



**HOGERE ZEEVAARTSCHOOL
ANTWERPEN**

NAUTISCHE FACULTEIT

Netto energie optimaliseren bij het Air Lubrication System

Philippe Van Dongen

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

Promotor: Kapt. Guido Delvaux
Copromotor: Helen Verstraelen
Academiejaar: 2020 – 2021

Voorwoord

In deze masterthesis wordt het Air Lubrication System besproken. Deze technologie heeft als doel het verminderen van brandstofverbruik en ook de kosten hiervan. Door de vorming van een luchtlaag rond de scheepsromp zal het schip minder rechtstreeks contact hebben met het zeewater. Een object dat zich door water verplaatst zal meer weerstand ondervinden tegenover een object dat zich door lucht verplaatst. Volgens dit principe zal de luchtlaag, gecreëerd door het Air Lubrication System, resulteren in een weerstandsvermindering van het schip. Met het gevolg dat een schip minder energie nodig heeft om zich aan eenzelfde snelheid te verplaatsen.

Ik heb dit onderwerp gekozen omdat de klimaatkwestie één van de grootste uitdagingen is van deze eeuw. Ook de maritieme sector zal zijn verantwoordelijkheid moeten nemen en er alles aan doen om deze klimaatveranderingen af te remmen. Het Air Lubrication System was een technologie waar ik in geloofde dat deze zou kunnen werken. Ik had het onderzoek graag meer praktisch benaderd maar wegens te weinig middelen kon ik niet tewerk gaan via deze weg. Ik ben zowel met de sleeptank in Luik in contact gekomen als MARIN aangezien deze al onderzoek over het ALS hebben uitgevoerd maar er was geen samenwerking mogelijk. Ook MSC en Howden Compressors konden geen hulp bieden.

Ik wil mijn promotor kapt. Guido Delvaux bedanken voor het nakijken en adviseren van dit werk. Dit zou ik ook willen doen voor mijn copromotor Helen Verstraelen. Alsook mijn vorige promotor Helga Van Noten die heeft geholpen met het opstellen van deze thesis. Tot slot zou ik dr. Arne Ven en dr. Laurine Burdorf willen bedanken voor het leerrijke interview.

Samenvatting

Met de eerste broeikasstrategie van de IMO wil de scheepvaart tegen 2050 zijn broeikasuitstoot reduceren met ten minste 50% tegenover het niveau van 2008. Hierna wilt men deze uitstoot zo snel mogelijk tot nul verkrijgen. Om dit te bereiken zijn alternatieve brandstoffen en nieuwe technieken nodig. Het Air Lubrication System is mogelijk één van de technologieën die hierbij kan helpen. Deze techniek creëert een luchtlaag onder het kiel van het schip waardoor dit vaartuig minder weerstand zal ondervinden. Deze weerstandsvermindering zal resulteren in een uitstootvermindering. Door eerder uitgevoerde onderzoeken en observaties van schepen met het Air Lubrication System blijkt deze technologie wel degelijk te werken. Het systeem kan het brandstofverbruik verminderen met 5-12%, dit afhankelijk van bepaalde factoren. In deze thesis wordt onderzocht of deze technologie een mogelijk impact heeft op zowel het milieu als het klimaat. Hiervoor werden vier mogelijke aspecten bestudeerd: de CO₂ vermindering, mogelijke antifouling, zuurstoftoevoeging aan zeewater en demping van geluidsemisatie. Aan de hand van het onderzoek kan geconcludeerd worden dat dit systeem alleen niet de oplossing is voor de klimaat en milieu aanpak van de maritieme sector, maar in combinatie met andere technieken is het zeker een stap in de goede richting.

Abstract

With IMO's first greenhouse strategy, the maritime industry aims to reduce its greenhouse gas emissions by at least 50% by 2050 compared to the levels of 2008. Whereafter, the aim is to get these emissions to zero as quickly as possible. To achieve this goal, alternative fuels and new techniques are in dire need. The Air Lubrication System is one of the possible technologies that could help with this problem. The technique creates a layer of air under the keel of the vessel, which reduces the vessel's resistance. The reduction in drag, caused by the reduction of the vessel's resistance, results in a reduction in emission. Previously conducted studies and observations of vessels sailing with the Air Lubrication System, have proven that this technology works. Depending on certain factors, the system could reduce fuel consumption by 5-12%. This thesis investigates the possible impact of the Air Lubrication System on the environment and climate. This has been done by taking into account four possible aspects of the technology: the CO₂ reduction, possible antifouling, the addition of oxygen into the seawater and noise emission reduction. Based on the research on can conclude that this system on its own is not the final solution for the climate and environment approach of the maritime sector. But, in combination with other techniques and systems it could have a beneficial impact on the maritime emission worldwide.

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	iii
Abstract	v
Inhoudsopgave	vii
Lijst van figuren	xi
Lijst van tabellen	xiii
Afkortingen	xv
Inleiding	1
1 Air Lubrication System	3
1.1 <i>Achtergrond en het doel van het systeem</i>	3
1.2 <i>Soorten Air Lubrication Systems (ALS)</i>	4
1.2.1 Bubbles Drag Reduction	4
1.2.2 Partial Cavity Drag Reduction	5
1.2.3 Air Layer Drag Reduction	6
1.2.4 AIRCOAT	6
1.3 <i>Vergelijking van de verschillende systemen</i>	7
1.4 <i>Huidige cijfers</i>	9
1.5 <i>Air bubbles voor andere doeleinden</i>	10
1.5.1 Bubble barrier	10
1.5.2 Baggeren	12
1.5.3 Voorkomen van orkaanvorming	13
1.5.4 Wrijving met ijs	13
2 Weerstandsbeperving	15
2.1 <i>Totale weerstand</i>	16
2.1.1 Wrijvingsweerstand	16
2.1.2 Drukweerstand	17
2.1.3 Viscose drukweerstand	17
2.1.4 Golfweerstand	20

2.2	<i>Berekeningsproces</i>	22
2.2.1	Het getal van Froude	22
2.2.2	Getal van Reynolds	23
2.2.3	Theoretische benadering van weerstand	24
2.2.4	Praktische benadering van weerstand	25
3	Antifouling	29
3.1	<i>Biofouling</i>	29
3.2	<i>Air Lubrication als antifouling</i>	32
4	Projecten en theoretische benadering van bestaand onderzoek	35
4.1	<i>PELS</i>	35
4.1.1	Het model	35
4.1.2	Invloed van zeegang op het model	37
4.1.3	Planar Motion Mechanism	38
4.1.4	Free sailing tests	40
4.2	<i>SMOOTH</i>	41
4.3	<i>MALS</i>	43
4.4	<i>Silverstream</i>	46
4.5	<i>Howden Compressors</i>	47
4.6	<i>AIRCOAT</i>	51
4.6.1	Salvinia effect	53
4.7	<i>Discussie</i>	56
5	Projectresultaten	59
5.1	<i>Bubble Drag Reduction</i>	59
5.1.1	Testen beweging schip	59
5.1.2	Testen manoeuvreerbaarheid	60
5.2	<i>Partial Cavity Drag Reduction</i>	61
5.2.1	Testen bewegingen schip	64
5.2.2	Testen manoeuvreerbaarheid	66
5.3	<i>Air Layer Drag Reduction</i>	66
5.3.1	Energiebesparing	66
5.4	<i>Besluit</i>	68
6	Onderzoek: mogelijke impact op het klimaat en het milieu	71
6.1	<i>Inleiding</i>	71

6.2	<i>Gevolgen CO₂ vermindering</i>	72
6.2.1	<i>Benadering CO₂ vermindering Europese wateren</i>	73
6.3	<i>Gevolgen antifouling</i>	74
6.4	<i>Gevolgen zuurstoftoevoeging aan zeewater</i>	76
6.5	<i>Gevolgen geluidsdemping</i>	78
6.6	<i>Besluit klimaat en milieu impact</i>	79
7	Algemeen besluit	83
	Bibliografie	85
	Bijlage: interview met dr. Laurine Burdorf en dr. Arne Ven	95
	Bijlage: CO₂ uitstoot Europese Wateren 2018	101

Lijst van figuren

Figuur 1 De werking van <i>Bubble Drag Reduction</i>	5
Figuur 2 De werking van <i>Partial Cavity Drag Reduction</i>	5
Figuur 3 De werking van Air Layer Drag Reduction	6
Figuur 4 Het AIRCOAT concept	7
Figuur 5 Een <i>bubble curtain</i>	10
Figuur 6 Het bovenaanzicht van een <i>bubble barrier</i>	11
Figuur 7 Een sedimenten barrière	12
Figuur 8 De werking van een luchtbubbelscherm	12
Figuur 9 Manoeuvreren in ijscondities met luchtbubbels	14
Figuur 10 Oorzaken van rompweerstand	16
Figuur 11 Een lichaam in een ideale vloeistof dat zich voorwaarts verplaatst	18
Figuur 12 Een lichaam dat een viscose drukweerstand ondervindt. Er ontstaat een grenslaag (<i>boundary layer</i>) die achteraan omvormt in een turbulente regio (<i>wake</i>).	19
Figuur 13 Divergerende en transversale golven	20
Figuur 14 Verschillende fases voor de vorming van biofouling	30
Figuur 15 Testplaatjes met en zonder antifouling	33
Figuur 16 Resultaat aangroei met en zonder luchtlaag	34
Figuur 17 Onderkant scheepsmodel met metalen strips	36
Figuur 18 <i>Planar Motion Mechanism</i>	39
Figuur 19 De zig-zag test	40
Figuur 20 De werking van het Mitsubishi luchtsysteem	43
Figuur 21 Het eerste schip met ALS	44
Figuur 22 Onderdelen van het Howden Air Lubrication System	48
Figuur 23 Mogelijk operationeel vlak van een compressor met relatie tot druk en luchtstroom	49
Figuur 24 Werkgebied compressor bij maximale luchtstroom	50
Figuur 25 Werkgebied compressor bij minimale luchtstroom	50
Figuur 26 Werkgebied compressor met gesloten inlaatkleppen	51
Figuur 27 Werkgebied compressor met open inlaatkleppen	51
Figuur 28 Het AIRCOAT concept	52
Figuur 29 De haarstructuur van de Salvinia plant	54
Figuur 30 Variatie in afstand van de scheidingslaag (links) en opperlakte snelheid met een vloeisnelheid van 0,6m/s (rechts)	55
Figuur 31 Een observatie van de operationele parameters (shaft power, RPM en log speed) op de MT Amalienborg met en zonder het ALS	57
Figuur 32 Metingen dompbeweging van model met (rood) en zonder bubbels (blauw)	59
Figuur 33 Krachtmetingen met microbubbels (vierkanten en kruisjes) en zonder Air Lubrication (lijnen)	60

Figuur 34 Vergelijking gasstroom PCDR (cirkels) en ALDR (driehoeken en sterretjes)	62
Figuur 35 Scheepsbodem van het PCDR model	63
Figuur 36 Energiebesparing % bij een hoge (blauw) en lage (rood) snelheid van 13,5 en 9 knopen	65
Figuur 37 Krachtbesparingspercentage in functie van de snelheid voor een schip met een ruwe romp en met een lengte van 100m	67
Figuur 38 Krachtbesparingspercentage met drie verschillende luchtinjecties: gladde bodem met 20% luchtinjectie (groen), ruwe bodem met 80% luchtinjectie (rood) en een gladde bodem met 80% luchtinjectie (zwart)	68
Figuur 39 De mogelijke gevolgen van biofouling	75
Figuur 40 Translocatie proces van maritieme organismen	76
Figuur 41 Aeratie	77

Lijst van tabellen

Tabel 1 Krachtbesparing in verband met luchtdikte	45
Tabel 2 Berekende parameters van het propulsie systeem van een passagierschip wanneer het ALS aan en af staat	58

Afkortingen

ACDR: Air Cavity Drag Reduction

ACES: Air Chamber Energy Saving

AIRCOAT: Air Induced friction Reduced ship

AL: Air Lubrication

ALDR: Air Layer Drag Reduction

ALS: Air Lubrication System

BDR: Bubble Drag Reduction

CFD: Computational Fluid Dynamics

DOF: Degrees Of Freedom

DWT: Deadweight tonnage

EEDI: Energy Efficient Design Index

FSE: Free Surface Effect

IMO: International Maritime Organization

ITTC: International Towing Tank Conference

LNG: Liquefied Natural Gas

Lpp: length between perpendiculars

MAL: Mitsubishi Air Lubrication

MARIN: Maritime Research Institute the Netherlands

MW: Megawatt

NIMS: Non-Indegenous Marine Species

PCDR: Partial Cavity Drag Reduction

PELS: Project Energy-saving air-Lubrication Ships

PMM: Planar Motion Mechanism

RoRo: Roll-on-Roll-off

RPM: Rotations Per Minute

SINTEF: Stiftelsen for industriell og teknisk forskning

SMOOTH: Sustainable Methods for Optimal design and Operation of ships
with air lubricated Hulls

TBTO: Tributyltin Oxide

TBT-SPC: Tributyltin self-polishing copolymer

TEU: Twenty Foot Equivalent Unit

WAIP: Winged Air Induction Pipe System

WSA: Wetted Surface Area

Inleiding

De klimaatkwestie is één van de grootste uitdagingen van de 21^{ste} eeuw. Allerlei landen en organisaties dienen voorstellen in om de klimaatverandering af te remmen. Zo wil 'het klimaatakkoord van Parijs' de klimaatopwarming tot ruim onder de 2°C houden, en kwam de Europese Commissie met een plan om onder andere de netto uitstoot aan broeikasgassen tegen 2050 tot nul te reduceren (de zogenaamde 'Green Deal'). Om deze klimaatdoelen te verwezenlijken, dient ook de transportsector zijn uitstoot te verminderen. De vraag naar transport neemt echter zowel voor personen als voor goederen toe. Omdat de huidige transportmiddelen vooral op verbrandingsmotoren werken, nemen daardoor ook de emissies van broeikasgassen toe. (Europese Commissie, 2020) (EUR-lex, 2016)

Voor de scheepvaart is, zeker bij lange afstanden, het nog niet helemaal duidelijk hoe de uitstoot drastisch verminderd kan worden. De energiebron kan aangepast worden (vb. elektrische motoren, biobrandstoffen, synthetische brandstoffen, waterstof). Grote efficiëntiewinsten kunnen echter geboekt worden door onder meer te voorzien in een betere aerodynamica en hydrodynamica.

Wanneer een schip vaart maakt door water ondervindt het veel weerstand. Indien deze weerstand beperkt kan worden, hoeft het schip minder energie te gebruiken om aan eenzelfde snelheid te varen. Deze verlaagde weerstand zou veel energie besparen. Bijgevolg zou een schip op zijn routes minder brandstof verbruiken, waardoor zijn broeikasuitstoot drastisch kan dalen. Het Air Lubrication System maakt gebruik van een technologie die ervoor zorgt dat de scheepweerstand stevig daalt. Het systeem creëert een luchtlaag onder het schip met als gevolg dat het vaartuig minder wrijving en ook minder weerstand zal ondervinden. Volgens het kader van het IMO *Energy Efficiency Design Index* (EEDI) wordt het Air Lubrication System

beschouwd als één van de meest innovatieve energie-efficiënte technologieën binnen de scheepsvaart. (ABS, 2019)

In het eerste hoofdstuk wordt het *Air Lubrication System* algemeen in het kort besproken. Waarna de vier methodes die er momenteel zijn worden beschreven om een overzicht te krijgen van de werking van deze technologie. Het tweede hoofdstuk gaat over het fysische aspect van weerstand. De Air Lubricatie (AL) technologie kan uitstoot van schepen verminderen doordat het de weerstand tussen het schip en het water reduceert. Daarom wordt dit in hoofdstuk twee grondig besproken. In het derde hoofdstuk komt antifouling aan bod. De luchtsmeringstechnologie kan hier mogelijk een impact op hebben wat een grote stap kan zijn om biofouling tegen te gaan. Doorheen de jaren zijn er verschillende projecten gestart om Air Lubrication te bestuderen en mogelijk hier een eigen systeem voor te ontwerpen. Hoofdstuk vier behandelt deze projecten om zo een overzicht te krijgen van de soorten onderzoeken die er zijn. Het vijfde hoofdstuk gaat over de gekende uitslagen van deze onderzoeken. Hier worden de resultaten van deze projecten beschreven per soort Air Lubrication, zodat de effectieve efficiëntie van de technologie wordt overlopen. Deze onderzoeken werden meestal door andere onderzoeksteams uitgevoerd en hebben dus geen onderling verband. Het is echter goed om hierover een beeld te verkrijgen van de capaciteiten. Mijn onderzoek naar de mogelijke impact op het milieu en het klimaat van het Air Lubrication System wordt in hoofdstuk zes behandeld. Zo wil ik een antwoord krijgen op de onderzoeksvraag: "Wat is de mogelijke bijdrage van het Air Lubrication System voor oplossingen van klimaat- en milieuproblemen in de scheepsvaart?".

1 Air Lubrication System

1.1 Achtergrond en het doel van het systeem

Het Air Lubrication System is een methode om de weerstand tussen een schip en het omliggende water te verminderen aan de hand van een luchtlaag. Het systeem werkt op basis van luchtsmering. Dit wil zeggen dat er door de creatie van een luchtlaag onderaan de scheepsromp minder contact zal zijn tussen de romp en het water. Dit wordt gerealiseerd door aan de kiel van het schip een luchtafvoersysteem te plaatsen, waardoor een 'luchttapijt' gevormd wordt. Deze luchtlaag onderaan het schip resulteert vervolgens in een vermindering van de wrijvingsweerstand. (Politis, 2016) (Raunek, 2020)

Het gebruik van een gelijkaardige systeem met bubbels onder een scheepsromp werd origineel toegepast voor een ander doeleind. Het *National Defense Research Committee* van de Verenigde Staten ontwikkelde na de Tweede Wereldoorlog het '*Prairie/Masker Air System*'. Dit systeem maakte gebruik van bubbels onder de scheepsromp en rond de propeller om zo het scheepsgeluid te dempen. Door gebruik te maken van dit concept werd bijgevolg de scheepsakoestiek minder detecteerbaar door sonar. Later werd dit systeem bestudeerd om de weerstand op de romp van het schip te verminderen. (ABS, 2019)(USNA, 2020)

De totale weerstand van een schip kan in drie categorieën worden onderverdeeld: golfweerstand, wrijvingsweerstand en vormweerstand. Voor schepen met een relatief lage snelheid kan de wrijvingsweerstand oplopen tot 85% van de totale weerstand. Dit is de weerstand die wordt verminderd door het Air Lubrication System. Met lage snelheid wordt bedoeld voor schepen met snelheids-lengte ratio ($\frac{V_s}{\sqrt{L_s}}$) minder dan 0,4. In deze formule wordt de snelheid uitgedrukt in knopen en de lengte in feet. Om een voorbeeld te geven: een schip met een lengte van 200 meter oftewel 656 feet en een snelheid van 10 knopen heeft een snelheids-lengte

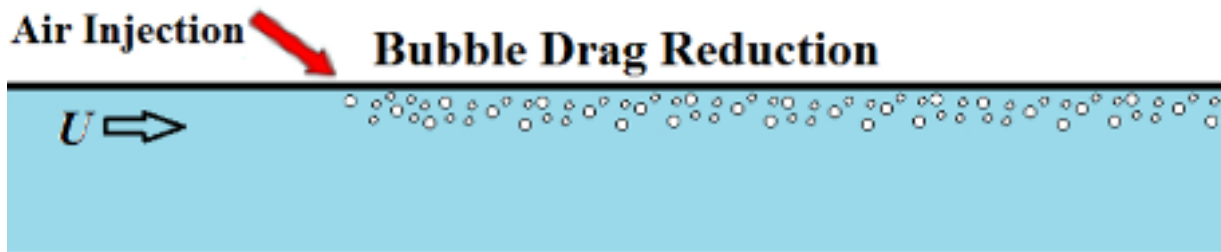
ratio van 0,39. Dit schip zal dus een zeer grote wrijvingsweerstand hebben. Door de wrijving te verminderen kan het brandstofverbruik van dit schip ook stevig dalen. De wrijvingsweerstand is grotendeels afhankelijk van het onderwateroppervlak van het schip ook wel *Wetted Surface Area* (WSA) genoemd. Door dit oppervlak te verkleinen zal de weestand bijgevolg ook verkleinen. Dit is wat het Air Lubrication System doet doordat het een luchtlaag maakt onder de romp. Hierdoor, zal het contactoppervlak van water met het schip kleiner worden. Dit wil zeggen dat de WSA kleiner is, wat resulteert in een vermindering van de wrijving. (ABS, 2019)(USNA, 2020)

1.2 Soorten Air Lubrication Systems (ALS)

Doorheen de jaren zijn er vier verschillende categorieën ontwikkeld die gebruik maken van Air Lubrication. Deze vier systemen zijn: *Bubble Drag Reduction* (BDR), *Air Layer Drag Reduction* (ALDR), *Partial Cavity Drag Reduction* (PCDR) en het AIRCOAT systeem. Deze technieken hebben vooral effect op de wrijvingsweerstand, dewelke in een later hoofdstuk (Weerstandsbeperving) grondig besproken wordt.

1.2.1 Bubbles Drag Reduction

De eerste vorm van Air Lubrication injecteert lucht in het aangrenzende water onderaan de bodem van het schip. De injectie gebeurt meestal via een geperforeerde plaat, poreus materiaal of via een gleuf. Hierdoor wordt de lucht onder de romp in kleine bubbels gesplitst. Onderaan de romp wordt het omliggende water vervolgens met de bubbels gemixt waardoor de dichtheid van het water vermindert. Hierdoor ondervindt het schip minder weerstand en glijdt het gemakkelijker door het water. (S. A. Mäkiharju, Perlin, & Ceccio, 2012)

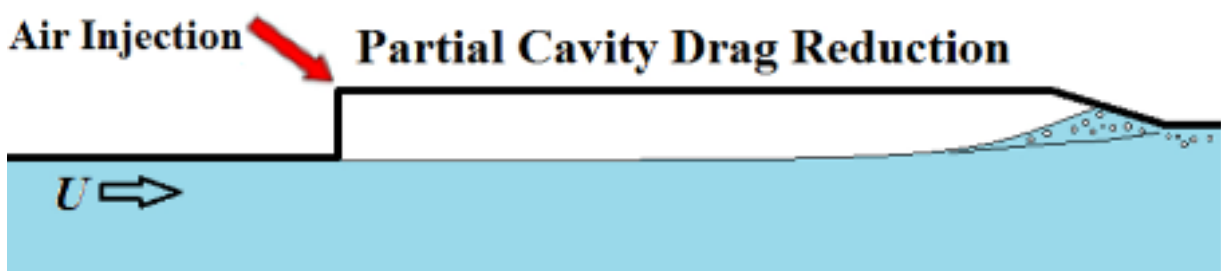


Figuur 1 De werking van *Bubble Drag Reduction*

(Makiharju, Perlin, & Ceccio, 2012)

1.2.2 Partial Cavity Drag Reduction

Deze vorm van ALS maakt gebruik van een holte onderaan de bodem van het schip. In deze holte wordt lucht geïnjecteerd zodat het een scheiding vormt tussen het water en de scheepsromp. Door deze methode verkleint het contactoppervlak tussen de kiel en het water, wat uiteindelijk resulteert in een kleinere weerstand die op het schip werkt. Met een goed ontworpen PCDR systeem en met de juiste scheepssnelheid is er quasi geen verlies van lucht. De luchtstroom is bij dit systeem van uiterste belang: zowel om de luchtholtes te vullen als deze te onderhouden van de juiste hoeveelheid lucht waardoor de kamer gevuld blijft. Als deze goed is onderhouden kan dit resulteren in een belangrijke reductie van de wrijvingsweerstand omdat een groot deel van de WSA verkleint. (ABS, 2019) (S. A. Mäkiharju e.a., 2012)

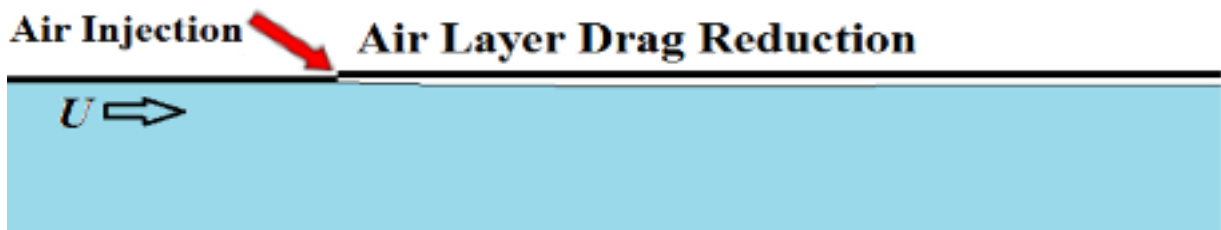


Figuur 2 De werking van *Partial Cavity Drag Reduction*

(Makiharju, Perlin, & Ceccio, 2012)

1.2.3 Air Layer Drag Reduction

De derde techniek vermindert de wrijvingsweerstand van het schip door onder een platte scheepsbodem een continue luchtlaag te injecteren. Deze lucht wordt niet zoals bij het PCDR systeem in een holte gespoten maar zoals bij het BDR systeem onderaan de romp geïnjecteerd. Als men de lucht hard genoeg laat stromen kan deze luchtlaag een goede ononderbroken laag vormen wat zorgt voor een grote scheiding tussen de scheepshuid en het vaarwater. Bij vorming van een stabiele luchtlaag kan een aanzienlijke weerstandsvermindering optreden. Om dit systeem toe te passen zijn er niet veel modificaties aan het schip nodig wat een groot voordeel biedt tegenover het PCDR systeem. (ABS, 2019) (Ceccio, Perlin, & Elbing, 2010)

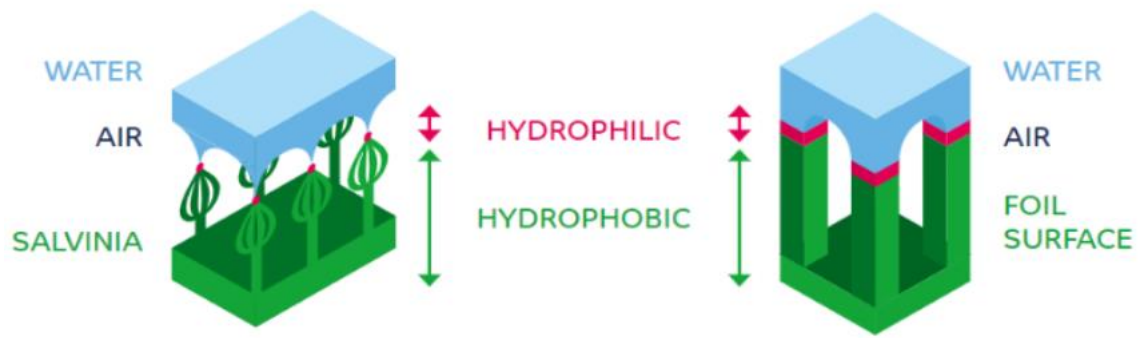


Figuur 3 De werking van Air Layer Drag Reduction

(Makiharju, Perlin, & Ceccio, 2012)

1.2.4 AIRCOAT

AIRCOAT staat voor '*AIR-induced friction reducing ship COATING*'. De ontwikkeling van deze technologie is onderdeel van het EU project Horizon 2020. Deze passieve Air Lubrication techniek is gebaseerd op het biologische fenomeen: het 'Salvinia effect'. Wanneer een Salvinia plant ondergedompeld wordt in water zal het een permanente luchtlaag behouden. AIRCOAT wil aan de hand van deze biomimetica techniek, dit specifiek effect nabootsen. (TRIMIS, 2018)



Figuur 4 Het AIRCOAT concept

(TRIMIS, 2018)

1.3 Vergelijking van de verschillende systemen

De scheepsindustrie erkent de mogelijkheden die het Air Lubrication System kan bieden voor de ontwikkeling van de toekomstige generatie van duurzame schepen. Echter, bestaat er geen universele oplossing want de keuze van de systemen is afhankelijk van de specificaties. Doorheen verschillende decennia is het Zweedse onderzoeksbedrijf SSPA betrokken geweest bij meerdere onderzoeken en testen met betrekking op de verschillende Air Lubrication systemen. Aan de hand van hun kennis hebben ze een vergelijking opgesteld van de drie systemen: *air film*, *air cavity* en *microbubbles*. Het AIRCOAT project wordt hier nog niet bij betrokken aangezien dit nog in ontwikkeling is. (Shiri & Wikander, 2018)

Het originele Air Lubrication System was aan de hand van de *air film* methode. Door het injecteren van een dunne luchtlaag tussen de scheepsromp en het water zal de WSA verkleinen. Deze methode is zeer effectief in het verminderen van weerstand. Deze efficiëntie gaat wel verloren wanneer een schip zich verplaatst met een hoge snelheid terwijl de luchtstroom nog laag is. Er zijn niet veel scheepsaanpassing nodig maar mogelijk wordt de romp aangepast om zo de luchtlaag beter onder het schip te kunnen behouden. De voordelen van deze methode zijn dat het zeer effectief is in het verminderen van weerstand en het biedt de mogelijkheid om op bestaande schepen geïnstalleerd te worden. De *air film* methode heeft weinig effect op het manoeuvreren van het schip. Het systeem is

alleen effectief binnen een beperkte snelheidslimiet aangezien deze bij hogere snelheden meer luchttoevoer nodig heeft wat meer energie vraagt. Bij een te lage snelheid zal deze luchtlaag niet tegen de romp stromen. Andere nadelen zijn dat het een aanzienlijke luchtstroom nodig heeft voor het onderhouden van de luchtlaag en dat het systeem enkel efficiënt werkt op een plat horizontaal stuk van de scheepsromp. Een horizontale, vlakke scheepsbodem is beter om de luchtlaag onderaan het schip te houden. Soms wordt de scheepsromp aangepast met groeven of bepaalde geleiders voor een betere controle van de luchtstroom. Het toevoegen van deze aanhangsels op de scheepsromp kan echter zorgen voor een verhoging van de weerstand, waardoor deels het voordeel van de luchtlaag wordt tegengewerkt. (Shiri & Wikander, 2018)

De *air cavity* methode vult een afgesloten gedeelte in de romp met lucht. Afhankelijk van de grootte van deze holte(s) wordt de *Wet Surface Area* stevig verkleint, waardoor dit systeem zeer efficiënt kan zijn. Een goed werkend *air cavity* systeem kan voor een totale weerstandsvermindering van 40% zorgen. Maar het onderhouden van de lucht in deze holtes vormt een groot probleem voor schepen met een lange romp die aan een lagere snelheid varen. In deze situatie kunnen golfsystemen in de holtes ontstaan wat resulteert in een slechte stabiliteit en effectiviteit. Een voordeel van deze methode is dat er geen limiet is op de lengte van de holte, waardoor de WSA beperkt kan blijven. Bij kalme wateren zal dit systeem geen sterke luchtstroom nodig hebben om de holte te onderhouden met lucht, wat ook voordelig is. De grote nadelen van dit systeem zijn: het verlies van effectiviteit bij hoge golven en het is niet mogelijk om dit systeem toe te passen op bestaande schepen. Daarom is dit systeem niet een veel voorkomende keuze in de maritieme sector. (Shiri & Wikander, 2018)

De laatste methode is ook de populairste: *microbubbles*. Deze methode werd al reeds geïnstalleerd op verschillende schepen aangezien dit snel kan gebeuren in een droogdok. De installatie is niet zoals het bij het *air cavity* systeem alleen mogelijk bij nieuwbouwschepen. De

weerstandsvmindering van deze methode is het gevolg van een lucht en water mix, die ontstaat door bubbelvorming. Aangezien deze bubbels snel stijgen naar het wateroppervlak, is het een uitdaging om deze bubbels dicht bij de scheepsromp te houden, wat een nadeel is. Het systeem is alleen effectief binnen een bepaalde snelheidslimiet. Deze limiet varieert van schip tot schip. Het grote voordeel is dat er een mogelijkheid bestaat om bestaande scheepsrompen achteraf aan te passen naar dit systeem. Deze methode heeft weinig of geen effect op de manoeuvreercharacteristieken van het schip. (Shiri & Wikander, 2018)

1.4 Huidige cijfers

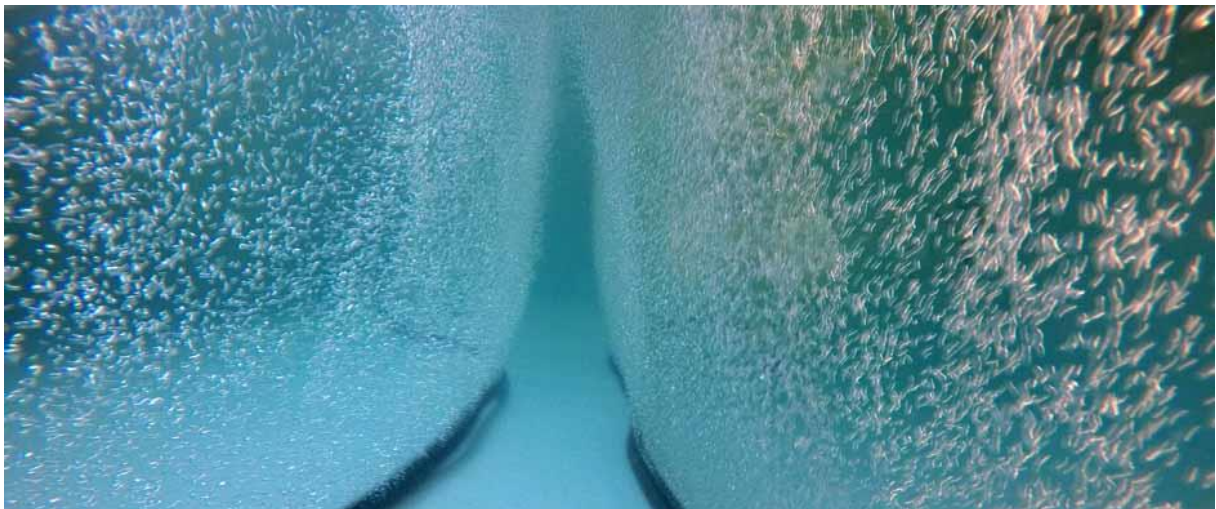
Vandaag de dag werken verschillende bedrijven aan de ontwikkeling van zowel *Partial Cavity Drag Reduction* (PCDR) technologie, als *Bubble Drag Reduction* (BDR) technologie. Het Nederlandse bedrijf DAMEN heeft zo bijvoorbeeld haar eigen PCDR systeem: *Air Chamber Energy Saving* (ACES). Het merendeel van de bedrijven richt zich echter op het BDR systeem. Zo heeft R&D Engineering het '*Winged Air Induction Pipe System* (WAIP)' en *Samsung Heavy Industries* haar eigen 'SAVER' systeem. Bovendien, zijn er nog heel wat andere ondernemingen zeer actief bezig met de ontwikkeling van deze technologie het implementeren ervan op schepen: *Mitsubishi Heavy Industries* met '*Mitsubishi Air Lubrication* (MAL)', *Foreship Air Lubrication System* en *Silverstream System*. (ABS, 2019)

In 2018 waren er 23 schepen waarbij het Air Lubrication System aan boord werd geïnstalleerd. Het betreft een verzameling van verschillende soorten schepen: ferry's, bulk carriers, een chemische tanker, een LNG carrier, een containerschip, cruise schepen, e.a. Ook de dimensies van de schepen variëren met scheepslengtes van 60 tot 350 meter. De MSC Gülsün, een containerschip met een lengte van 399,9 meter en een draagcapaciteit van 23.756 TEU, zal mogelijk uitgerust worden met een Air Lubrication System. In 2018 zijn bovendien bij het bedrijf Silverstream twaalf RoRo schepen besteld. (ABS, 2019) (Savvides, 2018)

1.5 *Air bubbles* voor andere doeleinden

1.5.1 *Bubble barrier*

Het creëren van een luchtbelgordijn kan voor bescherming van het lokale maritieme milieu en zeedieren zorgen maar het heeft ook andere functies. Een gordijn van bubbels heeft verschillende eigenschappen die gebruikt kunnen worden. Zowel geluid als trillingen worden gedempt door deze bubbels. Dit effect werd in de tweede wereldoorlog al bestudeerd om geluidsgolven te blokkeren afkomstig van onderzeeërs. De efficiëntie van de '*bubble barriers*' zijn afhankelijk van de bubbelgrootte, het geïnjecteerde luchtvolume, de afstand tussen de bubbels en de golffrequentie. Om de maximale efficiëntie uit dit systeem te halen worden soms twee of drie gordijnen naast elkaar geplaatst. Zo zal elke rij de totale impact reduceren. (Canadianpond, 2019)



Figuur 5 Een *bubble curtain*

(Canadianpond, 2019)

De '*bubble curtains*' worden onder andere gebruikt voor het dempen van geluid en trillingen bij mijnwerken, het boren naar aardolie, bouwen van maritieme structuren, militaire activiteiten en seismisch onderzoek. De trillingen en de onderwaterdruk die door deze werken ontstaan kunnen schade aanrichten bij vissen en zeezoogdieren. Walvissen en sommige andere zeezoogdieren communiceren immers via geluidsgolven, deze

communicatie kan dus verstoord worden door andere golven. Bubbelgordijnen zorgen voor een goede geluidsbescherming door het dichtheidsverschil tussen lucht en water. (Canadianpond, 2019)



Figuur 6 Het bovenaanzicht van een *bubble barrier*

(Canadianpond, 2019)

Bij het boren naar olie kan het gebeuren dat er olie ontsnapt en vrijkomt. Op die momenten is het belangrijk om er alles aan te doen om de verspreiding tegen te houden. In kalme wateren, kan een bubbelgordijn olieplekken ter plaatse houden en op die manier kustlijnen, havens en het maritieme milieu beschermen. (Canadianpond, 2019)

Een ander gebruik van dit systeem is het begeleiden van vissen in waterwegen, zoals rivieren. In sommige gebieden is er een uitdrukkelijke vraag naar het behouden en de bescherming van het zeeleven tegen gevaarlijke omgevingen en negatieve invloeden. Het kan evengoed gebruikt worden om kusten vrij te houden van algen, zeewier en kwallen. (Canadianpond, 2019)

1.5.2 Baggeren

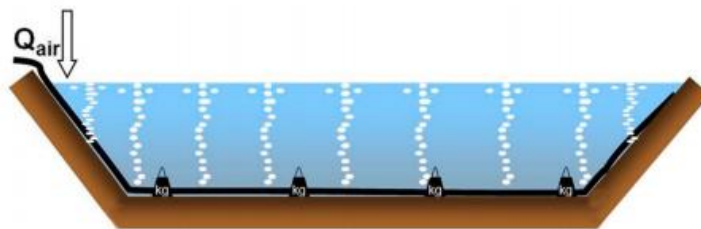
Bij alle sectoren van de scheepvaart is het belangrijk om de impact op het milieu te minimaliseren, dit geldt dus ook voor de baggersector. Luchtbubbels kunnen ook hierbij van pas komen, deze bubbels kunnen een barrière vormen om zo de verspreiding van sedimenten tegen te gaan. (Boskalis, 2012)



Figuur 7 Een sedimenten barrière

(Boskalis, 2012)

Een luchtbubbelscherm kan aan de ingang van een stortplaats voor baggerschepen geïnstalleerd worden. (zie Figuur 7) Dit scherm ontstaat doordat lucht door een geperforeerde tube wordt gepompt. Het voordeel van een luchtbubbelscherm tegenover een vast slibscherm is voornamelijk dat schepen ongestoord door dit scherm kunnen varen. Het systeem is zowel makkelijk te onderhouden als te installeren. Door de luchtstroom aan te passen kan de efficiëntie van het systeem geregeld worden. (Boskalis, 2012)



Figuur 8 De werking van een luchtbubbelscherm

(Boskalis, 2012)

1.5.3 Voorkomen van orkaanvorming

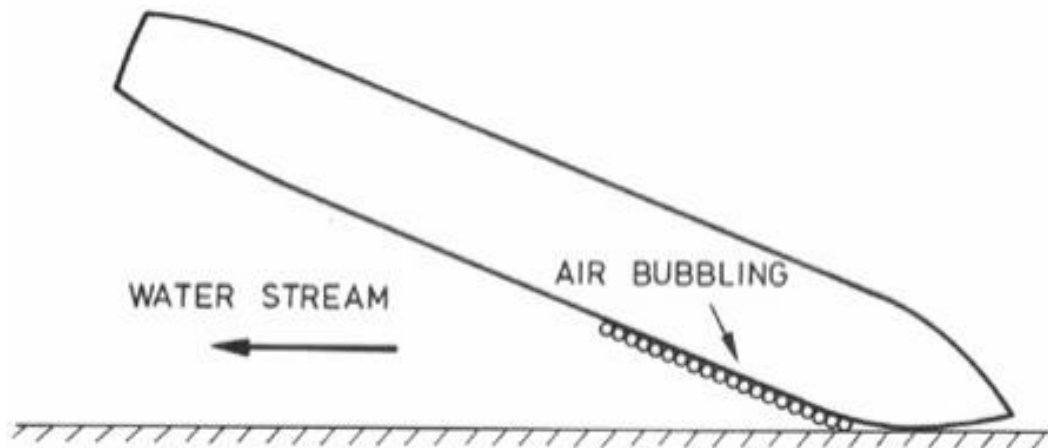
Orkanen zorgen jaarlijks voor immense schade en het verlies van mensenlevens. Wereldwijd wordt er gezocht naar manieren om dit fenomeen tegen te gaan. Noorse onderzoekers geloven dat koude bubbels hier de oplossing voor kunnen zijn. Er zijn namelijk drie vereisten nodig voordat een orkaan kan ontstaan. De bovenlucht moet kouder zijn dan de luchtlaag boven het water. Hierdoor zal de warme lucht kunnen stijgen doordat de atmosfeer onstabiel is. De corioliskracht moet duidelijk aanwezig zijn zodat er circulatie is en een lagedrukgebied ontstaat. Rond de evenaar zal een orkaan dus niet kunnen ontstaan. De derde voorwaarde is dat de temperatuur van het zeewater minstens 26.5 °C moet zijn. Door één van deze voorwaarden weg te nemen zal er geen orkaan kunnen ontstaan. Onderzoekers bij het Noorse onderzoeksbedrijf SINTEF (*Stiftelsen for industriell og teknisk forskning*) geloven dat koude bubbels de temperatuur van het water kunnen laten zakken onder de 26.5 °C welke één van de vereisten is voor orkaanvorming. (Klaassen, 2020) (SINTEF, 2018)

Het idee bestaat erin om een geperforeerde tube diep in het water te laten zakken. In deze tube, laat men perslucht stromen waardoor de luchtbubbels zullen stijgen naar het wateroppervlakte. Het koude water afkomstig van grotere diepte zal meestijgen met deze bubbels. Op deze manier zal de warmere oppervlaktetemperatuur afkoelen. (SINTEF, 2018)

1.5.4 Wrijving met ijs

De vraag naar energie efficiëntie steeg in de jaren 60. Zo werd in deze periode 'Air bubbling' ontwikkeld door *Wärtsilä Icebreaking Model Basin* met als doel de wrijving te verkleinen tussen de scheepsromp en het omliggende ijs. Het elementaire verschil met Air Lubrication die wordt gebruikt voor schepen in open water is dat bij ijsbrekers de bubbels aan de zijkant van de romp worden geproduceerd en niet aan de onderkant. Doordat deze bubbels aan de zijkant van de romp stijgen zal er een barrière ontstaan aan het wateroppervlak tussen de romp en het ijs. Eveneens bij het

manoeuvreren aan de kade kan deze technologie helpen doordat de luchtbubbels het ijs tussen het schip en de kade wegduwen. Zo zal het makkelijker zijn om een schip in ijscondities af te meren aan de kade. (Aker Arctic, 2020)



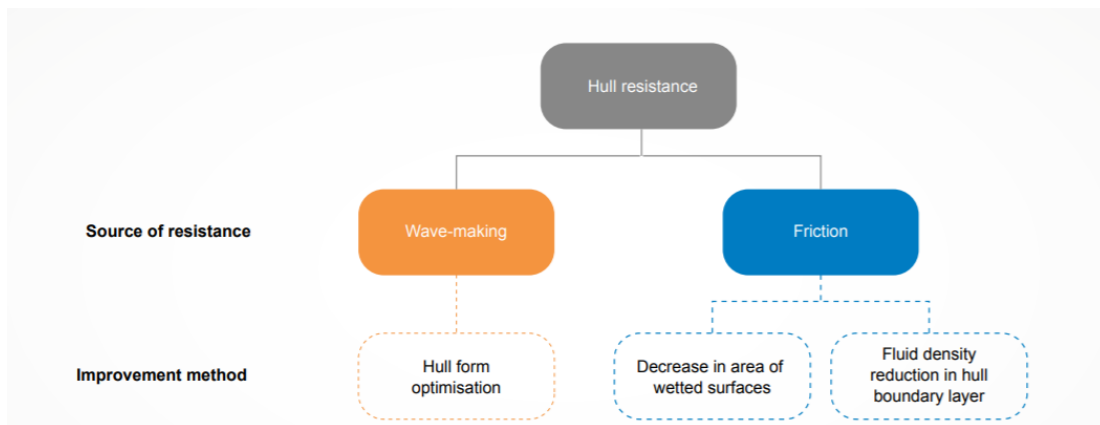
Figuur 9 Manoeuvreren in ijscondities met luchtbubbels

(Aker Arctic, 2020)

In de periode van 1970 tot 1980 was dit een populair systeem bij ijsbrekers. Het werd op verschillende Finse, Russische en Canadese ijsbrekers geïnstalleerd. Door de komst van de azimuthale schroef was er veel minder interesse in het luchtbubbelsysteem. Deze schroef kon namelijk een gelijkaardig effect creëren aan de hand van '*propeller wash*'. Tegenwoordig wordt het systeem terug geïnstalleerd aan boord van schepen als reserve hulpmiddel. (Aker Arctic, 2020)

2 Weerstandsbeperving

De methode die het Air Lubrication System gebruikt om de uitstoot te verminderen is weerstandsbeperking van het schip. Wanneer een schip vaart maakt in het water kan men twee duidelijke karakteristieken herkennen door de stroming te observeren. Rond het schip worden golven gevormd die samen met het schip bewegen. Achter het schip vormt zich dan weer een turbulent golfspoor (*wake*). Deze golven absorberen energie van de romp en vormen dus een weerstand. Die weerstand wordt op de romp overgebracht door schuifkrachten, dewelke veroorzaakt worden door zowel de druk als de viscositeit van het water. Krachten die hierdoor worden opgewekt kunnen op twee manieren op het schip werken: loodrecht (*normal forces*) of evenwijdig met de romp (*tangential forces*). De loodrechte krachten ontstaan door de statische en dynamische druk van het omliggende water terwijl de evenwijdige krachten worden veroorzaakt door wrijving met de scheepsromp. Deze wrijving is een schuifkracht en wordt opgewekt door het viscose water langs het schip. Door deze krachten te minimaliseren zal ook de weerstand uiteindelijk verminderen met als gevolg dat er minder energie nodig is voor de voortstuwing van het schip. Voor elk soort weerstand is er een methode om deze te verminderen. (figuur 10) Indien men de golfweerstand wil doen afnemen, zal men de vorm van het schip moeten aanpassen. Om de wrijving te verminderen bestaan twee opties: het onderwateroppervlak (WSA) verminderen of een reductie van de vloeistofdichtheid in de grenslaag rond de romp. Het Air Lubrication System vermindert zowel het contactoppervlak met het water (WSA) als de dichtheid van de grenslaag waardoor het dus een zeer doeltreffende techniek is. (Molland, Turnock, & Hudson, 2011)



Figuur 10 Oorzaken van rompweerstand

(Eliasson, 2018)

2.1 Totale weerstand

Om de totale weerstand te berekenen moet er rekening gehouden worden met een verdeling van de verschillende weerstanden. Deze kunnen onderverdeeld worden in verschillende componenten, die samen één geheel vormen. Het geheel kan bekomen worden door vier factoren te analyseren. Deze factoren zijn: wrijvingsweerstand, drukweerstand, totale viscose druk weerstand en de totale golfweerstand. Dit zijn telkens evenwijdige of loodrechte krachten die werken op de romp van het schip. Deze krachten zijn afkomstig van de viscositeit van het water of van de golven, die ontstaan door de beweging van het schip. Door al deze krachten te meten en te analyseren kan de totale weerstand berekend worden. (Molland e.a., 2011) (USNA, 2020)

2.1.1 Wrijvingsweerstand

Deze weerstand is afkomstig van schuifkrachten die evenwijdig lopen met de romp. Wanneer een schip vaart maakt door het water zal deze vloeistof, die zich volledig rond het schip bevindt, wrijving creëren. Deze wrijving resulteert in een kracht in de tegenovergestelde richting van de beweging van het schip. De wrijvingsweerstand is daardoor afhankelijk van de viscositeit van het water, de ruwheid van het scheepsoppervlak en van het onderwateroppervlak. Het belangrijkste aspect hiervan is de viscositeit,

aangezien deze de stroomweerstand van het fluïdum vertegenwoordigt. De viscositeit van een vloeistof is afhankelijk van de temperatuur. Als deze hoog is, zal men een lagere viscositeit verkrijgen. Hoe dieper een schip in het water gelegen is, hoe kouder de temperatuur van het water zal zijn en hoe hoger de viscositeit, waardoor men vervolgens meer wrijving zal ondervinden. De viscositeit wordt soms ook de stroperigheid van een vloeistof genoemd. Ondanks dat water vloeibaar is en daarom een relatief lage viscositeit heeft zal er aan de scheepwand veel weerstand worden geproduceerd. Bij lage snelheden kan de wrijvingsweerstand bij schepen oplopen tot 85% van de totale weerstand, terwijl dit bij hoge snelheden tot 40-50% van de totale weerstand kan bijdragen. (USNA, 2020) (Molland e.a., 2011) (Ensie, 2016)

2.1.2 Drukweerstand

Een schip ondervindt, door druk veroorzaakt, op vele plaatsen een kracht die loodrecht op het schip werkt. Al deze krachten opgeteld vormen de totale druk. Deze weerstand ontstaat, net zoals bij wrijvingsweerstand, zowel door de viscositeit van de vloeistof als door de golfvorming rond het schip. De drukweerstand kan worden onderverdeeld in de viscose drukweerstand en golfweerstand. Als men de drukweerstand combineert met de wrijvingsweerstand bekomt men de totale weerstand van het schip. (Molland e.a., 2011)

2.1.3 Viscose drukweerstand

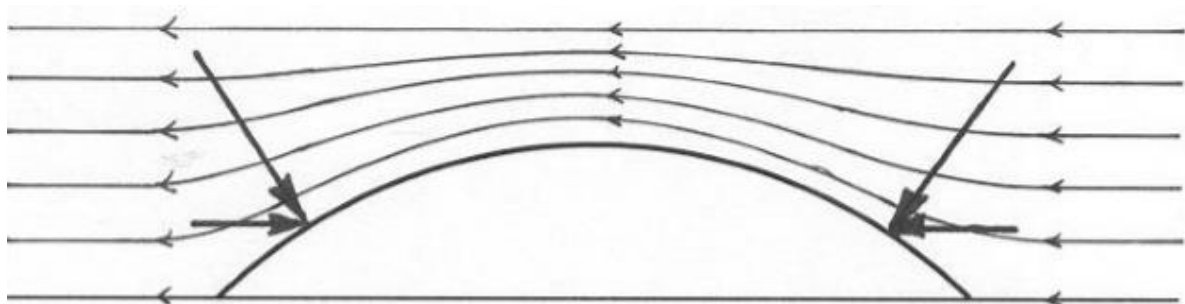
Wanneer een lichaam zich in een ideale vloeistof¹ bevindt, zal er rond dit lichaam een stroming ontstaan. De eigenschappen van een ideale vloeistof zijn dat er in dit fluïdum geen warmteoverdracht, schuifspanningen en viscositeit bestaat. Er zal hierdoor geen inwendige wrijving ontstaan. Dit wil zeggen dat er zich rond het lichaam een gelijke stroming bevindt zonder

¹ Een ideale vloeistof is onsamendrukbaar en niet viscoos. Het is echter onbestaande en wordt gebruikt om een theoretisch probleem op te lossen of makkelijker te maken. (Dourmashkin, 2020)

storingen. Op dit lichaam ontstaan er ook drukkrachten die hier loodrecht op inwerken. Vooraan op het lichaam zal er een drukkracht tot stand komen die tegen de voorwaartse beweging van het schip inwerkt. Achteraan het schip zal er eveneens een drukkracht werken die de voorwaartse beweging van het schip ondersteunt. Deze krachten zijn even groot en zullen dus een resultante hebben die gelijk is aan nul waardoor er geen weerstand ontstaat. Overal rond het lichaam bevinden zich drukkrachten evenals een symmetrische tegenwerkende kracht, waardoor het lichaam in het algemeen geen weerstand ondervindt. Wanneer een lichaam in een vloeistof vooruit beweegt zal er rond het lichaam een drukverschil ontstaan. Bij een lichaam met een spitse voor- en achterkant en een breed middenstuk, zoals in Figuur 11, zal vooraan het lichaam de druk vergroten aangezien de vloeistof hier opstapelt. Aan de zijkant van het schip zal vervolgens een snelle stroming ontstaan waardoor er een daling in druk ontstaat. Deze druk wordt terug groter aan het uiteinde van dit lichaam. Dit verschijnsel komt uit de wet van Bernoulli, volgens de formule:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + pgh = \text{constante}$$

met p de druk, v snelheid, g de valversnelling, h het hoogteverschil en ρ de dichtheid. Hieruit kan men afleiden dat een lagere druk resulteert in een hogere snelheid en vice versa. (USNA, 2020)

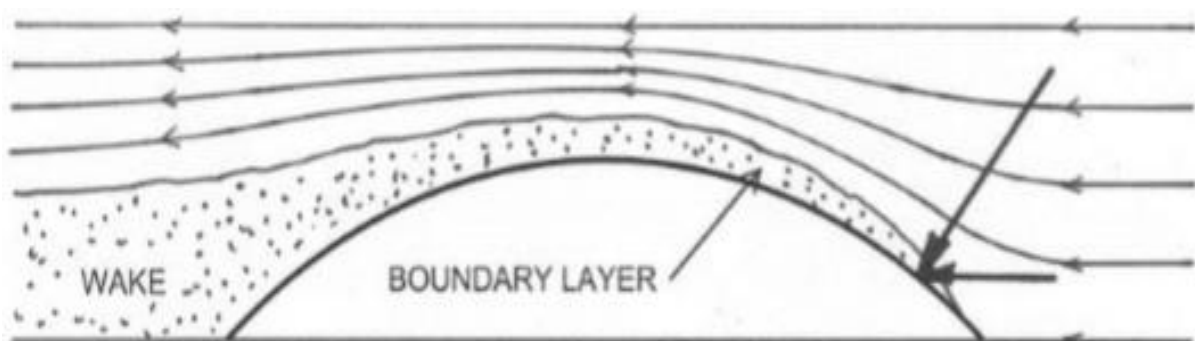


Figuur 11 Een lichaam in een ideale vloeistof dat zich voorwaarts verplaatst

(USNA, 2020)

Water is echter geen ideale vloeistof waardoor een lichaam in water wel weerstand zal ondervinden. Wanneer een lichaam in water beweegt, zullen vloeistofdeeltjes zich hieraan vastklemmen. Het gevolg hiervan is dat er

rondom het lichaam een grenslaag van vloeistof gevormd wordt. Er ontstaat een groot verschil in snelheid bij de stroming van deze grenslaag. De stroming vlak tegen het lichaam zal een andere snelheid ondervinden tegenover de stroming aan het uiteinde van de gevormde grenslaag. Bij de stroming tegen het lichaam bewegen de vloeistofdeeltjes aan eenzelfde snelheid van dit bepaalde lichaam. Terwijl aan het uiteinde van de grenslaag de snelheid van de omliggende vloeistofstroming wordt behaald. Dit resulteert vervolgens in een hogere turbulente stroming rond het lichaam. Net zoals in de ideale vloeistof zal er vooraan het lichaam loodrecht een drukkracht werken. Door de turbulente regio achteraan het lichaam zal de tegengestelde kracht echter niet even groot zijn, want de druk zal hier niet kunnen hervormen tot dezelfde waarde als die aan de voorkant. Hierdoor zal deze kracht niet groot genoeg zijn om de druk die vooraan inwerkt volledig tegen te gaan, waardoor er een weerstand ontstaat door de druk op het lichaam. Deze weerstand is de 'viscose drukweerstand' en wordt ook wel eens 'vormweerstand' genoemd. Schepen met een kleine lengte/breedte ratio zullen een grotere vormweerstand ondervinden tegenover schepen met een kleinere breedte. Ook schepen met een spitsere boeg hebben minder last van de viscose drukweerstand. Doordat de kracht loodrecht werkt, zal een scherpere vorm minder effect ondervinden van deze weerstand tegenover een schip met een zeer brede vlakke neus, dewelke zeer veel weerstand zal creëren. (USNA, 2020)



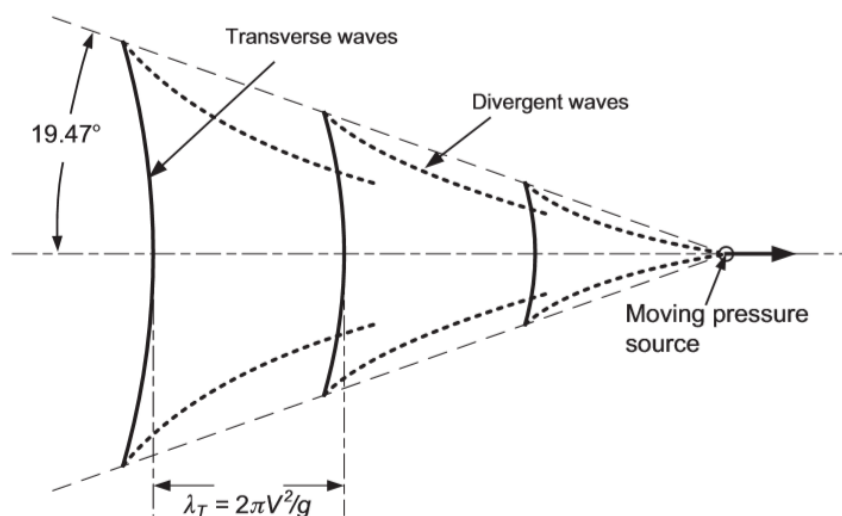
Figuur 12 Een lichaam dat een viscose drukweerstand ondervindt. Er ontstaat een grenslaag (*boundary layer*) die achteraan omvormt in een turbulente regio (*wake*).

(USNA, 2020)

2.1.4 Golfweerstand

Een schip in beweging zal golven genereren. De creatie van deze golven vraagt veel energie. Het vereist meer energie om hoge golven dan lage golven te maken. Dit heeft bijgevolg invloed op de snelheid van het schip. Een snel varend schip zal grote golven creëren terwijl een traag schip gepaard gaat met eerder kleine golven. De energie die naar de ontwikkeling van de golven gaat, kan bijgevolg niet worden gebruikt voor de voortstuwing van het schip. Deze wordt beschouwd als de golfweerstand. Dit zorgt vaak voor een limiterende factor van de snelheid van een schip, aangezien bij een grotere snelheid meer weerstand zal ontstaan. (Molland e.a., 2011) (USNA, 2020)

Door de beweging van een schip ontstaan twee soorten golven; golven die uitlopen naar de buitenkant van het schip (Kelvin golven of divergerende golven) en transversale golven. (zie Figuur 13) Een golfsysteem bestaat uit deze twee soorten golven en dit systeem ontstaat zowel aan de boeg als aan de achtersteven van een schip. Deze twee golfsystemen reageren met elkaar waardoor de golfweerstand vermindert of toeneemt. Bij een constructieve interferentie zal het golfsysteem vooraan de achterste golven vergroten met een hogere weerstand tot gevolg. Het tegenovergestelde fenomeen, waarbij golven elkaar dempen, wordt een destructieve interferentie genoemd. (USNA, 2020) (Molland e.a., 2011)



Figuur 13 Divergerende en transversale golven

(Molland, Turnock, & Hudson, 2011)

Aan transversale golven gaat de meeste energie verloren. De golflengte van de transversale golven is recht evenredig met de snelheid van het schip en kan worden benaderd met de formule: $\lambda = \frac{2\pi V^2}{g}$ waarbij λ gelijk is aan de golflengte, V de snelheid van het schip en g de valversnelling is. Een lage snelheid gaat gepaard met een kleine golflengte wat wil zeggen dat er zich veel golftoppen langs de scheepsromp bevinden. Er zullen bijgevolg minder golftoppen langs het schip verschijnen bij een hoge snelheid. Bij sommige snelheden resulteert de golfvorming aan de neus in een golftop of golfdal aan het achterschip, waardoor dit het achterste golfsysteem kan versterken of verzwakken. Dit resulteert dan weer in een grotere of kleinere weerstand. Wanneer het voorste golfsysteem een golf opwekt die resulteert in een top aan het achterschip, zal dit het achterste golfsysteem dempen waardoor het schip minder weerstand zal ondervinden. (Molland e.a., 2011) (USNA, 2020)

Bij een snelheid/lengte ratio van 1,34 is de golflengte gelijk aan de lengte van het schip en bereikt men de 'rompsnelheid'. De rompsnelheid wordt beschouwd als de limietsnelheid die efficiënt is. Bij een hogere snelheid zal de golfweerstand die op het schip werkt sterk vergroten. Net boven deze snelheid zakt de achtersteven van het schip in een groot golfdal, waardoor het zal varen onder een grote trimhoek. De neus van het schip zal ver boven water komen waardoor het besturen van het schip zeer inefficiënt wordt. Als men de snelheid weer kan verhogen kan men uit deze trimsituatie geraken waardoor het schip weer bestuurbaar wordt. Dit zal ook de golfweerstand dempen. Echter hebben schepen zelden genoeg vermogen om hoog boven de rompsnelheid te kunnen varen. (Molland e.a., 2011) (USNA, 2020)

2.2 Berekeningsproces

Het meten van weerstand is zeer belangrijk voor technologische systemen zoals Air Lubrication. Om dergelijke metingen te bekomen worden dit soort testen telkens uitgevoerd met een scheepsmodel. Dit model moet gelijkende karakteristieken hebben met het schip waarvan men resultaten wilt verkrijgen. Deze modeltesten worden berekend in een sleeptank. Het internationaal orgaan ITTC (*International Towing Tank Convention*) heeft hiervoor vaste procedures die men kan volgen om met metingen van een scheepsmodel de totaal weerstand van een schip op ware grootte te bekomen. Voor deze formules zijn de dimensieloze getallen van Froude en Reynolds zeer belangrijk. (ITTC, 2002)

2.2.1 Het getal van Froude

Dit getal is essentieel voor het bestuderen van hydrodynamica en de beweging van vloeistoffen. Aangezien de weerstand van een schip afhankelijk is van het gedrag van het omliggende water is dit ook voor de berekeningen hiervan een belangrijk aspect. Het getal van Froude is een dimensieloos getal dat de verhouding tussen de inertiekrachten en de zwaartekracht representeert. In deze formule staat V voor de snelheid van het schip, g voor de zwaartekracht en L_{pp} voor de lengte van het schip tussen de loodlijnen.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL_{pp}}} = \frac{\text{inertiekrachten}}{\text{gravitatiekrachten}}$$

De waarde van Fr zegt veel over de verdeling van krachten die werken op een bepaald moment. Zo weet men bij een groot getal van Froude dat de inertiekracht de gravitatiekracht overheerst. De waarde van dit getal zal de gang van het water in één van de drie categorieën plaatsen: sub-kritische stroming, kritische stroming en superkritische stroming. Bij een kritische stroming is het getal van Froude gelijk aan één, dit wil zeggen dat de stroming van het water gelijk is aan die van de oppervlakte golven. Oppervlakte golven ontstaan door een storing in het water waardoor er

energie wordt uitgewisseld. Bij een kritische stroming is er een perfecte balans tussen de gravitatiekrachten en de inertiekrachten. Een sub-kritische stroming gaat gepaard met een waarde die kleiner is dan één. Dit betekent: een trage stroming en een kleine energieoverdracht. De derde categorie, de superkritische stroming, vindt plaats als het getal van Froude groter is dan één. Deze overheersende inertiekracht zorgt voor een snelle stroming in combinatie met veel energie. Dit zal plaatsvinden wanneer het schip in ondiepere wateren vaart waardoor deze krachten vergroten. (Gregersen, 1998) (Chanson, 2004) (Rapp, 2017)

2.2.2 Getal van Reynolds

Dit getal is net zoals het getal van Froude zeer belangrijk als men gaat kijken naar de stroming van het water. Het zegt veel over de staat van de stroming en of deze dus laminair of eerder turbulent verloopt. Het getal van Reynolds vertegenwoordigt de relatie tussen de inertiekracht en de krachten opgewekt door de viscositeit. Dit zegt veel over de beweging van een vloeistof en de kleine deeltjes die zich hierin voortbewegen. Zeer kleine deeltjes zullen een klein getal van Reynolds hebben aangezien deze een kleine inertiekracht hebben waardoor ze vooral beïnvloed zijn door de viscositeit. Een object met een groot getal van Reynolds, zoals een schip, zal genoeg kracht hebben om tegen de stroom in te werken.

$$Re = \frac{V \cdot L_{pp}}{v} = \frac{\text{inertiekrachten}}{\text{viscositeitskrachten}}$$

V representeert hier de snelheid van het schip, L_{pp} de lengte van het schip tussen de loodlijnen en v de viscositeit van de vloeistof. Wanneer het getal van Reynolds een waarde heeft die kleiner is dan 2000 zal dit gepaard gaan met een laminaire of stabiele stroming. De viscositeit van het fluïdum zal deze stroming stabiliseren doordat het een grote versnelling in de vloeistof voorkomt met als gevolg dat deze stroming stabiel blijft. De viscose krachten zullen de inertiekracht bijgevolg domineren. Bij waarden groter dan 2000 zal er turbulentie ontstaan in de stroming. De waardes kunnen ver uit elkaar liggen; een mens zal ongeveer een waarde hebben van 1×10^6

terwijl een micro-organisme zoals een bacterie een waarde zal hebben rond 1×10^{-6} . Deze bacterie zal dus gewoon met de stroming meegaan terwijl een mens hier weerstand tegen kan bieden en zijn eigen richting kiezen. (Rapp, 2017) (Rogers, 1998)

2.2.3 Theoretische benadering van weerstand

Theoretisch gezien kan de totale weerstandscoefficiënt alleen afhangen van de getallen van Froude en Reynolds met $C_T = F(Re, Fr)$. Voor alle model testen moet er een schaal λ worden gekozen, deze schaal is $\lambda = \frac{L_S}{L_M}$. Voor zowel het model als het schip op ware grootte zullen het getal van Reynolds en Froude gelijk moeten zijn. Dit zorgt echter voor problemen in de berekeningen.

$$\begin{aligned} Re_M &= Re_S \\ \frac{V_M L_{ppM}}{v_M} &= \frac{V_S L_{ppS}}{v_S} \\ \mathbf{V_M} &= \mathbf{V_S \lambda} \quad \mathbf{(1)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Fr_M &= Fr_S \\ \frac{V_M}{\sqrt{g L_{ppM}}} &= \frac{V_S}{\sqrt{g L_{ppS}}} \\ \mathbf{V_M} &= \mathbf{\frac{V_S}{\sqrt{\lambda}}} \quad \mathbf{(2)} \end{aligned}$$

Zoals je kan zien bij vergelijking (1) $V_M = V_S \lambda$ en (2) $V_M = \frac{V_S}{\sqrt{\lambda}}$ zijn de voorwaarden voor de modelsnelheden verschillend. Het is onmogelijk om aan beide vereisten te voldoen. Om een juiste berekening te maken voor de totale weerstand bij een test met een modelschip, heeft het *International Towing Tank Conference* een algemene benadering opgesteld: de 'ITTC-57 methode' die later de 'ITTC-78 methode' werd. Testen in de sleeptank worden nu uitgevoerd met een model dat hetzelfde getal van Froude heeft. Het schip en het model verschillen wel van waarde voor het getal van Reynolds. Deze fout kan echter via enkele correcties aangepast worden. Een schip heeft meestal een getal van Reynolds van 10^9 terwijl een model

meestal een getal van Reynolds van 10^7 heeft. Een groter getal van Reynolds resulteert in een sterkere vorming van turbulentie, rond het schip en dit heeft een grote impact op de weerstand. Bij het modelschip zal deze turbulente regio zich meer achteraan vormen, wat het zeer moeilijk maakt om een vergelijking te maken met het echte schip. Daarom worden er artificiële turbulentie simulators op het voorschip van het model gemaakt. Soms is dit simpelweg tape met zand erop zodat dit meer storingen maakt in de omliggende stroming. Op deze manier wordt een aanzienlijk verschil in weerstand gecompenseerd. (Memorial University, z.d.) (Bertram, 2012)

2.2.4 Praktische benadering van weerstand

De weerstand wordt getest in een sleeptank met een model waarvan de romp 'naakt' is. Dit wil zeggen dat hier geen schroef of andere uitsteeksels aan hangen. De krachten die op de aanhangsels werken worden grotendeels veroorzaakt door viscose krachten en niet door zwaartekracht, waardoor de Reynolds factor wordt geschonden en de krachten niet gemakkelijk op ware grootte geschaald kunnen worden. Bij het testen van een model in een sleeptank geeft dit de weerstanden weer bij volgende condities: water op kamertemperatuur, diep vaarwater, geen zeegang en geen wind. Om de weerstand van het model om te rekenen naar de ware grootte van het schip zijn verschillende methodes mogelijk: ITTC-57, *Method of Hughes-Prohaska*, *Geosim method of Telfer* en ITTC-78. De laatste methode wordt in de praktijk het meest gebruikt: het is meer accuraat vergeleken met de andere methodes en het houdt bovendien rekening met de luchtweerstand. De ITTC-78 methode maakt ook gebruik van een vorm factor k , wat de ITTC-57 (nog) niet gebruikt. Deze factor helpt met het inschatten van viscose krachten, doordat het rekening houdt met effecten die zich voordoen op het scheepsoppervlak. Deze is ook gelijk voor het model en het schip zelf en blijft constant voor elke snelheid. (Niklas & Pruszko, 2019) (Bertram, 2012)

De totaal weerstand coëfficiënt (C_{TS}) bij de ITTC-78 methode wordt gehaald uit volgende formule:

$$c_{Ts} = (1 + k)c_{Fs} + c_w + c_A + c_{AA} + c_{Appendages}$$

Om deze formule te kunnen gebruiken moeten eerst de onbekende factoren worden berekend. Dit gebeurt aan de hand van volgend stappenplan.

1. Met de resultaten van de sleeptank kan men voor het model de totale weerstand coëfficiënt (c_{Tm}) berekenen voor elke snelheid die tijdens de test gebruikt werd:

$$c_{Tm} = \frac{R_{Tm}}{\frac{1}{2}\rho_m V_m^2 S_m}$$

met R_{Tm} de totaal gemeten weerstand van het model, ρ_m de dichtheid van het water tijdens de test, V_m de snelheid van het model en S_m het onderwateroppervlak.

2. Bereken van het model de wrijvingsweerstand coëfficiënt (c_{Fm}) voor elke snelheid zoals deze beschreven staat in ICCT-57:

$$c_{Fm} = \frac{0,075}{(\log_{10} Re_m - 2)^2}$$

3. Via de Prohoska methode kan men aan de hand van vorige twee stappen de vorm factor k berekenen:

$$\frac{c_T}{c_F} = (1 + k) + y \frac{Fr^4}{c_F}$$

4. Nu is het mogelijk om de golfweerstand (c_w) te verkrijgen:

$$c_w = c_{Tm} - (1 + k)c_{Fm}$$

5. Om de wrijvingsweerstand van het schip te berekenen kan stap 2 voor elke snelheid herhaald worden. Maar dan met het Reynolds getal van het schip in plaats van het model:

$$c_{Fs} = \frac{0,075}{(\log_{10} Re_s - 2)^2}$$

6. Bereken c_A , wat afhankelijk is van de ruwheid van het de scheepsromp:

$$c_A = \left(105 \left(\frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{3}} - 0,64 \right) \times 10^{-3}$$

hierbij is k_s de oppervlakte ruwheid van het schip en L_{WL} de lengte van de waterlijn. Aangezien de scheepsromp van het model gemaakt is van een ander materiaal zal de ruwheid dus ook verschillen, daarom wordt deze factor toegevoegd.

7. Bereken de luchtweerstand coëfficiënt aan de hand van S en de scheepsoppervlakte boven het water (A_{VT}):

$$c_{AA} = \frac{A_{VT}}{1000S}$$

8. Nu zijn alle coëfficiënten, behalve die van eventuele aanhangsels die nog kunnen toegevoegd worden berekend. Men kan bijgevolg de totale scheepsweerstand coëfficiënt berekenen door de coëfficiënten in volgende formule in te vullen:

$$c_{TS} = (1 + k)c_{FS} + c_w + c_A + c_{AA} + c_{Appendages}$$

9. Met de totale weerstand coëfficiënt is het mogelijk om de totale weerstand van het schip te bepalen volgens de formule:

$$R_{TS} = c_{TS} \frac{1}{2} \rho_s V_s^2 S_s$$

Door deze stappen te volgen kan men de weerstand van het scheepsmodel omzetten naar deze van het schip op ware grootte. Echter verschillen de condities van deze testen met de omstandigheden waarin een operationeel schip zich bevindt. Men moet nog rekening houden met zeegang, wind en aanhangsels aan het schip. Aangezien de meeste schepen niet veel aanhangsels hebben zal een eventuele kleine fout bij een schatting van deze

weerstand worden aanvaard. Bij de schepen die veel uitsteeksels onder de waterlijn hebben, zoals de combinatie van grote propeller met een boegschroef en met een *bilge keel*, ontstaat er een grotere onzekerheidsmarge om de totale weerstand in te schatten. (Memorial University, z.d.) (Bertram, 2012) (Niklas & Pruszko, 2019)

3 Antifouling

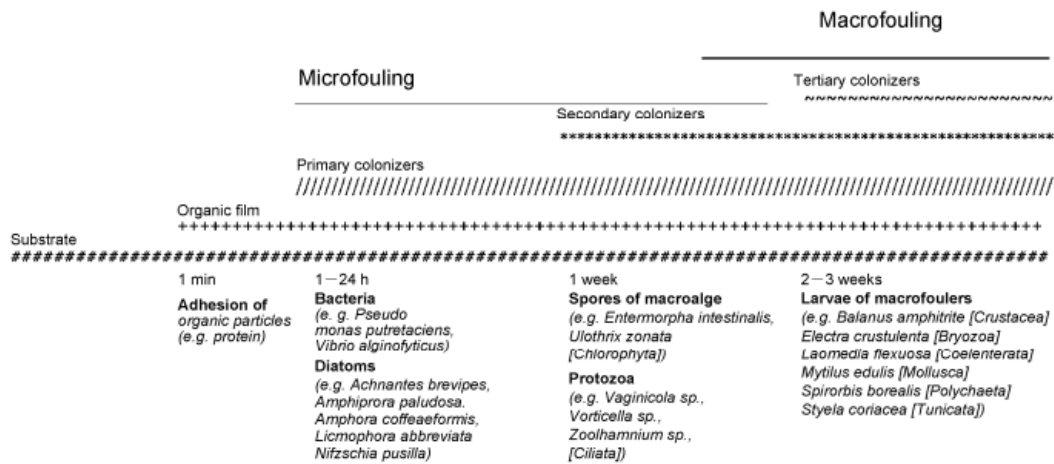
3.1 Biofouling

De aantrekking van marine organismen op de romp van een schip, ook wel biofouling genoemd, kan voor grote problemen zorgen. Bij aangroei op de romp zal een schip extra energie moeten consumeren om vaart te maken aangezien deze extra laag organismen voor meer weerstand zorgt. Hogere onderhoudskosten en grotere kans op corrosie zijn bijkomende problemen. Omwille van deze redenen is de zoektocht naar antifouling belangrijk in de maritieme sector. Er zijn situaties geweest waarbij de brandstofconsumptie met 40% steeg door biofouling. In het verleden is er een kostenanalyse opgesteld voor een trip van San Francisco tot Yokohama waarbij de kosten met 77% waren gestegen door de aanwezigheid van aangroei op de romp. (Cao, Wang, Chen, & Chen, 2011)

Er kan een onderverdeling gemaakt worden van de marine organismen die zich vastklemmen aan de romp: microfouling en macrofouling. Onder microfouling vallen bacteriën en diatomeeën². Bij macrofouling horen grotere organismen zoals mosselen, algen en zeewier. Het proces van biofouling bestaat uit meerdere fases. Eerst zal er op de oppervlakte een kleine laag van organisch materiaal ontstaan. De adhesie van deze deeltjes, zoals onder andere proteïnen, heeft een korte duur van ongeveer één minuut. Hierdoor plakt de oppervlakte meer waardoor de micro-organismen makkelijker aan de romp zullen kleven. In het volgende stadia wordt de bio-laag ontwikkeld. Dit wil zeggen dat bacteriën en microalgen zich zullen vastklemmen aan de oppervlakte. In deze fase waar nog geen macrofouling aan te pas komt kan het brandstofverbruik al oplopen tot 18% en de snelheid kan verminderen met minstens 20%. Na de vorming van de bio-laag zullen er zich larven en sporen van macrofouling op de oppervlakte bevinden. Na een periode van twee tot drie weken is de macrofouling compleet. Door de vorming van een complexe biologische gemeenschap op

² Diatomeeën zijn een klasse van de eencellige algen. (ANW, 2020)

de romp zullen er problemen ondervonden worden tijdens het varen. (Cao e.a., 2011)



Figuur 14 Verschillende fases voor de vorming van biofouling

(Cao e.a., 2011)

De aangroei op de romp is afhankelijk van meerdere factoren: zoutgehalte, geografische plaats, temperatuur, licht, waterdiepte en de scheepssnelheid. Echter, is het niet gemakkelijk om deze factoren aan te passen. Scheepsverven worden hierdoor onderzocht om op deze manier een omgeving te creëren die niet leefbaar of niet bewoonbaar is voor organismen. Er zijn drie categorieën antifouling die onderzocht worden: chemische, biologische en fysische. (Cao e.a., 2011)

Sinds de 20^{ste} eeuw werden antifouling coatings gebruikt. Meestal bevatten deze coatings tributyltin oxide (TBTO) en tributyltin fluoride. TBT-SPC kan zowel een hoge efficiëntie graad hebben als een lange levensduur. Desondanks de voordelen van TBT had het grote schadelijke gevolgen voor meerdere zeeorganismen. Het gevolg hiervan was dat vanaf 1 januari 2008 TBT in coatings werd verbannen door de IMO. Tegenwoordig zijn er meerdere coatings ontwikkeld die wel gebruikt mogen worden om de aangroei op de scheepromp tegen te gaan. Deze kunnen biociden bevatten of het kunnen coatings zijn die gebaseerd zijn op polymeren of nanotechnologie. Desondanks de positieve ontwikkeling van deze coatings

zijn er nog bepaalde uitdagingen die overwonnen moeten worden om de uiterste efficiëntie te bereiken. Zoals hoge kapitaalkosten en de duurzaamheid van deze coatings. Daarom is verder onderzoek nodig voor de ontwikkeling van een antifouling strategie die accuraat en onschadelijk is. In de paper '*comprehensive approach to antifouling strategies in desalination, marine environment, and wastewater treatment*' worden de moderne antifouling methodes vergeleken. Deze auteurs geloven dat de ontwikkeling van een goede antifouling methode aan de hand van een hydrofiele coating, zoals AIRCOAT (zie 1.2.4), een mogelijke oplossing kan zijn. (Cao e.a., 2011) (Bhoj, Tharmavaram, & Rawtani, 2021)

Het vinden van een goed werkende antifouling methode blijft belangrijk. Biofouling heeft niet alleen een effect op de uitstoot van broeikasgassen maar het zorgt ook voor een grote verhoging van de brandstofkosten. De kostenanalyse voor brandstof van een US Navy schip ligt rond de 500 miljoen dollar per jaar. Om de extra frictie, die ontstaat door biofouling, te overwinnen heeft een schip meer brandstof nodig. Jaarlijks kost deze extra brandstof 75 tot 100 miljoen dollar van de 500 miljoen. Het vliegdekschip 'USS America' ondervond vertraging als gevolg van aangroei op de romp. De maximum snelheid van het schip was van 30 knopen naar 23 knopen gedaald. Dit zorgde voor een dagelijkse kost van \$53.000. Het kostenplaatje voor de droogdokoperatie om dit te herstellen en de antifouling terug aan te brengen was 1,4 miljoen dollar. Maar dit komt ook voor bij koopvaardij schepen, zo zal een tanker van 250.000 ton waarvan slechts 5% van de onderwaterromp bedekt is door biofouling een kostenverhoging van 17% hebben. De extra kosten aan brandstof zullen jaarlijks meer dan 1 miljoen dollar bedragen. Een laag microfouling van amper één millimeter kan resulteren in een wrijvingsgroei op de romp van 80%. (Lewis, 1998)³

³ Deze bron dateert uit 1998 maar wordt toch gebruikt aangezien dit een duidelijk voorbeeld is. Deze cijfers zullen vandaag de dag variëren.

In 2012 was de maritieme sector wereldwijd verantwoordelijk voor 2,2% van de CO₂ uitstoot in de atmosfeer. Deze percentage wordt verwacht alleen maar te groeien. Om dit aan te pakken heeft de IMO het EEDI (*Energy Efficiency Design Index*) programma opgestart. De bedoeling hiervan is om schepen milieuvriendelijker te maken, één van de manieren hiervoor is de hydrodynamische karakteristieken van schepen te optimaliseren. Dit doel kan worden bereikt door schepen vrij te maken van biofouling. Uit berekeningen van een onderzoek blijkt dat bij een stijging van 30% weerstand de brandstofverbruik met 16,7% stijgt. Door de wrijving, veroorzaakt door biofouling, te verkleinen zal de nodige hoeveelheid brandstof ook dalen. Dit onderzoeksteam heeft ook een schip gevolgd voor de periode van november 2015 tot september 2017. Het schip ging in droogdok om de biofouling te verwijderen vanaf augustus 2016 tot oktober 2016. Door deze tocht te analyseren blijkt dat op het einde van de eerste periode het brandstofverbruik was gestegen met 20%. In de tweede periode maakte het schip gebruik van een betere antifouling, nog steeds steeg het brandstofverbruik nog met 5%. (Hakim, Nugroho, Nurrohman, Suastika, & Utama, 2019)

3.2 Air Lubrication als antifouling

Uit onderzoek van het Air Lubrication System is gebleken dat het effect had op de aangroei van de romp. Door de continue luchtstroom onderaan het schip zal het moeilijk zijn voor maritieme organismen om zich vast te klemmen. Op deze manier zal de romp vrij blijven van biofouling. Het bedrijf Silverstream heeft onderzoek gedaan over de prestaties van het luchtsmeringsysteem. Dit onderzoek vond plaats in de zee en werd voor een langdurige periode van twee en een half jaar op grote schaal getest. Het oorspronkelijke doel hiervan was het bestuderen van de mogelijke schade van luchtbubbels op de propeller. De gedachte hierachter was dat de bubbels geen negatieve gevolgen zouden hebben aangezien deze bestaan uit samengedrukte lucht. Cavitatie wordt veroorzaakt door het imploderen van een vacuüm bubbel doordat deze een groot drukverschil ondervindt. Aangezien de bubbels van het luchtsmeringssysteem niet

vacuüm zijn zou er geen cavitatie plaatsvinden. Om deze theorie te bevestigen werden er jaarlijks inspecties uitgevoerd op een schip waarop het systeem was geïnstalleerd. Hieruit werd het duidelijk dat de propeller nog in goede staat was. Daarbovenop viel het op dat er geen spoor was van maritieme aangroei. Dit gaf de aanleiding om eveneens de scheep romp te bestuderen. Echter was de conclusie uit het onderzoek dat het een te korte periode was om volledig te kunnen bevestigen dat het een goede antifouling methode is. Maar het onderzoek vertoont zeker positieve aspecten die aantonen dat het systeem hiervoor kan benuttigd worden. (Silberschmidt, Tasker, Pappas, & Johannesson, 2016)

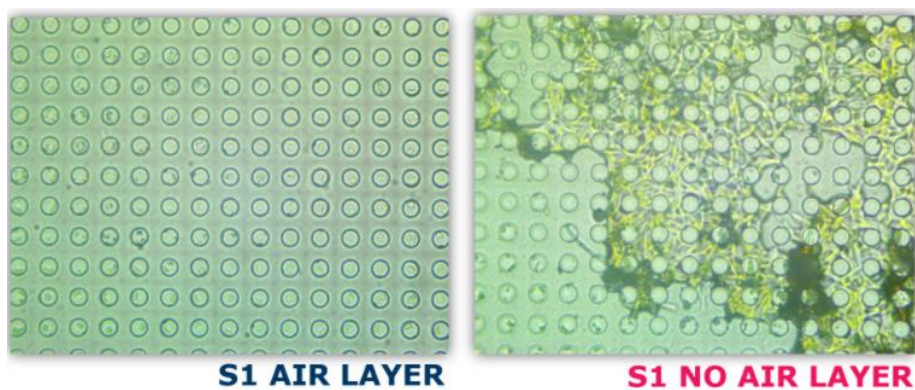
Ook het project AIRCOAT (zie 4.6) gelooft erin dat hun techniek zowel aan Air Lubrication doet als aan antifouling. Dit testen ze aan de hand van kleine prototypes in echte omstandigheden. Kleine plaatjes met en zonder AIRCOAT zijn geplaatst in offshore testomgevingen in zowel de Middellandse Zee bij Malta als bij Helgoland ten noorden van Duistland.



Figuur 15 Testplaatjes met en zonder antifouling

(AIRCOAT, z.d.)

Deze plaatjes (zie Figuur 15) worden zes maanden onderwater gehouden waardoor de aangroei kan bestudeerd worden. Twee keer per maand worden deze proefstukken bekeken om een vergelijking te maken. Na zes maanden worden de plaatjes naar het laboratorium binnengebracht om te analyseren. Aan de hand van software programma's worden de mogelijke organismen gescand en geanalyseerd. Zo wordt er een percentage weergegeven van de hoeveelheid biofouling op de teststalen. Uit onderzoek van het laboratorium is gebleken dat er bij aanwezigheid van een luchtlaag geen aangroei op de specimen te vinden is. (AIRCOAT, z.d.)



Figuur 16 Resultaat aangroei met en zonder luchtlaag

(AIRCOAT, z.d.)

4 Projecten en theoretische benadering van bestaand onderzoek

4.1 PELS

In 1999 startte het Nederlands project genaamd "*Project Energy-saving air-Lubrication Ships*" (PELS). Het project vond plaats in het *Maritime Research Institute the Netherlands*, ook wel MARIN genoemd. Dit project heeft zowel de *Bubble Drag Reduction* methode als de *Partial Cavity Drag Reduction* bestudeerd. Echter was er niet genoeg budget om ook ALDR aan te pakken. Het project heeft aangegeven dat een efficiëntieverbetering van 20% haalbaar met behulp van luchtsmering. PELS voerde niet alleen onderzoek naar de energiebesparing aan de hand van Air Lubrication maar deed ook manoeuvreer testen en proeven in open zee condities. Door middel van deze testen kon men onderzoeken of er eventuele negatieve effecten op de scheepsprestaties waren. Om de manoeuvreerbaarheid van schepen onder Air Lubrication te bestuderen werden *free-sailing* testen en *captive planar-moiton mechanism* (PMM) testen toegepast. De testen die uitgevoerd zijn worden in dit deel breder beschreven ter verduidelijking van volgende delen. (5.1 en 5.2) (Thill, Toxopeus, & van Walree, 2005)

4.1.1 Het model

Het scheepsmodel dat gebruikt werd was zes meter lang en gebaseerd op een schaal 1:20. Dit model wordt onderverdeeld in tien gelijke delen zodat men de verschillende krachten op het schip bij diverse plaatsen kan analyseren. Midscheeps bevinden er zich twee langsscheepse balken parallel van elkaar. Hierdoor is het mogelijk om zowel de bodem voor de luchtholtes als de microbubbels te creëren. Het wisselen van luchtholtes naar microbubbels en vice versa wordt gedaan door het aanpassen van de bodemplaat. *Twin thrusters* zorgen voor de propulsie van het model. Deze schroeven maken het mogelijk om buiten de water-lucht stroom van de

systemen te blijven. Om de stroming goed te kunnen analyseren werd er op het model een simpel gestroomlijnde boeg geplaatst. Om oxidatievervuiling op het metaal te voorkomen werd voor deze testen stikstofgas in plaats van lucht gebruikt. De stikstof werd bewaard in een hoge druk cilinder met reductiekleppen die de druk verlagen tot 5 bar. Het gas moet door een klep die de stroommassa controleert waardoor deze makkelijk verstelbaar is. (Thill e.a., 2005)

Op de bodemplaat van de BDR simulatie zijn op vijf longitudinale plaatsen poreus metalen strips bevestigd, om zo microbubbels te kunnen creëren. Deze bubbels werden gemaakt door stikstofgas dat door de metalen strips werd geïnjecteerd. (Thill e.a., 2005)



Figuur 17 Onderkant scheepsmodel met metalen strips

(Thill, Toxopeus, & Walree, 2005)

Voor de *Partial Cavitation Drag Reduction* test werd een andere bodem gebruikt. Op de bodem van het schip werden holtes geplaatst die, met uitzondering van de voorste holte, met behulp van tussenschotten telkens onderverdeeld werden in drie ruimtes. Hierdoor kon een vrij vloeistofoppervlak, wat negatief is voor de stabiliteit van het schip, vermeden worden. Dit fenomeen doet zich voor wanneer een tank of ruimte

op een schip niet volledig met een vloeistof is gevuld. Wanneer het schip een hellingshoek heeft zal de vloeistof zich naar de lage kant van de tank verplaatsen. Hierdoor verplaatst ook het zwaartepunt van de vloeistof. Wat resulteert in een verschuiving van het schip zijn zwaartepunt. Bij de het *Partial Cavitation Drag Reduction* model kan het FSE voorkomen doordat een golf ontstaat in de holte aan de bodem van dit model. Deze golf kan ervoor zorgen dat het zwaartepunt van het schip verschuift. Dit kan grote gevolgen hebben voor de stabiliteit van het schip. Daarom is het belangrijk om de lengte van de kamers te bepalen en te voorkomen dat er een vrij vloeistofoppervlak ontstaat. De lengte van deze kamers waren berekend via een formule van Matveev:

$$L_{cavity} = 0,34 \cdot \frac{S^2}{m} \cdot V_s^2$$

Aangezien een golfpatroon kan ontstaan is deze formule is gebaseerd op de berekening van een golflengte voor een bepaalde snelheid V_s . Omdat men in deze holtes geen golven wil doen ontstaan (dit kan slecht zijn voor de stabiliteit), kan men zo de geschatte lengte berekenen voor de luchtkamers. (Thill e.a., 2005) (Chakraborty, 2020)

4.1.2 Invloed van zeegang op het model

In een sleeptank werd het model telkens met en zonder Air Lubrication getest. Om vergelijkingen te kunnen maken werd het model blootgesteld aan verschillende condities. In de sleeptank werden regelmatige en onregelmatige golven gesimuleerd. Deze golven konden onder verschillende hoeken aankomen op het schip. De hoeken verschillen 45° , beginnend met golven recht op de neus van het schip en zo telkens 45° erbij tot op de hek van het schip. Het model werd getest onder twee snelheden om ook hieruit een eventueel verschil te kunnen observeren. Aan de hand van dit experiment kon men nagaan of de zeegang effect had op de scheepsbewegingen. Ook kon men nagaan of de luchtsmering nog altijd effectief bleef. (Thill e.a., 2005)

Om de effecten van de zeegang in verband met Air Lubrication en de karakteristieken van het schip te kunnen bestuderen was er nood aan een rekenmodel. De '*PANSHIP time domain panel code*' werd hiervoor gebruikt. Deze simulatie bepaalt de 6DOF, *six degrees of freedom*, van het model rekening houdende met de richting van golfinslag. Deze bewegingen houden het rollen, stampen, gieren, verzetten, schrikken en dompen van het schip in. Maar bovenal is PANSHIP uitstekend voor deze proeven omdat het ook rekening kan houden met de luchtkamers van het PCDR model. Door een vergelijking gebaseerd op de luchtinlaat, luchtvolume en luchtdruk in de luchtholtes van het model op te stellen kan de dynamiek van de luchtstroom bestudeerd worden. De combinatie van de hydrodynamica van het model en de beschrijving van de luchtkamers maakt dit rekenmodel ideaal. (Thill e.a., 2005)

4.1.3 Planar Motion Mechanism

Deze testen zijn voornamelijk belangrijk om te bepalen wat de effecten zijn van Air Lubrication tijdens het manoeuvreren van schepen. Dit is ook van belang voor de stabiliteit. Zo moet men weten of het schip nog zal voldoen aan de '*IMO Resolution A.751: interim standards for ship manoeuvrability*' criteria. Aan de hand hiervan is het gemakkelijk de karakteristieken te vergelijken met andere schepen en te weten te komen of er al dan niet grote afwijkingen zijn de resultaten. Onder andere werden er '*captive planar motion mechanism testen*' of ook wel PMM testen afgelegd. Deze testen onderzoeken de krachten die ontstaan op de romp van het model. Door PPM testen toe te passen wordt informatie verkregen die men nodig heeft om via een mathematische manier manoeuvreer modellen te berekenen voor schepen. (Vantorre & Eloit, 2010) (Thill e.a., 2005) (Gallardo Martínez, 2016)



Figuur 18 Planar Motion Mechanism

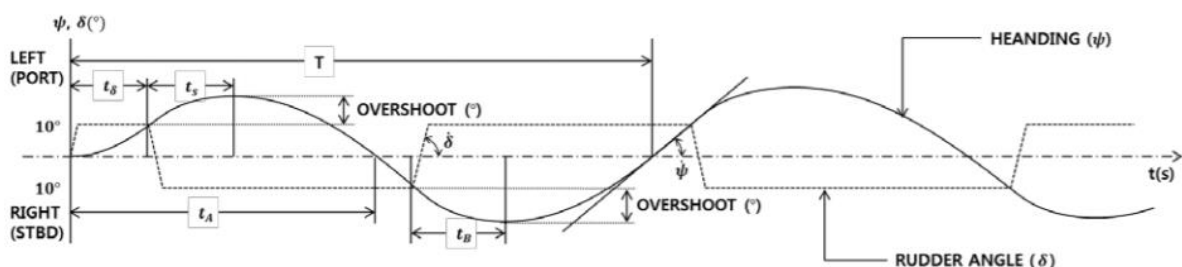
PPM voert modeltesten uit waarbij het model geforceerd gecoördineerde of onafhankelijke bewegingen maakt. Deze bewegingen zijn zowel slinger, schommel als gierbewegingen. Tijdens het uitvoeren van deze manoeuvres worden krachten en krachtmomenten gemeten op de romp van het model. Ook de schroef- en roerkrachten kunnen gemeten worden door deze test. Deze data wordt gebruikt om hydrodynamische coëfficiënten, zoals snelheid- en versnellingsafgeleiden, te bepalen om hiermee scheepsbewegingen en hydrodynamische krachten op het schip te voorspelen. (Burgess, Dell, & Sullivan, 2011)

Het scheepsmodel wordt met de PPM verbonden via een balans, zo worden de krachten en momenten gemeten tijdens de testen. Er kunnen twee soorten testen uitgevoerd worden: *steady tests* en *unsteady tests*. De eerste test meet krachten en momenten die afhankelijk zijn van de gierhoek, zwaaisnelheid, roerhoek, schroefsnellheid en de golfsnellheid. De *unsteady tests* meten krachten en momenten afhankelijk van snelheid, versnellingen en hydrodynamische coëfficiënten afkomstig van schommel-, slinger- en gierbewegingen. (Burgess e.a., 2011)

4.1.4 Free sailing tests

Deze testen werden uitgevoerd om de manoeuvreerbaarheidskarakteristieken te bepalen en deze ook te vergelijken met een test inclusief en exclusief Air Lubrication. Door deze proeven is het makkelijk om een directe vergelijking te maken tussen het model en het schip op ware grootte. Deze testen kunnen worden uitgevoerd door draadloze besturing van het model of via een kraan dat het model in de sleeptank bestuurd. De *free sailing* testen bij PELS bestonden uit een zig-zag test en een de combinatie van een draaicirkel en *pull-out* test. (Thill e.a., 2005)

De zig-zag test wordt uitgevoerd door telkens hetzelfde roerorder te wisselen tussen bakboord en stuurboord. Het roerorder is meestal 10° of 20° maar het kan evengoed een ander gekozen hoek zijn. Vanaf het moment dat de koers met hetzelfde aantal is uitgeweken als het roerorder slaat het roer over naar de andere kant. Deze test bekijkt dus hoe groot de 'overshoot' is en hoelang het dus duurt voordat het schip zijn nieuwe koers aangaat. Dit representeert de bevoegdheid van het schip om zowel zijn koers te behouden als de tijd die het nodig heeft om het gieren onder controle te krijgen. Vooral de eerste twee *overshoots* zijn belangrijk om het scheepsgedrag te analyseren. (ITTC, 2014)



Figuur 19 De zig-zag test

(ITTC, 2017)

De draaicirkel test wordt zowel naar stuurboord als bakboord uitgevoerd. Men voert dit uit door het roerorder volledig naar stuurboord of bakboord

te geven. Het is nodig om deze draaicirkel tot 540° te laten doorgaan om zo de hoofdparameters te kunnen bepalen. Door deze test wordt de tactische diameter bepaald en representeert ook de draaikarakteristieken van het schip. Dit kan gecombineerd worden met een pull-out test door het roer terug op midscheeps te zetten. Hierna wordt bepaald hoelang het duurt om terug op een rechte koers te gaan na de aanpassing van het roer. Deze testen werden telkens gedaan met en zonder Air Lubrication zodat er een vergelijking kon gemaakt worden. (ITTC, 2014) (ITTC, 2017)

4.2 SMOOTH

Tussen 2006 en 2011 werd het project SMOOTH (*Sustainable Methods for Optimal design and Operation of ships with air lubricated Hulls*) uitgevoerd, dit was onder leiding van de organisatie MARIN. De wet van Archimedes werd hier kort behandeld. Eenvoudig gezien bespreekt deze wet het volgende fenomeen: een schip of een lichaam kan drijven in water of een vloeistof wanneer er op het contactoppervlak van dit lichaam drukkrachten gelijk zijn verdeeld en deze drukkracht is bovendien gelijk aan gewicht van dit lichaam. Er waren bedenkingen of het schip zou blijven drijven als hieronder een mix van water en lucht bevond. De dichtheid van deze mix is lager tegenover water wat eventueel zou kunnen leiden tot minder drukkrachten om het schip drijvende te houden. Echter blijkt het zo dat als de lucht onder de scheepsromp dezelfde druk heeft als het omliggende water, het schip zal blijven drijven. Bij een goed gecontroleerde druk zal de diepgang van het schip stabiel blijven. SMOOTH benadrukt ook nog eens dat deze technologie een groot voordeel kan bieden. Wanneer een schip beweegt in een vloeistof zal het wrijving ondervinden, de wrijving van lucht is ongeveer twee procent tegenover de wrijving in water. De uitdaging zit erin om deze luchtlaag onder het schip in de juiste conditie te houden. (MARIN & dr. Prins, 2006)

Het project SMOOTH bestond uit een samenwerking van prominente Europese onderzoeksinstituten en industriële partners. Door deze collaboratie had het toegang tot o.a. uitstekende hydrodynamische

laboratoria, universiteiten en luchtsysteemleveranciers, om zo zeer accurate analyses te kunnen maken. De samenwerking was internationaal en bestond uit: MARIN (NL), Atlas Copco (NL), Damen Shipyards (NL), Imtech (NL), TK Veerhaven (NL), Bureau Veritas (FR), Akzo Nobel International Paint (GB), Istanbul Technical University (TR), SSPA (SE), New Logistics (DE) en DST (DE). (MARIN & dr. Prins, 2006)

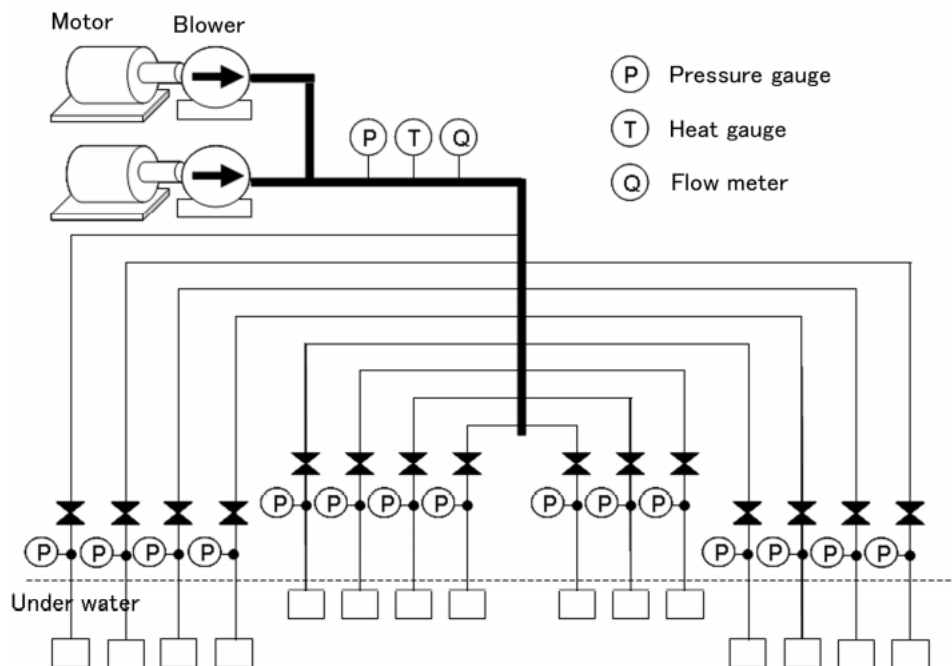
SMOOTH had het doel om al de aspecten van Air Lubrication te behandelen die nog nood hadden aan onderzoek, dit vooral in verband met schaalonderzoek. Het project bestond ook om deze technologie te beoordelen en deze te integreren in de Europese scheepsbouw. Op die manier wordt het toegankelijker voor Europese vaarwateren. (MARIN & dr. Prins, 2006)

Na drie jaar onderzoek was er geen twijfel meer dat zowel de *air layer* methode als de *air cavity* methode potentieel had. Echter werd er geconstateerd dat de Air Lubrication methode aan de hand van micro bubbels minder aantrekkelijk is, aangezien bij de testen in ware grootte de voordelige effecten hiervan klein waren. (MARIN & dr. Prins, 2006)

Volgens SMOOTH is de impact van Air Lubrication groot, het kan de geconsumeerde energie van een schip verminderen tot 15%. In het rapport stond het volgende voorbeeld om een idee te krijgen van de CO₂ reductie. In Europa zijn er ongeveer 5000 Nederlandse binnenlandse vaartuigen. Gemiddeld bezitten deze schepen een motor met 800kW. Neem nu dat deze schepen een brandstofverbruik van 180g/kWh hebben en voor 80% geladen zijn. Als deze schepen dan 4500 uur per jaar operationeel zijn, resulteert dit in een jaarlijks brandstofverbruik van 2.592.000 ton. Dit zorgt voor een uitstoot van 8.084.448 ton CO₂ per jaar. Een vermindering van 15% wilt dus zeggen dat er jaarlijks 1.212.667 ton CO₂ minder wordt uitgestoten. (MARIN & dr. Prins, 2006)

4.3 MALS

Mitsubishi Heavy Industries (MHI) heeft in 2010 een project gestart dat als eerste ter wereld testen deed op een nieuw gebouwd schip. Dit project heeft de naam *Mitsubishi Air Lubrication System* (MALS). Voordat de testen op het schip werden uitgevoerd, had Mitsubishi het Air Lubrication System bestudeerd in een sleeptank. Het model had een luchtinjectie systeem zoals te zien op Figuur 20: dit bestond uit een tank waarin lucht werd opgeslagen. Deze tank werd verbonden met een blazer. Aan deze blazer werden vijftien buizen verbonden die lucht naar de bodem van het model konden geleiden. De bodem van het model was breed en plat: dit is een ideale bodem voor het Air Lubrication System. Bij dit soort bodem blijft de lucht onder de bodem van het schip namelijk het makkelijkste gestroomlijnd. (Mizokami e.a., 2010)



Figuur 20 De werking van het Mitsubishi luchtsysteem

(Mizokami e.a., 2010)

Hetzelfde systeem dat hierboven wordt beschreven werd ook gebruikt op het nieuwe schip enkel met minder bodemopeningen. Het schip Yamatai, te zien in Figuur 21 behoort tot NYK-Hinode Line en werd voor deze testen

gebruikt. Yamatai is een heavy load carrier en is momenteel nog operationeel. Tijdens deze proeven was het belangrijk te controleren of het op ware grootte ook een energiebesparend effect had. De lengte van deze carrier is 162 meter en het heeft een brede, platte en ondiepe bodem. Het heeft dus een grote B/d ratio (breedte/diepte ratio) wat ideale omstandigheden zijn voor het Air Lubrication System. Bij een brede bodem zal de luchtlaag makkelijker onderaan het schip blijven, terwijl een grote diepte ervoor zorgt dat het systeem meer druk zal ondervinden waardoor de luchtbubbels moeilijker Het schip wordt aangedreven met twee medium-speed diesel motoren en een *controllable pitch propeller* (CPP). De luchtbubbels worden gecreëerd door twee luchtblazers die zich bevinden in de hulpmachinekamer. Deze blazen lucht naar de onderkant van het schip, waar de lucht wordt vrijgelaten via drie openingen. Door de vooruitgang van het schip wordt een luchtbubbeltapijt gevormd van de voorkant naar de achterkant van het schip. Dit werd bestudeerd aan de hand van onderwatercamera's. (Mizokami e.a., 2010)



Figuur 21 Het eerste schip met ALS

(NYK Line, 2010)

Om het energie sparende effect te bestuderen werd eerst het schip zonder Air Lubrication bestudeerd, waarna dezelfde test werd gedaan met de luchtlaag (en met dezelfde snelheid). Hierop werden vervolgens getij- en windcorrecties toegepast zodat de condities voor beide testen gelijk bleven.

Op het schip werd tijdelijk een torsiemeter geïnstalleerd waardoor de paardenkracht op de schroefas gemeten kon worden.

Tijdens de uitvoering werden er drie situaties in verband met de luchtsnelheid getest. Aan de hand van de formule: $t_b = \frac{Q_a}{B_a \cdot U}$ kon men de luchtsnelheid omrekenen tot de dikte van de luchtlaag onder de scheepsbodem. Hierbij is t_b de dikte van de luchtlaag, Q_a is de luchttoevoerratio, U is de scheepsnelheid en B_a staat voor de breedte gedekt door de luchtlaag. Er werden testen uitgevoerd met een luchtdikte van 3mm, 5mm en 7mm. De netto energie werd berekend door de gereduceerde waarde van de motorkracht te nemen en deze te verminderen met de elektrische krachtwaarde nodig voor de consumptie van de luchtblazers. Uit deze testen bleek dat de dikte van de luchtlaag recht evenredig was met de energiebesparing. De testresultaten zijn te zien in onderstaande tabel. Hoe dikker de luchtlaag hoe meer er bespaart kan worden. (Mizokami e.a., 2010)

Tabel 1 Krachtbesparing in verband met luchtdikte

(Mizokami e.a., 2010)

Luchtlaag (mm)	Krachtreductie (kW)	Kracht nodig voor luchtblazers (kW)	Netto kracht (besparing)
3	380	72	308 kW (8%)
5	530	143	387 kW (10%)
7	680	211	469 kW (12%)

Terwijl het MALS systeem op het schip Yamatai werd geplaatst werden er ook voorspellingen gemaakt over de bubbelverspreiding rond de romp. Deze voorspellingen konden gemaakt worden aan de hand van *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Niet alleen de bedekking rond de

scheepsromp, maar ook de luchtstroom die in de propeller binnendringt kon hiermee voorspeld worden. Door CFD was het mogelijk om te achterhalen of er op de propeller negatieve effecten waren waardoor de positieve effecten van het Air Lubrication System minder sterk naar voor kwamen. Tijdens deze simulaties werd verondersteld dat al de luchtbubbels eenzelfde diameter hadden die ondanks de stroming onveranderd bleven. Na deze proeven bleek dat de grootte van de luchtbubbel geen groot effect had op de verspreiding van de luchtbubbels. Dit wil zeggen dat de bubbel diameter kan variëren zonder grote negatieve gevolgen voor de luchtlaag onder het schip. Door deze proeven wist men dat het verlies aan voortstuwings efficiëntie verwaarloosbaar is. De stroom van luchtbubbels langs de bodem van het schip vloeien verder boven de propeller met als gevolg dat er weinig storing, zoals vibratie, voorkomt. (Kawabuchi e.a., 2011)

4.4 Silverstream

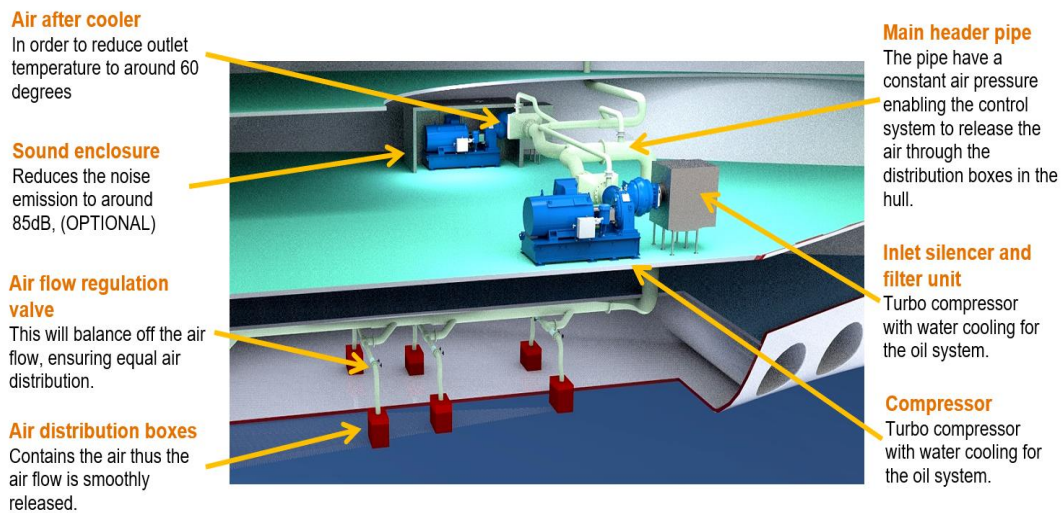
Silverstream is een bedrijf dat zich de laatste tien jaar bezig houdt met het ontwikkelen van groene technologie. Ze vinden dat de maritieme industrie onder grote druk staat om brandstofkosten te bedrukken en om duurzamer te worden. Daarom proberen ze al vele jaren een marktleider te zijn in propere technologie bij de nautische wereld. (Silverstream®, z.d.)

Het systeem dat door Silverstream wordt gebruikt is de *Bubble Drag Reduction*. Momenteel wordt er met het systeem tussen vijf en tien procent brandstof bespaart. Ze wil doorheen de jaren dit systeem blijven verbeteren en bijgevolg ook hogere besparingscijfers bereiken. Het bedrijf plaatst hun systeem zowel op nieuwe schepen als op bestaande schepen. Vanaf het moment dat een bestelling geplaatst is zou het 20 tot 24 weken duren tot dat de installatie geplaatst is en gebruikt kan worden. Er worden meerdere stappen genomen van bestelling tot installatie, te beginnen met de evaluatie van het schip. Binnen de twee weken na ontvangst van de scheepsinformatie wordt er een gepersonaliseerd plan gemaakt met de geschatte brandstofbesparingen voor het schip. De klant krijgt een

gedetailleerde data analyse mee waar de besparing worden weergegeven rekening houdend met verschillende snelheden en ballast condities. Deze evaluatie methode is ontwikkeld door onderzoek met HSVA (*Hamburg Ship Model Basin*) en het verzamelen van data over een periode van 2,5 jaar. Momenteel wordt hier ook data aan toegevoegd van reeds operationele schepen om zo een nauwkeurigere schatting te kunnen maken. Vervolgens wordt er een voorstel ingediend met een tijdschema en een beter overzicht van de prijs voor de installatie. Indien dit voorstel wordt aanvaard, maakt Silverstream een gedetailleerd plan met schetsen van het algemeen systeem en de plaatsing van de air release units. De materiaallevering wordt dan ook gestart. De air release units, compressoren en automatie systemen worden geproduceerd en binnen de 16 weken getest. Wanneer al het materiaal klaar is kan de installatie aan boord beginnen. Dit gebeurt in een droogdok met bijzijn van ingenieurs van Silverstream om de installatie te coördineren. De installatietijd is afhankelijk van project tot project maar kan soms in tien dagen gerealiseerd worden. Na installatie wordt alle apparatuur gecontroleerd waarna het schip klaar is voor gebruik. (Silverstream®, z.d.)

4.5 Howden Compressors

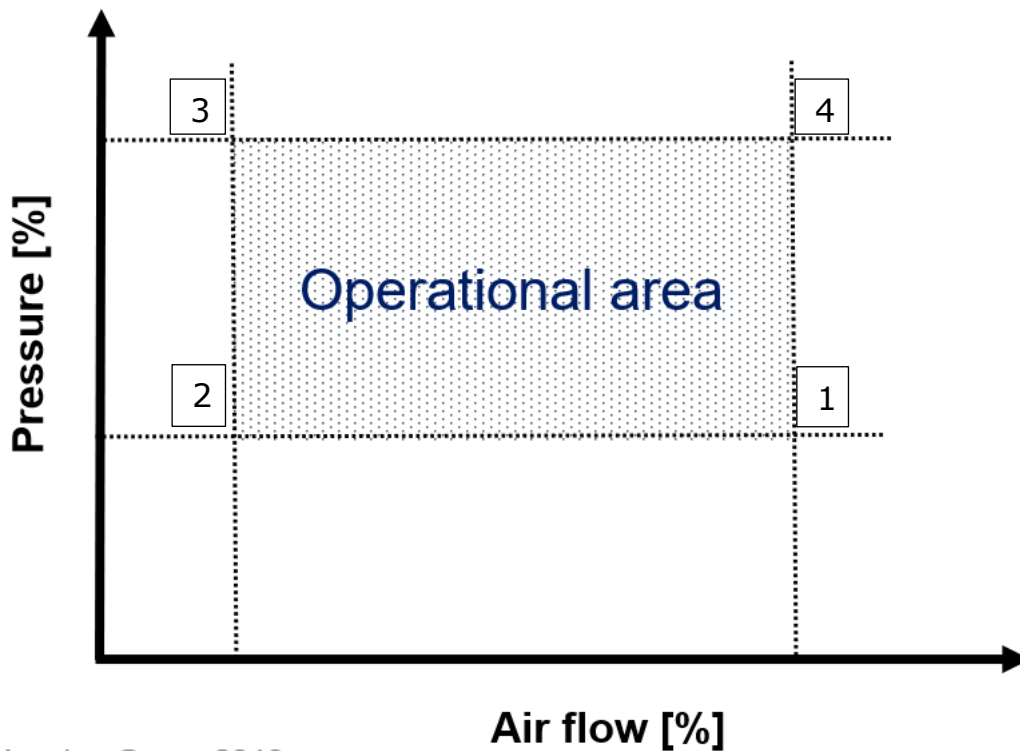
Er zijn niet veel onderdelen vereist om een Air Lubrication System aan boord van een schip operationeel te maken. Vooral de luchtstroom regulators, de compressor en de luchtverspreiders zijn belangrijk om het systeem te laten werken. Door deze onderdelen aan te passen aan het systeem zal er een algemeen groter operationeel vlak zijn waarbij de luchtbubbels gebruikt kunnen worden. Dit is wat het bedrijf Howden heeft gedaan met de compressoren die ze hebben ontworpen voor de luchtsmeringstechnologie. Deze hebben de naam: HV TURBO compressor. (Howden Group, 2019)



Figuur 22 Onderdelen van het Howden Air Lubrication System

(Howden Group, 2019)

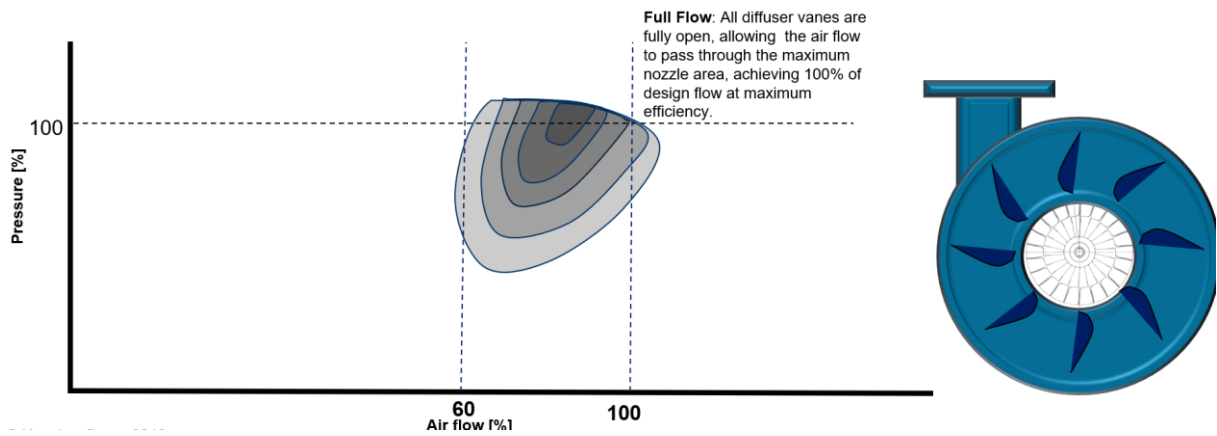
In de figuur hieronder ziet u het mogelijke operationeel vlak dat een compressor kan hebben bij het Air Lubrication System. Er zijn twee factoren die de grenzen van dit operationeel vlak beïnvloeden en die zijn de snelheid en de diepgang van het schip. Een schip dat volle vaart heeft met een minimale diepgang bevindt zich op punt 1. Eens dit schip vertraagt zal de luchtstroom verminderen tot het punt waarbij de minimale snelheid wordt bereikt waarbij Air Lubrication nog functioneel kan zijn. Het bereiken van deze minimum wordt weergegeven door punt 2. Door de diepgang van het schip te vergroten zal de druk stijgen tot men de maximale diepgang bereikt. Op onderstaande grafiek gaat men van punt 2 naar punt 3. Als dan de snelheid weer maximaal wordt zal punt 4 worden bereikt. Deze omstandigheden vormen de begrenzing van het operationele gebied. (Howden Group, 2019)



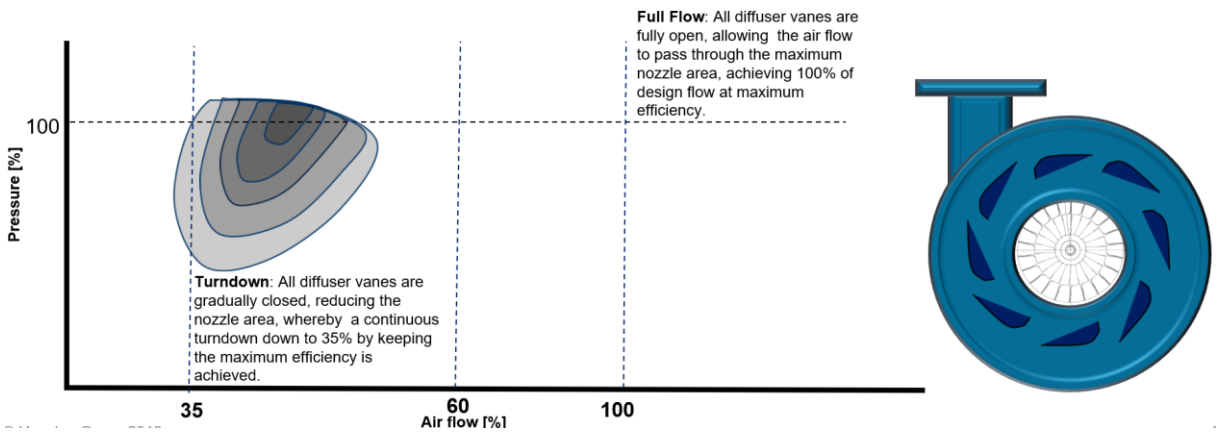
Figuur 23 Mogelijk operationeel vlak van een compressor met relatie tot druk en luchtstroom

(Howden Group, 2019)

Een compressor kan slechts optimaal functioneren binnen een klein deel van dit operationeel gebied. Howden heeft een compressor ontworpen dat zijn werkcondities kan aanpassen waardoor deze optimaal gebruik maakt van het mogelijke gebied van Figuur 23. Doordat de '*diffusor vanes*' niet meer vastzitten maar kunnen bewegen, zal de maximale efficiëntie van de compressor bereikt kunnen worden bij variabele luchtstroomcondities. Op onderstaande figuren zijn grijze zones te zien, hoe donkerder deze is hoe efficiënter de compressor zal kunnen werken. Als deze kleppen volledig openstaan zal het volledig operationeel zijn bij maximale luchtstroom. (zie Figuur 24) Maar ook als de kleppen bijna volledig gesloten zijn, waardoor er een minimale luchtstroom is, kan de compressor nog altijd efficiënt te werk gaan. (zie Figuur 25) (Howden Group, 2019)



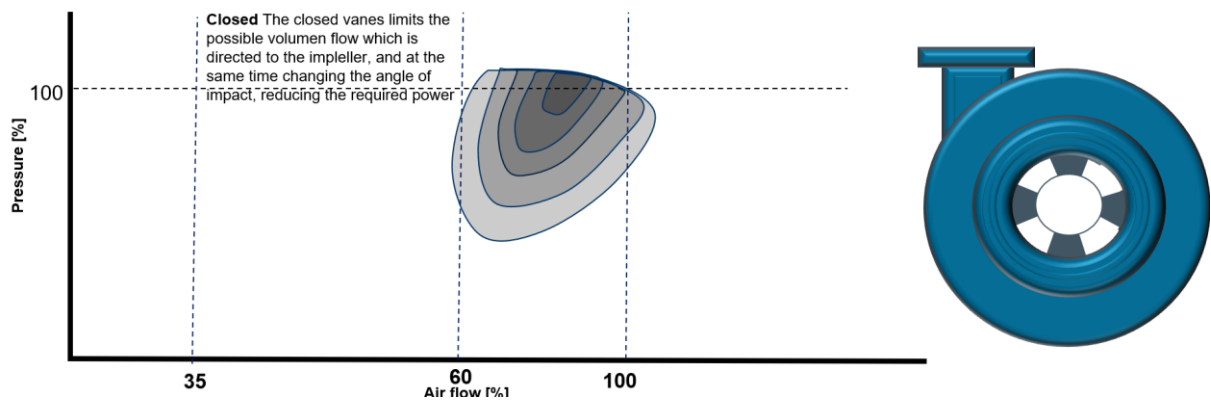
Figuur 24 Werkgebied compressor bij maximale luchtstroom



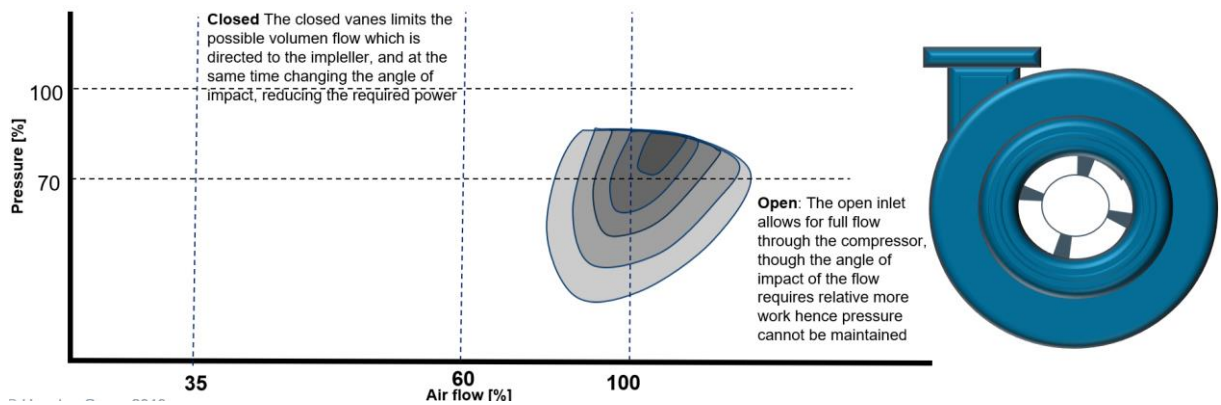
Figuur 25 Werkgebied compressor bij minimale luchtstroom

(Howden Group, 2019)

Door de inlaatkleppen van de compressor aan te passen kan deze ook bij lage druk presteren met een hoge efficiëntie. Met gesloten kleppen zal de maximale efficiëntie bereikt worden bij maximale druk. (zie Figuur 26) Als deze kleppen opengaan zal de compressor presteren met een lagere druk. (zie Figuur 27) Door zowel de 'diffusor vanes' als de inlaatkleppen te laten bewegen kan de compressor met hoge efficiëntie werken in bijna heel het operationele vlak van het schip. (Howden Group, 2019)



Figuur 26 Werkgebied compressor met gesloten inlaatkleppen



Figuur 27 Werkgebied compressor met open inlaatkleppen

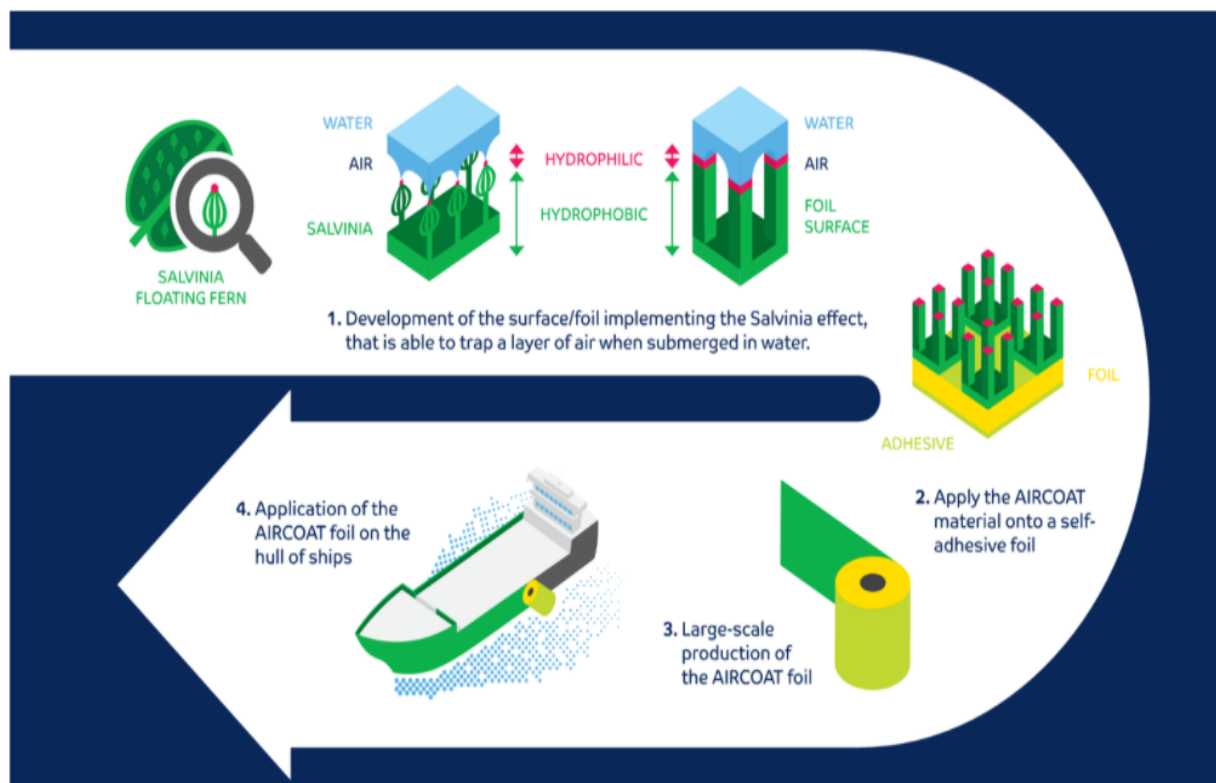
(Howden Group, 2019)

4.6 AIRCOAT

Horizon 2020 is het grootste onderzoek en innovatie programma van de Europese Unie, één van de projecten dat is opgestart door Horizon 2020 is AIRCOAT. Het *AIR Induced friction Reducing ship COATing* (AIRCOAT) project heeft als doel vervuiling in Europese wateren te verminderen en watertransport energie efficiënter te laten worden. Dit wil AIRCOAT bereiken met behulp van passieve Air Lubrication. Deze methode van Air Lubrication wordt bereikt door een biomimetische⁴ benadering van het Salvinia effect. Deze technologie is gebaseerd op een biologisch fenomeen: het waterafstotend effect van de Salvinia plant. Deze plant heeft een

⁴ Biomimetica of biomimicry kijkt naar de biologie en de ecologie om natuurlijke modellen te identificeren die die als inspiratie kunnen dienen voor bepaalde ontwerpen. (Hayes, Desha, & Baumeister, 2020)

mechanisme voor het langdurig vasthouden van lucht onder water. Dit is mogelijk doordat de plant een hydrofobe oppervlakte heeft. Het project AIRCOAT wil dit fenomeen gebruiken om een zelfklevende folie te creëren. Een schip met deze folie zal een permanente luchtlaag maken met als gevolg dat er minder weerstand ondervonden zal worden tussen de romp en het water. (TRIMIS, 2018)



Figuur 28 Het AIRCOAT concept

(HORIZON 2020, 2020)

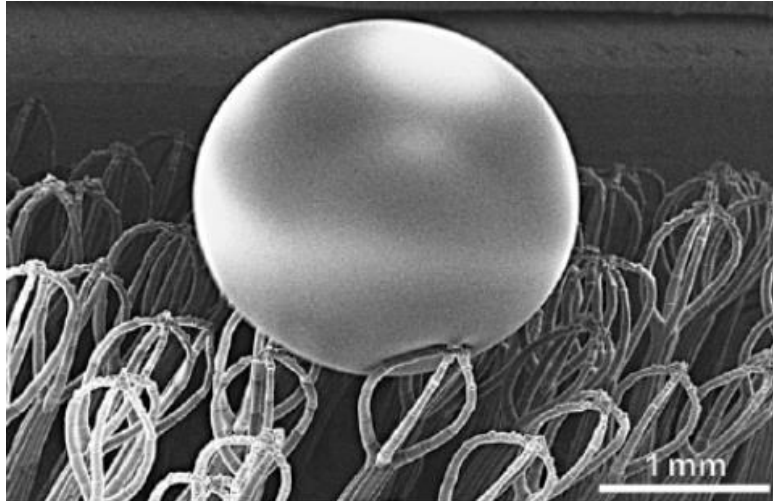
De project coördinator Johannes Oeffner gelooft dat deze technologie het potentieel heeft om 25% minder brandstof te verbruiken. De folie van het AIRCOAT project zal naast het verminderen van brandstofverbruik ook positief zijn voor andere aspecten. De permanente luchtlaag voorkomt bijvoorbeeld ook aangroei van maritieme organismen op de romp van het schip. De extra laag op de romp zal bovendien voorkomen dat de onderliggende lagen biociden vrijlaten in het water. Ook heeft het een verzachtend effect op de trillingen van het schip. Deze technologie heeft tenslotte ook het voordeel dat het gemakkelijk toepasbaar is op schepen

die al varende zijn. Het is een zeer toegankelijk systeem en kan gecombineerd worden met andere groene technologieën. (TRIMIS, 2018)

AIRCOAT start met het ontwikkelen van prototypes op kleine schaal zodat deze prototypes geoptimaliseerd kunnen worden. Na deze fase kunnen de testen op grote schaal beginnen. Zo kan de effectieve efficiëntie van deze folie achterhaald worden waarna het klaar is om gelanceerd te worden op de markt. Het project is gestart op 1 mei 2018 en heeft in totaal 5,3 miljoen euro gekregen van de Europese Commissie. (TRIMIS, 2018)

4.6.1 *Salvinia effect*

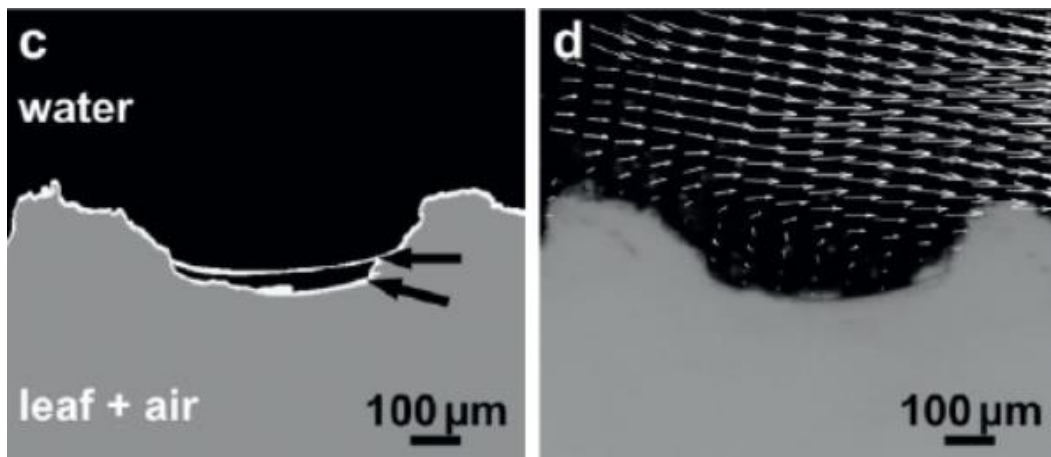
Het waterafstotende kenmerk van super hydrofobe oppervlakten op platen en dieren wordt in de wetenschap al lang besproken en onderzocht. Planten zoals de lotus bezitten deze eigenschap en staan ook bekend voor hun zelfreinigende eigenschap. Deze werden zowel biologisch als technisch onderzocht. Toch is er echter nog niet veel aandacht gegaan naar de luchtbehoudende karakteristiek van deze platen onder water. Het behouden van een luchtlaag onderwater is van groot technologisch, economisch en ecologisch belang voor lage frictie bij watertransport. De plant genaamd *Salvinia* heeft een complexe structuur op de oppervlakte van het blad, door deze structuur kan deze plant de luchtlaag voor een lange termijn behouden. Op de oppervlakte van het blad bevinden zich elastische haartjes die de vorm van een 'garde' hebben (zie Figuur 29). Deze haartjes zijn bedekt met nanoscopische waxkristallen. Wat opvalt is dat op het uiterst einde van deze haartjes de kristallen vervangen zijn door hydrofiele plekken. Deze plekken nemen maar 2% van de bladoppervlakte in maar zijn zeer belangrijk voor de luchtbehoudende capaciteiten. Ze zorgen ervoor dat de luchtlaag wordt gestabiliseerd doordat de water-luchtoppervlakte aan de uiteinde van de haartjes vastgepind wordt. Door een instabiele en turbulente omgeving gaat er normaal veel lucht verloren door de vorming van gasbubbel, maar deze vorming wordt nu voorkomen door de combinatie van de super hydrofobe en hydrofiele eigenschappen van de haartjes. (Barthlott e.a., 2010)



Figuur 29 De haarstructuur van de Salvinia plant

(Barthlott e.a., 2010)

De *Salvinia Molesta* is zeer dik bedekt met deze haartjes en zou gedurende meerdere weken een luchtlaag kunnen houden, totdat de bladeren afsterven. Wanneer het blad uit het water wordt gehaald, zal de omringende waterhuid verdwijnen waardoor het blad droog zal aanvoelen. Zoals te zien op Figuur 29 zullen individuele waterdruppels ronde vormen krijgen door de sterke hydrofobie van de bladeren. Door de haren op microscopische schaal te bestuderen, valt het op dat de haren elastisch meebewegen wanneer een druppel over het blad beweegt. Dit wijst erop dat de top van de haartjes een zeer sterke adhesie met het water heeft. De specifieke 'garde' structuur van de haartjes zal zoals een pilaar ondersteuning geven. Het zal voorkomen dat het water het bladoppervlakte bereikt. Uit onderzoek is gebleken dat de afstand tussen de waterlaag en het blad kan variëren doordat de plant trillingen ondervindt. Echter blijft de laag zeer goed op de haartoppen plakken waardoor het de ontsnapping van lucht voorkomt. (Barthlott e.a., 2010)



Figuur 30 Variatie in afstand van de scheidingslaag (links) en oppervlakte snelheid met een vloeisnelheid van 0,6m/s (rechts)

(Barthlott e.a., 2010)

Door een stroomsnelheid in het water te creëren is er ook nog een ander effect door de haarpuntjes te zien. Door het vastklemmen van het water aan de uiteindes van de haren verdwijnt de stroming er aan het wateroppervlak juist boven de scheidingslijn. Er wordt dus een stroomscheiding geïnduceerd met als resultaat dat de tangentiële kracht op de water-luchtzone zal verminderen. Bijgevolg is er minder risico voor het verlies van luchtvolume door oscillaties op de oppervlakte. (Barthlott e.a., 2010)

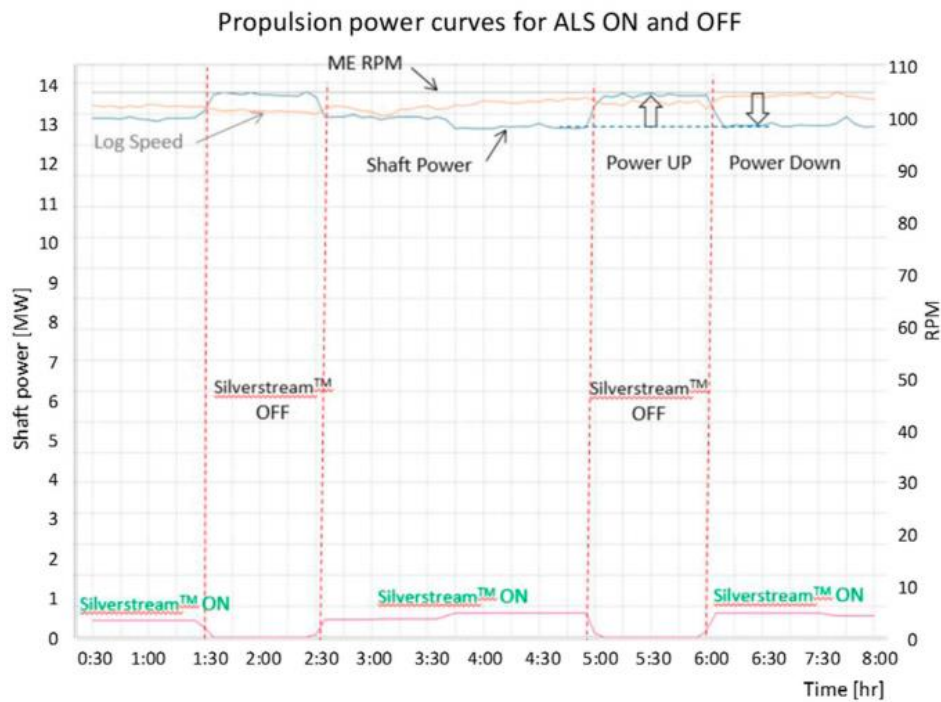
De conclusie van het Salvinia effect is dus dat de unieke combinatie van hydrofiële haarpunten en de hydrofobe oppervlakte zorgen voor een zeer stabiel lucht-water raakvlak. Om deze zone te doen devieren zal er in beide richtingen energie nodig zijn. Wanneer het water meer naar het bladoppervlak verplaatst, is er energie nodig om de vlakke meer over de hydrofobe zones te trekken. Wanneer de zone echter verder weg van het bladoppervlak gaat, zal er energie nodig zijn om het contact tussen het water en de hydrofiële uiteindes te verbreken. Het breken van dit contact wordt moeilijker gemaakt door de elastische eigenschap van de haartjes. Zo wordt er een afwijking toegestaan in beide richtingen, maar zullen na de deformatie de haartjes terug een equilibrium positie innemen tegenover de oppervlakte van het blad. Het voordeel van de stabilisatie is dat dit de

vorming van kleine bubbels voorkomt. Zo zal er dus geen lucht ontsnappen en zal de luchtzone rond het blad constant blijven. Dit effect kan de oplossing zijn om onder water langtijdig lucht bij te houden waardoor het zeer interessant is voor het ontwerpen van de scheepsromp. (Barthlott e.a., 2010)

4.7 Discussie

Bovenstaande projecten schatten het voordeel van het Air Lubrication System positief in. Giernalczyk en Kaminski (2021) werpen in hun onderzoek een genuanceerde kijk op deze systemen. In hun werk worden verschillende papers en verslagen geanalyseerd waarin propulsie parameters worden gepresenteerd van schepen die uitgerust zijn met het ALS. Met deze informatie werd een analyse opgesteld die de effectiviteit van het Air Lubrication System op een vrachtschip en een modern passagierschip beschrijft. (Giernalczyk & Kaminski, 2021)

De eerste analyse werd opgesteld voor de chemische tanker MT Amalienborg. Dit schip met de draagcapaciteit van 40.000 DWT (*Deadweight tonnage*) was het eerste schip met een Silverstream installatie. Na de installatie van dit systeem werden verschillende operationele parameters opgevolgd. Deze parameters waren: scheepsnelheid, energieconsumptie van de luchtinjectoren, RPM, asvermogen van propeller en brandstofverbruik van de hoofdmotoren. Aan de hand hiervan werden de effectieve besparingen gemeten die het Air Lubrication System veroorzaakt. Een opname van deze parameters werd zowel gemaakt wanneer het systeem aan stond, als wanneer het ALS uit stond. Op basis van deze metingen was het mogelijk de netto energiebesparing te bepalen tijdens het voorstuwten van de MT Amalienborg. Deze energiebesparingen variëren van 0,1% tot 4,5% bij een scheepsnelheid tussen 11 en 14 knopen. (Giernalczyk & Kaminski, 2021)



Figuur 31 Een observatie van de operationele parameters (shaft power, RPM en log speed) op de MT Amalienborg met en zonder het ALS

(Giernalczyk & Kaminski, 2021)

Door het veelbelovende resultaat van de MT Amalienborg steeg het aantal bestellingen voor het Air Lubrication System, vooral bij cruiseschepen. Ook hiervoor werd een analyse opgesteld voor de operationele parameters bij een cruiseschip. Dit passagiersschip was uitgerust met een dieselelektrische aandrijving. De berekende parameters van deze analyse zijn opgesteld in Tabel 2. Aan de hand van deze tabel kunnen volgende observaties gemaakt worden. Tussen punt 6 en 7 wordt het ALS aangezet, hierdoor is er minder kracht nodig voor de propulsie van het schip. Maar het gebruiken van het Air Lubrication System vraagt zelf ook energie. De netto energie tussen deze twee stappen vraagt 0,17 MW meer tegenover het energieverbruik voordat het systeem in gebruik was. Deze stijging van energieverbruik kwam vaker voor bij meetpunten waarbij het ALS aanstond. Alleen bij meetpunten 17 en 29 was een klein voordeel waarneembaar door het aanzetten van het Air Lubrication System. Bij dit schip werd de efficiëntie van het propulsie systeem niet vergroot door het ALS. (Giernalczyk & Kaminski, 2021)

**Tabel 2 Berekende parameters van het propulsie systeem van een passagierschip
wanneer het ALS aan en af staat**

(Giernalczyk & Kaminski, 2021)

Probe No.	ALS State	ALS Power Consumption	¹ Propeller Power Distribution	² Fuel Consumption Difference	Fuel Consumption Difference	³ Propeller Power Difference	⁴ Summary Propulsion Power Difference	⁵ Average Speed Difference
-	-	[MW]	[%]	[kg/h]	[%]	[MW]	[MW]	[kn]
-	-	A	B	C	D	E	F	G
6	off		69%					
7	on	0.47	68%	97	0.8	0.3	-0.17	0.3
9	on	0.51	66%				-0.31	
10	off		69%	-107	-0.9	-0.3	-0.30	0.1
16	off		71%				-1.30	
17	on	0.47	70%	125	1.0	0,7	0.23	0.1
19	on	0.51	69%				-0.51	
20	off		70%	-68	-0.6	-0.1	-0.10	-0.2
22	off		71%	0		1.0	1.00	
23	on	0.51	68%	75	0,6	0.5	-0.01	-0.1
24	on	0,51	69%				-0.71	
25	off		69%	299	2.4	-0.6	-0.60	0.0
26	off		78%				-2.10	
27	on	0.35	77%	237	1.7	-0.3	-0.65	-0.4
28	off		72%				-0.10	
29	on	0.48	69%	20	0.2	0.8	0.32	-0.4
30	on		71%	-101	-0.8	-0.2	-0.20	0.0
31	on	0.63	69%	146	1.2	0.6	-0.03	-0.1
32	off		68%	-95	-0.8	0.3	0.30	-0.1
33	off		71%				-0.60	
34	on	0.46	69%	189	1.5	0.0	-0.46	0.0
37	on	0.46	68%				-0.36	
38	off		70%	-102	-0.8	-0.3	-0.30	-0.1

¹ Propeller Power distribution-the part of total power produced on the vessel used for propulsion purposes. ² Fuel consumption difference-difference of fuel consumption when ALS is ON or OFF. ³ Propeller Power difference-difference of propeller power consumption before and after start ALS. ⁴ Summary Propulsion Power difference-difference of propulsion purpose power consumption before and after start ALS. ⁵ Average speed difference-difference of ship speed before and after start ALS.

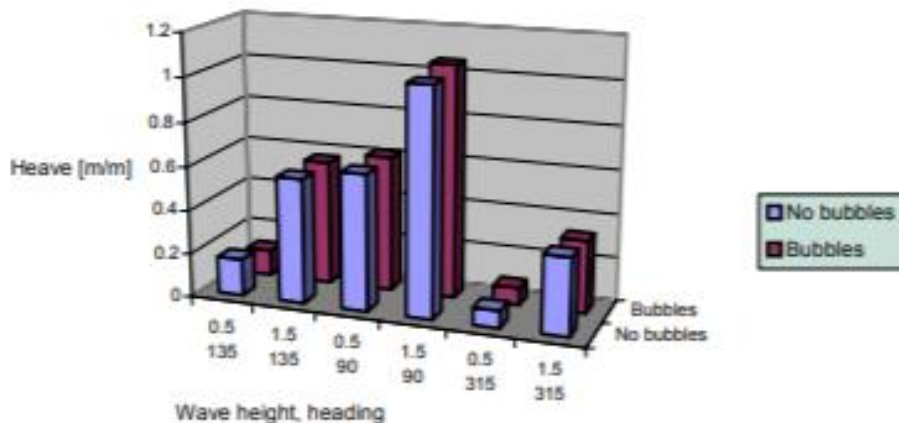
De analyse van de MT Amalienborg toont aan dat een voordelig resultaat van 4,5% haalbaar is bij een snelheid van 14 knopen. Maar onder deze ideale snelheid zakt de efficiëntie van het ALS. Bij een vaart van 13 knopen is de besparing nog maar 3,2% en bij 12 knopen wordt een energievermindering van 1,7% waargenomen. Het aanzetten van het Air Lubrication System bij het passagierschip met dieselelektrische aandrijving ging gepaard met een vermindering van het propellervermogen met 0,1 – 0,4 MW. Maar het verbruik van de luchtinjectoren bedroeg 0,34 – 0,63 MW. De vermindering werd dus gecompenseerd door het verbruik van de luchtinjectoren. Zo kan geconcludeerd worden dat de voorstuwing bij dit schip niet verbeterd werd door het ALS. (Giernalczyk & Kaminski, 2021)

5 Projectresultaten

5.1 Bubble Drag Reduction

5.1.1 Testen beweging schip

Testen bij PELS werden uitgevoerd in een sleeptank waarin afwisselend regelmatige en onregelmatige golven werden opgewekt. Het doel hiervan was tweezijdig: enerzijds trachtten ze na te gaan of de Air Lubrication techniek blijft werken in deze condities. Anderzijds wilden ze nagaan of er geen negatieve effecten in verband met de bewegingen van het schip zijn. (Thill e.a., 2005)



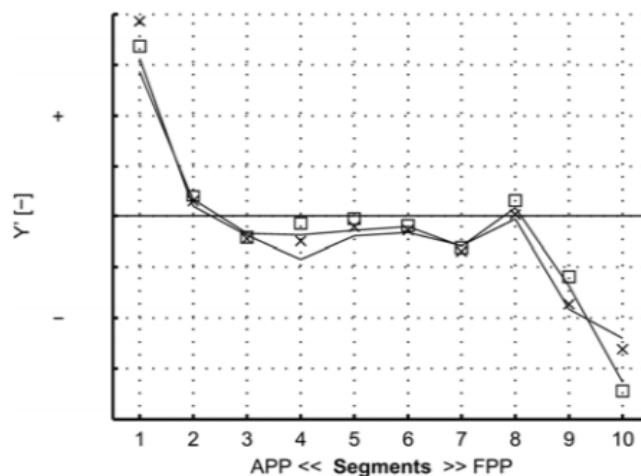
Figuur 32 Metingen dompbeweging van model met (rood) en zonder bubbels (blauw)

(Thill, Toxopeus, & Walree, 2005)

Ze concludeerden dat de Bubble Drag Reduction methode geen groot effect heeft op de bewegingen van het schip. Figuur 32 toont een grafiek die de dompbeweging van het schip in verband plaatst met de hoek waarmee de golf aankomt op het schip en de hoogte hiervan. Voor drie hoeken (90°, 135° en 315°) en twee golfhoogtes (0,5 meter en 1,5 meter) werd telkens de vergelijking gemaakt tussen de situatie met en zonder het BDR systeem. De bewegingsverschillen zijn voor elke situatie zeer klein en vertonen dus geen significant nadeel. Volgens deze testen heeft de zeegang bijgevolg geen negatief effect op de energiebesparing bij het *Bubble Drag Reducion* systeem. (Thill e.a., 2005)

5.1.2 Testen manoeuvreerbaarheid

Om het effect van Air Lubrication op de manoeuvreerbaarheid van een schip te analyseren werden twee soorten tests gedaan: de 'Planar Motion Mechanism' (PMM) test en de 'free sailing manoeuvring' test. De resultaten van deze testen zijn belangrijk om na te kunnen gaan of deze binnen de normen vallen van 'IMO Resolution A.751: interim standards for ship manoeuvrability'. De eerste soort test, PMM, werd gebruikt om de krachten op de scheepsromp tijdens het manoeuvreren te analyseren. Deze proef werd telkens uitgevoerd op een model dat gebruik maakt van microbubbels en een model zonder Air Lubrication. Zoals te zien op Figuur 33 valt er een klein verschil in de krachtmetingen te bemerken, bij de microbubbel configuratie ondervindt men namelijk iets minder zijwaartse krachten. Deze resultaten zijn de uitkomst van een test die gepaard ging met metingen bij een drifthoek van $2,5^\circ$. Zowel tijdens deze test, als tijdens testen met andere drifthoeken, werd de romp onder water geobserveerd. Het viel hierbij telkens op dat de luchtsmering minder effectief werd naarmate de drifthoek groter werd. Dit als gevolg van bubbels die steeds meer zijdelings de onderkant van de romp verlieten en dus de draairichting van het schip volgden. Bij extreme drifthoeken tijdens het uitvoeren van manoeuvres verliest het Air Lubrication System zijn effect. (Thill e.a., 2005) (Balagopalan, Tiwari, & Krishnankutty, 2017)



Figuur 33 Krachtmetingen met microbubbels (vierkanten en kruisjes) en zonder Air Lubrication (lijnen)

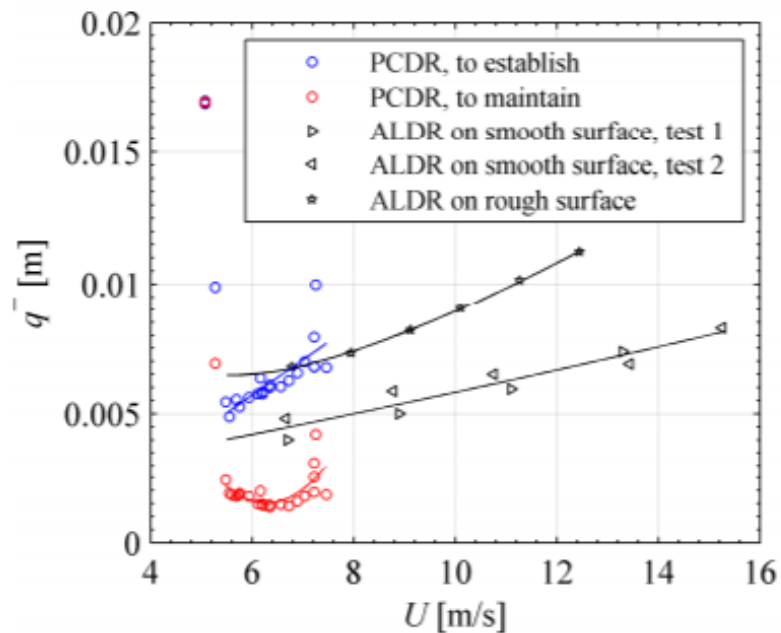
(Thill, Toxopeus, & Walree, 2005)

De 'free sailing test' bestond uit een zigzag test, een draaicirkel en een *pull out* test. Tijdens deze tests werd telkens de RPM constant gehouden, zo kon men waarnemen of de snelheid van het schip toenam of verminderde. De draaikarakteristieken van het model met het BDR systeem waren goed maar verschillen niet veel tegenover het conventionele model. De manoeuvreerbaarheid bleek quasi hetzelfde met of zonder bubbels. (Thill e.a., 2005)

5.2 Partial Cavity Drag Reduction

De gas flux is bij dit concept zeer belangrijk om de juiste hoeveelheid lucht te onderhouden. Het is cruciaal om de minimum hoeveelheid luchtstroom te bepalen die nodig is om de holte te vullen, alsook de hoeveelheid stroom om de juiste luchthoeveelheid te onderhouden. In 2010 hebben S. Mäkiharju, B. R. Elbing, A. Wiggins, D. R. Dowling, M. Perlin and S. L. Ceccio een paper geschreven over PCDR. In dit werk werd een experiment uitgevoerd over de stroomsnelheid van *Partial Cavity Drag Reduction*. Figuur 34 geeft de nodige hoeveelheid stroom weer voor een modelschip met het PCDR systeem. Deze testen werden uitgevoerd met een model van 12,9 meter lang, waarop één holte van 9,25 meter geplaatst werd. Deze resultaten zijn weliswaar een theoretische benadering aangezien al deze proeven in stil water plaatsvonden. Het model werd getest voor luchttoevoersnelheden van 5,48 m/s tot 7,56 m/s. In de paper werd een vergelijking gemaakt met het *Air Layer Drag Reduction* systeem. Voor dit systeem zijn de gegevens voor een groter snelheidsbereik gekend, namelijk van 6,79 tot 15,26 m/s. (S. A. Mäkiharju e.a., 2012)

De waarden van de stroomsnelheid U kan op de x-as teruggevonden worden. Deze stroomsnelheid kan via de formule: $Fr = U/\sqrt{gL_{cavity}}$ worden berekend. Waarbij Fr staat voor het getal van Froude (een getal zeer belangrijk voor weerstandsberekeningen, zie hoofdstuk 2.2.1), g voor valversnelling en L_{cavity} voor de lengte van de holte. De y-as van deze grafiek geeft de gasvolumestroom (q^-) weer. (S. Mäkiharju e.a., 2010)



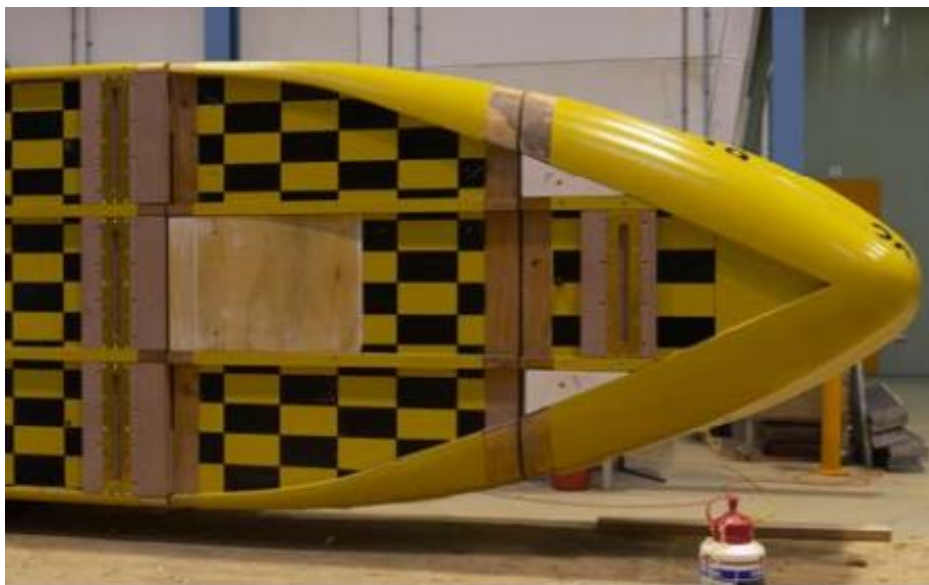
Figuur 34 Vergelijking gasstroom PCDR (cirkels) en ALDR (driehoeken en sterretjes)

(Mäkiharju, Elbing, Wiggins, Dowling, & Perl, 2010)

In bovenstaande grafiek wordt een vergelijking gemaakt tussen het *Partial Cavity Drag Reduction* systeem en het *Air Layer Drag Reduction* systeem. In de figuur wordt ook een onderscheid gemaakt tussen twee fases waarbij de luchttoevoer zal verschillen. De eerste fase van het proces is het opstarten van het systeem. Om de holte te vullen met de juiste hoeveelheid lucht is een zekere hoeveelheid stroomsnelheid nodig en die hoeveelheid wordt in Figuur 34 aangegeven door de blauwe kleur. De tweede fase is het onderhouden van de juist hoeveelheid lucht. Nadat het systeem is opgestart en de holtes met lucht zijn gevuld is het belangrijk dat er niet te veel of te weinig lucht in de holte komt. Om de juiste hoeveelheid lucht te verkrijgen is er een bepaalde stroomsnelheid nodig en die wordt in bovenstaande figuur weergegeven door de rode kleur. De driehoeken staan voor het ALDR systeem met een gladde romp en de sterretjes staan voor het ALDR systeem met een ruwe oppervlakte. Aan de hand van deze vergelijking kan men zien dat het ALDR verassend genoeg toch meer luchttoevoer nodig heeft tegenover het PCDR systeem. Een stroomsnelheid van 6,5 m/s is optimaal voor de PCDR, bij deze snelheid is de flux om het PCDR systeem op te starten 10% minder vergeleken met het ALDR systeem met ruwe

oppervlakte, maar wel 36% meer vergeleken met het ALDR systeem met gladde oppervlakte. Wanneer echter het systeem volledig opgestart is, is er tegenover het ALDR systeem slechts een kleine hoeveelheid lucht nodig om de holte te onderhouden. Dit kan zowaar een verschil van 67 tot 77% opleveren. Het is met andere woorden een zeer efficiënt systeem. Echter bevat het een groot nadeel door de beperking van het snelheidsbereik. Eens de snelheidslimiet wordt overschreden zal het zeer moeilijk of zelfs onmogelijk zijn om een positieve werking van dit systeem te ervaren. (S. Mäkiharju e.a., 2010)

Het "*Project Energy-saving air-Lubrication Ships*" heeft net zoals bij BDR ook naar het PCDR systeem onderzoek gevoerd. Er werd gebruik gemaakt van hetzelfde model maar voor deze testen werd een andere bodem voorzien. Op de bodem van het schip werden holtes geplaatst die op de voorste holte na telkens onderverdeeld werden in drie ruimtes met behulp van tussenschotten om zo een vrij vloeistofoppervlak, wat negatief is voor de stabiliteit van het schip, te vermijden. (Thill e.a., 2005)



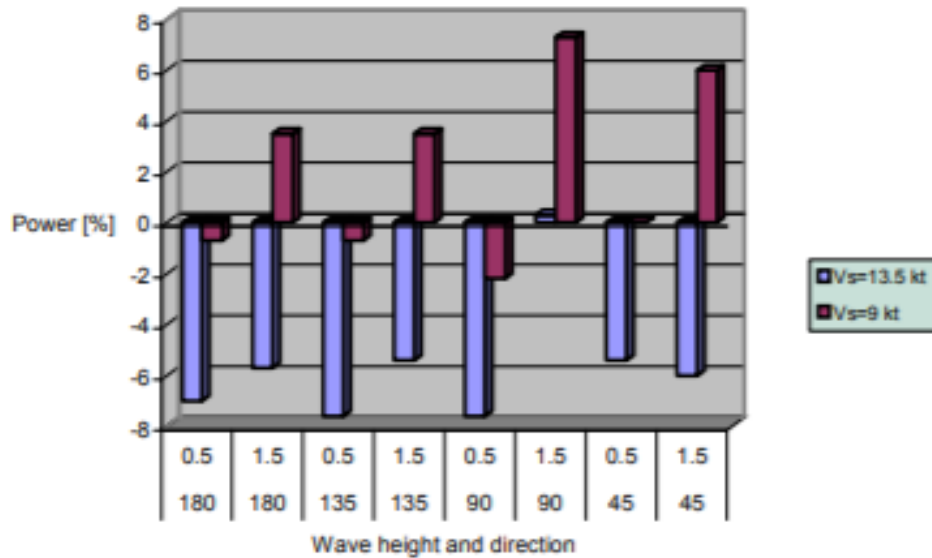
Figuur 35 Scheepsbodem van het PCDR model

(Thill, Toxopeus, & Walree, 2005)

5.2.1 Testen bewegingen schip

Deze testen werden uitgevoerd met en zonder luchtgevulde kamers en in een situatie met of zonder golven die regelmatig of onregelmatig waren. Dit deed men telkens aan de hand van twee snelheden en met golven die in verschillende hoeken het scheepsmodel raakten. Net zoals bij het BDR systeem werden de scheepsmoties niet significant gehinderd door de luchtsmering behalve wanneer de golven bij het ACDR systeem het scheepsmodel dwars troffen. Door de stabiliteitsverandering van het scheepsmodel werd de rolbeweging van het schip vergroot. (Thill e.a., 2005)

Het viel bij de resultaten op dat bij de configuratie met golven in combinatie met een lagere scheepssnelheid (bij deze testen 9 knopen) het luchtholte systeem niet efficiënt bleek. Dit kan men concluderen uit twee resultaten. Allereerst kon door de bewegingen van het water en het model lucht uit de kamers ontsnappen. Deze lucht kon de propeller hinderen waardoor deze niet optimaal kon werken. Ten tweede: als men kijkt naar energiebesparing bij ACDR was dit voor een grotere snelheid van 13,5 knopen een goed resultaat en werd er dus wel degelijk energie uitgespaard tot bijna 8%, terwijl dit bij een lage snelheid van 9 knopen niet het geval was en waardoor het meer energie kostte om het schip voort te sturen aan de hand van luchtkamers. (Thill e.a., 2005)



Figuur 36 Energiebesparing % bij een hoge (blauw) en lage (rood) snelheid van 13,5 en 9 knopen

(Thill, Toxopeus, & Walree, 2005)

PELS heeft net zoals het microbubbelsysteem ook voor het luchtholte systeem PPM testen gedaan. Als men de krachtmetingen vergelijkt met een conventioneel model zonder Air Lubrication en één met het PCDR systeem valt het op dat voor een kleine drifthoek de werkende krachten op het schip kleiner zijn bij het luchtholte systeem. Echter wanneer men het schip laat varen onder een grote drifthoek zal het PCDR systeem zeer grote laterale krachten ondervinden, groter in vergelijking met een model zonder luchtsmering. Bij een grote drifthoek zal men niet alleen laterale krachten ondervinden maar zal er ook meer lucht ontsnappen. Bij het draaien van het schip zal een drukverschil ontstaan doordat de lucht aan een kant van de luchtkamer opstapelt waardoor de druk zal stijgen. Door dit drukverschil zal er sneller lucht ontsnappen. Hoe groter de drifthoek hoe meer dit verschijnsel voorkomt wat er uiteindelijk voor kan zorgen dat het systeem niet meer effectief is. (Thill e.a., 2005)

5.2.2 Testen manoeuvreerbaarheid

Om de manoeuvreerbaarheid van het model te kunnen bestuderen werd eveneens een 'free-sailing experiment' uitgevoerd. Vergeleken met het luchtbubbel systeem en het conventionele model had het PCDR systeem veruit het beste vermogen om van koers te veranderen. Ook kon het door de luchtholtes goed de gierbeweging van het schip tegengaan. Dit komt doordat de tussenschoten van de luchtholtes deze bewegingen dempen. Bij de andere systemen werd de achterkant van het schip niet genoeg gedempt met als gevolg dat deze moeilijker te besturen waren. Het viel wel op dat bij het manoeuvreren met grote draaihoeken de achterste holtes geen lucht meer bevatte, waardoor de luchtsmering minder doeltreffend is. (Thill e.a., 2005)

5.3 Air Layer Drag Reduction

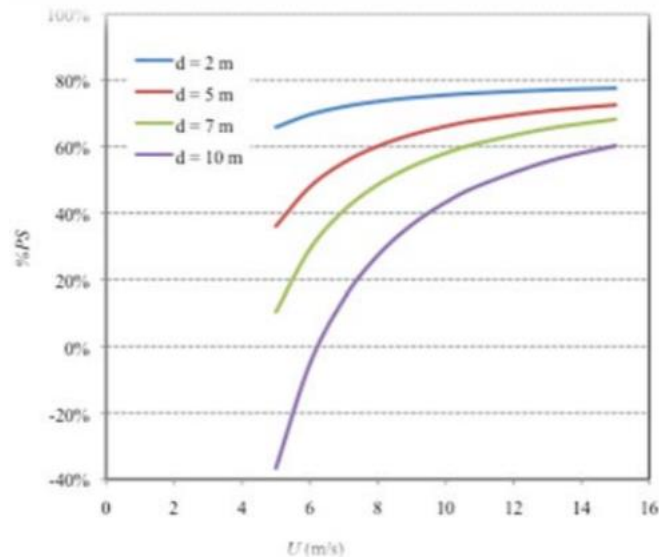
5.3.1 Energiebesparing

Om een idee te krijgen van de energiebesparing dat dit systeem teweeg brengt, werd in 2010 onderzoek gevoerd door S. L. Ceccio, M. Perlin, & B. R. Elbing. Het werd snel duidelijk dat de snelheid van de stroom onder de romp (in de formules en grafieken U (m/s)) recht evenredig is met de luchtstroom en benodigde voortstuwingskracht van het schip. Om een benadering te maken van deze berekeningen werden er met drie belangrijke factoren rekening gehouden: de snelheid, lengte en diepgang van het schip. Met een grotere scheepslengte zal men ook meer energie nodig hebben om de volledige onderkant te bedekken met een luchtlaag. Dus hoe langer het schip, hoe hoger de energiekosten zullen zijn. Ook bij de diepgang zal de energiekost recht evenredig zijn. Een schip met een grotere diepgang heeft meer energie nodig om zichzelf voor te stuwen. (Ceccio e.a., 2010)

Voor deze testen werd de formule $\%PS = 100 \left\{ \frac{P_{PB}(\%DR/100) - P_A}{P_{PB}} \right\}$ gebruikt.

Waarbij $\%PS$ staat voor energiebesparing, $\%DR$ voor sleepreductie, P_{PB} voor het basisvermogen dat nodig is om een vloeistof te verplaatsen aan het oppervlakte van de plaat en P_A voor het vermogen dat nodig is om een

bepaalde hoeveelheid lucht onder de scheepsromp te injecteren. Deze formule werd geanalyseerd voor verschillende diepgangen met verschillende scheepslengtes. (zie Figuur 37) Dit werd uitgevoerd voor schepen met een ruwe en gladde scheepsromp. (Ceccio e.a., 2010)

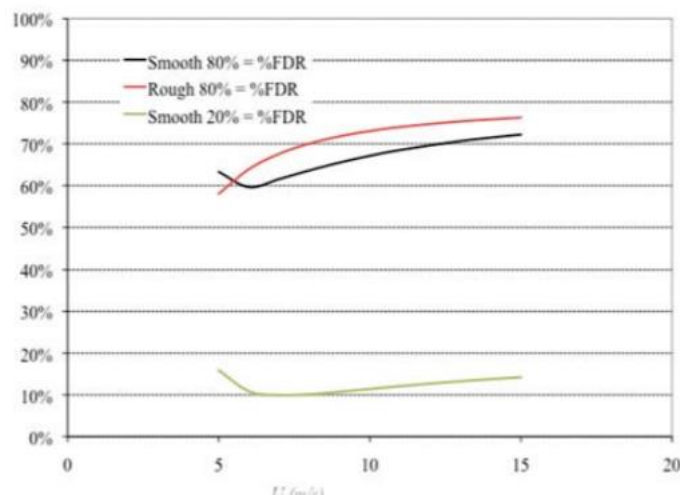


Figuur 37 Krachtbesparingspercentage in functie van de snelheid voor een schip met een ruwe romp en met een lengte van 100m

(Ceccio, Perlin, & Elbing, 2010)

Door de data te vergelijken die werd verkregen uit deze testen kan geconcludeerd worden dat het systeem voordeliger is wanneer men aan een hogere snelheid vaart. Bij lage snelheden kan dit zelfs een negatief resultaat hebben, doordat er meer energie nodig is om de lucht te pompen dan dat er energie gewonnen wordt door sleepreductie. Ook de diepgang speelt hier een grote rol, zoals te zien op Figuur 37 zal een schip dat dieper ligt meer energie nodig hebben in vergelijking met een schip dat minder diep ligt. Men heeft ook een vergelijking gemaakt tussen verschillende luchtstromen, zoals te zien op Figuur 38, waarbij men een test uitvoert met drie verschillende gasfluxen. Twee hiervan op een glad scheepsoppervlak waarbij men bij het ene de volledige luchthoeveelheid laat toestromen wat resulteert in 80% sleepreductie en bij de andere een minimale luchtstroom dat slechts voor 20% sleepreductie zorgt. Bij deze laatste zal er dus een

relatief zwakke en turbulente luchtlaag gevormd worden wat resulteert in minder effectieve weerstandsbesparing. Ook heeft men deze 80% luchtstroom getest op een ruw oppervlak. Bij 80% sleepreductie is er een strakke volledige luchtlaag gevormd wat resulteert in een lager energieverbruik. Merk op dat deze curven non-lineair zijn, omdat de relatie tussen wrijving en luchtinjectie variëren met de snelheid. De ALDR techniek kan dus wel degelijk zeer besparend zijn, maar men moet wel rekening houden dat deze data werd verzameld tijdens testen in optimale condities. In realistische omstandigheden op zee zullen deze waardes dus nog transformeren. (Ceccio e.a., 2010)



Figuur 38 Krachtbesparingspercentage met drie verschillende luchtinjecties: gladde bodem met 20% luchtinjectie (groen), ruwe bodem met 80% luchtinjectie (rood) en een gladde bodem met 80% luchtinjectie (zwart)

(Ceccio, Perlin, & Elbing, 2010)

5.4 Besluit

Het *Bubble Drag Reduction* systeem ondervindt weinig tot geen effect van zeegang op de technologie. Zelfs wanneer er golfgang is zal het systeem efficiënt blijven. Echter zal tijdens het manoeuvreren met grote drifthoeken lucht ontsnappen van de onderkant van het schip. Als het luchtverlies groot is kan dit systeem volledig zijn effect verliezen. Dat terzijde blijven de manoeuvreer karakteristieken van het schip met BDR vergelijkbaar met een schip zonder BDR.

De *Partial Cavity Drag Reduction* methode is op vlak van nodige luchttoevoer zeer efficiënt. Vergeleken met het ALDR systeem had het minder lucht nodig om doeltreffend te zijn. Ook na testen in zeegang had het geen grote beperkingen behalve bij golven die dwars aankwamen op het model, dit zorgde voor een versterking van de rolbeweging. Het systeem bleek bij lagere snelheden ook wel minder efficiënt te zijn. Net zoals bij het *Bubble Drag Reduction* systeem werd ook dit systeem beïnvloed door een grote drifthoek, hierbij kon er namelijk veel lucht ontsnappen. Dat terzijde had het wel een goede manoeuvreerbaarheid met werking van het PCDR systeem.

Over het *Air Layer Drag Reduction* systeem zijn geen bekende resultaten over de manoeuvreerbaarheid of over die invloed op de beweging van het schip. Wel over de energiebesparing met dit systeem. Deze zou voordeliger zijn wanneer het schip een grotere snelheid heeft, bij lage snelheden zou de energiebesparing zelfs negatief kunnen zijn. Ook de diepgang van het schip heeft een direct verband met de energiebesparende factor. Hoe dieper het schip gelegen is hoe meer energie er nodig is om het systeem te laten werken.

Aangezien er voor deze drie systemen verschillende testen zijn toegepast in verschillende omstandigheden, is het niet mogelijk om deze resultaten met elkaar te vergelijken. Elk systeem heeft wel bepaalde beperkingen door: diepgang, manoeuvreerbaarheid, zeegang of andere factoren. Maar er wordt ook telkens geconcludeerd dat bij de testen in labo omstandigheden het systeem een positieve werking kan hebben. Bij ideale vaaromstandigheden, zonder zware zeegang, zou het Air Lubrication System voor brandstofbesparing kunnen zorgen. (Thill e.a., 2005) (Ceccio e.a., 2010)

6 Onderzoek: mogelijke impact op het klimaat en het milieu

6.1 Inleiding

Het Air Lubrication System is volgens voorafgaande onderzoeken uitstoot besparend. Theoretisch onderzoek zegt dat deze brandstofbesparing kan variëren tussen 5-12%, bij het AIRCOAT systeem zou dit mogelijk nog meer kunnen zijn. Analyses in de realiteit variëren met de theorie aangezien de efficiëntie van het systeem afhankelijk is van de soort Air Lubrication, de zeegang en andere factoren. Volgens MALS was een netto energiereductie tot 12% mogelijk (zie tabel 1). Deze besparingen moeten in vraag worden gesteld aangezien de analyses in paper van de Giernalczyk en Kaminski (2021) aantonen dat deze effectieve besparing veel kleiner of zelfs negatief kan zijn.

Vandaag de dag wordt er veel aandacht besteed aan de klimaatkwestie en zowel grote alsook kleine aanpassingen kunnen helpen om de wereldwijde CO₂ uitstoot te verminderen. Zo stelde ik mij de vraag wat de impact op zowel het klimaat als het milieu zou zijn als alle operationele schepen met deze technologie uitgerust zijn. Op deze manier bekom ik een antwoord op de vraag: "Wat is de mogelijke bijdrage van het Air Lubrication System voor oplossingen van klimaat- en milieuproblemen in de scheepsvaart?"

Door contact op te nemen met de auteurs van de paper '*comprehensive inventory of ship traffic exhaust emissions in the European sea areas 2011*' heb ik cijfers kunnen verkrijgen die de maritieme uitstoot in Europese wateren representeren in 2018. Deze informatie is bekomen uit dezelfde database als de paper uit 2011. De cijfers geven een vrij accurate weergave over de maritieme uitstoot op dit moment. Door dit te combineren met de gegevens van voorafgaand onderzoek en persoonlijke inbreng en aanvulling

kan ik een theoretische benadering berekenen van de CO₂ reductie door Air Lubrication in Europese wateren. Zoals eerder besproken heeft het Air Lubrication System mogelijk een effect op de biofouling op een schip. Aangroei van micro-organismen op de romp van een schip zorgt voor een aanzienlijk verhoogde weerstand. Als deze extra last wordt weggenomen zal dit ook resulteren in een substantiële CO₂ uitstoot vermindering. Alsook kan dit zorgen voor minder verplaatsing van marine organismen wat effecten kan hebben op de ecosystemen van deze organismen. Het Air Lubrication System maakt bubbels met lucht. Deze toevoeging van zuurstof in het water kan mogelijk een betere leefomgeving voor maritieme zeedieren en planten betekenen. Tot slot zou het ALS ook de geluidsemisatie afkomstig van het schip kunnen dempen. Dit zou ik samen met de CO₂ reductie, de invloed van biofouling en de invloed van zuurstoftoevoeging willen bekijken om zo de impact op het klimaat en het milieu in vraag te kunnen stellen.

Aan de hand van deze benaderingen en stellingen kon ik een interview afleggen met klimaat- en milieuexperts. Met de info die ik van hun verkrijg zal ik zo tot besluiten kunnen komen over de impact dat het systeem op het milieu en het klimaat. Het doel hiervan is het kunnen aantonen dat zelfs deze kleine technologieën en reducties al een grote stap vooruit zijn naar een milieuvriendelijke en klimaat-neutrale wereld. Mijn hypothese is dat deze technologie alleen geen grote veranderingen teweegbrengt maar in combinatie met andere technologieën en technieken zeker een verschil maakt.

6.2 Gevolgen CO₂ vermindering

Via de database van de paper '*comprehensive inventory of ship traffic exhaust emissions in the European sea areas 2011*' heb ik de totale CO₂ uitstoot in 2018 van de scheepvaart verkregen. Dit bleek 168 megaton te zijn. Met deze cijfers ga ik vervolgens te werk in dit onderzoek.

In voorafgaande hoofdstukken zijn de reeds eerder uitgevoerde onderzoeken en projecten besproken. Deze hebben ieders hun testen gedaan en zijn zo tot hun eigen conclusies gekomen. Resultaten en besluiten die hieruit kwamen waren wel verschillend. Volgens PELS is een vermindering van 20% haalbaar terwijl SMOOTH 15% zegt. Dit zijn echter zeer theoretische conclusies. Het project van Mitsubishi, genaamd MALS, toont na testen op ware schaal aan dat een energiebesparing van 12% mogelijk is. Silverstream is momenteel een marktleider in de installatie van Air Lubrication. Het systeem is al op meerdere schepen geïnstalleerd en deze vaartuigen worden gemonitord om zo data te kunnen verzamelen. Dit bedrijf zegt dat een besparing van 5-10% CO₂ uitstoot tijdens de gehele trip wordt behaald. Het AIRCOAT project heeft een specifieke methode van Air Lubrication. Deze techniek is volop in ontwikkeling maar mogelijk zou het systeem een uitstootreductie van 25% kunnen hebben. Aangezien er nog geen testen hebben plaatsgevonden is deze besparing nog niet bewezen. Toch zou ik deze willen gebruiken om een hypothetisch resultaat te kunnen berekenen waarmee het effect van deze maximale emissiereductie kan worden besproken. Omdat deze cijfers zoveel verschillen zal ik voor het onderzoek twee benaderingen opstellen. De meeste schepen met BDR installatie aan boord beweren een besparing te hebben van 5-10%. Dit komt neer op een gemiddelde van 7,5%. De passieve luchtsmeringstechnologie AIRCOAT zou de hele romp van het schip kunnen bedekken waardoor er minder contact is met het omliggende water tegenover het BDR systeem. Als dit systeem zou werken kan het mogelijk voor een grote uitstootvermindering kunnen zorgen. Daarom wordt deze 25% ook gebruikt in de berekeningen.

6.2.1 Benadering CO₂ vermindering Europese wateren

De totale maritieme CO₂ uitstoot in 2018 was 168 megaton. Zoals eerder vermeld bevat dit deel van het onderzoek twee benaderingen. Eén van 7,5% en één van 25%.

$$168 \text{ megaton} \times 0,075 = 12,6 \text{ megaton}$$

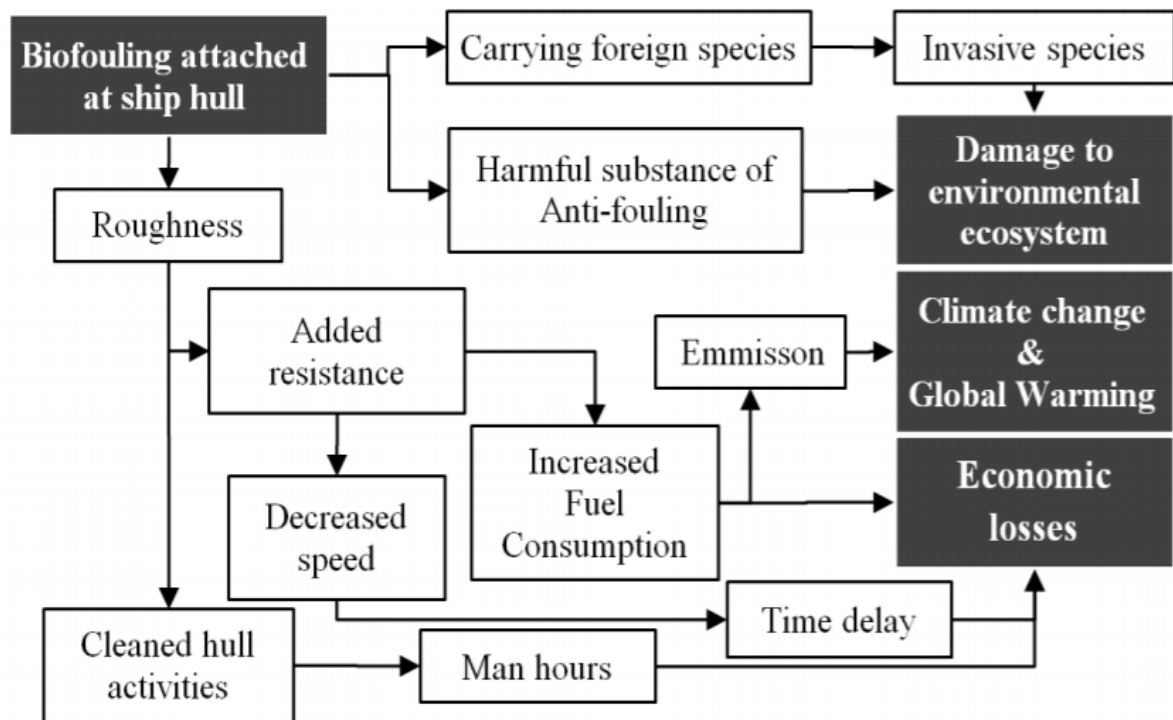
Voor de eerste berekening met 7.5% komt dit uit op een vermindering van 12,6 megaton CO₂. Als alle schepen die in Europese wateren varen een Air Lubrication System gebruiken zou de uitstoot van CO₂ niet 168 megaton maar 155,4 megaton bedragen.

$$168 \text{ megaton} \times 0,25 = 42 \text{ megaton}$$

Met het AIRCOAT systeem zou een vermindering van 25% mogelijk zijn. Eén vierde van 168 megaton is 42 megaton. Indien in de Europese wateren alle schepen AIRCOAT in gebruik hebben zou de CO₂ uitstoot kunnen verminderen naar 126 megaton.

6.3 Gevolgen antifouling

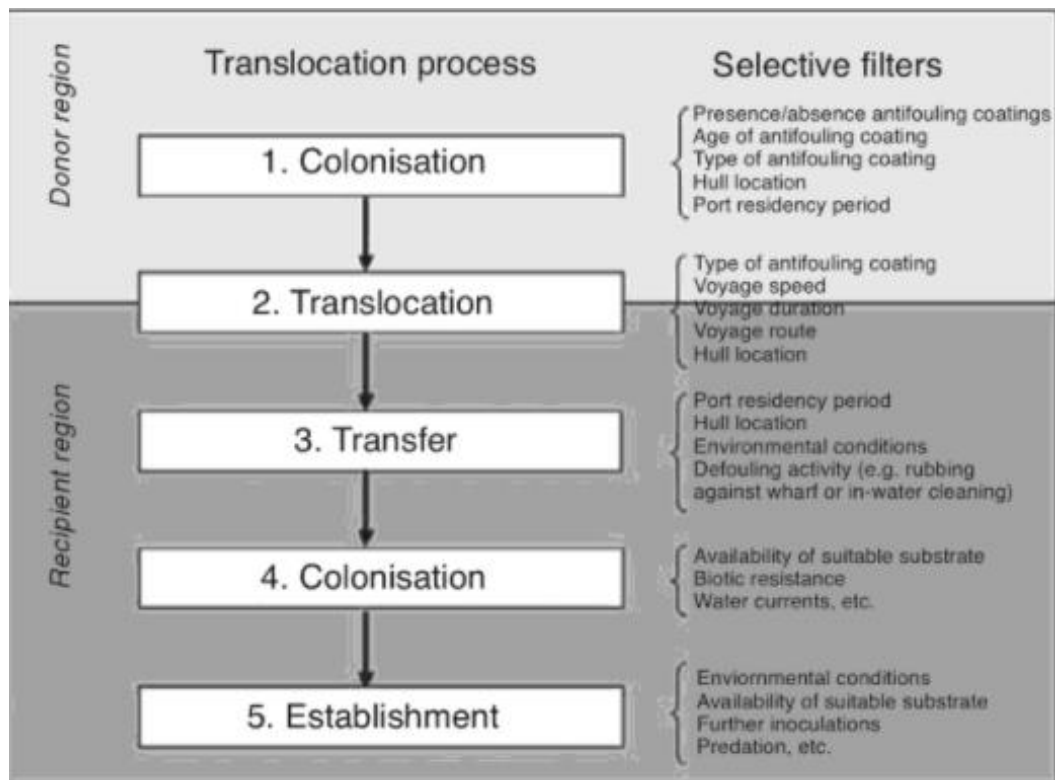
Zoals eerder besproken (zie 3.1) heeft de aangroei van biofouling een serieuze impact op het klimaat. De conclusies uit voorafgaande studies en observaties tonen aan dat een serieuze stijging van het brandstofverbruik het gevolg is van biofouling. Deze cijfers variëren aangezien ze afhankelijk zijn van de grootte van het bedekte deel van de romp. Ook het stadium van de biofouling heeft een effect op het percentage van brandstofverbruik. Zo zijn er resultaten die wijzen op een verbruik dat stijgt met 16%, terwijl andere studies een brandstofverbruik meten met een stijging van 40%. En zelfs met een goede antifouling methode zijn er soms nog sporen te vinden van biofouling. Deze sporen veroorzaken nog altijd een stijging van 5%. Bepaalde studies geloven dat dit systeem ervoor kan zorgen dat de aangroei van organismen vermeden kan worden. Dit wil zeggen dat ook hierin het Air Lubrication System kan helpen met het verminderen van CO₂ uitstoot.



Figuur 39 De mogelijke gevolgen van biofouling

(Hakim e.a., 2019)

Het vinden van een goede antifouling methode is niet alleen belangrijk voor het beperken van broeikasgassen. De aangroei op de romp kan ook ecosystemen schaden. Zo zullen schepen ervoor zorgen dat niet-inheemse marine organismen verplaatst worden van de ene regio naar de andere. Deze '*Non-Indegenous Marine Species*', ook wel NIMS genoemd, kunnen slecht zijn voor het maritieme ecosysteem en de biodiversiteit. Biofouling is samen met ballastwater één van de grote oorzaken van de antropogene translocatie die marine organismen ondervinden. Zo zullen op bepaalde regio's nieuwe soorten ontdekt worden terwijl dit niet hun normale habitat is. Het verplaatsen van een donor regio naar de ontvangende regio gebeurt in vijf stappen zoals te zien op Figuur 40. Bij elke stap zijn er bepaalde factoren (filters) die invloed hebben op de overlevingskans van deze organismen. Deze verplaatsing kan schadelijk zijn voor organismen en hun ecosystemen. Door middel van een goede antifouling methode zal deze translocatie stevig verminderen. (Lewis & Coutts, 2009)

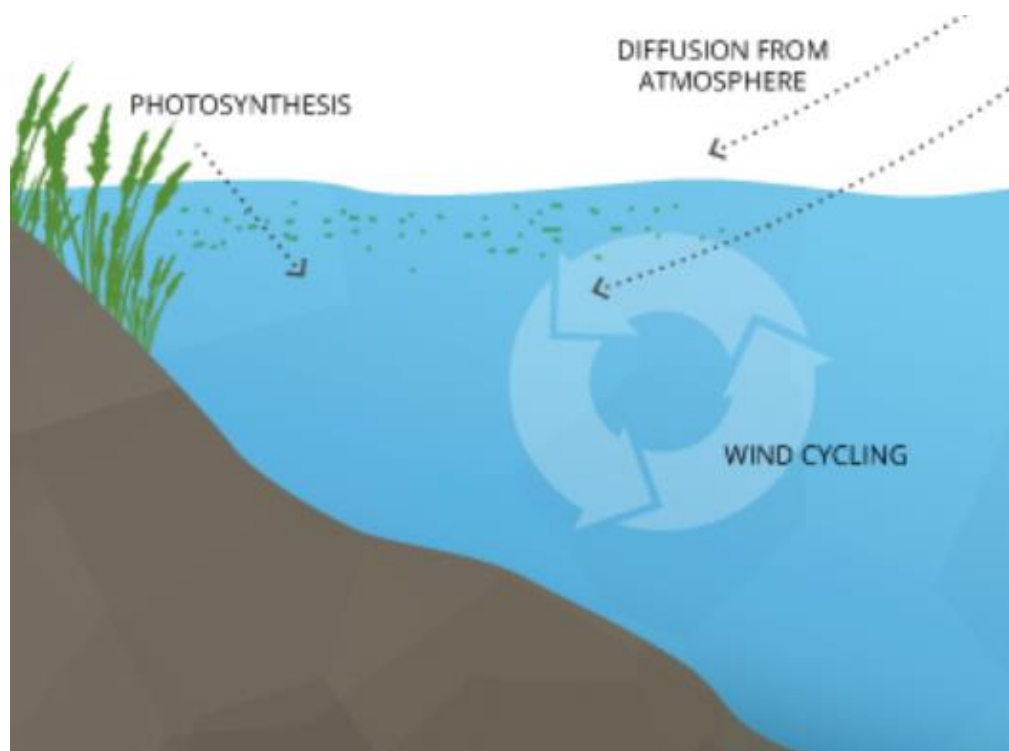


Figuur 40 Translocatie proces van maritieme organismen

(Lewis & Coutts, 2009)

6.4 Gevolgen zuurstoftoevoeging aan zeewater

Vissen hebben zuurstof nodig om te ademen via hun kieuwen, ook planten en bacteriën hebben zuurstof nodig voor respiratie. Wanneer er geen licht is waardoor geen fotosynthese kan plaatsvinden hebben deze planten nood aan opgeloste zuurstof (O_2). De nodige hoeveelheid O_2 hangt af van soort tot soort. Zo zullen vissen en planten op de bodem een kleinere hoeveelheid zuurstof nodig hebben tegenover deze die dicht bij het wateroppervlak leven. Vissen die in kleine dieptes leven zullen een zuurstof hoeveelheid van 4-15 mg/l nodig hebben terwijl deze op de bodem kunnen overleven in een omgeving van 1-6 mg/l. Deze zuivere O_2 komt het water binnen via fotosynthese of via lucht van de atmosfeer. Lucht geeft ofwel zuurstof langzaam af aan het omliggende water door diffusie of het gebeurt op een snelle manier via aeratie. Deze aeratie kan veroorzaakt worden door wind, watervallen en stromend water. Ook kan dit ontstaan door antropogene oorzaken, zoals bijvoorbeeld een waterwiel of een luchtpomp in een aquarium. (Fondriest Environmental, Inc., 2013)



Figuur 41 Aeratie

(Fondriest Environmental, Inc., 2013)

Een verzadiging van 100% lucht in water ontstaat bij het equilibrium punt. Zo zal aan de oppervlakte van het water de hoeveelheid O₂ proportioneel gelijk zijn aan het zuurstofpercentage van de lucht boven het wateroppervlak. De lucht in onze atmosfeer bevat 20,9% zuurstof, dit wilt zeggen dat op het zeeoppervlak bij 20°C een zuurstofverzadiging is van 9,03 mg/l. Zoutwatervissen en -planten hebben een hogere tolerantie voor een laagzuurstofpercentage tegenover zoetwatervissen en -planten. Dit komt omdat de 100% saturatie in zoutwater lager ligt dan bij zoetwater. Men kan stellen dat de O₂ concentratie in zoutwater 20% minder is dan in zoetwater. Toch hebben zoutwatervissen nog altijd genoeg zuurstof nodig om te kunnen overleven. Zo zal een gestreepte zeebaars een minimumconcentratie van 5 mg/l nodig hebben om te kunnen groeien. Sommige vissoorten zullen hun natuurlijke habitat verlaten als deze onder hun geprefereerde zuurstofniveau gaat. Wanneer bepaalde vissoorten, onder andere zalm, leven in omstandigheden waar het zuurstofpercentage te laag is kunnen deze vissen niet reproduceren. (Fondriest Environmental, Inc., 2013)

Het is zeer belangrijk dat de zuurstofsaturatie in het zeewater voldoende voorkomt. Als het Air Lubrication System hiervoor kan bijdragen, zoals dit gebeurt met een luchtpomp in een aquarium of een fontein in een visvijver, zou ik willen weten wat de effecten hiervan kunnen zijn.

6.5 Gevolgen geluidsdemping

Schepen zijn in de oceaan de meest voorkomende bron van geluidsvervuiling. Deze opwekking van geluid heeft echter effecten op vissen. Bij sommige vissoorten kan het gehoorverlies veroorzaken. Maar ook gehoorschade en endocriene stress kunnen gevolgen zijn van geluidsvervuiling. Meerdere testen op verschillende soorten zoetwatervissen in Europa tonen aan dat een verhoogde afscheiding van cortisol, het geproduceerde hormoon bij stressvolle situaties, gepaard gaat bij blootstelling aan scheepslawaai. Vissen zijn ook afhankelijk van hun gehoorsysteem om te kunnen communiceren en voor oriëntatie. Bovendien is het horen belangrijk om informatie te verkrijgen over roofdieren en prooien. Ten slotte hebben vissen hun gehoorsysteem nodig voor het aantrekken van partners. Schade hieraan kan dus zeer grote gevolgen hebben. (Vasconcelos, Amorim, & Ladich, 2007)

Het AIRCOAT project toont aan dat een luchtlaag de geluidsvervuiling die afkomstig is van het schip kan dempen. Uit testen blijkt dat een constante luchtlaag op de scheepsromp de geluidsemissie met 3 dB kan verminderen. Ook in het deel 1.5.1 van deze thesis wordt vermeld dat een '*bubble barrier*' geluid en trillingen kan dempen. Soms werd zelf een reductie van 10 dB of meer gerealiseerd. Hierdoor kan het Air Lubrication System bijdragen tot een meer milieuvriendelijke scheepsvaart. (TRIMIS, 2018) (Canadianpond, 2019)

6.6 Besluit klimaat en milieu impact

Het voorafgaand onderzoek van dit hoofdstuk bestaat zowel uit literatuurstudie als eigen inbreng. Door dit te combineren met het dubbelinterview (zie bijlage), dat werd afgelegd door biologen en klimaatexperts dr. Laurine Burdorf samen met inbreng van dr. Arne Ven, zal ik mijn besluit trekken over dit onderzoek om zo een antwoord te verkrijgen op de vraag "Wat is de mogelijke bijdrage van het Air Lubrication System voor oplossingen van klimaat- en milieuproblemen in de scheepsvaart?". Dr. Laurine Burdorf werkt bij Ecosysteembeheer (ECOBEBE), dit is een onderdeel van het *Global Change Ecology Centre* van de Universiteit Antwerpen. Dr. Arne Ven werkt bij *Plants and Ecosystems in a changing environment* (PLECO) ook onderdeel het *Global Change Ecology Centre* van de Universiteit Antwerpen. Nu is hij postdoc adviseur klimaatverandering voor het onderwijs.

Het Air Lubrication System zou mogelijk voor een jaarlijkse vermindering van 12,6 megaton CO₂ of 42 megaton CO₂ kunnen zorgen, respectievelijk zonder of met het AIRCOAT systeem. Maar, het blijft belangrijk om rekening te houden met de conclusie uit het onderzoek van Giernalczyk en Kaminski (2021). De gebruikte cijfers van dit onderzoek zijn benaderingen van het maximale potentieel van het ALS in ideale omstandigheden. Toch is het mogelijk dat er een weerstandsbeperking wordt gehaald. Als deze cijfers met het totaalbeeld van de Europese CO₂ uitstoot wordt vergeleken, dewelke tussen de 3000 en 4000 megaton ligt, is de bijdrage klein. Maar als men alleen kijkt naar de uitstoot afkomstig van schepen in Europese Wateren, is dit een grote stap vooruit. Zeker wanneer dit wordt vergeleken met de huidige verwezenlijkingen. Rechtstreeks heeft deze CO₂ vermindering geen grote impact op het milieu. Maar deze uitstoot kan zorgen voor klimaatveranderingen waarbij ook het weer zal wijzigen. Aangezien het weer een abiotische factor is die ervoor zorgt dat het milieu kan veranderen, heeft de CO₂ vermindering onrechtstreeks een impact op het milieu.

Net zoals de CO₂ vermindering een gevolg is van de weerstandsvermindering afkomstig van de luchtlaag, zal ook het voorkomen van aangroei op de romp een aanzienlijke CO₂ vermindering met zich meebrengen. Bovendien zal dit voor een groot deel de verplaatsing van organismen naar andere gebieden voorkomen. Zo zullen deze ecosystemen minder aangetast worden wat een groot effect heeft op het leefmilieu van deze organismen.

De eventuele zuurstoftoevoeging van het Air Lubrication System zal echter geen invloed hebben op zowel het milieu als op het klimaat. De wateren waarin deze schepen varen hebben veel circulatie waardoor de zuurstofopname vlot verloopt. Het systeem zou ook alleen in de bovenste waterlaag zuurstof kunnen bijbrengen, maar deze waterlaag is reeds het zuurstofrijkst.

De geluidsemisatie die veroorzaakt wordt door schepen heeft geen effect op het klimaat. Door deze geluidsvervuiling te dempen zal er op dat vlak niets veranderen. Echter heeft dit wel een effect op de communicatie van organismen. Ook om te paren maken vissen gebruik van geluid. Op deze manier tasten deze stoornissen het leefmilieu van deze organismen aan. Door dit te verminderen zullen de organismen die in de hogere waterlagen leven hieraan minder last ondervinden.

Aan de hand van dit onderzoek kan ik concluderen dat het Air Lubrication System zeker effecten heeft die het milieu en het klimaat beïnvloeden. Maar het systeem alleen is zeker niet genoeg om deze problemen aan te pakken en klimaatneutraal te worden. Om dit te bereiken zullen telkens combinaties nodig zijn van meerdere technieken. Dit wordt ook vermeld in de paper '*State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review*'. Er is momenteel geen enkele maatregel die resulteert in een broeikasemissievermindering die volstaat. Door een combinatie van bepaalde maatregelen is wel een reductie van 75% tegen 2050 mogelijk. De effecten van het luchtsmeringsysteem zal de

maritieme industrie niet direct voelen. Maar het zal wel zeker kunnen helpen om het totale plaatje van de maritieme sector te verbeteren. (Bouman, Lindstad, Rialland, & Strømman, 2017).

7 Algemeen besluit

Het Air Lubrication System kan onderverdeeld worden in vier verschillende methodes. Drie systemen die gebruik maken van actieve luchtsmeringstechnologie en één systeem dat gebruik maakt van een passief luchtsmeringssysteem. Deze eerste drie zijn: *Bubble Drag Reduction*, *Air Layer Drag Reduction* en *Partial Cavity Drag Reduction*. Deze systemen blijken uit theoretisch onderzoek een zeer positief effect te hebben op de weerstandsvermindering van een schip. Elke methode heeft zo zijn eigen manier om de *Wetted Surface Area* te verkleinen waardoor een schip minder wrijving zal ondervinden. Het is echter moeilijk om deze Air Lubrication Systems te beschouwen als de universele oplossing aangezien het zowel afhankelijk is van operationele condities van het schip als de scheepsspecificaties. Ook heeft elk systeem apart zijn grote voordelen en nadelen. Zo is *Bubble Drag Reduction* het populairste systeem aangezien deze makkelijk geïnstalleerd kan worden, terwijl het *Partial Cavity Drag Reduction* meer weerstandsvermindering kan realiseren. Maar om deze methode toe te passen zijn grote scheepsaanpassingen nodig. De producenten van de *air bubble* technologie beloven een weerstandsvermindering van 5-12%. Maar na een neutrale analyse van de prestatie parameters van schepen met het ALS blijkt de netto energiereductie lager te liggen. In de realiteit verschilt de weerstandsvermindering met de reductiepercentages die deze producenten verzekeren. Er zijn schepen die een netto energieoptimalisatie zullen ondervinden, maar voor sommige schepen zal dit met het *air bubble* systeem zeer klein tot nihil zijn.

Verder is er nog het systeem dat gebruik maakt van passieve luchtsmeringstechnologie: AIRCOAT. Dit is een project dat in een brandstofreductie van 25% gelooft. Het systeem maakt geen gebruik van luchtinjectoren en is gebaseerd op biomimetica. Ook kan dit aangebracht worden op heel de sloopromp en niet alleen de sloopbodem. Dit wil

zeggen dat als dit effectief werkt, het voor een grote netto energieoptimalisatie kan zorgen. De AIRCOAT technologie is nog volledig in ontwikkeling dus om gegronde conclusies te trekken over dit systeem is verder onderzoek nodig.

De directe toepassing van het Air Lubrication System, weerstandsbeperking, is niet het enige aspect waardoor deze technologie potentieel toont. Zo kan het systeem bijvoorbeeld werken als extra veiligheidsmaatregel bij ijsbrekers. Doordat de luchtbubbels een barrière vormen tussen de romp van het schip en het omliggende ijs. Bovendien kan het ALS mogelijk een impact hebben op zowel het klimaat als het milieu. Dit niet alleen aan de hand van CO₂ vermindering als gevolg van de weerstandsvermindering, maar uit meerdere verslagen blijkt de aangroei op de romp van schepen met het ALS te verminderen. Dit heeft zowel invloed op de emissie van het schip als op de translocatie van zeeorganismen. Eens vele schepen varen met een goede antifouling kan dit positieve effecten hebben op de ecosystemen van deze organismen. De luchtlaag die zich vormt rond het schip zal ook de geluidsemisatie, die afkomstig is van schepen, beperken. Op deze manier zullen bepaalde zeeorganismen in hogere waterlagen minder last ondervinden.

Het Air Lubrication System is een technologie met potentieel op verschillende vlakken. De weerstandsbeperkingen kunnen groot zijn maar het is belangrijk dat deze resulteren in een netto energieoptimalisatie. Als het netto energie verbruik voordelig is tegenover de kapitaalkost van de installatie van deze technologie is dit systeem zeker de moeite. Hoewel de besparing klein is, kan elke kost- en uitstootreductie voordelig zijn (op respectievelijk commercieel als maatschappelijk vlak).

Bibliografie

- ABS. (2019, 1 april). *Air Lubrication Technology*. Geraadpleegd van <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/Air%20Lubrication%20Technology.pdf>
- AIRCOAT. (z.d.). Antifouling experiments. Geraadpleegd van <https://aircoat.eu/antifouling/>
- Aker Arctic. (2020, 6 maart). Reducing ice friction since 1969. *Arctic Passion News*, 18–19.
- ANW. (2020, 29 oktober). Diatomeeën. *BETEKENIS & DEFINITIE*. Geraadpleegd van <https://www.ensie.nl/anw/diatomeeen>
- Balagopalan, A., Tiwari, K. N., & Krishnankutty, P. (2017). *HORIZONTAL PLANAR MOTION MECHANISM (HPMM) INCORPORATED TO THE EXISTING TOWING CARRIAGE FOR SHIP MANOEUVRING STUDIES*. ICSOT2017-42 (p. 6). Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/publication/322147054_HORIZONTAL_PLANAR_MOTION_MECHANISM_HPMM_INCORPORATED_TO_THE_EXISTING_TOWING_CARRIAGE_FOR_SHIP_MANOEUVRING_STUDIES
- Barthlott, W., Schimmel, T., Wiersch, S., Koch, K., Brede, M., Barczewski, M., Walheim, S., e.a. (2010). The Salvinia Paradox: Superhydrophobic Surfaces with Hydrophilic Pins for Air Retention Under Water. *Advanced Materials*, 22(21), 2325–2328. doi:10.1002/adma.200904411

- Bertram, V. (2012). Resistance and Propulsion. *Practical Ship Hydrodynamics* (pp. 73–141). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-097150-6.10003-X
- Bhoj, Y., Tharmavaram, M., & Rawtani, D. (2021). A comprehensive approach to antifouling strategies in desalination, marine environment, and wastewater treatment. *Chemical Physics Impact*, 2, 100008. doi:10.1016/j.chphi.2020.100008
- Boskalis. (2012). *Environmental mitigation measures: Air bubble screen*.
- Bouman, E. A., Lindstad, E., Riialand, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408–421. doi:10.1016/j.trd.2017.03.022
- Burgess, M., Dell, S., & Sullivan, M. (2011). A new horizontal planar motion mechanism (PMM) for the NRC-IOT towing tank and ice tank. 2nd International conference on advanced model measurement technology for EU maritime industry, 4-6 April, 2011, Newcastle upon Tyne, UK.
- Canadianpond. (2019, 7 maart). Air Bubble Curtains with Bubble Tubing®. Geraadpleegd van <https://canadianpond.ca/air-bubble-curtains-bubble-tubing/>
- Cao, S., Wang, J., Chen, H., & Chen, D. (2011). Progress of marine biofouling and antifouling technologies. *Chinese Science Bulletin*, 56(7), 598–612. doi:10.1007/s11434-010-4158-4

Ceccio, S. L., Perlin, M., & Elbing, B. R. (2010, 20 mei). *A cost-benefit analysis for air layer drag reduction.*

Chakraborty, S. (2020, 27 november). Ship Stability – What Makes a Ship Unstable? *Marine Insight*. Geraadpleegd van <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/intact-stability-of-surface-ships/#:~:text=An%20unstable%20equilibrium%20is%20caused,B%20now%20shifts%20to%20B1.&text=GM%20%3C%200%20means%20the%20ship%20is%20unstable.>

Chanson, H. (2004). Fundamentals of open channel flows. *Environmental Hydraulics of Open Channel Flows* (pp. 11–34). Elsevier. doi:10.1016/B978-075066165-2.50034-5

Dourmashkin, P. (2020, 30 december). *28.1: Ideal Fluids*. Geraadpleegd van [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Book%3A_Classical_Mechanics_\(Dourmashkin\)/28%3A_Fluid_Dynamics/28.01%3A_Ideal_Fluids](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Book%3A_Classical_Mechanics_(Dourmashkin)/28%3A_Fluid_Dynamics/28.01%3A_Ideal_Fluids)

Ensie. (2016, 23 juni). Viscositeit. *BETEKENIS & DEFINITIE VISCOSITEIT*. Geraadpleegd van <https://www.ensie.nl/redactie-ensie/viscositeit>

EUR-lex. (2016). *Klimaatverandering—Overeenkomst van Parijs, geratificeerd door de EU.*

Europese Commissie. (2020). *Voorstel voor een VERORDENING VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD tot vaststelling van een kader voor de totstandbrenging van klimaatneutraliteit en tot wijziging van*

Verordening (EU) 2018/1999 (Europese klimaatwet) COM/2020/80 final.

Fondriest Environmental, Inc. (2013, 19 november). Dissolved Oxygen. *Fundamentals of Environmental Measurements*. Geraadpleegd van <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/>

Gallardo Martínez, A. (2016 december). *INVESTIGATION OF THE AIR-LUBRICATION EFFECT ON FRICTION RESISTANCE*. (Thesis, Polytechnic University of Cartagena). Geraadpleegd van <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/8261/pfc-gal-inv.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

Giernalczyk, M., & Kaminski, P. (2021). Assessment of the Propulsion System Operation of the Ships Equipped with the Air Lubrication System. *Sensors*, 21(4), 1357. doi:10.3390/s21041357

Gregersen, E. (1998, 20 juli). Froude number. Geraadpleegd van <https://www.britannica.com/science/turbulent-flow>

Hakim, M. L., Nugroho, B., Nurrohman, M. N., Suastika, I. K., & Utama, I. K. A. P. (2019). Investigation of fuel consumption on an operating ship due to biofouling growth and quality of anti-fouling coating. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 339, 012037. doi:10.1088/1755-1315/339/1/012037

Hayes, S., Desha, C., & Baumeister, D. (2020). Learning from nature – Biomimicry innovation to support infrastructure sustainability and resilience. *Technological Forecasting and Social Change*, 161, 120287. doi:10.1016/j.techfore.2020.120287

- HORIZON 2020. (2020, 29 april). Periodic Reporting for period 1—AIRCOAT (Air Induced friction Reducing ship COATing). Geraadpleegd van <https://cordis.europa.eu/project/id/764553/reporting>
- Howden Group. (2019). *Howden Air Lubrication compressor*.
- ITTC. (2002). *Resistance Uncertainty Analysis, Example for Resistance Test*. Geraadpleegd van <https://ittc.info/media/2021/75-02-02-02.pdf>
- ITTC. (2014). *Free Running Model Tests*.
- ITTC. (2017). *Full Scale Manoeuvring Trials*.
- Kawabuchi, M., Kawakita, C., Mizokami, S., Kodan, Y., Higasa, S., & Shinichi, T. (2011). *CFD Predictions of Bubbly Flow around an Energy-saving Ship with Mitsubishi Air Lubrication System*. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 48 No. 1.
- Klaassen, R. (2020, 16 november). Wat is een orkaan? Geraadpleegd van <https://www.weerplaza.nl/weerinhethetnieuws/weerweetjes/wat-is-een-orkaan/4174/>
- Lewis, J. A. (1998). *Marine Biofouling and its Prevention on Underwater Surfaces*. Melbourne, Aeronautical and Maritime Research Laboratory. Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/profile/John-Lewis-53/publication/27255773_Marine_biofouling_and_its_prevention_on_underwater_surfaces/links/54575e700cf2bccc490f8125/Marine-biofouling-and-its-prevention-on-underwater-surfaces.pdf
- Lewis, J. A., & Coutts, A. D. M. (2009). Biofouling Invasion. *Biofouling* (Vol. Chapter 24).
- Mäkiharju, S. A., Perlin, M., & Ceccio, S. L. (2012). On the energy economics of Air Lubrication drag reduction. *International Journal of Naval*

Architecture and Ocean Engineering, 4(4), 412–422.
doi:10.2478/IJNAOE-2013-0107

Mäkiharju, S., Elbing, B. R., Wiggins, A., Dowling, D. R., Perlin, M., & Ceccio, S. L. (2010 september). *Perturbed Partial Cavity Drag Reduction at High Reynolds Numbers*. (Pasadena, California). Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/publication/235258531_Perturbed_Partial_Cavity_Drag_Reduction_at_High_Reynolds_Numbers

MARIN, & dr. Prins, ir. H. (2006). *Sustainable Methods for Optimal design and Operation of ships with air lubricated Hulls (SMOOTH)*.

Memorial University. (z.d.). *ENGR 4011 Resistance and Propulsion of Ships: Prediction of resistance using model tests*. (Memorial University). Geraadpleegd van <https://www.engr.mun.ca/~bveitch/courses/r-p/Assignments/ITTC-calculation-procedures-Lab1.pdf>

Mizokami, S., Kawakita, C., Kodan, Y., Takano, S., Higasa, S., & Shigenaga, R. (2010). *Experimental Study of Air Lubrication Method and Verification of Effects on Actual Hull by Means of Sea Trial*. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 47 No. 3.

Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). *Ship resistance and propulsion: Practical estimation of ship propulsive power*. New York: Cambridge University Press.

Niklas, K., & Pruszko, H. (2019). Full-scale CFD simulations for the determination of ship resistance as a rational, alternative method to towing tank experiments. *Ocean Engineering*, 190, 106435. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106435

- NYK Line. (2010). Second Module Carrier Equipped with an Innovative Air-Lubrication System Delivered. Geraadpleegd van https://www.nyk.com/english/news/2010/NE_101202.html
- Politis, K. (2016 oktober). *Introduction: Air Lubrication Methods for Drag Reduction in Hydrodynamic Flows*. (Ecole Centrale Nantes). Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/publication/310460385_PhD_Introduction_Air_Lubrication_Methods_for_Drag_Reduction_in_Hydrodynamic_Flows
- Rapp, B. E. (2017). Fluids. *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics* (pp. 243–263). Elsevier. doi:10.1016/B978-1-4557-3141-1.50009-5
- Raunek, K. (2020, 29 mei). How Air Lubrication System for Ships Works? Geraadpleegd van <https://www.marineinsight.com/green-shipping/how-air-lubrication-system-for-ships-work/#:~:text=Air%20Lubrication%20System%20is%20a,%2C%20creating%20energy%2Dsaving%20effects>.
- Rogers, K. (1998, 20 juli). Reynolds number. Geraadpleegd van <https://www.britannica.com/science/Reynolds-number>
- Savvides, N. (2018). A SECOND WIND FOR AIR LUBRICATION SYSTEMS. Geraadpleegd van <https://www.motorship.com/news101/ships-equipment/a-second-wind-for-air-lubrication-systems>
- Shiri, A., & Wikander, M. (2018, 23 april). Hull Air Lubrication: Future and challenges. Geraadpleegd van

https://www.sspa.se/sites/www.sspa.se/files/field_page_files/2018_sspa_highlights_65.pdf

Silberschmidt, N., Tasker, D., Pappas, T., & Johannesson, J. (2016). *Silverstream® System – Air Lubrication Performance Verification and Design Development*.

Silverstream®. (z.d.). About the Silverstream® System? Geraadpleegd van <https://www.silverstream-tech.com/the-technology/>

SINTEF. (2018). *Preventing hurricanes using air bubbles*. Geraadpleegd van www.sciencedaily.com/releases/2018/03/180319091035.htm

Thill, C., Toxopeus, S., & van Walree, F. (2005). *Project Energy-saving air-Lubricated Ships (PELS)*. Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/profile/Cornel_Thill/publication/267950865_Project_Energy-saving_air-Lubricated_Ships_PELS/links/57a2fba08aeef35741f5f56.pdf

TRIMIS. (2018 mei). AIRCOAT. Geraadpleegd van <https://trimis.ec.europa.eu/project/air-induced-friction-reducing-ship-coating#tab-outline>

USNA. (2020). *EN400: Principles of Ship Performance*. (United States Naval Academy). Geraadpleegd van https://www.usna.edu/NAOE/_files/documents/Courses/EN400/00.0_EN400_Course_Notes_Spring_2020

Vantorre, M., & Eloit, K. (2010 mei). *Ship behaviour in shallow and restricted navigation areas*. (Ghent University).

Vasconcelos, R. O., Amorim, M. C. P., & Ladich, F. (2007). Effects of ship noise on the detectability of communication signals in the Lusitanian

toadfish. *Journal of Experimental Biology*, 210(12), 2104–2112.
doi:10.1242/jeb.004317

Ven, A. (2021, 15 maart). De klimaatupdate – klimaatverandering, milieu-
en biodiversiteitproblemen. Geraadpleegd van
[https://www.scientists4climate.be/de-klimaatupdate-
klimaatverandering-milieu-en-biodiversiteit-
problemen/?lang=nl&fbclid=IwAR1PedoG0Lu3OHpucI88V3JIPO2xdF
hA32dH8u9NeA7JQmzAPJJFOF-seGY](https://www.scientists4climate.be/de-klimaatupdate-klimaatverandering-milieu-en-biodiversiteit-problemen/?lang=nl&fbclid=IwAR1PedoG0Lu3OHpucI88V3JIPO2xdFhA32dH8u9NeA7JQmzAPJJFOF-seGY)

Bijlage: interview met dr. Laurine Burdorf en dr. Arne Ven

1 De Europese Commissie wil tegen 2050 de uitstoot van broeikassen verminderen met 50% tegenover het niveau van 2008. In de maritieme sector verloopt de aanpak met betrekking tot de klimaatkwestie niet al te snel, wat is uw mening over deze aanpak?

Dr. Laurine Burdorf:

Het onderwerp van je thesis kende ik nog niet. Maar ik vind het wel zeer interessant. Vooraf wil ik al zeggen dat ik geen expert ben in de maritieme sector. Zelf weet ik wel veel over de maritieme systemen in de biologie en de ecologie. Wat ik hiermee wil zeggen is dat mijn mening misschien niet de meest belezen mening is voor deze vraag.

Ik denk dat het een probleem is dat de maritieme sector vaak buiten de internationale verdragen is gebleven, zoals het klimaatakkoord van Parijs en ook het ETS emissiehandelssysteem. De maritieme sector wordt hier altijd buiten gelaten, dus zo denk ik dat hier weinig incentive is. Behalve een paar Europese bedrijven, zoals bijvoorbeeld Jan de Nul en DEME, die zich meer inzetten op reductie van koolstofuitstoot. Maar de echt economische incentives zijn er te weinig of niet. Het is wel de bedoeling dat de maritieme sector in het ETS betrokken zal worden. Dit wil zeggen dat er een uitstoot limiet is en als je hierover gaat moet je betalen. Dit zou naar mijn mening zeker moeten. Ik denk dus dat deze economische incentive zeker nodig zal zijn.

2 Denkt u dat de groene aanpak aan de hand van weerstandsvermindering een mogelijke oplossing kan zijn voor de klimaatkwestie of eerder een stap in de goede richting?

2.1 Zijn er andere methodes in het maritieme milieu die u kent waar u hoge verwachting van heeft?

2.2 Het Air Lubrication System heeft wel al bewezen te werken en is makkelijk en snel te installeren (10 dagen). Denkt u dat dit een tijdelijke oplossing is of eerder een tussenstap naar andere methoden zoals waterstofaandrijving?

Dr. Laurine Burdorf:

Ik werk zelf aan een negatieve emissie technologie. Dit is een systeem dat actief CO₂ uit de lucht haalt. Sinds ik daarmee bezig ben is het belangrijk om te zien dat er geen enkele maatregel is die alles oplost. Er is telkens een combinatie nodig om tot een oplossing te komen. Het Air Lubrication System heeft niet lang nodig om geïnstalleerd te worden, dus op dat vlak is het zeker goed om de CO₂ te verminderen. Is dat genoeg op zichzelf, neen. Uiteindelijk ga je het moeten combineren als je klimaatneutraal wilt worden. Er zullen verschillende oplossingen en investeringen nodig zijn. Enerzijds kleine investeringen die snel effect hebben en anderzijds grote investeringen die effect hebben op lange termijn. Uiteindelijk is het een combinatie van alles dat er toe moet leiden (klimaatneutraliteit van de sector).

Zou een overstap naar waterstofaandrijving wel een zeer grote stap kunnen zijn?

Dr. Laurine Burdorf:

Ja, ik denk dat zeker de brandstoffen zeer veel doen. Enerzijds heb je de CO₂ die je altijd hebt bij fossiele brandstof (dus in niet-hernieuwbare brandstof). Waterstof en ammoniak vallen allemaal onder synthetische brandstof, hier komt minder CO₂ uitstoot van. Je hebt ook biofuels, maar die hebben dan weer het nadeel dat je zeer veel land nodig hebt om dit te produceren. Wat een ander voordeel is van geen diesel te gebruiken is dat je geen stikstofdioxide en geen fijnstof verkrijgt. Ook die zijn belangrijk in het klimaatdebat.

Dr. Arne Ven:

Het blijft een goed systeem ook al werken ze op waterstof, want dan nog is het handig om een zo efficiënt mogelijk systeem te hebben dat zelfs zo weinig mogelijk waterstof verbruikt.

3 Air Lubrication technologie zou voor een CO₂ vermindering van 7,5% kunnen zorgen. Voor de totale maritieme uitstoot in de Europese wateren zou dit neerkomen op een jaarlijkse reductie van 12,6 megaton CO₂. Kan een vermindering van deze mate (zichtbare) gevolgen hebben op het klimaat en het zeemilieu?

Dr. Laurine Burdorf:

Dit is een wat moeilijkere vraag. We leven in een grote wereld en de maritieme industrie is hier maar een deeltje van. In proportie is 12,6 megaton CO₂ tegenover de jaarlijkse Europese CO₂ uitstoot van ongeveer 3000 tot 4000 megaton klein. Maar 7,5% is voor de maritieme industrie is redelijk veel, zeker tegenover wat ze tot nu toe hebben laten zien. Het is dus zeker een stap in de goede richting, maar ik denk niet dat je dit direct zal voelen. Het zit in een geheel plaatje van allerlei industrieën en alleen dan zal het werken.

4 AIRCOAT belooft een vermindering van 25%. Dit wil zeggen dat in de Europese wateren een daling van 42 megaton CO₂ mogelijk is. Kan dit grote gevolgen hebben voor het klimaat?

Dr. Laurine Burdorf:

Ook dit zal hetzelfde antwoord hebben. Het klimaat is een collectief systeem waarin dat alles moet meewerken. Dit kan je dus niet apart bezien, maar het zal absoluut meedragen aan het reduceren binnen de maritieme sector.

Dit kan dus zeker meehelpen om tot de doelen van de maritieme sector te realiseren.

5 Voor het visserij wordt soms gebruik gemaakt van fontein omdat dit voor een zuurstofrijkere omgeving zorgt. Waarom is dit juist beter voor de vissen?

Dr. Laurine Burdorf:

Dit is eerder omdat deze fontein zullen voorkomen in een vijver. In zo een vijver zit geen circulatie. Wat je krijgt zonder circulatie is dat je je algen hebt in bovenste laag, deze doen aan fotosynthese, en deze gaan afsterven en naar de bodem zinken. Die worden daar verteerd door andere dieren die geen zuurstof produceren maar wel consumeren. Zonder goede water mixing krijg je stratificatie. De bovenste laag is dus zuurstofrijk en de onderste zuurstofarm. Zo krijg je zuurstofloosheid in de bodem. Deze fontein zorgt ervoor dat het water in beweging komt waardoor de onderste laag in contact komt met lucht en weer zuurstof kan krijgen. Dit is beter voor vissen zodat ze niet onder hun zuurstofniveau zitten, onder de 63 micromolair krijgen ze hypoxie waardoor ze (vissen) zullen afsterven.

5.1 Zou op deze manier het Air Lubrication System ook een betere omgeving voor de marine organismen kunnen maken?

Dr. Laurine Burdorf:

De zeeën, zijn meestal zeer zuurstofrijk. De meeste delen van de oceaan zit boven de 90% oplosbaarheid. Je hebt sommige uitzonderingen, El Niño en La Niña (grote zeestromingen), daar kan je grote sterfte hebben. Maar dat zijn eerder atypische voorgevallen. Ook zal deze zuurstofarmoede vaker in de lagere waterlagen voorkomen. De bovenste waterlaag zal al genoeg zuurstof hebben, dus hieraan zuurstof toevoegen zal echter geen effect hebben denk ik.

5.2 Misschien eerder in gesloten meer omgevingen zoals een haven?

Dr. Laurine Burdorf:

Er zijn sommige havens die zuurstofarmer zijn, maar dit denk ik niet.

6 Wat is een ecosysteem juist?

Dr. Laurine Burdorf:

Een gemeenschap van organismen in hun fysische omgeving. Organismen van verschillende soorten hebt maar ook een fysische omgeving zit daarbij.

Dr. Arne Ven

Samenwerking van meerdere organismen in hun omgeving.

6.1 Zouden er schadelijke gevolgen kunnen zijn voor ecosystemen ten gevolge van antropogene translocatie?

Dr. Laurine Burdorf:

Het verplaatsen van organismen van één systeem en naar een ander gaan? Op het gebied van biofouling weet ik hier niet veel van maar ik weet wel dat dit vaak gebeurt aan de hand van ballast tanks. Translocatie via ballastwater heeft er bijvoorbeeld voor gezorgd dat er tussen de Rode Zee en de Middellandse Zee een aantal organismen uitgewisseld zijn die zeker voor een impact zorgden op de ecosystemen. Iets uitwisselen tussen ecosystemen die ervoor geen connectiviteit hadden, je hebt 2 systemen en je hebt bij elk systeem een wedloop tussen organismen. Als je daar iets bij steekt uit een andere wedloop, die andere eigenschappen hebben

ontwikkeld, waarop het systeem waar je het binnenbrengt geen verdediging voor is geëvolueerd. Zo kunnen ze vaak vrij snel een ecosysteem overheersen omdat dit niet in deze wedloop was. Hoe meer je deze connectiviteit hebt, tussen gebieden die ervoor nog niet verbonden waren, heb je meer kans op dat overheersen van het ecosysteem. In de marine wateren is men er bang voor dat er eventueel een Noordpoolroute komt (nu dat die ijsvrij wordt) en dat hier dan van alles en nog wat mee wordt gebracht waardoor dit systeem aangetast kan worden.

7 Kan geluidsemissie dat afkomstig is van schepen gevolgen hebben op marine organismen?

Dr. Laurine Burdorf:

Er zijn een aantal studies die hier rond zijn uitgekomen, aangezien door de COVID periode minder geluid is geweest in bepaalde wateren. In België wordt er veel onderzoek gebruikt door het 'heien' van windmolen parken (rechtzetten van palen in de grond), hier heeft bijvoorbeeld kabeljauw last van. Het heeft zeker effect op alle organismen die communiceren met geluid, enerzijds op de communicatie (denk aan dolfijnen), en anderzijds heb je ook dieren die geluid maken voor de paartijd. Het wordt meer en meer ingezien dat geluid zeker effect heeft op organismen. Maar ik denk vooral op de hogere organismen. Daar is toch het onderzoek naar gedaan dat ik weet.

Bijlage: CO₂ uitstoot Europese Wateren 2018

Regio	Regio specifiek	CO ₂ [kg]
Totaal	/	168 017 543 000,0
Atlantische Ocean	Noord-Atlantische Oceaan	39 807 171 275,1
Noordzee	Noordzee	23 351 402 193,3
Middellandse Zee	Middellandse Zee Oost	20 276 717 994,7
Middellandse Zee	Middellandse Zee West	14 132 210 103,6
Baltische Zee	Baltische Zee	8 540 073 760,2
Engels Kanaal	Engels Kanaal	7 063 927 711,9
Middellandse Zee	Egeïsche Zee	6 317 934 415,8
Middellandse Zee	Tyreense Zee	5 128 120 560,7
Zwarte Zee	Zwarte Zee	4 181 795 658,2
Ierse en Britse Zeeën	Keltische Zee	3 917 855 750,6
Middellandse Zee	Adriatische Zee	3 809 763 501,6
Middellandse Zee	Alboránzee	3 546 294 687,6
Noorse Zee	Noorse Zee	3 376 607 403,8
Middellandse Zee	Balearische Zee	2 892 161 944,8
Middellandse Zee	Ionische Zee	2 848 228 378,8
Baltische Zee	Kattegat	2 765 079 874,3
Middellandse Zee	Zee van Marmara	2 523 566 127,1
Baltische Zee	Finse Golf	2 232 141 158,2
Noordzee	Skagerrak	1 948 198 515,7
Middellandse Zee	Straat van Gibraltar	1 631 652 068,5
Golf van Biskaje	Golf van Biskaje	1 315 009 542,6
Ierse en Britse Zeeën	Ierse Zee en het Sint-Georgekanaal	1 243 526 628,3
Middellandse Zee	Ligurische Zee	1 172 370 889,1
Baltische Zee	Botanische Golf	1 139 119 503,0
Arctische Oceaan	Barentszzee	1 013 756 964,3
Ierse en Britse Zeeën	Westkust van Schotland	696 952 992,7
Zee van Azov	Zee van Azov	529 310 080,4
Groenlandzee	Groenlandzee	220 587 909,0
Baltische Zee	Golf van Riga	180 106 194,6
Ierse en Britse Zeeën	Kanaal van Bristol	135 356 715,3
Arctische Oceaan	Witte Zee	88 682 636,4
Arctische Oceaan	Arctische Oceaan	53 517,4

Scheepstype	CO2 [kg]
Container schepen	49 397 473 000
Tankers	37 726 626 000
Cargo schepen	33 639 782 400
RoPax schepen	15 240 225 800
RoRo schepen	11 986 736 100
Diversen	5 879 946 800
Cruiseschepen	4 761 127 400
Visserij	3 586 771 970
Dienstschepen	2 855 172 100
Ongekend	1 619 466 500
Passagiersschepen	1 332 612 100