schip een interne inspectie waarbij onder andere de ladingtanks werden onderzocht. Van 2009 tot 2010 lag het schip in droogdok. Daar werden de tanks opnieuw geverfd. Hierbij werd een verfsysteem aangebracht op de dekbeplating en op de bodembeplating. Hoewel het verfsysteem niet werd aangebracht in overeenstemming met PSPC-COT, werd het verfsysteem wel aangebracht met 'uiterste zorg en veel inspecties'.

Tijdens het onderzoek werden 14 ladingtanks geïnspecteerd. Men kwam tot de volgende vaststelling:

- De structurele elementen van de ladingtanks bevonden zich in een uitstekende staat.
- De staat van het verfsysteem was goed tot uitstekend.
- Er werden geen noemenswaardige defecten gevonden.

Tabel 23: Het verfsysteem van schip B.

	
De dekbeplating	De bodembeplating

9.3.3 Schip C

Schip C is ook een dubbelwandige tanker die in 2008 werd geconverteerd naar FPSO. Hierbij werden de ladingtanks geverfd en het substraat werd gestraald tot Sa 21/2. Bovendien was het substraat vrij van vuil en vet. In totaal werden er twee voorschilderlagen aangebracht. De totale laagdikte van het verfsysteem bedroeg tussen 250 en 450 micrometer. Het oppervlakteprofiel bedroeg 60-90 μm . In 2012 werden de ladingtanks geïnspecteerd. Hierbij bleek dat de verfsystemen van de ladingtanks in een goede staat waren. Bovendien werden er geen beschadigingen aan het verfsysteem gevonden.

Tabel 24: Schip C.

	
De dekbeplating	De bodembeplating

9.3.4 Schip D

Schip D is een dubbelwandige VLCC. De ladingtanks werden in 2002 geverfd. Ook hier werden de tanks ‘uiterst zorgvuldig geverfd’, zonder PSPC-COT te volgen. Bij schip D werd enkel de bodembeplating (tanktop) geverfd. Na 10 jaar bevindt het verfsysteem zich nog steeds in een ‘uitstekende’ staat.

9.3.5 Schip E en F

Schip E en F zijn beide FPSO's. Deze werden beide geleverd met een deklaag van 2 * 150 µm. Gezien de specificaties van het aangebrachte verfsysteem, is het waarschijnlijk dat het oppervlak van de ladingtanks werden gestraald tot Sa 2½, en de zoutconcentratie op het oppervlak beperkt bleef. Bij schip E bleek het verfsysteem na 5 jaar nog steeds in een goede staat. Ook bij schip F bleek dat het verfsysteem, na 7 jaar dienst, in 'goede' staat verkeerde.

Tabel 25: Schip E.

	
De bodembeplating	De langsscheepse verstijvers

Tabel 26: Schip F.

	
De ladingtank (stuurboord)	De ladingtank

9.3.6 Schip G

Schip G is een dubbelwandige VLCC die in 2014 door de werf werd afgeleverd. Net geen jaar later, in 2015, werd het schip geïnspecteerd tijdens een ballastreis. Bij deze inspecties werden 10 ladingtanks en één slop tank visueel onderzocht op hun structurele staat en op de staat van hun verfsysteem. Deze tanks werden gecoat met twee lagen epoxy topcoat van elk 125 µm. Aangezien de totale laagdikte van de topcoats minder is dan 320 µm en het schip voor 1 januari 2016 werd afgeleverd, werd het schip niet gecoat conform PSPC-COT. Het verfsysteem in de ladingtanks werd aangebracht op de dekbeplating tot 2.5 meter beneden de dekbeplating, en vanaf de bodembeplating tot 1.6 meter boven de bodembeplating. Bij metingen bleek de laagdikte van het verfsysteem tussen 350 en 550 micrometer te liggen.

Het inspectieverslag van schip G zegt niets over de applicatieomstandigheden, oppervlaktevoorbereiding, gebruikte straalnorm, gebruik van voorschilderlagen, etc.

In No.1 bakboord ladingtank ontdekten de inspecteurs een scheur met een lengte van 300 millimeter. Deze scheur bevond zich op het achterste dwarsscheepse waterdichte schot dat in verbinding stond met het langsscheepse waterdichte schot.

Het verfsysteem van de dekbeplating vertoonde verspreide delaminatie van de toplaag. Hierbij werd de onderliggende verflaag blootgesteld. In sommige tanks werd ook mechanische schade aangetroffen op het verfsysteem van de bodembeplating.

De sloptanks waren volledig geverfd. Echter, ook hier vertoonde de topcoating van de dekbeplating op bepaalde plaatsen delaminatie. De structuur van de tank zelf was in goede staat.

De conclusie van het rapport was dat de scheur in No. 1 bakboord gerepareerd moest worden. Bovendien werd het aangeraden om het verfsysteem grondig te blijven inspecteren tijdens de komende 6 maanden. Als het verfsysteem nog meer zou falen, kan dit leiden tot enorme kosten voor de eigenaar. Aangezien het schip G een relatief nieuw schip is, werd de eigenaar aangeraden om een claim neer te leggen bij de werf.

9.3.7 Schip H

Schip H is ook een dubbelwandige VLCC die werd afgeleverd door dezelfde werf in 2014. Iets minder dan een jaar later, begin 2015, werden de verfsystemen en de structuur van 10 ladingtanks en beide sloptanks gecontroleerd. Dit gebeurde tijdens een ballastreis PSPC-COT. Net als bij schip G werden de dekbeplating en de bodembeplating van de aardolietanks gecoat. Deze tanks werden gecoat met twee lagen epoxy topcoat van elk 125 µm. Aangezien de totale laagdikte van de topcoats minder is dan 320 µm en het schip voor 1 januari 2016 werd afgeleverd, werd het schip niet gecoat conform PSPC-COT. De filmdikte van het verfsysteem werd op verschillende plaatsen gemeten en varieerde tussen 350 en 550 micron. Het inspectieverslag van schip G zegt niets over de applicatieomstandigheden, oppervlaktevoorbereiding, gebruikte straalnorm, gebruik van voorschilderlagen, etc.

Op de dekbeplating was er sprake van verspreide delaminatie van de topcoat, waardoor de onderste verflaag bloot kwam te liggen. Dit was enkel niet het geval voor ladingtank No. 2 stuurboord. In deze tank waren er plaatselijk plekken waar het verfsysteem in zijn geheel los kwam. Hierbij werd het substraat ontbloot. Op de bodembeplating van sommige tanks werd er mechanische schade ontdekt. De sloptanks waren volledig gecoat. Ook in deze tanks bleek dat het verfsysteem aan de dekbeplating faalde doordat de topcoat op bepaalde plaatsen delamineerde.

Om te voorkomen dat het verfsysteem binnen de zes maanden faalt, werden bijkomende inspecties aangeraden. Indien het verfsysteem nog verder faalt, bestaat het risico dat de eigenaar enorme verliezen zal maken. Aangezien het schip H een relatief nieuw schip is, werd de eigenaar aangeraden om een claim neer te leggen bij de werf.

Tabel 27: Schip H.

	
Verspreide delaminatie aan ladingtank No. 1 bakboord	Verspreide delaminatie aan ladingtank No. 1 bakboord.
	
Delaminatie van het verfsysteem aan de dekbeplating van ladingtank No.2 stuurboord.	Mechanische schade op de bodembeplating van ladingtank No. 5 stuurboord.

9.3.8 Mogelijke oorzaken van het vroegtijdig falen van schip G en schip H

Schip G en schip H werden beide gebouwd met hetzelfde verfsysteem, op dezelfde werf en tijdens dezelfde periode. Hoewel deze olietankers voorzien zijn van minstens twee lagen epoxy-topcoat op de dek -en bodembeplating van hun ladingtanks, falen beide verfsystemen vroegtijdig. Hier zijn veel mogelijk oorzaken voor. Doordat er in dit geval sprake is van delaminatie aan het dek kan de oorzaak in een slechte formulatie, een gebrekkig verfproces of gebrekkige verfspecificaties liggen. Mogelijks heeft de verf een slechte formulatie, waardoor deze niet bestand is tegen de krachten op het substraat of tegen de temperatuurswisseling van de dekbeplating. Ook kunnen de specificaties slecht zijn. Misschien was het substraat niet vrij van vuil, zout en vet, of werden er geen goede straalnormen gebruikt. Ten slotte zijn er misschien fouten gemaakt tijdens het verfproces. Zo is het mogelijk dat de applicateurs de verf slecht aanbrachten, mogelijks bij verkeerde temperaturen of met opgedreven verfspuiten.

Echter, het rapport geeft niet de oorzaak van de verfdefecten. Wat deze twee inspectierapporten wel aantonen, is dat een verfsysteem dat niet exact is aangebracht volgens PSPC-COT vroegtijdig kan falen.

9.4 De mening van experts

Experts⁹⁸ uit verschillende gerelateerde branches hebben toegang tot vertrouwelijke informatie. Zij antwoorden unaniem dat “het waarschijnlijk is dat een PSPC-COT – verfsysteem minstens 15 jaar in een goede staat zal blijven.”

⁹⁸ Welke experts welke informatie verstrekten is vertrouwelijk. Daarom worden hun namen niet genoemd.

9.5 Deelbesluit

Om met zekerheid te kunnen zeggen of PSPC-COT zijn nut bewijst moet een groot aantal schepen worden onderzocht die op verschillende routes varen met verschillende variëteiten ruwe aardolie. Helaas zijn er nog maar een beperkt aantal resultaten beschikbaar. Daardoor kan er niet met 100 % zekerheid gezegd worden of PSPC-COT wel effectief is. Niettegenstaande kunnen deze gegevens leiden tot een beter begrip van de duurzaamheid van een dergelijk verfsysteem.

IPPIC verzamelde reeds data van 11 tankers, waaruit bleek dat PSPC-COT doeltreffend kan zijn. De meeste inspectieverslagen doen vermoeden dat een verfsysteem lang kan stand houden in een ladingtank op voorwaarde dat het verfsysteem met zorg werd aangebracht. Het belangrijkste inspectieverslag is het verslag van schip A. Hierbij was het verfsysteem aangebracht conform PSPC-COT. Na 15 jaar bleek het verfsysteem in 'goede' staat te zijn. Sterker zelfs, het verfsysteem was in een uitstekende staat. De inspectieverslagen van schip G en H tonen aan dat een verfsysteem dat nog niet strikt aangebracht is volgens PSPC-COT vroegtijdig kan falen.

Uit gesprekken met experts blijkt dat het waarschijnlijk is dat PSPC-COT effectief zal zijn. Aangezien de gegevens waarop dit hoofdstuk zich baseert beperkt zijn, kan is het niet 100 procent zeker of alle PSPC-COT -verfsystemen effectief zullen zijn. Daarom luidt de voorlopige conclusie:

Een verfsysteem dat is aangebracht volgens PSPC-COT heeft het *potentieel* om 15 jaar in een 'goede' staat te blijven.

Besluit

Sommige tankers hebben last van extreme corrosie in hun ladingtanks. Dat komt omdat ruwe aardolie op steeds hogere temperaturen getransporteerd wordt en de ladingtank componenten bevat die corrosie bevorderen. Aan de onderzijde van de dekbeplating veroorzaakt een agressieve tankatmosfeer versnelde uniforme corrosie. Aan de bodembeplating van de ladingtank veroorzaken de aanwezigheid van bezinksel, water, zwavel en SRB hevige putcorrosie. Door de invoering van de dubbele wanden, stijgt de temperatuur in de ladingtank. Bovendien volgt de kwaliteit van de getransporteerde ruwe aardolie een dalende trend, waardoor de corrosie in ladingtanks aanzienlijk wordt versneld.

Bovendien worden tankers gevoeliger voor corrosie. Door gebrekkige toegangsmogelijkheden kan corrosie jarenlang onopgemerkt blijven. Door de minder strenge klasseregels worden moderne schepen minder sterk gebouwd en door negatieve toleranties op de dikte van de staalplaten kunnen deze dunner zijn dan voorzien.

Deze problematiek draagt ertoe bij dat de scheepsstructuur ernstig verzwakt, waardoor er zich ongevallen voordoen. Ladingtanks kunnen beginnen lekken en het dek, als bijzonder sterkte element, kan scheuren. In extreme gevallen kan het schip zelfs in twee breken. Daarom is het noodzakelijk om de ladingtanks degelijk te beschermen tegen extreme corrosie. De meest aangewezen methode hiervoor is het aanbrengen van een kwaliteitsvol verfsysteem op de dek -en bodembeplating van de tank. PSPC-COT is een aanzet hiertoe.

Een verfsysteem kan een ladingtank beschermen tegen corrosie door een barrière te vormen die de doorgang van ionen blokkeert. Echter, de verflaag kan onderhevig zijn aan allerlei defecten. Blaasvorming, scheurvorming, delaminatie, falen door roestvorming onder de verflaag en falen door een slechte constructie zijn hier slechts enkele voorbeelden van. Als het verfsysteem het begeeft, wordt de ladingtank blootgesteld aan de corrosieve omgeving, met alle gevolgen van dien.

Om deze verfdefecten te vermijden is het belangrijk dat de verf wordt aangebracht op een constructie die daarvoor ontworpen is, dat de verfspecificaties in orde zijn, dat de

formulatie van de verf goed is en dat de verf juist wordt aangebracht op een oppervlak dat daarvoor geschikt is.

Tijdens de productie is er een grote tijdsdruk op de applicatie van de verf. Bovendien zijn strenge procedures die het vakmanschap reguleren niet verplicht en hanteren verschillende classificatiebureaus verschillende regels. Ten slotte hoeft de werf slechts een jaar garantie te bieden.

Door deze realiteit is de duurzaamheid van een verfsysteem niet gegarandeerd. Daardoor riskeert de eigenaar van een tanker dat honderden miljoenen aan kapitaal ten prooi vallen aan één van de grootste gevaren van de zee: corrosie.

Bovendien worden sommige tankers helemaal niet beschermd tegen corrosie in de ladingtanks, of wordt het beschermingsysteem niet goed onderhouden.

PSPC-COT is de broodnodige minimumstandaard die de werven verplicht een kwalitatief verfsysteem aan te brengen in ladingtanks van olietankers. PSPC-COT reguleert het type verfsysteem, de staalvoorbereiding, het aanbrengen van de verf, het onderhoud, de inspectie en het documenteren van het verfproces. Zo streeft PSPC-COT ernaar dat het verfsysteem in ladingtanks van olietankers minstens 15 jaar in een 'goede' staat blijft. Zodra het verfsysteem niet meer 'goed' is, moet het schip vaker dure inspecties ondergaan. Daardoor wordt het zeer belangrijk voor de eigenaar om het verfsysteem goed te onderhouden.

Voor de werven en de eigenaars betekent PSPC-COT een kost. Zij zullen meer tijd, geld en energie moeten investeren in een degelijk en uitgebreid verfproject. Hierbij moet het verfproject degelijk worden ingepland in de productieplanning en kan het niet meer worden gebruikt als tijdsbuffer. Anderzijds betekent PSPC-COT dat de werven die reeds tijd en geld investeerden in een degelijk verfproject, geen competitief nadeel meer zullen lijden. Voor de verfproducent betekent PSPC-COT dat hij verven moet ontwikkelen die de kwalificatietesten kunnen doorstaan. Ook zal de verfproducent meer papierwerk hebben omdat de testen uitgebreid moeten worden gedocumenteerd.

Een eigenaar zal een schip willen kopen aan een prijs die zo laag mogelijk is, en willen verkopen voor een bedrag dat zo hoog mogelijk ligt. Daarom zullen sommige eigenaars initieel geen verfsysteem willen aanbrengen. Door de nieuwe minimumstandaarden zal de aankoop van een nieuw schip duurder zijn. Het grote voordeel voor de eigenaars is dat zij er zeker van kunnen zijn dat de ladingtanks van hun tankers beschermd worden door een kwalitatief verfsysteem- en dus in betere staat zullen zijn bij verkoop, wat een hogere verkoopprijs mogelijk maakt. Voor de veiligheid op zee betekent PSPC-COT een enorme vooruitgang. Doordat de corrosie minder snel zal optreden, daalt de kans op incidenten.

Helaas kent PSPC-COT tekortkomingen. Eerst en vooral vormen de lasnaden tussen de verschillende scheepsblokken de achilleshiel van PSPC-COT. Dit komt omdat PSPC-COT te weinig informatie geeft over de grootte van dit oppervlak, de passende oppervlaktevoorbereiding en de specificatie van het verfsysteem dat op dit gebied moet aangebracht worden. Ook geeft PSPC-COT te weinig richtlijnen over het gebruik van het straalmiddel, de dikte van de shop primer, de maximale dikte van het verfsysteem, waterstralen, het verfsysteem aan de *bellmouth* en de opleiding van de applicateurs. Tevens zegt PSPC-COT niets over de luchtvochtigheid van de omgeving tijdens het uitharden van de verf en over het gebruik van '*coating friendly*' design en de exacte formulatie van de verf. Wat ook opvallend is, is dat de resolutie geen richtlijnen biedt omtrent blaasvorming van het verfsysteem. Verder zijn er enkele tekortkomingen bij de laboratoriumtest die gebruikt kan worden om een verfsysteem goed te keuren conform PSC-COT. Zo is de samenstelling en temperatuur van de testvloeistof niet representatief voor de werkelijke omstandigheden. Bovendien worden de verfsystemen niet getest op oppervlaktes die bewerkt met staalborstels. Verder worden er geen eisen gesteld aan de flexibiliteit van het verfsysteem. Bovendien blijkt dat de laboratoriumtests moeilijk reproduceerbaar zijn en dat er een slechte correlatie bestaat tussen de tests en de realiteit.

Verder zegt het materiaal informatieblad niet duidelijk dat de verf slechts optimaal zal presteren wanneer deze wordt aangebracht bij de ideale applicatietemperatuur. Tevens vormt de verfininspecteur zelf ook een zwakke schakel van PSPC-COT. Hij moet de staat van het verfsysteem zeer nauwkeurig beoordelen. Deze beoordeling is moeilijk uit te voeren en onderhevig aan de subjectiviteit van de inspecteur. Bovendien kan de inspecteur onder druk worden gezet, of zelfs worden omgekocht.

Ten slotte is PSPC-COT slechts een minimumstandaard die een evenwicht zoekt tussen de eisen van verschillende belangengroepen. Terwijl de meeste olietankers zijn gebouwd voor een levenscyclus van 20-25 jaar, streeft PSPC-COT slechts een minimumleeftijd van 15 jaar in 'goede' staat na. Wanneer de eigenaar een verfsysteem wil aanbrengen dat aanzienlijk langer dan 15 jaar meegaat, zal hij strengere standaarden moeten gebruiken. Zo kan de levensduur van het verfsysteem verlengd worden door het toepassen van een grotere oppervlakteruwheid van het substraat, en een lagere maximaal zoutgehalte. Hierbij kunnen kleine aanpassingen in het verfprojecten de levensduur van het verfsysteem aanzienlijk verlengen.

Ondanks de gebreken aan PSPC-COT, is het waarschijnlijk dat de resolutie haar beoogde doelstelling zal halen. Bovendien is al gebleken dat een verfsysteem dat aangebracht is een ladingtank van een olietanker, volgens PSPC-COT, het potentieel heeft om minstens 15 jaar in een 'goede' staat te blijven. Sterker zelfs, in een uitstekende staat.

Bibliografie

Geschreven bronnen

- A. Schweizer, P. (2006). *Paints and Coatings: Applications and Corrosion resistance*. Taylor & Francis.
- Aerts, T. (2012). *Corrosie in ballast tanks: een vergelijking tussen de PSPC-resolutie en de TSCF-richtlijnen*. (Hogere Zeevaartschool Antwerpen, Antwerpen). Geraadpleegd van <http://193.190.182.100/opc/index.html?opclanguage=dutch>
- Affens, W. A. (1977 december). Can Pyrophoric Materials Form in Oil Tankers with Inert Gas Fire Protection Systems? Naval Research Laboratory Washington, D.C. Geraadpleegd van <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a050571.pdf>
- Alblas, B. (2017, 20 januari). De duurzaamheid van verfsystemen. Geraadpleegd van <http://www.cot-nl.com/>
- American Bureau of Shipping. (n.d.). *Guidance Notes on the Inspection, Maintenance and Application of Marine Coating Systems*. Houston, Texas.
- Amtec. (2015a). Amtec Guide to Coating Failures & Coating Breakdown. Amtec. Geraadpleegd van <http://www.amteccorrosion.co.uk/coatingfailuresguide.html>
- Amtec. (2015b). Amtec Guide to Coatings and Corrosion. Amtec. Geraadpleegd van <http://www.amteccorrosion.co.uk/coatingsguide.html>
- Anderson, C. (n.d.). *Protection of Ships*.
- Atkins P., & de Paula, J. (2009). *Elements of Physical Chemistry* (5de druk.). USA, NY: Oxford University Press. Geraadpleegd van http://www.kinetics.nsc.ru/chichinin/books/Chem_Phys/Atkins09.pdf
- Axelsen, S. B., & Rogne, T. (s.d.). Do micro-organisms “eat” metal? SINTEF Materials technology. Geraadpleegd van http://efcweb.org/efcweb_media/mechanisms.pdf
- Broderick, D. (2015). *A Structural design Methodoligy to reduce Structural Complexity to Improve Coating Application and Performance in Water Ballast Tanks*. (Newcastle University, Newcastle). Geraadpleegd van <https://theses.ncl.ac.uk/dspace/bitstream/10443/3213/1/Broderick,%20D.R.%202016.pdf>
- C. G. Munger, & L. D. Vincent. (1999). *Corrosion Prevention by Protective Coatings*. 2. National Association of Corrosion Engineers.
- Cathwell. (n.d.). Anodes for ballast and cargo tanks. Geraadpleegd van

- <http://www.cathwell.com/ships/systems/sacrificial-anodes/anodes-for-ballast-and-cargo-tanks/>
- Chevron. (2000). Corroison Protection of Cargo Tanks. Chevron.
- Chuang, T.-J., & Nguyen, T. (1997). A non-osmotic blister growth model in coating systems. Geraadpleegd van <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build98/PDF/b98084.pdf>
- CIG. (s.d.). CIG. Geraadpleegd van <http://www.centralindustrygroup.com/maritime/shipbuilding/blockshull-fabrication>
- CIN. (2017, februari). STANDARD ISO 8501 Corosion Protection of Steel Structures by Painting. Geraadpleegd van <http://www.cin-protective.com/portal/attachs.pdf?CONTENTITEMOID=98858080808280GC&CLASSTOKEN=scpdescricaocategoria&ATTRIBUTEID=ficheiro>
- Clegg, N. (n.d.). A short Guide to Osmosis & its Treatment. passionforpaint. Geraadpleegd van <http://www.passionforpaint.co.uk/pdf/osmosis3.pdf>
- Contraros, P. (2015). Diagnostics of Coating Breakdown in Ballast Tanks. Amtec. Geraadpleegd van <http://www.amteccorrosion.co.uk/coatingbreakdown.html>
- CT4X. (s. d.). Ballast Tank Protection. Center For Tankshp Excellence.
- DAMEN. (s.d.). HSEQ Manager. DAMEN. Geraadpleegd van http://www.kwaliteit-in-bedrijf.nl/vacatures/Damen_HSEQmanager.pdf
- De Baere, K. (2011). *CORROSION IN BALLAST TANKS ON BOARD OF MERCHANT VESSELS Corrosie in ballasttanks van koopvaardij schepen*. (Hogere Zeevaartschool Antwerpen, Antwerpen). Geraadpleegd van <file:///C:/Users/201202560/Downloads/242538.pdf>.
- De Baere, K. (s.d.). Corrosion in a marine environment.
- De Baere, K. (2015, 15 mei). Corrosion protection of steel facilities by means of a coating system. Surface preparation and application.
- De Baere, K. (2017 april). *PSPC₁₅ & PSPC-COT*
- De Baere, K., Potters, G., Verstraelen, H., Willemsen, R., Crab, F., & Fierens, R. (2013, 9 juli). Comparative study between in situ observation and simulation. HZS.
- Devanney, J. (2006). *The Tankship Tromedy: The Impending Disasters in Tankers*. Sisyphus Beach Tavernier, Florida: CTX Press.
- Eliasson, J. (2017, 3 april). *Marine Coatings Issues and Solutions*. Gepresenteerd op

- het AMACORT Corrosion Symposium, Antwerpen. Geraadpleegd van <http://corrosion.hzs.be/Presentations/Johnny%20Eliasson.pdf>
- EMSA. (2005, 3 juni). Double Hull Tankers: High Level Panel of Experts REPORT. European Maritime Safety Agency.
- Fagerberg, L. (2003, januari). Wrinkling in sandwich panels for marine Applications. Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/publication/228891097_Wrinkling_in_sandwich_panels_for_marine_applications
- Gold, V. (1987). *Compendium of Chemical Terminology*. International Union of Pure and Applied Chemistry.
- Helmenstine, A. M. (2017, maart 4). Petroleum Composition. ThoughtCo. Geraadpleegd van <https://www.thoughtco.com/chemical-composition-of-petroleum-607575>
- HEMPEL. (s.d.). Cursus grondbeginselen verftechnologie & inspectie.
- Hempel A/S. (2000). *Corrosion Protection - Inspectors Book of Reference*. Hempel A/S.
- Heylbroeck, B. (2014). Inspectie, survey en onderhoud
- IACS. (2011). Classification Societies - What, Why and How. IACS. Geraadpleegd van http://www.iacs.org.uk/document/public/explained/class_whatwhy&how.pdf
- IACS. (2015, 2 May). IACS Recommendation 87. Geraadpleegd van http://www.iacs.org.uk/document/public/Publications/Resolution_changes/PDF/REC_087_Rev2_pdf2592.pdf
- IACS. (2016, 4 juni). IACS Recommendation 87: guidelines for coating maintenance & repairs for ballast tanks and combined cargo/ballast tanks on oil tankers. Geraadpleegd van http://www.iacs.org.uk/document/public/Publications/Resolution_changes/PDF/REC_087_Rev2_pdf2592.pdf
- ICCT. (2011, 24 oktober) AN INTRODUCTION TO PETROLEUM REFINING AND THE PRODUCTION OF ULTRA LOW SULFUR GASOLINE AND DIESEL FUEL. Geraadpleegd van http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT05_Refining_Tutorial_FINAL_R1.pdf

- International Marine Coatings. (s.d.). Coatings technology: What is corrosion? Geraadpleegd van <http://www.international-marine.com/PaintGuides/WhatIsCorrosion.pdf>
- INTERTANKO. (n.d.). Regulation to phase out single-hull tankers. Geraadpleegd van <https://www.intertanko.com/upload/ChangjiangBill.pdf>
- J.L. Jansen, E. (2012 november). NACE-ABS Initiative on Training. ABS.
- J.L. Jansen, E. (2017, 24 januari). Nut en noodzaak van IMO PSPC-COT.
- JBP. (2005, 8 April). Technical background on Corrosion Addition. JBP.
- Jeffries, D. (2010). *Pyrophoric Ignition Hazards in Typical Refinery Operations*. Presented at the CAER Safety Summit Meeting. Geraadpleegd van <https://powerengineeringwiki.wikispaces.com/file/view/Pyrophoric+Ignition+Hazards.pdf>
- JFE. (2008 32/01). Corrosion Resistant Steel Plate for Shipbuilding. JFE. Geraadpleegd van <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/b03.html>
- Jones, J. C. (2010). Hydrocarbons: physical properties and their relevance to utilisation. Ventus Publishing ApS.
- Kashima, K., Tanino, Y., Kubo, S., Inami, A., & Miyuki, H. (2007). DEVELOPMENT OF CORROSION RESISTANT STEEL FOR CARGO OIL TANKS. Shipbuilding Technology ISST. Geraadpleegd van http://www.nmri.go.jp/main/cooperation/imo_iso/ISST2007/CD/paper/02_Kashima.pdf
- Katoh, K., Imai, S., Yasunaga, D. T., Miyuki, H., Yamane, Y., Ohyabu, H., Kobayashi, Y., et al. (n.d.). Study on Localized Corrosion on Cargo Oil Tank Bottom Plate of Oil Tanker. Geraadpleegd van <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=f8e48d29-8837-4a5e-96f0-45aa46c2c07a>
- Kattan, R., & Brodderick, D. (s.d.). Design for coating in ships ballast tanks. Safinah. Geraadpleegd van http://www.safinah.co.uk/wp-content/uploads/2014/09/40_Design-for-Coatings-in-Ships-Ballast-Tanks.pdf
- Kazahiko, S., & Masayoshi, N. (2015, maart). Coating deterioration and Corrosion Behavior of Ship Using Corrosion Resistant Steel for Ballast Tank “JFE-SIPTm-BT.” JFE. Geraadpleegd van <http://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/020/pdf/020-08.pdf>
- Khawar, N. (2013, 5 november). *Petroleum and Crude oil quality*. Geraadpleegd van

- <https://www.slideshare.net/KhawarNehalkhawarneh/petroleum-and-crude-oil-quality>
- Koteeswaren, M. (2010 juni). *CO₂ and H₂S Corrosion in Oil Pipelines*. (University of Stavanger, Stavanger).
- Mansell, J. N. . (2009). Flag State Responsibility.
- Marine coatings BV. (n.d.). Veel voorkomende problemen. Marine Coatings BV. Geraadpleegd van http://www.psmarine.nl/technische_service/veel_voorkomende_problemen/veel-voorkomende-problemen.html
- McNaught, A. D., & Wilkinson, A. (1997). *Compendium of Chemical Terminology* (2nd ed.). Blackwell Science.
- Melchers, R. E. (2017, 3 April). *Modelling, prediction and factors in the corrosion of steels in marine environments*. Antwerpen. Geraadpleegd van <http://corrosion.hzs.be/Presentations/Rob%20Melchers.pdf>
- Munger, C. (n.d.). Causes and prevention of paint failure. Ponderosa Protective Coatings. Geraadpleegd van <http://ponderosapaintco.com/techdata/8.pdf>
- Nguyen, T., & Martin, J. W. (n.d.). Modes and mechanisms of degradation of epoxy-coated reinforcing steel in a marine environment. Geraadpleegd van <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build96/PDF/b96041.pdf>
- Nippon Steel Corporation, & NYK Line. (s.d.). Anti-Corrosion Steel for Pitting corrosion on COT's of crude oil carrier. Geraadpleegd van <https://intertanko.com/upload/3.6%20-%20Anti-corrosion%20Steel-Nippon%20Steel-NYK.pdf>
- OCIMF. (1997). Factors influencing accelerated corrosion of oil cargo tanks. OCIMF.
- Paik, J., Lee, J. M., Hwang, J. S., & Park, Y. I. (2003). A Time-Dependent Corrosion Wastage Model for the Structures of Single-and Double-Hull Tankers and FSO and FPSOs. *Marine Technology*. Geraadpleegd van <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=4fa8b76d-859d-471b-a62e-abd9e3faba3b>
- Paint International. (s.d.a). Material Safety Data Sheet. Geraadpleegd van <http://www.international-pc.com/products/linings/devoe/documents/msds/000t-dc-solvents-msds.pdf>
- Paint International. (s.d.b). New Rules for Crude Oil Tanks. Geraadpleegd van <http://www.international-marine.com/Literature/New-rules-for-crude-oil->

tanks.pdf

- Park, J. H., Lee, G. D., Ooshige, H., Nishikata, A., & Tsuru, T. (2002, 19 December). Monitoring of water uptake in organic coatings under cyclic wet-dry conditions. Geraadpleegd van http://ac.els-cdn.com/S0010938X03000246/1-s2.0-S0010938X03000246-main.pdf?_tid=848226f8-0325-11e7-9756-00000aab0f02&acdnat=1488884713_c25933c7e6ea05789d26313aaf3f6146
- Potters, G. (2016, 2017). *Chemie voor Bachelors Nautische Wetenschappen*.
- Prent, C. (2017, 3 april). *Microbial Corrosion, myth or reality?* Gepresenteerd tijdens het AMACORT Corrosion Symposium, Antwerpen. Geraadpleegd van <http://corrosion.hzs.be/Presentations/Corina%20Prent.pdf>
- Raad van de Europese Unie. (2002, 5 februari). Mededeling van de Commissie aan het Europese Parlement en de Raad inzake de vergroting van de veiligheid op zee naar aanleiding van het vergaan van de olietanker "Prestige." Raad van de Europese Unie. Geraadpleegd van https://www.eumonitor.nl/9353000/1/j4nvgs5kjg27kof_j9vvik7m1c3gyxp/vj6ipa w31yum/f=/15301_02.pdf
- Rauta, D. (2004, 25 februari). *Double hulls & Corrosion*. Presented at the Royal Institute of Naval architects Conference, Londen.
- Rauta, D., Gunner, T., & Eliasson, J. (s.d.). Double Hull Tankers and Corrosion Protection. Geraadpleegd van <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=c56dbeb9-ddd5-44ad-a5d4-0b4ec517d8ad>
- Saltmarsh, M. (2010, 30 maart). French Court Upholds Verdict in Oil Spill. Geraadpleegd van <http://www.nytimes.com/2010/03/31/business/energy-environment/31total.html>
- Schoff, C. K. (n.d.). Sagging. *Coatingstech, oktober 2014*. Geraadpleegd van <http://www.paint.org/documents/2015/11/sagging.pdf>
- Schuring, E. W. S. (n.d.). *Onderbouwing Schade-Onderzoek: technieken voor schade-analyse en fractografie*. (p. 62). Geraadpleegd van <http://www.vemet.nl/dico/UserFiles/Downloads/Rapporten/Schadeonderzoek/Breukvlakken-en-Breukmechanismen-van-Metalen-94-M-09767.pdf>
- Selly, C. R. (1998). *Elements of Petroleum Geology* (2nd ed.). 470: Academic Press.
- Soares, C. , Garbatov, Y., Zayed, A., & Wang, G. (2008). Corrosion wastage model for ship crude oil tanks. Elsevier. Geraadpleegd van

- file:///C:/Users/201202560/Downloads/ABS%20Study%20on%20Underdeck%20Corrsion%20(3).pdf
- Soerensen, P. A., Kiil, S., Dam-Johansen, K., & Weinall, C. E. (2009). Influence of substrate topography on cathodic delamination of anticorrosive coatings. technical University of Danmark. Geraadpleegd van <http://orbit.dtu.dk/files/3527531/Influence%20of%20substrate%20topography%20on%20cathodic%20delamination%20of%20anticorrosive%20coatings.pdf>
- Thygesen, B. (2000). *Corrosion Onboard Crude Oil Tankers*.
- Thygesen, B. (2002a, 24 oktober). *Crude Oil Cargo Tank Corrosion*. Cardiff, Wales. .INTERTANKO.
- Towers, R. (2000 maart). Accelerated Corrosion in Cargo Tanks of Large, Double-Hull Ships: Causes and Countermeasures. Sigma Coatings.
- Transocean Coatings. (s.d.). SURFACE PREPARATION. Geraadpleegd van [file:///C:/Users/Gebruiker/Downloads/surfacepreparation-0%20\(5\).pdf](file:///C:/Users/Gebruiker/Downloads/surfacepreparation-0%20(5).pdf)
- Valero Energy Corporation. (2007, augustus). *Delaware City Refinery Tour*.
- Van der Kaaden. (n.d.). Wet blasting studied to replace dry blasting in Netherlands shipyards. *Journal of Protective Coatings and Linings*.
- Van Dokkum, K. (2006). *Ship Knowledge* (3rd ed.). DOKMAR.
- Vanderstockt, N., De Baere, K., Verstraelen, H., Willemen, R., & Potters, G. (2014). *Studie naar de duurzaamheid van epoxyverven in ballasttanks: studie naar de verouderingsprocessen van verfsystemen - het bekomen van een betrouwbare testopstelling voor het versnellen van corrosie*. (Hogere Zeevaartschool Antwerpen, Antwerpen). Geraadpleegd van <http://193.190.182.100/opc/index.html?opclanguage=dutch>
- Wilkins, T. (2007). *Single Hull Tanker Phase Out and its implications on Ship Conversion and Recycling in the Region*. Gepresenteerd bij Ship Care 2007, Peking. Geraadpleegd van <http://slideplayer.com/slide/10006871/>
- Willemen, R. (2017, 3 april). *Economic benefit of a long term coating strategy*. Gepresenteerd bij het AMACORT Corrosion Symposium, Antwerpen. Verkregen van <http://corrosion.hzs.be/Presentations/Remke%20Willemen.pdf>
- Willemen, R., Verstraelen, H., Meskens, R., Luyckx, D., Vastmans,, K., Lenaerts, S., & De Baere, K. (s.d.). THE ECONOMICS OF A LONG TERM COATING.
- Willemen, R. (2016). SHIP CONSTRUCTION 2.
- Yasunaga, D. T., Katho, K., Imai, S., Miyuki, H., Yamane, Y., Ohyabu, H., Saito, M.,

et al. (n.d.). Study on Cargo Oil Tank Upper Deck Corrosion of Oil Tanker.
 Young, R. J. (n.d.). *Introduction to polymers*.
 Zoski, C. G. (2007). *Handbook of Electrochemistry* (1st ed.). Elsevier. Geraadpleegd
 van <http://files.instrument.com.cn/bbs/upfile/2007527182619.pdf>

Internetbronnen

Amtec. (2015a). Amtec Guide to Assessment of Coating Breakdown. Geraadpleegd
 20 november 2016, van
<http://www.amteccorrosion.co.uk/breakdownassessmentguide.html>
 Amtec. (2015b). Amtec Guide to Surface Preparation. Geraadpleegd 20 oktober
 2016, b van <http://www.amteccorrosion.co.uk/surfaceprepguide.html>
 Amtec. (2015c). Introduction to Corrosion. c Geraadpleegd van
http://www.amteccorrosion.co.uk/m_corrosionguide.html
 ASTM. (2017). ASTM INTERNATIONAL. Geraadpleegd 10 april 2017, van
<https://www.astm.org/>
 Corrosionist. (2017). Corrosionist. Geraadpleegd 10 oktober 2016, van
<http://www.corrosionist.net/en/>
 Corrosion Consulting. (2017). Pitting corrosion. *Different Types of Corrosion*.
 Geraadpleegd 10 mei 2017, van
http://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/pitting_corrosion.htm
 CT4X. (2017). Center For Tankship Excellence. Geraadpleegd 22 februari 2017, van
<http://www.c4tx.org/>
 Davis, J. R. (2000). *Corrosion: understanding the basics* (1st ed.). Materials Park,
 OH, V.S.A.
 DH Tech. (2017). The User's Viewpoint. *DH Tech*. Geraadpleegd 11 mei 2017, van
<https://milosdjukichydrogen.wordpress.com/2014/05/06/high-temperature-hydrogen-attack-htha-of-boiler-tube/>
 Djukic, M. (2014 mei). High Temperature Hydrogen Attack (HTHA) of boiler tube.
High. Geraadpleegd 12 mei 2017, van
<https://milosdjukichydrogen.wordpress.com/2014/05/06/high-temperature-hydrogen-attack-htha-of-boiler-tube/>
 Du, L. (n.d.). The Corrosion Control Technology for High H₂S and CO₂ Content
 Natural Gas Gathering and Transportation System. Verkregen van
 EMSA. (2017). EMSA. Geraadpleegd 1 maart 2017, van

<http://www.emsa.europa.eu/visits-a-inspections/assessment-of-classification>
e-paint. (2017). e-paint. Geraadpleegd 3 oktober 2017, van <http://www.e-paint.co.uk/societies.html>

FROSIO. (s.d.). About FROSIO. *About FROSIO*. Geraadpleegd van <http://www.frosio.no/en/about>

Gordon England. (s.d.). The Corrosion Process. Geraadpleegd 2 februari 2017, van <http://www.gordonengland.co.uk/corrosion.htm>

IMO. (s.d.). Introduction to IMO. Geraadpleegd 10 April 2017, van <http://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx>

IMO. (2017). Construction Requirements for Oil Tankers- Double Hulls. *International Maritime Organization*. Geraadpleegd 26 april 2017, van <http://www.imo.org/en/ourwork/environment/pollutionprevention/oilpollution/pages/constructionrequirements.aspx>

IPPIC. (2017). IPPIC International Paint & Printing Ink Council. Geraadpleegd 10 april 2017, van <http://www.ippic.org/about>

Jackson, K. (2008 november). Coating Issues. Geraadpleegd 25 april 2017, van <http://slideplayer.com/user/10767685/>

JSTRA. (2017). Japan Ship Technology Research Association. Geraadpleegd 10 maart 2017, van <http://www.jstra.jp/english/>

JFE Steel Corporation. (2008, 29 januari). Development of New Corrosion-Resistant steel for greater Safety of Crude Oil Tankers. Verkregen van <http://www.jfe-steel.co.jp/en/release/2008/080129.html>

Kantharia, R. (2017, 28 februari). Single Hull Vs Double Hull Tankers. *Marine Insight*. Geraadpleegd van <http://www.marineinsight.com/naval-architecture/single-hull-vs-double-hull-tankers/>

Korean Register of Shipping. (s.d.). COATING STANDARD. Geraadpleegd 25 april 2017, van <http://slideplayer.com/slide/10566433/>

Kottonau, J. (2017). Simulation of Osmosis with Moveable Membrane. Osmotic ; Geraadpleegd 23 februari 2017, van <http://lsvr12.kanti-frauenfeld.ch/KOJ/Java/Osmosis.html>

Letzens, J. (n.d.). MV Berge Istra. *MV Berge Istra*. Geraadpleegd 28 februari 2017, van <http://www.wrecksite.eu/wreck.aspx?108559>

Lovett, T., & King, J. (2005 juli) Standard estimates of loads applied by waves. *Wave bending moment*. Geraadpleegd 1 maart 2017, from

http://worldwideflood.com/ark/hull_calcs/wave_bm1.htm#ref01

Marine Survey Practice. (2013, januari 6). Longitudinal strength. Geraadpleegd 10 februari 2017, van <http://marinesurveypractice.blogspot.be/2013/01/que-mirar-donde-mirar.html>

Maritimecyprus. (n.d.). Flashback in History: the breakup of the tanker NAKHODKA - 2 januari 1997. Geraadpleegd 2 maart 2017, van <https://maritimecyprus.com/2015/01/02/flashback-in-history-break-up-of-tanker-nakhodka-2-januari-1997/>

Meland, A. (2006, 3 January). Skipet som forsvant. Geraadpleegd 5 maart 2017, van <http://www.dagbladet.no/magasinet/2006/01/02/453618.html>

Mühlpfordt, H. (2009, februari 8). Galvanische Zelle. Geraadpleegd 3 maart 2017, van https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Galvanische_Zelle_grau_2009-02-08.svg

NACE. (2000). NACE international. Geraadpleegd maart 2017, van <https://www.nace.org/cstm/Education/Program.aspx?id=dcf75ff6-8816-db11-953d-001438c08dca>

Paul N. Gardner Company. (2017). Assessment of Surface Cleanliness. Geraadpleegd 20 september 2016, van https://www.gardco.com/pages/adhesion/surface_cleanliness.cfm

PenWell corporation. (2016). Oil&Gas Journal. Geraadpleegd van <http://corrosion.hzs.be/Presentations/Johnny%20Eliasson.pdf>

Petrowiki. (s.d.). Wax problems in production. Geraadpleegd 20 november 2015, van http://petrowiki.org/index.php?title=Wax_problems_in_production&printable=yes

Raloff, J. (2010, december 3). Heavier Crudes, heavier footprints. Geraadpleegd 21 april 2017, van <https://www.sciencenews.org/blog/science-public/heavier-crudes-heavier-footprints>

Shell. (s.d.). Prelude FLNG. Geraadpleegd 24 april 2017, van <http://www.shell.com/about-us/major-projects/prelude-flng.html>

Shodor. (2017). Chemical Thermodynamics. Geraadpleegd 5 mei 2017, van <http://www.shodor.org/unchem/advanced/thermo/>

SIS. (2017). Swedish Standards Institute. Geraadpleegd 10 maart 2017, van <http://www.sis.se/en/>

SSPC. (2017). SSPC. Geraadpleegd 10 maart 2017, van <http://www.sspc.org/>

- TSCF. (2012, 28 november). TANKER STRUCTURE CO-OPERATIVE FORUM CHARTER. *About TSCF*. Geraadpleegd 25 maart 2017, van <http://www.tscforum.org/AboutTSCF/interim.aspx>
- U.S. Energy Information Administration. (2012, 6 juli). Crude oils have different quality characteristics. Geraadpleegd <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=7110>
- WRS Marine. (2017). WRS Group. Geraadpleegd 12 mei 2017, van <http://wrsmarine.nl/wrsmarine/sacrificial-anodes/>
- Zandleven groep. (2017). Constructiefase. Geraadpleegd 4 april 2016, van <http://engineering.zandleven.com/nl/constructiefase>

Mm/

